

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ

Маєтний Михайло Ігорович ¹

Опубліковано	Секція	УДК
30.06.2025	Економіка	621.9

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17166713>

Анотація. Проведено аналіз сучасних методів багатокритеріальної оптимізації режимів різання, що орієнтовані на підвищення ефективності механічної обробки загартованих сталей, як матеріалів, що активно використовуються у високонавантажених конструкціях, але характеризуються низькою оброблюваністю через високу твердість, знижену теплопровідність і схильність до абразивного зношування інструмента. Обґрунтовано необхідність урахування комплексу чинників, зокрема мікроструктурного стану сталі після термічної обробки, фізико-механічних характеристик, режимних параметрів обробки, типу інструментального оснащення та динаміки теплових процесів у зоні різання. Розглянуто типові технологічні обмеження технологічного процесу різки, як то інтенсивний знос ріжучої кромки, поява вібрацій і локальний перегрів, які знижують точність, чистоту поверхні та ресурс інструмента. На основі аналізу відповідних механізмів формалізовано залежності між швидкістю різання, твердістю матеріалу та швидкістю деградації інструмента з використанням емпіричних моделей та функціональних залежностей шорсткості поверхні від подачі й зносу. Введено підхід, що дозволяє пов'язати зміни технологічних параметрів зі зміною показників якості обробки. Запропонована методика ґрунтується на трьох ключових напрямках оптимізації: мінімізації зносу інструмента, підвищенні точності й чистоти поверхні та скороченні тривалості технологічного процесу. Кожен із напрямів деталізується через практичні рішення: вибір інструментального покриття, контроль тертя та вібрацій, використання мастильних систем, оптимізацію геометрії інструмента й подачі. Методика поєднує стандартизовані підходи, емпіричні дані виробництва та технічні рекомендації провідних виробників ріжучого інструменту. Розроблений підхід забезпечує адаптивність до умов конкретного виробництва, може бути використаний для інженерного налаштування режимів різання та слугує універсальною основою для автоматизованих систем підтримки технологічних рішень у машинобудуванні.

Ключові слова: загартовані сталі, режими різання, знос інструмента, шорсткість поверхні, багатокритеріальна оптимізація, технологічна стабільність.

¹ Науковий співробітник
Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України
<https://orcid.org/0000-0002-9459-6102>

METHODOLOGICAL APPROACHES TO OPTIMIZATION OF CUTTING MODES IN PROCESSING HARDENED STEELS

Annotation. The analysis of modern methods of multi-criteria optimization of cutting modes, which are focused on increasing the efficiency of mechanical processing of hardened steels, as materials that are actively used in highly loaded structures, but are characterized by low machinability due to high hardness, reduced thermal conductivity and susceptibility to abrasive wear of the tool, is carried out. The need to take into account a complex of factors is substantiated, in particular, the microstructural state of the steel after heat treatment, physical and mechanical characteristics, processing parameters, type of tooling and dynamics of thermal processes in the cutting zone. Typical technological limitations of the cutting process are considered, such as intensive wear of the cutting edge, the appearance of vibrations and local overheating, which reduce accuracy, surface cleanliness and tool life. Based on the analysis of the relevant mechanisms, the dependences between the cutting speed, material hardness and tool degradation rate are formalized using empirical models and functional dependencies of surface roughness on feed and wear. An approach is introduced that allows linking changes in technological parameters with changes in processing quality indicators. The proposed methodology is based on three key areas of optimization: minimizing tool wear, increasing surface accuracy and cleanliness, and reducing the duration of the technological process. Each of the areas is detailed through practical solutions: the choice of tool coating, friction and vibration control, the use of lubrication systems, and optimization of tool geometry and feed. The methodology combines standardized approaches, empirical production data, and technical recommendations of leading manufacturers of cutting tools. The developed approach provides adaptability to specific production conditions, can be used for engineering tuning of cutting modes, and serves as a universal basis for automated systems to support technological solutions in mechanical engineering.

