

#### **4.4 Огляд праць з розробки та використання ручного лазерного інструмента**

Останні десятиліття XX століття для світового зварювального виробництва характеризувалися інтенсивним розвитком і розширенням областей застосування променевих джерел енергії (у першу чергу лазера) для зварювання й обробки конструкційних матеріалів. Висока густина енергії лазерного випромінювання, широкий діапазон її регулювання, можливість передачі енергії на значну відстань від джерела випромінювання забезпечують лазеру високу ефективність й універсальність.

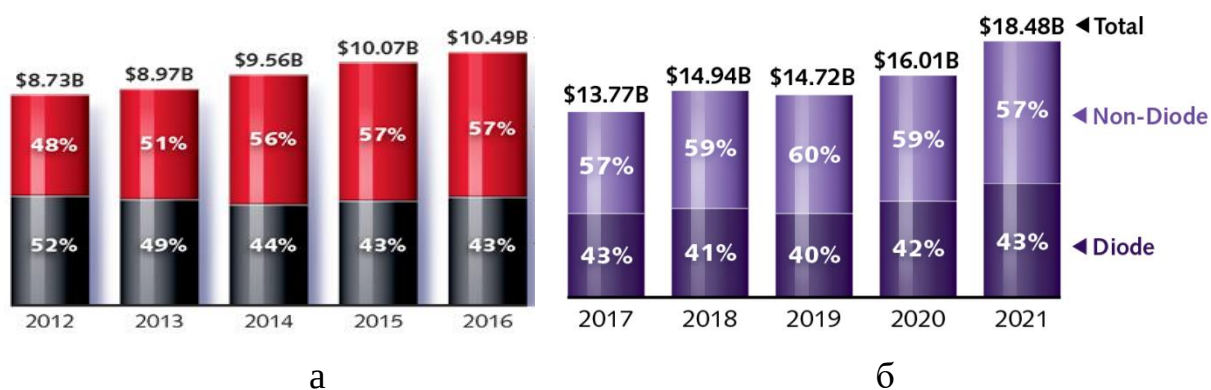
Області застосування лазера найрізноманітніші – від автомобільної індустрії до мікроелектроніки. Лазер як технологічний інструмент ідеально відповідає розвитку автоматизації й збільшенню гнучкості сучасного виробництва. Широке використання променевих технологій, та оптимістичний прогноз для подальшого зростання відсотку їх застосування, підтверджують данні різних джерел.

В даний час у промисловому виробництві домінують волоконні лазери, газові безперервні CO<sub>2</sub>-лазери й твердотільні Nd:YAG (неодим-ітрієві) лазери з ламповим накачуванням. Значно розширюється використання поки ще дорогих, але перспективних Nd:YAG - лазерів з діодним накачуванням, а також потужних діодних лазерів у сполученні з оптоволоконними світловодами [262].

На застосуванні лазерних джерел енергії засновані ефективні технології різання, «свердління» отворів, зварювання, наплавлення, поверхневого легування, термічної обробки й виправлення, нагрівання під формоутворення, гравірування й ін. Одне джерело лазерного випромінювання з оптоволоконним світловодом може забезпечувати послідовне виконання ряду технологічних операцій, наприклад різання, зварювання, термообробки звареного з'єднання й ін.

Як показали маркетингові дослідження фірми «Optechconsalting» [263], високу ефективність лазерних технологій і зростаючі масштаби їхнього

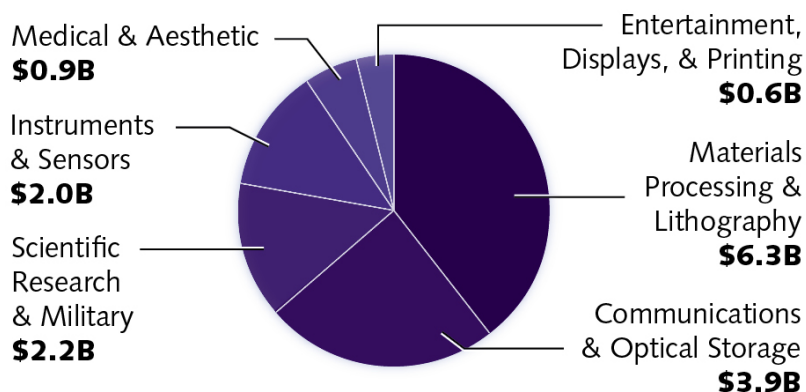
промислового застосування переконливо підтверджує збільшення щорічних продажів лазерних систем і джерел для обробки матеріалів. На мал. 1 представлені дані авторитетного видання «Laser Focus World» [264, 265], що показують зміну ринку лазерів за останні роки.



