

Ігор Андрійович Шапошник

старший науковий співробітник

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз

Служби безпеки України (Київ, Україна)

E-mail: shaposhnyk.igor@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9915-2674>**ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ МЕТАЛІВ НА ЇХ ЛАЗЕРНЕ РІЗАННЯ**

У цій роботі зосереджено увагу на проблемі та запропоновані попередні напрямки досліджень умов поглинання лазерного променя в металах і сплавах різного типу шорсткості, із забрудненнями та оксидами на поверхні. Проаналізовано різні механізми лазерного поглинання, що має важливе значення для вивчення лазерної обробки металів. Доведено, що поглинання лазерного світла залежить від низки різних параметрів, що містять і властивості лазера, і металу. Надано більш реалістичну інформацію про лазерне різання металів та сплавів в умовах виробництва й віддзеркалення лазерного світла поверхнями різного стану шорсткості.

Ключові слова: лазерні технології; лазерне різання; ручне лазерне різання; поглинання лазерного променя; відбиття лазерного променя; шорсткість поверхонь при лазерному різанні; кут нахилу лазерного інструменту.

Рис.: 1. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Використання лазерних технологій є наразі одним із найбільш прогресивних напрямків у промисловості, який в останні роки набув значного розвитку. Застосування лазерного випромінювання є ефективним процесом обробки різноманітних матеріалів. Лазерні технології відрізняються від традиційних методів обробки відсутністю контактних явищ у зоні обробки та можливістю дозованого інтенсивного підведення енергії до поверхні виробу; локальністю фізичних процесів у зоні термічного впливу та відсутністю значних деформацій оброблюваних деталей; можливістю обробки майже будь-яких матеріалів, незалежно від їх механічних властивостей, з високою якістю і продуктивністю. Дана технологія має високий рівень ефективності, а також екологічної чистоти. У деяких випадках лазерна технологія є єдиною для вирішення важливих технологічних завдань [1]. При лазерній обробці металів розуміння фундаментальних принципів поглинання поверхнею світла від лазерного променя відіграє важливу роль у визначенні оптимальних параметрів та умов обробки. Поглинання світла від лазерного променя залежить від низки різних параметрів. До них належать такі параметри лазера, як інтенсивність, довжина хвилі, поляризація та кут падіння, а також варто зазначити щодо параметрів матеріалу, таких, як: хімічний склад, температура, шорсткість, оксидні шари та забруднення на поверхні. Великі теоретичні та експериментальні дані про поглинання світла різноманітними матеріалами з чистими гладкими, вільними від забруднень поверхнями контрастують з відносно обмеженою інформацією про метали та сплави, що використовуються в реальних умовах виробництва [4].

Вищезазначені умови поглинання та відбиття лазерного променя від різних типів поверхонь вкрай важливі при ручній лазерній обробці металів та сплавів, особливо при різанні, коли промінь сфокусований у вузький пучок при високій потужності та частоті. При ручному різанні металів з малою шорсткістю складно зберігати кут нахилу інструменту відносно поверхні, тому відбиття променя від неї може завдати шкоди як оператору, так і обладнанню. Враховуючи ці фактори, дослідження таких умов обробки поверхонь металів та сплавів особливо важливі.

Постановка проблеми. Обробка металів лазерами досягла високого рівня розвитку та широкого застосування у промисловості. Лазерні технології використовуються для різання, свердління, зварювання, формування, гравіювання, маркування, загартування та інших форм обробки поверхні металів у широкому спектрі сучасних галузей промисловості, а саме: автомобільній, аерокосмічній, мікроелектронній та суднобудівній промисловості.

Загальним принципом для всіх лазерних технологій є те, що сфокусоване лазерне світло перетворюється на тепло всередині матеріалу. У галузі оптики дослідження взаємодії

світла з металами зазвичай зосереджувалися на чистих металевих елементах з максимально гладкими та чистими поверхнями. Це зрозуміло з погляду пошуку дотичних точок з існуючими теоріями фізики твердого тіла. Однак, метали та сплави, що зустрічаються в реальних умовах обробки лазерами, мають різні варіанти текстури та шорсткості, а також шари оксидів на своїх поверхнях. Обмежена кількість експериментальних даних та математичних моделей для цих видів неідеальних, але більш реалістичних поверхонь, є обмеженням для застосування лазерної обробки металів та сплавів. Отже, для отримання більш точних даних про поглинання лазерного світла та вирішення проблем теплопровідності при лазерній обробці різних поверхонь необхідні дослідження.

