

О.А. Шишкова, аспірант
М.Г. Сторчак, д.т.н., с.н.с., проф.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Особливості обробки хромомолібденових сталей на прикладі AISI 4140

У статті розглянуто особливості обробки хромомолібденової сталі AISI 4140, яка широко застосовується у машинобудуванні завдяки поєднанню високої міцності, зносостійкості та оброблюваності. Метою роботи є аналіз впливу термічної обробки та режимів різання на механічні властивості, оброблюваність і формування цілісності поверхневого шару матеріалу. Для досягнення поставленої мети використано методи аналізу наукових джерел, експериментальні дані та чисельне моделювання процесів різання із застосуванням методу скінченних елементів (FEM).

У роботі показано, що температура відпуску суттєво впливає на мікроструктуру та механічні характеристики сталі AISI 4140: зі зростанням температури спостерігається зниження твердості та міцності при одночасному підвищенні пластичності та ударної в'язкості. Визначено, що параметри різання, зокрема подача та швидкість різання, визначають якість обробленої поверхні, рівень залишкових напружень і інтенсивність зношування інструмента. Чисельне моделювання підтверджує можливість прогнозування температурних полів, напружено-деформованого стану та формування стружки в зоні різання.

Встановлено, що оптимальне поєднання режимів термічної обробки та параметрів різання дозволяє підвищити ефективність процесу механічної обробки, покращити якість поверхні та збільшити ресурс ріжучого інструмента. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів обробки легованих сталей та підвищення надійності деталей машин.

Ключові слова: сталь AISI 4140; хромомолібденова сталь; термічна обробка; механічні властивості; оброблюваність різанням; цілісність поверхні; залишкові напруження; чисельне моделювання; метод скінченних елементів.

Актуальність теми. AISI 4140 – це високоміцна хромомолібденова легована конструкційна сталь середнього вмісту вуглецю, що широко застосовується в машинобудуванні для виготовлення деталей, які працюють під навантаженням: вали, шестерні, осі, штоки, шпинделі, кривошипи, елементи трансмісій, деталі авіаційної, енергетичної та автомобільної техніки, прес-форми, бурові інструменти, а також захисний матеріал для корпусів бойових машин. Матеріали для корпусів бойових машин повинні мати високу міцність і твердість, щоб протистояти проникненню куль. Водночас деякі типи сталей не мають достатньої ударостійкості та кулестійкості, тому їхню міцність і твердість необхідно підвищувати. Одним із методів підвищення якості сталі є термічна обробка, зокрема процес гартування [1].

Мета роботи полягає у комплексному аналізі впливу термічної обробки та параметрів механічної обробки на мікроструктуру, механічні властивості, оброблюваність і цілісність поверхневого шару сталі AISI 4140, а також у дослідженні можливостей чисельного моделювання (FEM) для прогнозування процесів різання та формування залишкових напружень.

Термічна обробка сталі AISI 4140. Сталь AISI 4140 піддається різним видам термічної обробки для досягнення оптимального поєднання міцності, твердості, зносостійкості та пластичності. Для зменшення внутрішніх напружень та покращення оброблюваності застосовується відпал при якому сталь нагрівається до 830–850 °C і повільно охолоджується в печі або на повітрі. Відпал призводить до значного зниження механічної міцності, але збільшення пластичної енергії та пластичності. Крім того, сталь демонструє перехідну поведінку від початкового циклічного розм'якшення до стабільного циклічного зміцнення зі збільшенням амплітуди деформації. На противагу цьому, сталь AISI 4140 зазнає поступового циклічного розм'якшення до руйнування [2]. У відпаленому стані AISI 4140 забезпечує найкраще поєднання механічних властивостей сталі: міцність на розтяг, модуль пружності та подовження.

Нормалізація передбачає нагрівання до 850–900 °C і охолодження на повітрі, що вирівнює структуру і підвищує міцність. Під час процесу нормалізації мікроструктура матеріалу трансформується з грубозернистого перліту у дрібнозернистий перліт. Ця зміна призводить до підвищення межі міцності та межі текучості сталі. Водночас спостерігається зменшення подовження при розриві, звуження площі перерізу та зниження ударної в'язкості [3]. Тому, нормалізація застосовується для отримання збалансованих механічних властивостей, коли необхідне поєднання високої міцності та задовільної пластичності для подальшої обробки або експлуатації в умовах навантажень.

Термічне гартування проводять шляхом нагрівання до 830–870 °С з охолодженням у воді, маслі або полімерному розчині, що формує тверду мартенситну структуру. Сталь AISI 4140 зазвичай використовується після гартування та відпуску. Під час процесу термічної обробки у промисловому виробництві виникають певні проблеми, зокрема гартувальні тріщини при охолодженні у воді та низька твердість при гартуванні в олії [4]. Щоб уникнути утворення гартувальних тріщин та забезпечити необхідну твердість, промислові технології використовують оптимізовані режими охолодження та комбіновані середовища, що сприяють формуванню стабільної мартенситної структури перед відпуском. У своєму дослідженні автори [5] вивчали механічні властивості та стійкість до росту тріщин при втомі сталі AISI 4140 після одно – та багатоступеневої аустемперної обробки. Багатоступенева обробка забезпечує високу міцність при розтягуванні, а найкраща стійкість до росту тріщин спостерігається при 362 °С завдяки оптимальній байнітно-мартенситно-аустенітній мікроструктурі. Морфологія руйнування включає розтріскування мартенситних включень, пластичне руйнування залишкового аустеніту та міжзернове руйнування, що пояснює високу стійкість до втомного руйнування.

Автори [6] дослідили вплив гартувальних середовищ (вода та олива з різним рівнем перемішування) на мікроструктуру, твердість і розподіл напружень у сталі AISI 4140 за допомогою методів скінченних елементів. Свідчить, що після гартування за всіх умов перемішування утворюється повністю мартенситна структура з твердістю 647 HRC. Аналіз залишкових напружень показав, що водяне гартування створює більші напруження, особливо за інтенсивного охолодження, тоді як олива забезпечує рівномірний теплообмін, достатню швидкість охолодження та мінімальні деформації. Олива є більш оптимальним гартувальним середовищем для AISI 4140.

