

О. В. АФАНАСЬЄВА¹, Н. О. ЛАЛАЗАРОВА², О. Г. ПОПОВА³¹ Харківський національний університет радіоелектроніки² Харківський національний автомобільно-дорожній університет³ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ

Предмет і мета роботи. В даний час для обробки матеріалів в авіаційній промисловості застосовуються газові, твердотільні та волоконні лазери. Для термічної обробки сталей використовують газові СО₂-лазери потужністю понад 1 кВт, які надійні в експлуатації, але мають високу вартість і невисоку ефективність. Відсутні дані про використання волоконних малопотужних (до 20 Вт) лазерів, що працюють в імпульсному режимі, для поверхневого зміцнення сталевих виробів. Метою роботи є визначення режимів поверхневого зміцнення виробів з вуглецевих і легованих сталей за допомогою твердотільних імпульсних YAG-лазерів малої потужності. **Методики.** Для лазерного зміцнення використовували твердотільний YAG-лазер потужністю 5 Вт (діодне накачування, довжина хвилі випромінювання $\lambda=1,064$ мкм, імпульсний режим). Використання нелінійного кристала дозволило одержати УФ-випромінювання з $\lambda = 0,355$ мкм (третя гармоніка). Були досліджені такі режими: обробка за допомогою одиночних імпульсів (тривалість 0,1...0,4 мс) і багатоімпульсна обробка короткими (30...70 мкс) імпульсами. Швидкість сканування становила 8...2 мм/с. Енергія в імпульсі визначалася фотоелектричним методом. Термічне зміцнення проводили на таких сталях: У12, Р6М5. Здатність до гартування ультрафіолетовим випромінюванням оцінювали на сталях 20, 45, У12 та ШХ15. **Результати.** Визначені оптимальні величини тривалості імпульсів для одержання максимальної твердості при лазерному гартуванні досліджуваних сталей. При багатоімпульсній обробці сталей тривалість імпульсу менше, ніж при одноімпульсній, інтенсивність зміцнення вище, а якість обробленої поверхні краще. Одноімпульсна і багатоімпульсна обробка супроводжується частковим оплавленням поверхні сталевих виробів, що не дозволяє використовувати її у випадках, коли потрібна висока якість поверхні. Лазерне гартування сталей УФ-випромінюванням не супроводжується оплавленням. **Висновки.** Для поверхневого зміцнення виробів, коли можливе часткове оплавлення поверхні, можуть використовуватися лазери малої потужності в імпульсному режимі. Лазерне гартування УФ-випромінюванням є перспективним напрямом термічного зміцнення сталей, що дозволяє зберегти вихідну якість поверхневого шару. Термічне зміцнення лазерами малої потужності може бути ефективним при невеликих розмірах оброблюваних ділянок елементів паливної апаратури двигунів, елементів тертя, і, особливо, інструменту.

Ключові слова: твердотільний лазер малої потужності; одноімпульсна і багатоімпульсна обробка; тривалість імпульсу; поверхневе гартування; сталь.

Вступ

Лазерні технології останнім часом все більше знаходять застосування в авіаційній промисловості, тому що лазерна обробка матеріалів дозволяє забезпечити високу якість одержуваних виробів, задану продуктивність процесів, екологічну чистоту, а також економію людських і матеріальних ресурсів [1].

В результаті використання лазерного променю для зміцнення матеріалів з'являється можливість внесення докорінних змін в технологію виготовлення виробів. Таким способом зміцненням можна змінити властивості різних ділянок деталі, виготовленої з порівняно недорогого конструкційного матеріалу, і отримати сплави з унікальними характеристиками міцності, зносостійкості і корозійної стійкості [2, 3].