Основною мотивацією для цього дослідження було надання більш реалістичної інформації про лазерне різання металів та сплавів в умовах виробництва й віддзеркалення лазерного світла поверхнями різного стану шорсткості, а також при наявності шарів оксидів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світло, що падає на поверхню матеріалу, може відбиватися, проходити крізь нього або поглинатися. Всі ці явища відбуваються певною мірою. Для того щоб лазерна обробка була ефективною, лазерне світло має поглинатися матеріалом. У 2007 році це досліджували науковці Д. Бергстром, А. Каплан та Дж. Пауел з Технологічного університету Лулео, Швеція та прийшли до висновку, що поглинання лазерного променя матеріалами залежить від низки факторів. Основними серед яких є: інтенсивність, довжина хвилі, поляризація та кут падіння лазерного променя, а також властивості матеріалу, такі як: склад, температура, шорсткість поверхні, оксидні шари та забруднення. Також вищезазначеними науковцями було проведено дослідження щодо вимірювання та кількісної оцінки кількості лазерного світла, що поглинається металом, а також за допомогою лазерної калориметрії, вимірюючи коефіцієнт відбиття, використовуючи рефлектометри [4]. Ними було запропоновано математичні моделі, що використовуються для опису взаємодії між лазерним світлом та металеву поверхнею.

Дослідники з Дрезденського технологічного університету зосереджували свої дослідження на останніх розробках лазерного різання металів. Основну увагу вони приділили різанню потужними лазерами безперервного випромінювання в нижньому та високому інфрачервоному діапазонах. Також були досліджені останні розробки в галузі різання плавленням товстих листів металів, зокрема, досліджено позитивний вплив динамічного формування променя. Науковцями надано аналіз майбутніх тенденцій лазерного різання [6].

Учені з Національного технологічного інституту, Аллахабад, Індія, вивчаючи застосування лазерного променя для різання світловідбиваючих листових металів, таких, як алюміній, запропонували метод оптимізації якості, який називається методологією Тагучі, для пошуку оптимальних параметрів різання світловідбиваючого листа. Всі кроки методу Тагучі, а саме: вибір ортогонального масиву, обчислення співвідношення сигнал/шум, визначення оптимального налаштування параметрів та дисперсійний аналіз - були виконані за допомогою розробленого програмного забезпечення [7].

Більшість вищезазначених досліджень були зосереджені на вдосконаленні процесу лазерного різання та визначенні впливу різних параметрів лазерного променя й особливостей поверхні матеріалів на якість різання. Більшість матеріалів, що використовувалися в експериментах з лазерного різання, були або металами з чистою полірованою поверхнею, або з вкрай грубою поверхнею з великою шорсткістю обробки. Не було проведено порівняльного аналізу щодо впливу різних типів поверхонь на лазерне різання, особливо в умовах ручного режиму. Слід зазначити, що проведено мало експериментів з визначення тієї величини шорсткості поверхні, починаючи з якої відбитий від поверхні металу промінь може завдати шкоди оператору чи обладнанню. Наскільки відомо, жодні дослідження не були зосереджені на лазерному різанні полірованих поверхонь різноманітних металів та сплавів у ручному режимі з огляду на умови поглинання цими матеріалами лазерного променя.

Мета дослідження. У розділі фізики, що стосується оптики матеріалів, дослідження взаємодії світла з металами зазвичай зосереджувалися на чистих металевих елементах з максимально гладкими та чистими поверхнями. Для світла, що падає вертикально до поверхні, поглинання збільшується зі збільшенням шорсткості поверхні. Однак для світла, що падає під кутом до поверхні, залежність між поглинанням та шорсткістю поверхні є більш складною. Метали та металеві сплави, що зустрічаються в реальних умовах обробки лазерами, мають різні форми текстури та шорсткості поверхонь, а також мають шари оксидів зверху. Наприклад, у деяких випадках поглинання може зростати, падати та знову зростати зі збільшенням шорсткості поверхні. Через те, що глибина проникнення інфрачервоного та видимого світла в поверхню металу є невеликою (десятки нанометрів), поглинання є значною мірою поверхневим явищем і дуже сильно залежить від властивостей поверхні металу, а саме: шорсткості та текстури.

Метою цієї роботи є дослідження закономірностей поглинання лазерного випромінювання металами та сплавами з різним ступенем шорсткості, текстури поверхні, а також за наявності оксидних шарів і поверхневих забруднень в умовах, наближених до виробничих. Також увагу в статті зосереджено на отриманні експериментально та фізично обґрунтованих даних щодо поглинання лазерного світла металевими поверхнями з різним станом поверхні в промислових умовах обробки для підвищення ефективності технологічних процесів лазерного різання, що є важливим в умовах сучасного виробництва.