Після цього застосовують відпуск, який проводиться при 400–650 °С із подальшим охолодженням на повітрі, який зменшує крихкість, підвищує ударну в'язкість і забезпечує оптимальне поєднання твердості і пластичності. Під час відпуску сталей AISI 4140 грубі мартенсити перетворюються на дрібні відпущені мартенсити, що призводять до зниження твердості та міцності, тоді як пластичність та ударна в'язкість збільшувалась. Присутність легуючих елементів у сталі AISI 4140 є ключовим показником підвищення ефективності термічної обробки [7]. Зі збільшенням температури відпуску спостерігалось зниження твердості, міцності на розрив і межі текучості, тоді як подовження при розриві та ударна в'язкість зростали. Це пов'язано з фазовими перетвореннями, що відбуваються в мікроструктурі сталі AISI 4140 під час відпуску [8]. Правильний вибір температури та часу відпуску дозволяє досягти оптимального балансу між міцністю, твердістю та пластичністю, забезпечуючи високу експлуатаційну надійність деталей зі сталі AISI 4140 у відповідних промислових застосуваннях. У роботі [9] досліджено вплив оброблюваності на якість поверхні та вібрації під час точіння сталі AISI 4140 після звичайної термообробки та відпуску з використанням керамічних різальних інструментів у сухих умовах. Встановлено, що відпуск покращує оброблюваність матеріалу завдяки зниженню твердості та підвищенню в'язкості, що позитивно впливає на шорсткість поверхні та рівень вібрацій.

Автори [10] дослідили ортогональне різання сталі AISI 4140 з різними температурами відпуску (300, 450 і 600 °С) на основі експериментів і FEM-моделювання з використанням моделі Джонсона-Кука. Параметри матеріалу ідентифіковано шляхом чисельної оптимізації за експериментальними силами різання, що забезпечило високу відповідність між розрахунковими та вимірними даними. Встановлено перспективність підходу для подальшого прогнозування характеристик поверхневого шару, зокрема залишкових напружень, подрібнення зерна та фазових перетворень. На рисунку 1 зображено мікроструктуру сталі AISI 4140 після відпалу при різних температурах, де спостерігається феритно-перлітна структура.

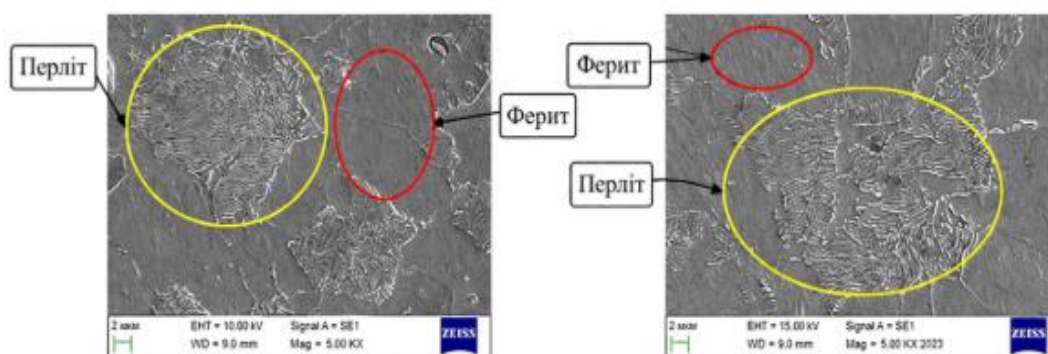


Рис. 1. Мікроструктура сталі AISI 4140 після відпалу [10]

Вплив термічної обробки на властивості сталі AISI 4140. Аналіз літературних джерел показує, що температура відпуску є одним із ключових факторів, який визначає співвідношення між міцністю та пластичними властивостями сталі AISI 4140. При цьому зі зростанням температури відбувається трансформація мікроструктури, що безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики матеріалу. Узагальнені дані щодо цього впливу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Вплив температури відпуску на властивості сталі AISI 4140

Температура відпуску, °C	Мікроструктура	Твердість (HRC)	Міцність (МПа)	Пластичність (%)	Ударна в'язкість (Дж/см ²)	Особливості
200	Відпущений мартенсит	52–56	1700–900	8–10	20–30	висока твердість, крихкість, значні внутрішні напруження
400	Відпущений мартенсит	38–45	1300–500	10–12	30–50	зниження напружень, збалансовані властивості
600	Відпущений мартенсит	28–32	900–1100	14–18	60–90	висока пластичність, стабільна структура, низькі напруження

Таким чином, наведені дані свідчать, що температура відпуску є визначальним фактором формування мікроструктури та комплексу механічних властивостей сталі AISI 4140. Зі зростанням температури відпуску спостерігається закономірне зниження твердості та міцності при одночасному підвищенні пластичності та ударної в'язкості, що дозволяє цілеспрямовано регулювати експлуатаційні характеристики матеріалу залежно від умов його використання. Вибір оптимального температурного інтервалу відпуску забезпечує необхідний баланс між міцністю, зносостійкістю та оброблюваністю сталі.

Є важливим не лише забезпечення необхідних об'ємних механічних властивостей, але й підвищення експлуатаційних характеристик поверхневого шару, який безпосередньо зазнає навантаження під час роботи деталей. Для підвищення твердості поверхневого шару і зносостійкості може застосовуватися цементація або азотування, що формує міцну поверхню та міцний підшар під нею, що корисно для зубчастих коліс, валів та шестерень. Цементація забезпечує насиченість поверхневого шару вуглецем із подальшим гартуванням, тоді як азотування передбачає дифузійне насичення азотом без необхідності подальшого гартування, що дозволяє зменшити деформації деталі.

Термічна обробка відіграє ключову роль у формуванні кінцевих властивостей сталей. Такі процеси, як відпал, нормалізація та гартування в олії, зазвичай застосовують для досягнення поєднання твердості та в'язкості [11]. Для ілюстрації впливу різних схем термічної обробки автори [12] піддавалися термічній обробці за схемами одноразового (Single Quenching and Tempering – SQT) та дворазового загартування та відпуску (Double Quenching and Tempering – DQT). Результати показали, що DQT-обробка забезпечує вищу міцність у порівнянні з SQT, хоча пластичність при цьому дещо знижується.

Термічна обробка сталі AISI 4140 дозволяє ефективно регулювати механічні властивості, досягаючи оптимального поєднання міцності, твердості, пластичності та ударної в'язкості, що забезпечує надійність і довговічність деталей у промислових застосуваннях. Кінцеві властивості сталі значною мірою визначаються її хімічним складом. Основним легувальним елементом сталі AISI 4140 є вуглець (C), і залежно від його вмісту сталь проявляє різні властивості. Крім того, легувальні елементи створюють різницю в мікроструктурі сталі, що значно впливає на такі механічні характеристики, як міцність на розтяг, межа плинності, ударна в'язкість, пластичність та оброблюваність. [13]

Хімічний склад та його вплив на властивості. Співвідношення вуглецю та легувальних елементів визначає формування мікроструктури і відповідно експлуатаційні характеристики сталі AISI 4140. Для узагальнення хімічного складу сталі наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Хімічний склад сталі AISI 4140

