

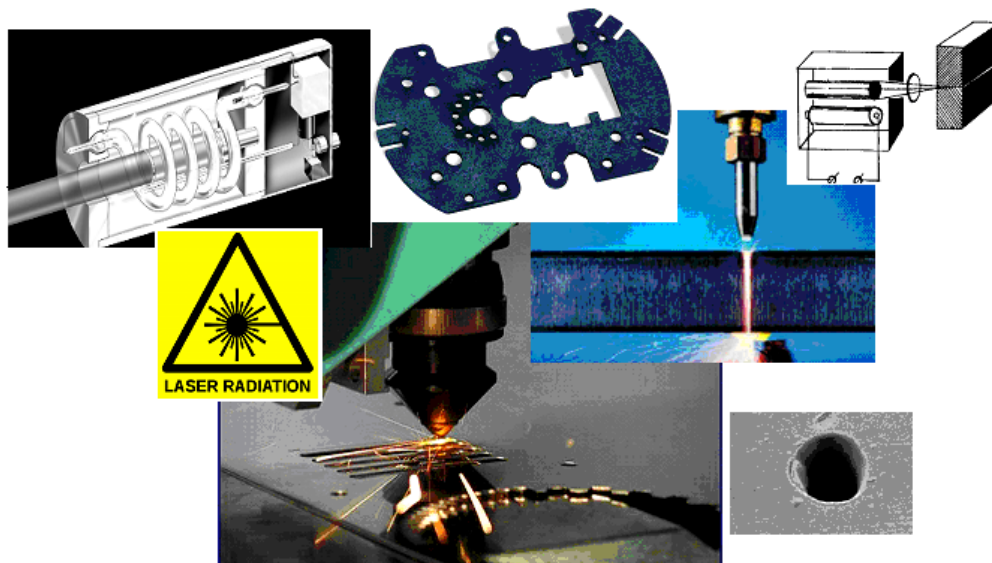
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

Л. І. Пупань

ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ У МАШИНОБУДУВАННІ

Навчальний посібник



Харків
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

Л. І. Пупань

ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ У МАШИНОБУДУВАННІ

Навчальний посібник

для студентів
спеціальності «Прикладна механіка»
денної, заочної і дистанційної форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 25.06.20 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2020

УДК 621.375.8
П88

Рецензенти:

Е. С. Геворкян, д-р техн. наук, проф., Український державний університет
залізничного транспорту,
В. В. Варганов, канд. техн. наук, зав. лабораторією, Акціонерне товариство
«Український науково-дослідний інститут вогнетривів
імені А. С. Бережного»

Пупань Л. І.

П88 Лазерні технології у машинобудуванні : навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХП», 2020. – 109 с.

У посібнику розглянуто властивості лазерного випромінювання як універсального інструмента. Наведено особливості практичної реалізації технологічних процесів лазерної обробки у машинобудуванні. Представлено також можливості використання лазерного випромінювання у контрольно-вимірювальних операціях та відомості щодо лазерних адитивних технологій.

Призначено для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання.

Іл. 44. Табл. 4. Бібліогр. : 12 найм.

УДК 621.375.8

© Л. І. Пупань , 2020

ВСТУП

Однією з якісно нових наукоємних технологій, що широко впроваджуються у виробництво, є лазерні технології, які базуються на використанні електромагнітного випромінювання, створюваного оптичними генераторами – лазерами.

Сфери застосування лазерного випромінювання дуже різноманітні: матеріалобробка, вимірювання і контроль в технологічних процесах, мікроелектроніка та мікрооптика, локація та навігація, маркування матеріалів і виробів, поверхневе очищення, оптичний зв'язок та волоконні технології, адитивні технології, медицина, голографія, реставрація художніх виробів і т. д.

Використання лазерних технологій – прогресивний напрямок у машинобудуванні, який в останні роки набув значного розвитку. Застосування лазерного випромінювання є ефективним в авіаційній та автомобільній промисловості, в спеціальних галузях, пов'язаних із застосуванням важкооброблюваних матеріалів.

Можливості сфокусованого пучка лазерного випромінювання як універсального інструменту унікальні. Лазерні технології відрізняються від традиційних методів обробки відсутністю контактних явищ в зоні обробки та можливістю точно дозованого інтенсивного підведення енергії до поверхні виробу; локальністю за глибиною та площею фізичних процесів у зоні термічного впливу при збереженні вихідних властивостей основного об'єму та відсутністю значних деформацій оброблюваних деталей; можливістю обробки практично будь-яких матеріалів, незалежно від їх механічних властивостей, з високою якістю і продуктивністю. Дана технологія має високий рівень трудо- і енергозбереження, а також екологічної чистоти. У ряді випадків лазерна технологія є єдиною для вирішення важливих технологічних завдань. Регулювання введеної в технологічний об'єкт енергії дозволяє одному й тому ж матеріалу надавати принципово різні властивості. На базі використання лазерного променя створено принципово нові технології виготовлення виробів у машинобудуванні.

До найбільш практично значимих видів лазерної обробки у загальному машинобудуванні традиційно відносять термообробку, різання, прошивання отворів, зварювання, наплавлення, поверхневе легування як найбільш вивчені та апробовані на практиці процеси. Ці технології можна здійснювати на універсальній лазерній установці (комплексі) при незначному його перенастроюванні за рахунок забезпечення оптимальних режимів обробки.

У навчальному посібнику викладено основні принципи формування лазерного випромінювання; представлена інформація щодо видів лазерної техніки та її практичного використання; надано аналіз процесів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, на базі яких реалізуються різні методи обробки матеріалів. Розглянуто властивості лазерного випромінювання як універсального інструменту. Показано особливості практичної реалізації різних технологічних процесів лазерної обробки у машинобудуванні. Наведено приклади виробів, для отримання яких застосування лазерних технологій є доцільним та перспективним.

1. ПРОМЕНЕВІ МЕТОДИ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ РОЛЬ У МАШИНОБУДУВАННІ

Розробка та впровадження принципово нових технологій, заснованих на останніх досягненнях науки і техніки, – головна риса теперішнього етапу розвитку виробництва.

Серед різних видів сучасних технологій особлива роль належить *променевим технологіям*, які полягають у впливі на поверхню матеріалу висококонцентрованих променевих потоків або високоенергетичних струменів.

Дані методи набули інтенсивного розвитку у другій половині ХХ століття і сьогодні займають повноправне місце серед інших технологій, що застосовуються в різних галузях, у тому числі в машинобудуванні.

Носіями енергії в цих методах є світловий промінь високої енергії, потік прискорених заряджених частинок – електронів, а також плазмовий струмінь.

Відмінною рисою променевих методів обробки є відсутність традиційного робочого інструменту, роль якого виконує безпосередньо використовуване випромінювання, яке надає теплового впливу на матеріал.

Променеві технології досить широко вже застосовуються у багатьох процесах машинобудування:

- у технологіях отримання конструкційних та інструментальних матеріалів із заданими властивостями – переплавленні металу з метою рафінування, а також у термообробці і легуванні;
- у технологіях виготовлення заготовок та деталей машин – променевих способах зварювання, розмірній обробці;
- при нанесенні зносостійких покриттів, у тому числі на різальний інструмент, відновленні зношених поверхонь виробів;
- у сучасних методах вимірювальної техніки та контролю якості і т. д.

Важливу роль відіграють променеві методи в технологіях розмірної обробки заготовок деталей машин.

Як відомо, за видом використовуваної енергії методи розмірної обробки поділяють на механічні, фізико-хімічні та комбіновані, рис.1.1.



Рисунок 1.1 – Методи розмірної обробки заготовок деталей машин

Поряд з найбільш поширеною універсальною традиційною механічною технологією (переважно, різанням) існує група перспективних фізико-хімічних методів розмірної обробки (ФХО), які базуються на використанні різних фізико-хімічних процесів енергетичного впливу на заготовку з метою формоутворення деталі з заданими розмірами, формою та необхідною якістю поверхні.

Розмірне формоутворення за допомогою фізико-хімічних методів обробки використовують у машинобудуванні в тих випадках, коли традиційними методами (наприклад, різанням) не можна виготовити деталь (вузол), або альтернативні технології ефективніші з точки зору трудомісткості та собівартості.

Широке використання різноманітних нетрадиційних методів обробки, у тому числі променевих, викликане необхідністю виготовлення виробів із важкооброблюваних матеріалів (високолегованих сталей, твердих сплавів, напівпровідникових та керамічних матеріалів); ускладненням фор-

ми виробів (у тому числі виробів з глухими фасонними отворами, порожнинами складної форми, отворами з криволінійною віссю, отворами малого діаметра); необхідністю обробки великогабаритних тонкостінних елементів конструкцій; підвищенням вимог до якості та точності отримуваних виробів; можливостями точного регулювання процесів та їх автоматизації завдяки достатній простоті кінематики формоутворення поверхні.

Нині відомі десятки видів формоутворення, заснованих на різноманітних хімічних, фізичних та електрофізичних явищах або їх поєднанні. Використання нових видів розмірної обробки дозволяє простіше і економніше розв'язувати важливі завдання технології машинобудування.

Однією з основних груп ФХО є променеві методи, засновані на розмірному видаленні матеріалу плавленням і випаровуванням його в зоні обробки під впливом енергії концентрованих променевих потоків або високоенергетичних струменів – лазерна, плазмова та електронно-променева обробка.

Променеві методи відрізняються високою щільністю енергії в зоні фокусування, локальністю, прецизійністю, високою якістю обробленої поверхні. Основним недоліком променевих методів обробки є досить висока вартість, тому їх застосування доцільне для виготовлення високоточних відповідальних виробів з важкооброблюваних матеріалів.

Із зазначених променевих методів обробки особлива роль належить *лазерним технологіям*, які базуються на використанні концентрованого високоенергетичного світлового променя і є невід'ємною частиною сучасного промислового виробництва.

Лазерні технології мають певні, досить вагомі переваги порівняно з іншими променевими методами. До них належать, наприклад, відсутність вакууму (порівняно з найближчим аналогом – електронно-променевою обробкою), що значно розширює технологічні можливості та спрощує обробку у різних середовищах – на повітрі, в середовищі інертних газів. Ці технології забезпечують досить просте керування лазерним променем за допомогою оптичних систем та обробку важкодоступних ділянок. Їх характеристиками є також несхильність до дії магнітного впливу (що забезпечує стабільність параметрів якості), гнучкість і легкість переналагодження, екологічна чистота і т. д. Перевагами застосування лазерних технологій є також висока якість виробів, висока продуктивність процесів, економія ма-

теріальних ресурсів, підвищення культури виробництва. Зазвичай лазерні установки є багатоцільовими і дозволяють реалізувати цілий ряд технологій обробки матеріалів – зварювання, різання, зміцнення, розмірну обробку.

Лазерна обробка може застосовуватись для практично всіх видів матеріалів незалежно від їх твердості та в'язкості (металів, твердих сплавів, кераміки, скла, пластмас, гум, напівпровідникових матеріалів, дорогоцінних каменів, біологічних матеріалів) у багатьох галузях промисловості – у машинобудуванні, у мікроелектроніці та комунікаційних технологіях, у промисловості будівельних матеріалів, у медицині, в сільському господарстві, в ювелірній промисловості та інших сферах, рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Основні споживачі лазерної технології

Лазерне випромінювання забезпечує отримання граничних значень багатьох технологічних параметрів – щільності потужності в зоні фокусування (до $10^{20} \dots 10^{24}$ Вт/м²), температури в зоні впливу (до 8000 °С) і т. д.

Загалом застосування лазерних технологій забезпечує підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємств.

Питання для самоперевірки

1. Яку роль відіграють променеві методи обробки у сучасному виробництві?
2. В чому полягає сутність дії променевих технологій виготовлення виробів?

3. Що є носієм енергії у променевих методах обробки?
4. Які процеси машинобудування здійснюються за допомогою променевих методів?
5. Які технології належать до фізико-хімічних методів розмірної обробки?
6. У яких випадках є доцільним розмірне формоутворення за допомогою фізико-хімічних методів?
7. В чому полягає перевага променевих методів розмірної обробки?
8. Назвіть особливі риси лазерної технології порівняно з іншими методами променевої обробки.
9. Які матеріали підлягають лазерній обробці?
10. За якими принципами визначається вибір променевих методів обробки?

2. ОСНОВИ ГЕНЕРАЦІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1. Світло як електромагнітні хвилі

Оскільки лазерні технології базуються на використанні світлового променя високої енергії, коротко розглянемо характеристики цього виду випромінювання.

Оптичне випромінювання (світло в широкому сенсі слова) являє собою електромагнітні хвилі з довжиною хвилі λ – від 100 нм до 1 мм. До оптичного випромінювання, окрім видимого світла, що сприймається людським оком ($\lambda \approx 0,38 \dots 0,78$ мкм), відносять також ультрафіолетове ($\lambda \approx 0,1 \dots 0,38$ мкм) та інфрачервоне ($\lambda \approx 0,78 \dots 1,0$ мкм) випромінювання (рис. 2.1).

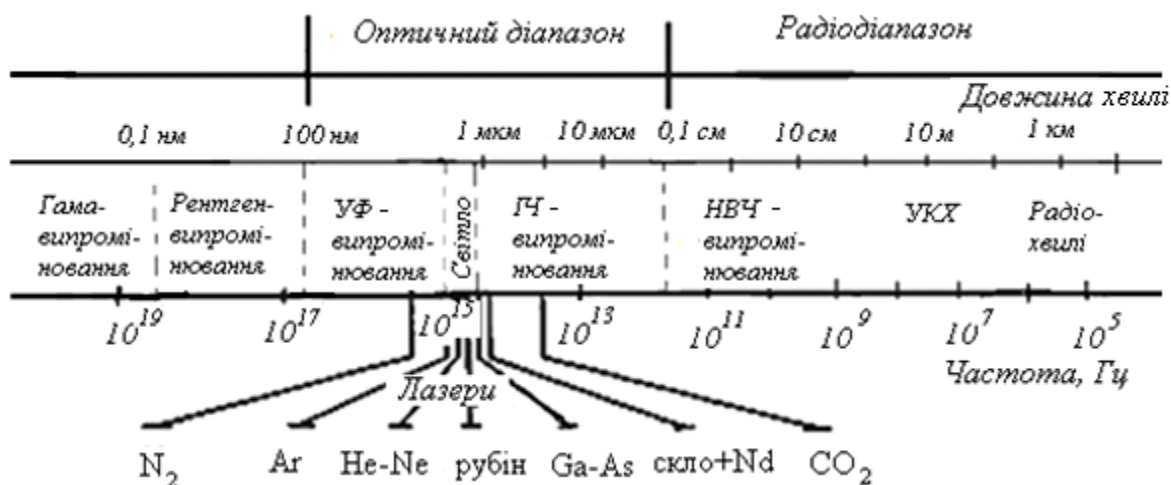


Рисунок 2.1 – Електромагнітний спектр і діапазон довжин хвиль, в якому здійснюється лазерне випромінювання

При проходженні світла як електромагнітних хвиль через середовище можливі процеси:

- відбиття – повернення хвиль при зустрічі з межею поділу двох середовищ з різними електричними властивостями «назад» в перше середовище;
- заломлення – зміна напрямку поширення при проходженні через межу розділу двох середовищ;
- дифракції – обгинання хвилями перешкод, розмір яких дорівнює або більше довжини хвилі;

- інтерференції – взаємодії одночасно декількох хвиль.

Для всіх типів електромагнітного випромінювання, включаючи світлові хвилі, є справедливим співвідношення

$$\lambda \nu = c, \quad (1.1)$$

де λ – довжина хвилі; ν – частота коливань; c – швидкість поширення світлової хвилі в вакуумі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Подвійна природа світла (так званий корпускулярно-хвильовий дуалізм) полягає в тому, що, з одного боку, світлове випромінювання являє собою електромагнітні хвилі, тобто коливання електричного і магнітного полів, з іншого боку, світлове випромінювання має корпускулярні властивості та може бути представлене як потік дискретних квантів енергії – фотонів. Кожен фотон несе певну кількість енергії, яка визначається як

$$W = h\nu = hc/\lambda, \quad (1.2)$$

де h – постійна Планка; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Таким чином, *лазерне випромінювання – це різновид електромагнітного випромінювання оптичного діапазону*. Найбільш поширеними є лазери, що генерують світлове випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0,3 (ультрафіолетовий діапазон – УФ) ... 10 мкм (інфрачервоний діапазон – ІЧ).

2.2. Основні властивості лазерного випромінювання

Лазерне випромінювання має особливі властивості, які роблять його унікальним технологічним інструментом. Серед них найважливішими є такі.

- *Монохроматичність* – лазерне випромінювання є світлом практично однієї довжини хвилі (однієї частоти). Відношення розкиду довжин хвиль, «представлених» в лазерному промені, до середньої довжини хвилі складає всього 10^{-6} ... 10^{-8} , а спеціальними заходами може бути зменшено навіть до 10^{-10} .

- *Спрямованість* – кут розходження променя в багатьох випадках не перевищує часток кутової хвилини. Це означає, що енергія може передаватися по променю на великі відстані і, відповідно до законів геометричної оптики, легко фокусуватися в зоні невеликих розмірів ~ 10 ... 100 мкм;

- *Когерентність* – узгодженість хвильових процесів в просторі і в ча-

сі, що теоретично дозволяє сфокусувати лазерне випромінювання в пляму діаметром, що дорівнює довжині хвилі, і отримувати найвищу щільність енергії.

Всі зазначені особливості лазерного випромінювання знайшли застосування при вирішенні різних технологічних завдань лазерної обробки.

2.3. Загальний принцип дії лазера

Лазер – пристрій, що перетворює різні види енергії (електричну, світлову, хімічну, теплову) в енергію когерентного електромагнітного випромінювання оптичного діапазону.

Принцип дії лазера (оптичного квантового генератора – ОКГ) закладений в його назві: *laser* – аббревіатура від *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – посилення світла в результаті вимушеного (стимульованого) випромінювання, що відображує фізичну сутність процесу генерації лазерного випромінювання.

Згідно із загальним уявленням атоми або молекули в системі речовини можуть знаходитись на різних енергетичних рівнях. На більш низьких рівнях E_1 вони мають меншу енергію, на більш високих (E_2) – більшу. Для переходу атома з нижнього рівня на верхній потрібні витрати енергії, наприклад, дія зовнішнього джерела (рис. 2.2, а). Збуджена мікрочастинка з енергією E_2 є нестійкою і може перейти на більш низький енергетичний рівень E_1 спонтанно (мимовільно), випускаючи квант випромінювання (фотон) з енергією

$$h\nu = hc / \lambda = E_2 - E_1, \quad (1.3)$$

де E_2 і E_1 – значення енергій двох станів, причому $E_2 > E_1$, рис. 2.2, б.

Спонтанне випромінювання мікрочастинок має випадковий і хаотичний характер: фотони випромінюються мікрочастинками в різні моменти часу (несинхронно), мають неоднакову частоту, поширюються в різних напрямках. Таке випромінювання випускають різні джерела некогерентного оптичного випромінювання (нелазерні), наприклад, теплові джерела світла (включаючи первинне джерело – Сонце), лампи розжарювання, газорозрядні і електролюмінесцентні джерела оптичного випромінювання, зокрема, світловипромінюючі діоди.

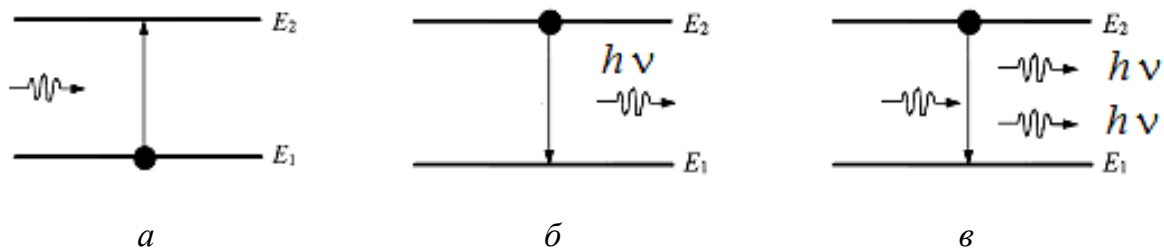


Рисунок 2.2 – Схеми процесів взаємодії випромінювання з речовиною:
 а – поглинання; б – спонтанне випромінювання;
 в – вимушене випромінювання

Якщо енергія фотонів зовнішнього джерела $h\nu = hc/\lambda = \Delta E = E_2 - E_1$, то в результаті взаємодії зовнішнього фотона з атомом (молекулою), що знаходиться на вищому енергетичному рівні E_2 , з'являються два фотони, які мають одну й ту ж частоту (довжину хвилі) та поширюються в одному й тому ж напрямку. Фактично спостерігається посилення інтенсивності падаючого світла, здійснюються умови вимушеного випромінювання (див. рис. 2.2, в).

Таким чином, лазерний ефект здійснюється завдяки переходам частинок речовини (атомів, молекул, іонів) між певними енергетичними рівнями атомної або молекулярної системи, що має назву *активне середовище* (активний елемент, активна речовина).

Для генерації лазерного випромінювання в активному середовищі необхідно забезпечити інтенсивне «заселення» одного або кількох верхніх енергетичних рівнів. Цей процес має назву «інверсна заселеність».

Інверсна заселеність – це такий стан системи, коли велика частина атомів, молекул знаходиться на верхніх енергетичних рівнях з більшою енергією, з яких починається флуоресцентний перехід, тобто надмірна концентрація збуджених мікрочастинок.

Для створення інверсної заселеності необхідно змінити теплову рівновагу системи, тобто здійснити «накачування» активного елемента (наприклад, опроміненням системи додатковим світлом зовнішнього джерела з певною довжиною хвилі λ та енергією фотонів ΔE).

Для посилення випромінювання та збільшення числа збуджених частинок, що беруть участь в генеруванні, збільшують розміри активного елемента і використовують *резонаторну систему* – два дзеркала (одне з

яких є повністю відбиваючим, непрозорим, інше – частково відбиваючим, напівпрозорим). Певна відстань між дзеркалами створює ефект резонансу – багатократне проходження світла крізь активне середовище та посилення випромінювання. Загальна оптична вісь дзеркал виділяє в просторі напрямок, в якому формується лазерний промінь.

Подальшим фокусуванням за допомогою фокусуючої лінзи зменшують діаметр променя, при цьому щільність енергії істотно зростає. Сфокусований лазерний промінь спрямовують на оброблюваний виріб.

Таким чином, у загальному випадку лазер складається з таких елементів (рис. 2.3): активний елемент, резонаторна система, пристрій накачування.

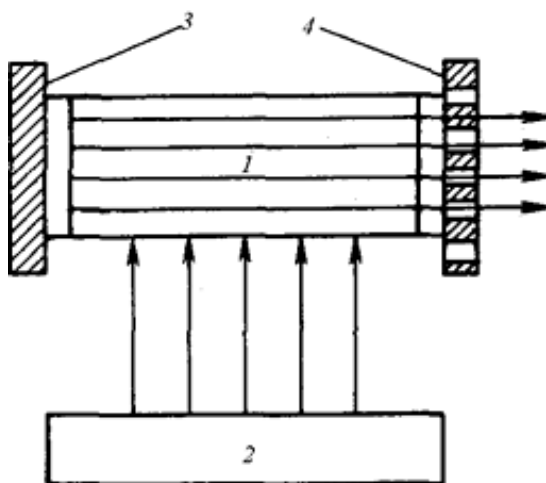


Рисунок 2.3 – Принципова схема лазера:
1 – активний елемент; 2 – пристрій накачування; 3,4 – два взаємно паралельних дзеркала (непрозоре і напівпрозоре відповідно)

На підставі сказаного вище можна зробити висновок: дія лазера заснована на використанні вимушеного (індукованого) випромінювання світла системою збуджених атомів, молекул, іонів або інших частинок речовини (активним середовищем), вміщеною в оптичний резонатор.

Незважаючи на відносну простоту принципової схеми, лазери досить різноманітні – за видами та розмірами активного середовища, за способами накачування, за геометрією та формою дзеркал оптичного резонатора та іншими параметрами.

Питання для самоперевірки

1. Що уявляє собою оптичне випромінювання (світло в широкому сенсі слова)?
2. Які процеси відбуваються при проходженні світла як електромагнітних хвиль через середовище?
3. В чому полягає подвійна природа світла?
4. В якому діапазоні хвиль найбільш поширені лазери генерують світлове випромінювання?
5. Назвіть основні властивості лазерного випромінювання.
6. Який основний принцип дії лазера?
7. В чому різниця спонтанного та вимушеного випромінювання?
8. Що являє собою активний елемент лазера?
9. В чому полягає сутність явища «інверсної заселеності» лазерної системи?
10. Яка призначеність «накачування» активного елемента лазера?
11. Назвіть основні складові елементи лазера.

3. ЛАЗЕРНА ТЕХНІКА

3.1. Історія створення лазерів та лазерних технологій

Лазерна технологія і техніка пройшли тривалий шлях розвитку – від сміливих фантазій письменників минулого століття, теоретичних розробок вчених різних країн до широкого реального застосування в різних сферах людської діяльності.

Деякі найбільш важливі етапи розвитку і становлення лазерної техніки і технологій наведено нижче.

- 1917 р. Відомий фізик Альберт Ейнштейн ввів поняття і зробив теоретичне обґрунтування вимушеного випромінювання, яке лежить в основі принципу роботи лазера.
- 1939 р. Російський фізик В. А. Фабрикант вказав на можливість використання вимушеного випромінювання для посилення електромагнітного випромінювання при його проходженні через речовину.
- 1950 р. Французький фізик Альфред Кастлер запропонував метод «оптичного накачування» середовища для реалізації основного принципу роботи лазера – створення інверсної заселеності.
- 1954 р. Молекулярний генератор мікрохвильового діапазону (мазер) розроблено незалежно та одночасно в СРСР (групою під керівництвом Н. Г. Басова і А. М. Прохорова) і в США (групою під керівництвом Ч. Таунса).
- 1960 р. Перший твердотільний (рубіновий) лазер оптичного діапазону створено американським фізиком Т. Мейманом.
- 1960 р. Створено перший газовий лазер з активною речовиною на основі суміші гелію і неону (автори – А. Джаван, У. Беннет, Д. Ерріот, США).
- 1962 р. Перші комерційні лазери з'явилися в США.
В СРСР і США одночасно створено перші напівпровідникові лазери.
- 1964 р. Розроблено перший газовий лазер безперервної дії підвищеної потужності (понад 1 кВт) та високим ККД з активною речовиною на основі вуглекислого газу CO_2 (індійський фізик К. Пател). Це відкрило нові перспективи у застосуванні лазерної техніки. З появою CO_2 -лазерів сфера використання лазерного променя для обробки матеріалів розширилася – від мікроелектроніки і приладобудування до багатьох енерго- і матеріало-

містких галузей промисловості, таких як машинобудування, електротехнічна промисловість, металургія і т. д.