Виклад основного матеріалу. Обробка металів лазерами дуже поширена в сучасній промисловості. Великий спектр промислових лазерів використовується для різання, свердління, зварювання, гравіювання, маркування, загартування та інших форм обробки різних матеріалів, у тому числі металів та сплавів у широкому спектрі сучасних галузей промисловості.

Невдовзі після появи першого рубінового лазера в 1960 році почали з'являтися експериментальні дослідження впливу лазера на матеріали. Перші розроблені лазери були занадто слабкими та занадто нестабільними для будь-якого промислового використання, але сучасні лазери здатні обробляти різноманітні матеріали з надзвичайною ефективністю. Стають доступними вищі потужності лазера, розширена кількість довжин хвиль, досліджується та впроваджується все більше і більше застосувань лазера в промислових цілях. Для того щоб лазерна обробка матеріалу була можливою та ефективною, електромагнітна енергія лазерного світла повинна перетворюватись на теплову енергію всередині матеріалу. Саме цей тип енергії, та, що поглинена матеріалом, створює потрібний ефект для різання, зварювання, свердління тощо. Поглинання лазерного світла залежить від низки різних параметрів, що є характеристиками як лазера, так і матеріалу. Важливими параметрами лазера є довжина хвилі лазера, кут падіння променя на поверхню металу та поляризація променя, яка пов'язана з орієнтацією електричного поля у світловій хвилі. За деяких обставин вона також може залежати від інтенсивності, яка є, в свою чергу, комбінацією потужності та розміру фокусної плями лазерного променя. Основним параметром матеріалу, що визначає кількість поглиненого світла, є хімічний склад матеріалу, незалежно від того, чи маємо ми справу з чистим елементом (наприклад, мідь, залізо, алюміній тощо), чи зі сплавом (наприклад, латунь або легрована сталь) [5]. Але незалежно від складу, світло завжди взаємодіє з електронами всередині металу або сплаву, оскільки світло є електромагнітною хвилею, а електричні та магнітні поля взаємодіють лише із зарядженою речовиною (атомні ядра зазвичай настільки важкі, що їх не можна легко переміщувати, і їхнім впливом часто нехтують). Електрони будуть прискорюватися електричним полем, і через різні зіткнення з іншими складовими металу енергія буде передаватися до решітки атомної структури твердого тіла.

Коли енергія передається металу, він нагрівається, і з підвищенням температури кількість поглиненого світла може змінюватися, оскільки як електрони, так і атоми кристалічної решітки в металі отримують кінетичну енергію, що впливатиме на частоту зіткнень. Поглинання також сильно залежить від властивостей поверхні металу або сплаву. Більшість реальних поверхонь не є ідеально плоскими (навіть майже ідеальні дзеркала) і мають певний ступінь текстури та шорсткості, що впливає на їхню оптичну поведінку [10]. Заглиблення та западини можуть «затримувати» частину світла і тим самим посилювати поглинання. На рис. 1 показано поверхні металів від полірованої поверхні до забрудненої іржавої.