Елемент	% вмісту	Опис
Вуглець (C)	0,39–0,43	забезпечує міцність і твердість матеріалу, підвищує зносостійкість, але надто високий вміст зменшує пластичність та оброблюваність
Кремній (Si)	0,15–0,35	підвищує міцність і еластичність, сприяє кращому гартуванню та одночасно покращує стійкість проти втоми
Марганець (Mn)	0,75–1,00	покращує міцність та твердість, підвищує властивості до зношування та сприяє видаленню сірки та поліпшення прокату
Хром (Cr)	0,80–1,10	основний легуючий елемент, підвищує міцність гартування, зносостійкість і корозійну стійкість, формує міцну карбідну структуру при термічній обробці
Молібден (Mo)	0,15–0,25	покращує гартування і міцність на високих температурах, зменшує крихкість після загартування, підвищує стійкість
Фосфор (P)	≤ 0,035	у малих кількостях покращує міцність і твердість, більший вміст знижує ударну в'язкість
Сірка (S)	≤ 0,040	підвищує оброблюваність різанням але надмірна кількість знижує пластичність і міцність

Такий хімічний склад забезпечує високу міцність, стійкість до зношування, хорошу оброблюваність у відпаленому стані та високу твердість після загартування та відпуску. Наявність цих елементів впливає на здатність сталі до загартування, стабільність мартенситної та перлітної структур, а також реакцію матеріалу на термічну обробку, що робить хімічний склад ключовим фактором для отримання бажаних механічних характеристик у виробництві високоякісних деталей. Зазвичай до складу сталей додають певні хімічні елементи для зменшення тертя між заготовкою та інструментом і збільшення терміну служби інструмента, покращуючи оброблюваність сталі. Проте такі добавки можуть спричинити зміни механічних властивостей сталей, а також впливати на застосовані термічні обробки [14].

Порівняльний аналіз з іншими сталями. Для об'єктивної оцінки експлуатаційних і технологічних можливостей сталі AISI 4140 доцільно розглянути її властивості в порівнянні з іншими представниками середньовуглецевих сталей, що представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняльний аналіз механічних характеристик сталей різних марок

Матеріал	Міцність (MPa)	Твердість HRC	Пластичність	Основне застосування
AISI 4140	655–850	28–32	Висока	Вали, шестерні, осі, деталі машин
AISI 4340	745–960	32–36	Середня	Високонавантажені вали, авіаційні компоненти
AISI 1040	580–700	18–22 (відпалена)	Середня	Вали, осі, шестерні, пружини, інструментальні деталі
AISI 8620	450–600	18–22	Висока	Загартовані шестерні, зубчасті колеса

Сталь AISI 4140 часто використовують у дослідженнях процесів механічної обробки завдяки оптимальному поєднанню міцності, відпуску, в'язкості та оброблюваності. На відміну від AISI 4340, що має вищу міцність але гіршу оброблюваність через більший вміст нікелю, сталь AISI 4140 забезпечує стабільні результати при лезовій обробці без надмірного зносу інструменту. Сталі AISI 4140 та AISI 4340 піддавалися однаковим умовам загартування та відпуску, їхня поведінка була різною. AISI 4340 краще реагує на термічну обробку, демонструючи вищі показники твердості порівняно з AISI 4140. Відпуск при низьких температурах і коротких проміжках часу не спричиняє суттєвого зниження твердості сталей. Дослідження твердості сталей є надзвичайно важливими через їх широке застосування в промисловості [15].

Для сталей AISI 4140, що містять легувальні елементи, встановлено, що зміна механічних властивостей після відпуску була більшою, ніж у AISI 1040. Це вважається важливим показником того, що легувальні елементи підвищують ефективність термічної обробки. Можна стверджувати, що механічні властивості середньовуглецевих сталей можуть бути покращені у потрібному напрямку шляхом оптимізації режимів термічної обробки [7].

Сталь AISI 4140 має високу міцність, вважається середньовуглецевою сталлю і використовується для багатьох високонавантажених деталей машин. Сталь AISI 8620 є загартованою низьколегованою сталлю, часто застосовується для цементації з метою виготовлення деталей з поверхневим загартуванням [16]. AISI 8620 має краще гартування та термостійкість, що робить її придатною для вивчення теплових і механічних явищ під час лезової обробки.

Особливості механічної обробки сталі AISI 4140. Матеріал AISI 4140 добре піддається токарній, фрезерній і шліфувальній обробці, а після термічної обробки точінню із використанням PCBN або керамічних інструментів. Поверхнева обробка використовується для покращення цілісності поверхні та індукції стискуючих залишкових напружень. Процес механічної обробки сталі є складним і сформована поверхня залежить від багатьох факторів: властивостей сталі (еластичні та пластичні деформації), матеріалу та геометрії ріжучого інструменту, вібрацій інструменту, швидкості різання, подачі, глибини різання, мастила, тощо. Під час механічної обробки поверхневий шар піддається пружно-пластичним деформаціям та нагріванню, що призводить до структурних змін, наклепу та утворенню залишкових напружень, а також появи нерівностей, які формують шорсткість поверхні [17].

Стабільна поведінка під навантаженням і добре вивчена пластична деформація для матеріалу AISI 4140 широко використовується як для експериментальних і чисельних досліджень процесів різання, включно з ортогональним різанням, моделюванням утворення стружки, теплових полів і залишкових напружень. Коли компоненти з цього легованого матеріалу (AISI 4140) експлуатуються в суворих умовах, наприклад піддаються серйозним ушкодженням поверхні, таким як абразивне зношування та корозії, що може прискорити передчасний вихід з ладу та скоротити життєвий цикл цих важливих і дорогих деталей. Тому важливо відновлювати зношені або пошкоджені компоненти, щоб подовжити термін служби [18].

Сталь AISI 4140 є універсальним матеріалом, який широко використовується в машинобудуванні завдяки своїй міцності та хорошій оброблюваності. Точіння на токарному верстаті передбачає зняття надлишкового матеріалу з заготовки для отримання конічної або циліндричної поверхні. Точіння – це процес механічної обробки матеріалів із твердістю понад 45 HRC з метою отримання готових деталей без додаткового шліфування. Найкращого результату при точінні досягають із застосуванням твердосплавних пластин із CBN, цементів або кераміки.

Типові матеріали, що підлягають точінню – леговані сталі, підшипникові сталі, інструментальні сталі для роботи в гарячому та холодному стані, швидкохідні сталі, штампована сталь, цементовані сталі, тощо. [19] Для токарної обробки застосовують карбіди або інструменти з покриттям TiN або TiAlN, що забезпечують високу зносостійкість. Оптимальні параметри різання залежать від твердості матеріалу. Використання мастильно-охолоджувальної рідин дозволяє зменшити тертя, знизити температуру в зоні різання та покращити якість поверхні. Порівнюючи з іншими сталями, такими як AISI 4340, AISI 8620 та AISI 4140 поєднує достатню оброблюваність із значною міцністю.

