

УДК 621.375.826:621

© В. Л. Дубнюк, ст. викладач, О. П. Худякова, магістрантка,
В. П. Котляров, д.т.н, професор, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ВИРІШЕННЯ РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ОПЕРАЦІЙ ЛАЗЕРНОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКИХ ВЕРСТАТІВ

Визначено умови коректного вживання чисельних методів вирішення рівняння теплопровідності при нагріві заготовки в результаті опромінення її поверхні лазерним променем. Приведено результати обліку нелінійностей I і II роду при обробці заготовок з чистою і покритою поверхнею і використанні імпульсного і безперервного режиму опромінення. Коректність вживаних методик підтверджено високим рівнем збіжності розрахункових і експериментальних результатів.

Ключові слова: лазер, зміцнення, режими лазерної обробки, рівняння теплопровідності, коефіцієнт поглинання.

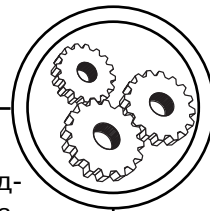
Вступ

Одним з визначальних етапів процедури проектування технологічної операції лазерної обробки [1] є етап вибору режимів її реалізації (параметрів пучка випромінювання і умов опромінення). Найбільш точними є експериментальні методи проектування режимів (на основі моделювання або оптимізації процесу обробки по методиці багатofакторних досліджень [2]), проте, складність оперативної оцінки результатів обробки в операціях зміцнення (підготовка шліфів зразків для дюрOMETричних досліджень), недовговічність результатів при достатньому об'ємі експериментів значно подовжують і здорожують процес проектування. З цих позицій зручнішими представляються методи аналітичного

проектування, наприклад, шляхом аналізу і розрахунку теплових полів в заготовці, що створюються в результаті лазерного опромінення.

Постановка проблеми, аналіз попередніх розробок

Відомі методики аналітичного проектування використовують або спрощені функціональні моделі [3–6], що отримуються при наближеному рішенні задачі теплопровідності різними методами лінеаризації (у тому числі граничних умов), або результати її рішення чисельними методами [7, 8]. Перші (спрощені) моделі призначені для інженерного (практичного) проектування включають обмежену кількість керованих чинників, тому недостатньо точні і часто супрово-



дяться додатковими експериментальними перевірками для визначення поправочних коефіцієнтів [3]. Перспективнішим з позицій оперативності і точності розрахунків є використання для моделювання процесу (у неявній формі) вирішень рівняння теплопровідності чисельними методами при коректній постановці завдання і достатньому програмному забезпеченні. Результати вживання цієї методики [7], отримані при аналізі теплових полів в заготовці із складною топографією опромінюваної поверхні і при обмежених її розмірах, показали, що розрахункові дані, близькі до реальних, виходять при обліку не лінійності температурних залежностей теплоємності, теплопровідності, щільності матеріалу та поглинальної здатності поверхні заготовки.

Якщо температурні залежності теплових властивостей металів і сплавів відомі [9–11] і можуть бути представлені графічно або описані функціями, то експериментальне визначення залежності поглинальної здатності поверхні заготовки дає наближені результати, оскільки не враховуються:

- стан поверхні заготовки (шорсткість, наявність, забрудненні, оксидів, покриттів);
- властивості пучка випромінювання;
- режим подачі променистої енергії.

Крім того, переривистий характер опромінюваної поверхні заготовки додатково ускладнює режимне забезпечення технологічної операції унаслідок

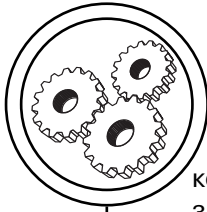
кількісної залежності тепловідводу із зони нагріву в тілі заготовки від її положення відносно матеріальних кордонів останнього.

У зв'язку з цим, для створення методики аналітичного проектування режимів поверхневого лазерного зміцнення в цих умовах метою виконаних досліджень є:

- розробка методики експериментального визначення поглинальної здатності матеріалу заготовки в реальних умовах лазерного опромінення;
- розробка засобів корекції режиму опромінення залежно від поглинальної здатності поверхні заготовки;
- оцінка міри достовірності розрахункових результатів вирішення рівняння теплопровідності чисельними методами з врахуванням реальних поглинальних властивостей поверхні опромінюваного виробу;
- обґрунтування необхідності розширення традиційного переліку керованих чинників до кількості, необхідної і достатньої для управління розмірами і формою зони зміцнення в межах поверхні заготовки із складною її топографією.

Результати проведених досліджень

Оптимальний характер подачі енергії випромінювання в зону опромінення залежить від топографії, розмірів і граничних характеристик ділянок поверхні, що підлягають зміцненню. Інерційність теплових процесів, процедур управління енергетичними і часовими характеристиками процесу опромінення, а та-



кож необхідність в періодичних змінах режиму опромінення поблизу граничних ділянок поверхні, що обробляється, визначають імпульсний режим опромінення як найбільш відповідний для виконання операції поверхневого зміцнення за рахунок формування при поверхневого загартованого шару. Але в роботі заплановані дослідження при імпульсній та безперервній подачі енергії випромінювання, що передбачає обробку заготовок з просторою та простою за топографією поверхнею.

1. Методика визначення коефіцієнта поглинання

Окрім теплофізичних властивостей матеріалу, від температури залежать також оптичні

властивості поверхні заготовки, зокрема поглинальна здатність. Але, якщо теплофізичні властивості опромінюваних матеріалів наводяться в довідковій літературі [10, 11] у вигляді таблиць або графіків (рис. 1), то дані про поглинальні властивості поверхні матеріалу суперечливі і їх недостатньо. Експериментальні методи дослідження коефіцієнта поглинання $A(u)$ або віддзеркалення $R(u)$ [12] за допомогою фотометричної кулі трудомісткі і вимагають спеціального вимірювального устаткування. Складна і багатобічна залежність $R(u)$ від стану поверхні заготовки (шорсткість, міра забруднення, наявність покриття і ін.), від довжини хвилі випромінювання робить практично

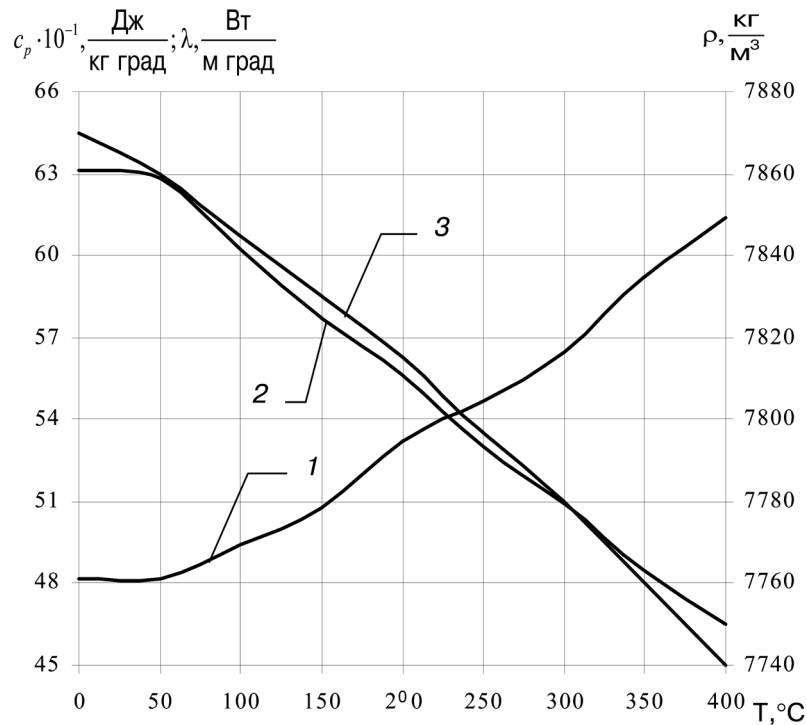
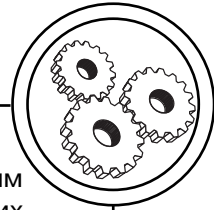


Рис. 1. Теплофізичні характеристики сталі У8: 1 — коефіцієнт теплоємності; 2 — коефіцієнт теплопровідності; 3 — щільність



неможливими вживання теоретичних методів розрахунку $R(u)$ (наприклад, за теорією Друде).