1. Аналіз публікацій

Більшість лазерних технологій базується на тепловій дії випромінювання, тобто мається на увазі необхідність нагрівання об'єкта впливу до заданої температури. Тому головною характеристикою лазера, який використовується в таких технологіях, є його потужність. Для імпульсних лазерів розглядають потужність в імпульсі і середню потужність, яка залежить від тривалості та частоти проходження імпульсів. Довжину хвилі лазерного випромінювання вибирають таким чином, щоб забезпечити максимальне поглинання випромінювання речовиною. Відбивна здатність металів зменшується зі зменшенням довжини хвилі, тому ефективність нагріву металів збільшується при використанні лазера з меншою довжиною хвилі. Отже, обробка металів з

використанням Nd:YAG-лазера, що має довжину хвилі $\lambda=1,06$ мкм, більш ефективна в порівнянні з обробкою CO₂-лазером, що має довжину хвилі $\lambda=10,6$ мкм. На поглинальну здатність впливають як шорсткість опромінюваної поверхні, так і вид покриття.

Тривалість дії випромінювання визначає температуру нагрівання об'єкта, швидкість нагрівання та охолодження, величину температурних градієнтів і розміри прогрітих шарів в матеріалі. При використанні імпульсних лазерів тривалість впливу визначається тривалістю імпульсу випромінювання τ . Тривалість дії лазерів, що працюють в безперервному режимі, залежить від швидкості сканування $V_{ск}$ лазерного променя по поверхні матеріалу. Частота проходження імпульсів визначає продуктивність обробки.

Враховуючи, що не усі перелічені параметри є рівнозначними з точки зору впливу на матеріал, або не можуть бути зміненими при налаштуванні установки, в якості змінних параметрів в даній роботі обрано довжину хвилі випромінювання, яка визначається типом лазера, потужність випромінювання та тривалість лазерного впливу, що залежить від тривалості імпульсів, частоти їх проходження та швидкості переміщення лазерного променя по поверхні оброблюваного матеріалу.

Лазерне термічне зміцнення сталі полягає у впливі інтенсивного потоку лазерного випромінювання на локальну ділянку поверхні, швидкому розігріві цієї ділянки до високих температур (вище критичних) і охолодженні із швидкістю вище критичної. В процесі нагрівання і охолодження відбуваються фазові перетворення, що призводять до утворення мартенситу.

Лазерне поверхнєве зміцнення має ряд переваг у порівнянні з іншими методами – не потрібно застосовувати будь-які охолоджуючі середовища, що спрощує технологію, характеризується малим часом впливу, локальністю і забезпечує відсутність деформацій деталей [4, 5]. Тепловий вплив при лазерному термозміцненні регулюється в широких межах за рахунок зміни параметрів лазерного випромінювання і режимів обробки. Це забезпечує регулювання швидкостей нагріву і охолодження металу, часу перебування металу при високих температурах, що дозволяє отримувати необхідну структуру поверхневої ділянки і відповідні властивості [6].

З точки зору використання лазерного випромінювання для поверхневої обробки з метою зміцнення матеріалів представляють інтерес такі режими: лазерний нагрів поверхневого шару матеріалу до температури, що не перевищує температуру плавлення, витримка при цій температурі і подальше охолодження; нагрів матеріалу до температури, що

перевищує температуру плавлення, кристалізації розплаву і охолодження закристалізованого матеріалу; нагрів матеріалу до температури, що перевищує температуру його випаровування, та пластична деформація за рахунок ударної хвилі; нагрів поверхневого шару плазмою, що утворюється при взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом.

Ці режими лазерного нагріву і фізичні явища в матеріалі, що їх супроводжують, лежать в основі методів поверхневого зміцнення.

Обладнання, що використовується для лазерної обробки матеріалів, надзвичайно різноманітне – це сам лазер, а також пристрої зовнішньої оптики, керовані столи, маніпулятори, роботи для переміщення виробу під час обробки, а також програмне забезпечення, необхідне для реалізації конкретної технології лазерного впливу [1, 4].

