

УДК 624.012

**ВПЛИВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЕННЯ НА ВАЖКИЙ БЕТОН**

**ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН**

**INFLUENCE OF LASER RADIATION ON HEAVY CONCRETE**

**Кархут І.І. к.т.н., доцент. (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)**

**Кархут И.И. к.т.н., доцент (Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов)**

**Karhut I.I. Ph.D., docent (National University "Lvivska Polytechnika", Lviv)**

**Наведено результати досліджень зразків кубів з важкого бетону на вплив лазерного випромінювання. Показано розподіл температур в зразках, зони впливу та руйнування поверхні, можливості обробки бетону, описано один з підходів до визначення НДС ділянки нагрівання.**

**Приведены результаты исследований образцов кубов из тяжелого бетона на воздействие лазерного излучения. Показано распределение температур в образцах, зоны влияния и разрушения поверхности, возможности обработки бетона, описан один из подходов к определению НДС участка нагрева.**

**The results of studies of samples of cubes of heavy concrete on the effects of laser radiation are presented. The temperature distribution in the samples, the zones of influence and surface destruction, the possibility of processing concrete are shown, one of the approaches to determining the stress-strain state of the heating section is described.**

**In the process of experimental studies, the appearance of “cold plasma” on the surface of the contact spot of ray and concrete was recorded. This phenomenon was recorded when testing cubes made of water-saturated concrete of all strength classes. When testing dry samples and at natural humidity, the plasma is not fixed. Moreover, in all samples, the formation of a layer of vitreous material up to 1 mm thick, separated from a concrete cube by a layer of a porous material such as cellular concrete, also about 1 mm thick, was recorded.**

**Vapors in this layer of free water from concrete and compounds, which are formed during the high-temperature destruction of cement stone, create an insulating layer. This layer does not allow the temperature to penetrate deep into concrete and creates opportunities for treating the surface of concrete**

(cleaning, etc.). Based on the results of the research, conclusions are drawn about the possibility of using a laser to treat the surface of concrete. Recommendations are also provided to reduce the effects of laser radiation on heavy concrete when operating protective structures.

**Ключові слова:** бетон, лазер, міцність, температурні напруження  
бетон, лазер, прочность, температурные напряжения  
concrete, laser, strength, temperature stress

**Вступ.** В багатьох країнах (Японія, США, Китай, Польща та ін. [16, 18, 24-26]) тривалий час проводяться дослідження впливу лазерного випромінення на поверхню різних будівельних матеріалів. Найбільш глибоко вивчено взаємодію лазерного випромінення з поверхнею металів [7]. В останні роки отримані результати досліджень впливу на такі будівельні матеріали як цегла, гіпс та комірковий бетон, які підтверджують можливості застосування лазера до обробки таких поверхонь [18-20].

Розвиток тріщин та градієнт напружень обмежується зонами стиску (ефект обойми) в матеріалі. Моделюванню даних процесів присвячені роботи [2-4, 9, 14]. Роботи [1, 6] присвячені розгляду проблем термодинаміки та теорії теплопередачі при високотемпературних процесах. В більшості випадків коректним вважається модель напівбезмежного простору [5, 6, 13].

Фазові перетворення в металах досліджені в роботі [14]. Дослідження термодинамічної поведінки композиційних матеріалів практично відсутні.

Значне поширення та розвиток технологічних процесів з використанням високих температур у різних галузях народного господарства (енергетика, металургія, хімічна та скляна промисловість, керамічні підприємства, гальванічні процеси і т.д.) зумовлює необхідність вивчення процесів взаємодії носіїв температури при їх місцевому контакті з конструкціями будівель промислових підприємств для підвищення надійності проектування, зокрема розрахунків міцності та деформативності. Для захисних конструкцій вивчення впливу місцевого високотемпературного навантаження в аварійному режимі також має велике значення. Правильне та більш точне врахування впливу теплового удару та місцевого нагрівання на несучі конструкції, в даному випадку на залізобетонні, дає можливість отримання економічного ефекту при проектуванні та будівництві споруд.

Особливістю лазерного нагрівання є його локальність (дія на обмеженій плямою променя поверхні), що призводить до появи тривимірних температурних полів та його короткочасність, що не дозволяє проявитись пластичним властивостям такого матеріалу, як бетон. В залежності від щільності потужності випромінення та тривалості його дії на матеріал в процесі взаємодії лазерного випромінення з речовиною виділено п'ять стадій:

1. Падіння і часткове відбиття випромінення,  $q > 0$ ;
2. Поглинання та нагрівання,  $q < 10^2$  Вт/см<sup>2</sup>;
3. Плавлення,  $q \approx 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>;