Подальші роки по теперішній час пов'язані зі створенням та вдосконаленням різних типів лазерів – твердотільних з різним активним середовищем, рідинних, газових, напівпровідникових (діодних), оптоволоконних, лазерів з використанням нанотехнологій; зі збільшенням діапазону довжини хвилі лазерного випромінювання з метою розширення гами оброблюваних сучасних матеріалів з різноманітними властивостями відповідно до необхідної сфери застосування; з підвищенням ККД лазерів та зниженням вартості промислових установок; з підвищенням параметрів точності і якості отримуваних виробів та іншими напрямками.

3.2. Класифікація лазерів

Існуючі типи лазерів можна класифікувати за кількома ознаками:

- *за принципом агрегатного стану активної речовини*: твердотільні, рідинні, газові лазери, лазери на вільних електронах і т. д.;
- *за способом збудження активної речовини* (за способом накачування): лазери з оптичним накачуванням, лазери з електронно-променевим накачуванням, газорозрядні лазери, діодні лазери, хімічні лазери, лазери з ядерним накачуванням, лазери зі збудженням сонячною енергією та інші;
- *за величиною випромінюваної потужності*: низькопотужні (10^{-3} ... 10 Вт), середньої потужності (10^3 ... 10^5 Вт), висопотужні (понад 10^6 Вт до десятків МВт);
- *за довжиною хвилі генерованого випромінювання*: від $0,001$ мкм (1 нм) до 1000 мкм (1 мм);
- *за режимом роботи*: безперервний, імпульсний, однократний;
- *за енергією імпульсу*;
- *за ККД* (від десятих часток відсотка в твердотільних лазерах до 60% в діодних);
- *за безпекою використання*.

Лазери є досить складним обладнанням, створення якого вимагає спеціальних знань точної механіки, оптики, електроніки, досвіду роботи з вакуумною технікою (для газових лазерів), технологією вирощування лазерних кристалів, виготовлення напівпровідникових шарів і т. д. Завдяки

складності конструкції лазери виглядають швидше як невеликий завод, а не як оптичний пристрій.

У той же час намітилася тенденція щодо спрощення структури лазерних установок, підвищення їх мобільності, створення офісного лазерного обладнання, зниження його вартості.

Лазерні установки виробляються багатьма провідними фірмами світу в США, Німеччині, Японії, Китаї, в Росії, в Україні. Вартість лазерів залежить від потужності, типу активного елемента і т. д. Середня вартість лазера невисокої потужності (100 ... 200 Вт) складає 1,5 ... 5000 тис. \$; вартість 1 години роботи (різання) – від 2 до 10 \$. За оцінками журналу «*Laser Focus World*», світовий ринок лазерів становить близько 8 млрд \$ США. З них більше 60 % припадає на діодні лазери, решта – на інші типи лазерних систем.

3.3. Основні типи твердотільних лазерів та їх характеристика

З усіх типів лазерів одними з найбільш поширених, у тому числі у машинобудуванні, є твердотільні лазери (рис. 3.1).

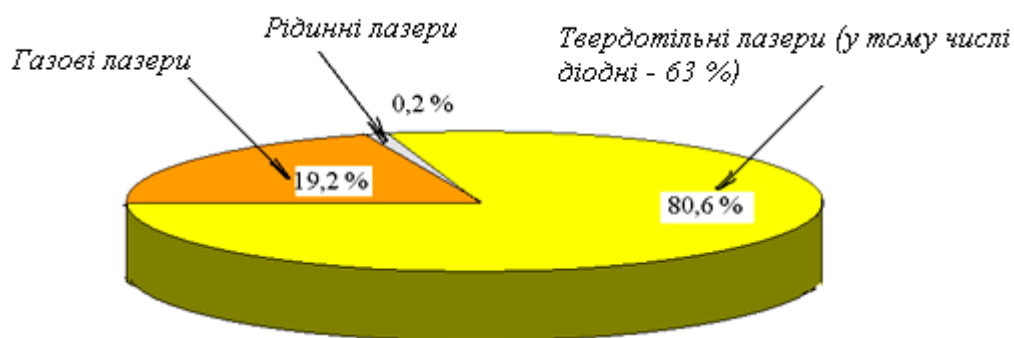


Рисунок 3.1 – Відносна частка різних типів промислових лазерів

Активне середовище класичних твердотільних лазерів являє собою циліндричні (або призматичні) стрижні довжиною 10 ... 30 см, виконані з люмінесцуючих матеріалів – штучно вирощених монокристалів (синтетичного рубіну, активованого хромом, ітрій-алюмінієвого гранату з домішками хрому, тулія, неодиму, гольмію); скла, активованого неодимом.

Для збудження активного середовища в твердотільних лазерах застосовується переважно оптичний метод накачування – за допомогою інтенсивного світла газорозрядних (для імпульсного режиму) або дугових (для безперервного режиму) ламп, напівпровідникових діодів, інших лазерів.

Сучасні твердотільні лазери здатні працювати як в імпульсному, так і в безперервному режимі. Довжина хвилі генерованого випромінювання характерна для видимої і ближньої інфрачервоної області спектра (див. рис. 2.1).

Застосовують твердотільні лазери в технологіях обробки матеріалів (лазери середнього рівня потужності – 50 ... 500 Вт); в лазерній спектроскопії; в датчиках різних величин; у вимірювальній техніці, в медицині, у наукових дослідженнях, наприклад, лазерному термоядерному синтезі (лазери потужністю до 10^7 Вт).

Рубіновий лазер (рис. 3.2) є першою реалізованою на практиці лазерною системою. В якості активного середовища використовується кристалічний стрижень з синтетичного рубіну (оксиду алюмінію Al_2O_3 , легованого 0,05 вагових % 3-валентних іонів хрому – $Cr^{3+}: Al_2O_3$). Лазери на рубіні генерують випромінювання у видимій (червоній) області спектра з довжиною хвилі $\lambda \sim 0,6943$ мкм (694,3 нм) при кімнатній температурі.

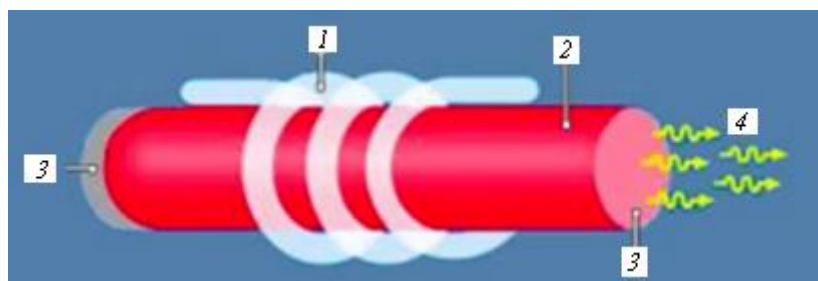


Рисунок 3.2 – Схема отримання лазерного випромінювання за допомогою рубінового лазера:

1– пристрій накачування; 2 – активний елемент з рубіну; 3 – непрозоре і напівпрозоре дзеркала; 4 – випромінювання

Рубінові лазери – трирівневі системи, що вимагає досить високої енергії накачування для досягнення порогу лазерного випромінювання. ККД лазерів на рубіні знаходиться в межах 0,1...1 %. Ці лазери працюють переважно в імпульсному режимі.

У *неодимового лазера* генерується випромінювання іонів Nd^{3+} . Іон Nd^{3+} може бути вбудований як активатор у різні робочі речовини – кристали, скло. В даний час найчастіше для лазерів з неодимом використовують кристали ітрій-алюмінієвого (алюмоітрієвого) гранату, легovanого неодимом – Nd: ІАГ. ККД лазерів цього типу становить кілька відсотків.

3.4. Діодні лазери

З урахуванням того, що сучасні традиційні твердотільні лазери є досить малоефективними перетворювачами енергії, *перспективними вважаються розробки напівпровідникових (діодних) лазерів*, ККД яких досягає 60 % і навіть вище.

Формально напівпровідникові (діодні) лазери також можуть бути віднесені до твердотільних, але мають ряд специфічних особливостей, тому належать до окремої групи.

Напівпровідникові лазери перспективні з економічної точки зору, є малогабаритними, не потребують складної багатоступінчастої технології виготовлення (порівняно з класичними твердотільними лазерами), технологія їх виробництва є досить налагодженою в промислових масштабах у багатьох країнах.

Завдяки вказаним перевагам діодні лазери досить широко використовують для обробки різних матеріалів, у вимірювальній техніці, для медичних застосувань, в побутових пристроях і приладах, а також в індустрії розваг.

Компактність конструкції дозволяє вбудовувати діодні лазери в автоматизовані промислові комплекси.

Активним елементом в діодних лазерах є напівпровідниковий кристал (арсенід галію, кремній з домішками індію, фосфат галію, арсенід індію, солі свинцю, селенід цинку та інші).

Діодні лазери являють собою напівпровідникові шари з p - і n -провідністю, через які пропускається електричний струм. Тонкий пограничний шар між p - і n -зонами розміром декілька мікрометрів є активною зоною, що випускає лазерне випромінювання (рис. 3.3). Таким чином, діодні лазери працюють на p - n – переході. Як і в традиційних твердотільних лазерах, p - n – активну зону для створення резонатора розміщують між дзеркалами, роль яких зазвичай виконують грані кристалу.



Рисунок 3.3 – Схема формування випромінювання діодного лазера (а) та його загальний вигляд (б)

Для збільшення потужності одиничні діодні лазери об'єднують в матриці-лінійки (рис. 3.4, а), які, в свою чергу, компонують в діодні блоки – пакети, модулі (рис. 3.4, б), що дає можливість досягти високих значень інтегральної потужності ~ 100 кВт.

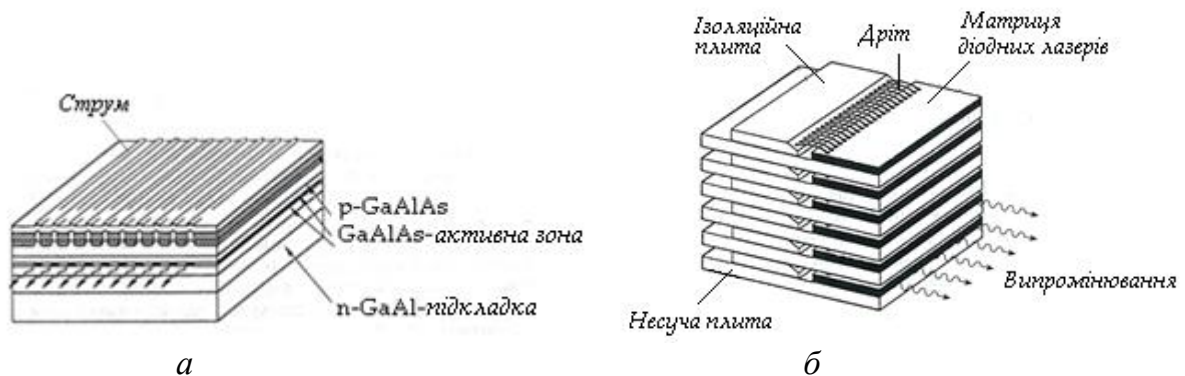


Рисунок 3.4 – Матриця (решітка) з декількох паралельно розташованих смужок лазерних діодів (а) та пакет (модуль) лазерних матриць (б)

Діодні лазери також використовують для підвищення ефективності роботи традиційних твердотільних лазерів – для накачування активних твердотільних елементів замість ламп накачування. Це сприяє істотному підвищенню ККД перетворення електричної енергії в лазерну, збільшенню терміну служби лазерів, зменшенню габаритних розмірів лазера (наприклад, габарити лазерного випромінювача потужністю 1 кВт зменшуються до розмірів взуттєвої коробки). Такі лазери називають лазерами з діодним накачуванням.

3.5. Волоконні лазери

Подальшим розвитком лазерної техніки є створення волоконних лазерів з використанням активних елементів на основі волоконної оптики.

Головна особливість даного лазера в тому, що випромінювання збуджується в тонкому, діаметром від нанометрів до 100 мкм, волокні-серцевині з оптично прозорого матеріалу (скла, полімера), яке знаходиться всередині волокна більшого діаметра – оболонці, рис. 3.5.

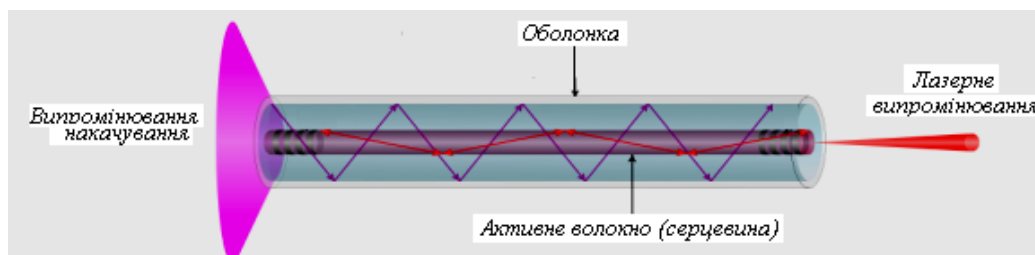


Рисунок 3.5 – Схема формування лазерного випромінювання у волоконних лазерах

Матеріал оболонки повинен мати менший показник заломлення порівняно з серцевиною. В цьому випадку реалізується ефект повного внутрішнього відбивання, тобто випромінювання відбивається від оболонки і залишається у волокні-серцевині. На практиці різниця показників заломлення регулюється за допомогою легуючих домішок. У оптичних волокнах показники заломлення серцевини і оболонки відрізняються на величину $\sim 1\%$.

Для накачування волоконних лазерів використовують переважно діодні лазери. Випромінювання діодних лазерів вводиться у кварцеве волокно довжиною до декількох десятків метрів, на виході з якого формується лазерний промінь (рис. 3.6).

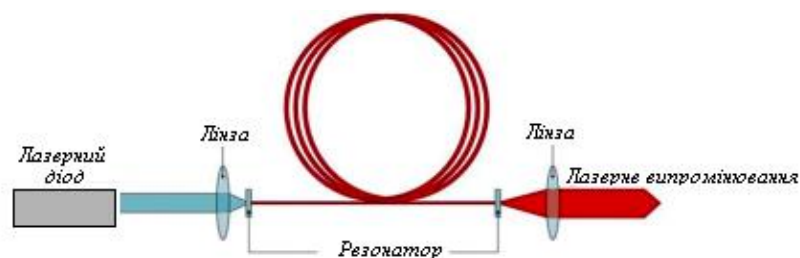


Рисунок 3.6 – Оптична система з волоконним лазером

Використання активних елементів на основі волоконної оптики забезпечує високу якість променя; високий ККД перетворення електроенергії; з'являється можливість розробки надійної і компактної конструкції лазера за рахунок виключення оптичних приладів, що потребують юстирування. Подібне обладнання є практично офісною технікою, живлення якої здійснюється від звичайної розетки.

Ці лазери є особливо ефективними при обробці матеріалів у важкодоступних місцях, у тому числі в процесах зварювання, в медицині. Досить поширені діодні лазери у вимірювальній та комп'ютерній техніці, побутових приладах. Їх частка серед різних видів промислових лазерів стає у багатьох сферах переважною (див. рис. 3.1).

3.6. Газові лазери

Активним елементом газового лазера є заповнена газом розрядна трубка. В результаті електричного розряду між введеними в трубку електродами, що створюється за допомогою джерела живлення, виникають прискорені електрони, які збуджують газові молекули. Повертаючись до стабільного стану, ці молекули утворюють кванти світла, аналогічно твердотільним лазерам.

Порівняно з іншими типами лазерів (твердотільними, напівпровідниковими) газові лазери мають такі специфічні властивості:

- більш значні розміри;
- більш високу якість пучка лазерного випромінювання;
- вищу потужність в безперервному режимі;
- велику точність і стабільність частоти випромінювання;
- великий діапазон довжин хвиль лазерного променя – від вакуумного ультрафіолетового діапазону з довжиною хвилі $\lambda \sim 100$ нм до надвисокочастотного випромінювання з $\lambda \sim 2$ мм (див. рис. 2.1).

В якості активного середовища в газових лазерах найчастіше застосовують збуджені електричним струмом гази або пари.

Основні типи газових лазерів: на нейтральних атомах; на нейтральних молекулах; на ексимерах; на іонах.

Газові лазери використовують в галузі наукових досліджень, у машинобудуванні, в будівництві (в тому числі великих споруд), в оптичному

зв'язку та локації, у голографії, в космічних дослідженнях, у військовій сфері, в медицині.

Один з найбільш поширених і широко застосовуваних у промисловому виробництві (зокрема, для обробки матеріалів), в медицині, для наукових цілей – CO_2 -лазер (рис. 3.7).

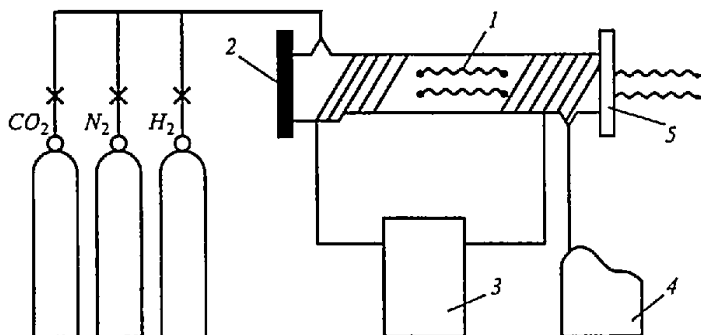


Рисунок 3.7 – Схема газового лазера:

1 – заповнена газом розрядна трубка (активний елемент);

2, 5 – непрозоре та напівпрозоре дзеркала;

3 – джерело живлення; 4 – система відкачування для створення розрідження

Зазвичай CO_2 -лазери працюють на суміші газів – вуглекислому газі, гелії, азоті ($\text{CO}_2 + \text{He} + \text{N}_2$). Генерація лазера здійснюється завдяки переходу молекул CO_2 між двома коливальними рівнями, азот і гелій значно підвищують ККД лазера. Гелій (вміст від 60 до 80 %) безпосередньо не бере участі в процесі генерації лазерного випромінювання. Його завданням є «спустошення» нижнього лазерного рівня в результаті зіткнень молекул CO_2 з гелієм і забезпечення високого тепловідведення. Азот виконує аналогічне завдання – молекули N_2 забезпечують ефективне накачування верхнього лазерного рівня. Гелій є дорогою і дефіцитною складовою, тому ведеться пошук нових безгелієвих робочих сумішей, наприклад, $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{повітря}$ і т. д. Всі ці лазери прийнято називати лазерами на CO_2 або CO_2 -лазерами.

Лазери даного типу мають високу потужність – до 100 кВт в безперервному режимі, досить великий ККД – до 20 %.

В імпульсному режимі генеруються лазерні імпульси тривалістю в діапазоні від нано- до мілісекунд.

Існує велика кількість конструктивних виконань CO_2 -лазера з довжиною хвилі в інфрачервоному діапазоні від 9 до 11 мкм.

3.7. Рідинні лазери

В рідинних лазерах активним середовищем є рідина.

Використання рідини в якості активного лазерного середовища має певні переваги. До них, наприклад, належать: легкість отримання активного середовища з необхідними характеристиками, простота зміни його складу, можливість прокачування середовища для підтримки у високоефективному стані, легкість охолодження, оптична однорідність та інші.

Однак підібрати рідину як основу активного середовища, що забезпечує вимоги отримання лазерного випромінювання з необхідними властивостями (високої щільності потужності, високої спрямованості у просторі і т. д.) для подальшого практичного використання досить складно. Численні дослідження різних рідин дозволили реалізувати лазерну генерацію лише у відносно невеликій кількості рідин, при цьому лазери на цих середовищах, як правило, поступаються твердотільним лазерам за своїми властивостями.

Практичне застосування мають два типи рідинних лазерів, що суттєво відрізняються і доповнюють один одного за властивостями випромінювання – лазери на органічних барвниках і лазери на неорганічних речовинах.

Рідинні лазери на барвниках, активна речовина яких створюється на основі молекул органічних барвників в органічних розчинниках або воді, допускають безперервне перенастроювання довжини хвилі λ випромінювання. Ці лазери завдяки зміні барвників не мають аналогів з точки зору можливості плавної перебудови довжини хвилі генерації в дуже широкому діапазоні – у всій видимій області спектра, включаючи ближній ультрафіолетовий та інфрачервоний діапазони (від 320 до 1260 нм).

Лазери на неорганічних рідинах (як в імпульсному, так і в безперервному режимах) мають більшу порівняно з твердотільними лазерами питому потужність, оскільки допускають ефективне охолодження робочої речовини. В існуючих рідинних лазерах на неорганічних рідинах активними речовинами є рідкісноземельні елементи (найчастіше Nd^{3+}).

Основний недолік, властивий усім рідинним лазерам, – відносно мала спрямованість випромінювання (велика розбіжність). Рідинні лазери порівняно з твердотільними і газовими мають обмежене застосування у машинобудуванні та інших галузях промисловості. Можуть використовувати

тись у медицині, у наукових роботах, наприклад, у дослідженні протікання хімічних реакцій у різних речовинах, оптичних дослідженнях.

3.8. Перспективні напрямки розвитку лазерної техніки

Розвиток лазерної техніки здійснюється в напрямку підвищення потужності та ККД лазерів, можливості комп'ютерного управління, передачі світлової енергії на великі відстані, зменшення габаритів обладнання, зниження його вартості.

Розвиток машинобудування та приладобудування на сучасному етапі визначається подальшим прагненням до зменшення габаритів, мініатюризації виробів, підвищення їх якості та надійності. При цьому значні зусилля спрямовуються на розвиток мікро- та нанотехнологій обробки матеріалів, серед яких особливе значення набуває лазерна обробка надпотужними короткодійними локалізованими імпульсами, тому що традиційні методи (мікромеханічна обробка, мікроштамповка) знаходяться на граничних можливостях при виготовленні сучасних мініатюрних і високоточних виробів.

Ступінь локалізації підведення лазерної енергії в просторі, що в значній мірі визначає точність отримуваних виробів, залежить від довжини хвилі випромінювання, а в часі – від тривалості лазерного імпульсу. Тому перспективними напрямками вдосконалення лазерної техніки, поряд із зазначеними вище, є також зменшення довжини хвилі випромінювання і тривалості його імпульсів.

Сьогодні лазерні пучки охопили весь оптичний діапазон, у тому числі інфрачервону і ультрафіолетову область спектра. Є навіть лазери рентгенівського діапазону, обговорюються ідеї гамма-лазера. Довжина хвилі лазерного випромінювання, яка залежить від природи активного елемента, може бути в діапазоні від декількох нанометрів (найкоротша з довжин хвиль випромінювання, що генерується сучасними лазерами, становить 4 нм) до 1 мм.

Створення лазерів короткохвильового рентгенівського випромінювання і гамма-випромінювання з довжиною хвилі атомного порядку, що має високу проникаючу здатність (до 15 ... 20 см в сталі) і граничними значеннями плями фокусування, відкриває нові можливості перед лазерною технологією та дозволяє підвищити можливості прецизійної обробки.

Локалізація в просторі та в часі лазерної енергії дозволяє досягти високої концентрації щільності потоку випромінювання (до $10^{14} \dots 10^{26}$ Вт/см²) і дає можливість реалізувати особливі механізми енергетичного впливу на матеріал (наприклад, механізм «холодного» руйнування – випаровування без плавлення) і, таким чином, виконати різноманітні види обробки. При цьому термічний вплив локалізується в надзвичайно малому шарі матеріалу – до товщини молекулярного або атомарного шарів без порушення структури основного матеріалу.

Тенденції розвитку лазерної техніки і технології, постійне їх вдосконалення приводять до того, що методи обробки матеріалів із застосуванням лазерного випромінювання стають конкурентоспроможними в різних галузях промисловості.

Аналіз світового ринку лазерів свідчить про інтенсивне зростання обсягу продажу лазерів. Зокрема, за останнє десятиліття цей показник майже подвоївся (рис. 3.8). За прогнозами фахівців ця тенденція збережеться і в наступні роки.



Рисунок 3.8 – Динаміка зростання світового обсягу виробництва джерел лазерного випромінювання

Серед великого різноманіття лазерів спостерігається збільшення відносної частки діодних (напівпровідникових) лазерів, див. рис. 3.1. Новітньою тенденцією останніх років є також збільшення частки волоконних лазерів завдяки їх незаперечним перевагам (рис. 3.9).

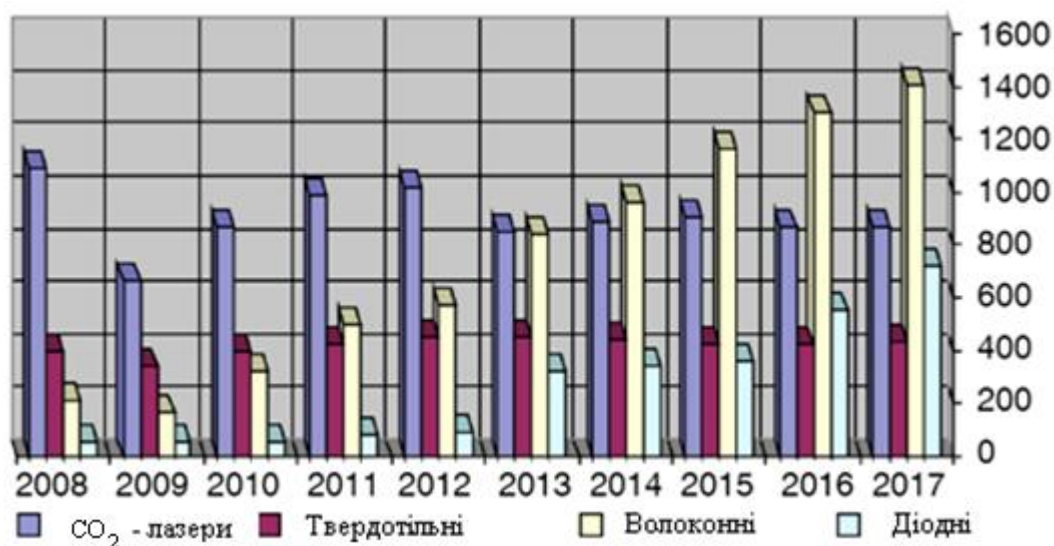


Рисунок 3.9 – Річний обсяг продажу промислових лазерів за типами, млн дол

У ряді випадків широке застосування лазерів стримується міркуваннями економічного характеру: вартість лазерів поки ще є досить високою, що вимагає ретельного аналізу всіх факторів при виборі даного способу.

3.9. Технологічні лазери.