Keywords: hardened steels, cutting modes, tool wear, surface roughness, multi-criteria optimization, technological stability.

Вступ

У сучасному машинобудуванні та інструментальній промисловості спостерігається стійка тенденція до зростання вимог до міцності, зносостійкості та довговічності конструкційних елементів, що, у свою чергу, зумовлює широке використання загартованих сталей як основного на сьогоднішній день конструкційного матеріалу [1, 2]. При цьому зазначається, що загартовані сталі характеризуються підвищеною твердістю, високою стабільністю і сприятливими експлуатаційними властивостями, проте їх обробка є надзвичайно складним технічним завданням [2, 3]. Традиційні методи обробки часто супроводжуються значним зношуванням ріжучого інструмента, низькою якістю обробленої поверхні та недостатньою стабільністю процесу, що прямо впливає на продуктивність і економічну ефективність виробництва (рис. 1). На тлі стрімкого розвитку точного верстатобудування, високошвидкісної обробки (High-Speed Machining, HSM) та впровадження систем числового програмного керування (Computer Numerical Control, CNC) значно зростає потреба в адаптації та оптимізації режимів різання з урахуванням як характеристик оброблюваного матеріалу, так і наявного інструментального забезпечення [4, 5]. У цьому контексті особливої **актуальності** набуває дослідження методологічних підходів до встановлення параметрів різання, що дозволяють досягти оптимального співвідношення між показниками технологічної ефективності, якості обробки та зносостійкості інструменту.

