

УДК 621.375.826:621

В.П. Котляров, І. Вахдатінія,
Х. Хаджі Моллабаші

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ЛАЗЕРНОГО ВИРІЗАННЯ СТЕНТІВ

Вступ

Висока якість коронарних стентів визначається оптимальністю технологічних операцій, необхідних для їх виготовлення. Тому багато чого в цьому сенсі залежить від формоутворювальних операцій — виготовлення заготовки (трубки), її перфорації і оздоблювальної обробки поверхні елементів стента, причому від двох останніх факторів однаковою мірою залежить кінцевий результат. Недоліки ж операції лазерного різання стента (нестабільність ширини його елементів, шорсткість і хвилястість бічних стінок, наявність ґрату і дросу в їх кромках) в результаті неоптимальної її організації, збільшують трудомісткість і вартість оздоблення. В цьому полягає взаємна залежність операцій.

Аналіз використовуваних схем формоутворення стента з трубчастої заготовки показав, що незалежно від орієнтації її осі (горизонтальної [1] чи вертикальної [2]) відносні контурні переміщення інструменту і заготовки розділені між ними: поздовжні переміщення і обертання здійснюються заготовкою, а радіальні — інструментом. Враховуючи масу і розміри заготовки стента, складність контурів, які вирізаються, щільність їх розміщення і мініатюрність розмірів, необхідно оптимізувати порядок формування змісту рисунка, щоб уникнути деформації виробу через локальний його нагрів та зменшення жорсткості під час операції.

Щодо режиму генерації лазера в операціях різання стентів існує єдина думка лише про доцільність імпульсної подачі енергії. Однак деякі дослідники надають перевагу імпульсам з тривалістю в мілісекунди [3] або мікросекунди [4], інші — з тривалістю в наносекунди. Є й прихильники фемтосекунд [5]. На доказ своєї позиції кожен із них наводить певні дані про якість результатів операції лазерного різання та продуктивності без їх зв'язку з умовами виконання подальших операцій оздоблення.

Постановка задачі

Розбіжності в поглядах спеціалістів щодо ефективного механізму формоутворення різу в стенті та зв'язаних з ним методик призначення режимів лазерної обробки потребують виконання експертних аналітичних (можливо, й натурних) досліджень операції лазерного різання стентів і впливу умов її реалізації на показники оздоблювальних операцій і загальну якість виробу. Саме це становить мету даних досліджень, для досягнення якої необхідно виконати такі дії:

- визначитися з технологічною схемою формування наскрізного різу в заготовці (трубці), виходячи з потреби досягнення якісного та продуктивного результату за вимогою спрощення наступних операцій оздоблювання;
- розробити методику режимного забезпечення операції за визначеною схемою обробки;
- оцінити можливості сучасного лазерного технологічного обладнання, придатного для реалізації спроектованої технологічної операції, а в разі необхідності — й запропонувати засоби його вдосконалення.

Оптимізація технологічної схеми обробки

Умовами оптимальної організації технологічної операції є:

- технологічна схема має забезпечувати досягнення максимальної продуктивності при достатній якості результатів;
- режим подачі енергії випромінювання (безперервний або імпульсний у різних його модифікаціях) повинен відповідати вибраному механізму руйнування матеріалу заготовки;
- комплекс параметрів, якими характеризується пучок випромінювання (енергетичних, тимчасових і просторових), і умови опромінювання заготовки (кількість імпульсів, тип та параметри перетворюючого оптичного елемента, а також відносне положення останнього і заготовки), має забезпечувати розв'язання технологічної задачі досягнення заданих розмірних, якісних і техніко-економічних показників;
- вибране лазерне технологічне устаткування (ЛТУ) має відповідати наведеним вище вимогам до організації операції, зокрема, містити елементи і вузли, необхідні для ефективної її реалізації.