Для визначення температурної залежності поглинальної здатності поверхні заготовки розроблено метод, заснований на рішенні зовнішньої задачі теплопровідності, що полягає у відновленні поглиненого теплового потоку на опромінюваній поверхні з урахуванням температурних залежностей теплофізичних властивостей матеріалу за часовою залежністю температури нижньої поверхні зразка з досліджуваного матеріалу. Вхідними даними експерименту є: параметри пучка випромінювання (довжина хвилі, енергетичні і часові характеристики) і умови опромінення (розміри пучка на поверхні зразка d_0 , тривалість нагріву t (тривалість імпульсу τ або тривалість $t = d_0/V$), що дозволяє визначити часову залежність інтенсивності випромінювання в зоні обробки площею s_w :

$$l_p(t) = \frac{P(t)}{s_w}. \quad (1)$$

За відомими теплофізичними властивостями матеріалу зразка $c_p(u)$, $\lambda(u)$, $\rho(u)$ і умовами опромінення, можна визначити коефіцієнт поглинання $A(u)$ із співвідношення енергії випромінювання і теплового потоку на верхній поверхні зразка, який обчислюється при мінімізації функціонала не в'язки в характерній крапці, наприклад, на нижній поверхні зразка, шляхом використання в якості рівняння зв'язку — вирішення одновимірного рівняння теплопровід-

ності (2), виконаного чисельним методом (методом кінцевих різниць) з відповідними початковими і граничними умовами на межах зразка: ($y = 0$ — на верхній, $y = h$ — на нижній):

$$c(u)\rho(u)\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(u)\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

$$u_0 = u_{\text{start}}$$

$$-\lambda(u)\frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{y=0} = [1-R(u)]W_p(t)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{y=h} = 0.$$

Функціонал не в'язки визначається залежністю:

$$RSQ = (T_{he}(t) - T_{hp}(t))^2, \quad (3)$$

де T_{he} та T_{hp} — експериментальне та розрахункове значення температур.

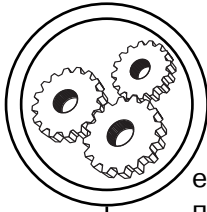
Для імпульсного режиму опромінення залежність $\tilde{P}(t)$ отримано за відомою енергією E , тривалістю імпульсу τ і формою імпульсу: остання інтерполювалася кубічним сплайном (4) і вирішувалося інтегральне рівняння (5).

$$\tilde{P}(t) = P_i + (t - t_i) \cdot (b_i + (t - t_i)) \cdot (c_i + (t - t_i))d_i, \quad (4)$$

де c_i , b_i , d_i — коефіцієнти сплайну; i — кількість точок інтерполяції.

$$E = \int_0^{\tau} \tilde{P}(t) dt. \quad (5)$$

Також інтерполювалися табличні значення теплофізичних характеристик $c(u)$, $\lambda(u)$, $\rho(u)$, та



експериментальні графіки температури $T_{he}(t)$.

Для реалізації запропонованої методики аналізу поглинальної здатності поверхні заготовки розроблені експериментальний стенд (рис. 2) та програма обчислень на ПК, що має наступні особливості: рівняння (2–5) замінювалися їх скінченно-різницевиими аналогами з неявною схемою апроксимації похідних і вирішувалися методом прогону по сітці з постійними кроками інтегрування (за просторовою координатою: $S_y = 2 \cdot 10^{-4}$ мм, за часовою: $D_t = 2,5 \cdot 10^{-4}$ с). З

метою заощадження машинного часу на кожному кроці D_t мінімізувався функціонал — методом «золотого перетину» з додатковою параболічною інтерполяцією і обліком точності плаваючої арифметики. Грубі помилки у визначенні коефіцієнта $A(u)$ відкидаються досягнувши $RSQ \leq 10^2$, а також виключається наступна за нею точка розрахунків. Просторово-енергетичні параметри пучка випромінювання 2 у вигляді відповідних розподілів інтенсивності і потужності пучка випромінювання реєструвалися

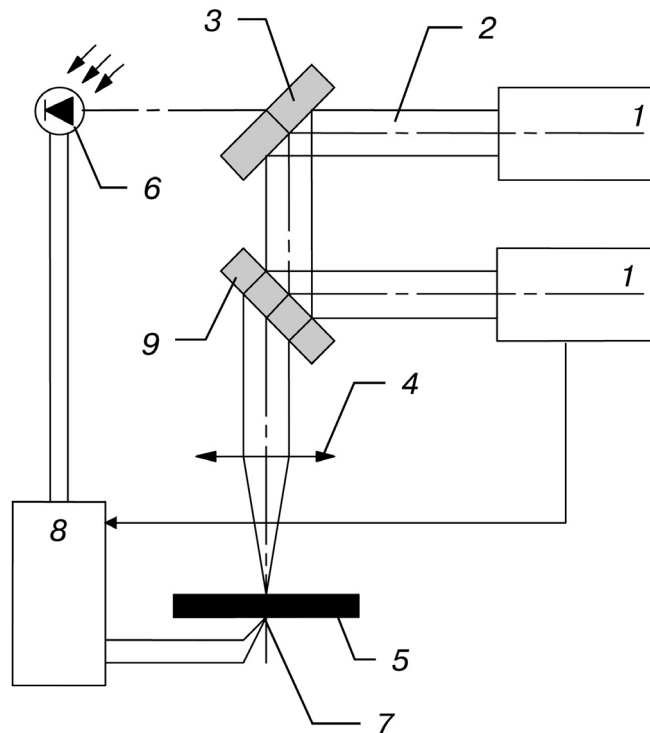
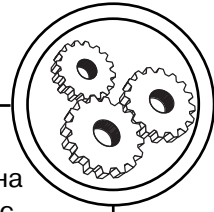


Рис. 2. Схема експериментального стенду для визначення температурної залежності коефіцієнта поглинання лазерного випромінювання поверхнею заготовки: 1 — лазер, 2 — пучок випромінювання, 3 — дзеркало, 4 — лінза, 5 — зразок з досліджуваного матеріалу, 6 — фотоприймач, 7 — термопара, 8 — осцилограф, 9 — скляна пластинка, 10 — вимірник енергетичних характеристик



двома вимірювальними каналами стенду 3–6 і 3–9–10 на екрані осцилографа 8, окрім цього вимірювалася також інтегральна характеристика — кількість енергії, направленої на зразок — вимірювачем 10. В якості зразків використовувалися тонкі пластини ($h = 0,2$ мм) з матеріалу заготовки, поверхня яких мала відповідну шорсткість і була очищена за традиційною методикою, або мала відповідне поглинаюче покриття (за складом та товщиною). Отримувані експериментальні результати (рівні енергії, тривалості опромінення, часова і просторова структура пучка випромінювання, графіки температури на нижній поверхні зразка), а також табличні значення теплофізичних характеристик матеріалу заготовки описувалися інтерполяцією кубічними сплайнами.

