

В.Е. ЛЕВИТСКИЙ¹

¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия

ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГРУЖЕННОГО БЕТОНА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРЕВЕ

Аннотация. Теория накопления повреждений в бетоне как неоднородно-хрупком материале применительно к условиям высокотемпературного резкорезимного нагрева дополнена предпосылкой об инвариантности предельных структурных напряжений, позволяющей представить развитие нелинейного компонента деформации и снижение прочности как единый процесс. Характеристикой этого процесса является коэффициент упругости (коэффициент секущего модуля) бетона, приобретающий в рассматриваемой постановке характер энтропийного параметра поврежденности материала. Следствия данной предпосылки сформулированы в виде базовых термомеханических соотношений, благодаря которым появляется возможность представить реакцию бетона на действие температуры и нагрузки как результат действия двух деградиционных механизмов: испарения влаги из геля цементного камня и разрушения структурных связей с ростом температуры, которые реализуются соответственно в виде линейного и нелинейного компонентов силовой деформации.

Предложена методика нормализации (представления в относительном к начальному значению виде) кривых развития силовых деформаций бетона, которая позволяет обоснованно разделить эти компоненты при анализе кривых деформирования и найти необходимые для их описания температурные параметры в условиях нагрева в нагруженном состоянии. Выявлено, что при той же нагрузке и температуре повышение деформативности при нагреве бетона в нагруженном состоянии по сравнению с нагружением после нагрева происходит за счёт увеличения линейного компонента при сохранении его доли в составе полной деформации, характеризуемой коэффициентом упругости, постоянной. Показано, что допущения, принятые в существующих моделях деформирования нагруженного бетона при нестационарном нагреве, являются частными решениями и определены условия, при которых их применение становится возможным.

Ключевые слова: бетон, огнестойкость, нагрев под нагрузкой, диаграмма деформирования, модуль упругости при нагреве, разделение компонентов деформации, модель термосилового сопротивления.

V.E. LEVITSKY¹

¹Russian University of Transport, Moscow, Russia

STRAIN PARAMETERS OF LOADED CONCRETE UNDER TRANSIENT HEATING CONDITIONS

Abstract. The theory of damage accumulation in concrete as a heterogeneous-brittle material, as applied to conditions of high-temperature, abrupt heating, is supplemented by the premise of the invariance of ultimate structural stresses, which makes it possible to imagine the development of a nonlinear component of deformation and a decrease in strength as a single process. A characteristic of this process is the elasticity coefficient (secant modulus coefficient) of concrete, which in the formulation under consideration acquires the character of an entropy parameter of material damage. The consequences of this premise are formulated in the form of basic thermomechanical relationships, thanks to which it becomes possible to consider the reaction of concrete to the action of temperature and load as a result of the action of two degradation mechanisms: evaporation of moisture from the gel of cement stone and destruction of structural bonds with increasing temperature, which are realized respectively in the form of linear and nonlinear components of force deformation.

A method of normalization (representation in a form relative to the initial value) of the development curves of force deformations of concrete is proposed, which allows us to reasonably separate these components when analyzing the deformation curves and find the temperature parameters necessary for their description under heating conditions in a loaded state. It was revealed that at the same load and temperature, an increase in deformability when heating concrete in a loaded state compared to loading after heating occurs due to an increase in the linear component while maintaining its share in the total deformation, characterized by the elasticity coefficient, constant. It is shown that the assumptions made in existing models of deformation of loaded concrete during unsteady heating are partial solutions, and the conditions under which their use becomes possible are determined.