Продуктивність операції із збільшенням тривалості імпульсів зростає, а вартість змен-

шується, особливо у зв'язку із спрощенням лазерної техніки. Скорочення тривалості імпульсів вільної генерації (ВГ) від $\tau = 0,3\text{--}0,5$ мс до $\tau = 50\text{--}100$ мкс при незмінній середній потужності випромінювання призводить до підвищення пикової інтенсивності в зоні опромінювання ($I_{ps} > 10^8 \text{ Вт/см}^2$), зменшення тривалості

теплових процесів у зоні різання, що викликає інтенсифікацію процесу паротворення і зменшення зони термічного впливу (ЗТВ). Підвищений тиск матеріалу, що випаровується, сприяє самоєвакуації продуктів руйнування з порожнини різу, зокрема розплаву з його дна і стінок, що гарантує деяке підвищення якості різання (стабільності ширини різу, зниження шорсткості поверхні і величини ґрату на нижній кромці стінки різу і дросу на верхній). Щоб досягти такого ж рівня якості при опромінюванні імпульсами $\tau = 0,3\text{--}0,5$ мс, коли інтенсивність I_{ps} досягає лише рівня 10^7 Вт/см^2 , необ-

хідне очищення порожнини різу від продуктів ерозії додатковим інструментом – струменем газу (повітря). Товщина ЗТВ, пропорційна тривалості опромінювання $Z_{\text{ТВ}} \approx (a\tau)^{1/2}$, дещо зростає.

Швидкість різання V залежно від матеріалу і розмірів стента досягає 250 мм/хв для обох режимів опромінювання, оскільки ідентичні частота надходження імпульсів f (не більше 200 Гц при імпульсному накачуванні) і розмір зони опромінювання на поверхні заготовки $d_0 \approx F\theta$ (F – фокусна відстань лінзи, θ – розбіжність пучка випромінювання). Також мало

різняться операції за собівартістю за наведених вище причин та практично однаковій комплектності ЛТУ.

Подальше зниження тривалості імпульсу призводить до істотного скорочення кількості рідкої фази в продуктах ерозії матеріалу заготовки і зменшення глибини ЗТВ. При $\tau < 1$ пс (фемтосекундні імпульси) вона практично відсутня. Проте навіть при рівні інтенсивності більше 10^{10} Вт/см^2 і ширині різу $b < 40 \text{ мкм}$ імпульсна енергія недостатня для прошивки стінки заготовки одним імпульсом, тобто схема формування наскрізного різу відрізнятиметься від одноімпульсної (рис. 1), при якій шорсткість стінки різу визначається коефіцієнтом перекриття суміжних отворів $k_n = S/d_0$ ($S = Vf$ – крок між сусідніми отворами), що для встановленого значення f і заданого рівня шорсткості поверхні R_z обмежує лінійну швидкість різання V :

$$V \leq fd_0 \left[1 - \left(1 - \frac{R_z}{d_0} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (1)$$

Якщо стінка трубки товщиною δ прошивається подачею N імпульсів (рис. 2), тобто $\delta = N\Delta$ (Δ – приріст глибини різу від дії одного імпульсу), то у зв'язку з необхідністю зменшення кроку зсуву пучка від лунки до лунки до величини $S_i = S/N$ вимушено зменшується швидкість обходу контуру при незмінній частоті надходження імпульсів: $V_i = S_i f$. Висока інтенсивність у зоні опромінювання