Час рішення однієї задачі на сучасних ПК менше 10^{-3} с, точність обчислень $1 \cdot 10^{-5}$ °C, відносна точність плаваючої арифметики $0,4768 \cdot 10^{-6}$. При мінімізації суми не в'язок (3) за кроками інтегрування підвищується точність обчислень, причому тривалість рішення задачі майже не зростає. Залежність коефіцієнта віддзеркалення від температури, для зразку із сталі У8 з чистою поверхнею ($R_a = 0,63$ мкм), теплофізичні характеристики якої показані на рис. 1, представлені на рис. 3. Розрахунок значень коефіцієнта віддзеркалення для більших температур не є доцільним оскільки після температури 300 °C вони практично не змінюються.

В операціях лазерного опромінення поверхонь заготовок,

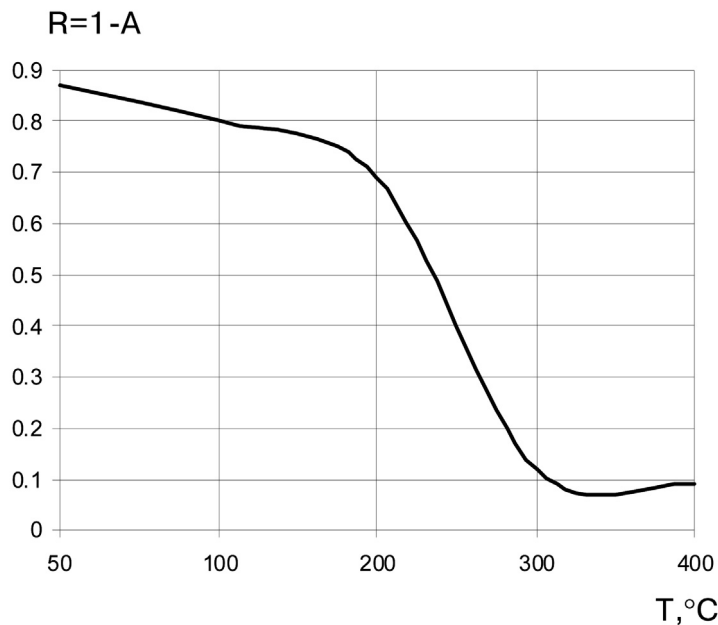
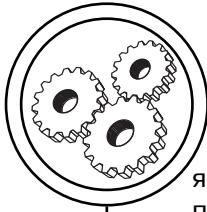


Рис. 3. Експериментальні результати визначення коефіцієнта віддзеркалення



які суттєво більші ніж поперек променя, потребується виконання декілька його проходів із зміною напрямлення швидкості подачі, що може привести до змінення рівня поглинання внаслідок іншої орієнтації шорсткості поверхні до її напрямку, появи на ній бруду, ржі та мастила або змінення поглинальної властивості штучного поглинального покриття. В таких випадках необхідне оперативне втручання в режим технологічної операції для його відповідного компенсування зміненням рівня одного, чи декількох складових, наприклад, швидкості подачі або потужності вип-

роміювання. В наступній схемі обробки (рис. 4) [13] для аналізу оптичних властивостей поверхні, що опромінюється, використано її «обмацування» перед надходженням променя 2, сконцентрованого лінзою 4, його периферійною частиною 14, яка відбирається за допомогою лінзи 3 з центральним отвором. Відбитий від поверхні заготовки 13 промінь у вигляді кільця засвічує кільцевий фотодатчик 7, розділений на сектори 8 та розташований на пластині 6 у торця корпусу 5, причому інформаційними в цей час є ті його сектори, які розташовані навпроти подачі заготовки.

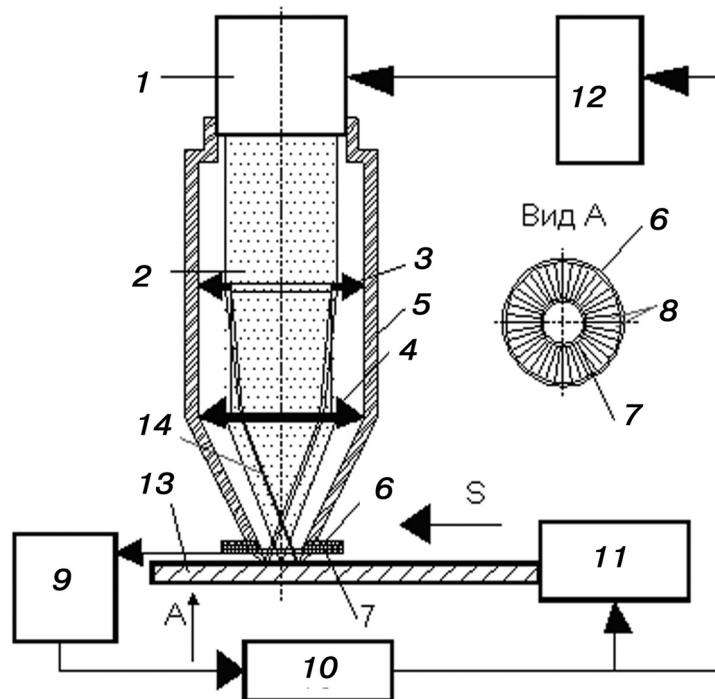
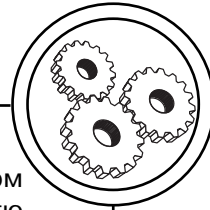


Рис. 4. Схема пристрою для лазерної обробки поверхонь із стабілізацією рівня поглинання енергії променя: 1 — лазер, 2 — лазерний промінь, 3, 4 — лінзи, 5 — різак, 6 — корпус датчика, 7 — секторальний фотодатчик, 8 — окремі сектори датчику, 9 — вимірювач, 10 — процесор, 11 — привод переміщення заготовки 13, 12 — блок живлення лазера, 14 — периферійний пучок випромінювання



Вимірювач 9 порівнює сигнал, отриманий від цих датчиків, з іншими і, в разі відмінностей між ними, що визначає процесор 10, останній видає керуючий сигнал або на корекцію швидкості подачі приводом 11, або на змінення потужності променя через блок живлення 12. Таким чином враховується дійсний рівень поглинання поверхні і стабілізується кількість енергії, яку отримує кожна її ділянка.

2. Дослідження температурних полів обчислювальними експериментами

Для оцінки суттєвості отриманих результатів розглянемо вплив температурної залежності коефіцієнта поглинання $A(T)$ на параметри теплової зони термічного впливу в результаті лазерного опромінення. З цією метою виконаємо аналіз температурного поля $T(y,t)$ в сталевій пластині (У8) завтовшки 3 мм, яку опромінено пучком лазерно

го випромінювання протягом часу 8 мс з інтенсивністю $1,5 \cdot 10^4$ Вт/см² з урахуванням отриманої експериментальної залежності коефіцієнта поглинання A , а також при постійних його значеннях: при середньо інтегральному в межах температури нагрівання ($A = 0,85$) і початковому ($A = 0,35$) [7]. Аналізуючи результати обчислювальних експериментів, які представлено на рис. 5, слід зазначити значущість впливу коефіцієнта поглинання $A(T)$ при опроміненні чистої поверхні на кількісні результати розрахунків. Так, максимальна температура на поверхні зразка з урахуванням залежності $A(T)$ удвічі більше, чим у випадку $A = 0,35$, але менше, ніж при $A = 0,85$ (рис. 5 а-в — залежності 1-3).

Це визначається кількістю поглиненої енергії $Q = \int_0^t A(T) W_p(t) dt$.