Хромомолібденова сталь добре піддається різним видам лезової обробки завдяки своїм властивостям і широкому застосуванню. Окрім токарної обробки використовується фрезерування, яке використовується для формування плоских поверхонь, свердління та розточування для отримання отворів і циліндричних каналів, а також нарізування різьби на валових або внутрішніх поверхнях деталей. Для підвищення точності та якості обробленої поверхні застосовують шліфування, яке забезпечує низьку шорсткість та високу точність оброблених деталей.

У своєму дослідженні автори [20] проаналізували оброблюваність загартованої сталі AISI 4140 під час точіння із використанням карбідного інструменту з покриттям SPPP-AITiSiN у поєднанні з рідиною в умовах MQL. Подача є більш впливовим фактором формування шорсткості, тоді як збільшення швидкості різання та радіуса при вершині інструмента сприяє покращенню якості поверхні. Автори підкреслюють потенціал SPPP-AITiSiN-інструментів як екологічно вигідної альтернативи CBN та кераміці для точіння загартованих сталей.

Автори [21] провели дослідження загартованої сталі AISI 4140 із використанням самохідних обертових інструментів (SPRT), що зменшувало знос інструмента та впливало на шорсткість поверхні. Кут нахилу, швидкість різання та подача істотно впливали на якість поверхні та довговічність інструмента. Дослідження [22] показало, що стійкість до зносу торця твердосплавних пластин при фрезеруванні AISI 4140 корелює із силами різання. Змодельовані моделі дозволяють оцінити знос торця онлайн, але підготовка кромки не завжди покращує ресурс інструмента, а необроблена кромка іноді демонструє крашу стійкість.

На відміну від умов твердого точіння, де теплова ситуація є сприятливою через відсутність переривчастого контакту, фрезерування є значно більш жорстким процесом. Під час фрезерування контакт

інструмента з заготовкою призводить до теплового циклу з періодичним нагріванням і охолодженням. Використання пластин CBN і властивості для процесу теплової коливання є несумісними. Фрезерування загартованої сталі AISI 4140 із використанням CBN-пластин показало, що за правильно підібраних режимів різання можна отримати якість поверхні, співставну з шліфуванням [8]. Експериментальні дослідження авторів [23] показали, що фрезерування сталі AISI 4140 без подачі рідини практично не відрізняється за шорсткістю поверхні від обробки з рідиною, що підтверджує дані щодо ефективності сухого різання. Підвищення швидкості обертання шпинделя зменшує шорсткість, тоді як збільшення глибини подачі її підвищує. Отримані результати свідчать, що фрезерування без рідини може бути застосовано ефективно, дозволяючи економити рідину та спрощувати технологічний процес.

Вплив режимів різання та інструменту. Під час токарної обробки подача є ключовим фактором шорсткості, а збільшення швидкості різання та радіуса вершини інструмента покращує якість поверхні. У фрезеруванні без подачі рідини можна досягти порівнянної якості поверхні з обробкою з рідиною, що дозволяє економити ресурси та спрощує технологічний процес.

Велика частина енергії, витраченої під час свердління, перетворюється на теплову через тертя між інструментом і заготовкою. Надмірне нагрівання негативно впливає на ефективність інструмента та погіршує якість обробленої поверхні. Дослідження авторів [24] свідчать, що матеріал заготовки істотно впливає на якість обробленої поверхні при свердлінні. Зокрема, було розглянуто AISI 304L, що формує значно більшу шорсткість в порівняно з AISI 4140, тоді як інші режими різання мають менш відчутний вплив. У статті [25] досліджено вплив умов мастильно-охолоджувальної рідини на шорсткість та знос інструмента при свердлінні на сталь AISI 4140. Було використано традиційну рідину, кокосову олію та мідна нанорідина у режимі MQL. MQL показав більшу ефективність і кращу проникну здатність, зменшуючи шорсткість поверхні, знос інструмента та морфологію стружки в порівняно з традиційним охолодженням та олією.

У своїй статті автори [26] показали, що покриття твердосплавних свердел (одношарове TiN, двошарове AlTiN+TiN та тришарове AlTiN+TiAlN+TiN) при свердлінні загартованої сталі AISI 4140 суттєво підвищує ресурс інструмента, покращує якість поверхні отворів та зменшує знос. Найефективнішим виявилось тришарове покриття, яке забезпечує більший ресурс свердла на найнижчу шорсткість поверхні.

Для ефективної обробки AISI 4140 важливо правильно підбирати інструмент, його покриття, геометрію, а також режим різання і застосування охолоджувально-мастильних рідин. Великі обсяги охолоджувально-мастильних рідин і досі широко застосовуються в металообробній промисловості, що зумовлює високі витрати на їх споживання та утилізацію й негативно впливає на довкілля [27].

Традиційні мастильно-охолоджувальні рідини застосовують для зменшення теплового впливу, проте за високих температур і тисків вони втрачають ефективність, є екологічно небезпечними та шкідливими для здоров'я [28]. За умови правильного вибору режимів різання та використання високоякісних твердосплавних пластин з покриттям застосування рідин може бути повністю усунене, що є найбільш доцільним рішенням з позицій сталого розвитку та екологічної безпеки [29].

Зростає науковий і практичний інтерес до екологічно безпечних технологій механічної обробки, зокрема до процесів, що забезпечують зменшення або повну відмову від застосування МОР без погіршення якості поверхні та зниження стійкості інструмента. У своєму дослідженні автори [30] оптимізували процес шліфування сталі AISI 4140 за сухих та вологих умов, аналізуючи чотири керовані параметри: поперечну подачу, швидкість заготовки, швидкість круга та глибину різання. Встановлено, що вологе шліфування знижує температуру, сухе – зменшує витрати, а оптимальні параметри залежать від пріоритету продуктивності або якості поверхні.

AISI 4140 використовується для різних видів лезової обробки в залежності від стану матеріалу, вимог до точності обробки і міцності оброблених деталей. Важливо враховувати, що властивості сталі під час обробки значною мірою залежать від її початкового стану. У незагартованому стані AISI 4140 характеризується хорошою оброблюваністю, середньою твердістю, достатньою пластичністю, що робить придатним для виготовлення заготовок і складних деталей при токарній або фрезерній обробці. Після загартування і відпуску твердість AISI 4140 може досягати 45–55 HRC, при цьому зростає втомна міцність, зносостійкість і опір контактному навантаженню. Обробка загартованої сталі є складною через її високу твердість, що спричиняє абразивне зношування і відповідно, скорочує ресурс інструмента, особливо в умовах сухого різання [21]. Комплексний підхід до оптимізації цих параметрів дозволяє підвищити ресурс інструмента, покращити якість обробленої поверхні та забезпечити стабільність роботи деталей у складних умовах експлуатації.

