

« Вікторія »

(шифр)

**Вплив режимів роботи фемтосекундного лазера на формування
поверхневих шарів на сталі 12Х18Н10Т**

ЗМІСТ

1. Літературний огляд

1.1. Лазери надкоротких імпульсів

1.2. Параметри фемтосекундних лазерів

1.3. Вплив різних параметрів фемтосекундного лазера на формування наноструктур

1.4. Формування структури на металах

1.5. Лазерно індуковані періодичні поверхневі структури

1.6. Використання фемтосекундних лазерів

2. Методи дослідження

2.1. Обробка фемтосекундним лазером

2.2. Матеріали та методи дослідження методи дослідження

2.3. Растровий електронний мікроскоп JSM-6700F

3. Результати досліджень

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Сталь 12X18H10T є добре вивченою та широко застосовується у багатьох галузях господарства. Але в окремих випадках застосування цієї сталі обмежується незадовільними властивостями. Запобігти ушкодженню поверхні можна за допомогою сучасних методів інженерії поверхні. Створення на сталях аустенітного класу багатофункціональних поверхневих шарів з відповідним співвідношенням нано– і мікроструктури є одним з найважливіших завдань сучасного матеріалознавства. Формування наперед заданих поверхневих структур з новими властивостями можна здійснювати лазерною обробкою.

Найбільш продуктивною технологією нано– і мікроструктурування на сьогодні вважається метод слабо сфокусованих ультракоротких імпульсів. При цьому процес керованого структуроутворення спостерігається одночасно по всій області дії лазерного променя. Отримання ультракоротких імпульсів стало можливим завдяки появі фемтосекундного лазера та розширення спектру розв'язуваних за їх допомогою задач. Причому, якщо спочатку фемтосекундні лазери були задіяні в основному для проведення фундаментальних фізичних досліджень, то останнім часом вони все більше використовуються для вирішення прикладних задач у матеріалознавстві, медицині, фізичній хімії та біології. Гранично мала тривалість імпульсів фемтосекундного лазера дозволяє досліджувати швидкоплинні релаксаційні процеси в речовині, наприклад теплообмін між електронами провідності і кристалічною ґраткою в металах, що відбувається в пікосекундному часовому діапазоні.

Дослідження особливостей структуроутворення у поверхневих шарах сталі 12X18H10T під дією фемтосекундного лазерного випромінювання відкриває нові можливості її використання. Саме тому, **метою нашої роботи** було оцінити вплив режимів обробки, зокрема зміни швидкості сканування лазерного променя на формування структури, мікрорельєф поверхні та можливі фазові перетворення.

1. Літературний огляд

Отримання ультракоротких імпульсів стало можливим тільки з розвитком існуючих лазерних систем і зокрема з появою фемтосекундного лазера. За останні 20 років широке поширення фемтосекундних лазерів призвело до значного розширення спектра розв'язуваних з їх допомогою задач. Причому, якщо на першому етапі після створення фемтосекундних лазерів, вони використовувалися в основному для фундаментальних фізичних досліджень, то останнім часом такі системи все більше використовуються для вирішення широкого спектра прикладних задач в різних галузях науки і техніки, у медицині, хімії, фізиці, матеріалознавстві та біології. Також такого типу лазери широко використовуються для прецизійної обробки широкого класу матеріалів. Висока потужність, поєднана з низьким розходом лазерного випромінювання, дозволяє концентрувати світлову енергію в дуже малому обсязі. Гранично мала тривалість імпульсів фемтосекундного лазера дозволяє досліджувати швидкі релаксаційні процеси в речовині, наприклад теплообмін між електронами провідності і кристалічною ґраткою в металах, що відбувається в пікосекундному часовому діапазоні.

1.1. Лазери надкоротких імпульсів

Фемтосекундні лазери — оптичні квантові генератори, здатні генерувати імпульси лазерного випромінювання, які містять мале число коливань оптичного поля, а також випромінюють світлові імпульси тривалістю від декількох до сотні фемтосекунд.

Одною з найважливіших переваг фемтосекундного лазера є мала (суб- і близько-мікронна) глибина зони теплової дії в місці взаємодії лазерного імпульсу з оброблювальною поверхнею. Це дозволяє виконувати сильнолокалізовану модифікацію окремих частин поверхні. За рахунок цього процес формування необхідних характеристик поверхні відбувається без значної зміни об'єму виробу, що особливо важливо для наноструктурних матеріалів, які володіють низькою термічною стабільністю структури [1].

Особливістю фемтосекундних лазерних імпульсів є можливість досягнення колосальних значень пікової потужності в імпульсі. Пікова потужність лазерного імпульсу $\sim 10^{14}$ Вт, що генерується сучасною мультитераватною лазерною системою (1 терават (ТВт) = 10^{12} Вт), в десятки разів перевищує потужність усіх джерел енергії на планеті. При цьому, у зв'язку з малою тривалістю, такі рекордні пікові потужності досягаються при відносно невеликій величині енергії лазерного імпульсу (кілька джоулів), а самі лазерні системи при цьому є досить компактними [2].

Основними характерними рисами фемтосекундного лазера є: мала тривалість імпульсу, при чому вектор електричної індукції встигає змінити своє значення лише кілька разів за час тривалості імпульсу; висока середня інтенсивність під час дії імпульсу завдяки малій тривалості (рис. 1.1); широкий спектр випромінювання, діапазон довжини хвилі від одиниць до сотень нанометрів; висока часова когерентність - послідовності імпульсів; висока просторова когерентність.

Отже, фемтосекундний лазер - це лазер, який випромінює оптичні імпульси тривалістю значно менше 1 пс, тобто в області фемтосекунд (1 fs = 10^{-15} с). Таким чином, він також належить до категорії ультрашвидких лазерів або ультракоротких імпульсних лазерів (Рис. 1.1).

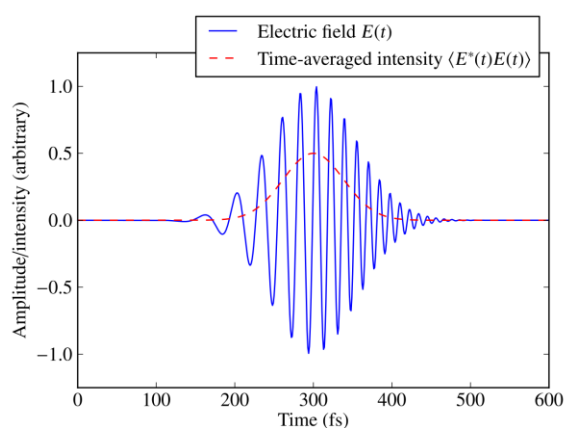


Рисунок 1.1 — Позитивне коливання ультракороткого імпульсу світла у часовій області

Створення таких коротких (субпікосекундних) світлових імпульсів майже завжди досягається технікою блокування пасивного режиму. Це

призводить до імпульсів з помірною енергією імпульсу і високою частотою повторення імпульсу в області мегагерца або гігагерца. Набагато вища енергія імпульсу (при менших частотах повторення) можлива за допомогою додатків фемтосекундного лазера з використанням системи оптичних підсилювачів ($\rightarrow$ ультрашвидкісні підсилювачі).

1.2. Параметри фемтосекундних лазерів

Помпування лазера здійснюється неперервним випромінюванням (з постійною інтенсивністю), аргонним газовим лазером або твердотілим неодимовим лазером з перетворенням у другу гармоніку (зменшення довжини хвилі у два рази). Зазвичай необхідна потужність випромінювання помпування близько 5 Вт. Експериментально настраюється положення кристалу і увігнутих дзеркал (наявні тонкі мікрометричні гвинти). Також підбирається величина дисперсії системи двох призм (тонке регульоване переміщення однієї з призм). Оптична схема фемтосекундного лазера представлена на рисунку 1.2 [3].

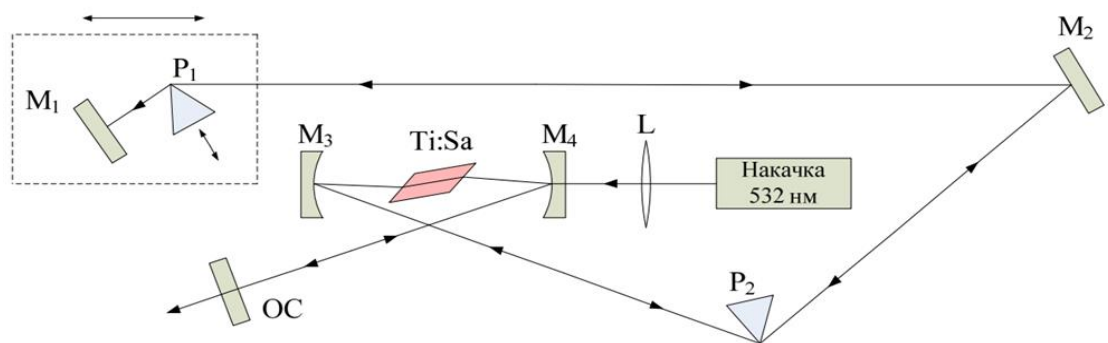


Рисунок 1.2 — Схема Ti: Sapphire фемтосекундного лазера “х” конфігурації

Основними параметрами фемтосекундного лазера, які впливають на функціональні характеристики оброблюваної поверхні, є: тривалість імпульсу (яка в деяких випадках налаштовується в певному інтервалі) τ , фс; частота проходження імпульсу (зазвичай фіксована або настраюється, але тільки в невеликому інтервалі), Гц; середня потужність генерації P , Вт та енергія імпульсу W , Дж.