На рис. 6 показані часові залежності енергетичної характе-

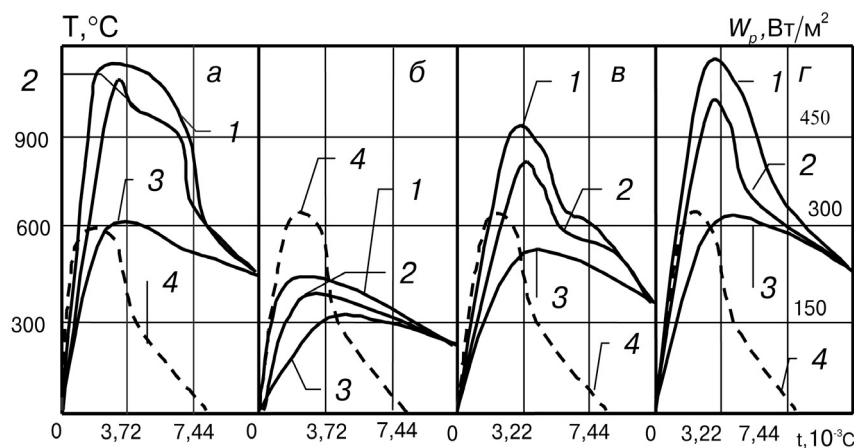


Рис. 5. Розподіл температури по глибині зони нагрівання в заготівці із У8: 1 — $y = 0$; 2 — $y = 16$ мкм; 3 — $y = 64$ мкм. а — $A = 0,85$; б — $A = 0,35$; в — $A(T)$ — для чистої поверхні; г — $A(T)$ — для поверхні з окисною плівкою). 4 — часова форма імпульсу випромінювання ($W_E = 1,2$ Дж/мм² ($\tau = 8 \cdot 10^{-3}$ с)

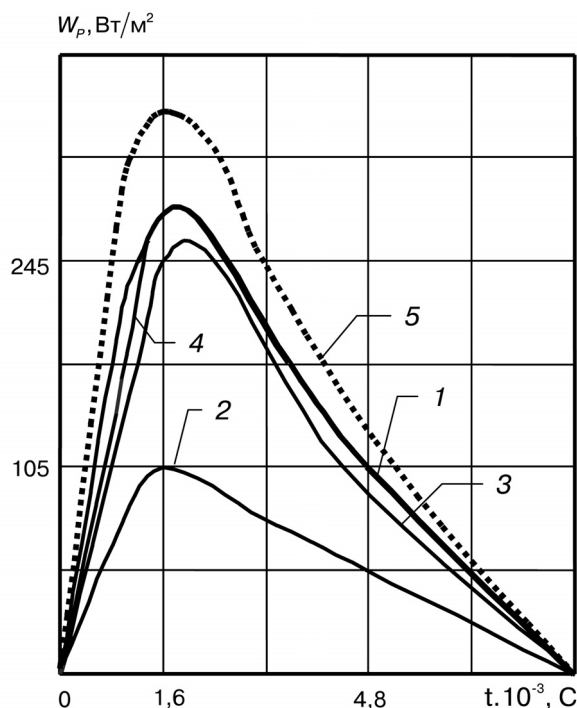
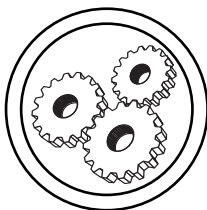
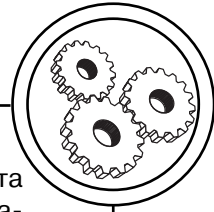


Рис. 6. Теплові потоки в заготівці: 1 — $A = 0,85$; 2 — $A = 0,35$; 3 — $A(T)$ — для чистої поверхні; 4 — $A(T)$ — для поверхні з окисною плівкою; 5 — часова структура імпульсу випромінювання

ристики пучка випромінювання і наведених їм теплових джерел $q(t)$. Незначна зміна коефіцієнта поглинання в діапазоні температур T_0 — 400 °С біля зразка з окисованою поверхнею (залежність 4 рис. 6) пояснює практично співпадаючий вигляд теплових джерел (криві 1 і 4 рис. 6) і теплових історій (рис. 5, а і г) для випадку не лінійності $A(T)$ і середньо інтегрального рівня коефіцієнта поглинання $A = 0,85$.

Чутливість розрахункового методу аналізу теплових полів в умовах запропонованої схеми обліку не лінійностей I і II роду доводиться також виглядом залежностей $T(y,t)$, які відрізняються в інтервалі температур

700 °С $< T < 900$ °С від подібних [15]. Для сталі У8 перегини на залежностях 1–3 (рис. 5, а, в, г) природно пов'язати із структурними перетвореннями, стрибкоподібною зміною теплофізичних параметрів, що характеризується: збільшенням теплоємності в області A_{c1} [9] і визначає акумулюючі властивості матеріалу, та подальшим зменшенням теплопровідності при 750 °С $< T < 850$ °С. В першому випадку при подоланні стрибка теплоємності відбувається накопичення тепловою енергією через різке зменшення температуропровідності матеріалу, в другому інтервалі температур підвищення теплопровідності



при практично незмінному рівні теплоємності знов збільшується швидкість термічних циклів. Тобто при нагріві, не дивлячись на інтенсивне підведення енергії випромінювання (залежність 5 на рис. 6) в інтервалі температур $700\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 723\text{ }^{\circ}\text{C}$, спостерігається зниження швидкості нагріву, а від точки A_{c1} до $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ її збільшення. При охолодженні від $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ швидкість складає $1,2 \cdot 10^5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ($W_p(t) = 7200\text{ Вт}/\text{см}^2$). При проходженні крапки A_{r1} швидкість сповільнюється до $0,4 \cdot 10^5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ($W_p(t) = 4880\text{ Вт}/\text{см}^2$). Відсутність подібних спотворень в теплових полях зон термічного впливу в роботах [7, 8] пояснюється тим, що аналітичні рішення теплової задачі процесу нагріву при лазерному опроміненні отримані для лінійних залежностей теплофізичних параметрів оброблюваного матеріалу від температури, що справедливо для більшості з них до $T < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1), що підтверджує вигляд залежностей 1–4 на рис. 5, б.

Усунення відмінностей в поглинальній здатності заготовок з чистою і окисованою поверхнею при її нагріві до $T = 425\text{ }^{\circ}\text{C}$ може бути підставою для рекомендації в попередньому підігріванні опромінюваної поверхні замість трудомісткої і тривалої процедури нанесення поглинаючого покриття, а також подальшій його утилізації. Так, при імпульсному опроміненні заготовки із сталі У8 (чиста поверхня) на вказаних вище режимах, подача другої порції енергії

з періодом $13 \cdot 10^{-3}\text{ с}$ (частота дотримання імпульсів 77 Гц) наводить до багатократного збільшення глибини проникнення теплового фронту.

На рис. 7 показані розмірні і кінетичні характеристики нагріву зони до $T \geq 723\text{ }^{\circ}\text{C}$ першим імпульсом (криві 1 і 2) і другим (3 і 4) при збереженні високої швидкості охолодження. Таке збільшення глибини зони досягається не лише за рахунок підвищення коефіцієнта поглинання, але і за рахунок оптимального використання другої порції енергії випромінювання.

