

**ДОБРОТВОРСЬКИЙ С.С., БАСОВА Є.В., АЛЕКСЕНКО Б.О., ПРИХОДЬКО В.О.,  
ДОБРОВОЛЬСЬКА Л.Г., БАСОВ В.В.**

## **ВПЛИВ КОРОТКОІМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ МІКРОСТРУКТУР ТА ТВЕРДІСТЬ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ**

В роботі розглянуті питання, пов'язані із технологією короткоімпульсного лазерного оброблення сталі AISI321. Об'єктом дослідження є поверхневі структури, що формуються після короткоімпульсного впливу наносекундного лазера, а також їх фізико-механічні характеристики. Предметом дослідження в роботі є процеси формування періодичних поверхневих структур після короткоімпульсного лазерного впливу.

Було сформульоване припущення про кореляцію характеру формування структурних перетворень в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу при процесі лазерного впливу із малою інтенсивністю лазерного випромінювання, та традиційного нагрівання-охолодження.

Зазначено, що при досягненні відповідник критичних умов опромінення (потужності опромінення, швидкості нагрівання та охолодження, градієнту деформації тощо) відбувається лазерне зміцнення аустенітної сталі із підвищенням твердості, тобто загартування.

Підкреслено, що короткоімпульсний лазерний вплив при невеликих потужностях лазера, викликає такі процеси в поверхневому шарі нержавіючої сталі AISI321, які здебільшого запобігають осадженню карбіду хрому і не зміцнюють матеріал, а поглинені лазерної енергії ще недостатньо для суттєвого створення мартенситних структур. Також підкреслено, що при багаторазовому короткочасовому накладанні теплових плям, що неодноразово перетинають одна одну, виникає збільшення теплової деформації матеріалу, і, як результат, в поверхневому шарі частково формуються більш міцні кристалічні структури – мартенсит, карбіди та окиси металів, що відповідає процесу загартування.

**Ключові слова:** твердість, сталь AISI 321, нанолазер, мікроструктура металу, тертя, періодичні структури, LIPSS.

### **DOBROTVORSKIY S., BASOVA Ye., ALEKSENKO B., PRYKHODKO V., DOBROVOLSKA L., BASOV V. INFLUENCE OF SHORT-PULSE LASER RADIATION ON THE SURFACE MICROSTRUCTURES FORMATION AND HARDNESS OF STAINLESS STEEL**

The paper deals with the issues related to the technology of short-pulse laser treatment of AISI321 steel. The object of the study is the surface structures formed after short-pulse exposure to a nanosecond laser, as well as their physical and mechanical characteristics. The subject of the study in the work are the processes of formation of periodic surface structures after short-pulse laser exposure.

The assumption about correlation of the character of formation of structural transformations in the surface layer of the processed material during the process of laser exposure with low intensity of laser radiation, and traditional heating cooling was formed.

It is noted that when the corresponding critical irradiation conditions (irradiation power, heating and cooling rates, strain gradient, etc.) are reached, laser hardening of austenitic steel with hardness increase, i.e. quenching, occurs.

It is emphasised that short-pulse laser exposure at low laser powers causes such processes in the surface layer of AISI321 stainless steel, which mainly prevent the deposition of chromium carbide and do not strengthen the material, and the absorbed laser energy is still insufficient to significantly create martensitic structures. It is also emphasised that the repeated short-term superposition of heat spots repeatedly crossing each other results in an increase in the thermal deformation of the material and, as a result, stronger crystal structures such as martensite, carbides and oxides are formed in the surface layer.

**Keywords:** hardness, AISI 321 steel, nanolaser, metal microstructure, friction, periodic structures, LIPSS.

**Вступ.** Питання покращення трибологічних властивостей матеріалів авіаційних агрегатів подвійного призначення (ААПІ) для збільшення їх ресурсу є гострим в умовах сучасних тенденцій розвитку відповідних машинобудівних конструкцій. Саме тому при проектуванні відповідальних елементів ААПІ постає необхідність у вирішенні задач циклічної міцності, довговічності, малозамітності тощо. Не дивлячись на розробку та вдосконалення нових, легких та міцних композиційних матеріалів, метали та сплави залишаються основою при виготовленні ААПІ. Але при цьому слід зазначити, що циклічні навантаження, що мають періодичну дію на металеву конструкцію ААПІ в результаті стають причиною накопичення пошкоджень, появи та розвитку втомних тріщин, та кінцевого результату – руйнуванню поверхні, що піддається циклічним навантаженням. Зважаючи на те, що для ААПІ характерний порівняно невеликий запас міцності, що виражається коефіцієнтом безпеки агрегату, актуальним стає питання пошуку та застосування нових технологій для отримання металевих поверхонь з покращеними трибологічними та міцнісними характеристиками водночас. Серед сучасних технологій можна виділити лазерне оброблення сталевих поверхонь ААПІ, для створення складних упорядкованих мікрорельєфів поверхні. Слід зазначити, що серед найактуальніших досліджень технології лазерного оброблення є, в тому числі і, вивчення закономірностей формування поверхонь з покращеними властивостями отриманих за рахунок короткоімпульсних лазерних впливів у наносекундному часовому діапазоні – LIPSS (Laser-induced periodic surface structures) [1-2].

**Аналіз основних досягнень та літератури.** Слід зазначити, що індуквані лазером періодичні поверхневі структури (LIPSS) знайшли широке застосування в багатьох галузях завдяки ефективній та гнучкій технології виготовлення, оскільки їх генерація можлива за одну технологічну операцію, що забезпечує простий спосіб наноструктурування поверхні з метою контролю оптичних, механічних та трибологічних властивостей поверхні відповідальних деталей машин. Завдяки ультракоротким періодам опромінення та надвисокій інтенсивності, швидкі лазерні імпульси мають унікальні технологічні переваги, такі як висока точність та гнучкість обробки, адаптивність матеріалу [3, 4]. Технологія надшвидких лазерних імпульсів стала одним з перспективних методів отримання поверхневих мікроструктур і наноструктур [5]. Порівняно з кількістю досліджень, пов'язаних із

механізмами формування LIPSS за допомогою нано- та фемтосекундних лазерних імпульсів, трибологічним характеристикам LIPSS та їхньому застосуванню присвячено доволі мало робіт [6-9].