Однак існують різні додаткові аспекти, які можуть бути важливими:

- коефіцієнт пропускну́ї здатності – добуток тривалості імпульсу на ширину спектра – показує, наскільки більша реальна спектральна ширина випромінювання в порівнянні з необхідною для даної тривалості імпульсу;

- якість імпульсу – включає в себе додаткові аспекти, такі як тимчасова і спектральна форми імпульсу, наприклад, наявність тимчасових або спектральних бічних пелюсток;

- стабільна лінійна поляризація на виході;

- шумові параметри. Вони можуть сильно відрізнятися серед різних видів і моделей фемтосекундних лазерів та включають в себе тремтіння щодо синхронізуючих імпульсів, нестабільність енергії імпульсів (інтенсивність шуму) і різні види фазового шуму. Крім того, це може бути важливо при перевірці на стабільність параметрів імпульсу, включаючи сприйнятливості на зовнішні фактори, такі як механічні вібрації і оптичний зворотній зв'язок;

- деякі лазери містять вбудовані засоби синхронізації для стабілізації частоти повторення імпульсів із зовнішнім джерелом або на підстроювання генерування довжини хвилі;

- вихідна потужність лазера може передаватися у відкритий простір, наприклад, через вихідне вікно, або через оптоволоконний вихід;

- вбудовані опції для контролювання виробленої потужності, довжини хвилі і тривалості імпульсу [4].

Крім цих аспектів самого лазера, інтерес може становити якість документаційного матеріалу, такого як специфікація виробу, керівництво користувача тощо.

1.3. Вплив різних параметрів фемтосекундного лазера на формування наноструктур

На формування наноструктур після обробки фемтосекундним лазером мають вплив численні параметри, а саме:

- 1) Кількість імпульсів. Нанопори та сферичні нанопротрузії на Ti, Au, Cu та Pt спостерігалися поблизу порогу абляції та при дуже низькій кількості імпульсів. Зауважено, що наноструктурування на міді у центрі плями пучка

можливе лише при флюенсі $1,5 \text{ Дж/см}^2$. Спостережено мікроструктури поза цим флуенсом, тому існує верхній поріг для формування наноструктури. Розмір нанофункцій збільшувався зі збільшенням кількості імпульсів при заданому флюенсі. Аналогічна тенденція спостерігалася і для фіксованої кількості лазерних імпульсів, де розмір функції збільшувався зі збільшенням флюенсу.

Таким чином, розміром і форму наноструктур можна керувати різними коливаннями та кількістю імпульсів. Два ефекти призводять до збільшення розміру ознак із збільшенням кількості імпульсів: (1) посилене поглинання енергії та (2) геометричний ефект. Посилене поглинання енергії відбувається за рахунок раніше створених наночастинок. З іншого боку, геометричний ефект викликається розсіяною енергією через підвищену шорсткість поверхні. Розмір наночастинок не збільшується нескінченно з кількістю імпульсів і флуктуацій. Багато з цих нанофункцій перетворилися на мікроструктури з достатньою кількістю імпульсів та величиною флюенсу. Точна величина двох останніх параметрів залежить від конкретного матеріалу.

2) Навколишнє середовище. Формування наноструктур на металах та сплавах у різних середовищах вивчалось в минулому. Були отримані наноконплеси на Al методом обробки фемтосекундним лазером (180 фс, 800 нм) як у етанолі, так і у воді з періодичністю 200–300 нм, тоді як Al, оброблений у повітрі, виявляв нерегулярні наноструктури розміром 100 нм. Помічено, що періодичність нановиступів у воді та етанолі не залежить від тривалості лазерного імпульсу, довжини хвилі чи поляризації. Однак флюенс, необхідний для створення наноструктур у повітрі, був вищим, ніж у етанолі або у воді.

Зауважено, що тиск газу не впливає на морфологію наноструктур, вироблених на платині. Однак кількість повторного осадження вища при обробці на повітрі при атмосферному тиску порівняно з величиною у вакуумі. Розширення плазми може пояснити це явище. Плазма розширюється швидше у вакуумі, ніж у повітрі при атмосферному тиску. Таким чином, частинки мають

більш високу тенденцію до повторного відтворення, коли вони перебувають у повітрі.

3) Кут падіння. Вплив кута падіння на періодичність лазерно-індукованих періодичних структур (ЛПС) поверхні вивчали для SS304, Pt, Au і W з лінійно поляризованим лазерним променем 800 нм. Періодичність на SS304 була збільшена з 670 до 1400 нм і зменшилася з 670 до 350 нм шляхом нахилу зразка від 0° до 50° . Аналогічно збільшували періодичність ЛПС для золота та платини з 600 до 3700 нм та 600 до 2800 нм відповідно нахилом зразка від 0° до 80° . Періодичність ЛПС зменшилася з 528 до 364 нм за рахунок збільшення кута падіння з 0° до 70° для вольфраму [5]. Теоретична періодичність не відповідає спостережуваній періодичності у всіх зазначених тут чотирьох випадках. Було висловлено припущення, що ефективний показник заломлення для інтерфейсу відрізняється від літературного значення через скупчення наночастинок на поверхні під час лазерної обробки.

4) Довжина хвилі. Періодичність ЛПС при нормальній частоті падіння змінюється лінійно залежно від довжини хвилі лазера. Досліджено залежність періодичності ЛПС від довжини хвилі вольфраму для основної та другої гармонік довжини хвилі лазера. Періодичність ЛПС 289 та 542 нм спостерігалась для довжини хвилі падаючої хвилі 400 та 800 нм відповідно.

1.4. Формування структури на металах

Імпульсне лазерне опромінення створило різноманітні періодичні шаблони поверхонь, в тому числі і періодичні поверхневі структури, що утворилися лазерним опроміненням наносекундними та фемтосекундними лазерними імпульсами і з коливанням біля порогу плавлення. Механізм, що відповідає за формування ЛПС, зараз добре вивчений.

Взаємодія лазера з речовиною при фемтосекундному лазерному опроміненні є складною через різні ефекти та процеси, що відбуваються за короткий час. Перший крок взаємодії «лазер-речовина» - поглинання фотонів електронами. Лінійне поглинання є основним механізмом поглинання металів, тоді як для напівпровідників, діелектриків та ізоляторів домінуючим є

нелінійне поглинання. Поглинання фотона збуджує електрони, і в масштабі часу 100 фс термалізація гарячих електронів призводить до підвищення температури електрона, що набагато вище температури ґратки. Гарячі електрони охолоджуються за рахунок дифузії гарячого електрона та взаємодії електрон-фонон. Таким чином, між ґраткою та електронами встановлюється теплова рівновага. Взаємодія лазера та матеріалу через кілька пікосекунд вважається тепловим процесом, тоді як явища, що відбувалися раніше, вважаються нетермічними процесами.

Взаємодія між електронами та фононами дуже важлива для мікроструктури. Для металів з великою електронно-фононною постійною енергією зв'язку тепло швидше передається від електронів до ґратки, ніж для металів з низькими константами зв'язку $e-ph$, і, отже, для металів з великими константами зв'язку $e-ph$ немає значної кількості теплопередачі всередині матеріалу. Як результат, поглинена енергія накопичується біля поверхні матеріалу і призводить до формування індукованих лазером поверхневих структур через посилену гідродинаміку розплавленого матеріалу. Таким чином, перехідні матеріали з великою постійною сполукою $e-ph$ більш схильні до формування різних поверхневих структур порівняно з благородними матеріалами, які мають низькі константи зв'язку $e-ph$.

Взаємодія «лазер-матеріал» включає складні процеси нагрівання, плавлення, випаровування, викидання атомів, іонів і молекул, ударних хвиль, ініціювання плазми та розширення плазми. Як правило, час релаксації електрон-ґратки в металах становить 1-10 пс., і це робить механізм фемтосекундної лазерної абляції відмінним від механізму більш тривалої імпульсної лазерної абляції в металах. Термічна абляція виникає тоді, коли ширина лазерного імпульсу перевищує час релаксації електрон-ґратки. [6]. Фемтосекундна лазерна абляція - це процес видалення низькопорогового матеріалу з поверхонь, керованих плазмою, що утворюється на поверхні матеріалу за рахунок генерації екстремальних температур і тиску, збуджених за рахунок багатифотонного поглинання. Передача енергії плазми через матеріал

відбувається через розширення ґратки та розрив зв'язку. Оскільки часовий масштаб лазера є субпікосекундним і всі супутні процеси проходять за цією шкалою, теплова дифузія в матеріал майже відсутня і матеріал не має достатньо часу для плавлення та затвердіння. Поглинена енергія лазера повністю осідає в ціль, і можна отримати більш високу ефективність абляції матеріалу [7].

Абляція відбувається в масштабі часу 100 пс після того, як імпульс фс-лазера стикається з матеріалом. Для механізмів фемтосекундної лазерної обробки було запропоновано та експериментально перевірено багато механізмів абляції. Серед них основними є фазовий вибух, критичне розділення фаз, фрагментація розщеплення, плавлення, випаровування та кулонівський вибух. Відповідно до моделі фазового вибуху в умовах фемтосекундного лазерного перегріву в матеріалі індуються екстремальні температура, тиск та щільність, і матеріал перетворюється на перегріту рідину. Складні фазові переходи та термодинамічні явища, такі як зародження бульбашок, перетворюють перегріту рідину в суміш крапель рідини та пари, яка розширюється з великою швидкістю. Матеріал після абляції швидко вистигає, що і призводить до утворення мікро- та наноструктур на поверхні. Гідродинаміка розплавленого басейну відіграє важливу роль у формуванні структури. Повторне осадження частинок ще більше виявляє морфологію опроміненої поверхні.

