

ВПЛИВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЕННЯ НА ВАЖКИЙ БЕТОН

© Кархут І. І., 2017

У багатьох країнах (Японія, США, Китай, Польща та ін.) тривалий час проводяться дослідження впливу лазерного випромінювання на поверхню різних будівельних матеріалів, зокрема у військових цілях. Глибше вивчено взаємодію лазерного випромінювання з поверхнею металів. В останні роки значну увагу вчені приділяють вивченню впливу лазерного випромінювання на поверхню бетонів: досліджуються температурні поля, хімічні реакції та напружено-деформований стан в області нагрівання, можливості технологічних впливів на поверхню таких будівельних матеріалів як цегла, гіпс та комірковий бетон, які підтверджують можливості застосування лазера до обробки їх поверхонь. У результаті досліджень зразків кубів з важкого бетону на вплив імпульсного лазерного випромінювання, проведених на кафедрі будівельних конструкцій та мостів отримано п'яту стадію взаємодії лазерного променя з бетоном – холодну плазму на поверхні водо насичених зразків. Досліджено також висушені зразки та зразки природної вологості у віці до двох років. Модельовано аварійний режим роботи захисних конструкцій при високотемпературному місцевому впливі. Вивчено розподіл температур на поверхні та в товщі зразків, зони впливу та руйнування поверхні протягом п'яти хвилин нагрівання. Виявлено особливості руйнування поверхні контакту. З допомогою акустично-емісійного контролю виявлено утворення нормальних макротріщин у бетоні в околі нагрівання. Проаналізовано можливості застосування відомих теоретичних залежностей для опису температурних полів у бетонних зразках, застосування коефіцієнта теплової дифузії, отриманого іншими авторами при дослідженні коміркового бетону.

Ключові слова: бетон, лазер, міцність, температурні напруження.

I. Karkhut

Lviv Polytechnic National University,
Department of building construction and bridges

INFLUENCE OF LASER RADIATION ON CONCRETE

© Karkhut I., 2017

In many countries (Japan, USA, China, Poland, etc.) the studies of the influence of laser radiation on the surface of various building materials are being carried out for a long time, including the military purposes. Most attention has been paid to the interaction of laser radiation with the surface of metals. In recent years, considerable attention has been paid to the study of the influence of laser radiation on the surface of concrete: the temperature fields, chemical reactions and stressed-deformed state in the field of heating, the possibility of technological influences on the surface of such building materials as brick, gypsum and cell concrete, confirming the possibility of application laser for processing their surfaces. As a result of studies of concrete cube samples on the influence of pulsed laser radiation, conducted on the Department of building construction and bridges, the fifth stage of the interaction of a laser beam with concrete was obtained – a cold plasma on the surface of water-saturated specimens. Dried specimens and samples with natural moisture up to two years age have also been studied. The emergency mode of work of protective structures at high-temperature local

influence was modeled. The distribution of temperatures on the surface and in the thickness of the samples, the zones of influence and the destruction of the surface during five minutes of heating have been studied. The features of contact surface destruction are revealed. With the help of acoustic emission control, the formation of normal macro crushes in concrete in the vicinity of heating was found. The possibilities of application of available theoretical dependences for the description of temperature fields in concrete samples, application of the coefficient of thermal diffusion obtained by other authors in the investigation of cellular concrete have been analyzed.

Key words: concrete, laser, strength, temperature stresses.

Вступ. У багатьох країнах (Японія, США, Китай, Польща та ін.) тривалий час проводяться дослідження впливу лазерного випромінювання на поверхню різних будівельних матеріалів, зокрема у військових цілях. Найглибше вивчено взаємодію лазерного випромінювання з поверхнею металів. В останні роки значну увагу вчені приділяють вивченню впливу лазерного випромінювання на поверхню бетонів: досліджуються температурні поля, хімічні реакції та напружено-деформований стан у царині нагрівання, можливості технологічних впливів на поверхню таких будівельних матеріалів як цегла, гіпс та комірковий бетон, які підтверджують можливості застосування лазера до обробки їхніх поверхонь.