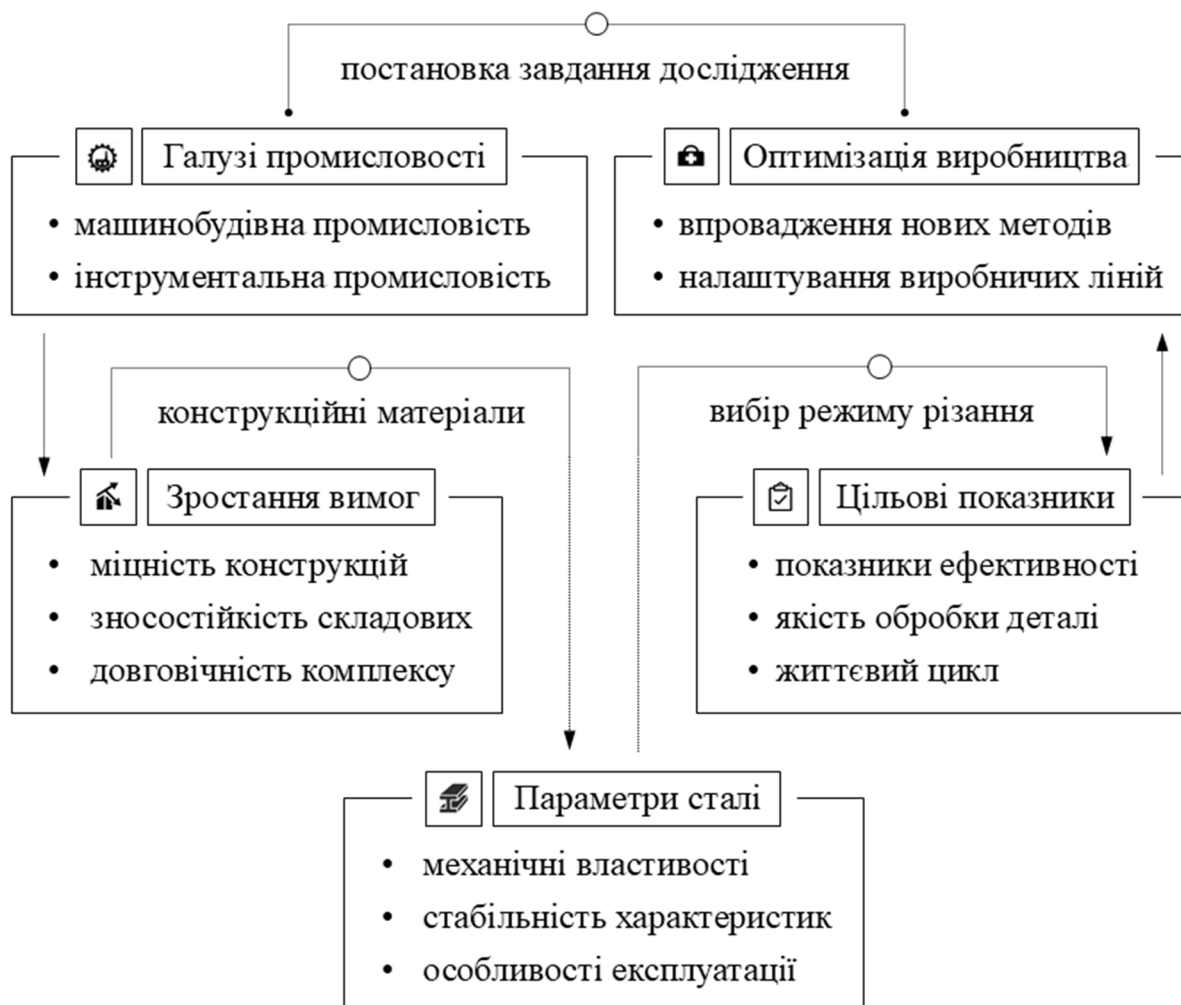


Рис. 1. Структурна схема формування завдання оптимізації режимів різання

Проведені в рамках індустріальних проєктів дослідження демонструють, що впровадження оптимізованих параметрів обробки, адаптованих до конкретних умов виробництва, забезпечує суттєве зниження зносу інструменту, скорочення тривалості операцій та підвищення стабільності обробки [4, 6-8]. Значну роль у стандартизації підходів до визначення режимів різання відіграють міжнародні нормативи. Зокрема, стандарт ISO 3685 встановлює процедури випробувань ріжучого інструменту за критерієм зношування [9], а стандарт ISO 513 забезпечує класифікацію матеріалів за оброблюваністю та типами ріжучих пластин. Врахування стандартів дає змогу провести співвіднесення результатів досліджень і сумісність інженерних рішень у межах глобальних виробничих ланцюгів. Водночас, рекомендації від провідних виробників ріжучого інструментального оснащення становлять важливу інформаційну базу для розробки практичних рекомендацій щодо режимів різання. Зазначені матеріали, що ґрунтуються на результатах стендових випробувань і аналізу даних, що отримані у процесі виробництва, дозволяють врахувати не лише фізико-механічні властивості сталей, а й геометрію інструменту, тип покриття, стратегії охолодження та параметри подачі [10-12]. Таким чином, сучасні підходи до оптимізації режимів різання повинні базуватися на поєднанні трьох взаємопов'язаних складових, як то емпіричні дані, отриманих у межах реального виробничого процесу, вимог міжнародних стандартів та технічних специфікацій виробників інструментального обладнання (рис. 2). Відсутність цілісної інтегративної методології, що об'єднує стандартизовані підходи, емпіричні виробничі дані та рекомендації інструментальних компаній, розглядається як одна з невирішена частина загального завдання оптимізації режимів різання.

Таким чином, **метою роботи** стала побудова цілісної методології є розробка інтегрованої методології оптимізації режимів різання при обробці загартованих сталей з урахуванням властивостей матеріалу, параметрів інструментального оснащення та вимог до якості й ефективності процесу.



Рис. 2. Формування інтегративної методології оптимізації режимів різання

У межах роботи передбачається проаналізувати фізико-механічні характеристики загартованих сталей, визначити вплив основних технологічних параметрів на результат обробки, дослідити можливості використання сучасних інструментальних матеріалів і покриттів, сформувані критерії та методи оптимізації процесу, а також визначити особливості впровадження систем машинного аналізу і адаптованих підходів до налаштування режимів різання.