1.5. Лазерно індуковані періодичні поверхневі структури (ЛПРС)

Мікро/нано структурування поверхні створює багато різних структур на різних матеріалах. Два широких типи - це лазерно-опромінені структури та лазерно-вписані структури. Можливості необмежені для лазерно-вписаних структур, тоді як для опромінених лазером структур повідомляється лише про кілька типів структур.

Фемтосекундна лазерна обробка може створювати структури в нанометровій шкалі. Наноструктури можуть з'являтися окремо або вони можуть бути пов'язані з мікроструктурами. Після охолодження матеріалу на поверхні формуються індуковані лазерними імпульсами періодичні поверхневі

структури (ЛППС), модуляція рельєфу яких утворюється у процесі поглинання лазерного імпульсу та зберігається після його припинення. Періоди та орієнтація ґраток суттєво залежать від характеристик лазерної обробки: кута падіння променя, поляризації, частоти, енергії імпульсу, довжини хвилі. Згідно інтерференційної моделі процес утворення періодичної структури починається з виникнення періодично модульованого інтерференційного світлового поля у просторі біля поверхні. Причиною цього явища є інтерференція падаючої світлової хвилі до хвилі, розсіяної реальною неоднорідною поверхнею. Після цього у періодично модульованому світловому полі відбувається просторово-неоднорідне нагрівання поверхні. При цьому розподіл температури вздовж поверхні корелює з розподілом інтенсивності інтерференційного світлового поля. Якщо інтенсивність лазерного випромінення достатньо велика, то неоднорідне нагрівання поверхні здатне викликати неоднорідне плавлення, випаровування і винесення речовини, внаслідок чого “запам’ятовується” інтерференційний рельєф.

1.6. Використання фемтосекундних лазерів

Здатність фемтосекундних лазерів ефективно покращувати складні конструкції та пристрої для найрізноманітніших застосувань була широко вивчена протягом останнього десятиліття. Сучасні методи лазерної обробки з ультракороткими світловими імпульсами можна використовувати для побудови матеріалів із роздільною здатністю до субмікрметра. Пряме лазерне записування (ПЛЗ) відповідних фоторезистів та інших прозорих носіїв може створювати складні тривимірні фотонні кристали (PhC), мікрооптичні компоненти, ґратки, риштування тканини (TE) та оптичні хвилеводи. Такі структури потенційно корисні для розширення можливостей додатків наступного покоління в телекомунікаціях та біоінженерії, які вимагають створення все більш досконалих мініатюрних деталей. Точність, швидкість виготовлення та універсальність ультрашвидкої лазерної обробки дозволяють зробити її важливим промисловим інструментом.

Фемтосекундні лазерні імпульси (ФЛІ) сьогодні використовуються для вирішення найпередовіших фундаментальних і прикладних задач: від дослідження динаміки електронів, управління реакціями до протонної терапії онкозахворювань і мікрохірургії біологічних клітин і навіть їх окремих органел. Особливе місце у використанні ФЛІ займає галузь, пов'язана з модифікуванням поверхні твердотільних матеріалів з метою створення функціональних поверхонь і селективною модифікацією нанорозмірних шарів.

В останні роки все більше уваги приділяється розробці функціональних поверхонь, за допомогою яких можна вирішити сучасні технічні завдання, пов'язані зі створенням матеріалів зі збільшеним коефіцієнтом поглинання сонячного випромінювання, підвищеною зносостійкістю і поліпшеними характеристиками міцності, каталітичної активності, а також зі створенням матеріалів, що володіють ефектом самоочищення поверхні (Ефект Лотоса) і можливістю перемикання режимів змочування від супергідрофобного до супергідрофільного стану. Особлива увага приділяється вирішенню завдань, пов'язаних з розробкою нових теплообмінних поверхонь, які широко використовуються в енергетиці та електроніці. Це дозволить значно інтенсифікувати теплообмін при випаровуванні і кипінні рідин. Взаємодія лазерного променя високої потужності з матеріалом має багато застосувань, включаючи хімічний аналіз, мікромасинування та імпульсне лазерне осадження тонких плівок.

Техніка фемтосекундного лазера дозволяє гранично швидко (~ 100 фс) вкласти в матеріал, а точніше, в його електронну підсистему, високі енергії. Таким чином, інтенсивність випромінювання на поверхні матеріалу в момент впливу може досягати декількох ТВт, що в тисячі мільярдів разів вище за ту інтенсивність, з якою Сонце висвітлює земну поверхню. Подібне високоенергетичне вплив призводить до колосальних змін морфології поверхні та її фізико-хімічних властивостей. В результаті цілого каскаду релаксаційних процесів - процесів перетворення поглинутої енергії ФЛІ в теплову енергію ґратки, подальшого нагрівання речовини і її плавлення, термогідродинамічного

руху розплаву і абляції, що відбувається з утворенням поверхневих і підповерхневих мікро- та наноструктур, а також подальшого охолодження матеріалу, призводить до аморфізації і рекристалізації розплаву. Таким чином формується нова морфологія поверхні і нова внутрішня структура матеріалу, що, в свою чергу, змінює фізико-хімічні властивості матеріалу.

Іншою важливою перевагою використання ФЛІ є локалізація впливу, яка дозволяє здійснювати мікро- і нанообробки різних матеріалів без пошкодження прилеглих шарів. Велика кількість завдань пов'язано з модифікацією тонких шарів - від наноструктурування до видалення поверхневих дефектів. Однією з найбільш затребуваних завдань є нанесення заданого малюнка і локальне видалення частини шарів для створення струмопровідних доріжок (контактів). Це представляє собою важливий науково-технічний прогрес для створення сучасних фотоелементів, дисплеїв і інших елементів мікроелектроніки. У зв'язку зі зменшенням розміру функціональних електронних компонентів (транзисторів) великий інтерес викликає модифікація багат шарових тонкоплівкових структур з нанорозмірною товщиною шарів.

2. Методи дослідження

2.1. Обробка фемтосекундним лазером

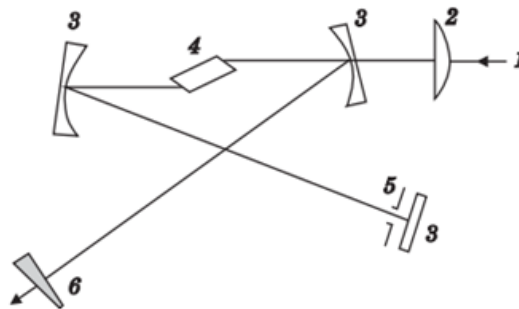
Джерелом випромінювання є фемтосекундний титан-сапфіровий TiAl_2O_3 комплекс у складі задаючого фемтосекундного генератора Mira Optima 900-F та регенеративного підсилювача Legend F-1K-HE. Основними параметрами лазерного випромінювання в експерименті є: довжина хвилі випромінювання 800 нм, тривалість імпульсу 140 фс, частота слідування імпульсів 1 кГц, енергія імпульсу 0.95 мДж, густина потужності випромінювання $\sim 5\text{-}10^{11}$ Вт/см².

Конструкція резонатору зображена на рисунку 2.1. В якості джерела збудження активного елементу, $-\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{+3}$, — використовується випромінювання неперервного лазера Nd:YVO_4 з діодною накачкою 'Verdi V10' (Coherent) з довжиною хвилі 532 нм та вихідною потужністю 10 Вт ($\pm 1\%$). При такій накачці неперервна послідовність імпульсів фемтосекундного діапазону має

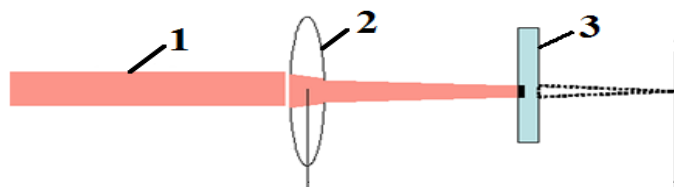
середню потужність 1,3 Вт на довжині хвилі 800 нм з рівнем розкиду по енергії меншим 0,1%. Система Optima включає ряд детекторів: вимірювача рівня потужності, датчика неперервного випромінювання, швидкого фотодіода, датчиків вологості та керування автоматичним стартером [8].

Вимірювання тривалості імпульсів в діапазоні фемто– і пікосекунд здійснювалося автокорелятором APE Autocorrelator mini (APE, ФРН) з діапазоном затримок від 150 фс до 15 пс. Вимірювання можуть виконуватися як для великих частот повторення, так і для одиночних імпульсів.

Опромінення зразка відбувалось за схемою наведеною на рисунку 2.2. Зразок розміщувався перед сходженням пучка в фокус на відстані 20–25 мм від фокуса.



1 – промінь помпування; 2 – лінза; 3 – напівпрозорі дзеркала;
4 – кристал Ті:сапфіру; 5 – діафрагма (щілина); 6 – вихідне дзеркало
Рисунок 2.1 – Оптична схема лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{+3}$ з лінзою Керрі [8]



1– лазерний пучок; 2 – лінза; 3 – зразок

Рисунок 2.2 — Принципова схема обробки

Обробляли поверхню зразка сталі 12Х18Н10Т, товщиною 2 мм. Попередньо зразок очищався за допомогою алмазної пасти з розміром частинок 0.5-1 мкм. Після чого промивався в ацетоні та спирті. Підготовлений таким

чином зразок встановлювався нормально до дії лазерного пучка, що фокусувався довгофокусною лінзою ($f=150$ мм). Зразок розміщувався на відстані 20-25 мм від фокуса перед сходженням пучка в фокус.