Огляд наукових джерел та публікацій. Найглибше вивчено взаємодію лазерного випромінювання з поверхнею металів [4] та підтверджено можливості застосування лазера до обробки поверхонь [8, 9, 13]. Розвиток тріщин та градієнт напружень обмежується зонами стиску (ефект обійми) в матеріалі. Моделюванню цих процесів присвячені роботи [2, 5, 7]. Робота [1] присвячена розгляду проблем термодинаміки та теорії теплопередачі при високотемпературних процесах. У більшості випадків коректним вважається модель безмежного напівпростору [3, 6].

Фазові перетворення досліджені в роботі [7], де наведені математичні моделі та методи розв'язку тепло-масопереносу в металах, зокрема з врахуванням нелінійності. Дослідження термодинамічної поведінки композиційних матеріалів майже відсутні.

Значне поширення та розвиток технологічних процесів з використанням високих температур у різних галузях народного господарства (енергетика, металургія, хімічна та скляна промисловість, підприємства будівельної кераміки, гальванічні виробництва тощо) зумовлює необхідність вивчення процесів взаємодії носіїв температури за їх місцевого контакту з несучими 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 точніше врахування впливу теплового удару та місцевого нагрівання на несучі конструкції, в цьому випадку на залізобетонні, уможливило отримання економічного ефекту під час проектування та будівництва захисних 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. Залежно від щільності потужності випромінювання та тривалості його дії на матеріал у процесі взаємодії лазерного випромінювання з речовиною виділено п'ять стадій:

1. Падіння і часткове відбиття випромінювання, $q > 0$;
2. Поглинання та нагрівання, $q < 10^2$ Вт/см²;
3. Плавлення, $q \approx 10^5$ Вт/см²;
4. Ерозія, $q = 10^5 \div 10^8$ Вт/см²;
5. Утворення плазми, $q > 10^7$ Вт/см².

Для неперервного випромінювання щільність потужності випромінювання q визначають залежно від площі плями фокусування S та середньої потужності $P_{сер}$:

$$q = \frac{P_{сер}}{S}. \quad (1)$$

Існуючі газові лазери мають потужність при неперервному випромінненні до 400 кВт та щільність потужності випроміннення до 10^{16} Вт/см². Такі характеристики швидко змінюють НДС матеріалу, зазвичай у бік зростання напружень за рахунок розвитку температурних деформацій. Наведена вище схема взаємодії з матеріалом (на прикладі металу) є досить умовною. Параметри лазерного випроміннення, властивості матеріалу та навколишнє середовище вносять корективи в неї. Слабко вивчене питання взаємодії та можливості обробки лазерним випромінненням поверхні такого матеріалу як конструкційний важкий бетон, що, враховуючи великі обсяги та тривалий термін його використання, становить чималий інтерес.

Експериментальні дослідження. В останні роки на кафедрі будівельних конструкцій та мостів Нац. ун-ту “Львівська політехніка” проводяться дослідження впливу місцевого нагрівання на міцність бетону [10-12]. Експерименти проводяться на звичайних важких бетонах трьох класів С12/15, С20/25, С30/35. Як досліджувані зразки прийнято кубики з ребром 100 та 150 мм. У віці 28 діб частина кубів випробовувалась для визначення міцності при одновісному стиску, частина насичувалась водою, частина висушувалась. При цьому зразки зважувались із точністю ± 2 г для визначення об’ємної ваги та вологості. Зважування зразків проводилось у віці трьох діб, одного, трьох, шести і дванадцяти місяців, перед силовими та термосиловими випробуваннями. Для одержання сухого бетону кубики витримувались у сушильній шафі при температурі 105 °С протягом трьох діб і до випробування зберігались при температурі 18–20 °С у 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 випроміннення.