Лазерні технологічні комплекси

Оскільки більшість технологічних застосувань лазерів заснована на тепловій дії світла, до технологічних лазерів відносять ті лазери, які здатні нагріти об'єкт впливу до температури, за якої в оброблюваному матеріалі відбуваються ті чи інші структурні та фізико-хімічні процеси, такі як зміна фазового стану і параметрів структури, хімічні реакції, фізичні переходи – плавлення, випаровування і т. д.

З метою реалізації лазерних технологій в промисловості, у тому числі в машинобудуванні, використовують лазерні технологічні комплекси (ЛТК).

Лазерний технологічний комплекс являє собою технологічну установку, основним компонентом якої є технологічний лазер (тобто джерело випромінювання з певними заданими параметрами згідно з процесами обробки), забезпечену маніпулятором виробу та (або) оптики, допоміжним технологічним оснащенням і загальною системою керування для проведення

технологічних операцій. При наявності автоматизованого маніпулятора та зв'язку між системами керування лазером і маніпулятором комплекс вважається автоматизованим (АЛТК).

Допоміжне технологічне оснащення може включати обладнання для підготовки технологічних операцій (пристрої нанесення покриття, завантажувачі деталей та інше); датчики та пристрої для контролю за перебігом технологічного процесу (візуалізатори лазерного випромінювання, пірометри, датчики проміжку між оброблюваним матеріалом та фокусуючою системою); обладнання для подачі захисного газу та охолодження; засоби захисту та техніки безпеки; системи контролю якості виробів.

Спрощену структурну схему ЛТК наведено на рис. 3.10.

Лазерні технологічні комплекси різноманітні за конструкцією, призначенням, експлуатаційними характеристиками.

ЛТК може мати систему формування та транспортування променя, систему його розщеплення на декілька позицій та систему сканування.

Системи можуть забезпечити: переміщення променя відносно нерухомої заготовки; переміщення заготовки відносно нерухомого променя; задане переміщення заготовки та променя одночасно.

Для різання плоских листових матеріалів застосовують двокоординатні системи, для вирізання складних виробів – багатокоординатні.

За призначенням лазерні технологічні комплекси можуть бути спеціалізованими і універсальними.

Спеціалізовані ЛТК призначені для роботи в умовах масового і великосерійного виробництва, характеризуються високою продуктивністю при виконанні однієї єдиної операції. Зараз ці ЛТК фактично перетворилися в лазерні автоматичні лінії, до складу яких входять транспортно-конвеєрні системи, системи завантаження-вивантаження, системи контролю та інше. Такі лінії виконують, наприклад, операції зварювання штовхачів клапанів, шестерень, маркування підшипників і т. д.

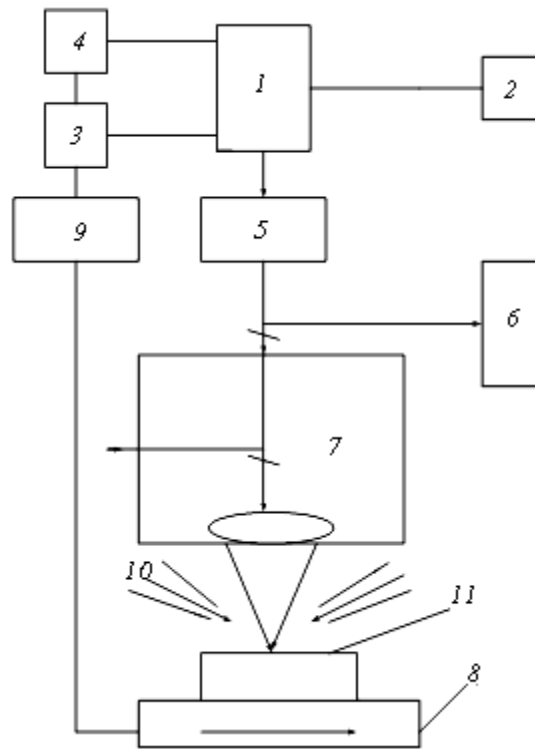


Рисунок 3.10 – Структурна схема лазерного технологічного комплексу:

1 – технологічний лазер; 2 – джерело живлення; 3 – блок підпалу; 4 – блок охолодження; 5 – пристрій дозування енергії; 6 – система стабілізації вихідної енергії; 7 – оптична система для фокусування та спостереження; 8 – робочий стіл; 9 – програмувальний пристрій; 10 – пристрій подачі газу; 11 – оброблювальна деталь

Універсальні ЛТК призначені для роботи в умовах дрібносерійного виробництва, характеризуються здатністю швидкого переналадження при зміні технологічних операцій. Є приклади ефективного застосування таких ЛТК для перфорації виробів, маркування та гравірування. Найбільші масштаби застосування універсальних ЛТК – в області фігурного розкрою листових матеріалів, де необхідне вирізування виробів за складним контуром.

Для роботи у виробничих умовах ЛТК повинні мати необхідну потужність; стабільне випромінювання в процесі роботи і досить високий ККД; нескладну і компактну конструкцію при належному дизайні; високу надійність і достатній термін служби вузлів і деталей; просте і зручне управління; невеликі експлуатаційні витрати і ремонтпридатність; максимальну зручність в обслуговуванні і безпеку.

Деякі приклади лазерних технологічних комплексів різного призначення представлено на рис. 3.11.



Рисунок 3.11 – Лазерні технологічні комплекси

Питання для самоперевірки

1. Назвіть основні етапи розвитку і становлення лазерної техніки.
2. За якими ознаками класифікують лазери?
3. Які типи лазерів Вам відомі за способом збудження активної речовини?
4. Яким є діапазон ККД сучасних лазерів?
5. Що являє собою світовий ринок лазерів?
6. Дайте коротку характеристику будови та принципу дії твердотільних лазерів.
7. Які матеріали використовують для створення активного середовища твердотільних лазерів?
8. Назвіть основні сфери використання твердотільних лазерів.
9. Вкажіть основні характеристики рубінових та неодимових лазерів.
10. Надайте стислу характеристику діодних лазерів та назвіть їх ос

новні переваги порівняно з традиційними твердотільними лазерами.

11. Які засоби використовують для збільшення потужності одиничних діодних лазерів?

12. Як діють волоконні лазери та які особливості сфер їх застосування?

13. Назвіть специфічні властивості газових лазерів та принципи їх устрою.

14. Що являє собою активне середовище газових лазерів?

15. Якими є переважні галузі використання газових лазерів?

16. Назвіть особливості та сфери використання рідинних лазерів.

17. Якими є основні напрямки вдосконалення лазерної техніки, пов'язані з розвитком машинобудування, приладобудування та інших галузей промисловості?

18. Що уявляє собою лазерний технологічний комплекс? Назвіть основні його складові.

19. Яке призначення спеціалізованих та універсальних ЛТК?

20. Назвіть основні вимоги до експлуатаційних властивостей лазерних технологічних комплексів.

4. ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЯК УНІВЕРСАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ

4.1. Основні параметри лазерного випромінювання технологічних лазерів

Широке застосування лазерного випромінювання у промисловому виробництві зумовлене специфічністю властивостей цього випромінювання як електромагнітних хвиль (див. п. 2.2) – монохроматичністю, когерентністю, високою спрямованістю, які в значній мірі характеризують «якість» лазерного променя.

До основних експлуатаційних параметрів випромінювання технологічних лазерів, див. п. 3.9, належать наступні.

- *Довжина хвилі випромінювання λ , мкм.*

Довжина хвилі технологічних лазерів повинна знаходитись в області найбільшого поглинання матеріалу: для металів – у видимій, для скла – в інфрачервоній, для полімерів і пластмас – в ультрафіолетовій частині спектра.

Поглиналина здатність залежить, в першу чергу, від оптичних характеристик матеріалу – коефіцієнта відбиття R , коефіцієнта поглинання $A = 1 - R$, показника поглинання α . Глибина проникнення випромінювання $\delta = 1/\alpha$.

- *Потужність випромінювання P , Вт.*

Середня потужність випромінювання сучасних лазерів $P_{\text{сер}}$ становить від декількох міліват до 10^6 Вт (1 МВт). Цю величину можна розглядати як критерій технологічних лазерів, оскільки процеси лазерної обробки пов'язані з тепловою дією випромінювання. З точки зору теплофізичного підходу до лазерного впливу на матеріали до технологічних лазерів відносять лазери, які здатні нагріти поверхню до заданої температури. Наприклад, при розмірній обробці (нагрівання до температури випаровування) достатня потужність для більшості матеріалів як в безперервному режимі роботи лазера, так і в імпульсному $P \approx 10^3$ Вт.

- *Щільність потужності випромінювання безперервних та імпульс-*

них лазерів q , Вт/м².

Дана характеристика є також важливим параметром теплового впливу лазерного випромінювання.

Під щільністю потужності q розуміють потужність P , поглинену одиницею площі плями фокусування S :

$$q = P/S. \quad (4.1)$$

Оскільки $P = E/\tau$, де E – енергія в імпульсі; τ – його тривалість, площа плями фокусування в загальному випадку $S = \pi d^2/4$ (d – діаметр плями фокусування, залежно від технологічного завдання становить 0,001 ... 0,2 мм), то щільність потужності імпульсного випромінювання

$$Q_{\text{імп}} = E/\tau S = 4E / \pi d^2 \tau. \quad (4.2)$$

Для безперервного випромінювання щільність потужності

$$q_{\text{безпер}} = P_{\text{ср}}/S. \quad (4.3)$$

В сучасних лазерах q становить від 10^7 до 10^{15} Вт/м². Унікальні лазери можуть мати щільність потужності до 10^{24} Вт/м². Для порівняння – щільність потужності випромінювання на поверхні Сонця – 10^{12} Вт/м².

- *Тривалість дії випромінювання t , с* – це тривалість імпульсу для імпульсних лазерів ($\tau = 10^{-2} \dots 10^{-18}$ с) або час ефективного впливу у безперервних лазерах, який визначається як

$$t = d/V_{\text{ск}}, \quad (4.4)$$

де d – діаметр плями в фокусі; $V_{\text{ск}}$ – швидкість сканування випромінювання.

Тривалість дії випромінювання визначає багато з характеристик процесу обробки – порогову енергію процесів, глибину нагрітого шару, величину термомеханічних напружень, стабільність розміру опроміненої зони і т. д.

- Для імпульсних лазерів – *енергія імпульсу E , Дж.*

Величина E складає 0,1 ... 1000 Дж в лазерах різного типу.

- *Питома поверхнева енергія W , Дж/м².*

$$W = Pt/S, \quad (4.5)$$

де t – тривалість дії випромінювання; P – потужність випромінювання в плямі фокусування; S – площа плями фокусування.

- *Пікова потужність імпульсних лазерів $P_{\text{п}}$*

$$P_{\text{п}} = E/\tau. \quad (4.6)$$

Максимальні значення даного параметра – до 10^{13} Вт.

- *Частота проходження імпульсів f , Гц*

$$f = 1/T, \quad (4.7)$$

де T – період проходження імпульсів.

Діапазон зміни f складає $0,1 \dots 10^3$ Гц.

- *Коефіцієнт корисної дії (ККД)* – відношення потужності лазерного випромінювання до потужності збудження, що підводиться до випромінювача; становить від десятих часток відсотка в твердотільних лазерах до десятків відсотків (60 % і більше) в напівпровідникових і волоконних лазерах.

- *Кутова розбіжність променя θ , мрад*

$$\theta = 12,2 \lambda/d. \quad (4.8)$$

Величина θ складає для різних типів лазерів від 0,2 (газовий He-Ne лазер) до 200 мрад (напівпровідниковий GaAs-лазер).

Необхідно враховувати також такі аспекти:

- наведені чисельні значення параметрів не є остаточними, оскільки лазерна техніка безперервно вдосконалюється;

- максимальні значення зазначених характеристик досягаються не у всіх лазерних установках, а переважно в установках, що застосовуються в фундаментальних дослідженнях;

- для оптимального вибору лазера має сенс розглядати насамперед найбільш важливі властивості випромінювання, до яких відносять довжину хвилі і потужність (щільність потужності).

Експлуатаційні параметри випромінювання деяких типів технологічних лазерів наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Характерні параметри випромінювання технологічних лазерів

Тип лазера	Активний елемент	Режим роботи	Довжина хвилі випромінювання λ , мкм	Мінімальний діаметр фокальної плями d , мкм	Енергія імпульсу E , Дж	Потужність випромінювання P , Вт	Тривалість імпульсу τ , с	Частота проходження імпульсів f , Гц	Кутова розбіжність променя θ , мрад	ККД, %	Сфера застосування
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Твердотільні лазери											
Лазер на алюмоітрієвому гранаті з неодимом	$\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Імп.	1,06	5	1	до 10^4	$10^{-3} \dots 10^{-4}$	10^4	0,2 ... 20	1 ... 3	Обробка матеріалів (прошивання отворів, різання), вимірювання, спектроскопія, датчики, наукові дослідження, медицина
Лазер на алюмоітрієвому гранаті з неодимом	$\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Безперервн.	1,06	5	—	10 ... 2000	—	—	0,2 ... 20	3	
Рубіновий лазер	$\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$	Імп.	0,69	2	0,1 ... 50	$10^5 \dots 5 \cdot 10^9$	$10^{-3} \dots 10^{-7}$	до 10^2	0,4 ... 10	1	Спектроскопія, медицина
Титан-сапфіровий лазер	$\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$	Імп.	0,7 ... 1,0	2	10^{-8}	50	$10^{-13} \dots 10^{-14}$	10^8	0,4 ... 10	< 1	Фундаментальні дослідження, метрологія, високощільний запис інформації

Продовження табл.4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. Газові лазери											
Лазер на вуглекислому газі	CO ₂ + He + N ₂	Імп.	10,6	30	0,5	до 10 ³	10 ⁻² ... 10 ⁻⁴	10 ² ... 10 ³	0,4 ... 10	10 ... 20	Обробка матеріалів (прошивання отворів, різання), медицина, наукові дослідження
Лазер на вуглекислому газі	CO ₂ + He + N ₂	Безпервн.	10,6	30	—	до 10 ³	—	—	0,4 ... 10	20	
Гелій-неоновий лазер	He-Ne	Імп.	0,63	10	10 ⁶ ... 10 ⁻³	10 ²	10 ⁻⁷	10 ³	0,1 ... 1	< 1	Вимірювання, датчики, стереолітографія, голографія, наукові дослідження
Лазер на парах міді	Cu	Імп.	0,51 ... 0,58	20	10 ⁻³	10 ²	10 ⁻⁸	10 ⁴	0,03 ... 10	1	Наукові дослідження, обробка матеріалів
3. Напівпровідникові лазери											
Арсенід-галієвий лазер	GaAs	Імп.	0,635 ... 0,95	5	10 ⁻²	10 ⁻³ ... 5 · 10 ³	10 ⁻¹⁴	10 ³	0,2 ... 200	10 ... 15	Інформаційні технології (оптоволоконний зв'язок, зберігання інформації, принтери, сканери), датчики, наукові дослідження, медицина
Фосфор-індієвий лазер	InP	Імп.	0,95 ... 1,55	5	10 ⁻²	10 ... 10 ²	10 ⁻¹⁰	—	0,2 ... 200	10 ... 15	

4.2 Переваги лазерної обробки порівняно з традиційними методами

Основними перевагами обробки з використанням лазерного випромінювання як інструмента є такі.

- *Відсутність механічного контакту між заготовкою і інструментом-променем* полегшує закріплення заготовки і усуває можливість появи небажаних деформацій. Це дозволяє обробляти тонкі, мініатюрні вироби, що легко деформуються, без небезпеки їх пошкодження.

- *Висока локалізація лазерного впливу на матеріали* дозволяє виконувати унікальні операції прецизійної мікрообробки, що неможливі або важко здійснюються при використанні інших технологічних методів.

- *Завдяки певній «гнучкості» лазерного випромінювання як інструмента порівняно легкою є зміна його положення у просторі* без складних металомістких пристосувань, завдяки чому можна проводити дистанційну обробку у важкодоступних або недоступних для звичайного інструмента місцях.

- *Безінерційність при переміщенні лазерного випромінювання* щодо заготовки, можливість дискретної і безперервної подачі енергії лазерного променя в зону обробки дозволяють значно підвищити продуктивність технологічних операцій.

- *Можливість управління температурою в зоні лазерного впливу* в широких межах створює умови для обробки будь-яких матеріалів, дозволяє здійснити заміну дефіцитних високолегованих сталей і сплавів менш дефіцитними конструкційними матеріалами та забезпечує більш широке використання неметалевих (керамічних, композиційних) матеріалів.

- *Застосування лазерної технології дозволяє істотно підвищити точність, якість, надійність, довговічність деталей, інструментів, виробів взагалі, дає можливість надати обробленим виробам нові експлуатаційні властивості.*

- *Відсутність зносу інструмента* зменшує витрати усіх видів ресурсів.

- Використання лазерного випромінювання як інструмента в різних технологічних процесах дозволяє істотно *покращити умови праці, підвищити загальну культуру виробництва.*

- *Лазерне обладнання – автоматизоване, є сумісним з промисловими*

роботами, багато з видів лазерів можуть бути вбудовані в автоматизовані промислові комплекси.

- Важливою перевагою лазерів є *можливість одним джерелом випромінювання обслуговувати кілька робочих місць* і протягом незначного часу (декількох секунд) переходити з обробки одного виду продукції на інший, що різко скорочує міжопераційний час, підвищує коефіцієнт завантаження обладнання і є важливим фактором економічної ефективності його роботи.

- *На одному типі лазерного обладнання можна здійснювати різні технологічні операції* – зварювання, різання, термообробку, наплавлення, легування і т. д.

До недоліків лазерних технологій слід віднести можливість обробки матеріалів на обмеженій глибині, а також порівняно низький коефіцієнт корисної дії лазерів і досить високу вартість лазерних установок і комплексів. Під час лазерної обробки існує також наявність ряду особливих вимог до конструкцій і матеріалів. Лазерна обробка вимагає виконання спеціальних правил техніки безпеки.

4.3. Управління переміщенням лазерного променя

Для багатьох видів застосувань лазерних технологій для обробки матеріалів необхідне забезпечення відносного переміщення лазерного випромінювання (модуляція) та об'єкта, на який це випромінювання направлено. Це може бути отримано зміною положення:

- 1) *об'єкта щодо нерухомого променя* (рис. 4.1, а, б, в);
- 2) *променя щодо нерухомого об'єкта* (рис. 4.1, г);
- 3) *променя щодо рухомого об'єкта* (рис. 4.1, д).

Перший спосіб (переміщення об'єкта щодо нерухомого променя) найбільш поширений в технологічних застосуваннях лазерного випромінювання завдяки відносній простоті реалізації. В цьому випадку заготовці може бути надано поступальний (див. рис. 4.1, а) або обертальний рух (див. рис. 4.1, б). Можливе також різне поєднання цих рухів.

Для реалізації другого і третього способів (див. рис. 4.1, г, д), що є більш складними і менш поширеними, використовують сканери різного принципу дії – інерційні (базуються на механічному переміщенні, а також обертанні відхиляючих елементів – дзеркал, призм) та майже безінерційні – оптичні, електричні та п'єзосканери.

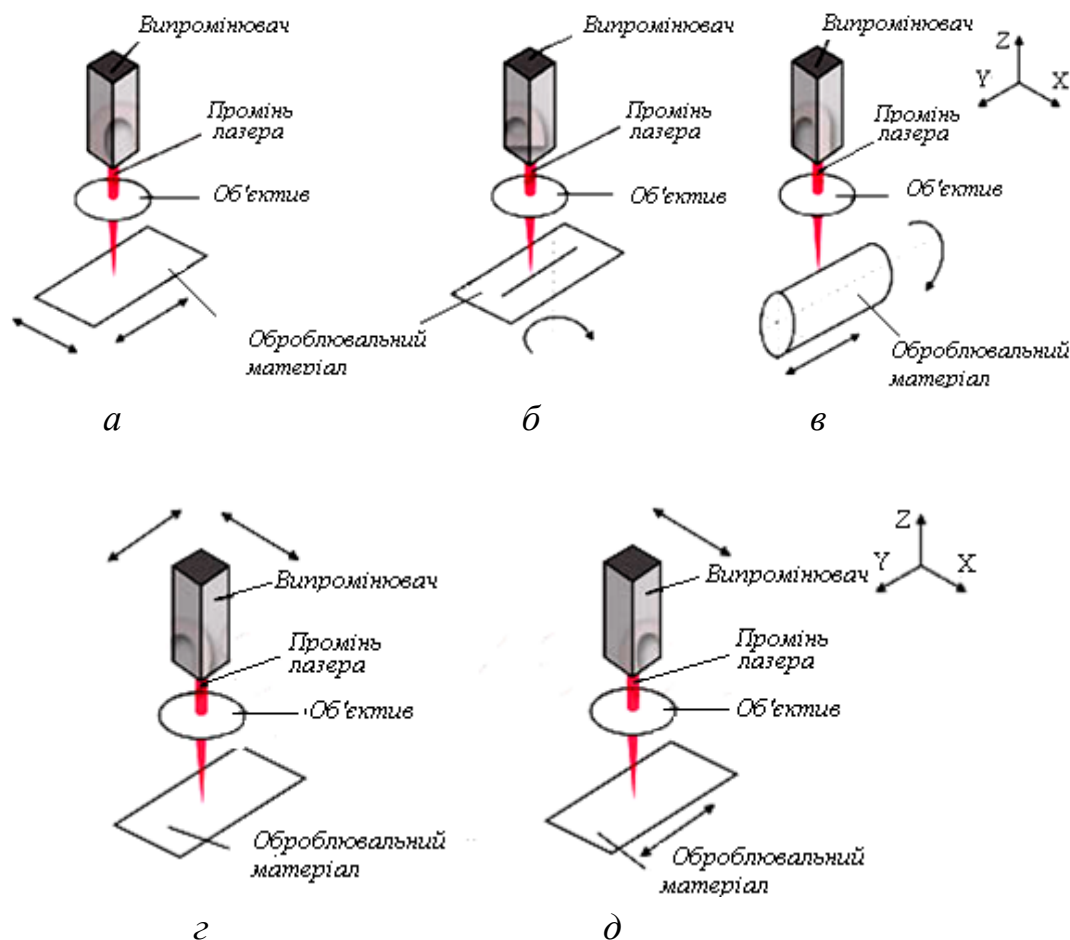


Рисунок 4.1 – Схеми відносного переміщення лазерного випромінювання та об'єкта

Принципово нові можливості у сфері обробки матеріалів багато в чому зумовлені саме високошвидкісним керуванням зміни енергії лазерного променя в часі та її швидким переміщенням в просторі.

4.4. Процеси взаємодії лазерного випромінювання з оброблюваним матеріалом та основні види лазерної обробки

Сутність обробки матеріалів висококонцентрованим потоком енергії лазерного променя полягає в перетворенні, з певним коефіцієнтом корисної дії, енергії джерела в теплову енергію, яка спричиняє зміни структурно-фазового або агрегатного стану поверхневого шару виробу. В поверхневому шарі також виникають такі процеси, як зміна напружено-деформованого стану, дифузія, хімічні реакції.

Можливості використання лазерного випромінювання як універсального інструмента для обробки матеріалів визначаються закономірностями перебігу вказаних фізичних процесів і явищ.

Залежно від інтенсивності (щільності потужності) випромінювання можна виділити наступні стадії взаємодії лазерного випромінювання з речовиною: відбивання лазерного випромінювання поверхнею оброблюваного матеріалу; нагрівання оброблюваного матеріалу та формування теплових потоків у внутрішні шари об'єму; плавлення матеріалу; випаровування (ерозія) поверхневих шарів матеріалу; утворення плазми (рис. 4.2).

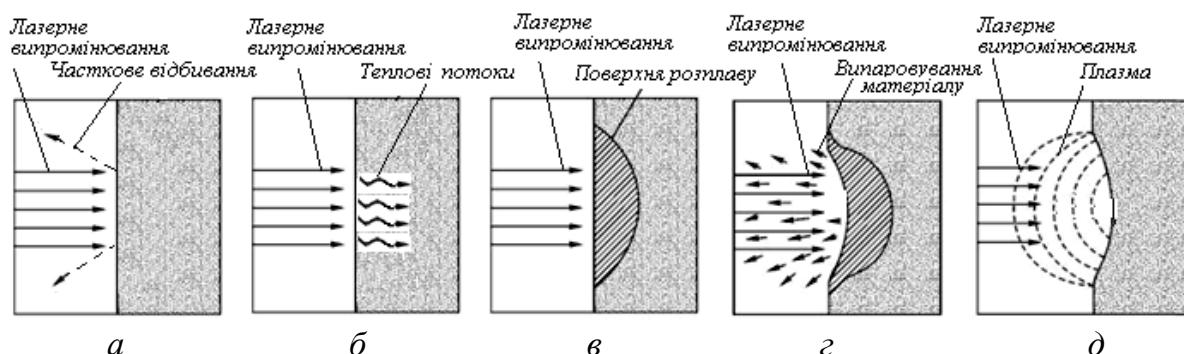


Рисунок 4.2 – Фізичні процеси взаємодії лазерного променя з матеріалом:

a – падіння і часткове відбивання, $q > 0$; *б* – поглинання і нагрівання, $q = 10^7 \dots 10^8 \text{ Вт/м}^2$; *в* – плавлення, $q = 10^{10} \dots 10^{11} \text{ Вт/м}^2$; *г* – випаровування (ерозія), $q = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ Вт/м}^2$; *д* – утворення плазми, $q > 10^{13} \text{ Вт/м}^2$

Завдяки зміні щільності потужності та часу дії лазерного випромінювання можливе керування вказаними вище стадіями взаємодії лазерного випромінювання з речовиною і, таким чином, реалізація різних технологічних процесів обробки.

Орієнтовна класифікація основних лазерних технологічних процесів, залежно від інтенсивності (щільності потужності) випромінювання та тривалості його дії на матеріал, наведена на рис. 4.3. Під тривалістю впливу розуміється тривалість часу експозиції при безперервному випромінюванні або тривалість імпульсу при імпульсному випромінюванні.



Рисунок 4.2 – Класифікація основних лазерних технологічних процесів

Завдяки безсумнівним перевагам (див. п. 4.1) лазерного променя як джерела теплової дії на матеріал, можливості реалізації структурно-фазових перетворень та зміни агрегатного стану поверхневих шарів матеріалу технології лазерної обробки все більше використовуються у різних видах виробництв машинобудівних підприємств – заготівельному, інструментальному, зварювальному, термічному, металургійному, механооброблювальному, ремонтному та інших.

Розподіл продажу промислових лазерів за видами їх використання, що характеризує актуальність лазерної обробки у різних технологіях, наведено на рис. 4.3.