4. Ерозія,  $q=10^5 \div 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>;
5. Утворення плазми,  $q > 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Існуючі газові лазери мають потужність при неперервному випроміненні до 400 кВт та щільність потужності випромінення до  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>. Такі характеристики дозволяють проводити різноманітні технологічні операції з матеріалами і широко їх застосовувати, так як дана технологія має значні переваги перед традиційними: можливість обробляти мініатюрні деталі без контакту з інструментом, високу локалізацію лазерного впливу, можливість проходження через прозорі оболонки, легку зміну положення в просторі без складних пристроїв, значну продуктивність операцій, можливість управління температурою, наявність інформації про хід операції обробки, що дозволяє автоматизувати процес, безпеку використання інструменту, високу довговічність деталей після обробки, кращі умови праці та культуру виробництва. Крім того, високі енергії дозволяють швидко змінювати НДС матеріалу, як правило, в бік зростання напружень за рахунок розвитку температурних деформацій. Слабо вивчене питання взаємодії та можливості обробки лазерним випроміненням поверхні такого матеріалу як конструкційний важкий бетон, що, враховуючи великі обсяги та тривалий термін його використання, представляє значний інтерес.

**Експериментальні дослідження.** На кафедрі «Будівельні конструкції та мости» НУ «Львівська політехніка» проводяться дослідження впливу місцевого нагрівання на стан поверхні та міцність бетону [21-23]. Експерименти проводяться на звичайних важких бетонах трьох класів С12/15, С20/25, С30/35. В якості досліджуваних зразків прийнято кубики з ребром 100 та 150 мм.

У віці 28 діб частина кубів випробовувалась для визначення міцності при одноісному стиску, частина насичувалась водою, частина висушувалась. При цьому зразки зважувались з точністю  $\pm 2$  г для визначення об'ємної ваги та вологості. Зважування зразків проводилось перед силовими та термосиловими випробуваннями. Для одержання сухого бетону кубики витримувались у сушильній шафі при температурі  $105^\circ\text{C}$  протягом трьох діб і до випробування зберігались при температурі  $18-20^\circ\text{C}$  в герметичній тарі.

Водонасичені зразки зберігались у ваннах та випробовувались протягом 0,5-1 год після виймання. По два кубики кожного рівня вологості випробовувались на дію лазерного випромінення.

Бетон опромінювався протягом 3-5 хв газовими лазерами потужністю 100 Вт (перша серія, лазер ЛГН-703,) та 300 Вт (друга і третя серії, лазер ІЛГН-709). Довжина хвилі випромінення газового CO<sub>2</sub> лазера ІЛГН-709 - 10,6 мкм. Кубик розміщувався на віддалі 0,3-0,5 м від джерела випромінення. Точка нагрівання знаходилась в геометричному центрі грані. Термопари хром ель-алюмелеві розміщувались на поверхні зразків та в товщі бетону (рис. 1).

Температура зразків нормальної вологості вище  $100^\circ\text{C}$  піднімалась тільки в околі зони діаметром 13-16 мм, а в зоні контакту з променем досягала 1200-

1300 °С, що визначалось за кольором світіння бетону та за характером оплавлення та утворення склоподібної поверхні. Процес оплавлення бетону починався через 1,2-2 хв, тобто протягом 3 хв нагрівання перепад температур досягав 600 °С/мм. При огляді кубиків після випробувань нормальних температурних макротріщин не виявлено. Причиною цього явища може бути короткочасність дії температури та незначний об'єм бетону, на який вона розповсюджувалась. По відношенню до об'єму куба цей об'єм не перевищував 0,5-1,0%.

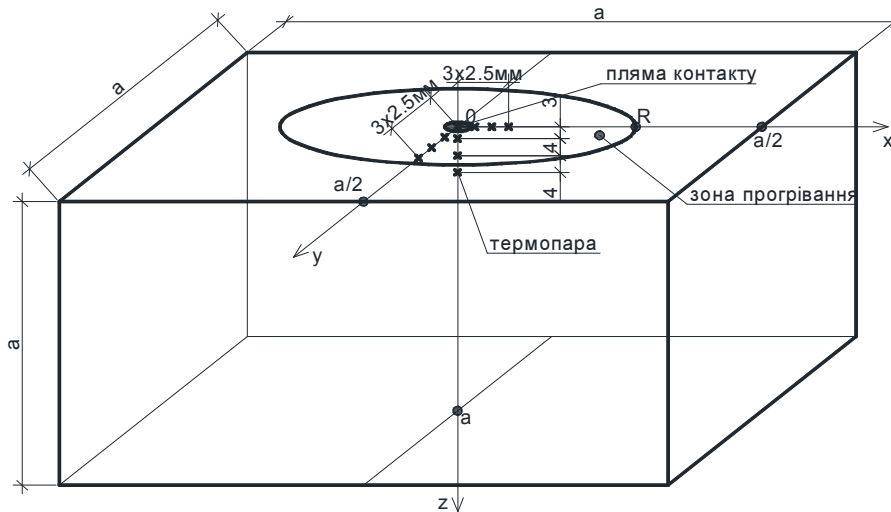


Рис.1 Схема до розрахунку температурного поля та розміщення термопар в бетонному кубу