Підвищений вміст вуглецю забезпечує сталі більшу міцність і кращу здатність до термічної обробки, що є особливо важливою властивістю при досягненні максимальної ударної в'язкості [31]. Завдяки поєднанню міцності і в'язкості матеріал є опірним до ударним навантаженням і зносу. Цілісність обробленої поверхні під час точіння загартованих сталей погіршується через інтенсивне тепловиділення та тертя, що потребує зниження температури за допомогою ефективного методу охолодження – мастила та належної роботи ріжучого інструменту [20].

В роботі авторів [32] підтверджено, що твердість поверхні AISI 4140 при токарній обробці значно залежить від ріжучої частини та швидкості шпинделя. Найвища твердість спостерігається при використанні рідини Dromus на середній швидкості шпинделя, тоді як високі швидкості знижують твердість. Для масла SAE 40 та відпрацьованої олії твердість поверхні зростає з підвищенням швидкості. Це підкреслює важливість оптимального підбору комбінації рідини та швидкості для покращення механічних властивостей обробленої поверхні. Публікація авторів [33] показали, що подача значно впливає на шорсткість поверхні та знос інструмента при сухій токарній обробці сталі AISI 4140 із покриттям TiN+AlCrN. Найнижчі значення шорсткості та зносу спостерігалися при подачі 0,06 мм/об, тоді як їх збільшення призводило до погіршення якості поверхні та зростання зносу інструмента. Отримані результати підкреслюють важливість оптимального вибору подачі для підвищення ресурсів інструмента та якості обробки.

Результати наведених досліджень свідчать, що механічні властивості та якість поверхневого шару сталі AISI 4140 при токарній обробці визначаються комплексним впливом термічного стану матеріалу, режимів різання, характеристик ріжучого інструмента та умов охолодження. Причому особливу роль відіграє ступінь термічної обробки заготовки, оскільки загартування суттєво змінює твердість, теплопровідність і зносостійкість матеріалу, що відображається на процесі різання. У зв'язку з цим доцільним є порівняльний розгляд особливостей лезової обробки загартованої і незагартованої сталі AISI 4140.

Обробка загартованої та незагартованої сталі. Для незагартованої сталі, тобто у відпущеному або нормалізованому стані, доступні стандартні види лезової обробки, які виконуються за допомогою легованих або швидкорізальних сталей та карбідних, інструментів з покриттям TiN або TiAlN – токарна обробка, фрезерування плоских поверхонь, свердління, розточування отворів і каналів, а також шліфування, яке дозволяє отримати низьку шорсткість та високу точність деталей. Зазвичай використовують режими точіння з помірною швидкістю різання (80–180 м/хв), подачею 0,1–0,4 мм і глибиною різання 0,5–3 мм. Головна мета полягає в отриманні необхідних геометричних параметрів і шорсткості поверхні без перегріву заготовки. Використання твердосплавних пластин з покриттям забезпечують добру зносостійкість. У більшості випадків використовується МОР для зменшення температури зони різання, покращення відведення стружки за збільшення довговічності інструменту.

Під час механічної обробки якість поверхні деталі визначається змінними у мікрогеометрії інструмента, формування стружки, температури, зношування ріжучої кромки. Розуміння цих взаємодій у процесі різання є критично важливими. Такі знання дають змогу виробникам інструменту оцінювати ефективність конструкції ріжучого інструмента ще до випробувань, що також дозволяє користувачам аналізувати вплив умов обробки на довговічність інструмента та на якість обробленої поверхні [34].

Для загартованої сталі, яка має підвищену твердість, при лезовій обробці різці швидко зношуються, тому застосовують спеціальні методи обробки. Шліфування на токарному верстаті із застосуванням CBN/PCBN інструментами, а також електроерозійна обробка (EDM) для складних форм або деталей із дуже високою твердістю.

Аналіз авторів показало, що електролітично-плазмове та індукційне загартування сталі AISI 4140 значно підвищують поверхневу твердість і зносостійкість за рахунок формування мартенситної структури, при цьому необроблені зразки демонструють найвищий знос [35].

У дослідженні [36] автори експериментально оцінювали обробку загартованої сталі AISI 4140 самохідним роторним інструментом (SPRT) у сухих умовах. SPRT зменшували різальні сили, знос кромки та температуру різання порівняно з різцем, хоча шорсткість поверхні була кращою при використанні різця. Найважливішими параметрами була подача (для різальних сил), швидкість різання (для зносу та шорсткості) та кут нахилу (для обертання та температури інструменту). Використання SPRT дозволяє рівномірно розподіляти теплове навантаження кромці по інструменту, підвищуючи термін його служби та ефективність.

Обробка загартованої сталі потребує спеціальні інструменти і технології, щоб забезпечити точність, довговічність інструменту та високі експлуатаційні властивості деталей. Умови різання в порівнянні з незагартованою сталлю суттєво жорсткіші, використовується режими різання з високою швидкістю (120–250 м/хв), малою подачею (0,05–0,2 мм) і глибиною різання 0,1–0,5 мм. Переважно виконується суха обробка або мінімальне використання мастила, оскільки використання МОР може спричинити виникнення мікротріщин на інструменті. Використання надтвердих інструментальних матеріалів – CBN або PCBN-пластини, зберігають ріжучі властивості при високих температурах і забезпечують низьку шорсткість поверхні. На рисунку 2 наведено порівняння форм стружки при різних умовах різання, що демонструє вплив мастильно-охолоджувального середовища на характер стружкоутворення.

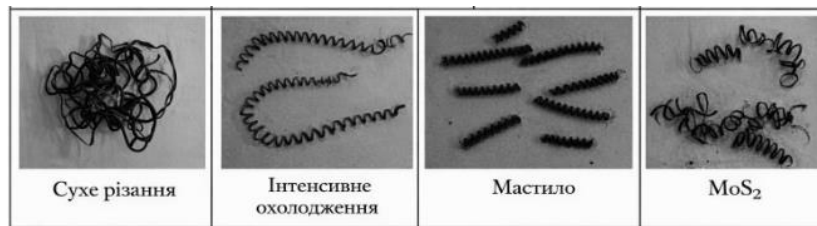


Рис. 2. Порівняння форм стружки за різних умовах різання [28]

Легована сталь 42CrMo4 у незагартованому стані добре піддається механічній обробці звичайними лезовими інструментами, в помірних режимах із використанням MOP, тоді як для загартованої сталі потрібні надтверді матеріали ріжучої частини та точне налаштування параметрів різання, високошвидкісна, малоподачна або суха обробка, спрямована на досягнення високої точності та якості поверхні. Детальне вивчення фізико-механічні характеристики AISI 4140 забезпечує високу ефективність її використання як надійного матеріалу для чисельного й експериментального аналізу процесів різання та оцінювання цілісності поверхні. Завдяки поєднанню високої міцності, в'язкості та структурної стабільності ця сталь широко застосовується у дослідженнях лезової обробки.