Рисунок 4.3 – Розподіл продажу промислових лазерів за видами їх використання

4.5. Оброблюваність матеріалів лазерним випромінюванням

За аналогією з іншими технологіями під *оброблюваністю матеріалів лазерним випромінюванням* розуміють властивість, що характеризує ступінь складності лазерної обробки даного матеріалу.

Дана властивість є комплексним поняттям і визначається рядом показників (абсолютних і відносних). Зокрема, відносна оброблюваність матеріалів лазерним випромінюванням може бути оцінена методом порівняння з певним матеріалом, оброблюваність якого прийнята за 1 (для металів таким матеріалом є вольфрам), табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Відносна оброблюваність деяких матеріалів лазерним випромінюванням

Матеріал	$T_{\text{пл.}}, ^\circ\text{C}$	Відносна оброблюваність
Вольфрам	3400	1
Молибден	2623	1,25
Мідь	1083	1,43
Залізо	1539	1,66
Хром	1890	1,87
Ніобій	2477	2,69
Титан	1671	3,50
Алюміній	660	4,57
Свинець	327	35,8
WC	2870	1,42
Cr ₃ C ₂	1895	1,67
ZrB ₂	3040	30,6
TiB ₂	3225	37,5
ZrC	3530	55,80
TiC	3140	85,00

Оброблюваність матеріалів лазерним випромінюванням, на відміну від механічної обробки, визначається не механічними властивостями матеріалу, а залежить від його теплофізичних властивостей: температури плавлення і випаровування, теплоємності, теплоти сублімації, теплоти плавлення.

Під час впливу лазерного випромінювання на матеріал в результаті нагрівання в поверхневому шарі відбуваються структурні і фазові зміни,

виникають залишкові термонапруження (дип. п. 4.4), змінюються властивості матеріалу, тобто виникає зона термічного впливу.

Під зоною термічного впливу (ЗТВ) розуміють область матеріалу з відмінними від вихідних структурою і властивостями, яка з'явилася в результаті дії лазерного опромінення. Розмір даної зони становить від декількох мікрометрів до декількох десятків і навіть сотень мікрометрів.

Структурні зміни в ЗТВ при лазерній обробці можуть бути такими:

- рекристалізація;
- загартування (сталей);
- аморфізація (склокераміки, тонких металевих плівок);
- взаємна дифузія нагрітих шарів;
- відпалення дефектів (у напівпровідниках) і т. д.

Характер структурних і фазових перетворень в матеріалі, параметри опроміненої зони при інших рівних умовах залежать від природи матеріалу, його вихідних властивостей.

Наприклад, у вуглецевих сталях зона термічного впливу при лазерній обробці має шарувату структуру (зазвичай 2 ... 3 шари), ширина ЗТВ ~ 60 ... 80 мкм. Перший шар являє собою світлу нетравлену смугу (білий шар), що спостерігається також при інших видах високошвидкісного локального нагрівання (електронно-променевого, електророзрядного, плазмового і т. д.). Мікротвердість цього шару значно відрізняється від мікротвердості вихідного матеріалу (істотно вища, збільшення твердості може становити у кілька разів та перевищувати твердість матеріалу при традиційній термічній обробці). Товщина шару ~ 10 ... 20 мкм.

Другий шар зазвичай є перехідним від шару з підвищеною мікротвердістю до вихідної структури.

Мікротвердість зони термічного впливу у вуглецевих сталях при однакових режимах обробки залежить від вмісту вуглецю: зі збільшенням вмісту вуглецю спостерігається значне зростання мікротвердості.

Збільшення мікротвердості в ЗТВ пов'язане зі структурними перетвореннями, що відбуваються при лазерному нагріванні, і формуванням фаз, що характеризуються високою твердістю (наприклад, мартенситної, мартенсито-аустенітної структури, перліто-цементитної складової).

Питання для самоперевірки

1. Які основні переваги обробки матеріалів з використанням лазерного випромінювання як інструмента?
2. Назвіть види відносних рухів лазерного променя та оброблювальної заготовки під час лазерної обробки.
3. Яка схема відносного переміщення лазерного випромінювання та об'єкта є найбільш поширеною у матеріалообробці і чому?
4. Які фізичні процеси та явища відбуваються в процесі взаємодії лазерного випромінювання з речовиною?
5. Назвіть основні стадії взаємодії лазерного випромінювання з речовиною залежно від щільності потужності випромінювання.
6. На яких ефектах впливу лазерного променя на матеріал базуються основні технологічні процеси лазерної обробки?
7. Які основні лазерні технологічні процеси відбуваються за умов стадії нагрівання лазерним променем?
8. Які основні лазерні технологічні процеси відбуваються на стадії плавлення матеріалу під дією лазерного променя?
9. Які основні лазерні технологічні процеси відбуваються на стадії випаровування матеріалу під дією лазерного променя?
10. Вкажіть основні технологічні параметри (щільність потужності, час дії лазерного імпульсу) при найбільш поширених методах лазерної обробки.
11. Як оцінюють відносну оброблюваність матеріалів лазерним випромінюванням?
12. Якими властивостями матеріалу визначається оброблюваність матеріалів лазерним випромінюванням?
13. Що розуміють під зоною термічного впливу (ЗТВ) під час лазерної обробки?
14. Які структурні зміни відбуваються в ЗТВ при лазерній обробці?

5. ЛАЗЕРНЕ РІЗАННЯ

5.1. Механізм реалізації та основні переваги лазерного різання порівняно з традиційними методами

Одним з основних процесів отримання заготовок або деталей в машинобудуванні є різання металу, тобто поділ вихідного матеріалу на частини або отримання з нього деталей певної форми. Традиційно використовуються механічні способи, основними недоліками яких є невисока продуктивність, низька стійкість різального інструмента, а також проблематичність, а часом і цілковита неможливість різнофігурного різання за круглими і криволінійними контурами.

Методи, засновані на фізико-хімічній дії на матеріал (газове, газоелектричне, плазмове різання), також не позбавлені істотних недоліків, основними з яких є низька точність, значний термічний вплив. Високоточне електроерозійне різання дозволяє виготовляти деталі будь-якої геометрії, проте її недоліками є низька продуктивність, висока технологічна складність.

Завдяки високій точності і складноконтурному розкрию на сьогоднішній день лазерні технології у багатьох випадках є найкращою альтернативою розглянутим вище методам.

Лазерне різання засноване на локальному нагріванні, плавленні та випаровуванні матеріалу сфокусованим лазерним променем. Можливе здійснення як наскрізного різання, так і нанесення рисок, отримання пазів і т. д.

Застосування лазерів для різання металів і неметалів має такі переваги порівняно із зазначеними вище традиційними методами.

- *Великий діапазон оброблюваних матеріалів:* вуглецеві та леговані сталі, у тому числі корозійностійкі; алюміній, титан, мідь та їх сплави; неметалеві матеріали – кераміка, графіт, деревина, фанера, щільний картон, наждачний папір, гума, скло, різні види пластиків, мінерали, шкіра та інші матеріали.

- *Можливість отримання тонких розрізів*, у тому числі фігурних – з гострими кутами, тонкими перемичками, переходами без радіусів.

- *Незначні розміри зони термічного впливу.* Механічні властивості ме-

талу в зоні різання лазером практично не змінюються, а окалиноутворення зведено до мінімуму.

- *Хімічна чистота процесу різання.*
- *Можливість автоматизації процесу і отримання високої продуктивності.*
- *Можливість різання за складним профілем у двох і трьох вимірах, у тому числі об'ємного різання з використанням високотехнологічних оптоволоконних систем. Геометрична форма деталей та рівень складності контуру виробу, які проектується під порізку лазером, фактично не обмежені.*
- *Високі показники точності та якості отримуваних виробів.* Використання лазера особливо виправдане у тих випадках, коли потрібно виготовити складні деталі малими серіями і великої номенклатури. У сучасному машинобудуванні такі замовлення стають все більш поширеними.

Найбільш ефективним є лазерне різання матеріалів такої товщини: сталь – від 0,2 мм до 30 мм; алюмінієві сплави – від 0,2 мм до 20 мм; сплави міді – від 0,2 мм до 15 мм; неметалеві матеріали – до 50 мм.

Порівняно з багатьма видами обладнання, що застосовується на виробництві, вартість лазерного устаткування для різання залишається ще досить високою, хоча останнім часом намітилася тенденція до її зниження.

Лазерне різання, що відбувається в режимі випаровування, див. рис. 4.2, здійснюється за умов великої інтенсивності лазерного випромінювання ($10^{10} \dots 10^{12}$ Вт/м²), яке реалізується в режимі коротких лазерних імпульсів наносекундної та пікосекундної тривалості. Щільність потужності випромінювання в цьому випадку перевищує щільність потоку об'ємного випаровування. Продукти руйнування в каналі різа знаходяться переважно в парогазовій фазі та видаляються з каналу за рахунок енергії та тиску парів. Цей механізм вимагає високих енерговитрат і здійснюється лише для досить тонкого металу.

З метою істотного скорочення витрат енергії, підвищення товщини оброблюваного металу і швидкості різання, тобто для інтенсифікації процесу та розширення його технологічних можливостей, застосовується допоміжний газ, що подається в зону різку. Таке різання називається *газолазерним*. За своєю сутністю ця технологія є комбінованою (гібридною).

Подача газу здійснюється зазвичай співвісно лазерному променю за допомогою спеціального сопла (рис. 5.1). Можливою є також бічна або кі-

льцева подача. Струмінь газу призначений для видалення продуктів ерозії (плавлення) із зони обробки, запобігання окисленню матеріалу (захисна функція), а в деяких випадках – для ініціювання екзотермічної реакції окиснення (горіння) в зоні лазерного впливу. В останньому випадку для цих цілей використовують кисень, стиснене повітря, а для створення захисного середовища – інертні гази (аргон, гелій, азот).

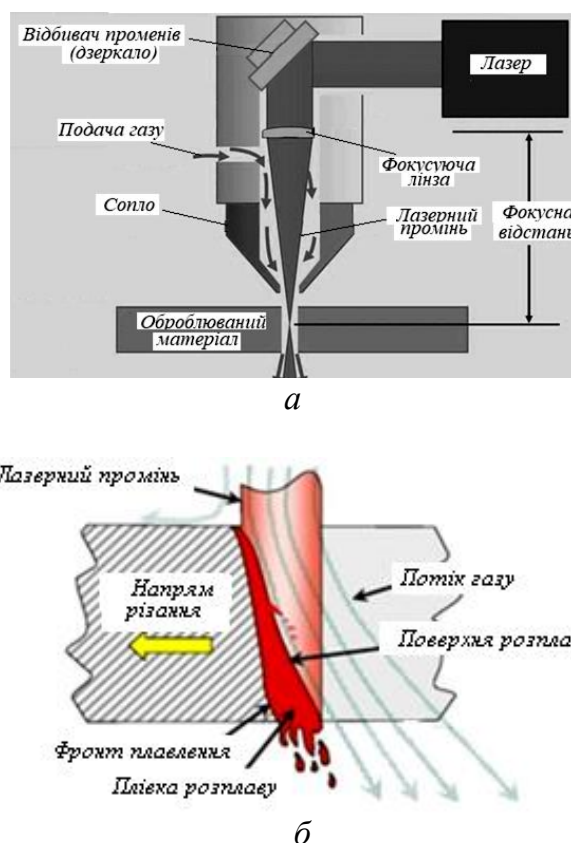


Рисунок 5.1 – Схема газолазерного різання (а) та переріз фронту різання (б)

Механізм різання з ініціацією горіння зазвичай використовується для матеріалів, схильних до займання і горіння за температур, нижчих точки плавлення, та до утворення рідкотекучих оксидів, наприклад, для низьковуглецевої сталі, титану.

Лазерне різання вуглецевих сталей проводиться з використанням кисню. При взаємодії кисню з металом, розігрітим лазерним променем, відбувається екзотермічна реакція окиснення. Тепло, що виділяється в процесі окиснення заліза, в 3 .. 5 разів перевищує підведену потужність лазерного випромінювання. Продукти горіння (оксиди) видувуються з порожнини різання цим же струменем кисню.

В процесі газолазерного різання металів і сплавів з низьким тепловим ефектом реакції горіння, а також схильних до утворення тугоплавких оксидів, матеріал не горить, а плавиться, і струмінь газу видаляє рідкий метал з області різку. Даний механізм характерний для легованих і високоуглецевих сталей, алюмінію, міді та інших матеріалів.

5.2. Основні параметри режиму лазерного різання і технологічні показники процесу

Основними параметрами режиму лазерного різання, є:

- *щільність потужності випромінювання q ;*
- *тиск і склад допоміжного газу;*
- *діаметр сфокусованої плями d і т. д.*

При імпульсному режимі до даних параметрів додаються:

- *частота повторення імпульсів f ;*
- *тривалість імпульсів τ .*

Параметри режиму лазерного різання у значній мірі визначають технологічні показники процесу – якість, точність, продуктивність. Досить впливовими є також характеристики та властивості оброблювального матеріалу – його товщина, поглинальна здатність, теплопровідність, в'язкість та інші.

Рівень технологічних показників процесу у значній мірі залежить від ступеня автоматизації обладнання, стабільності значень та похибок параметрів режиму.

- *Продуктивність лазерного різання характеризується швидкістю різання V , яка, в свою чергу, визначається потужністю випромінювання, товщиною матеріалу, тиском робочого газу, теплопровідністю матеріалу. У ряді випадків V значно більша, ніж при інших способах різання, у тому числі механічному, і становить 1 ... 10 м/хв (за товщини оброблюваного металу 25 ... 0,5 мм відповідно). Сучасні лазерні розкрійні комплекси дозволяють проводити розкрій неметалевих матеріалів зі швидкістю 10 ... 50 м/хв.*

- *Якість різку визначається, насамперед, шорсткістю його поверхні.*

Мінімальна шорсткість поверхні кромки після різання лазером становить $R_a \leq 3,2 \dots 12,5$ мкм (за товщини сталевих листа від 0,5 до 12 мм). Для порівняння – при гідроабразивному різанні якість поверхні становить $R_z = 20 \dots 60$ мкм. Збільшення продуктивності (швидкості різання) призводить до зниження якості обробленої поверхні.

- *Висока точність лазерного різання є однією з переваг порівняно з іншими видами обробки листового матеріалу. Так, наприклад, точність позиціонування при гідроабразивному різанні становить $\pm 0,2$ мм, точність різання $\pm 0,15$ мм. При лазерному різанні точність позиціонування буде $\pm 0,03$ мм, а точність (повторюваність) різання $\pm 0,005$ мм, що є визначальним фактором при необхідності вибору способу різання як технології, після якої додаткова обробка з метою «підгонки» розміру є економічно нецільною.*

5.3. Типові вироби лазерного різання у машинобудуванні

До найбільш характерних областей застосування лазерного різання та контурної обробки належать наступні.

- *Розкрій металевих листових матеріалів.*

Загалом ця технологія може бути використана для металу завтовшки 2 ... 30 мм, але найбільш раціональне її застосування (з точки зору продуктивності та якості) – отримання виробів за товщини вихідного матеріалу до 5 ... 10 мм.

Особливо ефективний лазерний розкрій заготовок для отримання виробів зі складним просторовим профілем. Такі вироби характерні для авіаційної, автомобільної та інших галузей, що відрізняються динамічністю в освоєнні нових видів продукції, невисокою серійністю, необхідністю апробації ряду варіантів дослідно-конструкторських розробок. Приклади матеріалів і отримуваних виробів: різання сталевих прокатаних листів при виготовленні обшивок літака, порожнин несучого гвинта гвинтокрила, деталей кузовів автомобіля та бронемашин; виготовлення спеціального різального інструмента; виробництво різноманітних деталей для суднобудування і т. д.

В останні роки активно розвивається технологія лазерного різання для розкрою та утилізації великотоннажних виробів (котли, вагони, ферми, морські платформи).

- *Розкрій неметалевих матеріалів.*

Лазерне випромінювання дозволяє ефективно здійснювати розкрій неметалевих матеріалів (завтовшки до 50 мм) – гуми, пластмаси, склотканини, паперових, картонних, текстильних матеріалів. Вирізані випромінюванням вироби з таких матеріалів добре зберігають форму; швидкість різання досягає декількох сотень метрів на хвилину; можливе одночасне різання відразу декількох шарів матеріалу. Важливою перевагою порівняно з механічною обробкою є відсутність відходів у вигляді пилу, що істотно покращує умови праці.

- *Виготовлення штампів.*

В даний час в інструментальному виробництві одним з найбільш дорогих видів інструмента є штампи і прес-форми. Проблема швидкого автоматизованого виготовлення штампів для гнучкого листоштампувального виробництва вирубних штампів, штампів для листового глибокого витягування залишається достатньо гострою у машинобудуванні через високу вартість і велику трудомісткість багатоетапного традиційного процесу. Найбільш відповідальними операціями при виготовленні штампів є отримання їх робочих вузлів – пуансона і матриці.

Значними перевагами лазерного різання є необмежена можливість виготовлення будь-якого за складністю профілю та можливість одночасного вирізання профілів пуансона і матриці практично без відходів завдяки не-значній ширині різку променем лазера ($\sim 0,1 \dots 0,15$ мм) та високій точності (до 0,005 мм), рис. 5.2. Особливістю технології є висока якість і можливість виготовлення набраних конструкцій вузлів, висока економічність операції порівняно з традиційною технологією.



Рисунок 5.2 – Пуансон і матриця, отримані лазерним контурним різанням

- *Різання та скрайбування крихких матеріалів.*

Лазерне різання використовується в машинобудуванні при виготовленні багатограних непереточуваних пластин із твердих сплавів та мінералокераміки, особливістю яких є підвищена крихкість.

Під скрайбуванням розуміють некрізне різання, що застосовується зазвичай для поділу крихких матеріалів – напівпровідників, кераміки, скла, мінералів. Скрайбування здійснюється шляхом нанесення на поверхні суцільної канавки або пробивання послідовності близько розташованих отворів, після чого матеріал легко розламується уздовж лінії скрайбування.

Суть традиційної технології скрайбування полягає в нанесенні (як правило, твердосплавним або алмазним інструментом) напрямної подряпини (підрізу), по якій при незначному зусиллі відбувається поділ матеріалу. Цей процес досить трудомісткий і зазвичай пов'язаний з високим відсотком браку обробки. Процес лазерного скрайбування відбувається в результаті теплового впливу інтенсивного лазерного променя на оброблюваний матеріал (у вигляді пластини). В результаті локального випаровування матеріалу при поверхневому переміщенні лазерного променя формується канавка (підріз) без механічної напруги в прилеглих областях і без суттєвого нагрівання пластини.

Технологія застосовується переважно в мікроелектроніці (виготовлення мікросхем при поділі пластин на основі кремнію), а також для виготовлення тонкоплівкових сонячних батарей і т. д.

На рис. 5.3 наведено процеси лазерного різання металевих та неметалевих матеріалів (див. рис.5.3, а), а також деякі приклади отримуваних виробів (див. рис.5.3, б).

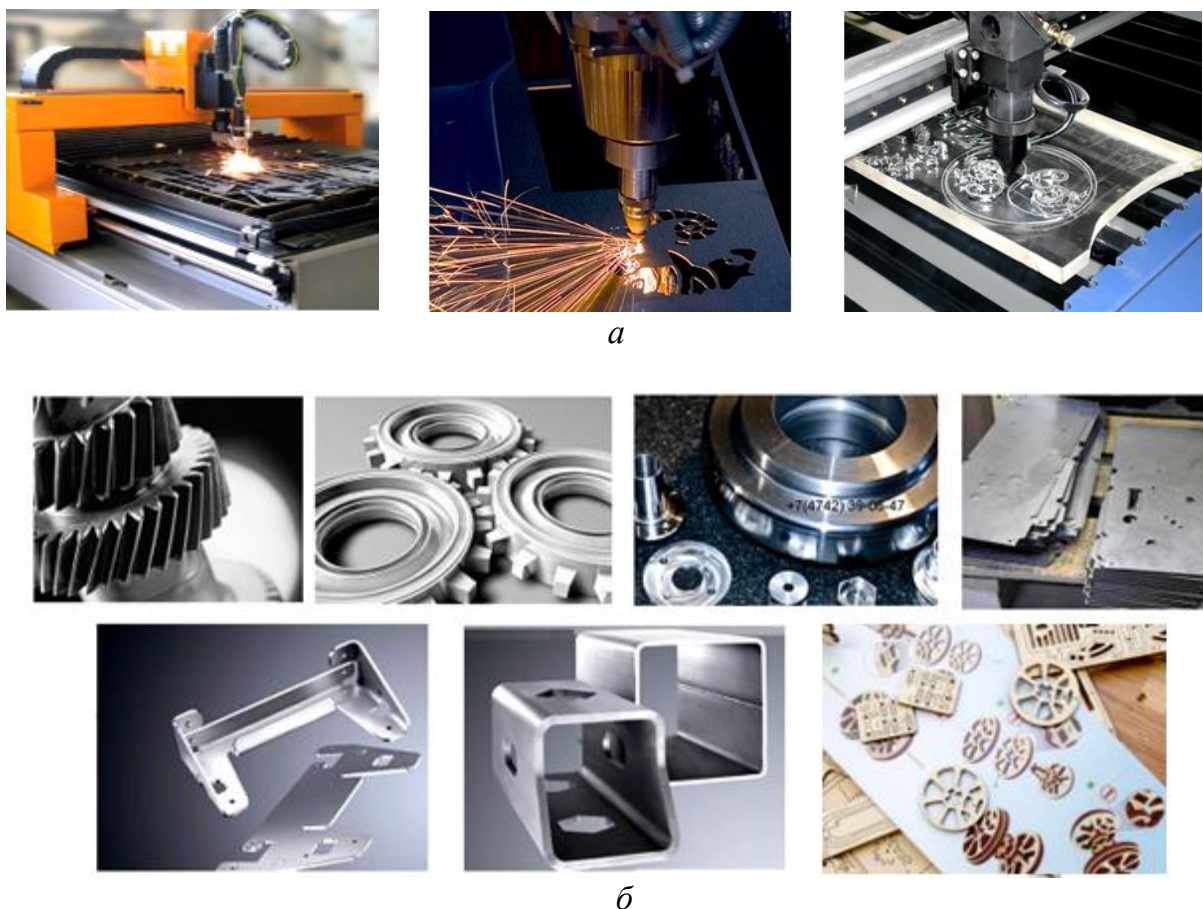


Рисунок 5.3 – Лазерне різання

5.4. Обладнання для лазерного різання

Для різання зазвичай використовують твердотільні (на рубіні, склі з неодимом або на алюмоітрієвому гранаті) і газові лазери (на вуглекислому газі).

При розкрої металів – сталі, алюмінієвих сплавів, міді та латуні твердотільні лазери мають перевагу порівняно з вуглекислотними, оскільки поглинання випромінювання поверхнею цих металів значно вище на довжині хвилі твердотільного лазера (видимий діапазон).

Для неметалів (пластмас, скла) застосовують лазери, що здійснюють випромінювання в ультрафіолетовому або інфрачервоному діапазоні, оскільки більшість подібних матеріалів є повністю або частково прозорими для видимого випромінювання, тобто випромінювання твердотільних лазерів.

Вуглекислотні лазери найбільш універсальні і застосовуються для обробки практично будь-яких металів і неметалів. Крім того, у них низька розбіжність променя, що дає можливість розмістити джерело випромінювання далеко від зони обробки без втрати якості променя.

Використовують як безперервний, так і імпульсно-періодичний режими випромінювання. Імпульсне випромінювання доцільно використовувати для прецизійного різання. Питання продуктивності при цьому відступає на другий план, тому що лазерна обробка в таких ситуаціях є єдиним технологічним засобом забезпечення поставленого конструктором завдання.

Безперервне випромінювання, навпаки, дає можливість здійснити високопродуктивне різання, причому з малими втратами матеріалу при обробці, що вигідно відрізняє лазерне різання від традиційних методів розкрою, в тому числі і від різання струменем плазми. Однак точність і якість різання можуть бути нижчими порівняно з використанням імпульсного випромінювання.

Зовнішній вигляд технологічного комплексу для лазерного різання наведено на рис. 5.4.



Рисунок 5.4 – Розкрійні комплекси для лазерного різання

Питання для самоперевірки

1. Назвіть основні переваги застосування лазерів для різання металів і неметалів порівняно з традиційними методами.
2. Для яких товщин вихідних конструкційних матеріалів лазерне різання є найбільш ефективним?
3. Які основні механізми лазерного різання?
4. Як здійснюється газолазерне різання?
5. Яке призначення допоміжного газу?
6. Дайте характеристику основних параметрів режиму лазерного різання.
7. Які чинники впливають на технологічні показники лазерного різання?
8. Назвіть основні технологічні показники процесу лазерного різання та їх орієнтовні кількісні параметри.
9. Які типові вироби лазерного різання і контурної обробки у машинобудуванні Вам відомі?
10. Що таке лазерне скрайбування та в яких сферах доцільне його використання?
11. Які види лазерів використовують для лазерного різання?
12. Які лазери використовують для розкрию металів та неметалів?

6. ЛАЗЕРНЕ ПРОШИВАННЯ ОТВОРІВ

6.1. Технологічні особливості процесу

Порівняно з механічною обробкою дана операція має ряд суттєвих переваг, до яких належать наступні.

- *Отримання отворів у будь-якому матеріалі незалежно від його механічних властивостей.*
- *Отримання отворів незначних за розміром діаметрів (від декількох мікрметрів до 0,3 ... 0,5 мм) з суттєвим значенням відношення глибини до діаметра ($h/d = 10 \dots 25$), рис. 6.1, а. При великих значеннях h/d лазерне прошивання перевершує за економічністю всі інші методи.*
- *Можливість отримання отворів з віссю, спрямованою під кутом до Поверхні (рис. 6.1, б).*
- *Отримання отворів у важкооброблюваних матеріалах (наприклад, у твердих і жароміцних сплавах).*
- *Отримання некруглих (наприклад, овальних) отворів (рис. 6.1, в).*
- *Достатньо високі показники продуктивності та якості.*

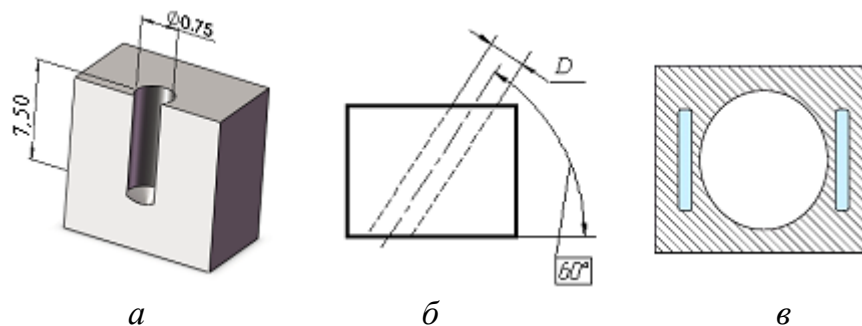


Рисунок 6.1 – Лазерне прошивання отворів

Крім цього, механічне свердління характеризується значним відсотком браку через поломки свердел, а також високою трудомісткістю заточування свердел малого діаметра. Електроерозійне прошивання, маючи певні переваги порівняно з механічним свердлінням, характеризується відхиленням осі інструмента на глибоких отворах, невисокою продуктивністю і низькою екологічністю. Лазерне прошивання отворів у значній мірі позбавлене цих недоліків.

