

**Швець Л. В.**

к.т.н., доцент

Яківчук С.В.

аспірант

*Вінницький національний
аграрний університет***Shvets L.**

Ph.D., Associate Professor

Yakivchuk S.

postgraduate student

*Vinnitsia National Agrarian
University***УДК 666.9****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-12****ОЦІНКА МАКСИМАЛЬНОЇ
ТЕМПЕРАТУРИ, ДОСЯГНУТОЇ
ПІД ЧАС ТВЕРДІННЯ БЕТОНУ**

В умовах зростаючих екологічних проблем та збільшення енерговитрат, розробка нових технологій виготовлення будівельних конструкцій є важливим завданням будівельної галузі. Один з ключових факторів, який впливає на якість та тривалість використання будівельних матеріалів - це теплова обробка бетону. Цей процес позитивно впливає на ряд параметрів матеріалу, таких як міцність, морозостійкість, водонепроникність та довговічність.

Однак, в умовах надмірного споживання електроенергії, актуальною стає необхідність зменшення енергетичних витрат у процесі виробництва. Відповідно до цього, розробка нових технологій повинна включати стратегії зниження витрат енергії та оптимізації технологічних циклів.

В Україні, як і в інших країнах, питання раціонального використання енергії має важливе значення. Враховуючи особливості енергетичного сектору країни, важливим напрямком є застосування альтернативних джерел енергії. Це відкриває шляхи до розвитку стійкого та ефективного будівництва, що враховує екологічні та енергетичні вимоги сучасності.

У пошуках оптимальних способів покращення властивостей бетону, які визначають його надійність та довговічність, вчені звертають увагу на комплексний вплив різних факторів. Зокрема, вібрація, надлишковий тиск, температурні режими та хімічні добавки відіграють ключову роль у підвищенні якісних характеристик бетону. Ці методи дозволяють не тільки значно поліпшити його міцність, але й забезпечити відмінну міцність умовно-прогінних матеріалів, покращити стійкість до зносу та агресивних середовищ.

У сучасних умовах, коли конкуренція в галузі виробництва бетонних виробів висока, важливо знаходити баланс між досягненням високих технічних характеристик матеріалу та збереженням економічної доцільності. Використання якісних наповнювачів та в'язучих високої якості підвищує міцність бетону, однак це може призвести до збільшення вартості виробу та зниження його конкурентоспроможності.

Ключові слова: бетон, міцність, морозостійкість, водонепроникність, довговічність, термосилова технологія.

Постановка проблеми. На жаль, однією з актуальних проблем є зменшення видобутку якісної сировини для будівельної галузі. Багато родовищ зазнали експлуатації або вичерпані, що ставить під загрозу стабільне

забезпечення високоякісними в'язучими заповнювачами.

У світлі цих викликів надзвичайно важливо шукати внутрішні резерви для підвищення міцності бетону. Використання місцевих будівельних матеріалів та оптимізація



процесів можуть стати відповіддю на ці проблеми. Застосування інноваційних методів виробництва та використання альтернативних джерел енергії можуть сприяти забезпеченню сталого та екологічно збалансованого розвитку будівельної галузі, зберігаючи ресурси та зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

Процес твердіння бетону включає підвищення температури, що може суттєво вплинути на якість та тривалість будівельних конструкцій. Проте точна оцінка та контроль температурного режиму під час твердіння викликають складнощі через неоднорідний розподіл температури у бетоні та зовнішні фактори. Це може спричинити негативні наслідки для міцності та стійкості будівельних матеріалів, особливо під час масштабних робіт. Отже, розробка ефективних методик та використання новітніх технологій контролю температурного режиму важливі для забезпечення якості та довговічності будівельних конструкцій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Температури затвердіння впливають на розвиток мікроструктури та утворення пор у цементних матеріалах, які, у свою чергу, впливають на капілярні напруги та пов'язану з ними усадку. Багато досліджень показали, що, незважаючи на те, що швидкість гідратації значно нижча при нижчих температурах затвердіння, розвинена мікроструктура в більш пізньому віці має більш рівномірний розподіл продуктів гідратації з меншою кількістю пор [1–4]. Однак існує розбіжність у кінцевому ступені гідратації при різних температурах. У той час як багато досліджень показують, що кінцевий ступінь гідратації вищий, коли температура затвердіння нижча [1,2,3,5], деякі інші показують, що кінцевий ступінь гідратації залишається однаковим при різних температурах затвердіння [1].