Чисельне моделювання процесів різання (FEM). У сучасних дослідженнях процесів різання широко застосовується методи кінцевих елементів, які дозволяють моделювати формування стружки та термомеханічні явища в зоні різання. Одним із підходів є метод ітераційної збіжності (ICM), що забезпечує формування процесу стружкоутворення без необхідності моделювання початкової стадії контакту інструмента із заготовкою. Дослідження свідчать, що результати залежать від параметрів сітки, тертя та теплофізичних властивостей матеріалу [37].

Чисельне моделювання ортогонального різання сталі AISI 4140 є ефективним інструментом для аналізу фізико-механічних процесів, що відбуваються в зоні різання. За допомогою методів скінченних елементів (FEM) моделюють формування стружки, розподіл температурних полів, напружень та деформацій, а також зношування ріжучого інструменту. Такий підхід дає можливість відтворити умови реального експерименту, прогнозувати параметри якості обробленої поверхні та оптимізувати режими різання. На рисунку 3 наведено схему формування залишкових напружень під час ортогонального різання, що включає етапи різання, відведення інструмента та релаксації.



Рис. 3. Схематичне зображення процесу формування залишкових напружень під час ортогонального різання [38]

Під час точіння AISI 4140 високі термомеханічні навантаження призводять до модифікації поверхневого шару, зокрема до утворення «білого шару» внаслідок динамічної рекристалізації, що негативно впливає на залишкові напруження та вторму міцність деталей. У роботі [38] розроблено силовий Soft-Sensor стану поверхні, який на основі аналітичної теплової моделі та FEM-моделювання з урахування DRX дозволяє оцінювати товщину білого шару без калібрування та руйнівного контролю, використовуючи лише фізичні властивості матеріалу та параметри різання. Запропонований підхід є перспективним для оперативного моніторингу та керування цілісністю поверхні, однак потребує подальшого вдосконалення моделей та інші режими та процеси різання.

У сучасному виробництві важливо контролювати не лише геометричну точність деталей, а й поверхневу цілісність, що включає мікроструктуру та залишкові напруження. У роботі [39] розроблено та експериментально перевірено чисельну модель формування стружки і залишкових напружень під час точіння сталі AISI 4140. Отримані результати показали, що в поверхневому шарі виникають значні розтягувальні та стискальні напруження, які стабілізуються на глибині 0,10–0,15 мм. Запропонована

модель демонструє добру відповідність експериментальним даним і може бути використана для прогнозування поверхневої цілісності після механічної обробки. Експериментальні дослідження, наведені в роботі [8], підтверджують суттєвий вплив параметрів різання на формування залишкових напружень і шорсткість поверхні при обробці сталі AISI 4140. Під час фрезеруванні загартованої сталі із застосуванням CBN-інструменту отримано значення шорсткості на рівні R_a 0,16–0,41 мкм, що відповідає якості шліфування. Продемонстровано, що такий підхід може ефективно замінити шліфування, забезпечуючи скорочення часу обробки та підвищення ефективності процесу.

Автори [40] у своїй роботі досліджували вплив різних наборів матеріальних констант рівняння Джонсона-Кука на результати чисельного моделювання ортогонального різання, морфологію стружки, температурних полів і залишкових напружень суттєво залежать від вибору параметрів моделі матеріалу. Найкраща відповідність експериментальним даним досягається при використанні констант, визначених на основі процесів різання, що враховують реальні умови деформації в зоні зсуву. Отримані результати підтверджують, що коректний вибір матеріальної моделі є ключовим фактором для підвищення достовірності FEM-моделювання процесів обробки.

Поряд з цим у дослідженні [41] оцінювали вплив різних моделей тертя на прогнозування зносу інструменту в FEM-моделях різання. Було розглянуто чотири моделі: тертя зсуву, Кулона, гібридну та постійного зсувного напруження. Знос оцінювався за допомогою індикаторів моделей Archard та Usui, що враховують тиск, швидкість ковзання та контакту температури. Результати показали значний вплив параметрів тертя на величину зносу, найбільший знос прогнозується для більшої моделі, найменший для постійного зсувного напруження. Запропонована методика дозволяє підвищити точність прогнозування зносу та оптимізувати процеси обробки.

У роботі [42] досліджено вплив моделей тертя на межах контакту інструмент-стружка-заготовка на процес формування стружки та точність прогнозування фізичних параметрів різання за допомогою FEM-моделювання. Підтверджено, що результати розрахунків суттєво залежать від тертя, зокрема від урахування граничного зсувного напруження та поєднання режимів зчеплення та ковзання. Встановлено, що параметри тертя впливають на сили різання, температури та напруження.

Загалом у чисельних моделюваннях враховуються нелінійні властивості матеріалу, такі як пластична деформація, термомеханічна поведінка, швидкість деформації та тепловиділення в зоні контакту. Для сталі AISI 4140, яка поєднує високу міцність, в'язкість і стабільність структури, чисельне моделювання дозволяє глибше розуміти механізм утворення залишкових напружень і прогнозувати поведінку матеріалу при різних швидкостях різання, подачі та геометрії інструмента, що робить сталі AISI 4140 зразковим матеріалом для досліджень у сфері цифрового аналізу процесів лезової обробки.

Висновки. Проведений аналіз сучасного стану досліджень сталі AISI 4140 дозволяє стверджувати, що даний матеріал залишається універсальним конструкційним матеріалом. Висока адаптивність матеріалу до термічної обробки досягає високих експлуатаційних характеристик, проте вимагає ретельного підходу до вибору режимів обробки з огляду на зношування інструменту та ризик структурного погіршення поверхневого шару. Термічна обробка є визначальним фактором формування експлуатаційних властивостей сталі, забезпечуючи можливість цілеспрямованого регулювання її мікроструктури та механічних характеристик. Водночас підвищення твердості матеріалу ускладнює процеси механічної обробки, що потребує обґрунтованого вибору режимів різання та інструментального забезпечення з урахуванням зношування інструмента і ризику погіршення стану поверхневого шару.

Встановлено, що одним із перспективних напрямків підвищення ефективності обробки є перехід від традиційного шліфування до технологій чистового точіння загартованої сталі, що дозволяє скоротити тривалість обробки та підвищити продуктивність виробництва. Важливу роль у дослідженні та оптимізації процесів різання відіграє чисельне моделювання методом скінченних елементів, яке забезпечує можливість прогнозування температурних полів, напружено-деформованого стану та залишкових напружень у поверхневому шарі деталі.