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 випроміннення газового СО₂ лазера ІЛГН-709 – 10,6 мкм. Кубик розміщувався на віддалі 0,5 м від джерела випроміннення (при випробуваннях першої серії віддаль становила 0,3 м). Точка нагрівання знаходилась у геометричному центрі грані. Термопари хромель-алюмелеві розміщувались на поверхні зразків та в товщі бетону (рис. 1).

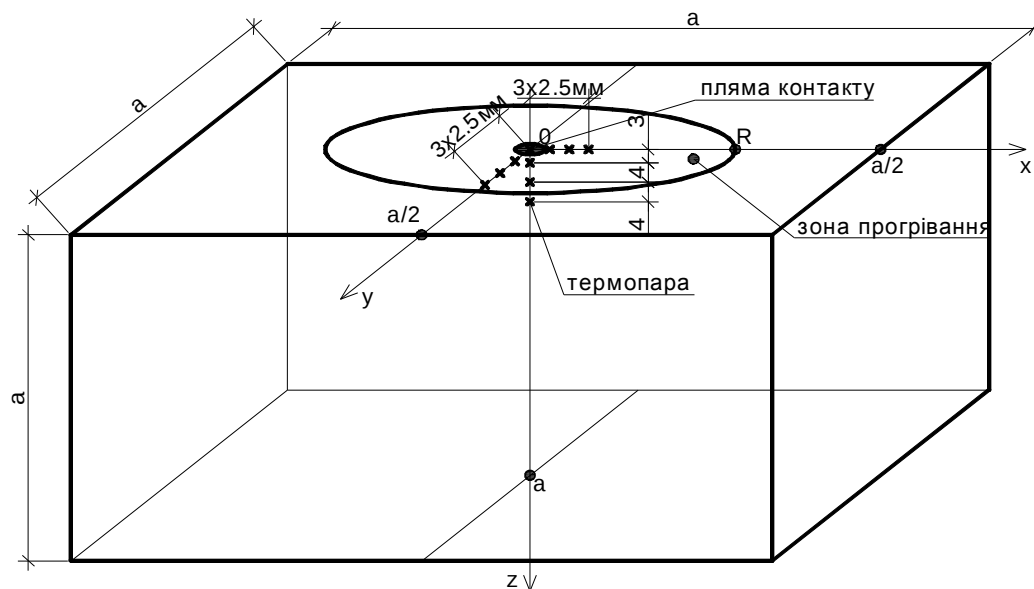


Рис. 1. Схема до розрахунку температурного поля та розміщення термопар в бетонному кубіку

Температура зразків нормальної вологості вище за 100 °С піднімалась тільки в околі зони діаметром 13–16 мм, а в зоні контакту з променем досягала 1200–1300 °С, що визначалось

тепловізором 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. Стосовно об'єму куба цей об'єм не перевищував 0,5–1,0 %. 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 усього часу нагрівання. У місці нагрівання вплив на структуру бетону є серйозним (руйнівним), а швидкість зростання кількості місцевих дефектів значною. Для встановлення обґрунтованих теоретичних залежностей були досліджені друга та третя серії кубиків.

Як видно з табл. 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 хв. нагрівання температура піднімалась вище за 100 °С, тобто вільна волога з бетону видалялась. 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 [10]. Після силових випробувань кубів встановлено, що розміри зон впливу випромінювання не залежать від характеристик міцності бетону.

Таблиця 1

Характер впливу місцевого нагрівання на бетон кубиків першої серії

Зони впливу лазерного випромінювання, мм	Середні для № зразків					
	13–14	61–62	85–86	87–88	65–66	89–90
Глибина оплавлення в зоні нагрівання	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

Таблиця 2

Характер впливу місцевого нагрівання на бетон кубиків другої серії

Зони впливу лазерного випромінювання, мм	Середні для № зразків					
	13–14	61–62	85–86	87–88	65–66	89–90
Глибина оплавлення в зоні нагрівання	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

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.