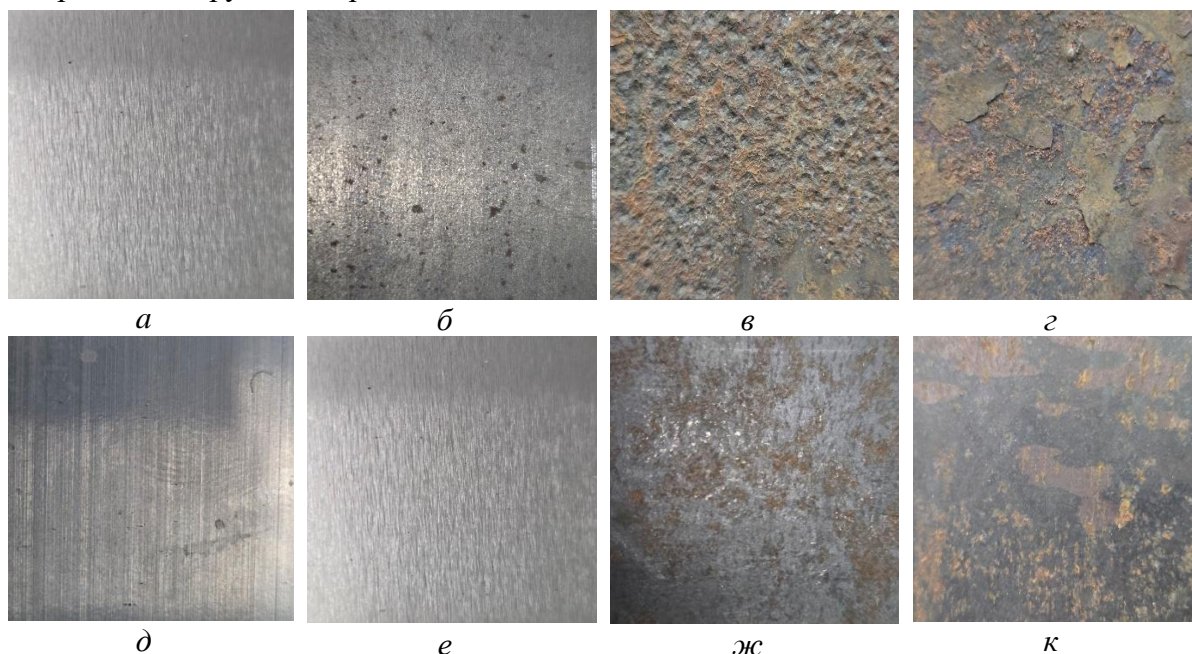


Рис. 1. Різні типи поверхонь металів

Джерело: розроблено авторами.

Метали також природно мають шар (або кілька шарів) оксидів на поверхні, і хімічні та оптичні властивості оксидів часто можуть дуже відрізнятися від властивостей металу або сплаву під ними. Тоді можливо, наприклад, отримати ситуацію, зображену на рис. 2, де світло проходить шаром оксиду, що може або збільшити поглинання, або відбитись від нього.

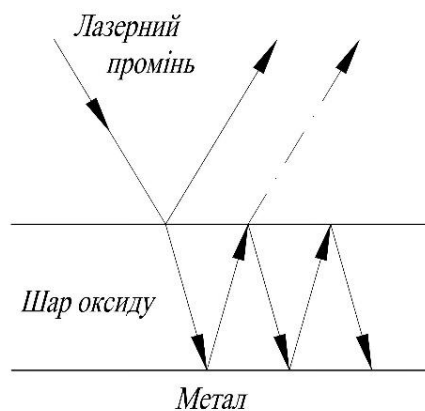


Рис. 2. Оксидна поверхня може як відбивати світло, так і поглинати.

Джерело: розроблено авторами.

Зрештою, такі забруднення, як: бруд, олія або пил - також змінюють потенціал поглинання металевої поверхні. Це може містити речовини, що залишилися на попередніх етапах обробки (таких як полірування або фрезерування), внаслідок гальванічної обробки або навіть при виготовленні прокату самого металу чи сплаву.

Отже, залежно від типу поверхні, з огляду на його шорсткість та оксидний шар, лазерний промінь може як поглинатись, так і відбиватись від поверхні. З галузі оптики твердого тіла маємо, що взаємодія світла з твердими матеріалами, містить явища поглинання, випромінювання, відбиття, проходження та розсіювання. Усі ці властивості фундаментально пов'язані з енергетичними станами електронів в атомах усередині твердого тіла, які утворюють енергетичні зони замість дискретних рівнів, як в окремих атомах. Поглинання світла відбувається, коли енергія фотона, що падає, відповідає різниці енергій між двома електронними станами, що переводить електрон на вищий енергетичний рівень. Натомість частина світла відбивається, коли зіштовхується з перепоною у вигляді межі між двома середовищами з різними показниками заломлення. Падіння лазерного променя на поліровану поверхню (де відсутній великий перепад у текстурі на поверхні) та забруднену іржаву поверхню показано на рис. 3.

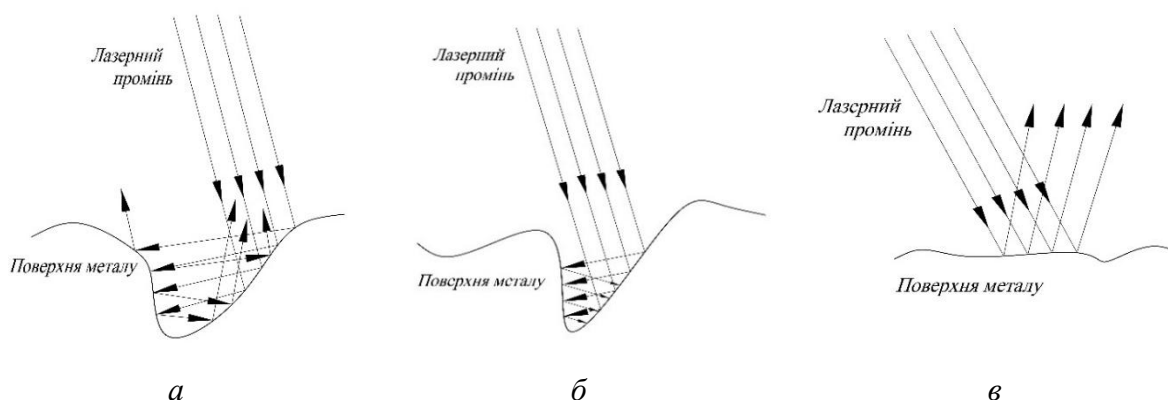


Рис. 3. Варіанти відбиття лазерного променя від різних поверхонь

Джерело: розроблено авторами.