В даний час з різною технологічною метою використовуються три типи лазерів: це газові, твердотільні і волоконні. Газові CO₂-лазери потужністю понад 1 кВт надійні в експлуатації, з автоматизованою системою управління технологічного комплексу широко використовуються для різних технологічних операцій, в тому числі для термічної обробки. Однак висока вартість таких комплексів та низька продуктивність обмежують їх застосування.

Твердотільні лазери на алюмоітрієвому гранаті (Nd³⁺:YAG-лазери) мають в порівнянні з газовими ряд переваг. Вони більш компактні, мають більш високі значення коефіцієнта корисної дії. Одночасно з цим YAG-лазери мають високу вартість і потребують значних експлуатаційних витрат. Для термічної обробки використовуються YAG-лазери потужністю 1...5 кВт, що працюють в безперервному та в імпульсному режимі.

На сьогоднішній день найбільш перспективними технологічними інструментами є волоконні лазери, які мають високу ефективність (до 50 %), що зменшує експлуатаційні витрати; невеликі розміри дозволяють легко вбудовувати їх в існуючі системи виробництва. Однак їх вартість поки залишається досить високою, що також не дозволяє говорити про їх широке використання.

Незважаючи на існуючу думку про те, що для проведення термічної обробки необхідний безперервний режим [1, 4, 7], можна припустити, що використання імпульсного випромінювання дозволить знизити потужність лазерних пристроїв: мала тривалість імпульсів і можливість фокусування випромінювання в пляму малого діаметра дозволяють створювати щільності потужності, які достатні для нагрівання оброблюваної поверхні до температур вище фазових перетворень.

В роботі [8] було показано, що імпульсний режим дозволяє проводити поверхнєве гартування

виробів з вуглецевих сталей лазерами малої потужності. Для кожної марки сталі існує оптимальна тривалість імпульсу, що забезпечує найбільш високу твердість зміцненого шару.

Метою цієї роботи є:

- 1) визначення оптимальної величини тривалості імпульсу одноімпульсного і багатоімпульсного лазерного випромінювання при поверхневому зміцненні вуглецевих і легованих сталей;
- 2) дослідження можливості поверхневого зміцнення сталей малої потужними лазерами УФ-діапазону.

2. Матеріали і методики досліджень

Для лазерного зміцнення використовували твердотільний YAG-лазер потужністю 5 Вт з діодним накачуванням (довжина хвилі випромінювання $\lambda=1,064$ мкм), що працює в імпульсному режимі. Використання нелінійного кристала дозволило одержати УФ-випромінювання з $\lambda=0,355$ мкм (третя гармоніка).

Були досліджені такі режими: обробка одиночними імпульсами тривалістю 0,1...0,4 мс і багатоімпульсний, тобто обробка короткими (30...70 мкс) імпульсами, швидкість переміщення столу становила 2...8 мм/с. Енергія в імпульсі визначалася фотоелектричним методом.

Зміцненню одиночними імпульсами та багатоімпульсною лазерною обробкою піддавали вуглецеву інструментальну сталь У12 та швидкорізальну сталь Р6М5. Сталі перед зміцненням піддавали стандартній термічній обробці: У12 – гартуванню і низькому відпуску, Р6М5 – гартуванню та триразовому відпуску.

Шорсткість зразків становила $R_z = 20$ мкм, тому додаткові заходи для збільшення поглинальної здатності поверхні не використовувалися. Після лазерного зміцнення вимірювали мікротвердість поверхневого шару на мікротвердомірі ПМТ-3.

Оцінка можливості гартування УФ-випромінюванням проводилась на сталях 20, 45, У12 та ШХ15 за мікротвердістю.

3. Результати досліджень та їх обговорення

Термічне зміцнення лазерами малої потужності може бути ефективним лише при невеликих розмірах оброблюваних ділянок. Тому дуже важливого значення набуває вибір об'єктів лазерного гартування. На наш погляд, найбільш доцільно проводити таку обробку для додаткового зміцнення окремих ділянок виробів, що вже були піддані стандартній зміцнювальній обробці. В першу чергу це стосуєть-

ся елементів паливної апаратури двигунів, елементів тертя і, особливо, інструменту: скальпелів, ножів, фрез, свердел та ін.