2.2. Матеріали та методи дослідження

Сталь 12X18H10T - це один з найбільш популярних і затребуваних сплавів на ринку України. Матеріал стійкий до корозії і впливу хімічно активних сполук, має велику механічну міцність і легко обробляється. Оптимальне поєднання високих експлуатаційних якостей і доступною вартості дозволяє використовувати цю сталь в різних галузях. Хімічний склад даної сталі можна побачити у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі марки 12X18H10T [9]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
до 0,12	до 0,8	до 2	9-11	до 0,02	до 0,035	17-19	до 0,3	0,4-1	~67

Сталь 12X18H10T – однофазна, нержавіюча сталь аустенітного класу. Основними легувальними елементами є Cr-Ni. Сталь має стійку структуру однорідного аустеніту з незначним вмістом карбідів Ti (Рис. 2.4).

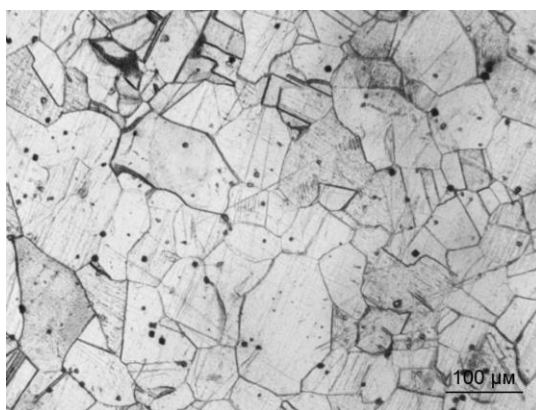


Рисунок 2.4 — Мікроструктура сталі 12X18H10T у вихідному стані

Хімічний склад сплаву безпосередньо впливає на фізичні і технічні властивості 12X18H10T. Хром, вміст якого в цій сталі складає 17-19%, являє собою основний елемент, що забезпечує здатність металу до пасивації і забезпечує її високу корозійну стійкість. Легування нікелем переводить сталь в

аустенітний клас, що має принципово важливе значення, так як дозволяє поєднувати високу технологічність сталі з унікальним комплексом експлуатаційних характеристик. У присутності 0,1% вуглецю сталь має при більше 900 °С повністю аустенітну структуру, що пов'язано з сильним аустенітоутворюючим впливом вуглецю. Співвідношення концентрацій хрому і нікелю робить специфічний вплив на стабільність аустеніту при охолодженні температури обробки на твердий розчин (1050-1100 °С). Крім впливу основних елементів, необхідно враховувати також присутність в сталі кремнію, титану та алюмінію, що сприяють утворенню фериту.

Сталь 12Х18Н10Т володіє високими механічними та експлуатаційними властивостями, що дозволяє використовувати її в різних галузях промисловості і в побуті (Табл. 2.2). З харчової нержавіючої сталі виготовляють посуд, кухонне начиння і аксесуари. Для потреб хімічної промисловості з цього сплаву роблять ємності і трубопроводи для зберігання і транспортування різних агресивних речовин - азотної, оцтової, фосфорної кислоти, а також з'єднань на їх основі.

Таблиця 2.2 — Механічні властивості сталі 12Х18Н10Т при підвищених температурах.

Температура випробування, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, кДж / см ²
Гартування 1050-1100 °С, охолодження на повітрі					
20	225-315	550-650	46-74	66-80	215-372
500	135-205	390-440	30-42	60-70	196-353
550	135-205	380-450	31-41	61-68	215-353
600	120-205	340-410	28-38	51-74	196-358
650	120-195	270-390	27-37	52-73	245-353
700	120-195	265-360	20-38	40-70	255-353

2.3. Растровий електронний мікроскоп JSM-6700F

Мікроаналіз поверхневих шарів та знаходження елементарного складу здійснювався за допомогою растрового електронного мікроскопа JSM-6700F.

Растровий електронний мікроскоп (РЕМ) - прилад класу електронний мікроскоп, призначений для отримання зображення поверхні об'єкта з високим

(до 0,4 нанометра) просторовим розширенням, також дає можливість отримувати інформацію про склад, будову та деякі інші властивості приповерхневих шарів. Заснований на принципі взаємодії електронного пучка з досліджуваним об'єктом. Сучасний РЕМ дозволяє працювати в широкому діапазоні збільшень приблизно від 3-10 крат (тобто еквівалентно збільшенню сильної ручної лінзи) до 1 000 000 крат, що приблизно в 500 разів перевищує межу збільшення кращих оптичних мікроскопів [10,11].

Характерні рентгенівські випромінювання утворюються, коли електронний промінь виймає електрон з внутрішньої оболонки зразка, внаслідок чого електрон вищої енергії заповнює оболонку і вивільняє енергію. Енергію або довжину хвилі цих характерних рентгенівських променів можна виміряти за допомогою енергодисперсної рентгенівської спектроскопії або рентгенівської спектроскопії, що диспергує довжину хвилі, і використовувати для ідентифікації та вимірювання кількості елементів у зразку та відображення їх розподілу. Завдяки дуже вузькому електронному промені мікрофотограми СЕМ мають велику глибину поля, що дає характерний тривимірний вигляд, корисний для розуміння структури поверхні зразка [12-14].

3. Результати досліджень

Дослідження проводили на сталі 12X18H10T після обробки фемтосекундним лазером за різними режимами (Рис. 3.1). На зразку у формі прямокутника розміром $10 \times 8,5$ мм було проведено обробку фемтосекундним лазером за 18 режимами (Табл. 3.1.). За неперервної дії лазерного пучка було одержано 6 доріжок (1-6), за точкової дії фемтосекундного лазера, різними режимами – 12 точок (12-18).

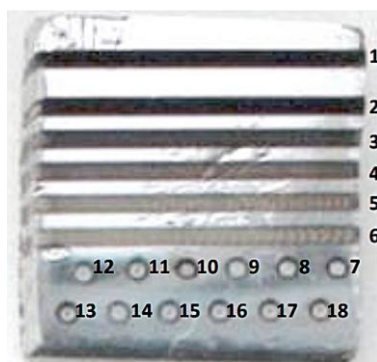


Рисунок 3.1 — Зовнішній вигляд досліджуваного зразка

Таблиця 3.1 — Режими обробки фемтосекундним лазером за тривалості імпульсу $t_{\text{імп}} = 140 \cdot 10^{-15} \text{ с}$ (140 фс) та довжині хвилі $\lambda = 800 \text{ нм}$

№	Швидкість лазерної обробки V, мм/с	Тривалість лазерного опромінення t, с	Потужність P, МВт	Частота f, Гц
1	0,4	-	805	100
2	1	-		
3	3	-		
4	5	-		
5	8	-		
6	10	-		
7	-	2	795	
8	-	1		
9	-	0,5		
10	-	5		
11	-	5	170	200
12	-	2		
13	-	10		
14	-	1		
15	-	2		
16	-	3		
17	-	4		
18	-	5		

Для більш детального вивчення впливу обробки на структуру поверхні сталі 12X18H10T було проведено мікроструктурні дослідження на растровому електронному мікроскопі JSM-6700F. Після всіх режимів обробки на мікроструктурі видно темні (борозенки) та світлі (розплавлений в результаті дії лазерного променя метал) ділянки, які формують лазерно індуковані

періодичні поверхневі структури (ЛППС). Орієнтація цих структур перпендикулярна лінійній поляризації лазерного поля. Але було виявлено, що зміна режиму обробки змінює мікрорельєф поверхні, форму і розміри сформованих фрагментів структури (рис.3.2-3.7).

За швидкості сканування променю $V=0,4$ мм/с немає чітко вираженої періодичності: світлі ділянки переривчасті, нерівномірні за розмірами, частково розгалужені, а їх чергування із темними ділянками є безсистемним (Рис. 3.2).

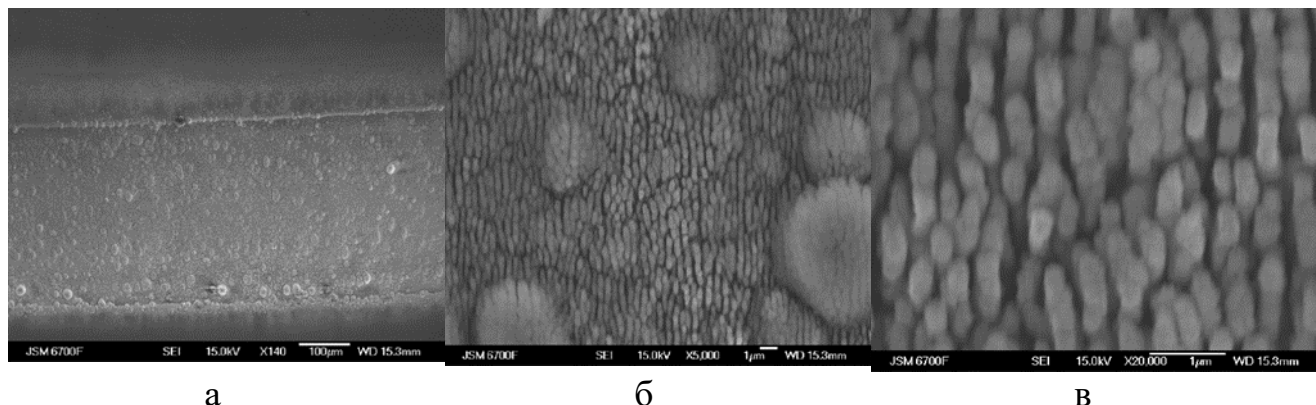


Рисунок 3.2 — Мікроструктура сталі 12X18H10T після лазерної обробки за режимом 1: а – збільшення 140; б – збільшення 5000; в – збільшення 20000

При збільшенні швидкості сканування фемтосекундного лазерного променю до $V=1,0$ мм/с картина змінюється незначно (Рис.3.3).