Мізуно та ін. [6] повідомили про зниження коефіцієнта тертя плівок LIPSS, покритих алмазоподібним вуглецем (DLC - diamond-like carbon), за низьких нормальних навантажень до 130 нН. Пізніше та сама група досліджувала контроль тертя за допомогою додаткових шарів ( $\text{MoS}_2$ ) або додаткових геометричних візерунків на поверхні [7]. Ейхштадт та інші [8] представили результати збільшення коефіцієнта тертя кремнію з покриттям LIPSS для нормальних навантажень у діапазоні мН. Обґрунтування потенціалу застосування LIPSS в області трибології, де показано значне зниження коефіцієнта тертя поверхонь, оброблених короткоімпульсним випромінюванням навели група дослідників в роботі [10]. Технологія LIPSS дозволяє гнучко виготовляти періодично розташовані структури субмікронного періоду, забезпечуючи потужну технологію безконтактної обробки для виготовлення поверхневих решіток на різноманітних матеріалах [11-14].

Важливо відзначити, що технологія лазерного зміцнення відповідальних деталей ААПП стає все більш затребуваною, особливо коли зміцненню підлягає обмежена ділянка складнопрофільної поверхні. Процес зміцнення поверхневого шару короткоімпульсним випромінюванням характеризується швидким нагрівом до температур правління поверхневого шару матеріалу із подальшим надшвидким його охолодженням за рахунок відведення тепла до основного об'єму матеріалу.

Формування LIPSS є досить складним процесом, механізм якого ще не з'ясований. Вплив надшвидких імпульсів і миттєві локальні зміни властивостей матеріалів є динамічними процесами зі зворотними зв'язками, що безпосередньо впливає на трибологічні та міцнісні характеристики формованих структур. Енергія лазерного випромінювання спочатку поглинається електронною системою опромінюваних матеріалів, потім вивільнена енергія передається решітці, що в подальшому викликає різні теплові та деформаційні ефекти, а отже зміни стану поверхневого шару. На період LIPSS впливають довжина хвилі лазера, густина потоку енергії, кількість накладених імпульсів [15-20]. У традиційних технологіях LIPSS завжди виникають періодичні структури через розподілене світлове поле, спричинене великою кількістю окремих частинок і поверхневих дефектів під час лазерної абляції, що ускладнює забезпечення однорідності при обробці поверхонь з великою площею. У той же час, технологія LIPSS все ще стикається з серйозними проблемами контролю однорідності формування поверхневих структур [21-22], що безпосередньо впливає на однорідну твердість всієї обробленої поверхні.

**Мета дослідження, постановка задачі.** У цій статті розглядаються фізико-механічні властивості (твердість) оброблених наносекундним лазерним випромінюванням (з покриттям LIPSS великої площі) зразків зі сталі AISI 321.

**Матеріали та методи.** Для експериментів були вирізані пластини з нержавіючої сталі AISI 321. Габаритні розміри пластин становили 35x55x1,5 мм. Поверхня в отриманому стані мала характерну для сталі гладку дзеркальну поверхню. Хімічний склад сталі (у вагових %): Fe 67,0; Cr 17,0...19,0; Ni 9,0...11,0; Mn <2,0; Si <0,8; Ti 0,6...0,8. Для отримання поліморфної шорсткості поверхні використовували лазерну установку з волоконним ітербієвим лазером інфрачервоного діапазону (довжина хвилі 1064 нм) і двовісним гальванометричним сканером BM 2500+ [23]. У цьому дослідженні використовували лазерний вплив із тривалістю імпульсу 100 нс, частотою повторення 20-100 кГц і піковою потужністю до 0,3 МДж у режимі TEM<sub>00</sub>. Зразки обробляли стратегією растрового оброблення «зігзаг» з щільністю паралельних ліній до 1,25 мкм [2].

Твердість поверхневого шару після лазерного сканування досліджували на сучасній універсальній машині – твердомірі за Віккерсом фірми ZwickRoell (Німеччина) (рис. 1), що базується на технологіях, які використовують інноваційні мехатронні компоненти. Випробовування відповідали діючим промисловим стандартам: ISO 6506, ISO 6507, ISO 4545, ASTM E384, ASTM E92, ASTM E10. Зразки досліджували на повітрі за кімнатної температури, використовуючи алмаз у формі піраміди як індентор, щоб наносити відбиток на випробовуваний матеріал. Зусилля натиску – 1 кг. Аналіз даних відбитків проводився автоматично з використанням вбудованого програмного забезпечення (рис.2).

При плануванні експерименту було враховано модель лазерного короткоімпульсного впливу на оброблюваний матеріал. Модель лазерного впливу на пластину з нержавіючої сталі побудовано в розрахунковому середовищі COMSOL Multiphysics® [24] (рис.3).

Тепловий потік до поверхні матеріалу розглядався як:

$$F = \frac{2P_{laser}}{\pi R_{spot}^2} \exp\left(-\frac{2\sqrt{(x - x_{coordinate})^2 + (y - y_{coordinate})^2}}{R_{spot}}\right)$$

де

$P_{laser}$  - потужність лазера, Вт,

$R_{spot}$  - радіус променя (25  $\mu\text{m}$ ),

$x, y_{coordinate}$  - координата пластини, куди сфокусовано промінь у цей момент часу.