Результати

Як було зазначено вище, загартовані сталі посідають важливе місце серед конструкційних матеріалів, що застосовуються у відповідальних вузлах машинобудівної та інструментальної продукції, де критичними є вимоги до зносостійкості, міцності й термічної стабільності. Завдяки комплексному поєднанню високої твердості, стабільності мікроструктури та експлуатаційної довговічності після термічної обробки, ці матеріали широко використовуються в умовах інтенсивного навантаження та зношування. Водночас зазначені властивості суттєво ускладнюють процеси механічної обробки, зумовлюючи необхідність ефективного підбору інструментальних матеріалів, режимів різання та охолоджувально-мастильних стратегій.

У результаті термічної обробки сталі зазнають суттєвих змін як у мікроструктурі, так і в комплексі фізико-механічних властивостей. Основними параметрами, що зазнають трансформації, є твердість H , границя міцності на розтяг σ_B , границя

плинності σ_Y , модуль пружності E , ударна в'язкість K_{CU} , теплопровідність λ , коефіцієнт теплового розширення α , питомий електричний опір ρ , а також структура. Ці властивості прямо впливають на оброблюваність сталі, зокрема на формування сил різання, теплові процеси у зоні контакту інструменту з матеріалом, а також на характер зношування ріжучої кромки. Для загартованих сталей часто використовується співвідношення для оцінки границі міцності через твердість $\sigma_B \approx k \cdot H$, де $k = 33 - 35$ МПа/HRC для загартованих сталей є коефіцієнтом, що розраховується емпірично. Це дозволяє розрахувати типові діапазони параметрів для загартованих сталей (табл. 1).

Таблиця 1.

Типовий діапазон параметрів для загартованих сталей [6, 10-12]

H , HRC	σ_B , ГПа	E , ГПа	λ , Вт/(м·К)	α , 10^{-6} К $^{-1}$
58-65	1,9-2,2	190-210	15-25	10-12

Твердість і мікроструктура загартованих сталей є ключовими чинниками, що визначають особливість їх механічної обробки. Зі збільшенням твердості за шкалою HRC погіршується здатність матеріалу до пластичного деформування, що призводить до інтенсифікації зносу інструмента, зростання температур у зоні різання, а також збільшення сили різання. Основними мікроструктурними фазами, що формуються після гартування та відпуску, є наступні [10-12]:

мартенситна структура забезпечує високу твердість (до HRC 65), але супроводжується підвищеною крихкістю, що зумовлює появу мікротріщин і нестабільне руйнування стружки;

бейніт характеризується нижчою твердістю та більш сприятливими умовами для формування стружки.

залишковий аустеніт здатен стабілізуватися при високих температурах, що може призводити до локальних змін твердості в процесі різання.

Зростання твердості оброблюваного матеріалу зазвичай корелює з експоненціальним збільшенням сили різання F_c , що може на математичному рівні бути описано як $F_c = k_A \cdot e^{k_B \cdot H}$, де k_A і k_B — емпіричні коефіцієнти, що визначаються експериментально. Також аналіз відповідних процесів надає можливість формалізувати залежність швидкості зношування інструмента V_w від рівня твердості та типу структури сталі як $V_w = H^n / k_s$, де k_s — коефіцієнт оброблюваності, що залежить від структури сталі, а n — показник ступеня що визначається експериментально на рівні $n \in \{1; 2\}$. Таким чином, оптимальний вибір режиму різання повинен базуватися не лише на числовому значенні показника твердості, а й на якісному аналізі мікроструктурного стану матеріалу у відповідності до поставленого завдання. Комплексний підхід до оцінки оброблюваності сталі дозволяє зменшити ризики передчасного зносу інструменту, забезпечити стабільність формування стружки та покращити якість обробленої поверхні.