Аналіз досліджень мікротвердості зразків інструментальних сталей У12 і Р6М5, що зміцнені за двома режимами, показав, що при обробці серіями коротких імпульсів мікротвердість сталі У12 вище, ніж при обробці одиночними імпульсами (рис. 1).

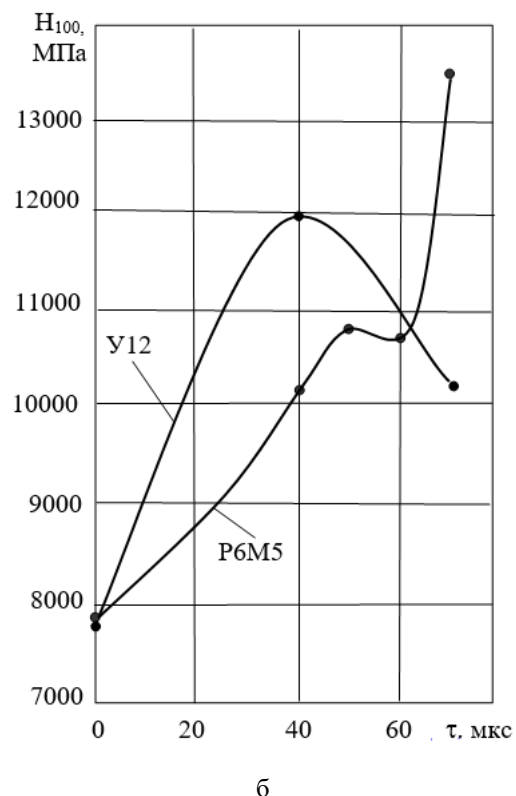
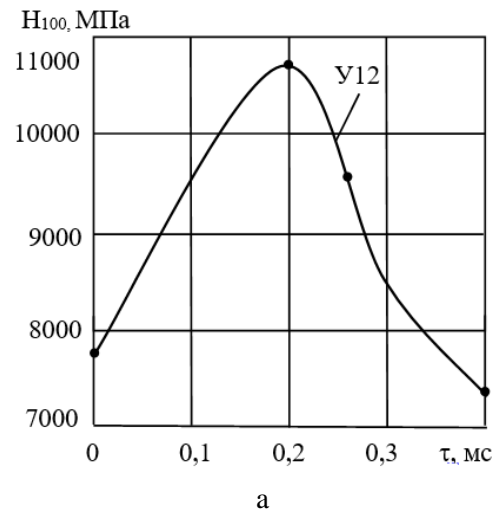


Рис. 1. Залежність мікротвердості від тривалості імпульсу: а – обробка одиночними імпульсами, б – багатоімпульсна обробка

Можна припустити, що при багатоімпульсній обробці внаслідок малого часу впливу лазерного випромінювання на матеріал і великій швидкості

відводу тепла, дифузійні процеси, пов'язані з розчиненням карбідів при плавленні, не встигають завершитися в повному обсязі. Тому зберігається вторинний цементит, відбувається подальше подрібнення зерна, підвищення густини дислокацій, що призводить до підвищення твердості.

Для сталі У12 оптимальне значення тривалості імпульсу становить 40 мкс. Для сталі Р6М5 в розглянутому часовому інтервалі спостерігається майже монотонне зростання мікротвердості. Можна припустити, по-перше, що проведення досліджень з більшою тривалістю імпульсу дозволить розробити оптимальний режим лазерного зміцнення для сталі Р6М5. По-друге, збільшення оптимальної тривалості імпульсу для сталі Р6М5 в порівнянні зі сталлю У12 пов'язане з її особливими теплофізичними властивостями: більшою теплоємністю і меншим в порівнянні з вуглецевою сталлю коефіцієнтом теплопровідності.