При обробці поверхні виробу, що має обмежені розміри і складну топографію (наявність вікон, пазів, уступів), найбільшу складність представляє вибір режимів обробки ділянок поверхні, прилеглих до граничних поверхонь, оскільки через замикання теплового потоку останніми, а також обмеженого його стоку в тіло заготовки, порушується симетрія теплового поля і змінюється динаміка процесів в зоні термічного впливу. На прикладі технологічного завдання проектування операції поверхневої обробки заготовки у вигляді клину, межі якого (граничні вузли прямокутної сітки інтегрування) задаються габаритними розмірами перетину тіла заготовки висотою H_y і шириною H_x , а також радіусом закруглення кромки r і кутом заострення клину β , виконано аналіз теплових полів в клині з нахилом задньої грані під кутом $\alpha = 90 - \beta$ ($\beta = 30, 45, 60$ або 75°), при радіусі $r = 0,2\text{ мм}$, виготовленому із сталі У8 з поверхнею

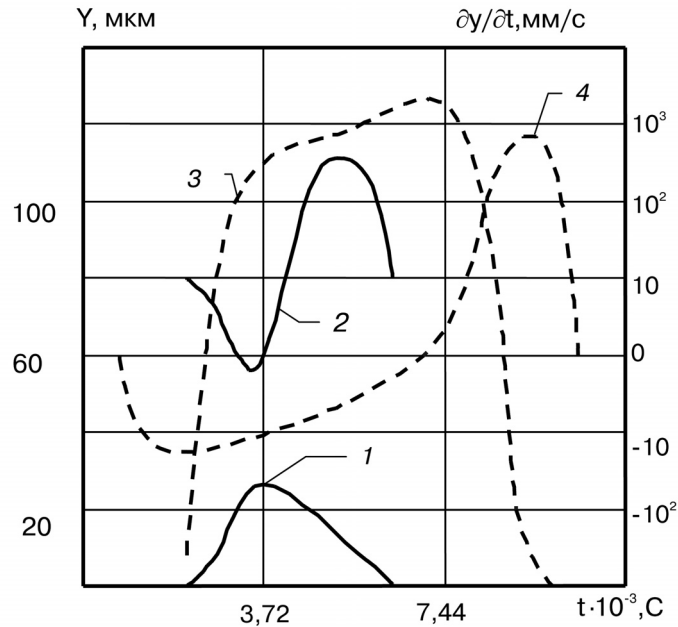
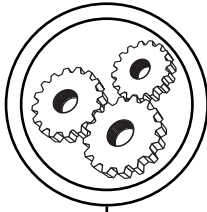
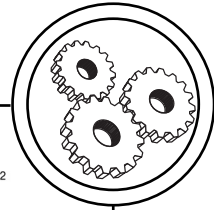


Рис. 7. Результати нагріву заготовки із сталі У8 з чистою поверхнею: 1, 2 — одним імпульсом; 3, 4 — двома (1, 3 — положення ізотерми $T = A_{c1}$, 2, 4 — швидкість її переміщення). $W_E = 1,2 \text{ Дж/мм}^2$; $\tau = 8 \text{ мс}$; $f = 77 \text{ Гц}$

без покриття (шорсткість $R_a = 0,63 \text{ мкм}$). Обчислювальні експерименти проведені при рішенні об'ємної задачі нагріву типу (2) з граничними умовами (3); для обліку можливих фазових перетворень при загартуванні з розплаву, що проводить і до зміни розподілу температури в зоні опромінення, вирішувалося завдання Стефана з формулюванням (2) і коефіцієнтом теплоємності, що враховує приховану теплоту плавлення матеріалу заготовки.

При розташуванні центру пучка випромінювання на відстані $X_{c_{\text{ф}}} \leq X_C \leq X_C^*$ від вершини клину ($X_{c_{\text{ф}}}$ — відстань, з якої починається плавлення вершини, X_C^* — граничне значення, при

якому нахил бічної грані відбивається на конфігурації теплового поля в заготовці) спостерігається спотворення звичної осьової симетрії ізотерм $T(x, y, t)$ і ізоліній швидкостей термічних циклів $dT(x, y, t)/dt$, причому у міру зменшення кута β збільшується зона заготовки з порушеною симетрією теплового поля. Крім того, змінюється і динаміка теплових процесів. Так, у момент часу $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ від початку опромінення в заготовці з $\beta = 30^\circ$ йде інтенсивний нагрів матеріалу із швидкістю $0,5 \cdot 10^5 \text{ град/с}$, а з $\beta = 45^\circ$ — охолодження із швидкістю $0,5 \cdot 10^4$. Це пояснюється накопиченням тепла в заготовці з теплоізолюваними поверхнями під кутом 30° внаслідок його об-



меженого стоку в тіло заготовки. Подібне явище спостерігається в заготовках з великими кутами загострення, проте, при більш інтенсивному підведенні енергії в зону опромінення, або при наближенні центру пучка до вершини кромки. На рис. 8 показані залежності критичних значень густини потужності (1) та положень пучка випромінювання на поверхні клину $X_{Скр}$ (2) від величини кута його загострення: при $W_E = 1,4 \text{ Дж/мм}^2$, $X_{Скр} = 0,48 \text{ мм}$ та $W_p = 90 \text{ Вт/мм}^2$ для $\beta = 30^\circ$.

Як видно з рис. 8 зменшення кута β приводить до необхідності збільшення відстані від кромки до центру пучка випромінювання $X_{Скр}$; внаслідок цього ефективніше використовується енергія випромінювання через скорочення її втрат в частині променя, що «звисає» з кромки, і зростає глибина зони тер-

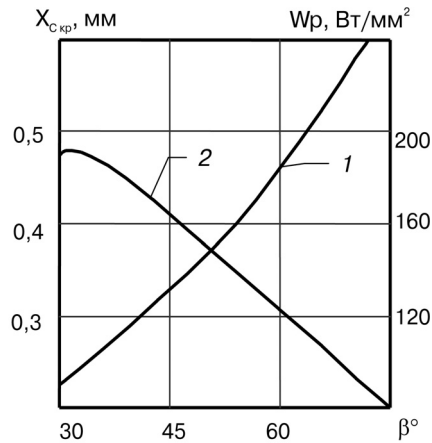


Рис. 8. Залежність критичного (без оплавлення ріжучої кромки) положення центру пучка випромінювання від вершини клину $X_{Скр}$ (1) і відповідної густини потужності випромінювання (2) від кута загострення β

мічного впливу (рис. 9) при деякому збільшенні її ширини (залежності 1–6), тобто зростає об'єм зміцненого матеріалу за-

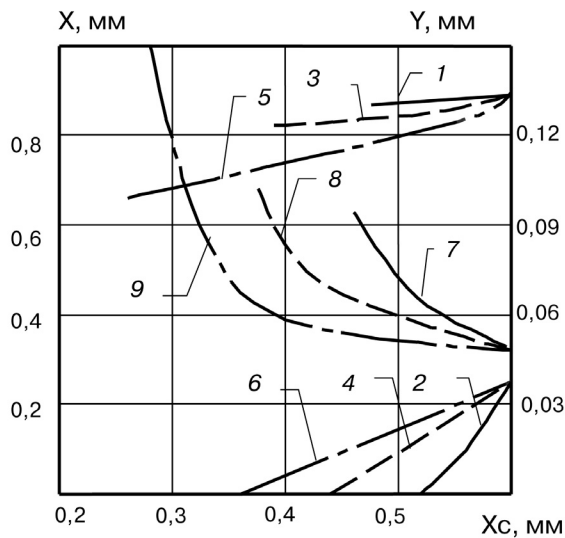
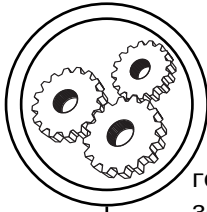


Рис. 9. Змінення розмірів зони зміцнення (меж ізотерми $T = 767 \text{ }^\circ\text{C}$) від положення пучка на поверхні клину X_c при різних величинах кута його загострення β : (1, 3, 5 — межі дальньої; 2, 4, 6 — ближньої до кромки ізотерми по поверхні клину, 7, 8, 9 — глибина зони): 1, 2, 7 — $\beta = 30^\circ$, 3, 4, 8 — $\beta = 45^\circ$, 5, 6, 9, — $\beta = 75^\circ$



готівки. Таким чином, розміри зони термічного впливу поблизу меж заготовок конкретних розмірів і форми визначаються не лише параметрами опромінення (розмірами пучка випромінювання, густиною потужності, що реалізується, і швидкістю відносного переміщення пучка і заготовки), але і положенням центру розподілу інтенсивності випромінювання відносно граничної поверхні заготовки.