Швидкість висушування водонасиченого бетону за рахунок вищої теплопровідності більша приблизно втричі, порівняно з бетоном нормальної вологості. Різке зростання температури бетону відбувається в околі двох діаметрів плями контакту з лазерним променем. Для бетону нормальної вологості зони впливу дуже ущільнені. Випаровування вологи з поверхні бетону починалось з першої секунди нагрівання і для бетону нормальної вологості продовжувалось 3-5 с, а для водонасиченого - протягом всього часу нагрівання. В місці нагрівання вплив на структуру бетону є серйозним (руйнуючим), а швидкість зростання кількості місцевих дефектів значною. Для встановлення обґрунтованих теоретичних залежностей були досліджені друга та третя серії кубиків.

**Результати досліджень.** Як видно з таблиць 1-3, по всій площі контакту променя з поверхнею бетону відбувався процес сплавлення його до склоподібної маси на глибину 2-3 мм, що починався через 1,5-2 хв нагрівання. Далі в околі діаметром до 40 мм за 5 хвилин нагрівання температура піднімалась вище 100 °С, тобто вільна волога з бетону видалалась. За час нагрівання температура в зоні контакту променя піднімалась до 1200-1300 °С, тобто перепад температур складав до 600 °С/мм. Дія такого градієнту протягом 3-5 хв нагрівання не призвела до утворення нормальних тріщин від температурних напружень через значний ефект

обойми. Акустично-емісійний контроль виявив утворення макротріщин від дотичних напружень, створених температурним градієнтом [21]. Після силових випробувань кубів встановлено, що розміри зон впливу випромінення не залежать від міцності бетону.

Таблиця 1

Характер впливу місцевого нагрівання на бетон кубиків першої серії

Зони впливу лазерного випромінення, мм	Середні для №№ зразків					
	13-14	61-62	85-86	87-88	65-66	89-90
Глибина оплавлення в зоні нагрів. бетону	2,0	3,2	2,5	1,5	2,0	2,0
Діаметр зони контакту променя з бетоном	7,5	9,0	8,0	6,0	6,5	7,5
Діаметр зони сплавлення бетону	7,5	10,0	8,0	7,0	8,0	8,8
Діаметр зони вилуговування цементного каменю	13,0	12,5	12,0	10,3	9,0	9,8
Діаметр зони реакцій дегідратації	17,0	18,0	19,5	11,5	9,6	11,0
Діаметр зони висушування	32,0	40,0	40,0	16,0	13,0	14,5
Діаметр зони нагрівання	46,0	52,0	52,0	24,0	15,5	16,5

Для досліджених класів бетону відхилення практично відсутні. Для всіх досліджених класів також характерна відсутність нормальних макротріщин, тобто оточуючий холодний бетон навіть при градієнті температур більше 1200 °С має достатній опір розтріскуванню.

Таблиця 2

Характер впливу місцевого нагрівання на бетон кубиків другої серії

Зони впливу лазерного випромінення, мм	Середні для №№ зразків					
	13-14	61-62	85-86	87-88	65-66	89-90
Глибина оплавлення в зоні нагрівання бетону	1,9	3,1	2,5	1,6	1,9	1,9
Діаметр зони контакту променя з бетоном	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Діаметр зони сплавлення бетону	7,5	7,7	7,5	8,0	7,9	8,0
Діаметр зони вилуговування цементного каменю	13,5	13,5	13,0	9,9	9,5	10,1
Діаметр зони реакцій дегідратації	18,5	18,5	20,5	11,8	10,0	11,0
Діаметр зони висушування	39,0	40,0	41,0	16,6	13,4	14,7
Діаметр зони нагрівання	48,0	52,0	51,0	25,5	16,5	16,6



Таблиця 3

## Характер впливу місцевого нагрівання на бетон кубиків третьої серії

Зони впливу лазерного випромінення, мм	Середні для №№ зразків					
	13-14	61-62	85-86	87-88	65-66	89-90
Глибина оплавлення в зоні нагрівання бетону	2,0	3,2	2,5	1,5	2,0	2,0
Діаметр зони контакту променя з бетоном	7,5	9,0	8,0	6,0	6,5	7,5
Діаметр зони сплавлення бетону	7,5	10,0	8,0	8,0	8,5	9,0
Діаметр зони вилуговування цементного каменю	13,0	12,5	12,0	11,2	9,0	9,4
Діаметр зони реакцій дегідратації	17,0	18,0	19,5	12,3	9,7	10,0
Діаметр зони висушування	42,5	44,0	43,0	18,0	13,0	13,5
Діаметр зони нагрівання	48,0	52,0	52,0	26,5	15,9	16,0