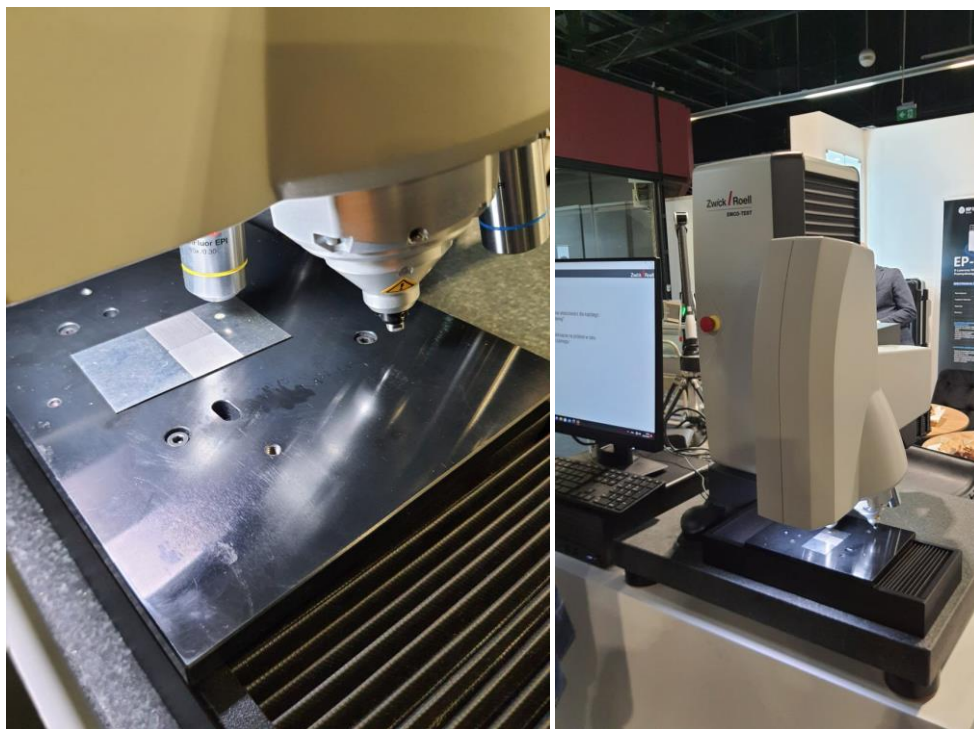


Рис. 1 – Твердомір за Віккерсом фірми ZwickRoell із зразками досліджуваної сталі AISI 321

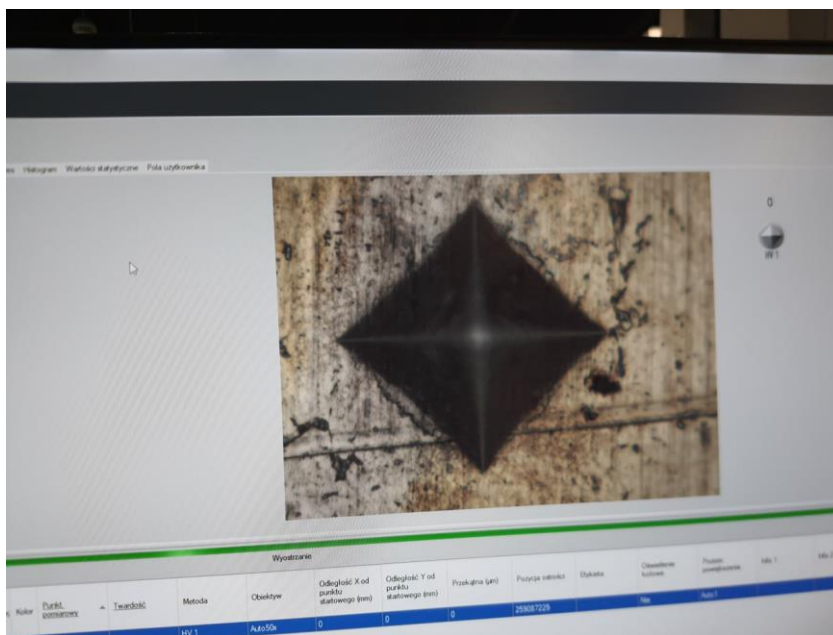


Рис. 2 – Демонстрація автоматичного аналізу відбитку на випробовуваному матеріалі – сталі AISI 321

**Результати експерименту.** Дослідження проводились на зразку сталі AISI 321 (рис.4), що піддавався обробці при різних потужностях лазера і швидкостях сканування (рис.4, поз. 1-4). В якості еталонної поверхні була прийнята необроблена ділянка зразку (рис.4, поз.5).

Ділянка (1) оброблювалася скануванням по траєкторії «зигзаг» з потужністю лазера 7,5 Вт, для досягнення низького рівня енергетичного вкладу. Швидкість сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц.

Ділянка (2) оброблювалася скануванням по траєкторії «зигзаг» з потужністю лазера 10 Вт, для досягнення зниженого рівня енергетичного вкладу. Швидкість сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц.

Ділянка (3) оброблювалася скануванням по траєкторії «зигзаг» з потужністю лазера 12,5 Вт, для досягнення помірного рівня енергетичного вкладу. Швидкість сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц.

Ділянка (4) оброблювалася скануванням по траєкторії «зигзаг» з потужністю лазера 15 Вт, для досягнення високого рівня енергетичного вкладу. Швидкість сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц.

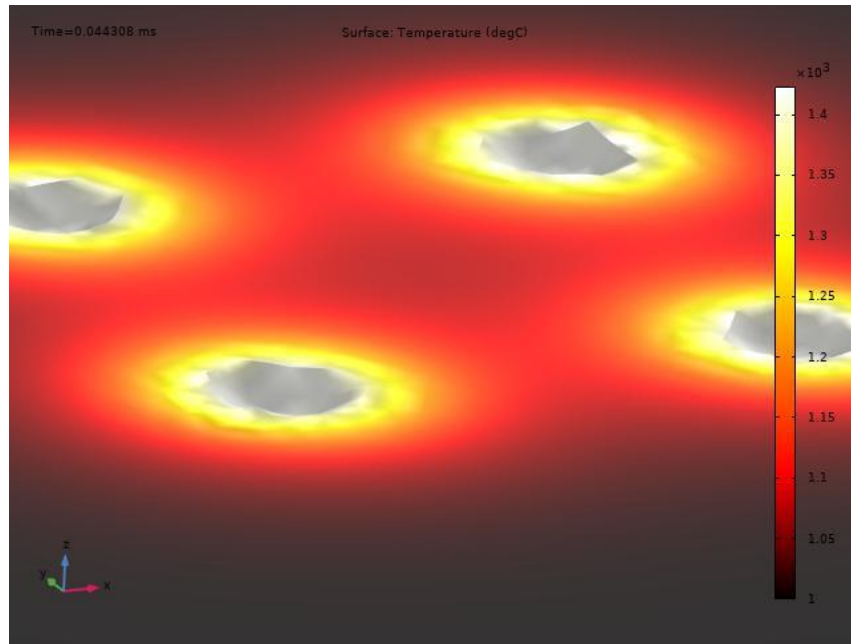


Рис. 3 – Комп'ютерне моделювання теплових полів при періодичному лазерному впливі на оброблюваний матеріал

Метою цього експерименту було всебічне розуміння впливу різних комбінацій енергії та потужності лазера на твердість поверхневого шару матеріалу і формування мікро- і наноструктур.