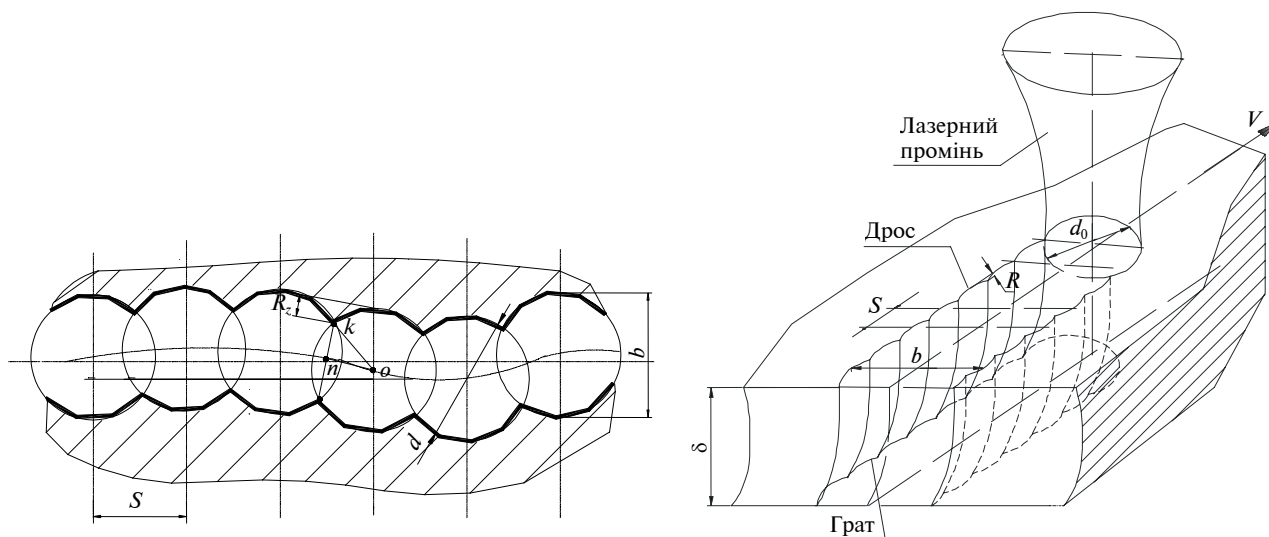


Рис. 1. Схема формування шорсткості стінки різу R_z при імпульсному різанні

супроводиться формуванням ерозійного факела у вигляді високотемпературної плазми, яка екранує пучок випромінювання або, принаймні, своїм фронтом спотворює початкові умови перетворення пучка випромінювання оптичним елементом, що неприпустимо. Тому частота надходження імпульсів повинна передбачати паузу між ними для розльоту продуктів руйнування величиною, не меншою ніж $(t - \tau) > Z / V_p$ ($t = 1 / f$, V_p – швидкість розльоту продуктів ерозії $\sim 10^5$ см/с). Цими обставинами пояснюється істотна втрата продуктивності операцій різання: у 2,5 раза для пікосекундних імпульсів і більш ніж в 10 разів для надкоротких, фемтосекундних. Крім того, різко зростає собівартість операції з цієї причини і в зв'язку з істотним дорожчанням лазерної техніки, необхідної для її реалізації. Додатково потрібно відзначити, що формування поздовжнього профілю різу внаслідок суперпозиції одиничних лунок (рис. 2) ускладнює геометрію поверхні стінки різу порівняно з одноімпульсною прошивкою (див. рис. 1) і затруднює керування рівнем шорсткості стінок дією на режим опромінювання.

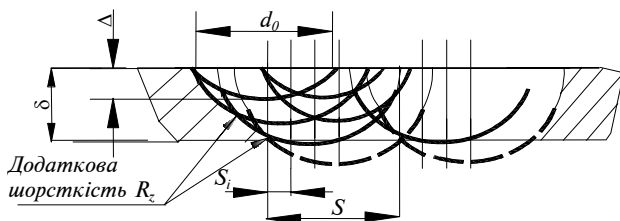


Рис. 2. Схема формування поздовжнього профілю різу при багатоімпульсній обробці

Наш досвід виготовлення стентів, що підтверджено розробками одною з провідних компаній-виробників лазерної техніки “LASAG AG”, показав, що ефективним може бути режим газолазерного різання імпульсами тривалістю 0,1–0,3 мс з інтенсивністю, яка не перевищує 10^7 Вт/см², якщо досягти повного видалення розплавленого матеріалу з порожнини різу. Така тривалість дає можливість зосередити в імпульсі достатньо енергії для одноімпульсної прошивки стінки трубчастої заготовки, тобто виконувати різання за схемою рис. 1. При цьому знижується шорсткість стінок поперек напрямку різання за рахунок “лікування” мікронерівностей розплавом, що переміщується вздовж стінки різу, і мінімізується поздовжня шорсткість вибором відповідного значення кое-