Keywords: concrete, fire, transient thermal strain, thermo-mechanical behavior, explicit and implicit constitutive model, load induced thermal strain, master curve LITS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Torelli G., Mandal P., Gillie M., Tran V.-X. Concrete Strains under Transient Thermal Conditions: A State-of-the-Art Review // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 127. Pp. 172-188. doi:10.1016/j.engstruct.2016.08.021
2. Anderberg Y., Thelandersson S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete: Part 2 - Experimental Investigation and Material Behavior Model. Bulletin 54. Lund Institute of Technology, Sweden. 1976. 85 p.
3. Schneider U. Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. Habilitationsschrift. Heft 42. Technischen Universität Braunschweig. 1979. 180 p.
4. Schneider U. Concrete at High Temperatures – a General Review // *Fire Safety Journal*. 1988. No. 13. Pp. 55-68.
5. Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan P.J.E. Transient Thermal Strain of Concrete: Literature Review, Conditions Within Specimen and Behaviour of Individual Constituents // *Magazine of Concrete Research*. 1985. Vol. 37. No. 132. Pp. 131-144.
6. Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan P.J.E. Strain of Concrete During First Heating to 600°C under Load // *Magazine of Concrete Research*. 1985. Vol. 37. No. 133. Pp. 195-215.
7. Diederichs U. Modelle zur Beschreibung der Betonverformung bei Instantionaren Temperature. Abschlußkolloquium Bauwerke unter Brand Einwirkung. Braunschweig. 1987. Pp. 25-34.
8. Terro M.J. Numerical Modeling of the Behaviour of Concrete Structures in Fire // *ACI Structural Journal*. 1998. Vol. 95. No. 2. Pp. 183-193.
9. Popovics S. A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete // *Cement and Concrete Research*. 1973. No. 3. Pp. 583-599. doi: 10.1016/0008-8846(73)90096-3
10. Franssen J.-M. Plastic Analysis of Concrete Structures Subjected to Fire / *Proceedings of the Workshop Fire Design of Concrete Structures: Whatnow? What next?* Milano. 2005. Pp.133-145.
11. Gernay T., Franssen J.-M. A Formulation of the Eurocode 2 Concrete Model at Elevated Temperature that Includes an Explicit Term for Transient Creep // *Fire Safety Journal*. 2012. Vol. 51. Pp. 1-9. doi:10.1016/j.firesaf.2012.02.001
12. Fan K., Li J., Yu M., Wu M., Yao Y. Compressive Stress-Strain Relationship for Stressed Concrete at High Temperatures // *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 130. 103576. 10.1016/j.firesaf.2022.103576.
13. Law A., Gillie M. Load Induced Thermal Strain: Implications for Structural Behavior // *Proceedings of the Fifth International Conference «Structures in Fire» (SiF-2008)*. Singapore. 2008. Pp. 488-496.
14. Alogla S.M., Kodur V.K.R. Quantifying Transient Creep Effects on Fire Response of Reinforced Concrete Columns // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 174. Pp. 885-895. doi:10.1016/j.engstruct.2018.07.093
15. Li S., Liew J.Y.R., Xiong M.-X. An Improved Implicit Analysis Method to Model Transient Strain of High-Strength Concrete During Unloading at Elevated Temperatures // *The 11th International Conference on Structures in Fire (SiF-2020)*. Australia, Brisbane. 2020. Pp. 611-621. doi:10.14264/147edd8
16. Le Q.X., Torero J.L., Dao V.T.N. Stress-strain-temperature Relationship for Concrete // *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. 103126. doi:10.1016/j.firesaf.2020.103126
17. Mindeguia J.-C., Hager I., Pimienta P. et al. Parametrical Study of Transient Thermal Strain of Ordinary and High Performance Concrete // *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 48. Pp. 40-52. doi:10.1016/j.cemconres.2013.02.004
18. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1962. 96 с.
19. Мурашев В.И. Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона (теория сопротивления железобетона). М.: Машстройиздат, 1950. 268 с.
20. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
21. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 311 с.
22. Бондаренко В.М., Карпенко Н.И. Уровень напряжённого состояния как фактор структурных изменений и реологического силового сопротивления бетона // *Academia. Архитектура и строительство*. 2007. № 4. С. 56-59.
23. Fedorov V.S., Levitsky V.E., Isaeva E.A. Basic Principles in the Theory of Force and Thermal Force Resistance of Concrete // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. Т. 18. № 6. С. 584-596.

