

В.И. КОРСУН¹, С.Н. КАРПЕНКО², С.Ю. МАКАРЕНКО³, А.В. НЕДОРЕЗОВ³
¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия
² Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия
³ Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка, Украина

СОВРЕМЕННЫЕ КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ БЕТОНОВ ПРИ ОБЪЕМНЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ

Аннотация. Достоверная оценка прочности и деформаций бетона в условиях неодноосных напряженных состояний важна для повышения надежности проектных решений. Классические теории прочности непригодны для таких материалов, как бетон, вследствие сложного сдвига-отрывного механизма разрушения его структуры. Приведено описание определяющих соотношений критериев прочности Г.А. Гениева, Г.А. Гениева – Н.М. Аликовой, Е.С. Лейтеса, А.В. Яшина, С.Ф. Клованича – Д.И. Безушко, К.Ж. Уиллам – Е.П. Варнке и Н.И. Карпенко. Выполнена оценка соответствия расчетных величин прочности опытным данным в условиях одно-, двух- и трехосных напряженных состояний. Определены критерии прочности, описывающие наиболее близко опытные данные в характерных областях напряженного состояния. Установлено, что наиболее разработанными являются условия прочности С.Ф. Клованича – Д.И. Безушко, К.Ж. Уиллам – Е.П. Варнке и Н.И. Карпенко. Критерии Е.С. Лейтеса и А.В. Яшина с достаточной точностью описывают опытные данные в условиях плоского напряженного состояния. Условия прочности Г.А. Гениева и Г.А. Гениева – Н.М. Аликовой требуют осторожного применения с учетом их отклонений от опытных данных в отдельных областях трехосных напряженных состояний. Определены программы нагружений в процессе экспериментальных исследований прочности бетона с целью более точного выявления форм функций меридиональных и девиаторных кривых.

Ключевые слова: бетон, многоосные напряженные состояния, критерии прочности, анализ.

V.I. KORSUN¹, S.N. KARPENKO², S.Yu. MAKARENKO³, A.V. NEDOREZOV³
¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
² Research Institute of Building Physics RAASN, Moscow, Russia
³ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makiyivka, Ukraine

MODERN STRENGTH CRITERIA FOR CONCRETE UNDER TRIAXIAL STRESS STATES

Abstract. Reliable assessment of the strength and deformations of concrete under multiaxial stress states is important for increasing the accuracy of analysis and design. Classical strength theories do not work for such materials as concrete due to the complex shear-pryout mechanism of its structural failure. Description of the key relations of strength criteria established by G.A. Geniev, G.A. Geniev – N.M. Alikova, E.S. Leites, A.V. Yashin, S.F. Klovanych – D.I. Bezushko, K.J. Willam – E.P. Warnke and N.I. Karpenko is given. Assessment of the compliance of the design strength with the experimental data under uni-, bi- and triaxial stress states is made. Strength criteria that most closely describe the experimental data in the specific areas of the stress state are determined. It has been found out that the most developed strength conditions are the ones developed by S.F. Klovanych – D.I. Bezushko, K.J. Willam – E.P. Warnke and N.I. Karpenko. The criteria introduced by E.S. Leites and A.V. Yashin describe the experimental data under conditions of the plane stress state with sufficient accuracy. The strength conditions established by G.A. Geniev and G.A. Geniev – N.M. Alikova require careful use, taking into account their deviations from the experimental data in certain areas of triaxial stress states. Loading programs in the process of experimental research of concrete strength aimed at identifying the forms of functions of meridional and deviatoric curves more accurately have been determined.