Характер впливу місцевого нагрівання на бетон кубиків третьої серії

Зони впливу лазерного випромінювання, мм	Середні для № зразків					
	13–14	61–62	85–86	87–88	65–66	89–90
Глибина оплавлення в зоні нагрівання	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 вилугування 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 випромінювання з бетоном різного ступеня вологості дозволили вивчити якісну картину цього процесу, оскільки 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 водонасичених кубиків була досягнута лише четверта стадія взаємодії, а саме – ерозія поверхні бетонного зразка. При цьому q становила $(1\div 3) \cdot 10^2$ Вт/см².



Рис. 2. П'ята стадія взаємодії (горіння плазми) на поверхні водонасиченого бетонного зразка

Для металів за такої щільності потужності випромінювання відбувається тільки нагрівання. При цьому глибина зони термічного впливу на висушені та нормальної вологості зразки становила не більше ніж 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. Опромінювання газовим CO₂ лазером ЛГН-709 з довжиною хвилі 10,6 мкм, що мав середню потужність 300 Вт та щільність по-

тужності $(0,6\div 1) \cdot 10^3$ Вт/см² призвело до досягнення п'ятої стадії взаємодії. Утворення плазми та поверхні водонасичених зразків відбувалось через 20–25 с після початку нагрівання (рис. 2). При цьому глибина зони нагрівання не перевищувала 25 мм [11, 12], а діаметр – 50 мм.

Проведені експериментальні дослідження показали, що для бетону пороги переходу стадій взаємодії значно знижуються порівняно з металами, особливо для водонасиченого (до 10^3 – 10^4). На поверхні водонасичених зразків утворюється плазма горіння при щільності потужності 10^3 Вт/см². При цьому на поверхні зразка утворюється склоподібний шар продуктів ерозії, слабо зв'язаний з основним масивом, який перешкоджає нагріванню глибших шарів бетону променистим теплом.

Порівняння процесів теплообміну у висушеному, водонасиченому та природної вологості бетонах показує, що рівень вологості відіграє важливу роль у регулюванні швидкості поширення теплового впливу. При зменшенні вологості швидкість поширення температури зменшується, а градієнт зростає (рис. 3). Процес сплавлення складових бетону проходив на всій поверхні контакту променя з бетоном і проходив на глибині до 1,5–2,6 мм.

Таблиця 4

Вплив лазерного випромінення на бетон кубиків першої серії (розміри зон, мм)

Зони впливу лазерного випромінювання	Крайова температура, °C	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 вилугування	500	9,50	9,67	12,50
Діаметр зони дегідратації	350	10,51	11,87	18,17
Діаметр зони висушування	100	14,0	14,95	37,33
Діаметр зони нагрівання	20	19,0	25,0	50,00

Таблиця 5

Вплив лазерного випромінення на бетон кубиків другої серії (розміри зон, мм)

Зони впливу лазерного випромінювання	Крайова температура, °C	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
Діаметр зони вилугування	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