Багато авторів показали, що усадка в цементних матеріалах зумовлена капілярними напругами, які розвиваються в структурі пор через зниження відносної вологості в міру гідратації в системах з частковою гідратацією в'язучих [6,7]. Капілярні напруги, які можна представити за допомогою рівнянь Кельвіна-Лапласа, залежать від температури, і тому багато досліджень [6,7,8,9] показали, що автогенні деформації не можуть бути представлені за допомогою функції зрілості на відміну від інших макромеханічних властивостей, такі як міцність на стиск і модуль пружності [9]. Було проведено багато досліджень, щоб зрозуміти вплив температур затвердіння на розвиток автогенної усадки в матеріалах на основі цементу [2,3]. Однак дуже

мало досліджень враховували той самий ефект для бетонів високої міцності [10], бетонів високої експлуатаційної якості [11,12] та ультрависокоєфективних бетонів армованих волокном [9,13]. Крім того, більшість цих досліджень зосереджено на температурах затвердіння вище 20 °С, а дослідження впливу температур затвердіння нижче 20 °С дуже нечисленні [9,11].

Мета досліджень. Розробка ефективних методів та використання новітніх технологій контролю температурного режиму важливі для забезпечення якості та довговічності будівельних конструкцій, отже мета роботи є вдосконалення термосилової технології виготовлення бетонів.

Виклад основного матеріалу

Важливість температури при прогріві бетонних виробів полягає в тому, що температурний режим може мати великий вплив на якість та характеристики бетонних виробів. Належне керування температурою в процесі виготовлення бетонних виробів є критичним аспектом для досягнення бажаних результатів.

Ключові аспекти важливості температури при прогріві бетонних виробів:

1. **Міцність і тривалість:** Правильний температурний режим впливає на формування кристалічної структури цементу в бетоні. Недостатні або надмірні температури можуть призвести до втрати міцності та тривалості матеріалу. Відповідний температурний контроль допомагає забезпечити оптимальну міцність та стійкість.

2. **Мікроструктура:** Температура впливає на розподіл води та водяної пари в бетоні під час твердіння. Неправильний режим може спричинити утворення пор під поверхнею бетону, що негативно вплине на його мікроструктуру та міцність.

3. **Мінімізація тріщин:** Під час охолодження бетону після нагріву можуть виникнути тріщини через термальні напруження. Забезпечення контролю температури під час охолодження допомагає уникнути цих тріщин та зберегти структуру виробу.

4. **Вплив на кінцеве використання:** Температурний режим також може вплинути на те, як бетонні вироби будуть вести себе в реальних умовах експлуатації. Наприклад, висока температура під час твердіння може покращити морозостійкість бетону.

5. **Енергоефективність і сталість:** Використання сонячної енергії для прогріву бетонних виробів може сприяти енергоефективності та зменшенню викидів CO₂, що є важливими аспектами у сучасній будівельній промисловості.



З досліджень бетон набирає міцності при температурі до 60°C, при підвищенні температури зміцність зменшується, через те що втрачається частина води. Серед досліджень Derabla і Benmalek, де бетон піддається навантаженню в 50 МПа та підданий термічній обробці при 60°C протягом 24 годин. Цей підхід виявився економічно ефективним на початку формування бетону, а в довгостроковій перспективі спостерігалася часткова втрата міцності [14].

Також інші дослідження підтвердили вплив підвищеної температури на бетон, що вплив високої температури до 300°C та відповідно збільшення сили пресування бетону під час твердіння знижує міцність бетону [15],[16].

Є моменти, які є негативними та повинні бути розглянуті при застосуванні термічної обробки високоміцних бетонів нового покоління.