Keywords: concrete, multiaxial stress state, strength criteria, analysis.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балан Т. А. Вариант критерия прочности структурно-неоднородных материалов при сложонапряженном состоянии [Текст] // Проблемы прочности. 1986. № 2. С. 21–26.
2. Бамбура А. Н., Давиденко А. И. Экспериментальные исследования закономерности деформирования бетона при двухосном сжатии [Текст] // Строительные конструкции. 1989. Вып. 42. С. 95–100.
3. Буслер Л. Э. Разрушение бетона в условиях двухосного сжатия-растяжения [Текст] // Новые исследования по технологии, расчету и конструированию железобетонных конструкций: сборник научных трудов / Под ред. Б. А. Крылова и Н. Н. Коровина. М.: НИИЖБ, 1980. С. 9–15.
4. Гвоздев А. А., Бич П. М. Прочность бетона при двухосном напряженном состоянии [Текст] // Бетон и железобетон. 1974. № 7. С. 10–11.
5. Гениев Г. А., Киссюк В. Н., Тюпин Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона [Текст]. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
6. Гениев Г. А., Аликова Н. М. Вариант условия прочности бетона [Текст] // Теоретические исследования в области строительной механики пространственных систем: сборник научных трудов / Под ред.: М. И. Ерхов. М.: ЦНИИСК, 1976. С. 21–27.
7. Карпенко Н. И., Карпенко С. Н. Составной критерий прочности бетона при объемном напряженном состоянии // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.): в 7 т. Т.4. Ремонт, восстановление и усиление железобетонных конструкций. Моделирование и математические методы. Общие вопросы бетоноведения. Организация строительства и контроль качества. М.: МГСУ. 2014. С. 156-165.
8. Карпенко Н. И., Белостоцкий А. М., Павлов А. С., Акимов П. А., Карпенко С. Н., Петров А. Н. Обзор критериев прочности железобетонных конструкций. Часть 1: Традиционные подходы и разработки отечественных ученых // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году: Сб. науч. тр. РААСН. М.: Издательство АСВ, 2020. С. 281-289.
9. Карпенко Н. И., Белостоцкий А. М., Павлов А. С., Акимов П. А., Карпенко С. Н., Петров А. Н. Обзор критериев прочности железобетонных конструкций. Часть 2: Разработки зарубежных ученых // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году: Сб. науч. тр. РААСН. М.: Издательство АСВ, 2020. С. 290-298.
10. Клованич С. Ф., Безушко Д. И. Численный эксперимент по исследованию деформационных теорий пластичности бетона [Текст] // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. 2006. Вып. 22. С. 122–130.
11. Корсун В. И., Баев А. М. Влияние температур от –50 до +150 °С на прочность и деформации тяжелого бетона при плоском напряженном состоянии [Текст] // Новые технологические решения для строительной промышленности Донбасса: сборник научных трудов / Редакционная коллегия: Е. В. Горохов (отв. ред.) и др. Киев: УМВ ВО, 1989. С. 129–136.
12. Корсун В.И., Калмыков Ю.Ю. Ортотропное деформирование бетона при неодноосных напряженных состояниях // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. 2004. № 2004-2(44). С. 28-34.
13. Корсун В.И., Макаренко С.Ю., Недорезов А.В. Сопоставительный анализ критериев прочности бетона для неодноосных напряженных состояний // Современное промышленное и гражданское строительство. 2014. Т. 10. №1. С. 65-78.
14. Кулик И. И. Прочность бетона при плоском сжатии-растяжении [Текст] // Вопросы строительства и архитектуры. Минск, 1977. Вып. № 7. С. 92–98.
15. Лейтес Е. С. К уточнению одного из условий прочности бетона [Текст] // Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности: сборник научных трудов / Под ред.: А. А. Гвоздева, С. М. Крылова. М.: НИИЖБ, 1980. С. 37–40.
16. Перваков В. Н. Прочность тяжелого бетона при трехосном напряженном состоянии «растяжение-сжатие-сжатие» [Текст] // Новое в технологии, расчете и конструировании железобетонных конструкций: сборник научных трудов / Под ред.: Б. А. Крылова. М.: НИИЖБ, 1984. С. 90–96.
17. Филоненко-Бородич М. М. Механические теории прочности [Текст]. М.: Издательство Московского Университета, 1961. 94 с.
18. Яшин А. В. Критерии прочности и деформирования бетона при простом нагружении для различных видов напряженного состояния [Текст] // Расчет и конструирование железобетонных конструкций: сборник научных трудов / Под ред. А. А. Гвоздева. М.: НИИЖБ, 1977. С. 48–57.
19. Яшин А. В. Макромеханика разрушения при сложных (многоосных) напряженных состояниях [Текст] // Прочностные и деформационные характеристики элементов бетонных и железобетонных конструкций: сборник научных трудов / Под ред. А. А. Гвоздева, Ю. П. Гуши. М.: НИИЖБ, 1981. С. 3–29.
20. Chen Q.; Zhang Y.; Zhao T.; Wang Z.; Wang Z. Mesoscale Modelling of Concretes Subjected to Triaxial Loadings: Mechanical Properties and Fracture Behaviour. *Materials* **2021**, *14*, 1099. <https://doi.org/10.3390/ma14051099>