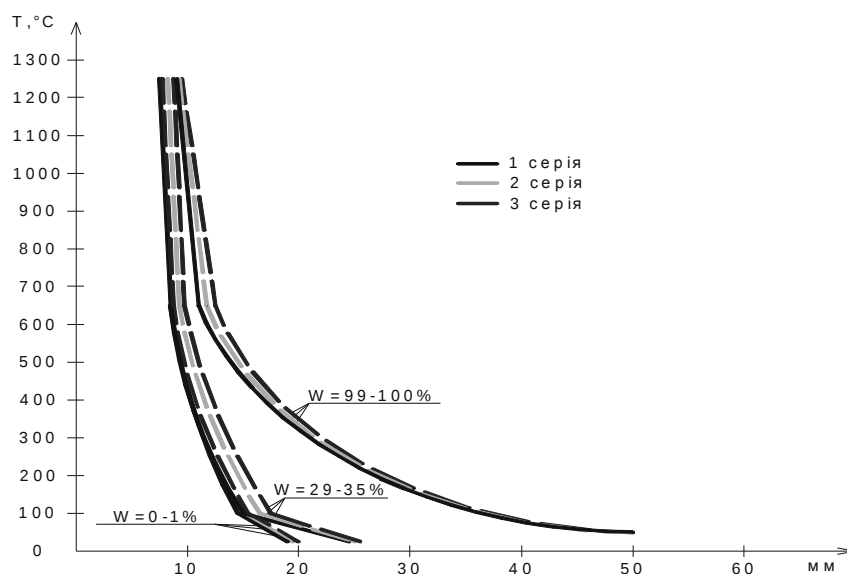


Рис. 3. Градієнти температур у бетонних кубиках залежно від рівня вологості

Таблиця 7

Вплив лазерного випромінення 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 вилугування	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

Під час огляду під мікроскопом було помічено крупні пори, співрозмірні 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, тому коефіцієнт теплової дифузії в глибші шари бетону можна прийняти як для коміркового бетону. Таке горіння було зафіксоване тільки під час дослідження всіх кубиків з водонасиченого бетону через 20–30 с після початку нагрівання і проходило впродовж усього часу експерименту.

Рівняння теплопровідності для цього випадку відоме:

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

де δ – товщина зразка, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – радіус-вектор; K_0 – модифікована функція Бесселя другого роду нульового порядку; K – коефіцієнт теплопередачі бетону.

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

$$T(z, r) = \frac{q}{2pKd} \quad (3)$$

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 3 для бетону призводить до появи значних відхилень від експериментальних даних.

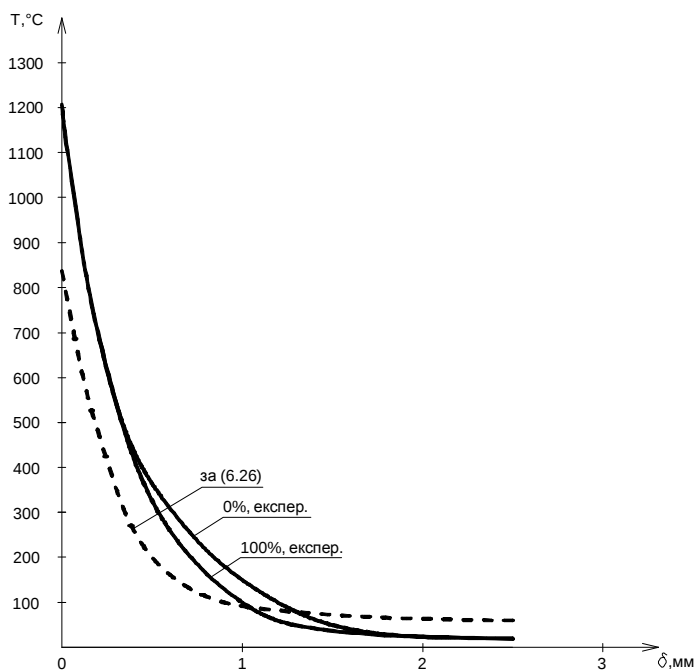


Рис. 4. Температура нагрівання бетону від лазерного випромінювання за глибиною зразків

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

Відхилення є дуже значними, більше ніж 50 % навіть при введенні поправки, хоча якісно картина температурного градієнту за глибиною зони нагрівання є подібною. Загалом необхідно точніше відображення різної природи матеріалів (сталі і бетону) та їх властивостей для правильного описання процесу нагрівання бетону від лазерного місцевого впливу.

Сьогодні розроблено загальні теоретичні залежності вирішення температурної задачі імпульсного нагрівання бетону в точці кінцевих розмірів у нескінченному півпросторі на основі отриманих експериментальних даних. Проведені експериментальні дослідження та теоретична обробка дозволять встановити відмінності теплових процесів при точковому нагріванні бетону та металів і оцінити причини відмінностей.