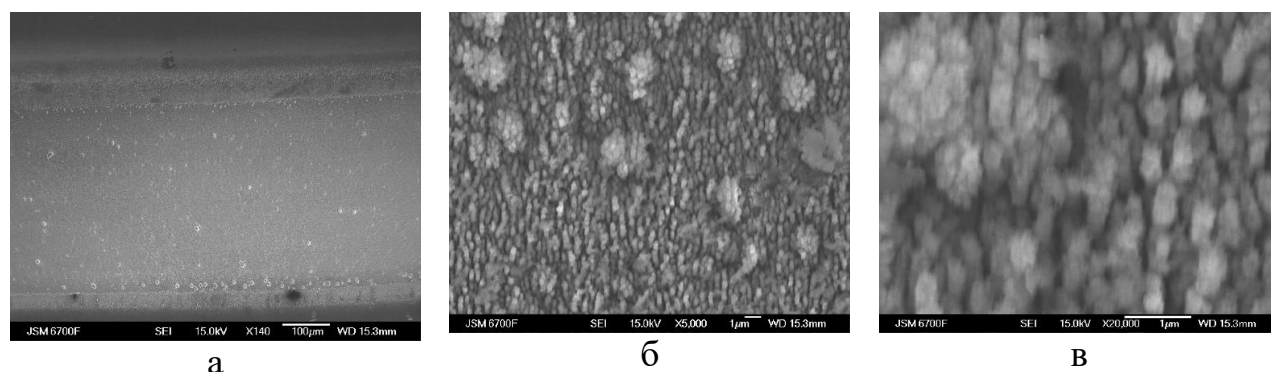


Рисунок 3.3 — Мікроструктура сталі 12X18H10T після лазерної обробки за наступним режимом 2: а – збільшення 140; б – збільшення 5000; в – збільшення 20000

Зі збільшенням швидкості сканування фемтосекундного лазерного променю до $V=3,0$ мм/с та $V=5,0$ мм/с за незмінної потужності та частоти структурний стан поверхні змінюється – утворюється багаторівневий рельєф,

представлений витягнутими мікроструктурами, які ще подекуди перериваються. На поверхні спостерігаються частинки округлої форми, які мають світле забарвлення (Рис. 3.4, 3.5).

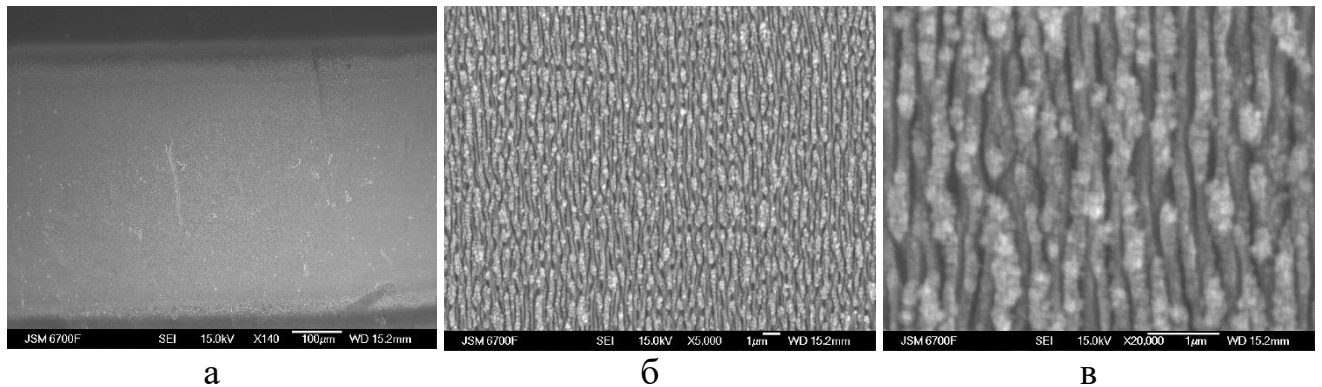


Рисунок 3.4 — Мікроструктура сталі 12X18H10T після лазерної обробки

за режимом 3: а – збільшення 140; б – збільшення 5000; в – збільшення 20000

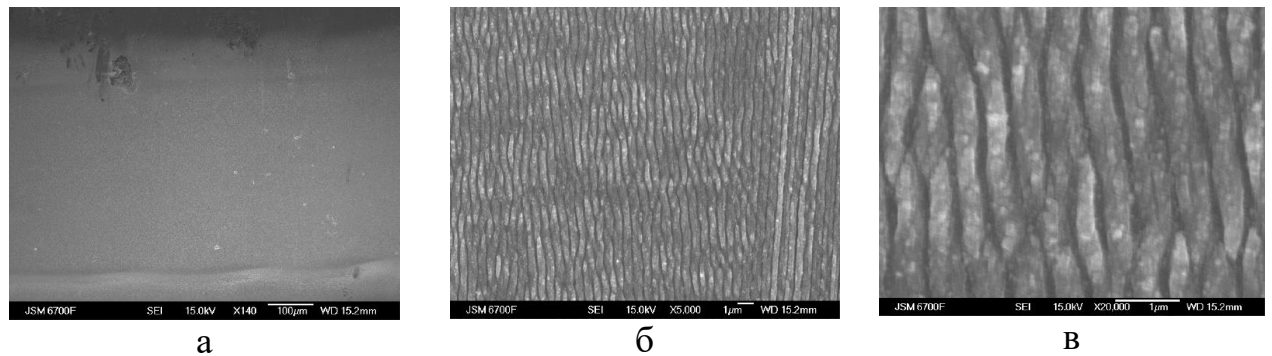


Рисунок 3.5 — Мікроструктура сталі 12X18H10T після лазерної обробки

за режимом 4: а – збільшення 140; б – збільшення 5000; в – збільшення 20000

При подальшому збільшенні швидкості сканування фемтосекундного лазерного променя до 8,0 - 10,0 мм/с формуються періодичні поверхневі структури з чітко окресленими майже безперервними уоднорідними фрагментами мікроструктури (Рис. 3.6, 3.7). На мікровиступах борозенок можна побачити різноманітні наноутворення, переважно округлої форми. Для їх ідентифікації необхідно провести додаткові дослідження.

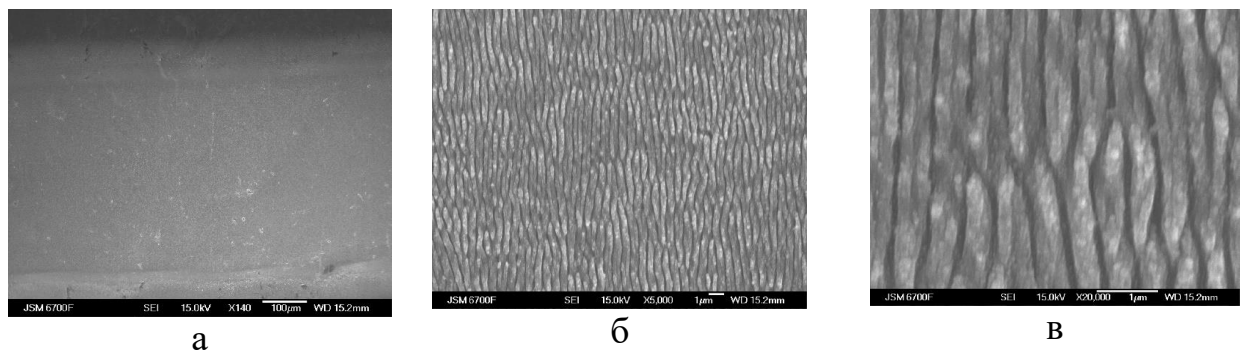


Рисунок 3.6 — Мікроструктура сталі 12Х18Н10Т після лазерної обробки за наступним режимом 5: а – збільшення 140; б – збільшення 5000; в – збільшення 20000

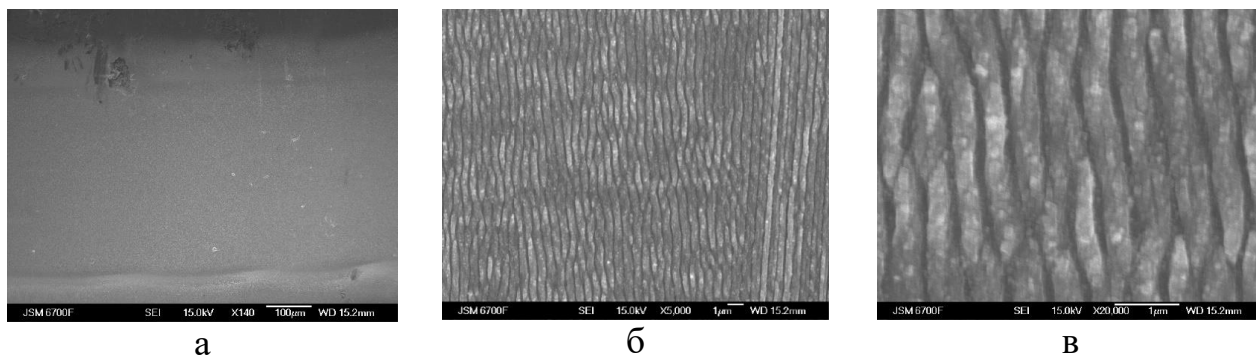


Рисунок 3.7 — Мікроструктура сталі 12Х18Н10Т після лазерної обробки за наступним режимом 6: а – збільшення 140; б – збільшення 5000; в – збільшення 20000