Водночас, слід зауважити, що механічна обробка загартованих сталей супроводжується низкою ускладнень, зумовлених їх високою твердістю, підвищеним коефіцієнтом тертя та зниженою теплопровідністю, формалізація яких є нетривіальною задачею. Найбільш критичними серед них є інтенсивний знос ріжучого інструмента, виникнення вібрацій та локальний перегрів у зоні різання, що безпосередньо впливають на стабільність, точність і економічність відповідного технологічного процесу. Підвищена твердість сталі та її абразивна здатність спричиняють прискорений задній та бічний знос ріжучої кромки, а також утворення дифузійних і термічних зон деградації. Зношування інструмента часто описується за допомогою закону Тейлора. У свою чергу наявність вібрацій формалізується як виникнення самозбуджених коливань, які

негативно впливають на якість поверхні, точність позиціонування та строк служби інструмента. Амплітуда вібрацій A_v корелює з жорсткістю системи та нерівномірністю зусиль як $A_v \propto F_c/k_s$, де F_c — головна сила різання, а k_s — динамічна жорсткість конструкції верстат-інструмент-заготовка. Нарешті, понад 70–80% енергії, що виділяється в зоні різання загартованої сталі, переходить у тепло, з якого лише частина відводиться стружкою. Низька теплопровідність сталі (табл. 1) призводить до локального підвищення температури до 800-1000 °С, що сприяє утворенню термозалежних фазових перетворень на поверхні інструменту та прискорює його знос через подальшу термічну деградацію покриття. Сукупність зазначених факторів обумовлює складність математичного опису процесу різання загартованих сталей та потребує розроблення адаптивних підходів до вибору режимів обробки, що враховують змінність термомеханічних умов та поведінку інструментального матеріалу в динамічному режимі навантаження.

Процес оптимізації режимів різання при обробці загартованих сталей передбачає багатокритеріальний підхід, що враховує як сам ресурс ріжучого інструмента, так і актуальні показники точності, якості обробленої поверхні, енергоспоживання та стабільності роботи технологічного комплексу. З огляду на складність термомеханічних процесів у зоні різання та чутливість сталей високої твердості до параметрів обробки, постає завдання формалізованого вибору режимів, які забезпечують компроміс між відповідними критеріями. Це включає у себе аналіз таких напрямків оптимізації як мінімізація зносу інструмента, покращення чистоти поверхні, зменшення тривалості обробки, підвищення енергетичної ефективності та забезпечення стабільності технологічного процесу за рахунок зниження рівня вібрацій.

Зношування ріжучого інструмента при обробці загартованих сталей є результатом складної взаємодії механічних, термічних і хімічних факторів у зоні різання. Основними механізмами деградації є абразивне стирання, адгезійне спікання, дифузійний перенос матеріалу й термічне руйнування покриття. Висока твердість загартованих сталей сприяє швидкому зносу, що суттєво знижує ефективний ресурс інструмента та погіршує якість обробки. Одним із базових підходів до формалізації процесу зношування є використання емпіричного закону Тейлора, який встановлює залежність між швидкістю різання v та стійкістю інструмента T як $v = C/T^n$, де C і n обираються емпірично. Для обробки загартованих сталей значення коефіцієнта n зазвичай становить 0,1–0,2, що вказує на високу чутливість інструмента до збільшення швидкості різання. Важливу роль відіграє оптимізація параметрів режиму різання, яка полягає у виборі таких значень швидкості, подачі та глибини, що мінімізують накопичення зносу при збереженні необхідної продуктивності. У відповідності до базової математичної моделі основні напрями зменшення зносу формують наступні категорії:

- використання інструментів із підвищеною зносостійкістю, зокрема твердосплавних пластин із покриттями TiAlN, AlCrN;
- регулювання теплового навантаження через вибір оптимальних параметрів різання та застосування охолоджувально-мастильних рідин;
- контроль стійкості тертя через правильний підбір геометрії інструмента, як то передній кут, радіус при вершині, тощо;
- онлайн-моніторинг стану інструмента з використанням датчиків сили, акустичної емісії або температури для своєчасної адаптації параметрів.

Таким чином, мінімізація зносу інструмента має системний характер і досягається за рахунок поєднання оптимізації режимних параметрів, вибору інструментального матеріалу, терморегуляції та інтелектуального моніторингу стану ріжучого елемента.