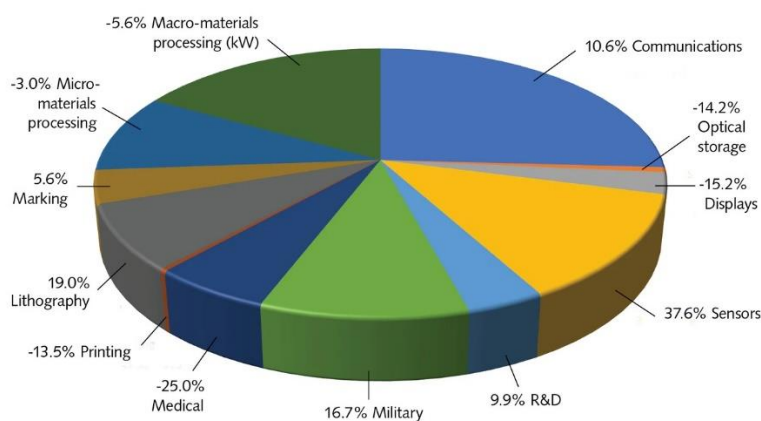
Малюнок 1. Ринок лазерів в 2012 – 2016 рр. (а) [264] і в 2017 – 2021 рр. (б) [265].

Ринок самих лише лазерів, без урахування технологічних та допоміжних систем, маніпуляторів, обладнання тощо, виріс майже вдвічі, і зростав практично весь час (крім 2019 року) постійно і неухильно, незважаючи на наслідки глобальних торгових конфліктів, слабких ділових інвестицій та Коронавірус-2019, які безумовно чинять тиск на світову економіку та підвищують ризик довгострокової стагнації. Що дозволило виробникам лазерів заробити близько 16 мільярдів доларів США у 2020 році (мал. 1, б). Діаграма розподілу продажів лазерів по найбільш затребуваним галузям економіки представлена на мал 2, а [265]. На мал. 2, б [266] наведена діаграма, що показує відсоткове співвідношення розподілу продажів лазерів у 2020 році. Знак «мінус» у різних галузях застосування вказує на спад продажів щодо результатів 2019 року.

## IMPROVEMENT OF SCIENTIFIC APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF ENGINEERING



a



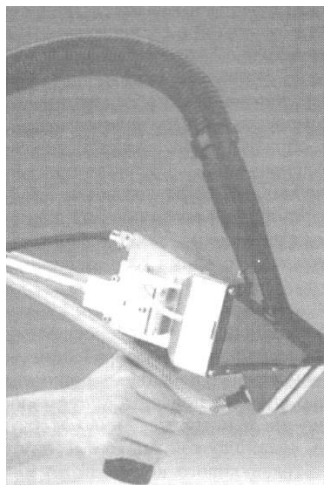
б

Малюнок 2. Діаграми розподілу продажів лазерів по галузям економіки в 2020 році у млрд. дол. США (а) [265] і у відсотках (б) [266].

Останнім часом з'явилося багато публікацій, в яких наведені приклади створення лазерних комплексів та ручного лазерного інструменту. Задачі, які можуть вирішуватися силами такого комплексу відносяться до відновлення деталей транспорту та обладнання, зварювання виробів з тонких сталевих листів. Часто у цих комплексах використовують потужні діодні лазери, оскільки їх ККД становить до 48 – 52 %. Відмітимо, що для підвищення гнучкості транспортування випромінювання його доцільно передавати по оптичному волокну. Такий технічний прийом можна застосувати для Nd:YAG-лазера (довжина хвилі випромінювання  $\lambda=1,06$  мкм). Для підвищення терміну експлуатації Nd:YAG-лазера його накачку здійснюють не лампами, а діодами.