У деяких випадках спостерігаються значні пошкодження поверхонь саме в зразках оброблених при підвищеній температурі. Це пояснюється надмірною деформацією відкритого поверхневого шару бетону [17]. Здебільшого це викликає мікротріщини на поверхні; отже такий процес спричиняє зниження механічних властивостей і довговічності бетону. Наступна проблема, пов'язана з раптовим і деструктивним розривом поверхневого шару, що відбувається при нагріванні бетону [17]. Ця проблема була пов'язана із щільною структурою високоміцних бетонів нового покоління. Відповідно структура такого високоміцного бетону обмежена і призводить до накопичення внутрішнього тиску, і коли міцність на розтяг досягається граничного стану, ця структура матеріалу руйнується. По даних пори утворюються при температурі 105°C, що відповідає температурі випаровування води, при температурі 220°C, відбувається розщеплення суміші [18].

Наведені дослідження і висновки ілюструють важливість контролю температури під час процесу твердіння бетону та термічної обробки. Основні висновки включають такі аспекти:

1. Вплив температури на міцність бетону: До певної межі, зі збільшенням температури під час твердіння бетону може спостерігатися покращення його міцності. Однак, якщо температура занадто висока (більше 60°C), це може призвести до втрати міцності через випаровування води та формування більш пористої структури.

2. Термічна обробка та економічна ефективність: дослідження, які використовують термічну обробку бетону при підвищених температурах, можуть бути економічно

ефективними на початковому етапі формування бетону. Проте на довгостроковій перспективі спостерігається часткова втрата міцності.

3. Вплив температури на структуру бетону: підвищена температура може призвести до утворення пор у бетоні та розщеплення суміші. Це може стати причиною зниження механічних властивостей та довговічності матеріалу.

4. Деструктивний розрив поверхневого шару: під впливом підвищеної температури може відбуватися деструктивний розрив поверхневого шару бетону. Ця проблема може бути пов'язана зі щільною структурою високоміцних бетонів.

Усі ці аспекти підкреслюють важливість точного контролю температури під час процесу твердіння бетону та термічної обробки для досягнення необхідних властивостей та якості бетонних виробів. Важливо балансувати між підвищенням температури для прискорення процесу твердіння та уникнення втрат міцності та інших негативних наслідків.

Висновки:

На основі наведених досліджень та висловлених узагальнених аспектів визначено, що:

Температурний режим важливий для міцності бетону: Ефективне керування температурою грає критичну роль у формуванні міцності та інших характеристик бетонних виробів;

Підвищена температура може впливати на структуру бетону, призводячи до утворення пор та деструкції поверхневого шару;

Використання термічної обробки бетону вимагає ретельного контролю температурного режиму та урахування конкретних властивостей матеріалу.

Отже, важливість температури при виготовленні бетонних виробів не може бути недооцінена. Правильне керування температурним режимом сприяє забезпеченню необхідних характеристик та якості бетону, що є важливим аспектом в будівництві та інфраструктурному розвитку.

Список використаних джерел

1. Gallucci E., Zhang X., Scrivener K.L., Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H), Cem. Concr. Res. 53. 2013. P. 185–195, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.008>.

2. Pane I., Hansen W., Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis, Cem. Concr. Res. 35. 2005. P. 1155–1164, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.027>.