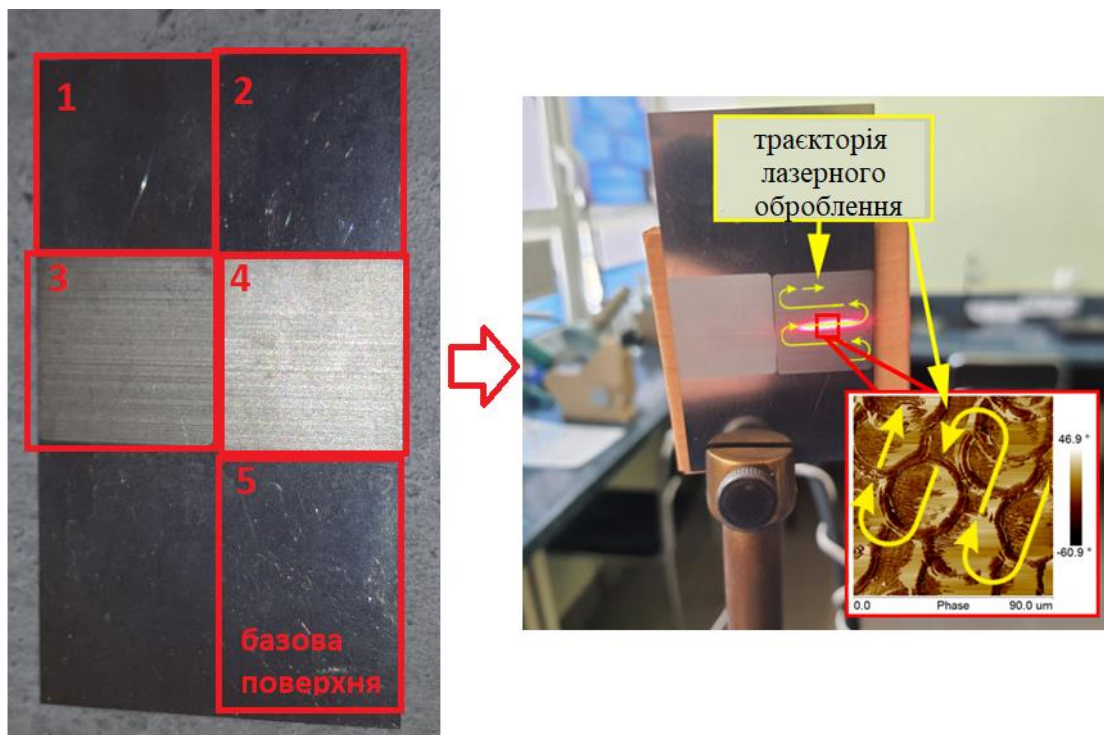


Рис. 4 – Зразок сталі AISI 321: 1-4 – ділянки, що підлягали різним режимам лазерного короткоімпульсного оброблення, 5 – ділянка необробленого матеріалу



Випробовування твердості в експерименті проводилося з використанням твердоміра по Віккерсу для комплексного оцінювання зміни твердості сталі AISI321 після різних процесів лазерної поверхневого оброблення. Автоматичне проведення вимірів дало змогу уникнути похибки вимірювання та отримати точний результат визначення твердості (рис.5).

Specimen	Point No	Hardness	Method	Diagonal
Próbka 22	1	184	HV 1	100,410
	2	181	HV 1	101,296
	3	176	HV 1	102,584
	4	219	HV 1	92,027
	5	186	HV 1	99,924

Рис. 5 – Протокол автоматизованого вимірювання твердості по Віккерсу: 1-5 ділянки зразка відповідно до (рис.2)

На рис. 6, 7, 8, 9 показані мікроструктури поверхневого шару сталевого зразка після різного енергетичного впливу наносекундного лазерного оброблення із результатами аналізу твердості. Слід зазначити, що в результаті впливу лазерного променя в металі утворюється зона термічного впливу. Структурні та фазові перетворення в зоні термічного впливу призводять до формування різних за структурою шарів.

На рис. 6 видно, що в умовах низької потужності (7,5 Вт) спостерігається поверхнева структура, що має здебільшого випадковий характер, та мало відрізняється від базової поверхні. Однак відповідно до результату вимірювання було визначено, що твердість ділянки (1) (рис.4) дещо зменшилась до 184 HV (рис. 5). Це може пояснюватися тим, що через малий енергетичний вплив імпульсного лазерного оброблення у поверхневому шарі відбулися незначні зміни мікроструктури, що характеризується зниженням твердості в зоні термічного впливу внаслідок часткової дестабілізації аустеніту та одночасного стабілізування аустенітної фази за рахунок наявності Ni у хімічному складі оброблюваного матеріалу. Це, напевне, також є результатом того, що із-за низької потужності лазера, та, відповідно недостатньої температури для значного зменшення сталості аустенитових структур відбувається незначне зниження вмісту вуглецю в обробленому шарі.

На рис.6 представлений результат визначення твердості на ділянці (2) (рис.4), величина якої також зменшилась до 181 HV. Тут важливо зазначити, що поверхнева структура вже має характеристику, що відповідає симбіозу періодичних і випадкових структур.