24. Карпенко Н.И., Моисеенко Г.А. Развитие диаграммного метода расчета конструкций из сталефибробетона на основе методики построения диаграмм-изохрон // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. №6 (1066). С. 20-23.
25. Buttignol T. A Load Induced Thermal Strain (LITS) Semi-Empirical Model for Plain and Steel Fiber Reinforced Concrete Subjected to Uniaxial Compressive Load // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 127. 105896. doi:10.1016/j.cemconres.2019.105896.
26. Buttignol T., Bitencourt J.L. A Transient Creep Investigation Applied to the Mesoscopic Analysis of Plain Concrete under Uniaxial Compression at High Temperature // Fire Safety Journal. 2021. Vol. 126. 103484. doi:10.1016/j.firesaf.2021.103484.
27. Alogla S., Kodur V. Temperature-Induced Transient Creep Strain in Fiber-Reinforced Concrete // Cement and Concrete Composites. 2020. Vol. 113. 103719. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103719.
28. Fan K., Li J., He Z., Liu Q., Yao Y. Transient creep strain of fly ash concrete at elevated temperatures // Magazine of Concrete Research. 2022. Vol. 74. doi:10.1680/jmacr.21.00267.

REFERENCES

1. Torelli G., Mandal P., Gillie M., Tran V.-X. Concrete Strains under Transient Thermal Conditions: A State-of-the-Art Review. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 127. Pp. 172-188. doi:10.1016/j.engstruct.2016.08.021
2. Anderberg Y., Thelandersson S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete: Part 2 - Experimental Investigation and Material Behavior Model. Bulletin 54. Lund Institute of Technology, Sweden. 1976. 85 p.
3. Schneider U. Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. Habilitationsschrift. Heft 42. Technischen Universität Braunschweig. 1979. 180 p.
4. Schneider U. Concrete at High Temperatures – a General Review. *Fire Safety Journal*. 1988. No. 13. Pp. 55-68
5. Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan P.J.E. Transient Thermal Strain of Concrete: Literature Review, Conditions Within Specimen and Behaviour of Individual Constituents. *Magazine of Concrete Research*. 1985. Vol. 37. No. 132. Pp. 131-144.
6. Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan P.J.E. Strain of Concrete During First Heating to 600°C under Load. *Magazine of Concrete Research*. 1985. Vol. 37. No. 133. Pp. 195-215.
7. Diederichs U. Modelle zur Beschreibung der Betonverformung bei Instantionaren Temperature. Abschlusskolloquium Bauwerke unter Brand Einwirkung. Braunschweig. 1987. Pp. 25-34.
8. Terro M.J. Numerical Modeling of the Behaviour of Concrete Structures in Fire. *ACI Structural Journal*. 1998. Vol. 95. No. 2. Pp. 183-193.
9. Popovics S. A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete. *Cement and Concrete Research*. 1973. No. 3. Pp. 583-599. doi: 10.1016/0008-8846(73)90096-3
10. Franssen J.-M. Plastic Analysis of Concrete Structures Subjected to Fire. Proceedings of the Workshop Fire Design of Concrete Structures: What now? What next? Milano. 2005. Pp.133-145.
11. Gernay T., Franssen J.-M. A Formulation of the Eurocode 2 Concrete Model at Elevated Temperature that Includes an Explicit Term for Transient Creep. *Fire Safety Journal*. 2012. Vol. 51. Pp. 1-9. doi:10.1016/j.firesaf.2012.02.001
12. Fan K., Li J., Yu M., Wu M., Yao Y. Compressive Stress-Strain Relationship for Stressed Concrete at High Temperatures. *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 130. 103576. doi:10.1016/j.firesaf.2022.103576.
13. Law A., Gillie M. Load Induced Thermal Strain: Implications for Structural Behavior. Proceedings of the Fifth International Conference «Structures in Fire» (SiF-2008). Singapore. 2008. Pp. 488-496.
14. Alogla S.M., Kodur V.K.R. Quantifying Transient Creep Effects on Fire Response of Reinforced Concrete Columns. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 174. Pp. 885-895. doi:10.1016/j.engstruct.2018.07.093
15. Li S., Liew J.Y.R., Xiong M.-X. An Improved Implicit Analysis Method to Model Transient Strain of High-Strength Concrete During Unloading at Elevated Temperatures. The 11th International Conference on Structures in Fire (SiF-2020). Australia, Brisbane. 2020. Pp. 611-621. doi:10.14264/147edd8
16. Le Q.X., Torero J.L., Dao V.T.N. Stress-strain-temperature Relationship for Concrete. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. 103126. doi:10.1016/j.firesaf.2020.103126
17. Mindeguia J.-C., Hager I., Pimienta P. et al. Parametrical Study of Transient Thermal Strain of Ordinary and High Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 48. Pp. 40-52. doi:10.1016/j.cemconres.2013.02.004
18. Berg O.Ya. Fizicheskiye osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona [Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1962. 96 p. (rus)
19. Murashev V.I. Treshchinoustoychivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona (teoriya soprotivleniya zhelezobetona) [Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete (theory of reinforced concrete resistance)]. Moscow: Mashstroyizdat. 1950. 268 p. (rus)
20. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow: Stroyizdat. 1996. 416 p. (rus)
21. Kachanov L.M. Osnovy mekhaniki razrusheniya [Fundamentals of fracture mechanics]. Moscow: Nauka. 1974. 311 p. (rus)