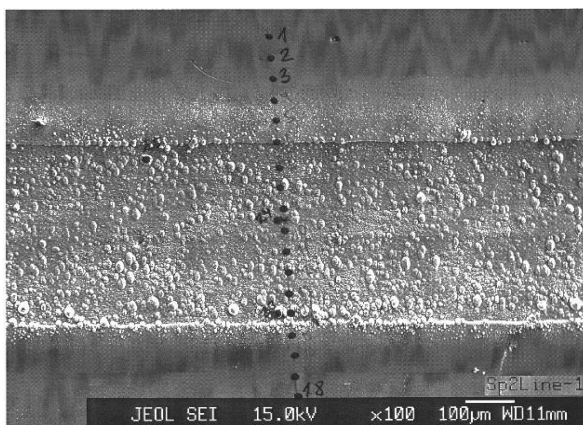
Проаналізувавши отримані мікроструктури можна сказати, що швидкість сканування лазерного променя, має значний вплив на формування поверхневих шарів. Утворення своєрідного мікрорельєфу поверхні на сталі 12Х18Н10Т можна пояснити складним процесом твердіння оплавлених поверхневих шарів. Зокрема при цьому інтенсифікуються процеси дифузії легувальних елементів сталі до поверхні та прискорюються можливі хімічні реакції. Крім того, збільшення швидкості охолодження та наслідки гідродинамічного удару можуть ініціювати фазові перетворення, фрагментацію та подрібнення мікроструктури.

Зміна мікрорельєфу поверхні опроміненого матеріалу відбувається внаслідок комплексного впливу багатьох факторів: потужності лазерного випромінювання, швидкості сканування лазерного променя за поверхнею, тривалості дії імпульсу на матеріал, процесів випаровування оплавленого матеріалу з утворенням плазми, наступної конденсації на поверхні, контакту ударних хвиль плазмового факела з поверхнею або процесів чистої абляції [15].

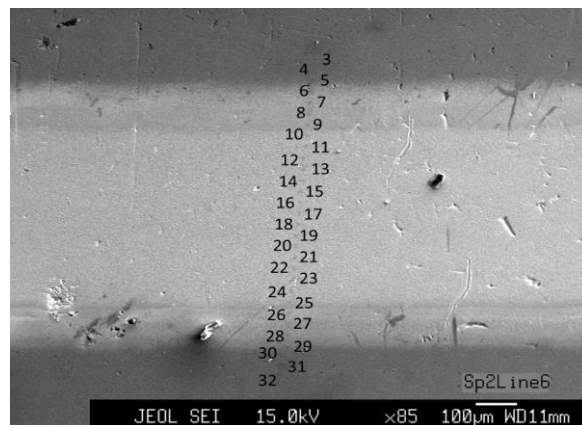
Для пояснення отриманих результатів необхідно відмітити, що основні особливості ультракороткої дії на метали пов'язані з високою швидкістю та

об'ємним характером виділення енергії лазерного випромінювання. Висока швидкість нагрівання конденсованого середовища пов'язана з швидкими фазовими трансформаціями речовини, переносом через фазові границі потужних потоків маси та енергії. Винесення енергії потоком речовини в сукупності з об'ємним механізмом виділення енергії лазерного випромінювання сприяють нагріванню поверхонь розділу фаз до температур, що значно перевищують рівноважні значення температур плавлення і випаровування. В силу тих же причин поблизу опромінюваних поверхонь в твердій і рідкій фазах формуються області температурних максимумів імпульсу [16].

Швидке нагрівання матеріалу, висока швидкість плавлення та відносно повільна передача енергії за рахунок теплопровідності призводять до суттєвого перегрівання твердої фази. Максимальна швидкість плавлення при $\tau = 10 \cdot 10^{-13} - 10 \cdot 10^{-15}$ с досягає швидкості звуку в твердому тілі. Це сприяє, з одного боку, створенню умов для виникнення ударної хвилі у твердій фазі, а з іншого - сприяє максимальному перегріванню. При збільшенні швидкості сканування ці процеси інтенсифікуються, що спричиняє комплекс фазових та хімічних перетворень. В нашому випадку через багатокomпонентність сталі однозначного фазового складу поверхневого шару виявити було неможливо, але було визначено елементний склад поверхні мікрорентгеноспектральним аналізом за допомогою растрового електронного мікроскопа JSM-6700F. Ми отримали масову долю кожного компонента сталі 12X18H10T після обробки фемтосекундним лазером. Даний аналіз проводили для двох режимів обробки: з найменшою (режим 1) та найбільшою (режим 6) швидкістю сканування фемтосекундного лазерного променя. Елементний аналіз проводили точково (Рис.3.8).



а



б

Рисунок 3.8 — Мікроструктура сталі 12X18H10T після обробки фемтосекундним лазером: а- режим 1; б – режим 6

Було встановлено, що розподіл на поверхні основних елементів, що входять до складу сталі 12X18H10T (Fe, Cr, Ni, Ti) є нерівномірним та змінюється зі зміною швидкості сканування фемтосекундним лазером (Табл. 3.2, 3.3).

Таблиця 3.2 — Елементний склад поверхневого шару сталі 12X18H10T в різних точках після обробки фемтосекундним лазером за режимом 1

Номер точки №	Cr	Mo	Si	Ni	Ti	Fe	Mn
3	18.268	0.063	0.613	9.88	0.338	68.375	1.441
4	17.316	0.11	0.527	8.913	5.824	62.62	1.347
5	18.106	0.075	0.631	9.939	0.553	68.165	1.41
6	16.347	0.075	0.72	8.823	0.386	58.965	1.562
7	15.094	0.065	0.74	7.893	0.511	51.424	1.849
8	10.047	0.007	1.872	7.067	0.265	39.789	3.694
9	13.503	0.022	2.235	7.297	0.397	48.748	2.46
10	14.526	0.05	1.424	8.149	0.265	55.813	2.205
11	13.949	0.024	2.174	7.433	0.263	51.359	2.683
12	15.852	0.049	1.56	7.049	0.291	52.275	2.368
13	15.474	0.071	1.787	8.052	0.31	56.284	2.328
14	18.199	0.034	0.473	9.263	0.632	65.552	1.717
15	15.11	0.023	1.615	7.696	0.337	55.426	2.15
16	16.765	0.047	1.061	8.344	0.288	59.873	1.833
17	13.027	0.034	1.199	8.722	0.357	43.954	2.177
18	15.801	0.05	0.793	8.266	0.436	57.926	1.626
19	17.955	0.036	0.571	9.438	0.907	66.716	1.431
20	18.391	0.095	0.63	9.589	0.409	68.497	1.431

21	18.281	0.062	0.617	9.592	0.334	68.255	1.449
22	17.728	0.061	0.603	9.796	0.302	68.437	1.428
23	11.272	0.059	1.751	6.741	0.277	39.051	2.886
24	14.703	0.025	1.89	7.803	0.681	52.276	2.592
25	13.695	0.042	1.301	7.769	0.4	51.811	2.316
Min	10,047	0,007	0,473	7,049	0,263	39,789	1,347
Max	18,391	0,11	2,235	9,939	5,824	68,497	3,694

Аналіз результатів елементного аналізу зразка, обробленого за режимом 1 (швидкість сканування лазерного променя $V=0,4$ мм/с, потужність 805 мВт, частота 1 кГц, довжини хвилі 800 нм, тривалості імпульсу 140 фс) показав, що в різних точках спостерігається коливання елементного складу сталі 12X18H10T. Так, мінімальний вміст Fe складає 39,789 %, максимальний - 68,497 %, мінімальний вміст Cr - 10,047 %, максимальний - 18,391 %, мінімальний вміст Ni - 7,049 %, максимальний - 9,939 %, мінімальний вміст Ti - 0,263 %, максимальний - 5,824 % (Рис. 3.9). Як видно (Рис. 3.8, а) точка 23 розташована на виступі. Згідно проведеного аналізу, в даній точці спостерігається значне зниження масової відсоткової частки всіх елементів, сумарна кількість яких в цій точці складає 62,037 %.

При збільшенні швидкості сканування фемтосекундного лазерного променя до $V=10,0$ мм/с за однакових інших параметрів (режим 6), розподіл масової відсоткової частки елементів змінюється (Табл. 3.3).