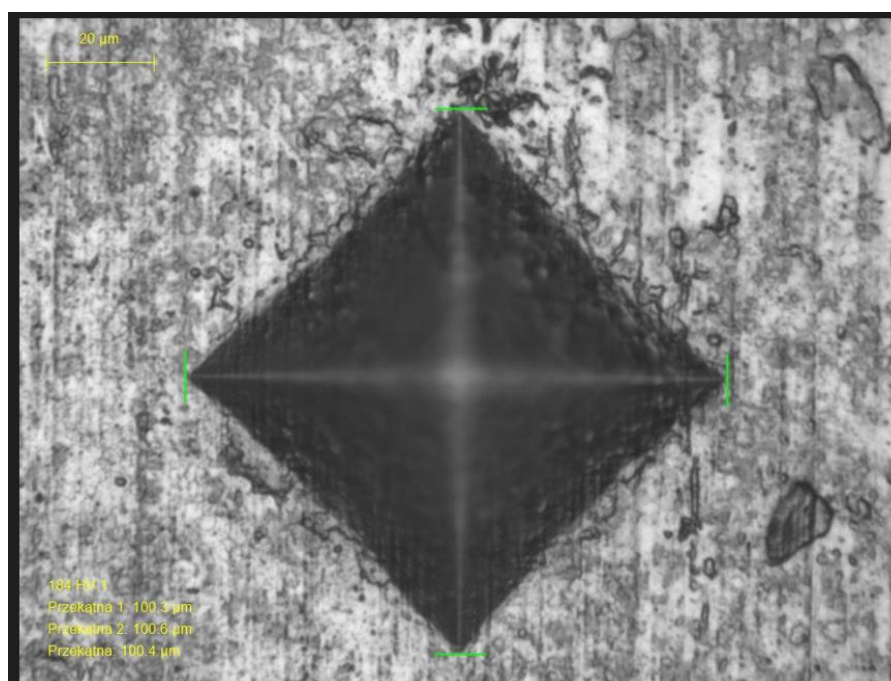


Рис. 6 – Вимірювання твердості ділянки (1), що оброблена з потужністю лазера 7,5 Вт, швидкістю сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц

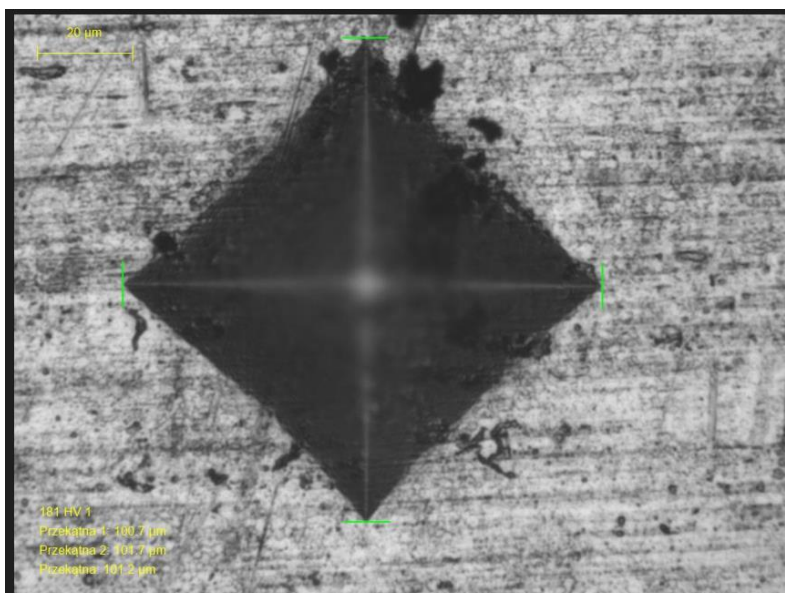


Рис. 7 – Вимірювання твердості ділянки (2), що оброблена з потужністю лазера 10 Вт, швидкістю сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц

Аналіз мікроструктури ділянки (2) показав наявність початкової фази створення періодичних структур за рахунок розплавлення тонкого поверхневого шару матеріалу. Подальше зменшення твердості може бути пояснене збільшенням потужності оброблення та, відповідно, збільшенням температури в зоні опромінення, що, в свою чергу, впливає на неосаджений вуглець в поверхневому шарі матеріалу.

Аналіз ділянки (3) (рис.4) дозволив визначити наявність візуалізованих періодичних структур (рис.7), що є шуканим ефектом. На цій ділянці відзначається подальше зменшення поверхневої твердості обробленого матеріалу до 176 HV (рис. 5).

Причини зниження поверхневої твердості ділянок 1-3 при підвищенні потужності оброблення та температури в зоні опромінення можливо пояснювати наступним чином. Відомо, що при традиційному термічному обробленні аустенітні сталі, до яких належить і AISI321, не піддаються закалюванню. А навпаки, зі збільшенням температури оброблення ще більше пом'якшуються. Це пов'язано із тим, що для аустенітних нержавіючих сталей теплова обробка є пом'якшувальною термічною операцією, що супроводжується вивільненням неосадженого вуглецю.

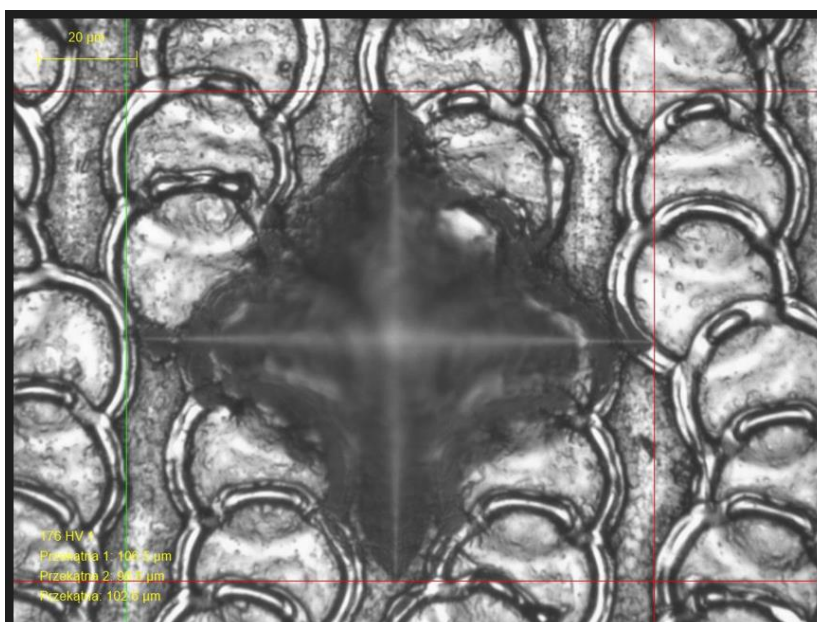


Рис. 8 – Вимірювання твердості ділянки (3), що оброблена з потужністю лазера 12,5 Вт, швидкістю сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц

Аналіз результатів дослідження ділянки (4) (рис.9) показав, що навідміну від попередніх ділянок (1) (рис. 6), (2) (рис.7), (3) (рис.8) ця поверхня має значні структурні зміни, які характеризуються більш розвинутою поверхнею та збільшеною твердістю дослідного зразка. Слід зазначити, що зі збільшенням потужності лазерного оброблення збільшуються як глибина, так і ширина зони зміцнення. Збільшення потужності до 15 Вт за інших рівних умов оброблення призводить до температурних умов, за яких можливо відбувається створення фазових структур із вмістом карбідів Ti, Cr та окисів металів, що і стає причиною збільшення твердості поверхневого шару матеріалу. Важливо зазначити, що за таких умов оброблення (збільшеної потужності лазера, збільшеної температури опромінення) в поверхневому шарі відбуваються структурні зміни, що характеризуються частковим перетворенням аустеніту в мартенсит, який має високу твердість. У підсумку, підвищення твердості обумовлене симбіозом цих двох процесів (створенням мартенситу, карбідів і окисів металів), тобто реалізується процес лазерного загартування або наклепу. Однак слід відзначити, що механізм лазерного загартування принципово відрізняється від механізму наклепу поверхні аустенітної нержавіючої сталі, що реалізується на ній при холодному пластичному деформуванні.