Точність розмірів і якість поверхні деталі є критично важливими показниками ефективності механічної обробки загартованих сталей, особливо в умовах виготовлення

прецизійних компонентів з високими експлуатаційними вимогами. Основними характеристиками, що визначають якість обробленої поверхні, є:

- макроегеометрія деталі, що визначається через ступінь відхилення від розмірів і форми;
- мікроегеометрія деталі, що визначається через параметри шорсткості;
- структура приповерхневого шару, що включає у себе такі параметри як зміцнення, термічні зони і мікротріщини;

Якість поверхні прямо залежить від режимних параметрів, геометрії інструмента, типу його зношування, жорсткості системи та динамічної стабільності процесу. Підвищення швидкості подачі та глибини різання призводить до зростання параметра шорсткості Ra , що на математичному рівні можна описати узагальненою функціональною залежністю в основі якої лежить сума добутоків зазначених параметрів і вагових коефіцієнтів. Крім того, на стабільність формування стружки впливають вібрації, викликаючи хвилеподібні дефекти поверхні, особливо при високій жорсткості сталі. Це дозволяє виділити основні напрями підвищення точності та чистоти:

- оптимізація процедур подачі матеріалу та глибини різання;
- застосування інструментів з позитивною геометрією та малим радіусом при вершині, що забезпечує плавне різання.
- контроль вібрацій через балансування інструмента, жорстке кріплення заготовки, а також пригнічення коливань пасивними у активними демпферами.
- застосування високоякісних охолоджувально-мастильних рідин, які знижують тертя й теплову деформацію.
- застосування надточних технологій обробки, як то шліфування, прецизійне точіння або фінішне фрезерування з низькими подачами.

Таким чином, досягнення високої точності та чистоти обробленої поверхні є результатом комплексного управління параметрами процесу, властивостями інструмента і стабільністю системи "верстат-інструмент-заготовка", що особливо важливо при обробці загартованих сталей з підвищеною жорсткістю та крихкістю.

Як показав проведений аналіз, підвищення ефективності механічної обробки загартованих сталей потребує цілеспрямованого удосконалення технологічних режимів з урахуванням множини взаємопов'язаних критеріїв, як то зносостійкість інструмента, якість обробленої поверхні, стабільність процесу та час виконання операції. Висока твердість і низька оброблюваність загартованих сталей істотно ускладнюють пошук універсального режиму, що одночасно забезпечує прийнятні показники якості та продуктивності. У таких умовах застосування багатокритеріальної оптимізації стає ключовим інструментом для забезпечення надійності, точності й економічної доцільності обробки.

Розроблена методика багатокритеріальної оптимізації режимів різання базується на поетапному аналізі основних технічних факторів, що впливають на результативність процесу, та передбачає узгодження між собою суперечливих вимог. На рис. 3 подано структуру ключових напрямів оптимізації, згрупованих за трьома основними критеріями:

- забезпечення точності та чистоти обробленої поверхні;
- мінімізація зносу ріжучого інструмента;
- скорочення тривалості технологічного процесу.



Рис. 3. Структура багатокритеріального підходу до інтегральної оптимізації режимів різання загартованих сталей

Кожен з напрямів надалі деталізується через відповідні технічні заходи, формуючи єдину систему впливу, результати якої можуть бути представлені у вигляді узагальненої функції ефективності.

Запропонована методика вирізняється інтегративним характером, що поєднує емпіричні закономірності, практичні рекомендації щодо інструментального оснащення та аналітичні залежності, застосовувані для оцінки якісних і продуктивних характеристик процесу. На відміну від вузькоспеціалізованих підходів, орієнтованих на ізольовану оптимізацію окремих параметрів, представлений багатокритеріальний підхід дозволяє здійснювати системне налаштування режимів різання з урахуванням реальних виробничих обмежень, вимог і специфікацій.