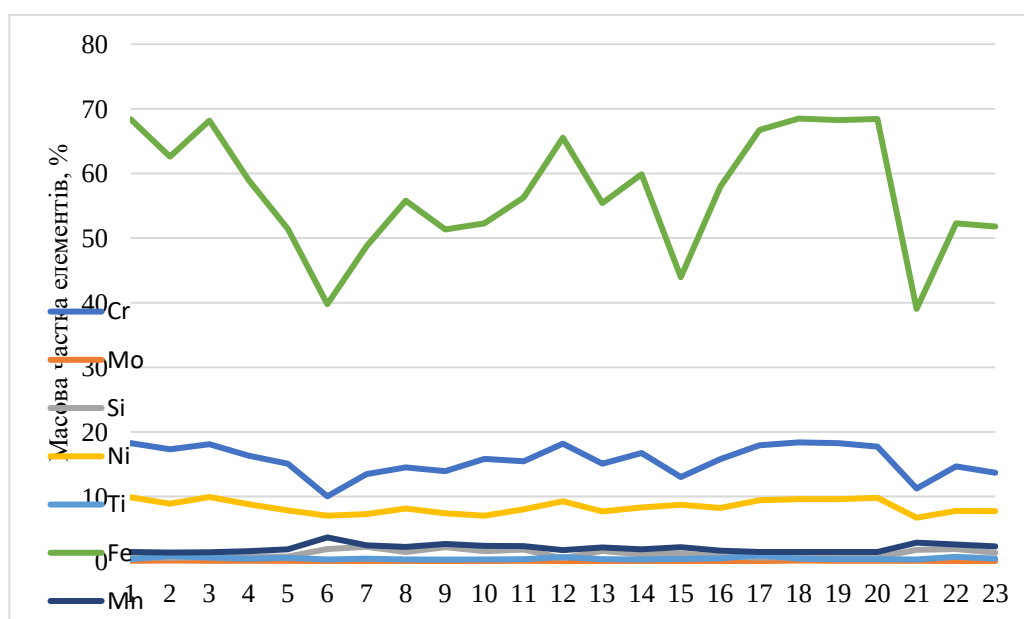


Рисунок 3.9 — Розподіл основних елементів сталі 12X18H10T після

обробки фемтосекундним лазером за режимом 1

Таблиця 3.3 — Елементний склад поверхневого шару сталі 12Х18Н10Т в різних точках після обробки фемтосекундним лазером за шостим режимом

Номер точки №	Cr	Mo	Si	Ni	Ti	Fe	Mn
1	19.2547	0.0505	1.2079	9.2359	0.4031	68.4064	1.4416
2	19.0761	0.0165	1.1571	9.3733	0.3899	68.6535	1.3336
3	19.0337	0.0349	1.189	9.214	0.3457	68.7789	1.4038
4	19.4873	0.055	1.1221	9.1163	0.6722	68.1465	1.4007
5	19.5055	0.0331	1.1379	9.2301	0.4963	68.1443	1.4529
6	19.4523	0.0499	1.1124	9.1418	0.7408	68.1634	1.3393
7	15.6571	0.2303	0.6888	6.9561	1.6918	58.4545	1.3215
8	19.4177	0.0263	1.2848	9.3136	0.4781	67.9127	1.5669
9	19.5281	0.0085	1.1904	9.5277	0.3755	67.8328	1.537
10	19.2072	0.0252	1.4614	9.3056	0.5274	67.9444	1.5288
11	18.9736	0.06	1.6226	9.267	0.5894	67.7613	1.7262
12	18.9326	0.0349	1.5967	9.3826	0.2798	68.0763	1.6971
13	18.907	0.0401	1.3847	9.281	0.3865	68.2656	1.7351
14	19.1076	0.0511	1.6649	9.0148	1.3193	67.0408	1.8015
15	19.5936	0.0203	1.4854	9.0188	0.3905	67.7873	1.7041
16	18.9334	0.0354	1.366	9.0362	1.0589	67.9293	1.6409
17	19.3256	0.0215	1.4599	9.2114	0.3826	68.0647	1.5342
18	19.6348	0.04	1.3726	8.9395	0.3737	68.0083	1.6311
19	19.4628	0.0306	1.5129	9.2933	0.4457	67.5762	1.6785
20	19.1357	0.0354	1.5916	9.0478	1.2563	67.2447	1.6885
21	19.2244	0.0304	1.3714	9.1245	0.4845	68.1761	1.5885
22	19.1606	0.0141	1.3521	9.3619	0.3023	68.1237	1.6852
23	19.3562	0.0299	1.5746	9.1991	0.2521	67.9164	1.6717
24	18.9721	0.0347	1.1754	8.8528	1.8887	67.3677	1.7087
25	19.0156	0.021	1.4327	9.4036	0.321	68.0707	1.7353
26	18.93	0.0246	1.5494	9.2422	0.3918	68.1099	1.7522
27	19.1483	0.0323	1.3661	9.3228	0.8609	67.6473	1.6222
28	18.8576	0.0397	1.2267	9.2797	0.8364	68.17	1.59
29	16.1651	0.1112	0.8166	7.44	0.7673	48.7649	0.9349
30	19.1461	0.0439	1.1701	9.6245	0.8692	67.7106	1.4355
31	19.3824	0.0178	1.1526	9.4028	1.4855	67.1409	1.418
32	19.198	0.0356	1.1612	9.3675	0.3527	68.471	1.414
Min	18.8576	0.0085	0.8166	6.9561	0.321	48.7649	1.3215

Max	19.6348	0.1112	1.6649	9.6245	1.8887	68.7789	1.8015
-----	---------	--------	--------	--------	--------	---------	--------

Було встановлено, що мінімальний вміст Fe складає 48,7649 %, максимальний – 68,7789 %, мінімальний вміст Cr – 18,8576 %, максимальний – 19,6348 %, мінімальний вміст Ni – 6,9561 %, максимальний – 9,6245 %, мінімальний вміст Ti – 0,321%, максимальний – 1,8887 % (Рис. 10). В точці 7 і 29 спостерігається значне зниження вмісту всіх елементів, сумарна кількість яких становить 85,0001 та 74, 9957 % відповідно. Скорше всього це пов'язано з наявністю у цих точках вторинних включень, найімовірніше оксидів. Якщо процес лазерної обробки здійснюється на повітрі, то на поверхні сталі 12X18H10T (яка містить 71% Fe; 0,12% C; 18% Cr; 10% Ni, а також незначну кількість легувальних елементів) будуть протікати реакції взаємодії основних компонентів сталі та повітря між собою. Згідно літературних джерел, при нагріванні сталі 12X18H10T до температури 799 К в атмосфері, на поверхні утворюється багатокомпонентна плівка з фазовим складом : Fe_2O_3 , CrO_2 , NiO . За температур 700–1000 К CrO_2 частково відновлюється Cr_2O_3 , фазовий склад плівки стає іншим: Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , NiO . При недостатній кількості кисню, коли вірогідність утворення FeO и NiO велика, найбільш вірогідним є утворення подвійних оксидів: за температур нижче 1000 К це FeCr_2O_4 . Так як процентний вміст заліза в сталі більше, ніж інших елементів, то його надлишок буде зв'язуватись у простий оксид Fe_2O_3 [17]. Експериментальні дані підтверджують можливість утворення після обробки фемтосекундним лазером подвійного оксиду FeCr_2O_4 на внутрішньому шарі (підложка-плівка) та утворення простих оксидів заліза на зовнішньому шарі (плівка-повітря) [18].

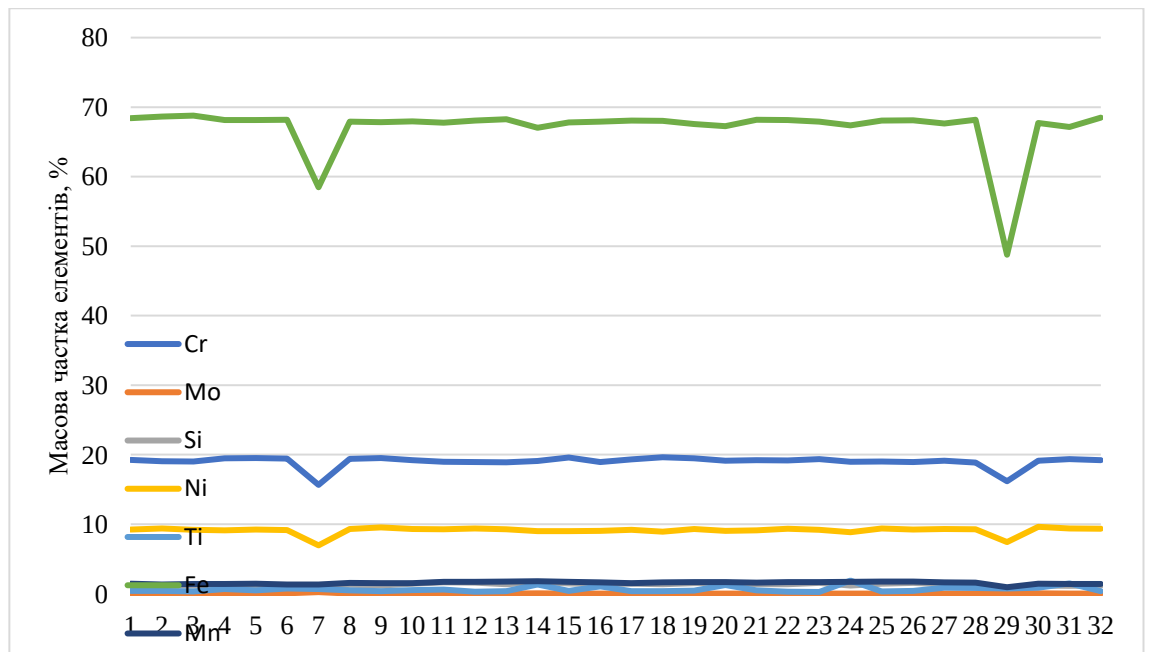
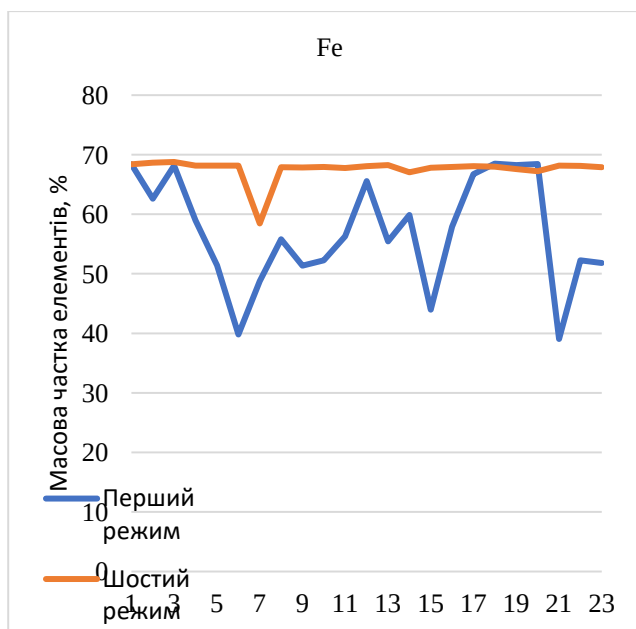
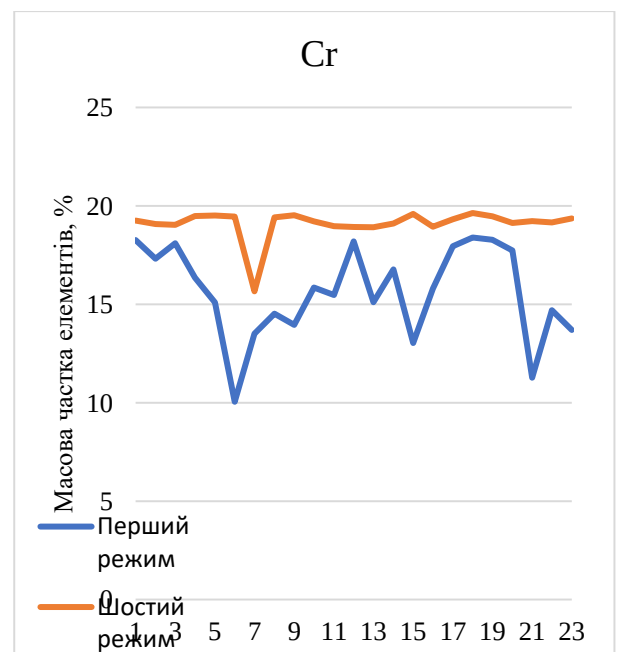