3. Перевірка достовірності результатів обчислювальних експериментів

Експериментальну перевірку результатів досліджень процесу зміцнення поверхні заготовки при лазерному опроміненні обчислювальними методами проводили при імпульсному ($\lambda = 1,06$ мкм) режимі подачі енергії на пів обмежених заготовок ($X, Y, Z \rightarrow \infty$) і заготовок з обмеженими розмірами та формою у вигляді клину, виготовле-

них із модельного матеріалу — евтектоїдної сталі У8 з чистою поверхнею ($R_a \leq 0,63$ мкм). В обчислювальних експериментах враховувалися температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу (рис. 1), поглинальної здатності поверхні заготовки (чистої — рис. 3 — для $\lambda = 1,06$ мкм і з окисною плівкою — рис. 10 — для $\lambda = 10,6$ мкм), які описувалися кубічними сплайнами. Розподіл інтенсивності в пучку випромінювання і часова залежність його потужності, задавалися за крапками у відповідній координатній сітці. Для імпульсного випромінювача приймався рівномірний розподіл інтенсивності з описом профілю сфокусованого пучка функцією Бесселя.

Режим опромінення в натурних експериментах близький до того, що використовувався в обчислювальних експериментах. Розмірні характеристики зон термічного впливу визначалися в

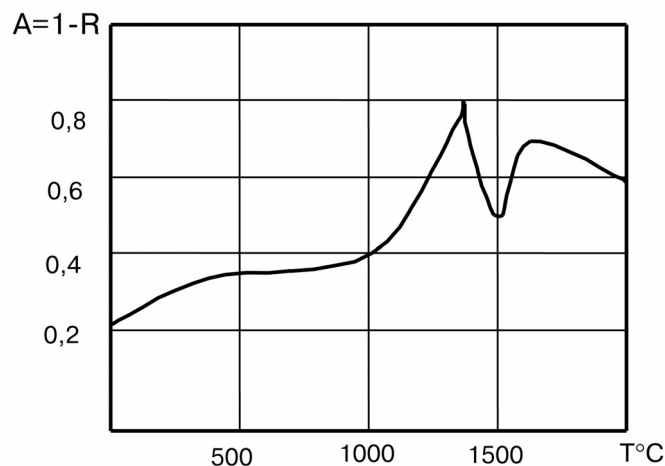
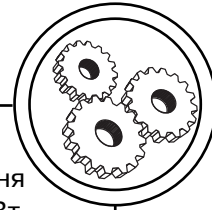


Рис. 10. Температурна залежність коефіцієнта поглинання ($A = 1 - R$) поверхні заготовки (сталь У8 ($R_a = 0,63$ мкм) з окисною плівкою при опроміненні пучком CO_2 -лазера)



результаті дюрOMETричних досліджень зразків за відомими методиками. Межею зони зміцнення вважалася структура, що мала твердість 7000 МПа. На рис. 11 показано розмірні характеристики зміцнених в експерименті зон (D_3 — ширина і Z_{TB} — глибина) — у вигляді середніх значень показників і розрахункові — у вигляді залежностей, отриманих для реальних умов опромінення (імпульсна енергія $E = 10$ Дж, тривалість $\tau = 4$ мс, діаметр пучка випромінювання на поверхні заготовки $d_0 = 1,5$ (5,0 мм). Ділянки кривих, виділені штриховою лінією, відповідають режимам опромінення з поверхневим оплавленням.

Подібні залежності для ширини (B_3) та глибини (Z_{TB}) зони термічного впливу для безпе-

ревного режиму опромінення (потужність в пучку $P = 1,0$ кВт, швидкість його переміщення $V = 2,0$ м/хв.) від $d_0 = 1,7 \div 8,6$ мм показані на рис. 12, а, а на рис. 12, б — від швидкості переміщення пучка ($P = 1,0$ кВт, $d_0 = 4,3$ мм) $V = 0,5 \div 5,0$ м/хв.

Розрахункові і експериментальні результати досить близькі — відносна усереднена погрішність передбачення результатів обробки не перевищує 6,9 % по глибині і 4,5 % по ширині зони зміцнення, сформованої в масивній заготовці.

Працездатність запропонованої методики аналізу теплових полів в заготовках обмежених розмірів і форми досліджувалася при обробці поверхні клиноподібної заготовки з кутами клину 90° і 60° та з вершиною на його ребрі при розташуванні

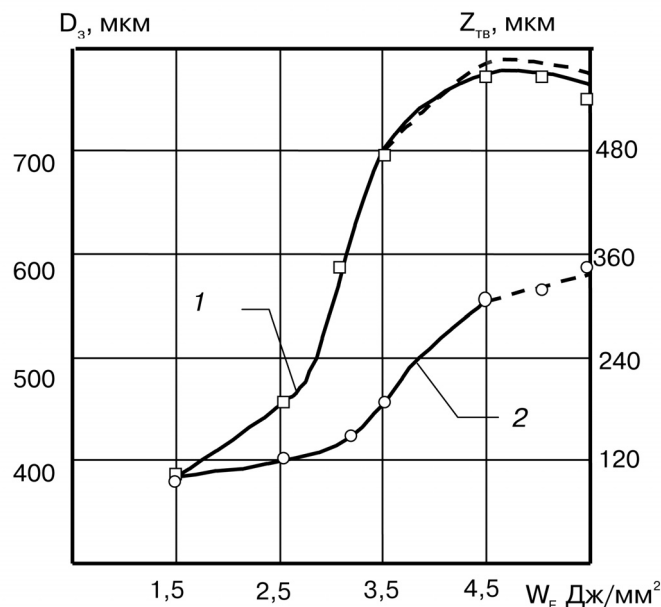


Рис. 11. Розмірні характеристики зон зміцнення після імпульсного опромінення поверхні заготовки із сталі У8 (1 — діаметр та 2 — глибина зони)

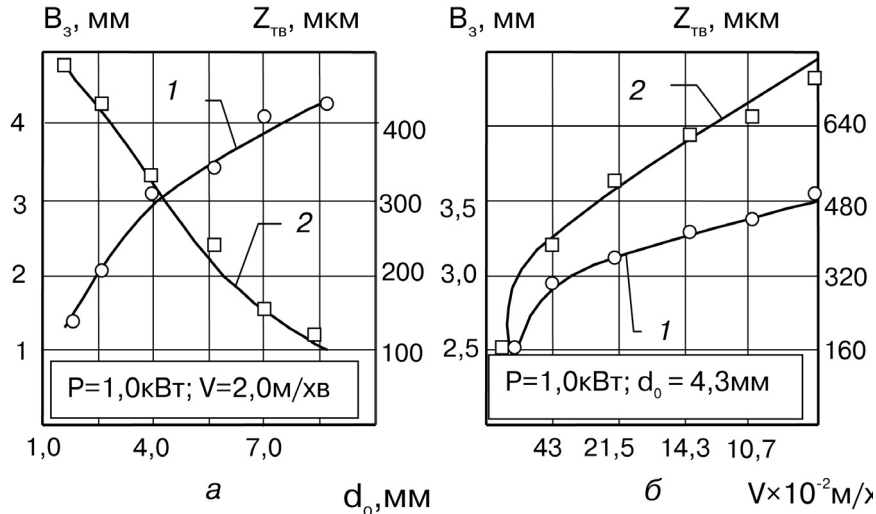
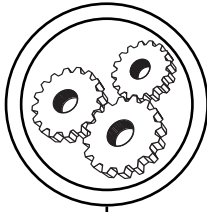