Таким чином, використання твердотілого лазера з довжиною випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм дозволяє проводити гартування, але температура нагрівання поверхні інструментальних сталей все ж зависока – більша за температуру плавлення.

Зі збільшенням тривалості імпульсу значення щільності потужності зростають [7]. Ці дані добре узгоджуються з аналізом поверхні зміцнених зразків. Всі досліджені режими викликають нагрів обробленої поверхні вище температури плавлення. Однак при обробці одиночними імпульсами спостерігається не тільки плавлення, а й спінення металу, а після кристалізації на поверхні утворюються мікротріщини (рис. 2).

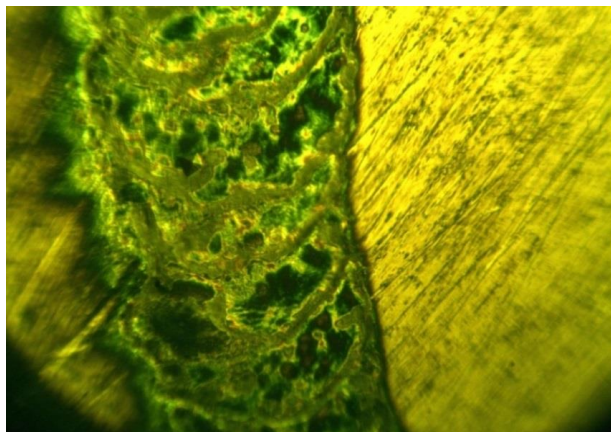


Рис. 2. Сталь У12, тривалість імпульсу 4 мс

Використання багатоімпульсної обробки хоча й призводить до часткового оплавлення, що в ряді випадків не бажано, все ж забезпечує більш високу якість поверхні.

Після лазерного впливу шорсткість поверхні вище, ніж до обробки.

Гартування малопотужними лазерами дозволяє проводити термічне зміцнення сталей і отримати високі значення мікротвердості поверхневого шару. Збільшення щільності потужності при проведенні поверхневого зміцнення досягали за рахунок зменшення діаметра плями фокусування лазерного проміню та збільшення кількості імпульсів. Однак і при одноімпульсній і при багатоімпульсній обробці гартування супроводжується частковим оплавленням. Гартування за такими режимами можна рекомендувати лише для тих деталей, від яких не вимагають високої якості поверхні.

В металах кванти випромінювання поглинаються електронами провідності в шарі товщиною $10^{-8} \dots 10^{-7}$ м, що відповідає глибині проникнення випромінювання у матеріал. При цьому енергія електронів провідності підвищується, зростає температура електронного газу, але температура решітки практично не змінюється. Через деякий, дуже незначний проміжок часу, $\tau > 10^{-11}$ с, температури електронного газу і решітки вирівнюються, і з цього моменту можна говорити про загальну температуру металу. Порівняння всіх частот випромінювання показує, що швидкість нагріву металу лімітується тільки швидкістю введення енергії випромінювання у метал, яка значною мірою залежить від поглинання випромінювання. Відомо, що із зменшенням довжини хвилі поглинальна здатність металів зростає практично до одиниці. Тому перспективним є гартування сталей за допомогою короткохвильового УФ-випромінювання, яке дозволяє отримувати якісну поверхню. Аналіз поверхні зразків, оброблених в імпульсному режимі при середній потужності 5 Вт і швидкості сканування 25 мм/с, показав, що оплавлення поверхні не відбувається. Результати вимірювань мікротвердості наведені у таблиці 1.