3. B. Lothenbach, F. Winnefeld, C. Alder, E. Wieland, P. Lunk, Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 37. 2007. P.483–491, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.016>.
4. I. Elkhadiri, M. Palacios, F. Puertas, Effect of curing temperature on cement hydration, *Ceram. - Silikaty.* 53. 2009. P. 65–75.
5. P. Rossi, J.P. Charron, M. Bastien-Masse, J.L. Tailhan, F. Le Maou, S. Ramanich, Tensile basic creep versus compressive basic creep at early ages: comparison between normal strength concrete and a very high strength fiber reinforced concrete, *Mater. Struct.* 47. 2014. P. 1773–1785.
6. G. Sant, The influence of temperature on autogenous volume changes in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures, *Cem. Concr. Compos.* 34. 2012. P. 855–865, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.003>.
7. A. Aili, M. Vandamme, J.-M. Torrenti, B. Masson, Is long-term autogenous shrinkage a creep phenomenon induced by capillary effects due to self-desiccation? *Cem. Concr. Res.* 108. 2018. P. 186–200, <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.02.023>.
8. P. Turcry, A. Loukili, L. Barcelo, J.M. Casabonne, Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age? *Cem. Concr. Res.* 32. 2002. P. 1443–1450, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00800-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00800-1).
9. M. Kazemi Kamyab, Autogenous Shrinkage and Hydration Kinetics of SH-UHPFRC Under Moderate to Low Temperature Curing Conditions, Doctoral thesis No: 5681 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2013. P. 57-86.
10. C. Jiang, Y. Yang, Y. Wang, Y. Zhou, C. Ma, Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures, *Constr. Build. Mater.* 61. 2014. P. 260–269, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.023>.
11. A.M. Soliman, M.L. Nehdi, Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high performance concrete at early-age, *Mater. Struct.* 44. 2011. P. 879–899, <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9670-0>.
12. Ç. Yalçınkaya, H. Yazıcı, Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures, *Constr. Build. Mater.* 144. 2017. P. 252–259, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.198>.
13. A. Kamen, E. Denarié, H. Sadouki, E. Brühwiler, Evaluation of UHPFRC activation energy using empirical models, *Mater. Struct.* 42. 2009. P. 527–537, <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9400-z>.
14. R. Derabla and M. L. Benmalek, “Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 66., Sep. 2014. P. 787–794
15. M. S. Khan and H. Abbas, “Effect of elevated temperature on the behavior of high volume fly ash concrete,” *KSCE J. Civ. Eng.*, Dec. 2014. P. 128-136.
16. K. N. Vishwanath Prof., S. Narayana Dr., and V. Bindiganavile Dr., “Influence of sustained elevated temperature on fly ash concrete,” *Indian Concr. J.*, vol. 88, no. 1., 2014. P. 26–32.
17. A. Omran, Z. He, and G. Long, “Heat damage of steam curing on the surface layer of concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 64, no. 11, pp. 995–1004, Nov. 2012.
18. L. T. Phan, “Pore pressure and explosive spalling in concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 41, no. 10, 2008. P. 1623–1632.

References

1. E. Gallucci, X. Zhang, K.L. Scrivener. (2013). Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H), *Cem. Concr. Res.* 53. P. 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.008>. [in English].
2. I. Pane, W. Hansen. (2005). Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis, *Cem. Concr. Res.* 35. P. 1155–1164, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.027>. [in English].
3. B. Lothenbach, F. Winnefeld, C. Alder, E. Wieland, P. Lunk. (2007). Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 37. P. 483–491. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.016>. [in English].
4. I. Elkhadiri, M. Palacios, F. Puertas. (2009). Effect of curing temperature on cement hydration, *Ceram. - Silikaty.* 53. P. 65–75. [in English].
5. P. Rossi, J.P. Charron, M. Bastien-Masse, J.L. Tailhan, F. Le Maou, S. Ramanich. (2014). Tensile basic creep versus compressive basic creep at early ages: comparison between normal strength concrete and a very high strength fiber reinforced concrete, *Mater. Struct.* 47. P. 1773–1785. [in English].