Рис. 12. Розмірні характеристики зон зміцнення після безперервного опромінення заготовки із сталі У8 (1 — ширина та 2 — глибина зони)

центру пучка випромінювання від останньої на відстані $X_{C_{кр}} \leq X_C \leq X_C^*$ (рис. 13). Обробка виконувалася при безперервному опроміненні ($P = 0,8$ кВт, $d_0 = 3,0$ мм) із швидкістю, при якій виключалося оплавлення ріжучої кромки ($V = 0,6$ м/хв. для $\beta = 90^\circ$ (а) і $1,6$ — для $\beta = 60^\circ$ (б)). Експерименти проводилися на устаткуванні, по методиці і зі зразками, які описано вище. Розрахункові профілі зон зміцнення є суперпозиціями ізотерм температури зміцнення (для сталі У8 — 787°C із урахуванням кінетичного зсуву температури (рівноважного) поліморфного перетворення: $\Delta T \approx 60^\circ\text{C}$ при швидкості нагріву 10^3 град/с), що мають найбільшу протяжність в тілі заготовки хоч би в одному напрямі виміру. Необхідність в такому описі межі зони зміцнення пояснюється тим, що результуюче теплове поле в заготовці форму-

ється як в результаті постачання енергії пучком випромінювання, так і внаслідок перевідбиття теплового потоку від граничних поверхонь заготовки, що відбувається протягом тривалого часового інтервалу. Так, при опроміненні тонкостінних заготовок спостерігається зростання розмірів зони зміцнення після припинення підведення енергії випромінювання за рахунок її підігрівання відбитим від протилежної до опромінення стінки заготовки тепловим потоком. У масивній заготовці відмінності швидкостей руху ізотерми в глибину і уздовж її поверхні не настільки великі, і максимальні розміри зони зміцнення зазвичай виявляються в сусідніх кроках інтегрування (за часом). Як видно з рис. 13 розрахункові і експериментальні результати практично збігаються (відносна погрішність глибини зони не перевищує 3,7%,

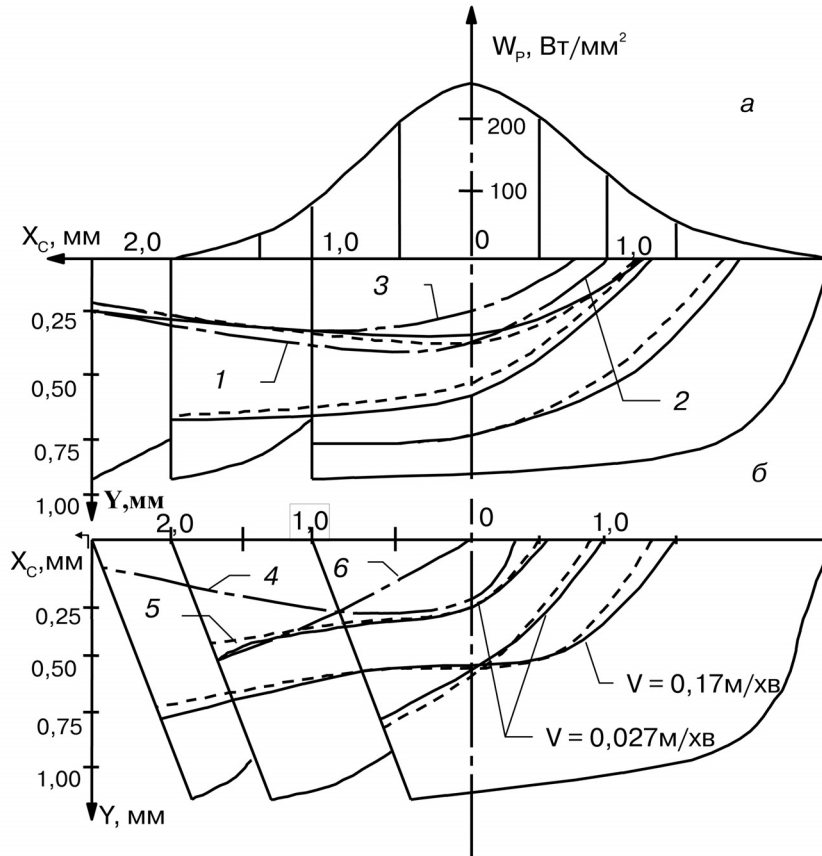
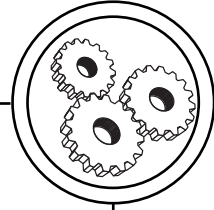


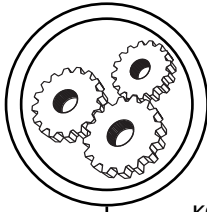
Рис. 13. Профіль зон зміцнення в заготовках обмежених розмірів і форми при різних положеннях пучка випромінювання на опромінюваній поверхні (- - - експериментальні результати; — — розрахункові положення ізоTERM: 1 — при $t = 0,1$ с від початку опромінювання; 2 — $t = 0,15$ с; 3 — $t = 0,35$ с; 4 — $t = 0,06$ с; 5 — $t = 0,1$ с; 6 — $t = 0,15$ с)

ширина — 4,2). На закінчення необхідно відзначити, що дані порівняльних досліджень розрахунковим і експериментальним шляхом розмірних характеристик зон зміцнення за різних умов опромінювання підтверджують достатню точність обчислювальних експериментів для аналізу температурних полів в заготовці при коректній постановці і рішенні задачі, тобто з врахуванням реальних температурних залежностей теп-

лофізичних властивостей матеріалу і поглинання поверхні заготовки, виміряного по розробленій методиці.

Висновки

1. Досить високий рівень збіжності розрахункових і експериментальних результатів дозволяє рекомендувати запропоновані методи для аналізу і проектування реальних операцій лазерної зміцнюючої обробки без оплавлення зон термічного впливу.



2. Працездатність розрахункових методів забезпечується лише при обліку нелінійних залежностей теплофізичних властивостей матеріалу заготовки, а також дійсного значення коефіцієнта поглинання її поверхні в температурному діапазоні $T_e - T_{\text{вип}}$.

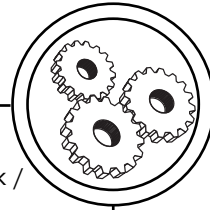
3. Уточнення поглинальних властивостей конструкційних матеріалів з урахуванням їх температурної залежності може здійснюватися за експериментально розрахунковою методикою на стенді шляхом порівняння фактичного і відновленого потоку випромінювання по фактичному тепловому потоку на нижньому кордоні зразка (одновимірною тепловою задачею).

4. Зважаючи на форми попереку зон термічного впливу, які вони мають внаслідок обраного шляху керування процесом опромінення, можна запропонувати в якості об'єкту дальших досліджень вирішення завдання розробки шляхів застосування додаткових засобів впливу на процес обробки для формування заданого попереку зони зміцнення.

5. В якості одного з додаткових факторів може застосовуватися розподіл інтенсивності в пучку випромінювання. Для його керування потрібна розробка елементів комп'ютерної оптики (дзеркал, лінз адаптивної конструкції).