Для того щоб лазерне різання було ефективним, лазерний промінь має поглинатися матеріалом. Для забезпечення ефективного процесу необхідно передати якомога більше енергії падаючого випромінювання на заготовку. Ця ефективність передачі описується поглинаючою здатністю зразка P . Поглинаюча здатність визначається як співвідношення між поглиненою енергією та енергією, що не була поглинена. Поглинаюча здатність змінюється під час процесу нагрівання та є функцією оптичних властивостей зразка, а також властивостей електромагнітної хвилі. Важливими властивостями в цьому відношенні для лазерного променя є потужність, довжина хвилі (γ), кут падіння, а також для матеріалу - це хімічний склад (наприклад, чисті метали, сплави, полімери, кераміка, композити тощо), температура, шорсткість поверхні, поверхневі та об'ємні дефекти та домішки (наприклад, частинки пилу, абразиви, тріщини, пори, оксиди тощо) [11].

Закон Бугера-Ламберта-Бера для металів описує процес експоненціального згасання електромагнітної хвилі (світла) при її проникненні вглиб металу. У фізиці твердого тіла він, зокрема, пояснює, чому метали є непрозорими. Для твердих тіл, зокрема металів, інтенсивність світла I на глибині z визначається формулою

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z}, \quad (1)$$

де I_0 – інтенсивність світла на поверхні металу, α – коефіцієнт поглинання, що характеризує здатність металу поглинати енергію, z – глибина проникнення світла в металі. Коефіцієнт поглинання своєю чергою пов'язаний з уявною частиною комплексного показника заломлення k та визначається за формулою

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\gamma}, \quad (2)$$

де γ – довжина хвилі. У металах є вільні електрони, які реагують на електричне поле світлової хвилі. Вони поглинають енергію фотонів, переходячи на вищі енергетичні рівні в межах зони провідності. Частина падаючого світла не поглинається, а відбивається від поверхні саме через взаємодію з електронним газом (металевий блиск). Для видимого світла коефіцієнт поглинання α у металів надзвичайно високий. Світло затухає вже на відстані близько 0,1 мкм від поверхні. Оптичну константу k можна розрахувати з комплексної діелектричної проникності

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2, \quad (3)$$

використовуючи рівняння

$$k^2 = (-\varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2})/2. \quad (4)$$

Залежність оптичної константи k від потужності світла, а також довжини хвилі та параметрів, що характеризують хімічний склад матеріал, викликає великий інтерес. Саме тому були розроблені різні методи для експериментального визначення цих властивостей, що занесені у спеціалізовані бази даних. Проте ці дані отримані здебільшого для чистих матеріалів за кімнатної температури з чистою та гладкою поверхнею.

Аналізуючи поглинання в металах в реальних умовах виробництва залежно від вищезазначених характеристик, необхідно зазначити, що загальна поглинаюча здатність P зразка буде дорівнювати сумі внутрішніх та зовнішніх факторів [9]. Можемо записати

$$P = P_{\text{вн}} + P_{\text{зовн}}, \quad (5)$$

де $P_{\text{вн}}$ – це поглинальна здатність, що визначається власними властивостями металу, $P_{\text{зовн}}$ – це поглинаюча здатність, що визначається зовнішніми умовами і містить різноманітні характеристики від шорсткості поверхні до оксидів, домішок та дефектів.

Велика розбіжність даних щодо поглинання в довідниковій літературі та відмінність між експериментальними даними й теорією головним чином пов'язані з тим, що якість поверхонь зразків, що досліджувались, далека від ідеальної. Отже, загальну поглинальну здатність не можна описати лише власними характеристиками металів, але також повинні, і часто значною мірою, враховуватись властивості стану поверхні. Основними показниками, що становлять науковий інтерес тут, є шорсткість поверхні, дефекти та домішки, а також оксидні шари. Вплив шорсткості поверхні на поглинальну здатність може проявлятися по-різному. Переходячи власне до різання металів сфокусованим лазерним променем високої потужності можна зазначити, що поглинання на ділянках поверхні, де кут падіння випромінювання є перпендикулярним до поверхні, збільшується. Також є великий вплив для збільшення поглинання від канавок, тріщини, нашарувань та сколів, які сприяють поширенню хвилеводів і тому можуть бути багаторазові відбиття вздовж нерівності поверхні. У дослідженнях залежності поглинання від шорсткості було розглянуто режим, коли шорсткість, що характеризується параметром шорсткості δ , дуже мала порівняно з довжиною хвилі лазера, тобто відношення δ/λ набагато менш як 1. Порівняльну оцінку поглинальної здатності поверхні з великою шорсткістю, P_r , у порівнянні з поглинальною здатністю дуже гладкої поверхні того ж матеріалу, $P_{\text{вн}}$, можна отримати за допомогою виразу