фіцієнта перекриття k_n . Крім того, слабоіонізовані продукти ерозійного факела не впливають на пучок випромінювання, що дає можливість зберегти його каустику під час прошивки одного елементу різу (отвору) і, отже, форму різу. Хоч триваліше опромінювання веде до збільшення глибини ЗТВ, наслідки цього легко усуваються при звичайній для оздоблювального етапу виготовлення стента термічній обробці, яка слугує підвищенню резистентності, рівномірному розпрямленню і поліпшенню гнучкості стента. Очевидно, що операція обробки стента після такого різання може бути виконана якісно і з меншими витратами. Враховуючи такі умови різання стентів, як мінімізація ширини різу (менше 40 мкм) і рівня шорсткості поверхні стінок різу вздовж та поперек різання, тип заготовки (трубка діаметром від 2 мм з товщиною стінки 0,05–0,15 мм) та теплові властивості її матеріалу (нержавіюча сталь, тантал і сплави нітінол, MP35N, L605), для забезпечення рівномірного розподілу розплаву вздовж стінки різу та захисту протилежної внутрішньої поверхні трубки необхідно продувати канал різу газом (повітрям) з тиском до 1,5 МПа та прокачувати нею воду під тиском 0,5 МПа.

Таким чином, оцінюючи комплексно конкурентні методи профілювання стента, можна виправдано вважати за оптимальну операцію газолазерного різання імпульсами мілісекундної тривалості з достатньою якістю і найбільшою продуктивністю при спрощеній операції обробки.

Визначення режимів лазерного різання

Режимне забезпечення операцій лазерної розмірної обробки імпульсами ВГ ускладнюється рядом обставин: невизначеністю тимчасового і енергетичного режимів подачі пічків, які становлять імпульс ВГ, і комбінованим характером масопереносу з порожнини різу – частковим випаровуванням з вимиваючою дією газового струменя. Враховуючи це, а також багатокритеріальність технологічного завдання, оптимальний набір параметрів інструменту і умов обробки можна встановити за однією з методик експериментальної оптимізації [6], що є тривалою і складною процедурою. В оцінювальних цілях можна використовувати методику проектування, розроблену в статті [7], яка, як показав досвід її використання, за певних умов дає змогу отримати досить задовільні результати. До таких умов належать:

- параметри різку – $4\delta / d_0 \gg 1$;
- матеріал заготовки – метал $\left(\frac{L_b \rho}{T_b c} \approx 5 \right)$ з

температурою плавлення $T_{пл} \approx 0,5T_b$ (L_b – питома теплота випаровування, ρ – щільність, T_b – температура випаровування (К), c – теплоємність);

- тривалість імпульсу – $\tau \ll 4,5d_0^2 / a$ (a – температуропровідність матеріалу).

За достатньою глибиною фокуса пучка випромінювання $2z_f \left(Z_{f00} = \pm \frac{4\lambda F^2}{\pi D_{\lambda}^2} \right)$ – для TEM_{00} і

$Z_{fmn} = \pm 5,56 \left(\frac{\lambda F^2}{2\pi D_{\lambda}^2} \right)$ – для TEM_{mn} , яка повин-

на бути більшою товщини стінки трубки δ , можна прийняти відповідну схему формування наскрізного каналу різку (рис. 3) одиночними імпульсами, за якою передбачається лінійний приріст глибини лунки до товщини заготовки за час дії імпульсу випромінювання τ . У цьому випадку режими обробки (τ_p , τ_d – розрахункові і дійсне значення тривалості, I_p – інтенсивність випромінювання, E – імпульсна енергія, f – частота надходження імпульсів, $P_{сер}$ – середня потужність і d_0 – розмір пучка на поверхні заготовки) можна розрахувати за такими формулами (A – коефіцієнт поглинання випромінювання поверхнею заготовки):