Проведені дослідження взаємодії лазерного випромінення з бетоном різного ступеня вологості дозволили вивчити якісну картину цього процесу, так як вологість дуже сильно впливає на електропровідність матеріалу, особливо такого як бетон, в структурі якого є багато оксидів та солей. При випробуваннях на дію лазера ЛГН-703 висушених, нормальної вологості та водо насичених кубиків була досягнута лише четверта стадія взаємодії, а саме – ерозія поверхні бетонного зразка. При цьому  $q$  становила  $(1\div 3)\cdot 10^2$  Вт/см<sup>2</sup>.

Для металів при такій щільності потужності випромінення відбувається тільки нагрівання. При цьому глибина зони термічного впливу на висушені та нормальної вологості зразки становила не більше 8 мм для однієї хвилини випробувань і 16 мм – для п'яти хвилин. Зона нагрівання по поверхні висушених та нормальної вологості зразків не перевищувала 30 мм у діаметрі для п'яти хвилин дії температурного навантаження. Опромінення газовим СО<sub>2</sub> лазером ІЛГН-709 з довжиною хвилі 10,6 мкм, що мав середню потужність 300 Вт та щільність потужності  $(0,6\div 1)\cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> призвело до досягнення п'ятої стадії взаємодії. Утворення плазми та поверхні водо насичених зразків відбувалось через 20-25 с після початку нагрівання. При цьому глибина зони нагрівання не перевищувала 25 мм [23], а діаметр 50 мм. Слід зауважити, що така щільність потужності випромінення в металах не викликає навіть плавлення. Проведені експериментальні дослідження показали, що для бетону пороги переходу стадій взаємодії значно знижуються порівняно з металами, особливо для водо насиченого (до 10<sup>3</sup>-

10<sup>4</sup>). На поверхні водо насичених зразків утворюється плазма горіння при щільності потужності 10<sup>3</sup> Вт/см<sup>2</sup>. При цьому на поверхні зразка утворюється склоподібний шар продуктів ерозії, слабо зв'язаний з основним масивом, який перешкоджає нагріванню глибших шарів бетону променистим теплом і коефіцієнт теплової дифузії в глибші шари бетону можна прийняти як для коміркового бетону.

Таблиця 4

Вплив лазерного випромінювання на бетон кубиків 1-ої серії (розміри зон, мм)

Зони впливу лазерного випромінювання	Крайова температура, °С	Вологість бетону W, %		
		0-1	29-35	99-100
Глибина зони сплавлення	1260	1,57	1,83	2,57
Діаметр зони сплавлення	1260	6,50	6,67	8,17
Діаметр зони спікання	650	8,43	8,50	10,50
Діаметр зони вилуговув.	500	9,50	9,67	12,50
Діаметр зони дегідратації	350	10,51	11,87	18,17
Діаметр зони висушув.	100	14,0	14,95	37,33
Діаметр зони нагрівання	20	19,0	25,0	50,00

Порівняння процесів теплообміну у висушеному, водо насиченому та природної вологості бетонах показує, що рівень вологості відіграє значну роль в регулюванні швидкості поширення теплового впливу. При зменшенні вологості швидкість поширення температури зменшується, а градієнт зростає [22]. Процес сплавлення складових бетону проходив на всій поверхні контакту променя з бетоном і проникав на глибину 1,5-2,6 мм. Склоподібна маса зони сплавлення мала дуже слабкий зв'язок з бетоном природної структури і легко відділялась від нього струменем повітря та води під тиском. Через 1,5-2 хв опромінення знову утворювався шар склоподібної структури, що сповільнював нагрівання глибших шарів і який треба було знову усувати механічним способом.

При огляді під мікроскопом було помічено крупні пори спів розмірні з порами у комірковому бетоні, через які з бетону випаровувалась вода та проходили її реакції зі складовими бетону і їх горіння у вигляді холодної плазми. Таке горіння було зафіксоване тільки при дослідженні всіх кубиків з водо насиченого бетону через 20-30 с після початку нагрівання і проходило впродовж усього часу експерименту.