22. Bondarenko V.M., Karpenko N.I. Uroven' napryazhonnogo sostoyaniya kak faktor strukturnykh izmeneniy i reologicheskogo silovogo soprotivleniya betona [Level of stress state as a factor of structural changes and rheological force resistance of concrete]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2007. No. 4. Pp. 56-59. (rus)
23. Fedorov V.S., Levitsky V.E., Isaeva E.A. Basic Principles in The Theory of Force and Thermal Force Resistance of Concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. Vol. 18. No. 6. Pp. 584-596.
24. Karpenko N.I., Moiseenko G.A. Razvitiye diagrammnogo metoda rascheta konstruktsey iz stalefibrobeta na osnove metodiki postroyeniya diagramm-izokhron [Development of a diagrammatic method for calculating structures made of steel fiber reinforced concrete based on the technique of constructing isochron diagrams]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2023. Vol. 1066. No. 6. Pp. 20-23. (rus)
25. Buttignol T. A Load Induced Thermal Strain (LITS) Semi-Empirical Model for Plain and Steel Fiber Reinforced Concrete Subjected to Uniaxial Compressive Load. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 127. 105896. doi:10.1016/j.cemconres.2019.105896.
26. Buttignol T., Bitencourt J.L. A Transient Creep Investigation Applied to the Mesoscopic Analysis of Plain Concrete under Uniaxial Compression at High Temperature. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 126. 103484. doi:10.1016/j.firesaf.2021.103484.
27. Alogla S., Kodur V. Temperature-Induced Transient Creep Strain in Fiber-Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 113. 103719. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103719.
28. Fan K., Li J., He Z., Liu Q., Yao Y. Transient creep strain of fly ash concrete at elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research*. 2022. Vol. 74. doi:10.1680/jmacr.21.00267.

Информация об авторе:

Левитский Валерий Евгеньевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения».
E-mail: dobriy_vecher@mail.ru

Information about author:

Levitsky Valery E.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
candidate in technical sciences, docent, associated professor, of the department of Building Construction, Buildings and Structures.
E-mail: dobriy_vecher@mail.ru