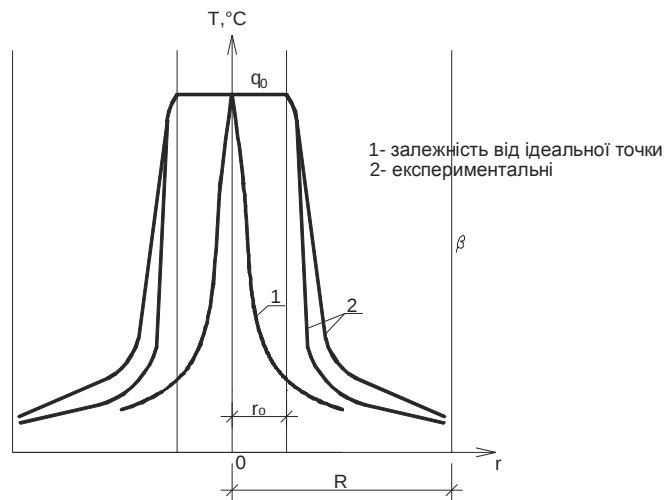


Рис. 5. До розрахунку температурних полів при точковому лазерному нагріванні бетону

Висновки. За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Вплив короткочасного місцевого нагрівання на структуру бетону в зоні дії температур є значним, аж до руйнування поверхневих шарів;
2. Дія місцевого точкового лазерного нагрівання протягом 5 хв. не призвела до появи нормальних макротріщин у бетоні кубиків через значний вплив ефекту обойми;
3. Дія градієнту температур до $600\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ протягом 3–5 хв. не знизила міцності бетонних кубиків, оскільки об'єм нагрітого бетону не перевищував 0,5–1 % об'єму зразка;
4. Зафіксовано хаотичне утворення макротріщин у поверхневому шарі бетону від дії дотичних температурних напружень;
5. Пороги між стадіями для бетону значно знижені порівняно з порогами для металів;
6. У водонасиченому бетоні при щільності потужності випромінювання $10^3\text{ Вт}/\text{см}^2$ досягається п'ята стадія взаємодії – горіння плазми на поверхні з додатковим променистим теплообміном.

1. Анищенко Л. М. Математические основы проектирования высокотемпературных технологических процессов / Анищенко Л. М., Лавренюк С. Ю. – М.: Наука, 1986. – 77 с.
2. Анполонов В. В. Термоупругое воздействие импульсно-периодического лазерного излучения на поверхность твердого тела / Анполонов В. В., Прохоров А. М., Хомич В. Ю. и др. // Квантовая электроника. – 1975. – Т. 2. – С. 380–390.
3. Бреховских В. Ф. Определение вида пространственного распределения мощности теплового источника при действии луча лазера на сталь / Бреховских В. Ф., Кокора А. Н., Углов А. А. // Физ. и химия обработки материалов. – 1967. – № 2. – С. 7–13.
4. Коваленко В. С. Лазерная технология. – К.: Вища школа, 1989.
5. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов: справочник / Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В., Кокора А. Н. – Машиностроение, 1985. – 496 с.
6. Макаров Н. И. О выборе схемы расчета температурного поля пластин при сварке световым потоком лазера / Макаров Н. И., Рыкалин Н. Н., Углов А. А. // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 3. – С. 9–15.
7. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы / А. А. Углов, И. Ю. Смуров, А. М. Лашин, А. Г. Гуськов. – М.: Наука, 1991. – 288 с.
8. Romanowska A., Jablonski M. Kompozyt gipsowy o podwyższonej akumulacji ciepła. Polska academia nauk. Studia z zakresu inżynierii NR 50. Warszawa-Łódź, 2001. – S 102.
9. 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.
10. 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 конст-рукцій”. К., 2007, вип. 7, – С. 191–197.
11. Кархут І. І., Демчина Б. Г., Була С. С. Дослідження процесів тріщиноутворення у бетоні при дії теплового удару із застосуванням методу акустичної емісії. № 600. Теорія і практика будівництва. – Львів,