Рисунок 3.10 — Елементний склад сталі 12Х18Н10Т після обробки фемтосекундним лазером за режимом 6

Як видно елементний склад поверхневого шару сталі значною мірою залежить від швидкості сканування поверхні фемтосекундним лазером (Рис. 3.11).



а



б

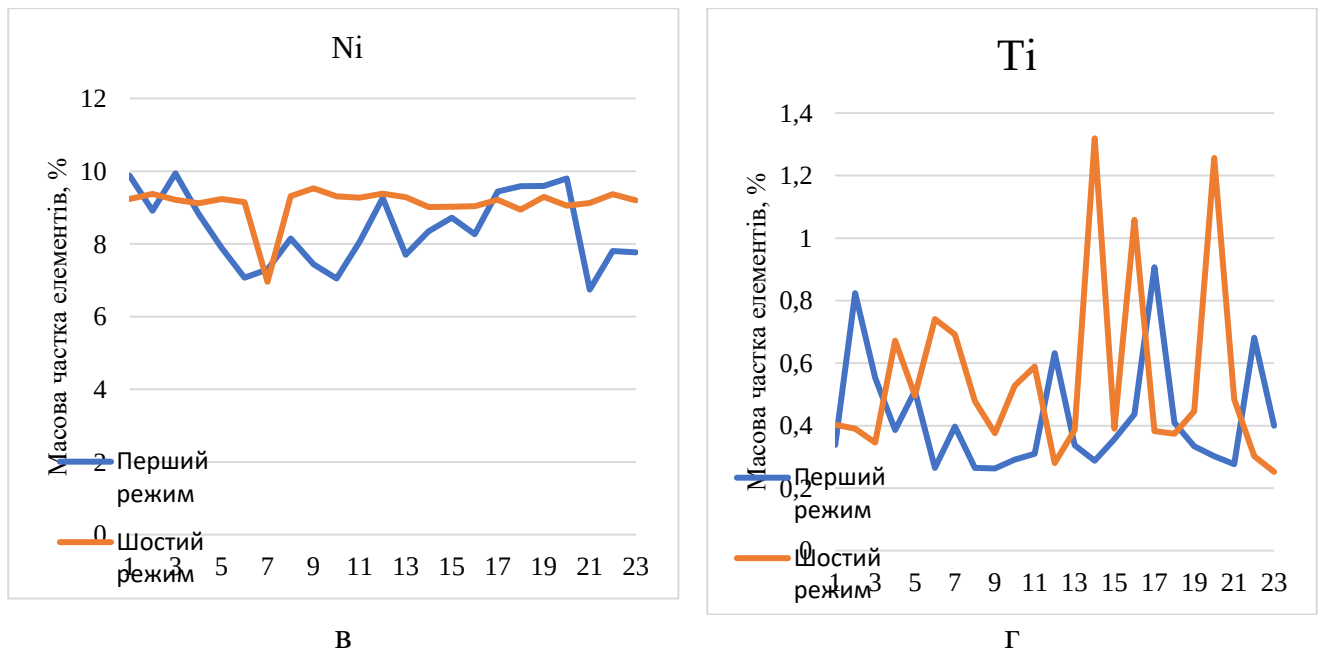


Рисунок 3.11 — Порівняння елементного складу сталі 12X18H10T після обробки фемтосекундним лазером за різними режимами: а – за вмістом Fe; б - за вмістом Cr; в - за вмістом Ni; г – за вмістом Ti

При першому режимі спостерігаємо нестабільний вміст хімічних елементів в різних точках, масова частка всіх елементів є меншою, ніж у сталі 12X18H10T у вихідному стані. За шостим режимом елементний склад є стабільнішим (Fe, Cr, Ni), масова частка елементів майже відповідає стандартизованому хімічному складу для даної сталі.

ВИСНОВКИ

1. Швидкість сканування лазерного променя, має значний вплив на формування поверхневих шарів 12X18H10T. При малих швидкостях сканування на поверхні немає чітко вираженої періодичності структури. При високих швидкостях сканування формуються періодичні поверхневі структури з чітко окресленими майже безперервними уоднорідними фрагментами мікроструктури

2. Було встановлено хаотичне розміщення хімічних елементів на поверхні сталі 12X18H10T після обробки фемтосекундним лазером за першим режимом (швидкість сканування лазерного променя $V=0,4$ мм/с). При збільшенні швидкості сканування до $V=10,0$ мм/с у поверхневих шарах

елементний склад є майже однорідним по всій обробленій поверхні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kolobov Yu.R., Valiev R.Z. et al., Grain Boundary Diffusion and Properties of Nanostructured Materials. - Cambridge International Science Publishing, 2007, 250 pp
2. П.Г. Крюков Лазеры ультракоротких импульсов, Квантовая электроника, 31, № 2 (2001), стр. 95
3. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці. Навчальний посібник // О.К. Шуаїбов, І.І. Опачко, І.Е. Качер, М.П. Чучман, - Ужгород. Ужгородський національний університет, фізичний та інженерно-фізичний факультети. 2009. - с.238.
4. Dr. Rüdiger Paschotta, lasers emitting light pulses with durations between a few femtoseconds and hundreds of femtoseconds, *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, 1. edition October 2008
5. Zhao, Q.Z.; Malzer, S.; Wang, L.J. Formation of subwavelength periodic structures on tungsten induced by ultrashort laser pulses. *Opt. Lett.* 2007, 32, 1932–1934
6. George Amoako. Femtosecond Laser Structuring of Materials : A Review. - Опубліковано Канадським центром науки і освіти. - 03.04.2019. – 11 с.
7. Chichkov, B.N.; Momma, C.; Nolte, S.; vonAlvensleben, F.; Tunnermann, A. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Appl. Phys. A* 1996, 63, 109–115
8. Часороздільні методи для фемтофотоніки наноструктур / І.В. Блонський, І.М. Дмитрук, М.Г. Зубрілін, В.М. Кадан, П.І. Коренюк, І.А. Павлов, В.О. Сальников // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології: Зб. наук. пр. — К.: РВВ ІМФ, 2008. — Т. 6, № 1. — С. 45–74.
9. ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. – Взамен ГОСТ 5632-61: Введ. 27.12.72. –М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 38 с.

10. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Ф. //Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. – Мир.: 1984. – С 303
11. Stokes, Debbie J. // Principles and Practice of Variable Pressure / Environmental Scanning Electron Microscopy. – John Wiley & Sons Inc, 2008. – С. 13-14.
12. Goldstein, G. I.; Newbury, D. E.; Echlin, P.; Joy, D. C.; Fiori, C.; Lifshin, E.// Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis – New York: Plenum Press, – 1981, – С 6-9
13. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: – М.: Мир, 1984.-456 с..
14. D. E. Newbury. Image Formation in the Scanning Electron Microscope. – Springer, Boston, MA. – 1975. – С. 302-303.
15. Study of structure and morphology of surface layers formed on TRIP steel by the femtosecond laser treatment / Duriagina, Z.A., Tepla, T.L., Kulyk, V.V., Kosarevych, R.Y., Vira, V.V., Semeniuk, O.A. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. - 2019. - V. 93 (1-2). - P. 5-19.
16. Мажукин В. И., Мажукин А. В., Лобок М. Г. Динамика фазовых переходов и перегретых метастабильных состояний при нано-фемтосекундном лазерном воздействии на металлические мишени //Математическое моделирование. – 2009. – Т. 21. – №. 11. – С. 99-112.
17. Вейко В.П., Слободов А.А., Одинцова Г.В. Определение химических и фазовых превращений при импульсном лазерном облучении многокомпонентных сплавов на воздухе методами химической термодинамики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. №2 (84)
18. Jervisa T.R., Williamsonb D.L., Hirvonena J.P. Characterization of the surface oxide formed by excimer laser surface processing of AISI 304 stainless steel // Mater. Lett. – 1990. – V. 9. – P. 379–383.