Перша публікація про мобільну лазерну установку з ручним робочим інструментом з'явилася в 1996р. [267]. Фраунхоферівський інститут лазерної

техніки (м. Аахен, Німеччина) розробив мобільну лазерну установку «Clean» (мал. 3).



Малюнок 3. Мобільна лазерна установка для очищення поверхні «Clean» [267].

Лазерне випромінювання даної установки використовується для очищення, зокрема, видалення іржі, окалини, фарби та інших забруднень із металевих і неметалічних поверхонь, у тому числі й зі зварених швів. Дана установка комплектується потужним твердотільним лазером, випромінювання якого по світловоду довжиною до 100 м передається на робочий інструмент, який оператор переміщає вручну. Вбудований у робочий інструмент сканер забезпечує необхідну ширину оброблюваної поверхні. Лазер автоматично відключається в той момент, коли робочу головку відводять від оброблюваної поверхні.

В основі лазерного очищення лежить ефект локального випару поверхневих забруднень. Крім того, ці забруднення віддаляються ударною хвилею, створеною лазерним пучком. Пар, що утворюється, і частки із зони обробки віддаляються за допомогою вбудованої в головку вентиляційної системи оснащеної фільтрами. Для технології лазерного очищення характерні незначні термічне й механічне навантаження на основний метал.

На думку авторів [267], компактна конструкція лазерного інструмента, мобільність установки, можливість переміщення робочої головки по поверхні будь-якої довжини й конфігурації повинні сприяти широкому поширенню нової установки в металообробних галузях виробництва.

На Саксонському машинобудівному підприємстві (м. Цвікау, Німеччина) при співробітництві із Лазерним інститутом Університету прикладних наук Міттвайда (м. Міттвайда, Німеччина) розроблений мобільний апарат з робочим інструментом для ручного лазерного зварювання й обробки (мал. 4) [268, 269].



Малюнок 4. Інструмент для ручного лазерного зварювання й обробки [268].

Його можна комплектувати твердотільним Nd:YAG-лазером або діодним лазером потужністю більше 1 кВт, що зв'язується з ручним робочим інструментом оптоволоконним світловодом. Крім того, у комплект апарата входять блоки живлення й керування лазером, а також система охолодження.

Зазначений робочий інструмент має масу 1,5 кг і переміщується вручну. З його допомогою можна зварювати листи з конструкційної й нержавіючої сталей і титана. Хвильовий спектр діодного лазера особливо зручний для зварювання алюмінію, тому мобільний апарат використовується для зварювання різних сплавів із цього металу, зокрема в автомобілебудуванні.

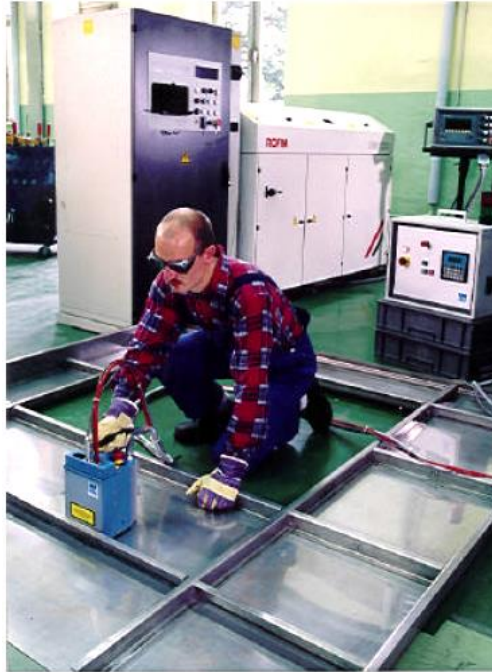
Лазерний ручний робочий інструмент оснащений змінною оптикою, за допомогою якої можна змінювати як фокусну відстань, так і густину його випромінювання на оброблювану поверхню в межах  $(0,2 - 1,0) \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Оптиковолоконний світловод забезпечує рівномірний профіль перетину лазерного пучка, що спрощує технологію зварювання листів встик без оброблення кромek. Лазерним пучком управляє мікроконтролер, що аналізує вихідний сигнал залежно від швидкості переміщення пальника зварником. При зміні швидкості переміщення виробляється коректування потужності лазерного пучка, що сприяє одержанню звареного з'єднання необхідної якості. Для відхилення лазерного пучка всередині головки встановлене дзеркало, за допомогою якого зварник може також вести спостереження за процесом. У конструкцію робочого інструмента входять функціональні вузли генерування лазерного випромінювання та спостереження за процесом зварювання, клавіші керування і запобіжне блокування, розташовані на рукоятці. Зварювальне сопло має модульну конструкцію й складається із власно сопла, сенсорів, пристрою регулювання фокусної відстані, датчика переміщення й пристрою, що захищає оператора від випромінювання.