Висновки

У ході проведеного дослідження було здійснено системний аналіз факторів, що впливають на ефективність механічної обробки загартованих сталей, що включало у себе виконання наступних завдань:

Встановлено, що загартовані сталі мають високі експлуатаційні характеристики, однак їхня обробка супроводжується підвищеним зносом інструмента, вібраціями та термічними ефектами, що ускладнюють стабільне підтримання якості та точності.

Проаналізовано сучасні методологічні підходи до встановлення параметрів різання, включаючи нормативні стандарти (ISO), результати індустріальних досліджень і технічні специфікації інструментального оснащення.

Визначено, що критично важливими є не лише твердість сталі, а й її мікроструктурний стан, який впливає на силу різання, теплові процеси та тип зношування інструмента.

Розроблено багатокритеріальну методику оптимізації, яка враховує одночасно зносостійкість, точність обробки та тривалість процесу. Запропоновано формалізовану структуру ключових напрямів оптимізації.

Показано, що запропонований підхід забезпечує адаптивність до умов виробництва та може використовуватися як основа для побудови інтегрованих рішень з налаштування режимів різання в сучасному машинобудуванні.

Список джерел

1. Bhattacharya, B., & Bhattacharjee, D. (2022). Steel as a structural material. *Future Landscape of Structural Materials in India*, 1–23. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8523-1_1.
2. Zykova, A. P., Panfilov, A. O., Vorontsov, A. V., Kolubaev, E. A., & Tarasov, S. Yu. (2022). Hardening mechanisms in stainless steel/aluminum bronze composite fabricated using electron beam additive manufacturing. *Steel in Translation*, 52(10), 912–919. <https://doi.org/10.3103/s0967091222100163>.
3. Zhu, H. (2018). Mechanical and fatigue properties of CFRP Plate Reinforced Steel Structural Interface. *Functional Materials*, 25(4), 759–765. <https://doi.org/10.15407/fm25.04.759>.
4. Sobiyi, K., & Sigalas, I. (2016). High-speed machining of martensitic stainless steel using PCBN. *Journal of Superhard Materials*, 38(1), 34–39. <https://doi.org/10.3103/s1063457616010056>.
5. Przulucki, R. (2018). Numerical determination of equivalent resistivity for an automotive catalyst with a steel core. 2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS), 1–4. <https://doi.org/10.1109/epmccs.2018.8596623>.
6. Trent, E. M., Wright, P. K., & Dearnley, P. A. (2025). Machinability of steels and cast irons. *Metal Cutting*, 399–465. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99155-1.00007-6>.
7. Derbaba, V., Kozechko, V., Patsera, S., Voichyshen, O., & Kozechko, V. (2023). Performance indicators of cutting tools from extra hard materials. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 74, 133–142. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.133>.
8. Gu, L., Kang, G., Chen, H., & Wang, M. (2016). On adiabatic shear fracture in high-speed machining of martensitic precipitation-hardening stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 234, 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.03.010>.
9. Panda, A., Duplák, J., & Vasilko, K. (2012). Analysis of cutting tools durability compared with standard ISO 3685. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 621–624. <https://doi.org/10.7763/ijcte.2012.v4.544>.
10. Boing, D., de Oliveira, A. J., & Schroeter, R. B. (2020). Evaluation of wear mechanisms of PVD and CVD coatings deposited on cemented carbide substrates applied to hard turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11–12), 5441–5451. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05000-x>.
11. Ånmark, N., Björk, T., Ganea, A., Ölund, P., Hogmark, S., Karasev, A., & Jönsson, P. G. (2015). The effect of inclusion composition on tool wear in hard part turning using PCBN Cutting Tools. *Wear*, 334–335, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.04.008>.

12. Moreno, M., Andersson, J. M., M'Saoubi, R., Kryzhanivskyy, V., Johansson-Jöesaar, M. P., Johnson, L. J. S., Odén, M., & Rogström, L. (2023). Adhesive wear of TiAlN coatings during low speed turning of stainless steel 316L. *Wear*, 524–525, 204838. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204838>.