6. G. Sant. (2012). The influence of temperature on autogenous volume changes in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures, *Cem. Concr. Compos.* 34. P. 855–865, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.003>. [in English].
7. A. Aili, M. Vandamme, J.-M. Torrenti, B. Masson. (2018). Is long-term autogenous shrinkage a creep phenomenon induced by capillary effects due to self-desiccation? *Cem. Concr. Res.* 108. P. 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.023>. [in English].
8. P. Turcry, A. Loukili, L. Barcelo, J.M. Casabonne. (2002) Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age? *Cem. Concr. Res.* 32. P. 1443–1450, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00800-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00800-1). [in English].
9. M. Kazemi Kamyab, (2013) Autogenous Shrinkage and Hydration Kinetics of SH-UHPFRC Under Moderate to Low Temperature Curing Conditions, Doctoral thesis No: 5681 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland. P. 57-86. [in English].
10. C. Jiang, Y. Yang, Y. Wang, Y. Zhou, C. Ma. (2014) Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures, *Constr. Build. Mater.* 61. P. 260–269, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.023>. [in English].
11. A.M. Soliman, M.L. Nehdi. (2011). Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high performance concrete at early-age, *Mater. Struct.* 44. P. 879–899, <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9670-0>. [in English].
12. Ç. Yalçinkaya, H. Yazıcı. (2017). Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures, *Constr. Build. Mater.* 144. P. 252–259, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.198>. [in English].
13. A. Kamen, E. Denarié, H. Sadouki, E. Brühwiler. (2009). Evaluation of UHPFRC activation energy using empirical models, *Mater. Struct.* 42. P. 527–537, <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9400-z>. [in English].
14. R. Derabla and M. L. Benmalek, (2014). “Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 66. P. 787–794 [in English].
15. M. S. Khan and H. Abbas. (2014). “Effect of elevated temperature on the behavior of high volume fly ash concrete,” *KSCE J. Civ. Eng.* Dec. 2014. P. 128-136. [in English].
16. K. N. Vishwanath Prof., S. Narayana Dr., and V. Bindiganavile Dr., (2014). “Influence of sustained elevated temperature on fly ash concrete,” *Indian Concr. J.*, vol. 88, no. 1, P. 26–32. [in English].
17. A. Omran, Z. He, and G. Long. (2012). “Heat damage of steam curing on the surface layer of concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 64, no. 11, Nov. 2012. P. 995–1004, [in English].
18. L. T. Phan. (2008). “Pore pressure and explosive spalling in concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 41, no. 10. P. 1623–1632 [in English].

ESTIMATION OF THE MAXIMUM TEMPERATURE REACHED DURING THE HARDENING OF CONCRETE

In the conditions of growing environmental problems and increasing energy consumption, the development of new technologies for manufacturing building structures is an important task of the construction industry. One of the key factors that affects the quality and duration of use of building materials is heat treatment of concrete. This process has a positive effect on a number of material parameters, such as strength, frost resistance, waterproofing and durability.

However, in conditions of excessive electricity consumption, the need to reduce energy costs in the production process becomes urgent. Accordingly, the development of new technologies should include strategies to reduce energy consumption and optimize technological cycles.

In Ukraine, as in other countries, the issue of rational use of energy is of great importance. Taking into account the peculiarities of the country's energy sector, an important direction is the use of alternative energy sources. This opens the way to the development of sustainable and efficient construction that takes into account the environmental and energy requirements of the present.

In search of optimal ways to improve the properties of concrete, which determine its reliability and durability, scientists pay attention to the complex influence of various factors. In particular, vibration, excess pressure, temperature regimes and chemical additives play a key role in improving the quality characteristics of concrete. These methods make it possible not only to significantly improve its strength, but also to provide excellent strength of conventional materials, improve resistance to wear and aggressive environments.



In modern conditions, when competition in the field of concrete products production is high, it is important to find a balance between achieving high technical characteristics of the material and maintaining economic feasibility. The use of high-quality fillers and high-quality binders increases the strength of concrete, but this can lead to an increase in the cost of the product and a decrease in its competitiveness.

Unfortunately, one of the urgent problems is the decrease in production of high-quality raw materials for the construction industry. Many deposits have been exploited or exhausted, which jeopardizes the stable supply of high-quality binders and aggregates.

In light of these challenges, it is extremely important to look for internal reserves to increase the strength of concrete. The use of local building materials and optimization of processes can be the answer to these problems. The application of innovative production methods and the use of alternative energy sources can contribute to the sustainable and ecologically balanced development of the construction industry, saving resources and reducing the negative impact on the environment.

Key words: concrete, strength, weather resistance, water permeability, durability, thermopower technology.

Відомості про автора

Швець Людмила Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: shlv0505@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4364-0126>).

Яківчук Сергій Володимирович – аспірант Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: SergiiYakivchuk7@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0157-1812>).

Yakivchuk Serhii - graduate student at the Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: SergiiYakivchuk7@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0157-1812>).

Shvets Ludmila – Ph.D., Associate Professor, Department of Agricultural Engineering and Technical Service Vinnytsia National Agrarian University (Sunny str., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: shlv0505@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4364-0126>).