Переносний блок живлення мобільної лазерної установки є принципово новою розробкою й відрізняється насамперед компактністю, швидким реагуванням на різні збурювання й високим ККД. Такий блок дозволяє вибрати параметри зварювання й зміцнення різних матеріалів у постійному або імпульсному режимах.

Інше конструктивне рішення ручного робочого інструмента у вигляді своєрідної «праски» запропоновано в Лазерному центрі Ганноверського університету ім. Лейбніца (м. Ганновер, Німеччина) [270].

У зварювальному учбово-дослідницькому центрі Галле (м. Галле, Німеччина) розроблені два варіанти оригінального переносного устаткування для механізованого лазерного зварювання [270-272]. Джерелом лазерного випромінювання в ньому є твердотільний Nd:YAG -лазер, пов'язаний з робочим інструментом оптиковолоконним світловодом. Переносний апарат LHSg-1 (мал. 5)

призначений для лазерного зварювання коротких стикових і напусткових з'єднань і гарантує високу якість швів з гарним формуванням. Для зварювання таврових з'єднань використовується переносний апарат LHSГ-2 (мал. 6), що дозволяє операторові робити прихватки й наступне зварювання металоконструкції в машино- і суднобудуванні.



Малюнок 5. Лазерне зварювання просторових конструкцій за допомогою ручного лазерного інструмента LHSГ-1 [271].

Позиціювання обох апаратів проводиться вручну. Параметри режиму зварювання задаються спеціальною програмою. Процес зварювання починається при стаціонарному положенні апарата, потім зварювальна головка пересувається автоматично на встановлену довжину шва з обраною швидкістю. Зварювання проводиться в захисному газі. Апарати мають захисні екрани від лазерного випромінювання на випадок некоректного обслуговування або інших непередбачених обставин.





Малюнок 6. Лазерне зварювання просторових конструкцій за допомогою ручного лазерного інструмента LHSG-2 [272].

Традиційна для компанії SLV модульна конструкція апаратів, дозволяє задовольняти вимогам виробництва. Апарати можуть бути адаптовані до різних фокуруючих головок. Технічні характеристики установок наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики установок компанії SLV [271, 272].

| Параметри                          | Значення    |
|------------------------------------|-------------|
| Максимальна довжина шва, мм        | 60          |
| Швидкість зварювання, м/хв         | 0,4 – 2,5   |
| Максимальна потужність лазера, кВт | 2           |
| Габарити LHSG-1, мм                | 150×230×150 |
| Габарити LHSG-2, мм                | 220×240×250 |
| Маса LHSG-1, кг                    | 5,5         |
| Маса LHSG-2, кг                    | 3,5         |

Лазерне випромінювання використовується також для робіт з наплавлення. У зв'язку з великою номенклатурою відновлюваних деталей по типорозмірах і призначенню використовують різні способи, техніку й технологію наплавлення



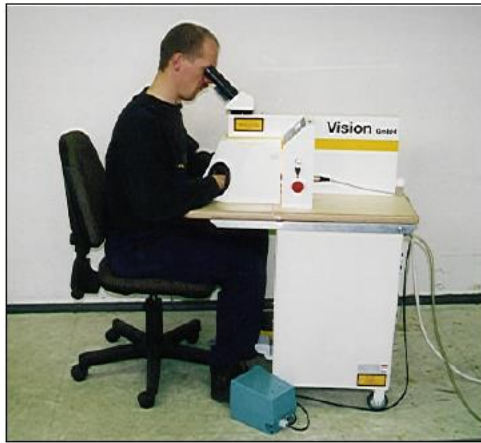
[273]. Наплавлення у важкодоступних місцях у всіх просторових положеннях, у тому числі на криволінійних поверхнях деталей, роблять із використанням автоматизованого устаткування. Якщо буде потреба багатошарового наплавлення перед наплавленням кожного наступного шару попередній шар фрезерується. За допомогою імпульсного лазера з ручним позиціонуванням можна наплавляти невеликі й прецизійні деталі, відновлювати дуже тонкі крайки без ризику їхнього оплавлення, заварювати дефекти наплавлення після механічної обробки.