21. Javanmardi P. Experimental study of triaxial behavior of concrete under lateral confining stress. *Open Civ. Eng. J.* 2017, 11, 281–291, doi:10.2174/1874149501711010281.
22. Malecot Y., Daudeville L., Dupray F., Poinard C., Buzaud E. Strength and damage of concrete under high triaxial loading // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2010. №14(6-7). P. 777-803.
23. Vu X. H., Malecot Y., Daudeville L., Buzaud E. Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: Effect of the saturation ratio // *International Journal of Solids and Structures*. 2009. №46(5). P. 1105-1120.
24. Hampel T, Speck K, Scheerer S, et al. High-performance concrete under biaxial and triaxial loads. *ASCE J Eng Mech*, 2009,135: 1274–1280
25. Korsun V.I., Kalmykov Yu.Yu., Makarenko S.Yu. A version of the failure criterion modification for plane concrete. (2017). *Key Engineering Materials*. 755, pp. 300-321. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.755.300>
26. Kupfer H. Das Verhalten des Betons unter zweiachsiger Beanspruchung // *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 1968. № H.6. P. 1515–1518.
27. Schröder S., Opitz H. Festigkeit und Verformungseigenschaften des Betons bei zweiachsiger Druckbeanspruchung // *Bauplanung-Bautechnik*. 1968. 22. Jg. Heft 4. P. 190 – 196.
28. Wang, H.; Song, Y. Behavior of mass concrete under biaxial compression- tension and triaxial compression- compression- tension. *Mater. Struct.* 2009, 42, 241–249, doi:10.1617/s11527- 008- 9381- y.
29. Willam K. J., Warnke E. P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete // *Int. Assoc. Bridge. Struct. Eng.* 1974. V. 19. P. 1–31.