Таблиця 1
Мікротвердість різних сталей
до та після гартування УФ-випромінюванням

Марка сталі	Мікротвердість, МПа		
	У вихідному стані	Гартування ІЧ-випромінюванням, $\lambda = 1,06$ мкм	Гартування УФ-випромінюванням, $\lambda = 0,355$ мкм
20	2100	5770	6350
45	2700	8050	9200
У12	8150	11050	11280
ШХ15	7950	10200	10150

Аналіз результатів вимірювання мікротвердості зміцненого шару вуглецевих і легованої сталі показав можливість їх поверхневого зміцнення (із збереженням необхідної якості поверхні) малопотужними лазерами УФ-діапазону при використанні імпульсного режиму.

Висновки

Таким чином, в роботі показано, що для поверхневого зміцнення можливе використання лазерів малої потужності в імпульсному режимі. Визначена тривалість імпульсу випромінювання при обробці одиночними імпульсами і при багатоімпульсній обробці сталі У12, яка дозволяє отримати максимальну твердість зміцненого шару.

Дослідження показали, що при багатоімпульсній обробці сталей, коли довжина імпульсу менше, ніж при одноімпульсній, інтенсивність зміцнення вище. Однак рекомендувати таку обробку можна тільки для тих виробів, де не потрібна висока якість поверхні. Одноімпульсна і багатоімпульсна обробка супроводжуються частковим оплавленням поверхні сталевих виробів.

Перспективним напрямом використання малопотужних лазерів для термічного зміцнення сталей є збільшення поглинальної здатності поверхні за рахунок зменшення довжини хвилі випромінювання – гартування сталей УФ-випромінюванням (з довжиною хвилі $\lambda = 0,355$ мкм) лазерами малої потужності (5 – 10 Вт), що працюють в імпульсному режимі без оплавлення поверхні.

Література

1. Коваленко, В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера [Текст] / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, В. С. Черненко. – К. : Техника, 1990. – 192 с.
2. Baykara, T. Effects of Laser Hardening Treatment on the Wear Properties of the Vanadis 4 Extra and Vanadis 10 Tool Steels [Text] / T. Baykara, N. Keskin // *International Journal of Metallurgy and Metal Physics*, 2019. – Vol. 4, Iss. 1. – 9 p. DOI: 10.35840/2631-5076/9229.
3. Kapustynskiy, O. Laser Treatment for Strengthening of Thin Sheet Steel [Text] / O. Kapustynskiy, N. Višniakov // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 2020. – Article ID: 5963012. – 13 p. DOI: 10.1155/2020/5963012.
4. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки.: учеб. пособие для вузов [Текст] / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
5. Крапошин, В. С. Выбор режима нагрева поверхностным тепловым источником для получения

заданной глубины закалки и заданного структурного состояния [Текст] : учебн. пособие / В. С. Крапошин. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 40 с.

6. Дощечкина, И. В. Условия лазерной обработки для получения максимальной твердости поверхности среднеуглеродистых сталей [Текст] // И. В. Дощечкина / *Вестник ХНАДУ*. – 2008. – Вып. 42. – С. 52-54.

7. Бураков, В. А. Формирование структур повышенной износостойкости при лазерной закалке металлообрабатывающего инструмента [Текст] / В. А. Бураков, С. С. Федосиенко // *Металловедение и термическая обработка*. – 1983. – № 5. – С. 16-17.

8. Афанасьева, О. В. Поверхностное упрочнение сталей лазерами малой мощности [Текст] / О. В. Афанасьева, Н. А. Лалазарова // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2013. – Том 12, Вып. 3. – С. 242-246.