Сьогодні іноземні виробники, включаючи малі й середні підприємства, значно збільшують інвестиції в лазерні технології. Незважаючи на складність і високу вартість лазерного устаткування й технологій, їх застосування в підсумку може бути економічно доцільним, оскільки забезпечить збільшення продуктивності зварювання й більш високу якість продукції.

При використанні ручного лазерного інструменту на сьогоднішній день намітились тенденції застосування його у стаціонарному та напівавтоматичному режимах.

При виконанні експериментів у напівавтоматичному режимі оператор здійснює вручну переміщення лазерної головки відносно оброблюваної поверхні. При цьому всі параметри технологічного процесу встановлюються системою управління.

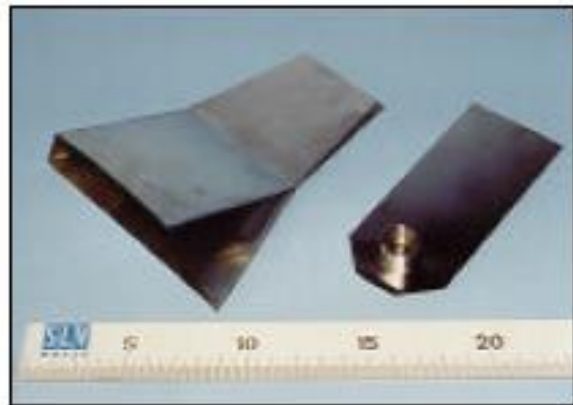
Стаціонарний режим передбачає ведення процесу зварювання та наплавлення при нерухомій системі генерації лазерного випромінювання. Переміщення оброблюваних деталей під час цього процесу оператор здійснює вручну. На мал.8 приведена схема обробки при стаціонарному режимі та типові деталі [274]. На мал. 9 показаний варіант ручного лазерного інструмента для проведення робіт у напівавтоматичному режимі.



а)

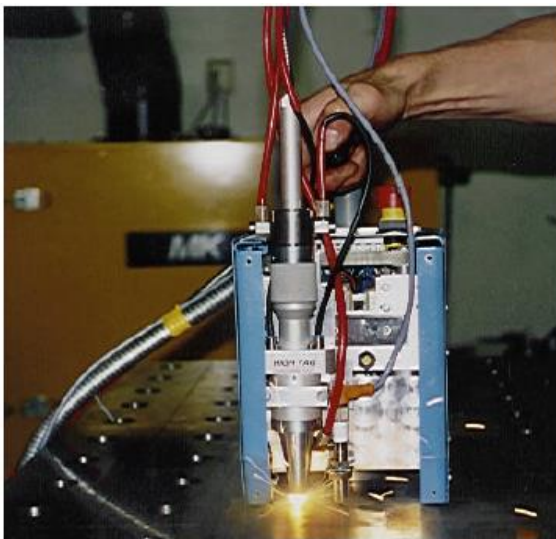


б)



в)

Малюнок 8. Ручне лазерне зварювання у стаціонарному режимі: типове робоче місце оператора (а); схема обробки (б); типові деталі (в) [274].



а)



б)

Малюнок 9. Ручне лазерне зварювання у напівавтоматичному режимі: ручна лазерна головка (а) [274]; типова оброблювана конструкція (б) [275]

Висновки:

1. аналіз робіт, виконаних в цій області, показує, що питання, пов'язані з використанням ручного лазерного інструмента та його всебічним технологічним оснащенням актуальні та знаходяться зараз в стадії інтенсивних наукових досліджень та розробки;
2. роботи, що проводяться в цьому напрямі зорієнтовані, в основному, на використання ручного лазерного інструмента в стаціонарному та напівавтоматичному режимах обробки;
3. в Україні недостатньо вивчені можливості застосування лазерного випромінювання для ручного зварювання та наплавлення металевих сплавів.