$$P_r \approx 1 - (1 - P_{\text{вн}})e^{-(4\pi\delta/\gamma)^2}. \quad (6)$$

Це рівняння було встановлено на основі припущення про гауссівський розподіл висоти шорсткості на поверхні. Дану формулу можна використовувати для загальних функцій розподілу шорсткості [10]. Однак не всі геометрії шорсткості призводять до посилення поглинання. Для перпендикулярно падаючого лазерного променя поглинання поверхні збільшується зі збільшенням шорсткості поверхні. Однак для світла, що падає під кутом, що не є перпендикулярним до поверхні, залежність між поглинанням та шорсткістю поверхні є складнішою. Наприклад, у деяких випадках поглинання може зростати, падати та знову зростати зі збільшенням шорсткості поверхні та зменшенням кута падіння променя.

При різанні металів, коли промінь падає на пласку гладку металеву поверхню під кутом не перпендикулярним до поверхні, він відбивається як звичайне світло з такими ж оптичними властивостями відбиття. Проте лазерний промінь для різання металу сфокусований у вузький пучок високої інтенсивності. Попадання такого променя, навіть відзеркаленого, на обладнання або людину може завдати великої шкоди. В умовах автоматизованого різання на спеціальних верстатах для збільшення поглинання промінь, що падає на зразок, налаштовують чітко перпендикулярно до поверхні, а також зменшують відстань від головки, звідки виходить промінь до деталі [11]. Однак якщо поверхня деталі шорстка, світло не відбивається від поверхні і повністю поглинається, що збільшує ефективність різання. Це відбувається навіть в умовах, коли промінь падає під кутом не перпендикулярним до поверхні. Якщо поверхня іржава, має тріщини та сколи, це теж сприяє підвищенню поглинання. Лазерне різання металів з блискучою або дзеркальною поверхнею (таких як мідь, латунь, алюміній або нержавіюча сталь) є технологічно складним процесом через високу відбивну здатність цих матеріалів. Зворотне відбиття променя може пошкодити оптичну систему лазера. Для безпечної та якісної обробки використовують оптоволоконні лазери. Їхня довжина хвилі (близько 1,07 мкм) значно краще поглинається металами, ніж у CO₂-лазерів, що мінімізує ризик відбиття та забезпечує стабільне різання. На поверхню металу іноді наносять захисну плівку або спеціальні поглинаючі суміші, які зменшують блиск і допомагають променю «зачепитися» за матеріал на початку процесу. Також іноді використовують азот або кисень, що запобігає окисленню та забезпечує чисту, дзеркальну кромку. Кисень, зазвичай, використовується для товстіших листів (наприклад, міді понад 2 мм), створюючи екзотермічну реакцію, яка прискорює процес. Максимальна товщина різання для кольорових металів зазвичай менша, ніж для сталі. Для алюмінію це товщина до 12-16 мм, для латуні – до 6-10 мм, а для міді – до 4-6 мм (через надвисоку теплопровідність та відбивну здатність). Більшість сучасних верстатів оснащені системами автоматичного захисту від відбитого випромінювання, які миттєво вимикають лазер у разі критичного відбиття променя [12].

Поверхні звичайних металів, знаходячись на повітрі, найчастіше покриваються шаром оксиду, який іноді має багатшарову структуру. Шари оксиду можуть спричинити збільшення поглинальної здатності зразка на порядок. Товщина та структура оксидного шару є основними властивостями, що визначають цю частку у поглинаючу здатність. Ці властивості можуть змінюватися під час лазерної різки через їхню залежність від температури. На ефект поглинання також сильно впливає довжина хвилі променя, що було підтверджено експериментально. Також домішки, що розсіяні на поверхні металу та в ньому, можуть збільшити поглинання випромінювання. Одним із таких прикладів є частинки пилу різного розміру та форми, які можуть призвести до утворення центрів різко підвищеної локальної поглинаючої здатності. Іншим прикладом є абразивні частинки, що за-

лишаються після полірування та іншої механічної обробки, вплив яких у поглинання значною мірою визначається видом цих частинок та їх поглинальними властивостями на відповідній довжині хвилі лазера. Таким чином, для зменшення або усунення впливу такого поглинання шляхом видалення таких частинок, полірувальні матеріали повинні бути прозорими для відповідної довжини хвилі. Крім домішок, також можемо мати додаткове поглинання через дефекти, що виникають в основній масі металу, такі як пори, а також вкраплення інших хімічних елементів.