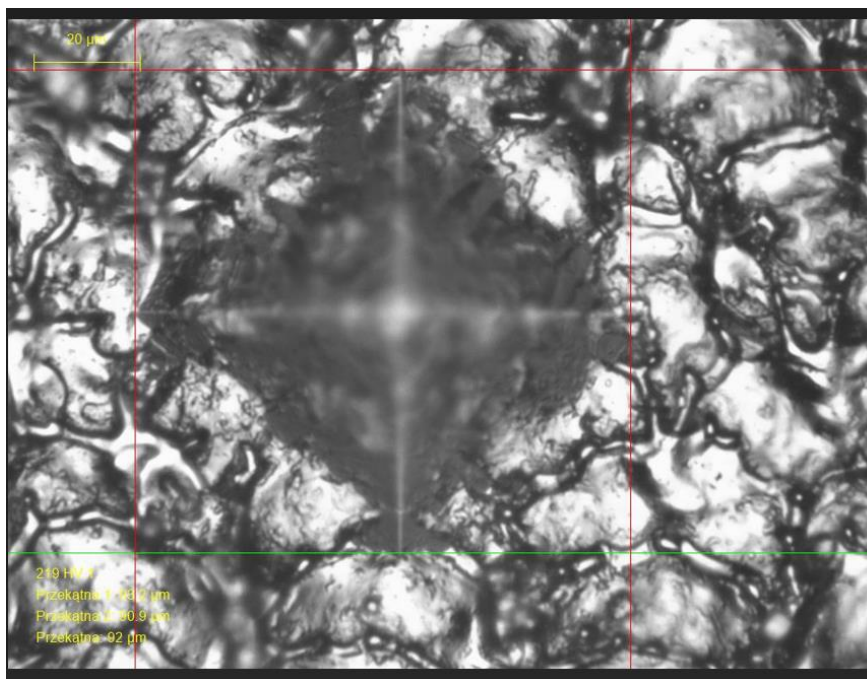


Рис. 9 – Вимірювання твердості ділянки (3), що оброблена з потужністю лазера 15 Вт, швидкістю сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц

**Висновки.** Відомо, що при традиційних методах нагрівання та охолодження аустенітних сталей, в тому числі сталі AISI321, не відбувається формування загартованих структур із високою твердістю. Окрім того слід зазначити, що при зменшенні вмісту вуглецю нижчим за 0,03 %, утворення мартенситу в сталі взагалі не відбувається, а сталь є повністю аустенітною за кімнатної температури.

Можемо припустити, що за малої інтенсивності лазерного випромінювання, процеси, що мають місце в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу, напевне, відповідають характеру традиційного нагрівання-охолодження. Однак при досягненні відповідних критичних умов опромінення (потужності опромінення, швидкості нагрівання та охолодження, градієнту деформації тощо) відбувається лазерне зміцнення аустенітної сталі із підвищенням твердості, тобто загартування. В основі механізму підвищення твердості лежать процеси часткового перетворення аустеніту в мартенсит та утворення твердих карбідів та окисів в поверхневому шарі обробленого металу.

Таким чином можна зазначити, що короткоімпульсний лазерний вплив при невеликих потужностях лазера, викликає такі процеси в поверхневому шарі нержавіючої сталі AISI321, які здебільшого запобігають осадженню карбиду хрому і не зміцнюють матеріал, а поглиненої лазерної енергії ще недостатньо для суттєвого створення мартенситних структур. Це також стає результатом наявної роботи міжкристалічних дрібних частинок TiC, що, в свою чергу, виконують подвійну функцію: вони запобігають сенсibilізації та міжкристалітній корозії, а також покращують опір сталі AISI 321 до корозії [25]. Однак при багаторазовому короткочасовому накладанні теплових плям, що неодноразово перетинають одна одну, виникає збільшення теплової деформації матеріалу, і, як результат, в поверхневому шарі формуються більш міцні кристалічні структури – мартенсит, карбіди та окиси металів.



Подяки. Загальний підхід розвинуто в рамках науково-дослідного проекту "Формування і трансформація періодичних нановуглецевмісних структур на поверхні металів короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами" (ДР. № 0124U000481). Автори також висловлюють подяку співробітникам "Лабораторія лазерних технологій" АТ ФЕД за допомогу в підготовці зразків для досліджень та менеджеру польського представництва фірми Zwick Roell Міхалу Котульські (Michał Kotulski) за можливість проведення експерименту на високоякісному обладнанні.