Таблиця 5

Вплив лазерного випромінювання на бетон кубиків 2-ої серії (розміри зон, мм)

Зони впливу лазерного випромінювання	Крайова температура, °С	Вологість бетону W, %		
		0-1	29-35	99-100
Глибина зони сплавлення	1260	1,65	1,93	2,67
Діаметр зони сплавлення	1260	6,57	6,95	8,33
Діаметр зони спікання	650	8,53	9,74	11,26

Продовження таблиці 5

Діаметр зони вилуговування	500	9,59	10,41	13,48
Діаметр зони дегідратації	350	12,13	13,06	19,39
Діаметр зони висушування	100	14,47	16,09	37,84
Діаметр зони нагрівання	20	16,51	26,02	50,00

Таблиця 6

Вплив лазерного випромінювання на бетон кубиків третьої серії  
(розміри зон, мм)

Зони впливу лазерного випромінювання	Крайова температура, °C	Вологість бетону W, %		
		0-1	18-20	99-100
Глибина зони сплавлення	1260	1,76	2,06	2,72
Діаметр зони сплавлення	1260	6,57	7,16	8,71
Діаметр зони спікання	650	8,63	9,60	11,80
Діаметр зони вилуговування	500	9,72	10,88	14,05
Діаметр зони дегідратації	350	12,38	13,54	20,16
Діаметр зони висушування	100	15,09	17,05	38,32
Діаметр зони нагрівання	20	17,44	26,22	50,50

**Теоретичні основи розрахунків.** Рівняння теплопровідності для даного випадку відоме:

$$T(z, r) = \frac{q}{2\pi K \delta} \exp\left(-\frac{Vx}{2a}\right) K_0\left(\frac{Vr}{2a}\right) \quad (1)$$

де  $\delta$  – товщина зразка,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  – радіус-вектор;

$K_0$  – модифікована функція Бесселя другого роду нульового порядку;

$K$  – коефіцієнт теплопередачі бетону.

В нашому випадку  $V_x=0$ , так як промінь нерухомий. Тоді рівняння спрощується до вигляду:

$$T(z, r) = \frac{q}{2\pi K \delta} \quad (2)$$

Ця залежність дає можливість якісно оцінити та описати результати експерименту без врахування розмірів плями контакту променя з бетоном при визначенні глибини нагрівання бетону.

Застосування залежності 2) для бетону призводить до появи значних відхилень від експериментальних даних.

Для зменшення їх було введено емпіричний поправочний коефіцієнт  $10^{-4}$ . На рис. 2 наведено графіки порівняння експериментальних та теоретичних температур по глибині кубика.



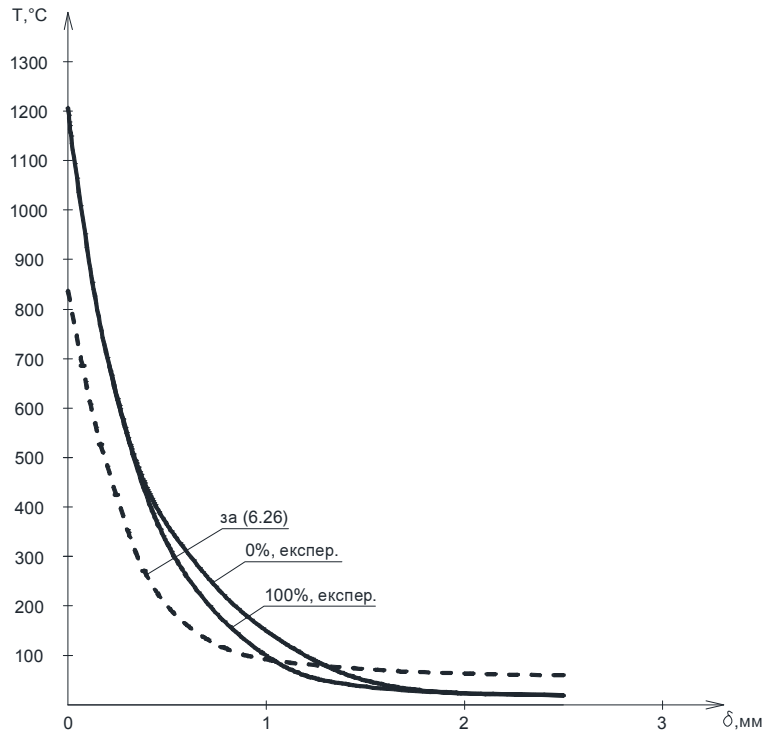


Рис. 2 Температура нагрівання бетону від лазерного випромінення за глибиною зразків

Відхилення є дуже значними, більше 50% навіть при введенні поправки, хоча якісно картина температурного градієнту по глибині зони нагрівання є подібною. В цілому, необхідно більш точне відображення різної природи матеріалів (сталі і бетону) та їх властивостей для правильного описання процесу нагрівання бетону від лазерного місцевого впливу.