Висновки. Глибоке знання та розуміння фундаментальних механізмів поглинання, що лежать в основі будь-якої обробки матеріалів лазерами, безумовно, має велике значення для майбутнього розвитку цієї технології. У цій статті розглянуто результати деяких важливих спостережень та досліджень й пояснюється залежність поглинаючої здатності металу від різних властивостей лазера та матеріалу, таких, як: довжина хвилі, кут падіння, шорсткість поверхні, оксиди, дефекти та домішки. Багато зовнішніх властивостей металу, що оброблюється, впливають на поглинаючу здатність, серед яких оксидні шари та шорсткість поверхні є, мабуть, найважливішими, і для яких існують теоретичні моделі. Поглинаюча здатність залежить від геометрії шорсткості та, в більшості випадків, посилюється при збільшенні шорсткості поверхні. Є моделі як для малої, так і для великої шорсткості. Поглинальна здатність посилюється і в оксидних шарах через інтерференційні ефекти та сильно залежить від товщини оксидного шару, структури та довжини хвилі лазера. У роботі було зазначено про вплив дефектів домішок, а також об'ємних властивостей, таких як пори, тріщини та канавки, які можуть призвести до локальних змін поглинання. Незважаючи на те, що є багато експериментальних результатів для чистих металів за кімнатної температури, потрібно більше даних для оцінки моделі за підвищених температур та для негладких і нечистих поверхонь.

Список використаних джерел

1. Пупань, Л. І. (2020). *Лазерні технології у машинобудуванні: навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання*. НТУ «ХП».
2. Бобицький, Я. В., & Матвіїшин, Г. Л. (2015). *Лазерні технології. Частина 1: навчальний посібник*. Видавництво Львівської політехніки.
3. Готра, З. Ю., & Бобицький, Я. В. (1991). *Лазерні методи обробки в мікроелектроніці*. Світ.
4. Тимчик, Г. С., & Філіппова, М. В. (уклад.). (2018). *Лазерні технології: лабораторний практикум: навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»*. КПІ ім. Ігоря Сікорського.
5. Бобицький, Я. В., & Матвіїшин, Г. Л. (2015). *Лазерні технології. Частина 2: навчальний посібник*. Видавництво Львівської політехніки.
6. Bergström, D., & Kaplan, A. (2003). Mathematical modelling of laser absorption mechanisms in metals: A review. In *Proceedings of the 16th Meeting on Mathematical Modelling of Materials Processing with Lasers (M4PL16)*. Igl, Austria.
7. Guarino, S., Ponticelli, G. S., & Venettacci, S. (2020). Environmental assessment of Selective Laser Melting compared with Laser Cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 525–538. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.004>.
8. Tang, K., Kawka, P., & Buckius, R. (1999). Geometric optics applied to rough surfaces coated with an absorbing thin film. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 13(2), 169–176.

9. Schott, P., de Beaucoudrey, N., & Bourlier, C. (2003). Reflectivity of one-dimensional rough surfaces using the ray tracing technique with multiple reflections. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (Vol. 7, pp. 4214–4216).
10. Rodrigues, G. C., Vorkov, V., & Dufloy, J. R. (2018). Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP*, 74, 714–718. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.026>.
11. Seon, S., Shin, J. S., Oh, S. Y., Park, H., Chung, C.-M., Kim, T.-S., Lee, L., & Lee, J. (2018). Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting. *Optics & Laser Technology*, 103, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.054>.
12. Celli, V., Maradudin, A., Marvin, A., & McGurn, A. (1985). Some aspects of light scattering from randomly rough metal surfaces. *Journal of the Optical Society of America A*, 2(12), 2225–2239.