Список використаної літератури

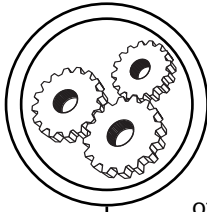
1. Котляров В. П. Технологія лазерної обробки. Підручник / В. П. Котляров. — Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2010. — 308 с.
2. Басс М. Я. Использование математического планирования эксперимента ПРИ разработке технологического процесса поверхностного упрочнения деталей лазером / М. Я. Басс, В. И. Тютюнников. — РУК. деп. в Союзтехноприбор, DP1085, 1979. — 9 с.
3. Коваленко В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, В. С. Черненко. — Киев : Техника, 1990. — 192 с.
4. Андрияхин В. М. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью CO₂-лазера непрерывного действия / В. М. Андрияхин, В. С. Майоров, В. П. Якунин // Поверхн. : Физ., хим., механика. — 1983 — № 6. — С. 140–147.
5. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, Н. И. Мисюра. — М. : МГТУ им. Баумана, 2008. — 664 с.
6. Веденов А. А. Физические процессы при лазерной обработке материалов / А. А. Веденов, Г. Т. Гладуш. — Л. : Машиностроение, 1986. — 216 с.
7. Рыкалин Н. Н. Расчет нелинейных задач лазерного нагрева металла / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. Ю. Самуров // Сб. : Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы. — М. : Наука, 1985. — С. 20–36.
8. Рыкалин А. А. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник // Н. И. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев и др. — М. : Машиностроение, 1985. — 496 с.
9. Киконин И. К. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И. К. Киконина. — М. : Атомиздат, 1976. — 1006 с.



10. Варгафтик Н. Б. Теплофизические свойства веществ. Справочник / Под ред. Н. Б. Варгафтика. — М. : Госэнергоиздат, 1956. — 376 с.
11. Неймарк Б. Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник / Под ред. Б. Е. Неймарка. — М. : Энергия, 1967. — 240 с.
12. Агафонов В. А. Измерение температурной зависимости коэффициента отражения металла, нагреваемого излучением CO₂-лазера / В. А. Агафонов, Я. М. Герд, В. А. Длугунович и др. // ЖПС. — 1986. — т. 45. — № 1. — С. 1–25.
13. Котляров В. П. Технологічне оснащення лазерних комплексів. Підручник / В. П. Котляров. — Київ : НТУУ «КПІ» ВПК «Політехніка», 2013. — 592 с.
14. Makinouchi S. Analysis of moving Gaussian heat source / S. Makinouchi, Y. Namba, E. Omura // Preprint of JSME. — 1980. — № 805–2.
15. Omura E. Laser Hardening Using Step Functional Heat Input / E. Omura, Y. Namba, S. Makinouchi // Bull. of JSME. — 1983. — v. 5. — № 7. — P. 1229–1233.
16. Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. — М. : Наука, 1978. — 306 с.

References

1. Kotliarov V. P. Tekhnolohiia lazernoj obrobky. Pidruchnyk / V. P. Kotliarov. — Nizhyn : NDU im. M. Hoholia, 2010. — 308 s.
2. Bass M. Ja. Ispol'zovanie matematicheskogo planirovanija jeksperimenta PRI razrabotke tehnologicheskogo processa poverhnostnogo uprochnenija detalej lazerom / M. Ja. Bass, V. I. Tjutjunnikov. — RUK. dep. v Sojuztehnopribor, DP1085, 1979. — 9 s.
3. Kovalenko V. S. Uprochnenie i legirovanie detalej mashin luchom lazera / V. S. Kovalenko, L. F. Golovko, V. S. Chernenko. — Kiev : Tehnika, 1990. — 192 s.
4. Andrijahin V. M. Raschet poverhnostnoj zakalki zhelezouglerodistyh splavov s pomoshh'ju SO₂-lazera nepreryvnogo dejstvija / V. M. Andrijahin, V. S. Majorov, V. P. Jakunin // Poverhn. : Fiz., him., mehanika. — 1983 — № 6. — S. 140–147.
5. Grigor'janc A. G. Tehnologicheskie processy lazernoj obrabotki / A. G. Grigor'janc, I. N. Shiganov, N. I. Misjura. — M. : MGTU im. Baumana, 2008. — 664 s.
6. Vedenov A. A. Fizicheskie processy pri lazernoj obrabotke materialov / A. A. Vedenov, G. T. Gladush. — L. : Mashinostroenie, 1986. — 216 s.
7. Rykalin N. N. Raschet nelinejnyh zadach lazernogo nagreva metalla / N. N. Rykalin, A. A. Uglov, I. Ju. Samurov // Sb. : Vozdejstvie koncentrirovannyh potokov jenergii na materialy. — M. : Nauka, 1985. — S. 20–36.
8. Rykalin A. A. Lazernaja i jelektronno-luchevaja obrabotka materialov. Spravochnik // N. I. Rykalin, A. A. Uglov, I. V. Zuev i dr. — M. : Mashinostroenie, 1985. — 496 s.
9. Kikonin I. K. Tablicy fizicheskikh velichin. Spravochnik / Pod red. I. K. Kikonina. — M. : Atomizdat, 1976. — 1006 s.
10. Vargaftik N. B. Teplofizicheskie svojstva veshhestv. Spravochnik / Pod red. N. B. Vargaftika. — M. : Gosjenergoizdat, 1956. — 376 s.
11. Nejmark B. E. Fizicheskie svojstva stalej i splavov, primenjaemyh v jenergetike. Spravochnik / Pod red. B. E. Nejmarka. — M. : Jenergija, 1967. — 240 s.



12. Agafonov V. A. Izmerenie temperaturnoj zavisimosti koeficienta otrazhenija metalla, nagrevaemogo izlucheniem SO₂-lazera / V. A. Agafonov, Ja. M. Gerd, V. A. Dlugunovich i dr. // ZhPS. — 1986. — t. 45. — № 1. — S. 1–25.

13. Kotliarov V. P. Tekhnolohichne osnashchennia lazernykh kompleksiv. Pidruchnyk / V. P. Kotliarov. — Kyiv : NTUU «KPI» VPK «Politehnika», 2013. — 592 s.

14. Makinouchi S. Analysis of moving Gaussian heat source / S. Makinouchi, Y. Namba, E. Omura // Preprint of JSME. — 1980. — № 805–2.

15. Omura E. Laser Hardening Using Step Functional Heat Input / E. Omura, Y. Namba, S. Makinouchi // Bull. of JSME. — 1983. — v. 5. — № 7. — P. 1229–1233.

16. Samarskij A. A. Metody reshenija setochnykh uravnenij / A. A. Samarskij, E. S. Nikolaev. — M. : Nauka, 1978. — 306 s.

Определены условия корректного применения численных методов решения уравнения теплопроводности при нагреве заготовки в результате облучения ее поверхности лазерным лучом. Приведены результаты учета нелинейностей I и II рода при обработке заготовок с чистой и покрытой поверхностью и использовании импульсного и непрерывного режима облучения. Корректность применяемых методик подтверждены высоким уровнем сходимости расчетных и экспериментальных результатов.

Ключевые слова: лазер, упрочнение, режимы лазерной обработки, уравнение теплопроводности, коэффициент поглощения.

The correct application terms of heat conductivity equalization decision numeral methods are certain at heating of purveyance as a result of its surface irradiation by a laser ray. The results of nonlinearity I and II view account are resulted at purveyances treatment with a clean and covered surface and use of the impulsive and continuous irradiation mode. Correctness of the applied methods is confirmed by the high level of calculation and experimental results convergence.

Keywords: laser, work-hardening, modes of laser treatment, equalization of heat conductivity, absorbance.

Рецензент — А. І. Жученко, д.т.н.,
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 24.12.14