$$\tau_p = 0,33 \frac{b^2}{a},$$

$$I_p = 1,65 \frac{\delta L_b \rho}{A \tau_d},$$

$$E = 0,5\delta \rho L_b b^2 / A,$$

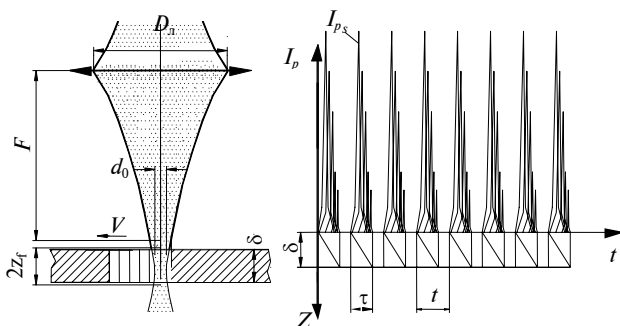


Рис. 3. Розрахункова схема наскрізного різання моноімпульсами лазерного випромінювання

$$f \leq (t + \tau)^{-1} = (0,05b^2 / a + \tau)^{-1},$$

$$P_{сер} = \pi b^2 I_p \tau f / 4;$$

$$d_0 = 0,6b;$$

швидкість різання визначається допустимою величиною поздовжньої шорсткості (1), а розбіжність пучка випромінювання – фокусною відстанню використовуваної лінзи (об'єктива) F : $\theta \leq d_0 / F$ і в разі потреби коректується оптичними засобами, наприклад відповідним налагодженням телескопа, розміщеного на шляху пучка випромінювання.

Технологічне обладнання

Розрахований режим подачі імпульсної енергії може бути реалізований різними лазерами або за рахунок імпульсного накачування, або модуляцією добротності резонатора при безперервному збудженні активного середовища. Для лампових випромінювачів (наприклад, лазера KLS246 виробництва "LASAG AG") при використанні режиму чергової дуги (передіонізація лампи накачування) імпульсним накачуванням вдається досягти частоти в декілька кілогерц, що сприяє достатній продуктивності операції з високою якістю стінок різку. Проте хаотичність пічкової структури імпульсу ВГ є причиною нестабільності розмірних результатів, а подовжена (до $0,25\tau$) задня стінка істотно збільшує частку рідкої в'язкої фракції в порожнині різку і глибину ЗТВ, для видалення якої різ продувається газом з тиском до 1,5 МПа. Структура імпульсів може бути стабілізована при додатковій модуляції добротності резонатора, що розбиває їх на серію пучків (рис. 4, а) з високим рівнем інтенсивності $I_{ps} > 10^8$ Вт/см², але з недостатньою

енергією, що призводить до багатоімпульсної прошивки стінки трубки при випарному механізмі формування мікролунок, що було розглянуто вище (див. рис. 2).

Лампові лазери з безперервним накачуванням, а також більш сучасні та економічні лазери з діодною накачкою (наприклад, ROFIN DP 010 HX виробництва "ROFIN SINAR"), волоконні (ROFIN FLx75 того ж виробництва) також переводяться в імпульсний режим за допомогою модуляції добротності резонатора або струму накачування. Імпульси в останніх лазерах (рис. 4, в) енергоємні, але ха-

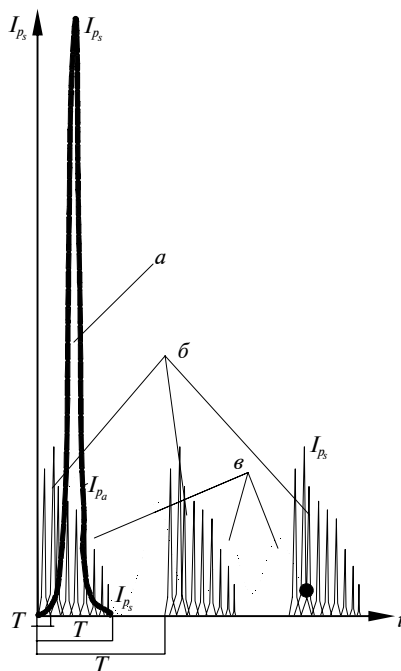


Рис. 4. Структура імпульсів випромінювання для лазерів із 100 %-ною (а) та частковою (б) модуляцією добротності резонатора або струму накачування (в)

рактизуються низьким рівнем середньої інтенсивності $I_{p_a} \leq 10^7$ Вт/см². Крім того, внут-

рішньорезонаторні модулятори (лазерні затвори) промислового виробництва (акустооптичні затвори (АОЗ)) можуть забезпечити 100 %-ну глибину модуляції лише одночастотного випромінювання, що обмежує їх застосування та енергетичні можливості.