Подальші дослідження полягають у розробці та підтвердженні комплексних фізико-математичних моделей, що враховують не лише термомеханічні параметри різання, а й кінетику фазових перетворень у реальному часі. Пріоритетним завданням є дослідження взаємозв'язку між режимами точіння та втомною міцністю деталей. Використання сучасних методів чисельного моделювання обробки AISI 4140 дозволить забезпечити прогнозовану цілісність поверхні, мінімізувати небажані структурні зміни в поверхневому шарі та забезпечувати максимальну довговічність критично важливих вузлів.

References:

1. Basori, I., Masitah, I., Susetyo, F.B. and Nanto, D. (2024), «The effect of quenching process on the microstructure and hardness of AISI 4140 steel», *Journal of Physics Conference Series*, doi: 10.1088/1742-6596/2866/1/012020.
2. Badaruddin, M.S., Wardono, H.A., Wang, C. and Rivai, A. (2019), «Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment», *International Journal of Fatigue*, Vol. 125, pp. 15–23, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.04.020.

3. Yılmaz, Y. and Kesti, E. (2021), «Investigation of the Effect of Normalization Process on Mechanical Properties and Microstructure of the AISI 4140 Alloy Steel», *International Journal of Science and Research (IJSR)*, doi: 10.21275/sr21726140705.
4. Zheng, L., Zheng, D., Zhao, L. et al. (2013), «Novel water-air circulation quenching process for AISI 4140 steel», *Metals and Materials International*, Vol. 19, No. 6, pp. 1373–1376, doi: 10.1007/s12540-013-6034-7.
5. Badaruddin, M., Sugiyanto, Sumardi, S. and Asmi, D. (2024), «Improvement of the fatigue crack growth resistance in AISI 4140 steel under single- and multi-austempering heat treatments», *Results in Engineering*, Vol. 21, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101814.
6. Akyıldız, Y., Akman, A., Horasan, B. et al. (2022), «Investigating the effect of quenching media and agitation conditions on the microstructure, hardness, and stress distribution of AISI 4140 steel by using FEM», *Proceedings of the 16th MAS International European Conference on Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, pp. 156–163.
7. Çoban, O. (2025), «Heat treatment of AISI 1040 and AISI 4140 steels: microstructure-mechanical property relationships for normalization, spheroidization and quenching-tempering», *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, Vol. 5, No. 2, pp. 556–567, doi: 10.61112/jiens.1634515.
8. Stipkovic, M.A., Bordinassi, E.C., de Farias, A. and Delijaicov, S. (2017), «Surface integrity analysis in machining of hardened AISI 4140 steel», *Materials Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 387–394, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2016-0420.
9. Kam, M. and Şeremet, M. (2021), «Experimental investigation of the effect of machinability on surface quality and vibration in hard turning of hardened AISI 4140 steels using ceramic cutting tools», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E. Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 235, No. 6, pp. 1824–1836, doi: 10.1177/09544089211007366.
10. Stampfer, B., González, G., Segebade, E. and Gerstenmeyer, M. (2021), «Material parameter optimization for orthogonal cutting simulations of AISI 4140 at various tempering conditions», *Procedia CIRP*, Vol. 102, pp. 198–203, doi: 10.1016/j.procir.2021.09.034.
11. Mudda, S., Hegde, A., Sharma, S. et al. (2025), «Effect of various heat treatment methods and optimization of their parameters on mechanical properties of AISI 4140 steel», *Scientific Reports*, Vol. 15, No. 1, doi: 10.1038/s41598-025-17299-1.
12. Badaruddin, M., Pratama, R.P., Sugiyanto and Harnowo (2023), «Effect of single and double quenching-tempering heat treatments on microstructures and tensile strength of AISI 4140 in annealing condition», *AIP Conference Proceedings*, doi: 10.1063/5.0115822.
13. Aytaç, A., Işık, M.S., Çanakçı, B. et al. (2018), «AISI 1008, 1040 ve 4140 çeliklerinde ısıtılma işlemi, karbon oranı ve alaşım elementlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi», *Savunma Bilimleri Dergisi*, pp. 139–165, doi:10.17134/khosbd.477252.
14. Santos, F., San-Juan, M., Martín, Ó. et al. (2011), «Study of the variation of mechanical properties and cutting forces as an effect of machinability improvement», *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, Vol. 3, No. 2, pp. 97–104.
15. Machado, D. dos S., Louzada, G.G., Farage, D.S. and Sessa, J.C. (2024), «Análise bibliométrica na base de dados Scopus sobre “tratamento térmico nos aços AISI 4140 e AISI 4340”», Vol. 21, No. 13, doi: 10.54033/cadpedv21n13-439.
16. Zhang, C., Bowler, N. and Lo, C. (2009), «Magnetic characterization of surface-hardened steel», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, doi: 10.1016/j.jmmm.2009.07.065.
17. Lopes, K.S.S., Sales, W.F. and Palma, E.S. (2008), «Influence of machining parameters on fatigue endurance limit of AISI 4140 steel», *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 30, No. 1, pp. 77–83, doi: 10.1590/s1678-58782008000100011.
18. Nagaraja, T.K. (2021), «Investigation of effect of mechanical properties and influence of heat treatment on AISI 4140 steel», *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, doi: 10.1088/1757-899x/1013/1/012008.
19. Rathod, S.G., Mohite, S.S. and Yadav, M.H. (2017), «Effects of cutting parameters on cutting force, surface roughness and MRR in hard turning of AISI 4140 alloy steel», *Journal of Advances in Science and Technology*, pp. 273–280.
20. Padhan, S., Wagri, N.K., Dash, L. et al. (2023), «Investigation on surface integrity in hard turning of AISI 4140 steel with SPPP-ALTiSiN coated carbide insert under nano-MQL», *Lubricants*, Vol. 11, No. 2, doi: 10.3390/lubricants11020049.
21. Ahmed, W., Hegab, H., Mohany, A. and Kishawy, H. (2021), «Analysis and optimization of machining hardened steel AISI 4140 with self-propelled rotary tools», *Materials*, Vol. 14, No. 20, doi: 10.3390/ma14206106.
22. Denguir, L.A., Besnard, A., Fromentin, G. et al. (2016), «Flank wear prediction in milling AISI 4140 based on cutting forces PCA for different cutting edge preparations», *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 18, No. 3, pp. 273–290, doi: 10.1504/ijmmm.2016.076278.
23. Napid, S., Bakhori, A., Siambaton, Z. et al. (2024), «Analysis and effect of cutting parameters on the surface roughness of type 4140 steel in the dry milling process», *Proceedings of the International Conference on Science and Technology UISU*, pp. 181–187, doi: 10.30743/fncbv93.
24. Schmidt, R., Strodick, S. and Walther, F. et al. (2020), «Influence of the process parameters and forces on the bore sub-surface zone in BTA deep-hole drilling of AISI 4140 and AISI 304L», *Procedia CIRP*, Vol. 87, pp. 41–46, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.010.
25. Muthuvel, S., Naresh Babu, M. and Muthukrishnan, N. (2018), «Copper nanofluids under minimum quantity lubrication during drilling of AISI 4140 steel», *Australian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 18, pp. S151–S164, doi: 10.1080/14484846.2018.1486694.