References

1. Kovalenko, V. S., Golovko, L. F., Chernenko, V. S. *Uprochnenie i legirovanie detalej mashin luchom lazera* [Hardening and alloying of machine parts with a laser beam]. Kiev, Tekhnika Publ., 1990. 192 p.
2. Baykara, T., Keskin, N. Effects of Laser Hardening Treatment on the Wear Properties of the Vanadis 4 Extra and Vanadis 10 Tool Steels. *International Journal of Metallurgy and Metal Physics*, 2019, vol. 4, iss. 1. 9 p. DOI: 10.35840/2631-5076/9229.
3. Kapustynskiy, O., Višniakov, N. Laser Treatment for Strengthening of Thin Sheet Steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 2020, Article ID: 5963012. 13 p. DOI: 10.1155/2020/5963012.
4. Grigoryancz, A. G., Shiganov, I. N., Misyurov, A. I. *Tekhnologicheskie procesy lazernoj obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2006. 664 p.
5. Kraposhin, V. S. *Vybor rezhima nagreva poverhnostnym teplovym istochnikom dlya polucheniya zadannoj glubiny zakalki i zadannogo strukturnogo sostoyaniya* [The choice of heating mode by a surface heat source to obtain a given hardening depth and a given structural state]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2002. 40 p.
6. Doshechkina, I. V. *Usloviya lazernoj obrabotki dlya polucheniya maksimalnoj tvyordosti poverhnosti sredneuglerodistykh stalej* [Laser processing conditions to obtain maximum surface hardness of medium carbon steels]. *Vestnik HNADU - Bulletin of KHNADU*, 2008, vol. 42, pp. 52-54.
7. Burakov, V. A., Fedosienko, S. S. *Formirovanie struktur povyshennoj iznosostojkosti pri lazernoj zakalke metalloobrabatyvayushogo instrumenta* [The formation of structures of increased wear resistance during laser hardening of metalworking tools]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka – Metal Science and Heat Treatment*, 1983, no. 5. pp. 16-17.

8. Afanasieva, O. V., Lalazarova, N. A. Poverkhnostnoe uprochnenie stalei lazerami maloi moshchnosti [Surface hardening of steels by low-

power lasers]. *Prikladnaya radioelektronika – Applied radio electronics*, 2013, vol. 12, iss. 3, pp. 242-246.

Поступила в редакцию 12.01.2021, рассмотрена на редколлегии 16.04.2021

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

О. В. Афанасьева, Н. А. Лалазарова, Е. Г. Попова

Предмет и цель работы. В настоящее время для обработки материалов в авиационной промышленности используются газовые, твердотельные и волоконные лазеры. Для термической обработки сталей применяют газовые CO₂-лазеры с мощностью более 1 кВт, которые надежны в эксплуатации, но имеют высокую стоимость и низкую эффективность. Нет результатов по использованию импульсных лазеров малой мощности (до 20 Вт) для поверхностного упрочнения стальных изделий. Целью данной работы является определение режимов поверхностного упрочнения изделий из углеродистых и легированных сталей с использованием маломощных твердотельных импульсных YAG-лазеров. **Методики.** Для лазерной закалки использовался твердотельный YAG-лазер мощностью 5 Вт (диодная накачка, длина волны излучения $\lambda = 1,064$ мкм, импульсный режим). Использование нелинейного кристалла позволило получить УФ-излучение с $\lambda = 0,355$ мкм (третья гармоника). Были исследованы следующие режимы: обработка с помощью одиночных импульсов (длительность 0,1...0,4 мс) и многоимпульсная обработка короткими (30...70 мкс) импульсами. Скорость сканирования составляла 8...2 мм/с. Энергия в импульсе определялась фотоэлектрическим методом. Термическое упрочнение проводили на таких сталях: У12, Р6М5. Возможность упрочнения УФ-излучением была оценена на сталях 20, 45, У12 и ШХ15. **Результаты.** Определены оптимальные значения длительности импульса для получения максимальной твердости при лазерном упрочнении исследованных сталей. При многоимпульсной обработке сталей длительность импульса меньше, чем при одноимпульсной, интенсивность упрочнения выше, а качество обработанной поверхности лучше. Одноимпульсная и многоимпульсная обработка сопровождается частичным оплавлением поверхности стальных изделий, что не позволяет использовать её в случаях, когда требуется высокое качество поверхности. Лазерное упрочнение сталей ультрафиолетовым излучением не сопровождается оплавлением. **Выводы.** Для поверхностного упрочнения изделий, где возможно частичное оплавление поверхности, могут использоваться лазеры малой мощности в импульсном режиме. Лазерная закалка ультрафиолетовым излучением является перспективным направлением для термического упрочнения сталей, которое позволяет сохранить исходное качество поверхностного слоя. Термическое упрочнение лазерами малой мощности может быть эффективным при небольших размерах обрабатываемых участков элементов топливной аппаратуры двигателей самолётов, элементов трения, и, особенно, инструмента.