#### Список літератури:

1. Dobrotvorskiy, S. et al. (2023). Computer Modelling and Comparative Analysis of Surface Microrelief Inspection by the Method of Scattering of a Laser Beam During Its Small-Angle Sliding Incidence. In: Cioboată, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 762, pp. 237–252. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_20).
2. Dobrotvorskiy, S. et al. (2023). The Relief of the Structured by Nanosecond Laser Stainless Steel Surface Inspection by Sliding Reflection of a Laser Beam. In: Balog, M., Iakovets, A., Hrehova, S. (eds) EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, pp. 65–77. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_5)
3. Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, Hayasaki Y, Mizeikis V, Buividas R, et al. Ultrafast Laser Processing of Materials: From Science to Industry. *Light Sci Appl*, 5(8), e16133 (2016). <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.133>
4. Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast Lasers-Reliable Tools for Advanced Materials Processing. *Light Sci App*, 3(4), e1491 (2014). <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.30>
5. Jiang L, Wang A-D, Li B, Cui T-H, Lu Y-F. Electrons Dynamics Control by Shaping Femtosecond Laser Pulses in Micro/nanofabrication: Modeling, Method, Measurement and Application. *Light Sci Appl*, 7(2), 17134 (2018). <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.134>
6. A. Mizuno, T. Honda, J. Kiuchi, Y. Iwai, N. Yasumaru, K. Miyazaki, *Tribol. Online* 1, 44 (2006)
7. N. Yasumaru, Kenzo Miyazaki, J. Kiuchi, *Appl. Surf. Sci.* 254, 2364 (2008)
8. J. Eichstädt, G.R.B.E. Römer, A.J. Huis in't Veld, *Phys. Proc.* 12, 7 (2011)
9. C.-Y. Chen, C.-J. Chung, B.-H. Wu, W.-L. Li, C.-W. Chien, P.-H. Wu, C.-W. Cheng, *Appl. Phys. A* 107, 345 (2012)
10. Bonse J, Koter R, Hartelt M, Spaltmann D, Pentzien S, Höhm S, et al. Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures on Steel and Titanium alloy for Tribological Applications. *Appl Phys A*, 17(1), 103–110 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8229-2>
11. Dusser B, Sagan Z, Soder H, Faure N, Colombier JP, Jourlin M, et al. Controlled Nanostructures Formation by Ultra Fast Laser Pulses for Color Marking. *Opt Express*, 18(3), 2913–2924 (2010). <https://doi.org/10.1364/oe.18.002913>
12. Jiang H-B, Zhang Y-L, Liu Y, Fu X-Y, Li Y-F, Liu Y-Q, et al. Bioinspired FewLayer Graphene Prepared by Chemical Vapor Deposition on Femtosecond Laser-Structured Cu Foil. *Laser Photon Rev*, 10(3), 441–450 (2016). <https://doi.org/10.1002/lpor.201500256>.
13. Drevinskas R, Beresna M, Zhang J, Kazanskii AG, Kazansky PG. Ultrafast Laser-Induced Metasurfaces for Geometric Phase Manipulation. *Adv Opt Mater*, 5(1), 1600575 (2017). <https://doi.org/10.1002/adom.201600575>
14. Wang L, Chen Q-D, Cao X-W, Buividas R, Wang X, Juodkazis S, et al. Plasmonic Nano-Printing: Large-Area Nanoscale Energy Deposition for Efficient Surface Texturing. *Light Sci Appl*, 6(12), e17112 (2017). <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.112>
15. Miyagawa, R., Kamibayashi, D., Nakamura, H. et al. Crystallinity in periodic nanostructure surface on Si substrates induced by near- and mid-infrared femtosecond laser irradiation. *Sci Rep* 12, 20955 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25365-1>.
16. Shinonaga, T., Tsukamoto, M. & Miyaji, G. Periodic nanostructures on titanium dioxide film produced using femtosecond laser with wavelengths of 388 nm and 775 nm. *Opt. Express* 22, 14696 (2014). <https://doi.org/10.1364/OE.22.014696>
17. Bonse, J. & Kruger, J. Pulse number dependence of laser-induced periodic surface structures for femtosecond laser irradiation of silicon. *J. Appl. Phys.* 108, 034903 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3456501>
18. Miyaji, G. & Miyazaki, K. Nanoscale ablation on patterned diamondlike carbon film with femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. Lett.* 91, 123102 (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2784966>
19. Hashida, M., Ikuta, Y., Miyasaka, Y., Tokita, S. & Sakabe, S. Simple formula for the interspaces of periodic grating structures selforganized on metal surfaces by femtosecond laser ablation. *Appl. Phys. Lett.* 102, 174106 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4803940>
20. Nivas, J. et al. Effects of ambient air pressure on surface structures produced by ultra-short laser pulses irradiation. *Opt. Lett.* 42, 2710–2713 (2017). <https://doi.org/10.1364/OL.42.002710>
21. Sun Q, Liang F, Vallée R, Chin SL. Nanograting Formation on the Surface of Silica Glass by Scanning Focused Femtosecond Laser Pulses. *Opt Lett*, 33(22), 2713–2725 (2008). <https://doi.org/10.1364/ol.33.002713>.
22. Bonse J, Krüger J, Höhm S, Rosenfeld A. Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures. *J Laser Appl* (2012) 24(4):042006. <https://doi.org/10.2351/1.4712658>
23. Sotnikov, V.T., Dobrotvorskiy, S.S., Zapechelnuk, E.F., Dobrotvorskiy, M.V.: Self-oscillations of the emission of charged particles from the surface of optical transparent media with nonlinear absorption of laser radiation. *Surface. Physics, chemistry, mechanics*, 9, 103–110 (1986).
24. COMSOL User's Guide. Ray Optics Module. COMSOL© (2022). <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.roptics/RayOpticsModuleUsersGuide.pdf>, last accessed 2024/02/02
25. Moura, V., Kina, A. Y., Tavares, S. S. M., Lima, L. D., & Mainier, F. B. (2007). Influence of stabilization heat treatments on microstructure, hardness and intergranular corrosion resistance of the AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Science*, 43(2), 536–540. doi:10.1007/s10853-007-1785-5

#### Bibliography (transliterated):

1. Dobrotvorskiy, S. et al. (2023). Computer Modelling and Comparative Analysis of Surface Microrelief Inspection by the Method of Scattering of a Laser Beam During Its Small-Angle Sliding Incidence. In: Cioboată, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 762, pp. 237–252. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_20).
2. Dobrotvorskiy, S. et al. (2023). The Relief of the Structured by Nanosecond Laser Stainless Steel Surface Inspection by Sliding Reflection of a Laser Beam. In: Balog, M., Iakovets, A., Hrehova, S. (eds) EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, pp. 65–77. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_5)
3. Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, Hayasaki Y, Mizeikis V, Buividas R, et al. Ultrafast Laser Processing of Materials: From Science to Industry. *Light Sci Appl*, 5(8), e16133 (2016). <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.133>



4. Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast Lasers-Reliable Tools for Advanced Materials Processing. *Light Sci App*, 3(4), e1491 (2014). <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.30>
5. Jiang L, Wang A-D, Li B, Cui T-H, Lu Y-F. Electrons Dynamics Control by Shaping Femtosecond Laser Pulses in Micro/nanofabrication: Modeling, Method, Measurement and Application. *Light Sci Appl*, 7(2), 17134 (2018). <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.134>
6. A. Mizuno, T. Honda, J. Kiuchi, Y. Iwai, N. Yasumaru, K. Miyazaki, *Tribol. Online* 1, 44 (2006)
7. N. Yasumaru, Kenzo Miyazaki, J. Kiuchi, *Appl. Surf. Sci.* 254, 2364 (2008)
8. J. Eichstaedt, G.R.B.E. Roemer, A.J. Huis in't Veld, *Phys. Proc.* 12, 7 (2011)
9. C.-Y. Chen, C.-J. Chung, B.-H. Wu, W.-L. Li, C.-W. Chien, P.-H. Wu, C.-W. Cheng, *Appl. Phys. A* 107, 345 (2012)
10. Bonse J, Koter R, Hartelt M, Spaltmann D, Pentzien S, Höhm S, et al. Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures on Steel and Titanium alloy for Tribological Applications. *Appl Phys A*, 17(1), 103–110 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8229-2>
11. Dusser B, Sagan Z, Soder H, Faure N, Colombier JP, Jourlin M, et al. Controlled Nanostructures Formation by Ultra Fast Laser Pulses for Color Marking. *Opt Express*, 18(3), 2913–2924 (2010). <https://doi.org/10.1364/oe.18.002913>
12. Jiang H-B, Zhang Y-L, Liu Y, Fu X-Y, Li Y-F, Liu Y-Q, et al. Bioinspired FewLayer Graphene Prepared by Chemical Vapor Deposition on Femtosecond Laser-Structured Cu Foil. *Laser Photon Rev*, 10(3), 441–450 (2016). <https://doi.org/10.1002/lpor.201500256>
13. Drevinskas R, Beresna M, Zhang J, Kazanskii AG, Kazansky PG. Ultrafast Laser-Induced Metasurfaces for Geometric Phase Manipulation. *Adv Opt Mater*, 5(1), 1600575 (2017). <https://doi.org/10.1002/adom.201600575>
14. Wang L, Chen Q-D, Cao X-W, Buividas R, Wang X, Juodkazis S, et al. Plasmonic Nano-Printing: Large-Area Nanoscale Energy Deposition for Efficient Surface Texturing. *Light Sci Appl*, 6(12), e17112 (2017). <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.112>
15. Miyagawa, R., Kamibayashi, D., Nakamura, H. et al. Crystallinity in periodic nanostructure surface on Si substrates induced by near- and mid-infrared femtosecond laser irradiation. *Sci Rep* 12, 20955 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25365-1>
16. Shimonaga, T., Tsukamoto, M. & Miyaji, G. Periodic nanostructures on titanium dioxide film produced using femtosecond laser with wavelengths of 388 nm and 775 nm. *Opt. Express* 22, 14696 (2014). <https://doi.org/10.1364/OE.22.014696>
17. Bonse, J. & Kruger, J. Pulse number dependence of laser-induced periodic surface structures for femtosecond laser irradiation of silicon. *J. Appl. Phys.* 108, 034903 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3456501>
18. Miyaji, G. & Miyazaki, K. Nanoscale ablation on patterned diamondlike carbon film with femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. Lett.* 91, 123102 (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2784966>
19. Hashida, M., Ikuta, Y., Miyasaka, Y., Tokita, S. & Sakabe, S. Simple formula for the interspaces of periodic grating structures selforganized on metal surfaces by femtosecond laser ablation. *Appl. Phys. Lett.* 102, 174106 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4803940>
20. Nivas, J. et al. Effects of ambient air pressure on surface structures produced by ultra-short laser pulses irradiation. *Opt. Lett.* 42, 2710–2713 (2017). <https://doi.org/10.1364/OL.42.002710>
21. Sun Q, Liang F, Vallée R, Chin SL. Nanograting Formation on the Surface of Silica Glass by Scanning Focused Femtosecond Laser Pulses. *Opt Lett*, 33(22), 2713–2725 (2008). <https://doi.org/10.1364/ol.33.002713>
22. Bonse J, Krüger J, Höhm S, Rosenfeld A. Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures. *J Laser Appl* (2012) 24(4):042006. <https://doi.org/10.2351/1.4712658>
23. Sotnikov, V.T., Dobrotvorsky, S.S., Zapechelnuk, E.F., Dobrotvorskaya, M.V.: Self-oscillations of the emission of charged particles from the surface of optical transparent media with nonlinear absorption of laser radiation. *Surface. Physics, chemistry, mechanics*, 9, 103-110 (1986).
24. COMSOL User's Guide. Ray Optics Module. COMSOL© (2022). <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.ropics/RayOpticsModuleUsersGuide.pdf>, last accessed 2024/02/02
25. Moura, V., Kina, A. Y., Tavares, S. S. M., Lima, L. D., & Mainier, F. B. (2007). Influence of stabilization heat treatments on microstructure, hardness and intergranular corrosion resistance of the AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Science*, 43(2), 536–540. doi:10.1007/s10853-007-1785-5

*Поступила (received) 10.02.2024*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Добротворський Сергій Семенович (Sergey Dobrotvorskiy)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [sdobro50@gmail.com](mailto:sdobro50@gmail.com), ORCID: 0000-0003-1223-1036

**Басова Євгенія Володимирівна (Yevheniia Basova)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [e.v.basova.khpi@gmail.com](mailto:e.v.basova.khpi@gmail.com), ORCID: 0000-0002-8549-4788

**Алексенко Борис Олександрович (Borys A. Aleksenko)** – докторант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [ttm777@ukr.net](mailto:ttm777@ukr.net), ORCID: 0000-0001-9680-9370

**Приходько Вадим Олександрович (Vadym Prykhodko)** – аспірант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0000-0003-2094-7472

**Добровольська Людмила Георгіївна (Ludmila Dobrovol'ska)** - кандидат технічних наук, доцент кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [lyudmyla@ukr.net](mailto:lyudmyla@ukr.net), ORCID: 0000-0001-8318-8552

**Басов Віктор Вікторович (Viktor Basov)** – інженер-механік, м.Харків; e-mail: [basovkd@gmail.com](mailto:basovkd@gmail.com), ORCID: 0009-0007-2889-3946