REFERENCES

1. Balan T.A. Variant criteria prochnosti strukturno-neodnorodnykh materialov pri slojnonapryagennom sostoyanii [Variant of criterion of strength of structure and nonuniform materials in the process of combined stress state] // *Problemi prochnosti*, 1986, Number 2, Pp. 21-26. (rus)
2. Bambura A.N.; Davidenko A.I. Experimental'nye issledovaniya zakonmernosti deformirovaniya betona pri dvykhnosnom sgatii [Experimental investigation of behavior of straining of concrete in the process of biaxial compression] // *Stroitel'nye konstruktssii*. 1989, Issue 42, Pp. 95-100. (rus)
3. Busler L.E. Razrushenie betona v usloviyakh dvykhnosnogo sjatiya-rastyajeniya // *Новые исследования по технологии, расчету и конструированию железобетонных конструкций: сборник научных трудов [Concrete deterioration under the conditions of biaxial compression-declamping] // Novye issledovania po technologii, raschety I konsruirovaniu gelezobetonnykh konstruktssii: Edited volume / Edited by Krylov B. A.; Korovin N. N. Moscow: NIIZhB, 1980. Pp. 9-15. (rus)*
4. Gvozdev A.A., Bich P.M. Prochnost' betona pri dvykhnosnom napryagennom sostoyanii [Concrete strength under biaxial stress state] // *Beton I gelezobeton*. 1974. Number 7. Pp. 10-11. (rus)
5. Geniev G.A., Kissiuk V.N., Tiupin G.A. Teoria plastichnosti betona i gelezobetona [Plasticity theory of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Stroizdat, 1974. 316 p. (rus)
6. Alikova N.M., Geniev G.A. Variant usloviya prochnosti betona [Variant of strength condition of concrete] / *Teoreticheskie issledovaniya v oblasti stroitel'noi mekhaniki prostranstvennykh sistem: Edited Volume / Edited by Erhov, M. I. Moscow: TsNIISK, 1976. Pp. 21-27. (rus)*
7. Karpenko N.I., Karpenko S.N. Sostavnoi kriterii prochnosti betona pri ob'emnom napryagennom sostoyanii [Composite criterion of concrete strength under triaxia stress state] // *Beton I gelezobeton – vzglyad v budushchee: scientific proceedings of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete (Moscow, May 12-16, 2014): in 7 vols. t. 4. Remont, vosstanovlenie I ysilenie gelezobetonnykh kondtrukticii. Modelirovanie I matematicheskie metody. Obshchie voprosy betonovedeniya. Organizatsia stroitel'stva I kontrol' kachestva. Moscow: MGSU, 2014. Pp. 156-165.*
8. Karpenko N.I., Belostockii A.M., Pavlov A.C., Akimov P.A., karpenko S.N., Petrov A.N. Obzor kriteriev prochnosti gelezobetonnykh konstrukticii. Chast' 1: Tradicionnye podkhody I razrabotki otechestvennykh uchenykh [Review of the strength criteria of reinforced concrete structures. Part 1: Traditional approaches and developments of Russian scientists] // *Phundamental'nye, poiskovyie I prikladnye issledovaniya Rossiiskoi akademii architektury I stroitel'nykh nauk po nauchnomy obespecheniu razvitiya architektury, gradostroitel'stva I stroitel'noi otrasli Rossiiskoy Federatsii v 2019 godu: Collection of scientific papers. RAASN. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2020, Pp. 281-289.*
9. Karpenko N.I., Belostockii A.M., Pavlov A.C., Akimov P.A., karpenko S.N., Petrov A.N. Obzor kriteriev prochnosti gelezobetonnykh konstrukticii. Chast' 1: Razrabotki zarubezhnykh avtorov [Review of the strength criteria of reinforced concrete structures. Part 2: Developments of foreign scientists] // *Phundamental'nye, poiskovyie I prikladnye issledovaniya Rossiiskoi akademii architektury I stroitel'nykh nauk po nauchnomy obespecheniu razvitiya architektury, gradostroitel'stva I stroitel'noi otrasli Rossiiskoy Federatsii v 2019 godu: Collection of scientific papers. RAASN. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2020, Pp. 290-298.*