26. Şahin, Ö. and Kaluç, E. (2023), «Experimental investigation of the effect of coating on surface roughness and drill life in drilling of AISI 4140 steel», *Jurnal Tribologi*, Vol. 36, pp. 70–85.
27. Elbah, M., Laouici, H., Benlahmidi, S. et al. (2019), «Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, No. 5–6, pp. 2581–2597, doi: 10.1007/s00170-019-04403-9.
28. Tiwari, A., Makhesana, M.A., Patel, K.M. and Mawandiya, B.K. (2020), «Experimental investigations on the applicability of solid lubricants in processing of AISI 4140 steel», *Materials Today: Proceedings*, Vol. 26, pp. 2921–2925, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.603.
29. Revuru, R.S., Zhang, J.Z. and Posinasetti, N.R. (2020), «Comparative performance studies of turning AISI 4140 steel with TiC/TiCN/TiN-coated carbide inserts using MQL, flooding with vegetable cutting fluids, and dry machining», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 108, No. 1–2, pp. 381–391, doi: 10.1007/s00170-020-05378-8.
30. Roy, R., Ghosh, S.K., Kaiser, T.I. et al. (2022), «Multi-response optimization of surface grinding process parameters of AISI 4140 alloy steel using response surface methodology and desirability function under dry and wet conditions», *Coatings*, Vol. 12, No. 1, doi: 10.3390/coatings12010104.
31. Tecer, M.M. (2020), «Effects of various heat treatment procedures on the toughness of AISI 4140 low alloy steel», *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, Vol. 3, pp. 131–149.
32. Iswanto, I., Tjahjanti, P.H., Widodo, E. and Chilmi, M. (2020), «Effect of cutting fluid and spindle speed on surface hardness in turning AISI 4140 steel», *Turbo, Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, Vol. 9, No. 2, pp. 233–237, doi: 10.24127/trb.v9i2.1305.
33. Paengchit, P. and Saikaew, C. (2018), «Feed rate affecting surface roughness and tool wear in dry hard turning of AISI 4140 steel automotive parts using TiN+AlCrN coated inserts», *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, Vol. 307, doi: 10.1088/1757-899x/307/1/012024.
34. Agmell, M., Ahadi, A., Gutnichenko, O. and Stahl, J.-E. (2016), «The influence of tool micro-geometry on stress distribution in turning operations of AISI 4140 by FE analysis», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, No. 9–12, pp. 3109–3122, doi: 10.1007/s00170-016-9296-7.
35. Ayday, A. and Durman, M. (2014), «Effect of different surface-heat-treatment methods on the surface properties of AISI 4140 steel», *Materials and Technology*, Vol. 48, No. 5, pp. 787–790.
36. Ahmed, W., Hegab, H., Mohany, A. and Kishawy, H. (2021), «On machining hardened steel AISI 4140 with self-propelled rotary tools: experimental investigation and analysis», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 113, No. 11–12, pp. 3163–3176, doi: 10.1007/s00170-021-06827-8.
37. Dirikolu, M.H., Childs, T.H.C. and Maekawa, K. (2001), «Finite element simulation of chip flow in metal machining», *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 11, pp. 2699–2713, doi: 10.1016/s0020-7403(01)00047-9.
38. Meurer, M., Tekkaya, B., Schraknepper, D. et al. (2022), «Numerical prediction of machining induced residual stresses when hard cutting AISI 4140», *Procedia CIRP*, Vol. 108, pp. 583–588, doi: 10.1016/j.procir.2022.03.092.
39. Meurer, M., Tekkaya, B., Augspurger, T. et al. (2020), «Cutting force based surface integrity soft-sensor when hard machining AISI 4140», *Technisches Messen*, Vol. 87, No. 11, pp. 683–693, doi: 10.1515/teme-2020-0050.
40. Umbrello, D., M'Saoubi, R. and Outeiro J.C. (2007), «The influence of Johnson–Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 3–4, pp. 462–470, doi: 10.1016/j.ijmactools.2006.06.006.
41. Storchak, M., Melnyk, O., Stepchyn, Y. et al. (2025), «Effect of friction model type on tool wear prediction in machining», *Machines*, Vol. 13, No. 10, doi: 10.3390/machines13100904.
42. Arrazola, P.J. and Özel, T. (2010), «Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining», *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52, No. 1, pp. 31–42, doi: 10.1016/j.ijmecs.2009.10.001.

Шишкова Оксана Андріївна – аспірант, асистент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0004-2062-4870>.

Наукові інтереси:

- оброблюваність легованих сталей;
- механічна обробка матеріалів;
- ортогональне різання та процеси стружкоутворення.

E-mail: asp_shoa@student.ztu.edu.ua.

Сторчак Михайло Григорович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-6603-1710>.

Наукові інтереси:

- дослідження та моделювання процесів різання;
- дослідження та синтез технологічних процесів обробки зубчастих коліс;
- дослідження стану металорізальних верстатів.

E-mail: kmi_smg@ztu.edu.ua.

Shyshkova O.A., Storchak M.H.

Machining characteristics of chromium-molybdenum steels: a case study of AISI 4140

The article examines the machining characteristics of chromium-molybdenum steel AISI 4140, which is widely used in mechanical engineering due to its combination of high strength, wear resistance, and good machinability. The aim of this study is to analyze the influence of heat treatment and cutting conditions on the mechanical properties, machinability, and the formation of surface integrity of the material. To achieve this goal, methods of scientific literature analysis, experimental data, and numerical modeling of machining processes using the finite element method (FEM) were employed.

The study demonstrates that tempering temperature significantly affects the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel: with increasing temperature, a decrease in hardness and strength is observed, accompanied by an increase in ductility and impact toughness. It is determined that cutting parameters, particularly feed rate and cutting speed, play a decisive role in the quality of the machined surface, the level of residual stresses, and tool wear intensity. Numerical modeling confirms the capability to predict temperature fields, stress-strain state, and chip formation in the cutting zone.

It is established that an optimal combination of heat treatment regimes and cutting parameters enhances the efficiency of the machining process, improves surface quality, and increases tool life. The obtained results can be applied to optimize machining processes of alloy steels and to improve the reliability of machine components.

Keywords: AISI 4140 steel; chromium-molybdenum steel; heat treatment; mechanical properties; machinability; surface integrity; residual stresses; numerical modeling; finite element method (FEM).

Стаття надійшла до редакції 13.01.2026.