Прошивання отворів за допомогою лазерного випромінювання є першим і на сьогодні одним з найбільш поширених технологічних застосувань лазерів.

Даний вид обробки виконується, як правило, імпульсним випромінюванням – моноімпульсним, багатоімпульсним (імпульсні лазери на гранаті та CO_2). Однак є ряд операцій, для яких доцільно використовувати безперервне випромінювання.

Базовим процесом технології прошивання отворів (як і для операцій різання, отримання щілин, пазів) є утворення елементарної лунки (отвору) під дією одиничного імпульсу або серії імпульсів. Особливістю лазерного прошивання отворів є реалізація процесу не за рахунок механічного видавлення матеріалу, а в результаті його плавлення і випаровування (рис. 6.2).

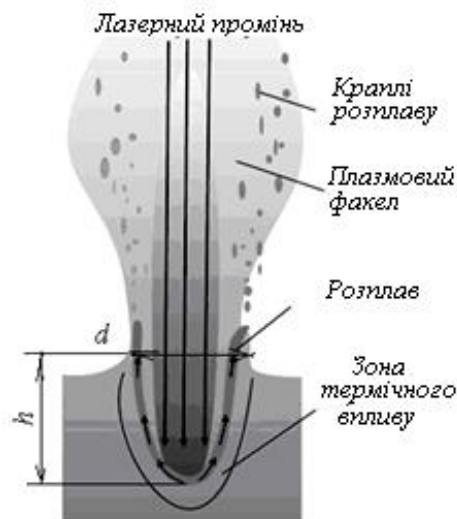


Рисунок 6.2 – Схема лазерного прошивання отвору

Лазерне прошивання отворів може проводитись у двох режимах:

1) за участю рідкої фази; 2) в режимі сублімації, тобто переходу з твердого стану в газоподібний, минаючи рідку фазу.

У першому випадку в зоні впливу випромінювання утворюється рідка фаза, яка видаляється за рахунок газодинамічного ефекту, утвореного парами матеріалу. Цей метод продуктивний, але менш точний, ніж метод, заснований на формуванні отворів за рахунок сублімації. Механізм видалення матеріалу при прошиванні отворів у значній мірі залежить також від тривалості імпульсів.

Значення розмірних характеристик отвору (глибини h , діаметра d) визначаються як параметрами лазерного випромінювання (радіусом плями фокусування r , кутом світлового конуса випромінювання ϕ , енергією випромінювання в імпульсі E), так і характеристиками оброблюваного матеріалу, зокрема, його щільністю ρ , теплофізичними характеристиками – прихованою теплотою випаровування речовини L_v (кількістю тепла, яку необхідно надати рідкому або твердому тілу для перетворення його в пар при незмінній температурі), прихованою теплотою плавлення речовини L_m (кількістю тепла, яку необхідно надати твердій речовині для переходу в рідкий стан при незмінній температурі).

Області застосування лазерної технології на прошивальних операціях обмежуються в даний час отворами, призначеними в основному не для сполучення з іншими деталями, а для пропускання променів (світлових, електронних), різних рідких або газоподібних середовищ (палива, води, повітря і т. д.). У зв'язку з цим більш жорсткі вимоги ставляться зазвичай не до якості обробленої поверхні отворів, а до точності їх розмірних характеристик. Проте для ряду технічних застосувань є також важливою оцінка макро- і мікрогеометрії поверхні отвору, впливу різних чинників на шорсткість обробленої поверхні.

Оцінювання відхилень розмірів отворів показує, що отвори, оброблені в моноімпульсному режимі, без застосування спеціальних прийомів, можна віднести до 6-го ... 7-го квалітетів залежно від умов обробки, що відповідає точності отворів, отриманих тонким свердлінням (розгортанням).

Підвищення точності обробки може бути досягнуто поліпшенням конструкції лазерних технологічних установок, підвищенням їх техніко-експлуатаційних характеристик, зниженням складових похибок, що вносяться окремими конструктивними елементами і вузлами обладнання.

6.2. Типові вироби з отворами, отриманими лазерним прошиванням

Типовими виробами машинобудування, лазерне прошивання отворів для яких є доцільною та економічно виправданою технологією, є такі.

- *Обробка серій отворів* (діаметром менше 1 мм) в довгомірних трубчастих і листових заготовках.

Серйозною проблемою для виробничників є отримання великої кількості отворів діаметром менше 1 мм у великогабаритних виробах. Прикладами таких деталей є довгомірні трубчасті заготовки з великою кількістю отворів для протипожежної системи літака, для розпилювальних систем, криволінійні труби, довгомірні деталі з профільного прокату та інші.

Лазерна технологія порівняно зі свердлінням при обробці вказаних деталей має певні переваги завдяки відсутності операцій розмітки, зенкування вхідної частини отвору, зняття задирок спеціальним інструментом на внутрішній поверхні труб.

Значні труднощі являє також прошивання отворів у трубах, що мають складний просторовий вигнутий профіль. Свердління отворів у подібних виробах є проблематичним через складність їх базування, а також через часті поломки свердел малого діаметра. Застосування лазерного випромінювання дозволяє значно вдосконалити технологічний процес обробки таких отворів.

Лазерну технологію доцільно використовувати при необхідності отримання отворів однакового діаметра з великою щільністю їх розміщення за площею листової заготовки – при виготовленні різного роду сит, фільтрів, ламінованих поверхонь літальних апаратів і т. д. (рис. 6.3, а).

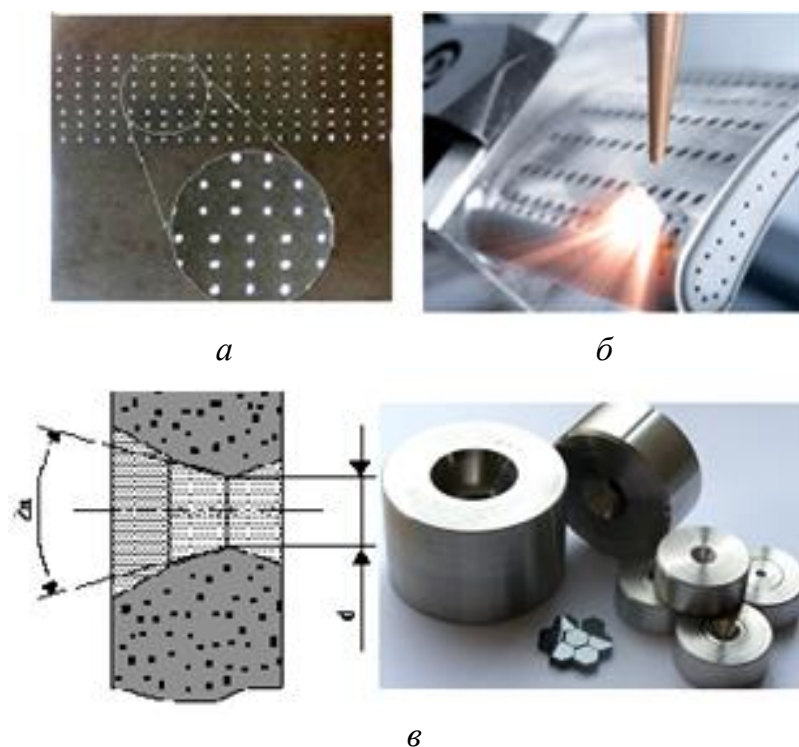


Рисунок 6.3 – Приклади виробів з лазерним прошиванням отворів

- *Отримання системи отворів для охолодження турбінних лопаток* (рис. 6.3, б).

Від надійності цих елементів значною мірою залежить надійність і ресурс газотурбінних двигунів, і відповідно, безпека польотів. Цю задачу можна вирішити шляхом розробки і впровадження якісно нових технологій, в тому числі прошивання охолоджуючих отворів у лопатках. Щоб уникнути так званих «гарячих точок» на поверхні лопаток, щільність отворів повинна становити до 200 отворів/см². До того ж, складна структура жароміцних нікелевих сплавів, що використовуються для цих виробів, вимагає такого розташування системи отворів, що не змінює їх структуру і властивості. Перспективною технологією отримання охолоджуючих мікроотворів (діаметром 100 ... 500 мкм) в жароміцних сплавах є лазерне прошивання.

- *Прошивання отворів в алмазних волоках (фільерах) для протягування дроту діаметром 10 ... 1000 мкм* (рис. 6.3, в).

Профіль отвору у волоці має складну форму і складається з вхідної зони, мастильного конуса, робочого каналу і вихідної зони. Ця обставина, а також висока твердість алмазу є причиною великої трудомісткості виготовлення волок. Традиційна технологія, заснована на використанні електрофізичних методів з механічним свердлінням, передбачає кілька десятків операцій і переходів, що призводять до тривалості циклу виготовлення волоки від 2,5 до 20 год.

Лазерна обробка каналу отвору у волоці, що зазвичай поєднується з ультразвуковим доведенням, підвищує продуктивність обробки більше ніж у 100 разів.

- Однією з областей доцільного застосування лазерного випромінювання є *прошивання отворів у пластинчастих твердосплавних заготовках для введення дротяного електрода електроерозійного вирізного верстата при виготовленні вирубних штампів, а також інших подібних деталей.*

- *Отримання отворів (діаметром 0,01 ... 0,25 мм) у корпусах розпилювачів паливної апаратури.*

- *Обробка газовідвідних отворів у вкладишах шинних прес-форм (застосовують для вулканізації покришок в автомобілебудуванні).*

- *Обробка отворів в керамічних матеріалах (наприклад, фільерах для текстильного машинобудування, у феритових пластинах пам'яті), в інших діелектричних крихких матеріалах – склі, кварці і т. д.*

- *Обробка отворів в деталях із пластмас* (клапани для аерозольних балончиків, перфорація поліетиленових труб).
- *Лазерне прошивання отворів у виробах медичного призначення.*
- Виготовлення сит з отворами $d < 1$ мм, щільністю 10 ... 15 тис. шт/м² для борошномельної та хімічної промисловості та інші застосування.

Питання для самоперевірки

1. Назвіть основні переваги лазерного прошивання отворів порівняно з механічним свердлінням.
2. Опишіть базові фізичні процеси технології лазерного прошивання отворів.
3. Які основні режими лазерного прошивання отворів?
4. Від яких параметрів залежать значення розмірних характеристик отворів, отриманих лазерною технологією?
5. Назвіть основні вимоги до якості та точності розмірних характеристик отворів, отриманих лазерним прошиванням. Чому переважними є характеристики точності?
6. Якими методами здійснюється підвищення точності отримуваних отворів?
7. Назвіть типові вироби машинобудування, для яких є доцільною та економічно виправданою технологія лазерного прошивання отворів.

7. ЛАЗЕРНА ПОВЕРХНЕВА ОБРОБКА

7.1. Сутність та види лазерного поверхневого зміцнення

Зміцнювальна лазерна поверхнева обробка (лазерне гартування) – напрямок, який активно розвивається у світовій практиці і являє собою достатньо простий спосіб підвищення твердості та зносостійкості поверхневого шару матеріалу в 2 ... 3 рази без термічного деформування виробів, типового для традиційних методів термообробки. Використання різних видів лазерного зміцнення у машинобудуванні і приладобудуванні дає можливість істотно скоротити витрати дефіцитних високолегованих сталей при виготовленні відповідальних деталей машин, інструментів, підвищити надійність та довговічність виробів.

На відміну від відомих процесів і методів термозміцнення гартуванням, нагрівання при лазерній термообробці є не об'ємним, а поверхневим. Можливе керування товщиною зони гартування в широких межах завдяки зміні інтенсивності випромінювання та тривалості його дії.

Ефект зміцнення при лазерному впливі на металеві матеріали спостерігається внаслідок надвисоких швидкостей нагрівання і наступного охолодження матеріалу зі значними температурними градієнтами, часткового легування поверхневого шару елементами навколишнього середовища, зростання щільності дислокацій в зоні опромінення і т. д. В матеріалі при таких умовах відбуваються структурні і фазові перетворення, що супроводжуються утворенням специфічної ультрадисперсної однорідної (гомогенної) структури з унікальними властивостями.

Лазерне гартування ефективно застосовується для більшості вуглецевих і легованих сталей, чавунів, для ряду кольорових сплавів.

Основними видами лазерного зміцнення, що реалізуються залежно від щільності потужності лазерного випромінювання та швидкості охолодження, є наступні: зміцнення без фазового переходу, зміцнення з фазовим переходом, лазерне легування, наплавлення, аморфізація поверхні, «шокове» зміцнення, табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Основні види лазерного зміцнення

Вид зміцнення	Щільність потужності q , Вт/м ²	Швидкість охолодження $V_{\text{ох}}$, °C/с	Глибина зони термічного впливу $h_{\text{зТВ}}$, мм
Без фазового переходу	$10^7 \dots 10^8$	$10^4 \dots 10^5$	0,02 ... 0,5
З фазовим переходом	$10^8 \dots 10^9$	$10^4 \dots 10^6$	0,2 ... 3
Лазерне легування	$10^8 \dots 10^{10}$	$10^4 \dots 10^6$	0,2 ... 2
Лазерне наплавлення	$10^8 \dots 10^{10}$	$10^4 \dots 10^6$	0,02 ... 1
Аморфізація поверхні	$10^{12} \dots 10^{14}$	$10^6 \dots 10^{10}$	0,01 ... 0,10
«Шокове» зміцнення	$10^{13} \dots 10^{16}$	$10^4 \dots 10^6$	0,02 ... 0,2

- *Зміцнення без фазового переходу* ($q = 10^7 \dots 10^8$ Вт/м², $V_{\text{ох}} = 10^4 \dots 10^5$ °C/с) передбачає структурні зміни в матеріалі без розплавлення опроміненої зони. При такому зміцненні зберігається вихідна шорсткість поверхні.

- *Зміцнення з фазовим переходом* ($q = 10^8 \dots 10^9$ Вт/м², $V_{\text{ох}} = 10^4 \dots 10^6$ °C/с) передбачає плавлення матеріалу в опроміненій зоні, вимагає більш високої щільності потужності випромінювання. Плавлення матеріалу призводить до зміни вихідної шорсткості поверхні.

Перші два види обробки не потребують спеціального середовища, обробка проводиться на повітрі.

- При *лазерному легуванні* ($q = 10^8 \dots 10^{10}$ Вт/м², $V_{\text{ох}} = 10^4 \dots 10^6$ °C/с) необхідне спеціальне середовище – газоподібне, рідинне, тверде. Цей вид термообробки відбувається з оплавленням поверхні. В поверхневому шарі (глибиною від декількох мікрометрів до декількох міліметрів) утворюється новий сплав, відмінний за складом і структурою від матричного матеріалу.

Легуючі елементи вводяться в матеріал переважно у вигляді порошку або обмазки металів (титану, молібдену, вольфраму), неметалевих матеріалів (хлориду амонію, бору, вуглецю), а також тугоплавких сполук (карбідів титану, цирконію, вольфраму, кремнію, бору та талію, нітридів алюмінію, бору і титану). Можливі й інші способи введення, наприклад, накатування фольги з легуючого матеріалу на оброблювану поверхню; утримання легуючих елементів магнітним полем на матричній поверхні; подача легуючого складу в зону обробки синхронно з лазерним випромінюванням і т. д.

- *Лазерне наплавлення* ($q = 10^8 \dots 10^{10}$ Вт/м², $V_{\text{ох}} = 10^4 \dots 10^6$ °C/с)

дозволяє нанести на поверхню оброблюваного матеріалу шар іншого матеріалу, що поліпшує механічні та експлуатаційні характеристики основного матеріалу – міцність, зносостійкість, жаростійкість, корозійну стійкість.

Як вихідні матеріали для наплавлення найбільшого розвитку отримали порошкові матеріали, які примусово подаються газовим потоком (повітря, азот, гелій, аргон, вуглекислий газ) в зону лазерного оплавлення поверхні.

Лазерне наплавлення дозволяє локально наносити зносостійкі покриття (наприклад, основа сталь – наплавка молібден; основа титан – наплавка кобальт; основа сталь – наплавка титан) і керамічні склади.

Ця технологія може бути також успішно застосована на ремонтно-відновлювальних ділянках для відновлення зношених поверхонь елементів обладнання як заміна досить «грубому» процесу дугового наплавлення, у тому числі для відновлення валів, фланцевих з'єднань, турбінних лопаток, штампувального обладнання, деталей авіаційної техніки (рис. 7.1).

За рахунок передачі випромінювання по оптоволокну з'являється можливість обробки виробів складних геометричних форм.

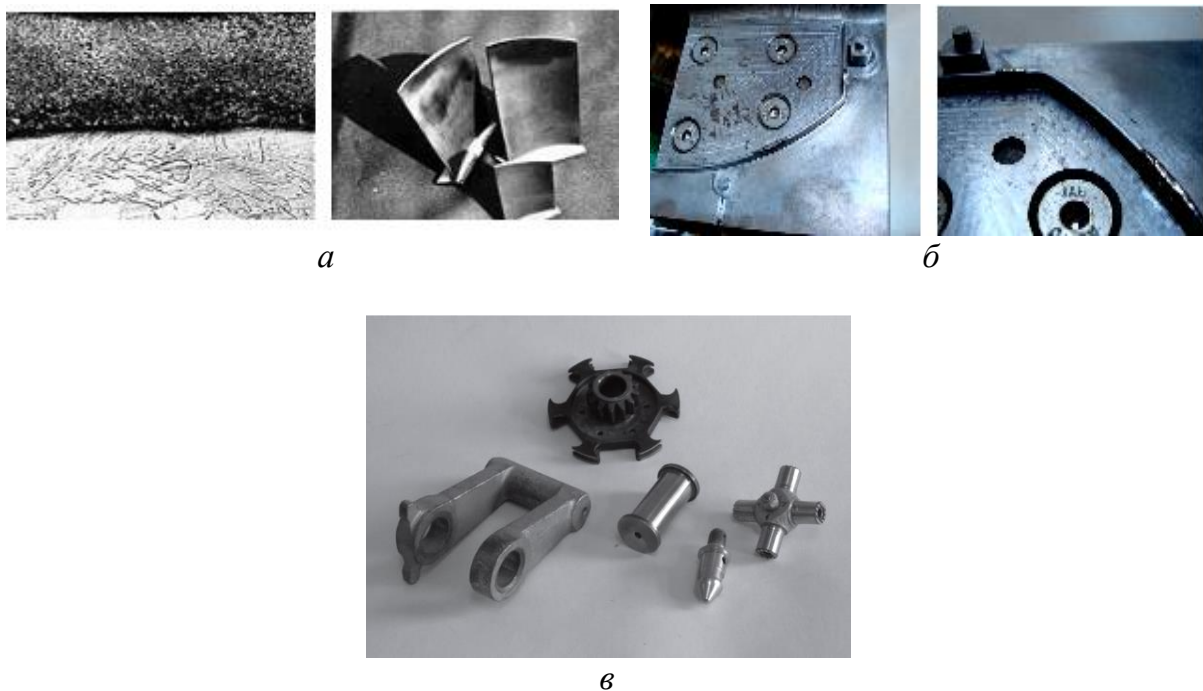


Рисунок 7.1 – Загальний вигляд наплавленого шару та відновлені лопатки з титанового сплаву (а); наплавлення кромки елемента штампа (б); деталі авіатехніки, відновлені методом порошкового лазерного наплавлення (в)

- Відносно новим різновидом лазерного зміцнення є *аморфізація поверхні* ($q = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Вт/м}^2$, $V_{\text{ох}} = 10^6 \dots 10^{10} \text{ }^\circ\text{C/с}$) в умовах швидкісного опромінення (коротким імпульсом або скануючим променем). Надвисокі швидкості тепловідводу забезпечують своєрідне заморожування розплаву, утворення металевого скла (метгласу) або аморфного стану поверхні. При цьому досягається висока твердість, корозійна стійкість, поліпшуються магнітні характеристики та інші властивості.

- *«Шокове» зміцнення* має місце при впливі на матеріал потужного надкороткого імпульсу випромінювання ($q = 10^{13} \dots 10^{16} \text{ Вт/м}^2$). Такий імпульс приводить до виникнення імпульсу віддачі, який, в свою чергу, викликає утворення ударної хвилі в матеріалі і, в результаті, сприяє істотному його зміцненню.

Перші чотири види зміцнення набули найбільшого поширення.

Зазначені види лазерної зміцнюючої технології перспективні у зв'язку зі зростанням дефіциту чистих металів типу W, Mo, Ni, Cr, V, гострою необхідністю зниження витрат високолегованих сталей, а також з проблемою збільшення надійності і довговічності виробів з менш дефіцитних конструкційних матеріалів.

7.2. Сфери використання та обладнання лазерної зміцнювальної технології

Наслідком лазерного зміцнення є покращення багатьох експлуатаційних показників опромінених матеріалів – зносостійкості, теплостійкості, їх механічних характеристик, сприятливий розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі матеріалів, тобто тих параметрів, які визначають триботехнічні властивості контактуючих поверхонь, надійність і довговічність виробів машинобудування.

Лазерна зміцнювальна технологія інтенсивно розвивається і в даний час знаходить застосування в багатьох галузях промисловості.

Найбільш поширена сфера застосування лазерного зміцнення – *інструментальне виробництво* (зміцнення поверхні різців, фрез, свердел, елементів штампного оснащення), *зміцнення робочих поверхонь деталей машин і приладів, у тому числі великогабаритних деталей хімічного та енергетичного машинобудування.*

Обладнання для лазерного зміцнення базується на використанні твердотільних або газових лазерів.

Установки на базі твердотільних лазерів випускаються серійно, зазвичай більш компактні, хоча і не генерують випромінювання високої потужності. Більшість установок для зміцнення має імпульсний режим роботи. Це обладнання, як правило, використовується для обробки невеликих ділянок робочих поверхонь деталей порівняно малих розмірів.

Обладнання на основі газових лазерів зазвичай генерує потужне безперервне випромінювання, що розширює можливості виконання різних видів зміцнення.

При створенні нових видів зміцнюючих технологій перспективним є поєднання в одному процесі лазерного зміцнення і локального пластичного деформування – комбінований спосіб обробки.

Питання для самоперевірки

1. Що являє собою зміцнювальна лазерна поверхнева обробка?
2. Чим пояснюється ефект зміцнення при лазерному впливі на металеві матеріали?
3. Назвіть основні види лазерного зміцнення залежно від щільності потужності лазерного випромінювання і швидкості охолодження.
4. Надайте характеристику лазерного зміцнення без фазового переходу та зміцнення з фазовим переходом.
5. Які особливості лазерного легування?
6. Які основні сфери застосування лазерного наплавлення?
7. Що являють собою аморфізація та «шокове» зміцнення?
8. Назвіть найбільш поширені сфери застосування лазерного зміцнення.
9. Які види лазерів використовують для реалізації лазерного зміцнення?

8. ЛАЗЕРНЕ ЗВАРЮВАННЯ

8.1. Основні переваги використання лазерного випромінювання у зварювальному виробництві

Лазерне зварювання є одним з найважливіших промислових використаннях лазера. Розвиток сучасного світового зварювального виробництва багато в чому пов'язаний із застосуванням лазерного випромінювання, наприклад, такі тенденції.

- *Розвиток «гібридних» технологій*, заснованих на одночасному використанні двох або більше процесів з'єднання, у тому числі з використанням лазерних джерел.
- *Вирішення проблем екологічної безпеки та охорони праці*. Пріоритет промислового застосування в економічно розвинених країнах віддається екологічно чистим зварювальним технологіям, зокрема, лазерним.
- *Створення нових засобів нагрівання, придатних до зварювання плавленням*. Сучасні способи зварювання плавленням засновані на використанні поверхневих джерел нагрівання з інтенсивністю (щільністю потужності) від 10^2 до 10^{13} Вт/м². Найбільш високі значення характерні для лазерного випромінювання, табл.8.1.
- *Ефективне застосування зварювальних процесів*, перш за все, лазерних, в медицині і т. д.

Таблиця 8.1 – Характеристики джерела нагрівання в різних способах зварювання плавленням

Вид зварювання	Мінімальна площа плями нагрівання S , мм ²	Максимальна щільність потужності в плямі нагрівання, Вт/м ²
Ручне електродугове	10^{-1}	10^9
Дугове в захисних газах (аргонодугове)	10^{-1}	10^6
Газове	1	$5 \cdot 10^2$
Мікроплазмове	10^{-4}	10^{10}
Електронно-променеве	10^{-5}	10^{11}
Лазерне	10^{-6}	$10^{10} \dots 10^{13}$

До переваг лазерного зварювання порівняно з традиційними способами належать такі.

- Лазерне зварювання забезпечує високі показники точності і про-

дуктивності процесу.

- Лазерне зварювання дозволяє отримувати з'єднання різних матеріалів завтовшки від декількох мікрметрів до десятків міліметрів. З'єднують однорідні і різнорідні метали (Au-Ge, Au-Si, Ni-Cu), у тому числі з великою різницею в температурі плавлення (W-Al, Cu-Ta), метали з неметалами (керамікою, склом), неметалеві матеріали.

- Лазерне зварювання здійснюється як на повітрі, так і в середовищі захисних газів – аргону, CO₂. Вакуум, як при електронно-променевому зварюванні, не потрібний, тому лазерним променем можна зварювати великогабаритні конструкції.

- Завдяки нескладному керуванню і регулюванню за допомогою дзеркальних оптичних систем лазерний промінь дозволяє проводити зварювання у важкодоступних місцях. На відміну від електронного променя і електричної дуги, на лазерний промінь не впливають магнітні поля, що забезпечує стабільне формування шва.

- Завдяки високій концентрації енергії (в плямі діаметром 0,1 мм і менше) в процесі лазерного зварювання обсяг зварювальної ванни незначний, ширина зони термічного впливу має невеликі значення. Це забезпечує високу технологічну міцність зварних з'єднань, а також незначні деформації зварних конструкцій.

- Швидкість лазерного зварювання безперервним випромінюванням у кілька разів перевищує швидкості традиційних способів зварювання плавленням і може становити до 500 м/год.

- Лазерне зварювання проводиться як з наскрізним проплавленням (шов утворюється за всією товщиною зварюваних ділянок деталей), так і з частковим проплавленням. Зварні шви однаково якісно формуються у будь-якому просторовому положенні.