Засоби модернізації лазерної техніки

Крім акустооптичних затворів, єдиним модулятором промислового зразка, який міг би застосовуватися для часткової модуляції добротності резонатора, є модулятори на ефекті Доплера [8], які успішно використовувалися у випромінювачах із слабопідсилюючими активними середовищами ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{+3}$), для яких досяжна лінійна швидкість зміни довжини резонатора була достатня для відведення частоти генерації за межі ширини спектра випромінювання збуджених центрів (Cr^{+3}) за час наростання хвилі. Для сильнопідсилюючих активних середовищ ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{+3}$) такий режим модуляції [9] формує групи пучків (рис. 4, б) з керованою сумарною тривалістю і середньою інтенсивністю, які придатні для використання в технологічній схемі рис. 3, причому в імпульсів практично відсутня задня ділянка. Проте такі

модулятори так і не набули широкого застосування через складність практичної реалізації поворотно-поступальної ходи дзеркала резонатора в поршневому режимі (без перекосу).

Нами розроблено та досліджено кілька конструкцій модуляторів, які дають змогу змінювати режим постачання енергії (від безперервного до імпульсного із змінюваними його характеристиками) при 100 %-ній модуляції випромінювання для резонаторів із плоских або сферичних дзеркал.

Більш ефективні та простіші в реалізації (ніж наведені вище) модулятори засновані на періодичній зміні порогу генерації лазерів 1, 2, 3, що досягається за допомогою тривіального роз'юстирування резонаторів 2–3 періодичним відхиленням одного із дзеркал від нормального положення на невеликий кут (менше 10 хв) (рис. 5) [10]. У цьому лазері 100 %-не дзеркало резонатора 3 прикріплено через пружний елемент 7 до торця ультразвукової головки 6 (УЗГ), яку встановлено в корпусі 5 під деяким кутом α до осі резонатора. При виключенні УЗГ дзеркало 3 елементом 7 притискається до торців юстирувальних гвинтів 4, що забезпечує роботу випромінювача при мінімальному рівні

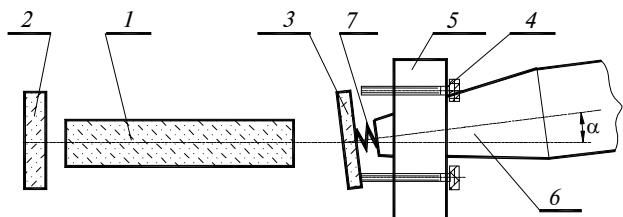


Рис. 5. Модулятор на дзеркалі, що коливається

енергії накачування. Цей поріг зростає при розладі резонатора нахилом дзеркала від нормального положення і при колишньому рівні накачування хвиля, що виникає, розсіюється через різке збільшення дифракційних втрат резонатора. У цей період йде накопичення енергії накачування в активному середовищі, що сприяє підвищенню потужності імпульсів, які формуються з частотою роботи УЗГ при поверненні дзеркала в нормальне положення. Зміною частоти і амплітуди коливань впливають на тривалість імпульсів випромінювання та їх потужність.

Добротність резонаторів із сферичних дзеркал, зокрема нестійкої конфігурації, також можна періодично змінювати від встановленої величини до мінімальної за рахунок збільшення дифракційних втрат, тим самим перетворюючи безперервне випромінювання на імпульсне

[11]. Для цього 100 %-не дзеркало резонатора I повинно періодично змінювати кривизну від дзеркалювальної поверхні, що унеможливує формування стоячої хвилі між двома його станами спокою (рис. 6). В увігнутому положенні дзеркала I додають кривизну R'_2 :

$$R'_2 > R_1 - (a + b + nl),$$

де a , b і l — лінійні розміри резонатора; n — показник заломлення активного середовища 2.