Для цього запропоновані загальні теоретичні залежності вирішення температурної задачі імпульсного нагрівання бетону в точці кінцевих розмірів в нескінченному півпросторі. Радіус зони впливу лазерного випромінення позначено через  $R$ , радіус точки контакту лазерного променя з бетоном –  $r_0$ . Форма кривих (рис. 3) в нашому випадку залежить від рівня вологості бетону. Координати  $x$ ,  $y$  та  $z$  обмежені розмірами кубика з ребром  $a$ .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T \left( \pm \frac{a}{2}, y, z \right)}{\partial x} = 0 \quad \text{при} \quad -\frac{a}{2} \leq y \leq \frac{a}{2}, \quad 0 \leq z \leq a; \quad (4)$$

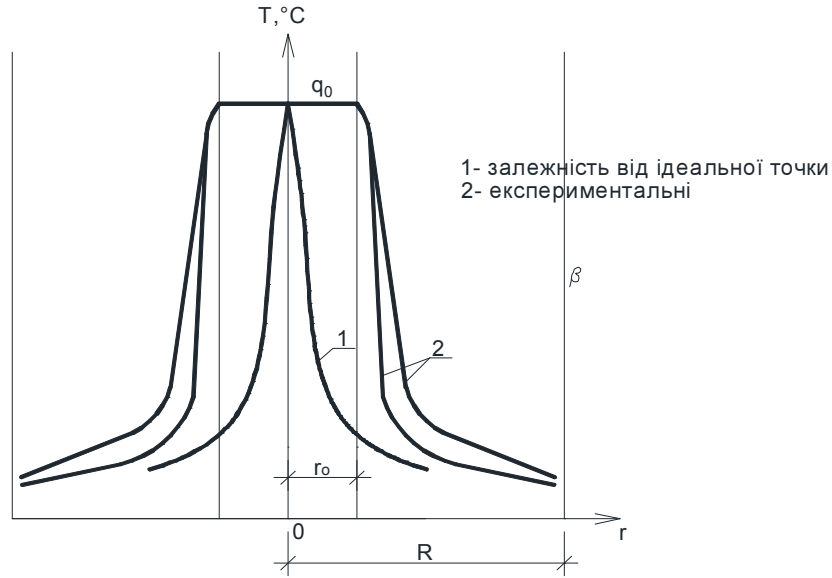


Рис. 3 До розрахунку температурних полів при точковому лазерному нагріванні бетону

$$\frac{\partial T\left(x, \pm \frac{a}{2}, z\right)}{\partial y} = 0 \quad \text{при} \quad -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, \quad 0 \leq z \leq a; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(x, y, a)}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, \quad -\frac{a}{2} \leq y \leq \frac{a}{2}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T(x, y, 0)}{\partial z} = -q_0 \exp(-\beta(x^2 + y^2)) S_-(R - \sqrt{x^2 + y^2}) - \alpha_c(T_c - T) - \alpha_r(T_c - T) \quad (7)$$

$$\text{при} \quad -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, \quad -\frac{a}{2} \leq y \leq \frac{a}{2};$$

де  $a$  – розміри бетонного зразка.

Температурне поле в даному випадку є просторовим і змінним в часі до моменту встановлення рівноваги процесів теплообміну.

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z), \quad S_-(x) - \text{функція, зі значеннями} \quad S_-(x) = \begin{cases} 1, x \geq 0; \\ 0, x < 0. \end{cases}$$

$\alpha_c$  – коефіцієнт теплообміну конвекцією (як для коміркового бетону);  $\alpha_r$  – коефіцієнт теплообміну випромінення (для водонасиченого бетону  $\alpha_r \neq 0$ ).

Розрахункові температурні поля порівнювались з експериментальними. Проведені експериментальні дослідження та теоретична обробка дозволили встановити відмінності теплових процесів при точковому нагріванні бетону та металів і оцінити причини відмінностей.

## Висновки

За результатами досліджень можна зробити наступні висновки:

- 1) вплив короточасного місцевого нагрівання на структуру бетону в зоні дії температур є значним, аж до руйнування поверхневих шарів;
- 2) дія точкового лазерного нагрівання протягом 5 хв. не призвела до появи нормальних макротріщин в бетоні кубиків через вплив ефекту обойми;
- 3) дія градієнту температур до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$  протягом 3-5 хв. не знизила міцності бетону стандартних бетонних кубиків, так як об'єм нагрітого бетону не перевищував 0,5-1% об'єму зразка;
- 4) зафіксовано хаотичне утворення макротріщин в поверхневому шарі бетону від дії дотичних температурних напружень;
- 5) пороги між стадіями роботи при контакті променя з бетоном значно знижені порівняно з порогами для металів;
- 6) у водо насиченому бетоні при щільності потужності випромінення  $10^3\text{ Вт}/\text{см}^2$  досягається п'ята стадія взаємодії – горіння плазми на поверхні з додатковим променистим теплообміном;
- 7) при розрахунку температурних полів можна використовувати запропоновані залежності з врахуванням наявності пористого шару між бетоном та склоподібною масою на контакті;
- 8) для обробки (чищення) поверхні бетону можна застосовувати лазерні технології з рухомим променем з тепловим впливом плями контакту 2-4 с на кожному місці;
- 9) для обробки бетону вглиб нерухомим променем необхідно механічним способом (стиснене повітря або вода) періодично видаляти шар склоподібної маси з поверхні контакту.