Ключевые слова: твердотельный лазер малой мощности; одноимпульсная и многоимпульсная обработка; длительность импульса; поверхностное упрочнение; сталь.

NEW TECHNOLOGIES OF LASER PROCESSING

O. Afanasieva, N. Lalazarova, O. Popova

Subject and purpose. Currently, gas, solid-state, and fiber lasers are used to process materials in the aviation industry. For the thermal treatment of steels, gas CO₂ lasers with a capacity of more than 1 kW used, which are reliable in operation but have high cost and low efficiency. There are no results on the use of low-power (up to 20 W) pulsed-mode lasers for surface hardening of steel products. The purpose of this work is to determine the modes of surface hardening of products from carbon and alloy steels using low-power solid-state pulsed YAG lasers. **Methodology.** For laser hardening, a 5 W solid-state YAG laser was used (diode pumping, radiation wavelength $\lambda = 1,064$ μm , pulse mode). The use of a nonlinear crystal made it possible to obtain UV radiation with $\lambda = 0,355$ μm (third harmonic). The following modes were investigated: processing with single pulses (duration 0,1...0,4 ms) and multi-pulse processing with short (30...70 ms) pulses. The scanning speed was 8...2 mm/s. The energy in the pulse was determined by the photoelectric method. Thermal hardening was performed on the following steels: У12, Р6М5. The possibility of UV radiation hardening was evaluated on steel 20, 45, У12, and ШХ15. **Findings.** The optimum values of pulse duration for maximum hardness in laser hardening of the investigated steels. With multi-pulse treatment of steels, the pulse duration is shorter than with single-pulse treatment, the hardening intensity is higher, and the quality of the processed surface is better. Single-pulse and multi-pulse processing are accompanied by partial melting of the surface of steel products, which does not allow it to be used in cases where a high quality of the surface is required. Laser hardening of steel by ultraviolet radiation is not accompanied by melting. **Conclusion.** For surface hardening of products, where partial melting of the surface is possible, low-power lasers in pulse mode can be used. Laser hardening by ultraviolet radiation is a promising direction for

thermal hardening of steels, which allows maintaining the original quality of the surface layer. Thermal hardening with low-power lasers can be effective for small-sized areas of the processed parts of the fuel equipment of aircraft engines, friction elements, and, especially, the tool is small.

Keywords: low-power solid-state laser; single-pulse and multi-pulse processing; pulse duration; surface hardening; steel.

Афанасьєва Ольга Валентинівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Лалазарова Наталія Олексіївна – канд. техн. наук, доц. каф. технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна.

Попова Олена Георгіївна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Olga Afanasieva – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Physical Foundations of Electronic Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, e-mail: olha.afanasieva@nure.ua, ORCID: 0000-0002-5382-2986, Scopus Author ID: 57201346145, <https://scholar.google.com/citations?user=l02A3UkAAAAJ&hl=ru>

Nataliia Lalazarova – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Technology of Metals and Materials Science Department, Kharkiv, Ukraine, e-mail: lalaz1932@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2138-9081, Scopus Author ID: 57196345772, https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=jjU38RsAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate

Olena Popova – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.popova@khai.edu, ORCID: 0000-0003-3955-3852, <https://scholar.google.com/citations?user=aRR3gjEAAAAJ&hl=ru>