2007. – С. 79–83. 12. Кархут І. І., Лопатиський І. Є., Дольников В. О., Стахіра П. Й., Футало О. Б. “Експериментальне дослідження взаємодії лазерного випромінювання з конструкційним бетоном // Держ. ун-т “Львівська політехніка”. – № 360. – 1998. – С. 78–81. 13. Kamata H. Study on methods for decontaminating concrete surface by laser treatment. Review of Laser Engineering. v 24–2, pp. 182–199 (1996).

References

1. Anishchenko L. M., Lavrenyuk S. Yu. Matematicheskie osnovy proektirovaniya vysokotemperaturnykh tekhnologicheskikh protsessov. – M.: Nauka, 1986. – 77 s. 2. Appolonov V. V., Prokhorov A. M., Khomich V. Yu. i dr. Termouprugoe vozdeistvie impul'sno-periodicheskogo lazernogo izlucheniya na poverkhnost' tverdogo tela //Kvantovaya elektronika. – 1975. –Т.2. – С. 380–390. 3. Brekhovskikh V. F., Kokora A. N., Uglov A. A. Opredelenie vida prostranstvennogo raspredeleniya moshchnosti teplovogo istochnika pri deistvii luchazera na stal' // Fiz. i khimiya obrabotki materialov.- 1967. – No. 2. – С. 7–13. 4. Kovalenko V. S. Lazernaya tekhnologiya. – K.: Vishcha shkola, 1989. 5. Lazernaya i elektronoluchevaya obrabotka materialov: Spravochnik / Rykalin N. N., Uglov A. A., Zuev I. V., Kokora A. N. – Mashinostroenie, 1985. – 496 s. 6. Makarov N. I., Rykalin N. N., Uglov A. A. O vybere skhemy rascheta temperaturnogo polya plastin pri svarke svetovym potokom lazera // Fizika i khimiya obrabotki materialov. – 1967. – No. 3. – С. 9–15. 7. Modelirovanie teplofizicheskikh protsessov impul'snogo lazernogo vozdeistviya na metally / A. A. Uglov, I. Yu. Smurov, A. M. Lashin, A. G. Gus'kov. – M.: Nauka, 1991. – 288 s. 8. Romanowska A., Jablonski M. Kompozyt gipsowy o podwyższonej akumulacji ciepła. Polska academia nauk. Studia z zakresu inżynierii NR 50. Warszawa-Łódź – 2001, s 102. 9. 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. 10. Karkhut I. I., Bula S. S., Soroka Ya. V. Rozpodil temperatury v ob'yemi betonu pry diyi teplovoho udaru, yak vydu mistsevoho nahrivu. III Mizhnarodnyy symposium “Mekhanika i fizyka ruynuvannya budivel'nykh materialiv i konst-ruktsiy”. Kyiv. 2007, vyp.7, s.191–197. 11. Karkhut I. I., Demchyna B. H., Bula S. S. Doslidzhennya protsesiv trishchynoutvorenniya u betoni pry diyi teplovoho udaru iz zastosuvannyam metodu akustychnoyi emisiyi. Visnyk. #600. Teoriya i praktyka budivnytstva. L'viv, 2007, s. 79–83. 12. Karkhut I. I., Lopatys'kyi I. Ye., Dol'nikov V. O., Stakhira P. Y., Futalo O. B. “Eksperymental'ne doslidzhennya vzayemodiyi lazernoho vyprominyuvannya z konstruktsiynym betonom // Visnyk, DU “L'vivs'ka politekhnika”, #360, 1998 r., S. 78–81. 13. Kamata H. Study on methods for decontaminating concrete surface by laser treatment. Review of Laser Engineering. v 24–2, pp. 182–199 (1996).