- При лазерному зварюванні можна досягти великого відношення глибини до ширини проплавлення матеріалу («кинджальне» проплавлення).

8.2. Основні види лазерного зварювання

Лазерне зварювання базується на використанні лазерного випромінювання як теплового концентрованого джерела для локального розплавлення матеріалу з'єднувальних виробів. Технологія має багато спільних

рис з процесами лазерного зміцнення при їх виконанні на граничному рівні щільності потужності випромінювання.

Лазерне зварювання здійснюється в широкому діапазоні режимів, що забезпечують високопродуктивний процес з'єднання металів завтовшки від декількох мікрометрів до десятків міліметрів.

Зварювання здійснюється з розплавленням металу в зоні дії лазерного променя, з незначним випаровуванням, з інтенсивним випаровуванням (при глибокому проплавленні) та формуванням парогазового каналу (рис. 8.1).

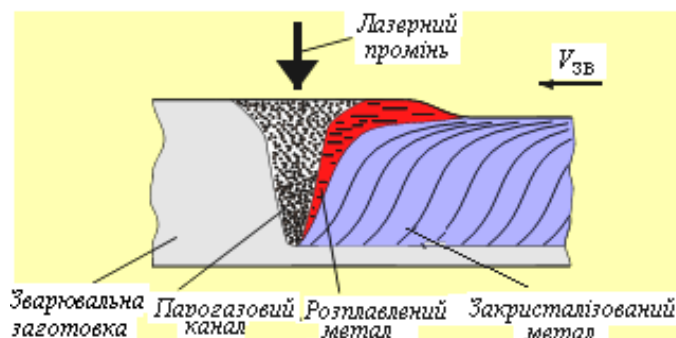


Рисунок 8.1 – Схема формування зварного шва при лазерному зварюванні з глибоким проплавленням

З метою попередження утворення оксидів в зварному з'єднанні застосовують захист зони лазерного впливу за допомогою захисних газів (Ar, He, CO₂), які подаються через сопло безпосередньо в зону дії лазера. Одним з технологічних прийомів є також використання присадного матеріалу у вигляді порошку або проволоки. Це дає можливість регулювати хімічний склад шва, виключити дефекти (пори), а також підвищити точність при складанні деталей.

Зазвичай щільність потужності, необхідна й достатня для здійснення процесів лазерного зварювання, знаходиться в діапазоні $q = 10^9 \dots 10^{11} \text{ Вт/м}^2$. Нижня межа пояснюється більшою ефективністю і економічністю інших методів зварювання, наприклад, дугового або газового. Верхня межа пов'язана з розвитком інтенсивного випаровування, що призводить до викиду металу і підвищення концентрації дефектів зварного шва.

Порівняно з різанням або прошиванням отворів лазерне зварювання деталей і заготовок відбувається за значно менших значень щільності по-

тужності, див. рис. 4.1. Це пояснюється тим, що при зварюванні необхідні лише розігрівання і плавлення матеріалу без випаровування.

Існують такі основні види лазерного зварювання:

- *за технологічною ознакою* розрізняють лазерне зварювання з глибоким проплавленням і лазерне зварювання матеріалів незначної товщини;
- *залежно від конструкції виробів*, що зварюються, технологічних вимог і ряду інших факторів можливе здійснення зварювання з наскрізним проплавленням (застосовується при зварюванні листових навантажених конструкцій) і без наскрізного проплавлення (застосовується для герметизації або з'єднання тонких деталей з масивними);
- *за положенням в просторі*, аналогічно іншим способам зварювання плавленням, лазерне зварювання може здійснюватися в нижньому положенні, вертикальному, горизонтальному, стельовому, як з переміщенням променя, так і зварювальних виробів;
- *за формою з'єднання* лазерне зварювання може бути точковим і шовним.

Перспективними є методи поєднання лазерного зварювання з іншими зварювальними процесами – комбіновані методи, наприклад, лазерне зварювання у поєднанні з дуговим зварюванням в середовищі захисних газів; світлолазерне зварювання; лазерно-плазмове зварювання і т. д.

8.3. Сфери використання лазерного зварювання

Специфічні переваги вигідно відрізняють лазерне зварювання від інших методів цієї технології.

Основними раціональними областями застосування лазерного зварювання є такі.

- *Лазерне зварювання виробів незначної товщини* – 0,02...1 мм (щільність потужності випромінювання $10^9 \dots 10^{10}$ Вт/м²):
 - точкове і шовне зварювання деталей електровакуумних приладів з тугоплавких металів і сплавів; герметизація корпусів різних приладів;
 - точкове зварювання у мікроелектроніці і радіотехнічній промисловості (зварювання дрітків, елементів мікросхем), у точному приладобудуванні, в ювелірній промисловості, в медицині, виготовленні художніх виробів, реставрації творів мистецтва;

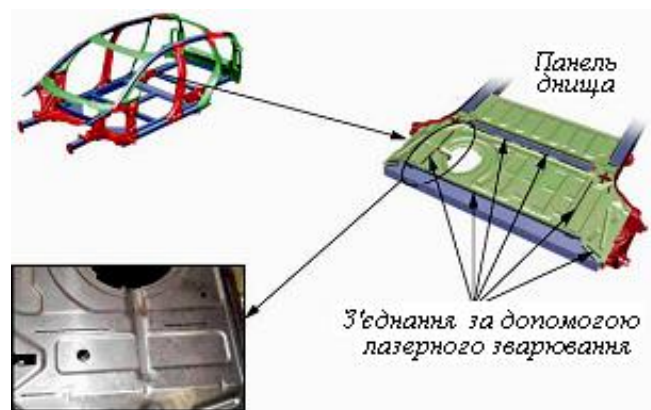
– до інших застосувань даного виду лазерного зварювання можуть бути віднесені заварювання аерозольних балонів, герметизація капсул для ліків і т. д.

- *Лазерне зварювання середніх і великих товщин* – більше 1 мм (щільність потужності випромінювання понад 10^{10} Вт/м²):

- виробництво великогабаритних корпусних деталей, наприклад, двигунів і обшивки літаків, автомобілів і судів; валів і осей, що працюють в умовах знакозмінних навантажень, наприклад, карданних валів автомобіля та інших виробів (рис. 8.2);

- виготовлення деталей механізмів і машин, що складаються з різно-рідних матеріалів;

- зварювання труб, арматурних конструкцій і т. д.



а



б

Рисунок 8.2 – Лазерне зварювання при виготовленні сталевих кузовів автомобіля (а); шовне зварювання машинобудівних виробів (б)

- Окрему групу застосування лазерного зварювання являють деталі і вироби, в тому числі для машинобудування, в яких для надійного з'єднання потрібне *глибоке («кинджальне») проплавлення* – з великим

співвідношенням глибини та ширини шва (10 ... 25), рис.8.3. У цьому випадку використовується, як правило, безперервне випромінювання достатньої високої потужності – більше 1 ... 2 кВт. Зварювання в режимі глибокого проплавлення застосовується, наприклад, при виготовленні шестерень коробки передач автомобіля, карданного вала.

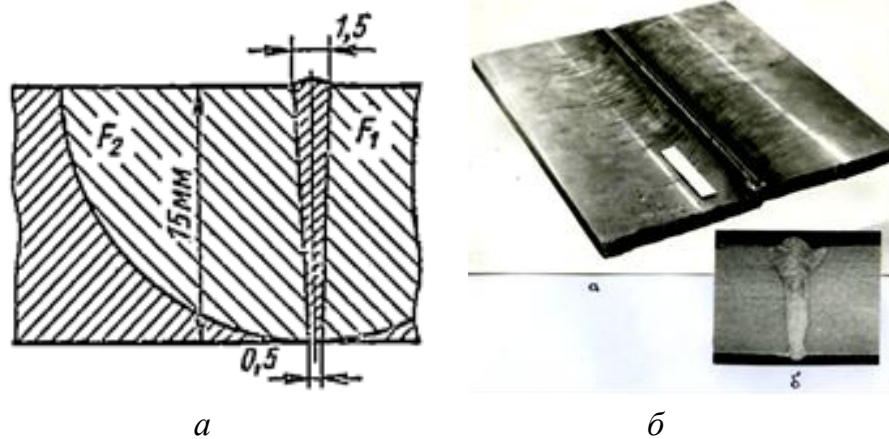


Рисунок 8.3 – Схема (а) та мікрофотографія (б) шва з «кинжальним» проплавленням

Широке застосування лазерного зварювання, як і інших лазерних технологічних процесів, стримується економічними факторами. Зазвичай цей вид зварювання рекомендують, якщо традиційні способи не дають бажаних результатів або технічно не можуть бути реалізованими.

До таких випадків належить необхідність отримання прецизійної конструкції, форма і розміри якої не повинні змінюватися в результаті зварювання. Лазерне зварювання доцільне, якщо воно дозволяє значно спростити технологію виготовлення виробів при використанні зварювання як заключної операції без подальшої правки або механічної обробки. Економічно виправдане лазерне зварювання в разі необхідності підвищення продуктивності.

При виготовленні великогабаритних конструкцій малої жорсткості або з важкодоступними швами, а також при необхідності з'єднання важкозварюваних, у тому числі різнорідних матеріалів, лазерне зварювання може виявитися єдиним процесом, що забезпечує якісні зварні з'єднання.

Питання для самоперевірки

1. Які тенденції розвитку зварювального виробництва пов'язані з застосуванням лазерного випромінювання?
2. Назвіть основні переваги лазерного зварювання порівняно з традиційними способами.
3. Які види лазерного зварювання за технологічною ознакою Вам відомі?
4. Вкажіть основні види лазерного зварювання залежно від конструкції виробів.
5. Надайте характеристику основних сфер застосування лазерного зварювання.
6. Вкажіть характерні приклади використання лазерного зварювання виробів малих товщин.
7. Які приклади виробів із застосуванням лазерного зварювання середніх і великих товщин Вам відомі?
8. Назвіть характерні вироби машинобудування, для виготовлення яких використовується лазерне зварювання.
9. Що являє собою зварювання з «кинджальним» проплавленням?
10. Назвіть основні фактори, що визначають доцільність використання лазерного зварювання у промисловості.

9. ІНШІ СФЕРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У МАШИНОБУДУВАННІ

9.1. Інтенсифікація механічної обробки

Висока локальність впливу, можливість підведення енергії променя у важкодоступні місця, зміна властивостей матеріалу в умовах лазерного опромінення дозволяють удосконалювати класичні технологічні процеси обробки, зокрема, механічну обробку. Деякі приклади наведено нижче.

- *Попереднє нагрівання матеріалу при обробці різанням.*

Процеси механічної обробки корозійностійких і швидкорізальних сталей, спеціальних сплавів, високоміцних чавунів, керамічних матеріалів на основі SiO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 та інших матеріалів зазвичай характеризуються низькою продуктивністю і значним зносом різального інструменту. Відомим способом інтенсифікації процесів різання важкооброблюваних матеріалів є застосування попереднього нагрівання матеріалу поверхневого шару за допомогою індуктивного, електродугового, електроконтактного, газополум'яного, плазмового нагрівання.

При нагріванні поліпшується оброблюваність різанням внаслідок зміни механічних характеристик матеріалу в зоні стружкоутворення – збільшення його пластичності, зниження міцності і твердості. Так, зміни механічних характеристик M_2 оброблюваного матеріалу з підвищенням температури з рівня T_1 до рівня T_2 визначаються закономірністю

$$M_2 = M_1 e^{-\alpha_T (T_2 - T_1)}, \quad (9.1)$$

де M_1 – механічні характеристики матеріалу при температурі T_1 ; α_T – температурний коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу і умов пластичного деформування.

Зміна механічних характеристик матеріалу (зменшення твердості, міцності, збільшення пластичності), в свою чергу, знижує зусилля різання, знос різального інструменту, дозволяє підвищити швидкість різання і збільшити, таким чином, продуктивність обробки при забезпеченні високих показників точності та якості процесу.

Традиційні способи нагрівання мають ряд істотних недоліків. Вони або складні в реалізації та енергоємні, або пов'язані зі складністю підведення додаткової енергії до заготовки, або не забезпечують достатньої локалізації теплового впливу в зоні різання.

При використанні для попереднього нагрівання лазерного випромінювання розглянуті недоліки в значній мірі усуваються.

Лазерний вплив можна локалізувати таким чином, щоб нагріванню підлягала лише зона стружкоутворення (рис. 9.1). У цьому випадку глибина зони термічного впливу не перевищує глибини різання, не відбуваються термічні деформації деталі, нагрівання не відбивається негативно на точності і якості обробки.

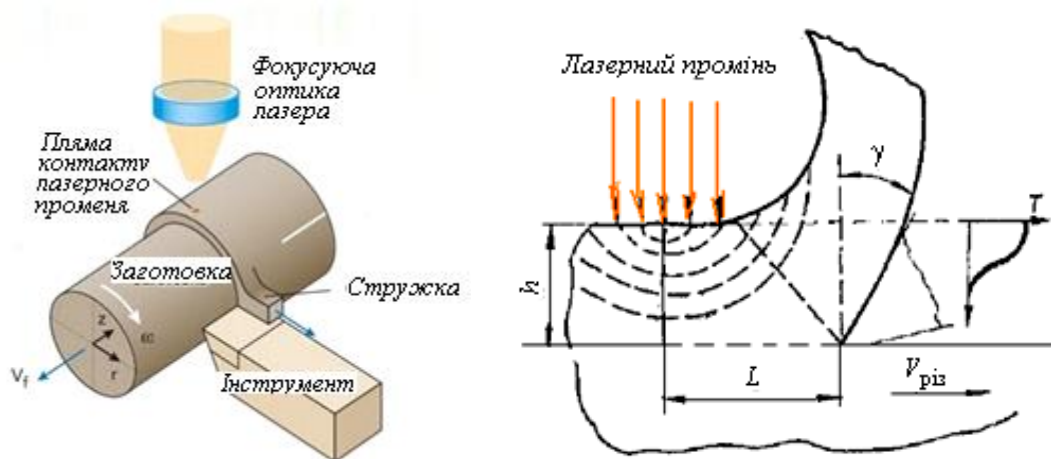


Рисунок 9.1 – Схема точіння металу в умовах його попереднього нагрівання лазерним випромінюванням

Ефективність використання лазерного нагрівання в значній мірі визначається щільністю потужності випромінювання q , а також залежить від режиму точіння. Зі збільшенням q спостерігається значне зменшення результуючої сили різання.

Попереднє нагрівання лазерним випромінюванням приводить не лише до зниження складових сил різання, але й до поліпшення якості обробленої поверхні. Так, при лазерно-механічній обробці шорсткість поверхні жароміцної сталі знижується приблизно в 2 рази порівняно зі звичайним різанням. Істотно, до 1,5 ... 3 разів, може бути підвищена і продуктивність обробки.

Для реалізації розглянутого процесу використовується зазвичай інструмент, армований пластинками твердого сплаву ВК8, Т15К6, ВК6М і т. д. Як випромінювачі при створенні спеціального обладнання застосовуються лазери безперервного випромінювання на CO_2 великої потужності ($P > 1$ кВт).

- *Лазерне подрібнення стружки.*

Механічна обробка глибоких ($L > 5D$) точних отворів у важкооброблюваних матеріалах часто пов'язана з труднощами видалення стружки з порожнини отвору. Як правило, під час свердління або розточування спеціальним інструментом утворюється зливна стружка, що забиває отвір і призводить до утворення браку або поломки інструмента. Проблема посилюється при обробці отворів малих діаметрів.

Періодичне виведення інструмента з порожнини отвору для очищення від стружки значно підвищує трудомісткість обробки, знижує продуктивність процесу.

Ефективне використання стисненого повітря або мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) можливе лише при дробленні стружки в зоні обробки.

Для вирішення цієї проблеми може бути використана лазерна технологія. В зону різання подається лазерне випромінювання, яке фокусується на поверхні зрізання стружки. Робоча частина свердла для глибокого свердління є трубчастою деталлю з поздовжнім прямолінійним пазом. Через отвір у свердлі підводиться МОР, яка потім виходить із зони обробки по поздовжньому пазу назовні, захоплюючи при цьому і стружку (рис. 9.2).



Рисунок 9.2 – Свердла для глибокого свердління

З огляду на малі розміри порожнистого інструмента, для транспортування лазерного променя використовують волоконний світловод, закріплений вздовж внутрішньої стінки інструмента. Крізь світловод подають імпульсне випромінювання, частота якого залежить від швидкості різання, для забезпечення надломлення стружки на довжині, зручній для подальшої евакуації з порожнини отвору. При цьому випромінювання може не приз-

водити до повного різання стружки на елементи, достатньою є перфорація (прошивання 1 ... 2 отворів), що послаблює переріз стружки. Подальший контакт стружки з поверхнею інструмента або деталі довершує її надломлення.

9.2. Динамічне балансування деталей

У машинобудуванні, точному приладобудуванні особливо гостро стоїть проблема врівноваження обертових мас – *динамічне балансування деталей*. Аналіз причин виходу з ладу агрегатів, приладів і машин, що мають швидкообертові вузли, показує, що одним з головних резервів підвищення їх точності, надійності і довговічності є зниження ступеня неврівноваженості (дисбалансу) обертових деталей. Дисбаланс є причиною підвищених нерівномірних навантажень на опори кочення або ковзання, їх підвищений знос і, як наслідок, руйнування, вихід з ладу відповідального вузла виробу.

Особливої актуальності проблема вдосконалення процесу балансування набуває внаслідок розширення використання високообертових механізмів, машин, агрегатів, навігаційних та інерційних систем. Так, частота обертання роторів сучасних електро- і гідродвигунів знаходиться в межах від декількох тисяч до декількох десятків тисяч обертів на хвилину. Усунення дисбалансу може бути здійснене механічним способом (свердлінням, фрезеруванням або шліфуванням), а також із використання електрофізичних методів впливу на матеріал (електроерозійного, електронно-променевого, електрохімічного і т. д.). Однак існуючі методи не завжди задовольняють збільшені вимоги точності, усунення дисбалансу і підвищення продуктивності виконання цієї операції.

Застосування лазерного випромінювання для усунення дисбалансу дозволяє не лише підвищити продуктивність і точність балансувального процесу, а й досягти повної автоматизації цієї складної й трудомісткої операції. Лазерний спосіб врівноваження дає можливість усунути дисбаланс в період обертання виробу (наприклад, ротора електродвигуна) за один його пуск, що значно спрощує технологічний процес.

Перевагою технології є можливість балансування виробів, виготовлених як з металевих, так і неметалевих матеріалів, матеріалів з особливими фізико-механічними властивостями.

Усунення дисбалансу відбувається в результаті лазерної ерозії оброблюваної деталі. При впливі лазерного імпульсу на поверхню деталі, що обертається, внаслідок процесів плавлення і випаровування матеріалу утворюється каверна, розміри якої (довжина, глибина) залежать як від характеристик лазерного випромінювання, властивостей матеріалу, так і від швидкості обертання деталі.

Підвищення точності лазерного балансування можна здійснити двома шляхами. Перший передбачає схему обробки, за якої деталь і фокусувальна система обертаються з однаковою частотою, тобто фактично відтворюється процес лазерного прошивання некрізних отворів імпульсним випромінюванням за умов нерухомої деталі. Можливий і інший шлях досягнення цього ефекту, але без додаткового обертання фокусувальної системи. Цей шлях полягає у підборі тривалості імпульсу в таких межах, щоб імітувався процес обробки нерухомої деталі. У цьому випадку на поверхні утворюється лунка, однак знімання матеріалу набагато менше, ніж при впливі імпульсу вільної генерації.

Обладнання для балансування може бути створене на базі твердотільних і газових лазерів як імпульсного, так і безперервного випромінювання. Балансувальна установка на базі імпульсного твердотільного лазера (рис. 9.3) складається з блоку випромінювача 1, фокусувальної системи 2, датчиків неврівноваженості 4, блоку синхронізації 5 положення важкого місця ротора 3 і моменту подачі лазерного випромінювання, блоку управління 6 роботою лазера.

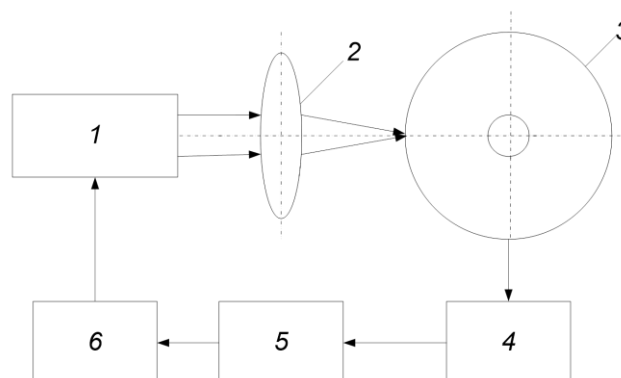


Рисунок 9.3 – Балансувальна машина на базі імпульсного лазера

9.3. Поверхневе очищення виробів

Очищення поверхні є однією з базових технологій в багатьох галузях промисловості, в тому числі у машинобудуванні. Для деяких видів виробництв це використання лазерного випромінювання досить актуальне, оскільки висока якість очищення поверхні гарантує високий ресурс і надійність роботи виробів.

Очищення в загальному вигляді являє собою операцію видалення поверхневих шарів, утворених будь-якими забрудненнями або покриттями, іноді включає і основний шар матеріалу.

Очищення може супроводжуватися супутніми ефектами, наприклад, поліпшенням трибологічних властивостей поверхні, перерозподілом залишкових поверхневих напружень, і, в результаті, зміною механічних, корозійних, фізико-хімічних та інших властивостей.

Існує досить великий арсенал традиційних методів очищення поверхні – механічних, ультразвукових, хімічних, електрохімічних та інших, що успішно використовуються у промисловості. Однак в даний час зазначені методи не в повній мірі задовольняють дедалі більше зростаючі вимоги за технологічними, техніко-економічними, екологічними показниками.

Вагомими перевагами лазерного очищення – висока продуктивність (до 5 ... 7 м²/год), екологічна безпека, відсутність витратних матеріалів, висока технологічна відтворюваність процесу, можливість комплексно вирішувати проблему очищення поверхні (видаляються одночасно як органічні, так і неорганічні забруднення), вирішення питань технологічної спадковості поверхневого шару – відкривають широкі потенційні можливості впровадження даної технології в різних галузях промисловості.

В основі механізмів лазерного очищення лежить весь спектр процесів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною на повітрі та в рідких середовищах – нагрівання, випаровування, утворення плазми, виникнення ударних хвиль і т. д. (див. п. 4.3).

Основними областями застосування лазерного очищення є такі.

- *Лазерне очищення металопрокату від шару окалини для подальшої обробки.*
- *Лазерне очищення поверхні різи, після нарізування якої можлива присутність залишків МОР, органічних і неорганічних забруднень.*
- *Видалення застарілих лакофарбових покриттів з великогабаритних*

аеродинамічних поверхонь літаків, гелікоптерів.

- *Лазерне очищення великогабаритних зварних конструкцій.*
- *Очищення зовнішньої і внутрішньої поверхні труб перед нанесенням захисних корозійностійких покриттів в атомній енергетиці, нафтогазовому комплексі, житлово-комунальному господарстві.*
- *Лазерне очищення поверхні лопаток турбін, експлуатаційне забруднення яких призводить до розбалансування ротора турбіни, погіршення характеристик теплообміну лопаток, зменшує коефіцієнт покорисної дії і стійкість до різних видів зносу поверхні.*
- *Лазерна дезактивація радіаційно-забруднених металевих поверхонь.*
- *Лазерне очищення при реставрації витворів мистецтва, фасадів і внутрішніх інтер'єрів історичних споруд, скульптур, давніх рукописів та інші використання.*

9.4. Маркування виробів

Проблема ідентифікування виробленої продукції і нанесення (або зчитування) різних обсягів функціональної інформації є надзвичайно актуальною у зв'язку зі зростанням номенклатури і обсягів виробництва різних виробів.

Промислове маркування – нанесення на деталі та вироби інформаційних та ідентифікаційних даних – в даний час здійснюється різними методами, у тому числі механічним, електроерозійним, ультразвуковим, електрохімічним; маркуванням фарбою та інші. Однак при сучасних підвищених вимогах до точності, незначних розмірах виробів, можливій крихкості матеріалу, інших обмеженнях ці методи не завжди прийнятні. Крім того, їх продуктивність також у ряді випадків не задовольняє сучасні вимоги.

У той же час потреба в нанесенні необхідної інформації стає дедалі більшою. Мова йде не лише про тривіальні позначення, що характеризують типорозмір, фірмовий знак, експлуатаційні умови і т. д. При вирішенні задачі забезпечення відносної простоти маркування, зниження його собівартості і підвищення продуктивності на поверхню виробу або деталі повинен наноситися необхідний обсяг технологічної інформації в закодованому вигляді, яка зазвичай знаходиться у супровідній документації. Зчитування такої інформації та перетворення у відповідні електричні сигнали дозволяє

оперативно керувати технологічним процесом в умовах сучасного гнучкого автоматизованого виробництва (ГАП).

На відміну від інших методів, лазерна технологія дозволяє проводити маркування на будь-яких матеріалах (електро- і неелектропровідних, у тому числі важкооброблюваних, з підвищеною крихкістю), безконтактно і з високою швидкістю при забезпеченні високої якості і точності, не лише на поверхні, але і всередині обсягу матеріалу, прозорого для лазерного променя.

В процесі лазерного маркування лазерний промінь фокусується на поверхні виробу. В результаті відбувається локальне нагрівання, яке приводить до зміни властивостей матеріалу (наприклад, зміни кольору), плавлення, часткового випаровування.

Безперечними перевагами лазерного маркування є такі:

- *мініатюрність знаку* (ширина лінії знаку становить ~ 10 мкм при розмірах самого знаку до декількох десятків мікрометрів);
- *відсутність механічного впливу на виріб* внаслідок безконтактності методу обробки, що дозволяє маркувати тонкостінні, крихкі деталі, вузли і вироби у збірці;
- *високі точність і якість нанесення знаків*, що гарантує надійність і стабільність їх зчитування фотоелектронними пристроями;
- *висока продуктивність процесу*;
- *довговічність і стійкість до зовнішніх впливів*, наприклад, до механічного навантаження і коливань температури;
- *екологічна чистота*;
- *можливість маркування виробів складної форми*, а також одночасно на зовнішній та внутрішній поверхні виробу;
- *можливість повної автоматизації*.

Для маркування машин застосовують газові (на CO_2) та твердотільні (Nd-YAG-лазери). CO_2 -лазери маркують зі швидкістю до 6000 знаків/хв, вони найбільш придатні для виконання великих обсягів робіт, якщо вимоги точності зображення не є досить жорсткими. Порівняно з CO_2 -лазерами лазери, що використовують неодим, дозволяють більш зручну адаптацію до зміни форми виробу і шрифтів, а також забезпечують високу точність зображення. Перспективними (насамперед, для виробів складної форми) є також волоконні лазери.