References

1. Pupan, L. I. (2020). *Lazerni tehnolohii u mashynobuduvanni: navch. posibnyk dlia studentiv spetsialnosti «Prykladna mekhanika» dennoi, zaochnoi ta dystantsiinoi form navchannia [Laser technologies in mechanical engineering: study guide for students of the specialty "Applied Mechanics" of full-time, part-time and distance learning]*. NTU «KhPI».
2. Bobytskyi, Ya. V., & Matviishyn, H. L. (2015). *Lazerni tehnolohii. Chastyna 1: navchalnyi posibnyk [Laser technologies. Part 1: Study guide]*. Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki.
3. Hotra, Z. Yu., & Bobytskyi, Ya. V. (1991). *Lazerni metody obrobky v mikroelektronitsi [Laser processing methods in microelectronics]*. Svit.
4. Tymchyk, H. S., & Filippova, M. V. (Compilers). (2018). *Lazerni tehnolohii. Laboratornyi praktykum: navch. posib. dlia stud. spetsialnostei 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tehnolohii», 152 «Metrolohiia ta informatsiino-vymiriuvalna tekhnika» [Laser technologies. Laboratory workshop: Study guide for students of specialties 151 "Automation and computer-integrated technologies", 152 "Metrology and information-measuring technology"]*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.
5. Bobytskyi, Ya. V., & Matviishyn, H. L. (2015). *Lazerni tehnolohii. Chastyna 2: navchalnyi posibnyk [Laser technologies. Part 2: Study guide]*. Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki.
6. Bergstrom, D., & Kaplan, A. (2003). Mathematical modelling of laser absorption mechanisms in metals: A review. *Proceedings of the 16th Meeting on Mathematical Modelling of Materials Processing with Lasers (M4PL16)*, Igls, Austria, January 20–24.
7. Guarino, S., Ponticelli, G. S., & Venettacci, S. (2020). Environmental assessment of selective laser melting compared with laser cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 525–538. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.004>.
8. Tang, K., Kawka, P., & Buckius, R. (1999). Geometric optics applied to rough surfaces coated with an absorbing thin film. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 13, 169–176.
9. Schott, P., de Beaucoudrey, N., & Bourlier, C. (2003). Reflectivity of one-dimensional rough surfaces using the ray tracing technique with multiple reflections. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4214–4216.
10. Rodrigues, G. C., Vorkov, V., & Dufloy, J. R. (2018). Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP*, 74, 714–718. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.026>.
11. Seon, S., Shin, J. S., Oh, S. Y., Park, H., Chung, C.-M., Kim, T.-S., Lee, L., & Lee, J. (2018). Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting. *Optics & Laser Technology*, 103, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.054>.
12. Celli, V., Maradudin, A., Marvin, A., & McGurn, A. (1985). Some aspects of light scattering from randomly rough metal surfaces. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 2225–2239.

Дата першого надходження статті до видання: 22.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.01.2026

UDC 621.375.826:621

Ihor Shaposhnyk

Senior Research official

Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of Security Service of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shaposhnyk.ihor@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9915-2674>**THE INFLUENCE OF METALS' SURFACE PROPERTIES
ON THEIR LASER CUTTING**

The use of laser technology is currently one of the most progressive areas in industry, which has undergone significant development in recent years. The use of laser radiation is an effective process for processing various materials. Laser technologies differ from traditional processing methods in the absence of contact phenomena in the processing zone and the possibility of dosed intensive energy supply to the surface of the product; the locality of physical processes in the heat-affected zone and the absence of significant deformations of the processed parts; the possibility of processing almost any materials, regardless of their mechanical properties, with high quality and productivity. This technology has a high level of efficiency, as well as environmental friendliness. In some cases, laser technology is the only one for solving important technological problems [1, p. 5]. In laser processing of metals, understanding the fundamental principles of surface absorption of light from a laser beam plays an important role in determining the optimal parameters and processing conditions. The absorption of light from a laser beam depends on a number of different parameters. These include laser parameters such as intensity, wavelength, polarization and angle of incidence, and, it is worth noting, material parameters such as chemical composition, temperature, roughness, oxide layers and surface contamination. Extensive theoretical and experimental data on light absorption by various materials with clean, smooth, contamination-free surfaces contrast with relatively limited information on metals and alloys used in real production conditions [4, p. 28]. This paper focuses on the problem and proposes preliminary directions for research into the conditions of laser beam absorption in metals and alloys of various types of roughness, with contaminants and oxides on the surface. The above-mentioned conditions of laser beam absorption and reflection from various types of surfaces are extremely important in manual laser processing of metals and alloys, especially in cutting, when the beam is focused into a narrow beam at high power and frequency. When manually cutting metals with low roughness, it is difficult to maintain the angle of inclination of the tool relative to the surface, so the reflection of the beam from it can cause damage to both the operator and the equipment. Considering these factors, the study of such conditions for the surface treatment of metals and alloys is particularly important.

Key words: laser technologies; laser cutting; manual laser cutting; laser beam absorption; laser beam reflection; surface roughness during laser cutting; laser tool tilt angle.

Fig.: 1. References: 12.