1. Анищенко Л.М., Лавренюк С.Ю. Математические основы проектирования высокотемпературных технологических процессов. –М.: Наука, 1986. -77с.

Anyshchenko L.M., Lavreniuk S.Iu. Matematycheskye osnovy proektyrovaniya vysokotemperaturnykh tekhnolohycheskykh protsessov. –М.: Nauka, 1986. -77s.

2. Апанасевич П.А. Основы теории взаимодействия света с веществом. – Минск: Наука и техника, 1977. – 496с.

Apanasevych P.A. Osnovy teoryy vzaymodeistviya sveta s veshchestvom. – Mynsk: Nauka y tekhnika, 1977. – 496s.

3. Апполонов В.В., Барчуков А.И., Карлов Н.В. и др. Термическое воздействие мощного лазерного излучения на поверхности твердого тела //Квантовая электроника. – 1975. –Т.2. – С.380-390.

Appolonov V.V., Barchukov A.Y., Karlov N.V. y dr. Termicheskoye vozdeistviye moshchnoho lazernoho yzlucheniya na poverkhnosty tverdoho tela //Kvantovaia elektronika. – 1975. –Т.2. – С.380-390.

4. Апполонов В.В., Прохоров А.М., Хомич В.Ю. и др. Термоупругое воздействие импульсно-периодического лазерного излучения на поверхность твердого тела //Квантовая электроника. – 1975. –Т.2. – С.380-390.

Appolonov V.V., Prokhorov A.M., Khomych V.Iu. y dr. Termoupruhoye vozdeistviye ympulsno-peryodycheskoho lazernoho yzlucheniya na poverkhnost tverdoho tela //Kvantovaia elektronika. – 1975. –Т.2. – С.380-390.

5. Бреховских В.Ф., Кокора А.Н., Углов А.А. Определение вида пространственного распределения мощности теплового источника при действии луча лазера на сталь //Физ. и химия обработки материалов. - 1967. - №2. - С.7-13.

Brekhovskiykh V.F., Kokora A.N., Uhlov A.A. Opredelenye vyda prostranstvennoho raspredeleniya moshchnosti teplovoho ystochnyka pry deistvyuy lucha lazera na stal //Fyz. y khymyia obrabotky materyalov. - 1967. - №2. - S.7-13.

6. Веденов А.А., Гладун Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. - М.: Энергоавтомиздат, 1985.-208с.

Vedenov A.A., Hladun H.H. Fyzycheskiye protsessy pry lazernoі obrabotke materyalov. - M.: Enerhoavtomyzdat, 1985.-208s.

7. Коваленко В.С. Лазерная технология. К., “Вища школа”, 1989.

Kovalenko V.S. Lazernaia tekhnolohyia. K., “Vyshcha shkola”, 1989.

8. Коляно Ю.М., Кулик А.Н. Температурные напряжения от объемных источников. - Киев: Наук. думка, 1983.–288с.

Koliano Yu.M., Kulyk A.N. Temperaturnyye napriazheniya ot ob'emykh ystochnykov. - Kyev: Nauk. dumka, 1983.–288s.

9. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов: Справочник /Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. – Машиностроение, 1985. – 496с.

Lazernaia y elektronno-luchevaia obrabotka materyalov: Spravochnyk /Rykalyn N.N., Uhlov A.A., Zuev Y.V., Kokora A.N. – Mashynostroeniye, 1985. – 496s.

10. Леонтьев П.А., Чеканова Н.Т., Хан М.Т. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1988. – 143с. 11. Летохов В.С., Устимов Н.Д. Мощные лазеры и их применение. – М.: Сов.радио, 1980. – 112с.

Leontev P.A., Chekanova N.T., Khan M.T. Lazernaia poverkhnostnaia obrabotka metallov y splavov. – M.: Metallurhiya, 1988. – 143s. 11. Letokhov V.S., Ustymov N.D. Moshchnyye lazery y ykh pryumeneniye. – M.: Sov.radyo, 1980. – 112s.

12. Либенсон М.Н., Романов Г.С., Имас Я.А. Учет влияния температурной зависимости оптических постоянных металла на характер его нагрева излучением ОКГ //Журнал технической физики. -1968. – Т.38, вып. 7. – С.1116-1119.