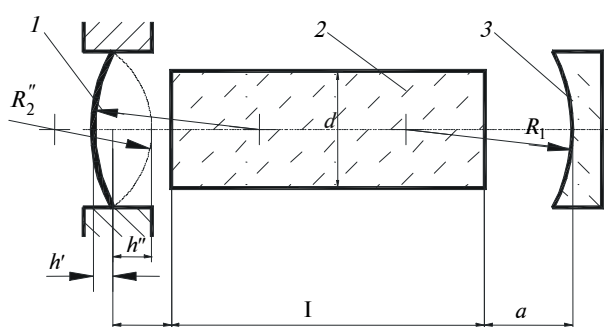


Рис. 6. Схема випромінювача з дзеркалом-мембраною

В опуклому положенні радіус дзеркала I має становити

$$R''_2 < R_1 - (a + b + nl).$$

При кривизні 50 %-ного дзеркала 3 $R_1 > (a + b + nl)$ його комбінація з увігнутим станом дзеркала I утворює стійку конфігурацію, здатну формувати стоячу хвилю, тобто здатну формувати пучок випромінювання. З опуклим станом дзеркала I утворюється нестійка конфігурація резонатора, схильна до накопичення енергії накачування в розміщеному в ньому активному середовищі 2. Таким чином, періодичні зміни форми віддзеркалювальної поверхні призводять до накопичення енергії накачування і до її перетворення в імпульс випромінювання при нерухомому положенні дзеркала в увігнутому положенні. Конструкція такого дзеркала відрізняється простотою.

Обидва принципи модуляції не мають обмежень за швидкістю переміщення дзеркал, тобто можливе керування частотно-енергетичними параметрами випромінювання в широких межах для формування пачки пічків з визначеними частотними та енергетичними характеристиками, які необхідні для газолазерного наскрізного різання трубчастих заготовок стентів.

Подібний режим модуляції випромінювання досягається при використанні найбільш

простої конструкції лазерного затвору — механічного модулятора (рис. 7). Керування добротністю резонаторів 3–5 виконується шляхом їх перекриття непрозорими ділянками бокової поверхні стакана I . Під час дії безперервної накачки в ці періоди обертання стакана активне середовище 4 накопичує енергію, а при положенні стакана із збігаючими осями отворів 2 з обох сторін активного середовища 4 формується імпульс випромінювання. Частота імпульсів визначається

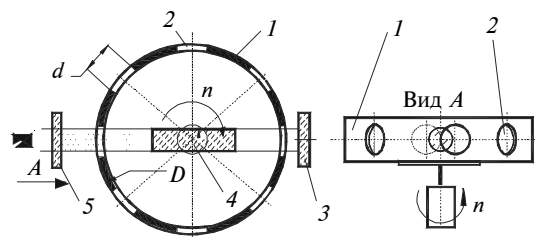


Рис. 7. Механічний модулятор із прискореним перекриттям резонатора

кутовим кроком розміщення парною кількістю отворів та швидкістю обертання стакана, а тривалість імпульсу дорівнює часу відновлення додатного зворотного зв'язку, тобто відкриття обох торців активного середовища: $\tau = d / \pi D n$. Наприклад, для активного елемента $\varnothing 6$ мм, із стаканом діаметром 200 мм, який обертається із швидкістю 1500 об/хв, тривалість пачки імпульсів буде становити $\tau_n \approx 0,38$ мс, а імпульсна енергія — $E_n \approx 0,08$ Дж, що достатньо для одноімпульсної прошивки отвору діаметром 0,04 мм у заготовці товщиною 0,1 мм, виготовленої з нержавіючої сталі. Якщо кутовий крок розміщення отворів 4° (лінійний крок 7 мм), а поздовжня шорсткість не перевищує значення $R_z = 0,3$ мкм, то лінійна швидкість різання досягає 600 мм/хв, що майже втричі перевищує швидкість різання імпульсами мікросекундної тривалості.