Лазерні маркувальні системи мають комп'ютерне регулювання з використанням програм, які дозволяють оператору змінювати програмні установки під час роботи. Швидкість роботи лазерної лінії може складати до 1000 мм/с.

Типові приклади використання маркувальної технології з використанням лазера у машинобудуванні та інших галузях:

- виливки, підшипники, фланці, вали, труби, балони, арматура, деталі автомобілів або літаків;
- інструмент (у тому числі, різальний) та прилади;
- градування на склі оптичних прецизійних приладів, маркування скляної тари;
- маркування пластикової упаковки;
- нанесення логотипів, штрих-кодів на товарах різного призначення;
- друк літер і цифр на комп'ютерних клавіатурах, дисплеях мобільних телефонів та інше.

Деякі вироби з лазерним маркуванням наведено на рис. 9.4.



Рисунок 9.4 – Приклади лазерного маркування

Питання для самоперевірки

1. Назвіть основні напрямки використання лазерного випромінювання для інтенсифікації механічної обробки.
2. Який механізм дії попереднього лазерного нагрівання матеріалу при обробці різанням та його переваги порівняно з традиційними методами?
3. Яке призначення та принцип реалізації лазерного подрібнення стружки під час свердління?
4. Як здійснюється динамічне балансування деталей за допомогою лазера?
5. Надайте характеристику лазерного поверхневого очищення виробів та основних сфер його застосування.
6. Які переваги має лазерна технологія під час промислового маркування виробів?
7. Назвіть типові приклади використання маркувальної технології з використанням лазера у машинобудуванні та інших галузях.

10. ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ У КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ В МАШИНОБУДУВАННІ

10.1. Лазерні прилади

Винахід і створення різноманітних видів лазерів відкрило нові можливості для метрології в багатьох аспектах: у еталоніруванні часу і частоти, в підвищенні точності вимірювання довжини, швидкості, у створенні нових методів нанесення лінійних шкал. Задяки лазерному випромінюванню з'явилися принципово нові засоби вимірювання багатьох величин та параметрів.

Сучасна концепція метрологічного забезпечення виробництва передбачає суттєве розширення масштабів використання засобів вимірювання і контролю в процесі виготовлення виробів. Високий ступінь автоматизації, зростаючі вимоги до якості продукції зумовили те, що контрольно-вимірювальні операції, які раніше розглядались як необхідні, але допоміжні роботи, сьогодні є одними з основних. Їх частка складає більше 40 % трудомісткості робіт з виготовлення виробу.

Однією з тенденцій розвитку і вдосконалення метрологічного забезпечення у сучасному промисловому виробництві є створення *безконтактного вимірювального обладнання з використанням лазерного випромінювання*.

За допомогою лазерних систем надійно вирішуються завдання ідентифікації і пошуку дефектів виробу, контролю його геометричних розмірів і форми, точності та якості складання, а також відхилення цих і інших параметрів від допустимого значення.

Сфери використання лазерних приладів, що мають як джерело світла лазер, все більше поширюються. Це пояснюється їх вагомими перевагами порівняно з іншими традиційними приладами з джерелами світла. Лазери створюють випромінювання найбільшої інтенсивності, забезпечують високу точність вимірювання. Лазерні прилади є швидкодіючими засобами, вони зручні та надійні в роботі. За допомогою лазерів може здійснюватись безперервний контроль розмірів деталі в процесі обробки, в тому числі у важкодоступних місцях деталі, а також коли доступ до об'єкта вимірювання ускладнений.

Лазерні вимірювальні засоби дозволяють проведення прецизійних та унікальних лабораторних досліджень, забезпечують здійснення виробничих вимірювань та випробувань, дають можливість організувати кліматичний та екологічний контроль зовнішнього середовища. Лазерне випромінювання також використовується для періодичної повірки засобів вимірювання та вузлів позиціонування.

У лазерних приладах ефективно використовують такі властивості лазерного променя як вузька спрямованість, невеликий кут розходження, незначний переріз променя, визначений вузькосмуговий частотний спектр, висока монохроматичність, велика потужність, значна дальність дії та інші. Додаткові технічні засоби забезпечують безперервний та імпульсний режими роботи лазерів залежно від призначення вимірювань.

Методи лазерних вимірювань базуються на фізичних (оптичних) ефектах взаємодії лазерного випромінювання та об'єкта (середовища), див. п. 2.1. Активно використовуються явища відбивання та пропускання світла. У багатьох вимірюваннях проявляється також інтерференція. При вимірюванні об'єктів з незначними розмірами успішно використовується дифракція.

При виготовленні деталей механічною обробкою найбільш поширеними видами прецизійних вимірювань є вимірювання розмірів і форми, вимірювання товщини, об'єму, контроль положення об'єкта.

Серед лазерних приладів, які використовують у машинобудуванні, – лазерні мікрометри, лазерні інтерферометри, лазерні профілометри, пірометри, дефектоскопи і т. д. Наведені приклади вимірювального обладнання базуються переважно на використанні діодних лазерів.

Наприклад, *лазерний мікрометр* є універсальним інструментом для вимірювання лінійних розмірів; він являє собою настільну безконтактну вимірювальну систему, яка використовує високошвидкісний скануючий лазерний промінь для точного вимірювання деталей. Даний прилад призначений для вимірювання лінійної довжини, ширини, товщини, діаметра, проміжку в об'єктах технологічного типу, для контролю положення.

Лазерний мікрометр застосовується для вимірювання об'єктів, які складно або неможливо виміряти традиційним інструментом, такі як електричні компоненти або м'які матеріали, які можуть деформуватися при механічному контакті. Прилад є досить поширеним для вимірювання калі-

брів. Різні модифікації подібних приладів мають досить широкий діапазон вимірювання – від 5 мкм до 160 мм, високу та надвисоку точність ($\pm 0,3 \dots 20$ мкм), незначну похибку позиціонування. Основні елементи конструкції лазерного мікрометра та зовнішній вигляд його моделей наведено на рис. 10.1.

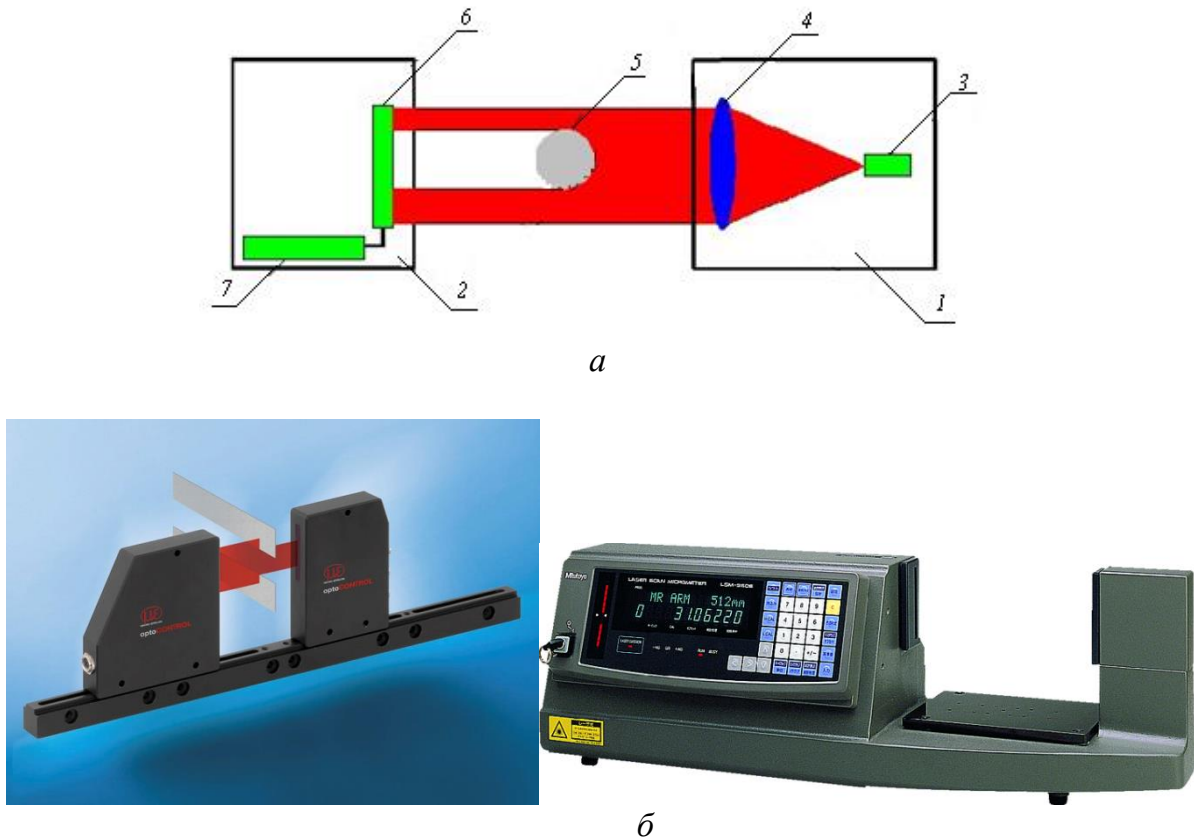


Рисунок 10.1 – Принцип конструкції лазерного мікрометра (а) та деякі з його моделей (б):

- 1 – випромінювач; 2 – приймач; 3 – напівпровідниковий лазер;
4 – об'єктив; 5 – вимірювальний об'єкт; 6 – ПЗЗ-фотоприймач зі скануючою лінійкою; 7 – процесор для розрахунку границь

У багатьох моделях лазерних мікрометрів застосовують тіньовий принцип дії. Лазер індукує випромінювання, яке колімується за допомогою об'єктива, тобто створюється тонкий паралельний потік випромінювання за допомогою щілин (див. рис. 10.1, а). Коли в область між випромінювачем і приймачем поміщують об'єкт, він виявляється в області колімованого променя. В результаті цього утворюється тіньове зображення. Воно сканується за допомогою лінійки ПЗЗ-фотоприймача. Саме розташування ті-

ньової границі бере в розрахунок процесор, який визначає розмір. Зчитування даних здійснюється в автоматичному режимі.

Лазерна інтерферометрія – галузь вимірювальної техніки, що інтенсивно розвивається та має широку сферу застосувань як в науковому плані, так і в промислових технологіях.

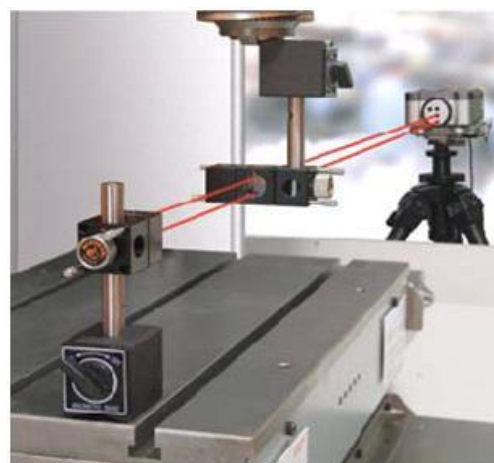
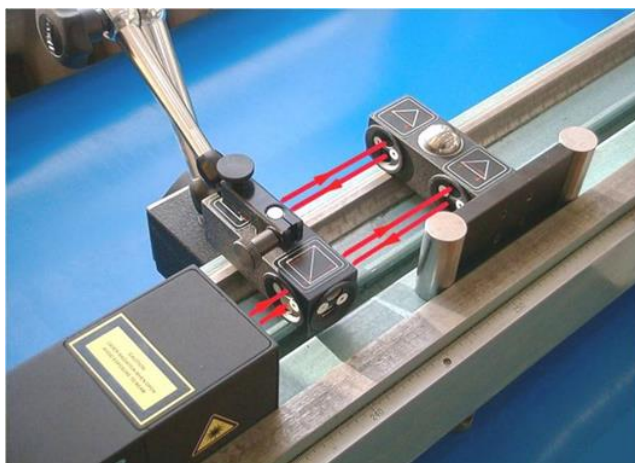
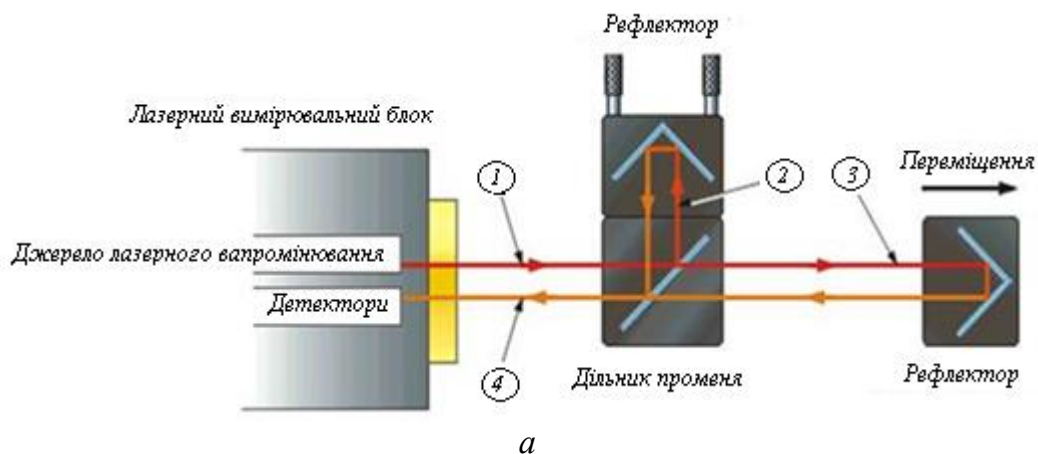
Інтерферометри переміщень і напрямків, призначені для вимірювання довжини і положення об'єктів, були відомі в долазерний період. Принцип дії інтерферометра полягає в наступному: пучок електромагнітного випромінювання за допомогою спеціального пристрою просторово розділяється на два або більшу кількість когерентних пучків. Кожен з пучків проходить різні оптичні шляхи і направляється на екран, створюючи інтерференційну картину, за якою можна встановити різницю фаз інтерферуючих пучків в даній точці картини, яка, в свою чергу, корелює з геометричними характеристиками та іншими параметрами об'єкта.

Лазери істотно покращили метрологічні характеристики інтерферометрів і значно розширили сферу їх застосувань. Лазерні інтерферометри використовуються для високоточного автоматизованого контролю параметрів руху, механічних коливань, ударів, динамічних деформацій, а також для неруйнівного контролю матеріалів і виробів, для контролю механічних і теплофізичних властивостей, точності форми і розташування поверхонь і т. д.

У верстатних системах лазерні інтерферометри використовуються за двома основними напрямками: для контролю точності позиціонування робочих органів верстатів з ЧПУ і гнучкими виробничими модулями (ГВМ) при випробуваннях і в процесі експлуатації, а також як датчики зворотного зв'язку сліdkуючого приводу подач в системах управління прецизійних автоматизованих верстатів і координатно-вимірювальних машин.

Лазерні інтерферометри мають межі вимірювань переміщення від 0 до 60 м. Дискретність відліку приладів складає 0,001 ... 0,3 мкм, відносна похибка вимірювань – 10^{-7} . За діапазоном і точністю вони перевершують всю гаму вимірювальних приладів машинобудування і приладобудування. Перспективність лазерної інтерферометрії характеризується ще й тим, що висока інтенсивність випромінювання лазера дозволяє створювати оптичні системи, на роботу яких не впливають вібрації, шум, зовнішнє освітлення і навіть деяка запиленість повітря.

Конструктивно сучасні лазерні інтерферометри складаються з двох основних блоків: оптичного блока (інтерферометр з лазерним, наприклад, з гелій-неоновим випромінювачем) і електронного блоку (обчислювального пристрою) реєстрації та обробки результатів вимірювання (рис. 10.2).



б

Рисунок 10.2 – Схема лазерного інтерферометра (а)
та вимірвальні системи на базі лазерного інтерферометра (б)

Лазерний промінь 1 (див. рис. 10.2, а), що генерується лазером, розкладається світлоділником на два промені рівної інтенсивності, один з яких (2) створює спільно з нерухомо закріпленим дзеркалом опорну гілку інтерферометра. Другий промінь (3) направляється на рухоме дзеркало, утворюючи вимірвальну гілку. Відбиті від дзеркал промені змішуються у світлоділнику, в результаті чого формується сигнал 4, інтенсивність якого періодично змінюється і складається з окремих смуг підвищеної і зни-

женої інтенсивності (інтерференційна картина). Далі фотоприймач (детектор) перетворює число смуг в електричні імпульси, що відображають переміщення об'єкта (наприклад, робочого органу верстата) і можуть бути використані як сигнали зворотного зв'язку в системі управління або в системі контролю об'єктів.

За допомогою модифікованого лазерного інтерферометра можна вимірювати швидкість переміщення об'єкта. В ряді випадків, наприклад, при безконтактному контролі швидкості гарячої прокатки, такі системи виявляються найбільш ефективними.

На базі лазерного інтерферометра створено також вимірювач кутових швидкостей і переміщень в просторі – *лазерний гіроскоп*.

Лазерне випромінювання використовується також в різних типах обладнання з метою візування. Використовуючи малу розбіжність лазерного променя в поєднанні з його високою інтенсивністю, можна створити досить прості прилади для орієнтування різних об'єктів за променем. На аналогічному принципі побудований прилад для нівелювання напрямних великогабаритних верстатів. В діапазоні кількох десятків метрів забезпечується точність до 2 мм на 1 м.

Досить поширеними у машинобудуванні є також *лазерні пірометри* (рис. 10.3, а).



Рисунок 10.3 – Лазерний пірометр (а) та лазерний профілометр (б)

Принцип дії пірометрів заснований на вимірюванні потужності теплового випромінювання об'єкта переважно в діапазонах інфрачервоного випромінювання і видимого світла. В лазерних пірометрах випромінювання лазера (діодного) використовується як високоточний цілепоказчик.

Подібні прилади дозволяють безконтактно вимірювати температури об'єктів (заготовок, деталей, інструментів) безпосередньо в ході технологічних процесів (у тому числі, в процесах різання). Узагальнені характеристики лазерних пірометрів: діапазон вимірювання – від -50 до $+3000$ $^{\circ}\text{C}$, точність – $\pm 0,5 \dots 1,5$ %, роздільна здатність $0,1$ $^{\circ}\text{C}$, час відгуку ≤ 1 с.

Лазерні пірометри компактні і зручні в роботі. Їх перевагами є також можливість вимірювання температури на віддаленому, важкодоступному об'єкті; об'єкті, що рухається або є небезпечним для контакту; експрес-моніторинг в разі швидкої зміни температури поверхні.

У лазерних профілометрах, рис. 10.3, б, лазерний промінь використовується як оптичний зонд для безконтактного оцінювання мікротопографії обробленої поверхні та визначення основних параметрів шорсткості. Перевагами приладу є висока та надвисока точність; відсутність пошкодження поверхні (на відміну від щупових контактних приладів); можливість автоматичного калібрування діапазону вимірюваних висот мікронерівностей (завдяки тому, що вони вимірюються в одиницях відомої довжини хвилі випромінювання); вищі значення роздільної здатності та інше. Розроблено різні за принциповою схемою різновиди приладів (у тому числі лазерні скануючі 3D мікроскопи), які залежно від довжини хвилі випромінювання λ дозволяють вимірювання мінімальної висоти нерівностей поверхні до $0,5$ нм.

Прилади використовують для контролю шорсткості поверхні відповідальних виробів, у тому числі складної форми, з високими вимогами до якості поверхні; тонколистового матеріалу, наприклад, прокату; функціонально-захисних покриттів, поверхні колісних пар; виробів мікроелектроніки та інше.

10.2. Лазерні трекери та сканери

За своєю суттю *лазерні трекери* являють собою високотехнологічні мобільні портативні координатно-вимірювальні машини (рис. 10.4), в основі яких лежить принцип стеження за спеціальним відбивачем за допомогою променя лазера. Трекери дозволяють здійснювати точні вимірювання об'єктів складних геометричних форм, у тому числі великогабаритних, на

великих відстанях, а також контролювати складання та установлення великогабаритних конструкцій. Цей тип обладнання також використовується для створення прототипів виробів, оптимізації процесів та інших задач.

Трекери мають можливість працювати в складних виробничих умовах – як в приміщеннях, так і на відкритому повітрі, в широкому діапазоні температур, в умовах підвищеної вологості та забрудненості повітря.



Рисунок 10.4 – Загальний вигляд лазерних трекерів різних виробників

Лазерні трекери дозволяють з високою точністю вимірювати геометричні стандарти (точки, кола, площини, конуси, циліндри і т. д.), відстані, кути, відхилення форм, взаємне розташування об'єктів; виконувати контроль криволінійних поверхонь методом порівняння з *CAD* моделлю; контролювати лінійно-кутові розміри між виміряними елементами і проводити аналіз їх взаємного розташування (непаралельність, неплоскостність і т. д.).

Похибка цих приладів на дистанціях ~ 1 м складає 5 ... 15 мкм, на дистанціях ~ 10 м – 100 мкм; похибка кутових вимірювань не перевищує 10". Робоча зона трекерів – 1 ... 320 м.

Принцип дії лазерного трекера полягає у вимірюванні двох кутів (горизонтального α та вертикального β) і відстані d (рис. 10.5). Трекер посилає лазерний промінь до відбивача (рефлектора), який наводиться до зіткнення з поверхнею вимірюваного об'єкта. Промінь, відбитий від цілі, повертається тим же шляхом і приймається трекером в тій самій точці, звідки

він був випущений. Частина відбитого світла надходить до вимірювача відстаней (наприклад, датчика-інтерферометра), який обчислює відстань від трекера до рефлектора. Кути вимірюються за допомогою кутових енкoderів – датчиків, вбудованих в трекер.

З урахуванням двох кутів і відстані обчислюються поточні просторові координати відбивача (наприклад, X , Y , Z). Координати можна отримувати як в статичному режимі, так і в динаміці.

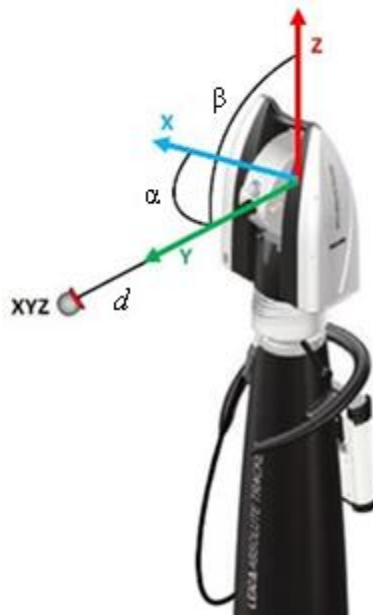


Рисунок 10.5 – Принцип вимірювань лазерним трекером

Однією з характерних ознак трекера є автоматичне управління кутовими координатами лазерного випромінювання. Трекер направляє промінь в потрібному напрямку за допомогою повороту механічних осей. Програмне забезпечення визначає координати центра елемента, його дійсні геометричні розміри і відхилення форми.

Для вимірювання криволінійних поверхонь деталей існує можливість імпорту *CAD* моделей в програмне забезпечення для контролю методом порівняння з розробленою *CAD* моделлю.

Лазерні трекери використовують для контролю таких великогабаритних деталей, як фюзеляжі і крила літаків, корпуси суден і вагонів, кузови автомобілів, станини верстатів і пресів, а також при калібруванні верстатів,

промислових роботів і координатно-вимірвальних машин, з метою контролю металорізальних інструментів і штампів, для контролю робочих коліс турбін та в інших сферах машинобудування.

Обладнання, як правило, має додаткові зонди, за допомогою яких можливе вимірювання прихованих недоступних точок конструкцій або в глибоких важкодоступних місцях, де неможливе використання стандартних відбивачів.

Функції лазерних трекерів та здатність проводити складні вимірвальні маніпуляції значно розширюються за допомогою *лазерних сканерів*, які використовують в комплекті з трекерами (рис. 10.6).

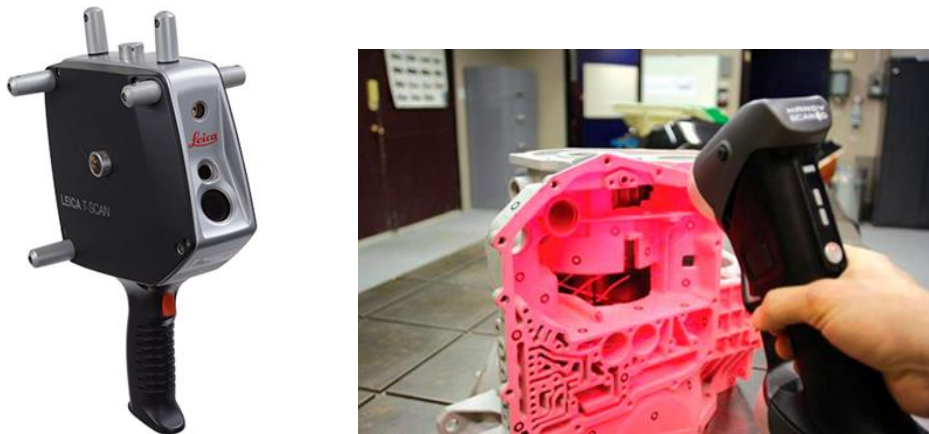


Рисунок 10.6 – Лазерний сканер

Лазерне 3D сканування у промисловій метрології використовується для контролю розмірів або геометричних складних форм з подальшим порівнянням результатів з номінальними значеннями (наприклад, при вибіркового контролю та аналізі для автоматизованої підготовки виробництва), а також для зворотного проектування (реверсного інжинірингу), тобто побудови *CAD* моделі виробу за наявним реальним зразком.

Діапазон вимірювань лазерного сканера – 1,5 ... 2 5 м (залежно від типу лазерного трекера). Швидкість сканування – 20 000 ... 90 000 точок за секунду. Точність – 0,028 ... 0,035 мм. Щільність сканування може бути заданою користувачем від 0,5 до 1000 мм при заданій відстані до об'єкта вимірювання.

Сучасні моделі лазерного трекара можуть також працювати в режимі сканера, тобто мають вбудовані функції сканування – так звані скануючі трекари (рис. 10.7).

Лазерні трекари з функцією сканування можуть виконувати пряме сканування та контроль геометрії великогабаритних деталей; вони зручні для проведення оцифровування об'єктів, які незручно або неможливо вимірювати за допомогою ручних сканерів; можуть бути використаними для складання та контролю обладнання у машинобудуванні, в енергетичній, будівельній, металургійній та інших галузях.