Lybenson M.N., Romanov H.S., Ymas Ya.A. Uchet vlyaniya temperaturnoi zavysymosty optycheskykh postoiannykh metalla na kharakter eho nahreva yzluchenyem OKH //Zhurnal tekhnicheskoi fyzyky. -1968. – Т.38, вып. 7. – S.1116-1119.

13. Макаров Н.И., Рыкалин Н.Н., Углов А.А. О выборе схемы расчета температурного поля пластин при сварке световым потоком лазера //Физика и химия обработки материалов. – 1967. -№3. – С.9-15.

Makarov N.Y., Rykalyn N.N., Uhlov A.A. O vybere skhemy rascheta temperaturnoho polia plastyn pry svarke svetovym potokom lazera //Fyzyka y khymyia obrabotky materyalov. – 1967. -№3. – S.9-15.

14. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы/ А.А. Углов, И.Ю. Смуров, А.М. Лашин, А.Г. Гуськов. – М.: Наука, 1991. – 288с.

Modelyrovanye teplofyzycheskykh protsessov ympulsnoho lazernoho vozdeistviya na metally/ A.A. Uhlov, Y.Iu. Smurov, A.M. Lashyn, A.H. Huskov. – M.: Nauka, 1991. – 288s.

15. Прохоров А.М., Копов В.И., Урсу И., Михаилеску И.Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. -М.: Наука, 1988. – 537с.

Prokhorov A.M., Kopov V.Y., Ursu Y., Mykhaylesku Y.N. Vzaymodeistviye lazernoho yzlucheniya s metallamy. -M.: Nauka, 1988. – 537s

16. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. – М.:Мир, 1974. – 468с.  
 Rэdy Dzh. Deistvye moshchnoho lazernoho yzlucheniya. – М.:Мир, 1974. – 468s.
17. Рэди Дж. Промышленное применение лазеров. – М.: Мир, 1981. – 638 с.  
 Rэdy Dzh. Promyshlennoe pryumenenye lazerov. – М.: Мир, 1981. – 638 s.
18. Roźniakowski K. Zastosowanie promieniowania laserowego w badaniach i modyfikacji właściwości materiałów budowlanych. Polska academia nauk. Studia z zakresu inżynierii NR 50. Warszawa-Łódź -2001, s 200.
19. Romanowska A., Jablonski M. Kompozyt gipsowy o podwyższonej akumulacji ciepła. Polska academia nauk. Studia z zakresu inżynierii NR 50. Warszawa-Łódź -2001, s 102.
20. Gawin D., Kośny J., Wilkes K. Wpływ zawartości wilgoci na dokładność pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła betonu komórkowego metodą stacjonarną. Polska academia nauk. Studia z zakresu inżynierii NR 50. Warszawa-Łódź -2005, s 88.
21. Кархут І.І., Була С.С., Сорока Я.В. Розподіл температури в об'ємі бетону при дії теплового удару, як виду місцевого нагріву. VII Міжнародний симпозіум «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій». Київ. 2007, вип.7, с.191-197.  
 Karkhut I.I., Bula S.S., Soroka Ya.V. Rozpodil temperatury v obiemі betonu pry dii teplovoho udaru, yak vydu mistsevoho nahrivu. VII Mizhnarodnyi sympozium «Mekhanika i fizyka ruinuvannya budivelnykh materialiv i konstruktsii». Kyiv. 2007, vyp.7, s.191-197.
22. Кархут І.І., Демчина Б.Г., Була С.С. Дослідження процесів тріщиноутворення у бетоні при дії теплового удару із застосуванням методу акустичної емісії. Вісник. №600. Теорія і практика будівництва. Львів, 2007, с.79-83.  
 Karkhut I.I., Demchyna B.H., Bula S.S. Doslidzhennia protsesiv trishchynoutvorennya u betoni pry dii teplovoho udaru iz zastosuvanniam metodu akustychnoi emisii. Visnyk. №600. Teoriia i praktyka budivnytstva. Lviv, 2007, s.79-83.
23. Кархут І.І., та ін. “Експериментальне дослідження взаємодії лазерного випромінювання з конструкційним бетоном // Вісник, ДУ “Львівська політехніка”, №360, 1998р., С.78-81.  
 Karkhut I.I., ta in.. “Eksperymentalne doslidzhennia vzaiemodii lazernoho vyprominiuvannya z konstruktsiinym betonom // Visnyk, DU “Lvivska politekhnika”, №360, 1998r., S.78-81.
24. Hamasaki M. Experimental cutting of biological shield concrete using laser. Proc. International Symposium on Laser Processing. Tokio, 1987.
25. Wignarajan S. New horizons for high-power lasers: applications in civil engineering. Proceeding SPIE, v 3887-01, pp. 34-44 (1999).
26. Kamata H. Study on methods for decontaminating concrete surface by laser treatment. Review of Laser Engineering. v 24-2, pp. 182-199 (1996).