Висновки

У технології лазерного різання стентів не обов'язково застосовувати дорогі і часто екзотичні лазерні системи, що працюють із надкороткими імпульсами або на гармоніках інфрачервоного або видимого випромінювання. Досить мати високоорганізований за модовим складом і ретельно перетворений оптичними засобами промінь, щоб при простому режимі генерації з використанням особливих прийомів обробки отримати результати, порівняльні з отриманими дорожчими коштами.

Аналіз режимів роботи сучасних лазерних систем, які застосовуються в лазерній технології, дав змогу визначити ефективні режими їх роботи для цілей лазерного різання та розробити прості за конструкцією модулятори, які при використанні на доступному за ціною та обслуговуванню обладнанні дають можливість отримати результати обробки на рівні зарубіжних зразків.

У подальших дослідженнях технології виготовлення стентів необхідно визначити вплив запропонованих змін в операції лазерного рі-

зання на ефективність та продуктивність оздоблювальних операцій, а також на можливість одночасного з різанням формування на стінках різу “кишень” для акумуляції лікарських засобів (антикоагулянтів).

Наступним етапом планується освоєння технології виготовлення стентів з впровадженням розроблених елементів у технологічні операції та практична оцінка реальних їх результатів, в тому числі собівартості виробів.

В.П. Котляров, І. Вахдатинія,
Х. Хаджи Моллабаші

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ВЫРЕЗКИ СТЕНТОВ

В результате анализа операций лазерной резки стентов установлены особенности результатов обработки импульсами разной длительности и причины существенных различий в качестве, производительности и себестоимости соответствующих операций. Рассмотрены и технологически обеспечены (методикой выбора режимов обработки и технологической оснасткой) наиболее эффективные (по мнению авторов) операции, выполняемые импульсами миллисекундной длительности.

V.P. Kotlyarov, I. Vahdatinia, H. Haji Mollabashi

TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF STENTS LASER UNDERCUT

The analysis of the laser cutting stents operations enables to reveal the specificity of processing results by different duration impulses, as well as to determine the cause of substantial differences in quality, productivity and prime price of these operations. We consider and provide a technological basis for the most effective (in our opinion) operations carried out with the impulses of millisecond duration by the method of choice of the processing modes and technological rigging.

1. Патент USA № US 6,521,865 B1 кл. B23k 26/38. Pulsed fiber laser cutting system for medical implants, Stephen Jones, Klaus Kleine, Brad Whitney.
2. Патент USA №US 2004/0004063 A1 кл. B23K 26/38. Vertical stent cutting process. Kennet M., Merdan A.
3. Вейко В.П. Лазерная микрообработка. — СПб.: ГУ ИТМО, 2005. — 110 с.
4. Патент USA № US 6,696,667 B1 кл. B26/38. Laser stent cutting. Aiden Flanagan.
5. Schuessler A., Strobel M. Stent materials and manufacturing: Requirements and possibilities // Opportunities. ASM Materials & Processes for medical devices Conference 8–10 Sept. 2003 Anaheim.
6. Котляров В.П., Лелека С.В., Недадь З. Оптимізація операцій газолазерного контурного різання // Експрес-новини: наука, техніка, виробництво. — 1999. — № 15. — С. 20–23.
7. Steffen J. Prozessoptimierung bei materialabtragenden Bearbeitungsproblemen mit Laserstrahlung // Feinwerktechn. und Messtechnik. — 1987. — 8, N 7. — P. 309–320.
8. Соколов Б.М., Вакс Е.Д., Соколова М.А. Ультразвуковая синхронизация излучения рубинового лазера // ЭФ и ЭХМО. — 1971. — № 10. — С. 8–12.
9. Белова Г.Н. Лазер на неодимовом стекле с управляемой ультразвуком интенсивностью излучения // Квантовая электроника. — 1979. — 6, № 8. — С. 1740–1745.
10. А.с. СССР № 1610707. Лазерный излучатель для технологических установок / В.П. Котляров, И.И. Штома, 1990.
11. Котляров В.П., Коваленко В.С., Анякин Н.И. ОКГ для лазерных технологических установок // Электрохим. и электрофиз. методы обработки материалов: Сб. научн. тр. — Тула: ТПИ, 1985. — С. 31–35.