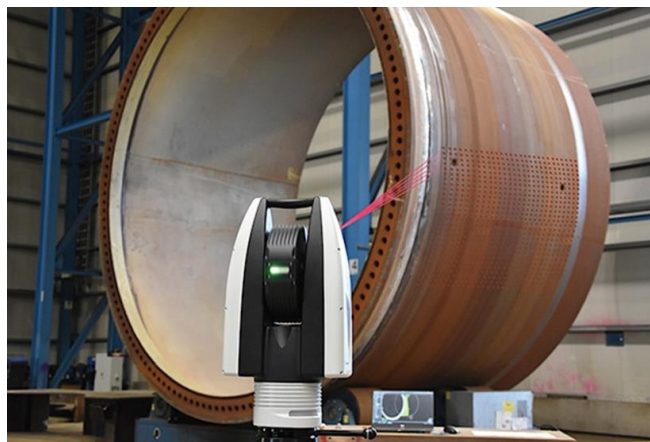


Рисунок 10.7 – Скануючий лазерний трекер в процесі вимірювання

Питання для самоперевірки

1. Яка роль та функції лазерних приладів у метрологічному забезпеченні сучасного промислового виробництва?
2. Який принцип дії лазерних мікрометрів та в яких випадках вони використовуються?
3. Що являє собою лазерна інтерферометрія?
4. Назвіть основні метрологічні показники лазерних інтерферометрів.
5. Опишіть принцип дії лазерних пірометрів та їх основні метрологічні характеристики.
6. Які переваги мають лазерні профілометри порівняно з традиційними?

7. Які можливості в процесах точного вимірювання має лазерний трекер?
8. Як працює лазерний трекер та яка точність вимірювання досягається за його допомогою?
9. Яке призначення лазерного 3D сканування у промисловій метрології?
10. Що являють собою скануючі трекери?

11. ЛАЗЕРНІ АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Аддитивні технології (АТ), або технології пошарового синтезу, є одним з найбільш перспективних напрямків розвитку «цифрового» виробництва. Дані технології дозволяють істотно прискорити НДДКР і рішення задач підготовки виробництва, а також активно застосовуються для виробництва готової продукції в багатьох галузях, в тому числі у машинобудуванні.

Існує велика різноманітність технологій, які можна назвати аддитивними. Їх об'єднує створення виробу не відділенням «зайвого» матеріалу від заготовки (як в традиційних «від'ємних» технологіях), а пошаровим або локальним «нарощуванням» шляхом додавання матеріалу.

Образ виробу задається аналітично, кресленням, файлами комп'ютерних томографів або цифровими фотографіями. На цій основі створюється тривимірна математична модель конструкції об'єкта, яка оптимізується, а потім пошаровим нарощуванням різними способами матеріалізується, тобто створюється фізичний об'єкт.

Ідеологія адитивного формоутворення об'єкта (моделі, прототипу або кінцевого виробу) базується на комп'ютерному автоматизованому 3D CAD проектуванні; комп'ютерній візуалізації; комп'ютерній оптимізації конструкції об'єкта виходячи з вимог дизайну, форми, функціональних властивостей; трансформації трикоординатної моделі в сукупність двовимірних пошарових моделей; можливості відтворення цієї сукупності пошарових моделей, тобто матеріалізації моделі як єдиного цілого, як фізичного твердотілого виробу або його прототипу.

Інтенсивний розвиток технологій пошарового виготовлення тривимірних об'єктів практично будь-якого ступеня складності багато в чому зобов'язаний успіхам, досягнутим в розробці та освоєнні лазерних технологій обробки матеріалів та лазерної техніки. Лазерне випромінювання використовується, як правило, на стадії матеріалізації 3D моделей. У різних методах адитивних технологій залежно від вихідних матеріалів, параметрів лазерного випромінювання та кінцевої мети конкретної АТ можлива реалізація різних видів взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом і відповідно різних фізико-хімічних процесів. Подібними процесами можуть бути лазерна фотополімеризація (SLA, PolyJet), лазерне

спікання порошкових середовищ (*SLS*, *SLM* та інші), лазерне різання (*LOM*) і т. д.

Найбільш поширеними методами адитивних технологій, в яких використовуються різні види впливу лазерного випромінювання на матеріал на стадії матеріалізації 3D моделі, є такі.

- *SLA (Stereolithography)* – технологія стереолітографії, яка базується на створенні тривимірних об'єктів пошаровою полімеризацією (затвердінням) рідких фотополімерних матеріалів при впливі на них ультрафіолетового випромінювання або випромінювання видимої частини спектра (рис. 11.1, а).

Основою лазерної стереолітографії є локальна зміна фазового складу однорідного середовища (перехід рідина – тверде тіло) в результаті ініційованої лазером в даному об'ємі реакції фотополімеризації.

Як вихідні матеріали в *SLA* використовують рідкі композиції, схильні до фотополімеризації (КФП), які, як правило, є багатокомпонентними системами, що складаються із зв'язуючого, світлочутливих сполук реактопластів, переважно, складів на основі епоксидних смол, а також добавок (фотоініціаторів, наповнювачів, барвників), які забезпечують необхідні властивості як композиції, так і полімерного матеріалу, отриманого на основі КФП, кінцевого виробу в цілому.

Фокусування лазерного променя відбувається на поверхні КФП, проте з урахуванням напівпрозорості речовини лазерний промінь проникає на певну глибину h , забезпечуючи його полімеризацію.

Під дією лазерного випромінювання в рідкому реакційноздатному середовищі (фотополімерній композиції) створюються активні центри (радикали, іони, активовані комплекси), які, взаємодіючи з молекулами мономера, ініціюють зростання полімерних ланцюгів, що веде до фазової зміни опроміненого середовища, тобто затвердіння шару. Завдяки тому, що активовані центри виникають тільки в опроміненому об'ємі, досягається просторова селективність фотоініційованої полімеризації.

Процес виготовлення виробів методом стереолітографії (*SLA*) реалізується таким чином (див. 11.1, а).

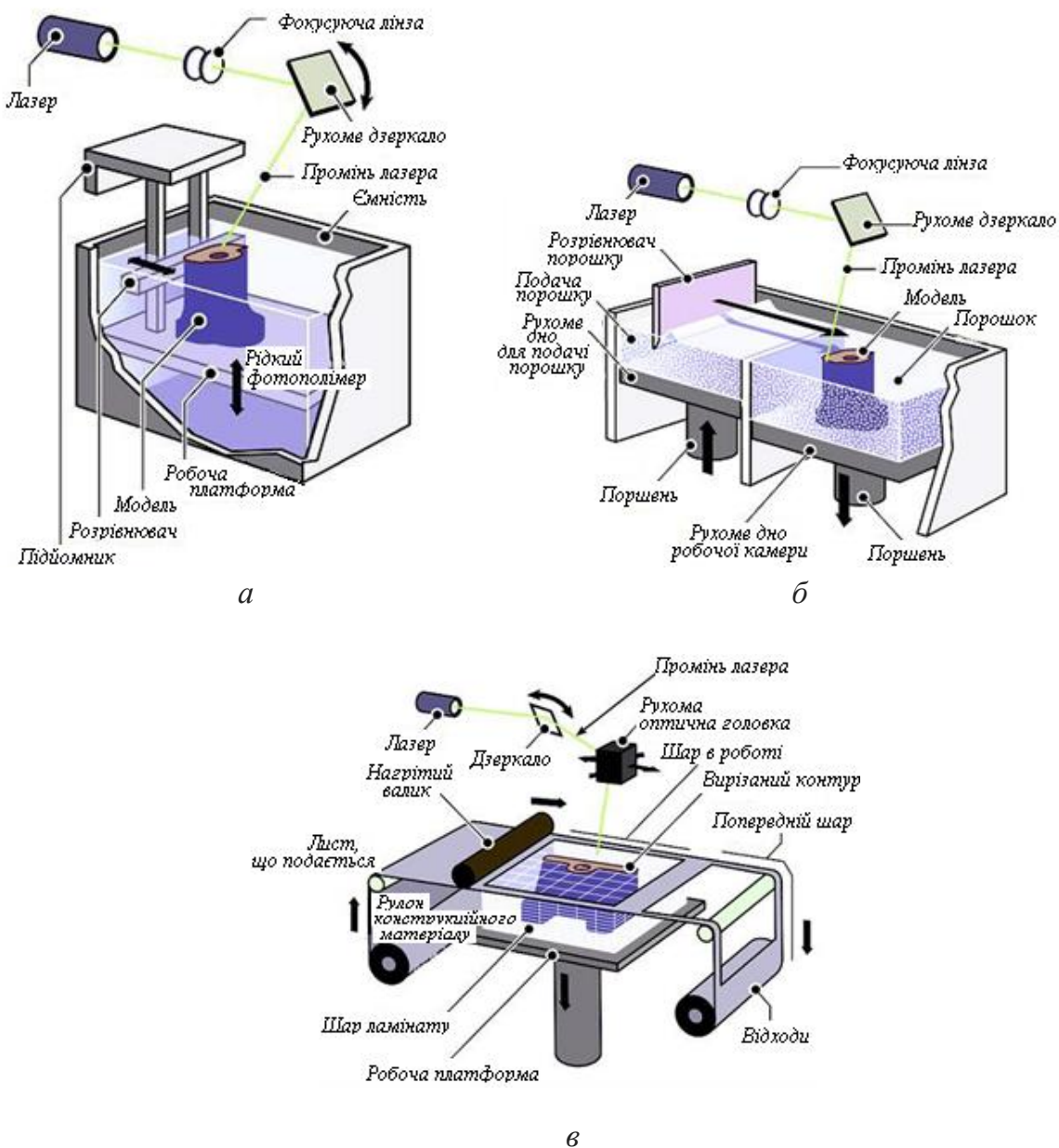


Рисунок 11.1 – Принципова схема SLA (а), SLS (б) та LOM (в) – устат

Композиція, схильна до фотополімеризації, заливається в ванну. На глибині одного шару (0,025 ... 0,20 мм на машинах різного типу) нижче поверхні рідкого полімера розташовується рухома платформа, здатна переміщатися у вертикальному напрямку. За допомогою дзеркала промінь лазера сканує шар полімера над платформою, що призводить до його затвердіння за формою відповідного поперечного перерізу. Далі платформа опускається на глибину одного шару і процес повторюється доти, поки об'єкт повністю не побудується.

Найчастіше в *SLA* використовують випромінювання лазера з довжиною хвилі λ в ближній і середній УФ-області спектра для забезпечення енергії впливу, необхідної для реалізації процесу полімеризації з достатньою швидкістю. Наприклад, у багатьох уставах *SLA* джерелом випромінювання є твердотільний ванадатовий лазер з активним елементом на основі Nd: YVO₄ з діодним накачуванням ($\lambda = 0,355$ мкм, УФ-зона).

Час, необхідний для полімеризації, залежить від спектральних характеристик вихідної речовини, параметрів лазерного променя (довжини хвилі λ , потужності P , діаметра d) і швидкості його переміщення за поверхнею вихідної композиції (швидкості сканування V).

Утворені між полімеризованими шарами *SLA*-об'єкта хімічні зв'язки дозволяють отримувати щільні, водо- і повітронепроникні вироби, які є ізотропними і мають рівну міцність в усіх напрямках.

Використовуючи різні види опромінення (безперервне, імпульсне), можна отримати на поверхні полімерну плівку (площину), лінію або точку; ці елементи використовуються для формування фізичної копії тривимірних об'єктів за їх комп'ютерною моделлю.

Різноманіття властивостей робить фотополімеризовані матеріали та вироби з них по-справжньому універсальними. Фотополімерні моделі можуть мати різний колір, бути еластичними і жорсткими, матовими і прозорими, композитними, термостійкими, біосумісними, мати багато інших характеристик і відповідати параметрам інженерних пластиків.

Ці матеріали достатньо технологічні і можуть піддаватися різним технологіям постобробки – склеюванню, шліфуванню, фарбуванню і т. д.

Галузі застосування *SLA*-виробів досить різноманітні – від машинобудування, у тому числі автомобілебудування, авіабудування до медичних застосувань, археології, ювелірної промисловості і т. д. Переважно отримують моделі, наприклад, випалювані (газифіковані) моделі в прогресивних технологіях точного лиття, постійні моделі для лиття в піщано-глинисті форми, випробувальні аеродинамічні моделі (рис. 11.2), а також елементи ливарного оснащення та інше. Можливе виробництво малих серій товарної продукції.



а



б



в

Рисунок 11.2 – Моделі авто- і авіакомпонентів, отримані *SLA*-технологією з фотополімерів, та готові металеві вироби:

а – модель кришки двигуна; *б* – модель решітки радіатора;
в – готовий вузол і фотополімерна модель для авіабудування

• Однією з найбільш перспективних адитивних технологій, заснованих на використанні лазера, є *технологія виборчого пошарового спікання порошкової маси* в результаті теплового впливу лазерного випромінювання (рис. 11.1, *б*).

Метод реалізується в такий спосіб. Пристрій для нанесення і вирівнювання шару порошку знімає шар порошку з живильника і рівномірним шаром розподіляє його по поверхні підкладки (див. рис. 11.1, *б*). Лазерний промінь сканує поверхню даного шару порошку і шляхом спікання (оплавлення) формує виріб. По закінченню сканування порошкового шару платформа з виготовлюваним виробом опускається на товщину шару, а платформа з порошком піднімається; процес нанесення шару порошку і скану-

вання повторюється. Після завершення процесу платформа з виробом піднімається і очищається від невикористаного порошку.

Окрім основних переваг – можливості створення реальних повнофункціональних виробів, економічності внаслідок відсутності спеціальних підтримок при побудові виробу, досить високі рейтинги цієї технології на ринку адитивних систем в значній мірі зумовлені також можливістю використання широкого спектру відносно дешевих, доступних і нетоксичних матеріалів в дисперсному стані – полімерів, кераміки, металів і сплавів, композитів.

Даний метод дозволяє швидко виготовити вироби складної форми (включаючи внутрішні порожнини) безпосередньо за комп'ютерною геометричною моделлю без використання прес-інструменту.

Ще однією привабливою стороною лазерного спікання є можливість з'єднання матеріалів і композицій, що мають різну природу хімічного зв'язку. Існує також можливість задавати градієнт властивостей за перерізом виробу внаслідок зміни хімічного складу, розміру зерен і пор. Таким чином, лазерне спікання порошків є ефективною технологією в області створення функціональних градієнтних матеріалів для різних сфер застосування.

Потрапляючи на тонкий шар порошку, лазерний промінь спікає його частинки і формує тверду однорідну масу відповідно до геометрії деталі. Лазерне спікання порошкових металевих і неметалевих матеріалів полягає в нагріванні локальних ділянок поверхні до температур вище критичних, що приводить до схоплювання між собою частинок порошкового матеріалу, з наступним охолодженням з досить високою швидкістю.

У даному випадку (на відміну від *SLA*-технології) лазерний промінь є не джерелом світла, а джерелом тепла. Як джерело тепла лазер має ряд переваг: чистоту, здатність генерувати високу температуру, забезпечувати локальність нагрівання, можливість контролювати газове середовище. Це може служити і для захисту матеріалу від окиснення, і для проведення хімічних реакцій на поверхні матеріалу.

Методи лазерного адитивного виробництва, засновані на селективному пошаровому спіканні порошкового середовища, за особливостями процесу ущільнення матеріалу умовно поділяють на такі види: *селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering – SLS), непряме лазерне спікання*

металів (*Indirect Metal Laser Sintering – IMLS*), пряме лазерне спікання металів (*Direct Metal Laser Sintering – DMLS*), а також селективне лазерне плавлення (*Selective Laser Melting – SLM*).

У першому варіанті ущільнення шару порошку відбувається за рахунок твердофазного спікання. У другому – за рахунок просочення зв'язкою пористого каркаса, раніше сформованого лазерним випромінюванням. В основі прямого лазерного спікання металів лежить ущільнення за механізмом рідиннофазного спікання за рахунок плавлення легкоплавкого компонента в порошковій суміші. В останньому варіанті ущільнення відбувається за рахунок повного плавлення і розтікання розплаву.

Реалізація традиційного механізму твердофазного спікання (технологія *SLS*) при нагріванні порошку до температури нижче температури плавлення основного компонента переважно для здійснення механізму дифузії атомів не отримала значного поширення, оскільки для більш повного протікання об'ємної і поверхневої дифузії, в'язкої течії та інших процесів, що мають місце при спіканні порошку, потрібна відносно тривала витримка під лазерним випромінюванням. Це призводить до тривалої роботи лазера і низької продуктивності процесу. Крім того, вироби, отримані *SLS*, мають пористу структуру (пористість $> 20\%$), що вимагає подальшої обробки (постообробки) для зниження пористості та поліпшення механічних властивостей.

Тому більш перспективною в цьому сенсі є технологія з використанням механізму рідиннофазного спікання (*SLM*), коли нагріті лазерним випромінюванням матеріали досягають рідкої фази в процесі плавлення. При цьому відпадає необхідність у застосуванні спеціальних легкоплавких компонентів, можливе повне переплавлення вихідного дисперсного металевих матеріалу. Дана технологія дає можливість виготовити практично повністю щільні вироби, з високими механічними властивостями завдяки дрібнокристалічній структурі.

Аналогічно *SLA*, однією з основних частин в установках селективного лазерного спікання (плавлення) є лазерна система, в якій використовуються різні типи лазерів – твердотільні (з активним елементом з алюмоітрієвого граната *Nd:YAG*), волоконні (ітербієві), газові CO_2 -лазери і т. д.

Вибір лазера залежить від властивостей матеріалу порошкового середовища, перш за все, поглинальної здатності стосовно лазерного випро-

мінювання. Більш висока поглинальна здатність дозволяє збільшити глибину проплавлення і в більш широких межах варіювати параметри процесу.

Так, використання лазерів з довжиною хвилі $\lambda = 1,0 \dots 1,1$ мкм (Nd:YAG лазер, ітербієві волоконні лазери) є переважним для спікання порошків металів, металів і карбідів, що пов'язано з підвищеним поглинанням випромінювання даного діапазону довжин хвиль. Використання CO₂-лазера з довжиною хвилі $\lambda = 10,64$ мкм є найбільш сприятливим для спікання полімерних порошків і порошків оксидної кераміки.

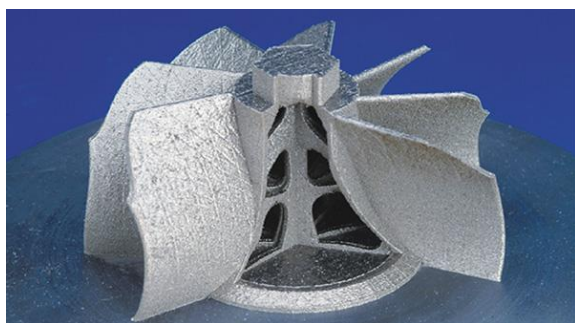
Застосування лазерів, що працюють в імпульсному режимі, дає можливість поліпшити міцність зв'язку між шарами і зменшити зону термічного впливу. Це пояснюється великим значенням енергії імпульсу і його короткою тривалістю (наносекунди). Характеристики використовуваних лазерних систем для технології *SLM*, як правило, знаходяться в межах: потужність лазера – 200 Вт ... 1 кВт, швидкість сканування – до 2 м/с, швидкість позиціонування – до 7 м/с, діаметр плями фокусування – 35 ... 400 мкм.

Деякі приклади застосування технології *SLS (SLM)* наведено на рис. 11.3.

- Досить поширеною аддитивною технологією на базі використання лазерного випромінювання є також технологія виготовлення об'єктів з використанням ламінування *LOM (Laminated Object Manufacturing)*, рис. 11.1, в – пошаровий синтез виробів з листових матеріалів під впливом сфокусованого лазерного променя, тобто лазерне різання і склеювання листових матеріалів. У деяких процесах *LOM*-технології реалізується також лазерне зварювання.

Вихідними матеріалами є термоклейкий папір, пластикова плівка, склотканина, кераміка, металеві листові матеріали та інші.

Технологія *LOM* використовується для виготовлення моделей (наприклад, для лиття в піщано-глинисті форми, лиття за випалюваними моделями), порожнистих форм для отримання виплавлюваних моделей, штампів, прес-форм та інших виробів.



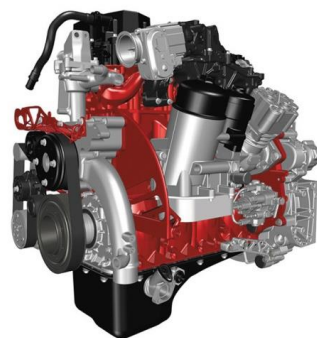
a



б



в



г

Рисунок 11.3 – Вироби авіа-та автомобільної техніки, отримані з використанням *SLM*-технології:

a – крильчатка; *б* – лопатка турбіни; *в* – паливна форсунка;
г – двигун *Renault Trucks*

Технологія пошарового складання з плоских шарів знайшла використання також в області ландшафтного моделювання і створення геопросторових моделей ділянок земної поверхні, а також створення макетів в галузі архітектури та дизайну. Фарбування шарів в процесі друку дозволяє отримувати повнокольорові об'ємні моделі.

Питання для самоперевірки

1. Яку роль відіграють лазерні технології у розвитку та становленні адитивних технологій виготовлення виробів?
2. Які види адитивних технологій з використанням лазерного випромінювання Вам відомі?
3. Які процеси взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом реалізуються в адитивних технологіях?

4. Які функції виконує лазерне випромінювання в технології стереолітографії (SLA)?
5. Які лазери використовують для реалізації технології стереолітографії, за якими ознаками відбувається їх вибір?
6. Яка роль лазерного випромінювання у технології виборчого шарового спікання (плавління) порошкової маси?
7. За якими характеристиками відбувається вибір лазерної техніки в технологіях *SLS (SLM)*?
8. Які типи лазерів використовують в процесах *SLS (SLM)*?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коваленко В. С. Лазерная технология: учеб. – Киев : Вища шк., 1989.
2. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянца. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
3. Мурзин С. П. Лазерные технологии обработки материалов : учеб. пособие / С. П. Мурзин, В. Н. Илюхин. – Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2006.
4. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение : пер. с нем. / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер. – Москва : Техносфера, 2008.
5. Аверьянова И.О. Технология машиностроения. Высокоэнергетические и комбинированные методы обработки : учеб. пособие / И. О. Аверьянова, В. В. Клепиков. – Москва : ФОРУМ, 2008.
6. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок и др.; под ред. А. И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011.
7. Chryssolouris G. Laser Machining: Theory and Practice (Mechanical Engineering Series) / G. Chryssolouris . – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg GmbH, 2013.
8. Бобицький Я. В. Лазерні технології : навч. посібник / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015.
9. LaRoux K. Gillespie. Design for Advanced Manufacturing: Technologies and Processes. – McGraw-Hill Education, 2017.
10. Вейко В. П. Введение в лазерные технологии : опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии» / В. П. Вейко, А. А. Петров, А. А. Самохвалов; под ред. В. П. Вейко. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2018.
11. Григорьянц А. Г. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении : учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров, Р. С. Третьяков; под ред. А. Г. Григорьянца. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018.
12. Жидков И. С. Электрофизические методы обработки материалов : учеб. пособие / И. С. Жидков, А. И. Кухаренко, С. О. Чолах. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. ПРОМЕНЕВІ МЕТОДИ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ РОЛЬ У МАШИНОБУДУВАННІ	5
Питання для самоперевірки	8
2. ОСНОВИ ГЕНЕРАЦІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	10
2.1. Світло як електромагнітні хвилі.....	10
2.2. Основні властивості лазерного випромінювання.....	11
2.3. Загальний принцип дії лазера	12
Питання для самоперевірки	15
3. ЛАЗЕРНА ТЕХНІКА.....	16
3.1. Історія створення лазерів та лазерних технологій	16
3.2. Класифікація лазерів	17
3.3. Основні типи твердотільних лазерів та їх характеристика	18
3.4. Діодні лазери	20
3.5. Волоконні лазери	22
3.6. Газові лазери.....	23
3.7. Рідинні лазери	25
3.8. Перспективні напрямки розвитку лазерної техніки.....	26
3.9. Технологічні лазери. Лазерні технологічні комплекси	28
Питання для самоперевірки	31
4. ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЯК УНІВЕРСАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ	33
4.1. Основні параметри лазерного випромінювання технологічних лазерів.....	33
4.2. Переваги лазерної обробки порівняно з традиційними методами.....	38
4.3. Управління переміщенням лазерного променя	39
4.4. Процеси взаємодії лазерного випромінювання з оброблюваним матеріалом та основні види лазерної обробки	40
4.5. Оброблюваність матеріалів лазерним випромінюванням	43
Питання для самоперевірки	45
5. ЛАЗЕРНЕ РІЗАННЯ	46
5.1. Механізм реалізації та основні переваги лазерного різання порівняно з традиційними методами	46

5.2. Основні параметри режиму лазерного різання і технологічні показники процесу	49
5.3. Типові вироби лазерного різання у машинобудуванні	50
5.4. Обладнання для лазерного різання	53
Питання для самоперевірки	55
6. ЛАЗЕРНЕ ПРОШИВАННЯ ОТВОРІВ	56
6.1. Технологічні особливості процесу	56
6.2. Типові вироби з отворами, отриманими лазерним прошиванням	58
Питання для самоперевірки	61
7. ЛАЗЕРНА ПОВЕРХНЕВА ОБРОБКА	62
7.1. Сутність та види лазерного поверхневого зміцнення	62
7.2. Сфери використання та обладнання лазерної зміцнювальної технології	65
Питання для самоперевірки	66
8. ЛАЗЕРНЕ ЗВАРЮВАННЯ	67
8.1. Основні переваги використання лазерного випромінювання у зварювальному виробництві	67
8.2. Основні види лазерного зварювання	68
8.3. Сфери використання лазерного зварювання	70
Питання для самоперевірки	73
9. ІНШІ СФЕРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У МАШИНОБУДУВАННІ	74
9.1. Інтенсифікація механічної обробки	74
9.2. Динамічне балансування деталей	77
9.3. Поверхневе очищення виробів	79
9.4. Маркування виробів	80
Питання для самоперевірки	83
10. ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ У КОНТРОЛЬНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ В МАШИНОБУДУВАННІ	84
10.1. Лазерні прилади	84
10.2. Лазерні трекери та сканери	90
Питання для самоперевірки	94
11. ЛАЗЕРНІ АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ	96
Питання для самоперевірки	104
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	106

Навчальне видання

ПУПАНЬ Лариса Іванівна

ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ У МАШИНОБУДУВАННІ

Навчальний посібник

для студентів спеціальності «Прикладна механіка»
денної, заочної та дистанційної форм навчання

Роботу до видання рекомендував Олександр Шелковий

Редактор Марія Єфремова

План 2020 р., поз. 56

Підп. до друку 27.11.2020 р. Гарнітура Таймс.

Видавничий центр НТУ «ХП», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво про державну реєстрацію № 5478 від 21.08.2017 р.

Самостійне електронне видання