10. Klovanich S.F., Bezushko D.I. Chislennyi experiment po issledovaniu deformatsionnykh teorii plastichnosti betona [Numerical experiment based on investigation of deformation plasticity theory of concrete] // Vestnik Odesskoi gosudarstvennoi akademii srtoitel'stva I arkitektury. 2006. Issue 22. Pp. 122—130. (rus)
11. Korsun V.I., Baev A.M. Vliyznie temperature ot -50 do +50°C na prochnost' I deformatsii tyazhelogo betona pri ploskom napryazhennom sostoyanii [The influence of temperature from -50 to +150 on strength and deformation of heavy concrete under plane stress] // Novye technologicheskie resheniya dlya stroitel'noy promyshlennosti Donbassa / Edited by Gorokhov, Ye. V. et al. Kyiv: UVM VO, 1989. Pp. 129—136. (rus)
12. Korsun V.I., Kalmykov Yu.Yu. Orthotropnoye deformirovanie betona pri neodnoosnykh napryazhennykh sostoyaniyakh [Orthotropic deformation of concrete under non-axial stress conditions] // Vestnik Donbasskoi gosudarstvennoi akademii srtoitel'stva I arkitektury. 2004. № 2004-2(44). Pp. 28-34. (rus)
13. Korsun V.I., Makarenko S.Yu., Nedorezov A.V. Sopostavitel'nyi analiz kriteriev prochnosti betona dlya neodnoosnykh napryazhennykh sostoyanii [Comparative analysis of concrete strength criteria for non-axial stress states] // Sovremennoe promyshlennoe I grazhdanskoe stroitel'stvo. 2014. T. 10. №1. Pp. 65-78.
14. Kulik I. I. Prochnost' betona pri ploskom szhtii-rastyazhenii [Concrete strength under plane compression and extension] // Voprosy stroitel'stva I arkitektury. Minsk, 1977. Issue 7. Pp. 92-98. (rus)
15. Leites E.S. K utochneniu odnogo iz uslovii prochnosti betona [To improvement one from conditions of concrete strength] // Povedenie betonov I elementov gelezobetonnykh konstruktsii pri vozdeistvii razlichnoy dlitel'nosti: Edited Volume / Edited by Gvozdev, A. A.; Krylov, S. M. Moscow: NIIZhB, 1980. Pp. 37—40. (rus)
16. Pervakov V.N. Prochnost' tyazhelogo betona pri tryokhosnom napryazhennom sostoyanii «rastyazhenie-szhatie» [Strength of heavy concrete under triaxial state of stress «extension compression»] // Novoe v technologii, raschete I konstruirovaniy gelezobetonnykh konstruktsii: Edited Volume / Edited by Krylov, S. M. Moscow: NIIZhB, 1984. Pp. 90-96. (rus)
17. Filonenko-Borodich M. M. Mekhanicheskie teorii prochnosti [Mechanical theory of strength]. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1961. 94 p. (rus)
18. Yashin A.V. Kriterii prochnosti I deformirovaniya betona pri prostom nagruzhении dlya razlichnykh vidov napryazhennogo sostoyania [Strength criteria and straining of concrete under simple loading for different stress pattern] // raschet I konstruirovaniye gelezobetonnykh konstruktsii: Edited Volume / Edited by Gvozdev, A. A. Moscow: NIIZhB, 1977. Pp. 48-57. (rus)
19. Yashin A.V. Macromechanica razrusheniya pri slojnykh (mnogoosnykh) napryazhennykh sostoyaniyakh [Macromechanics damage under the combined stress] // Prochnostnye I deformatsionnye charakteristiki elementov betonnykh I gelezobetonnykh konstruktsii: Edited Volume / Edited by Gvozdev, A. A.; Gushcha, Yu. P. Moscow: NIIZhB, 1981. Pp. 3-29. (rus)
20. Chen Q.; Zhang Y.; Zhao T.; Wang Z.; Wang Z. Mesoscale Modelling of Concretes Subjected to Triaxial Loadings: Mechanical Properties and Fracture Behaviour. *Materials* **2021**, *14*, 1099. <https://doi.org/10.3390/ma14051099>
21. Javanmardi P. Experimental study of triaxial behavior of concrete under lateral confining stress. *Open Civ. Eng. J.* 2017, *11*, 281–291, doi:10.2174/1874149501711010281.
22. Malecot Y., Daudeville L., Dupray F., Poinard C., Buzaud E. Strength and damage of concrete under high triaxial loading // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2010. №14(6-7). P. 777-803.
23. Vu X.H., Malecot Y., Daudeville L., Buzaud E. Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: Effect of the saturation ratio // *International Journal of Solids and Structures*. 2009. №46(5). P. 1105-1120
24. Hampel T, Speck K, Scheerer S, et al. High-performance concrete under biaxial and triaxial loads. *ASCE J Eng Mech*, 2009,135: 1274–1280
25. Korsun V.I., Kalmykov Yu.Yu., Makarenko S.Yu. A version of the failure criterion modification for plane concrete. (2017). *Key Engineering Materials*. 755. Pp. 300-321. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.755.300>
26. Kupfer H. Das Verhalten des Betons unter zweiachsiger Beanspruchung // *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 1968. № H.6. P. 1515–1518.
27. Schröder S., Opitz H. Festigkeit und Verformungseigenschaften des Betons bei zweiachsiger Druckbeanspruchung // *Bauplanung-Bautechnik*. 1968. 22. Jg. Heft 4. P. 190 – 196.
28. Wang, H.; Song, Y. Behavior of mass concrete under biaxial compression- tension and triaxial compression- compression- tension. *Mater. Struct.* 2009, *42*, 241–249, doi:10.1617/s11527- 008- 9381- y.
29. Willam K. J., Warnke E. P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete // *Int. Assoc. Bridge. Struct. Eng.* 1974. V. 19. P. 1–31.

Информация об авторах:

Корсун Владимир Иванович

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Россия, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства.

E-mail: korsun_vi@mail.ru

Карпенко Сергей Николаевич

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Проблем прочности и качества в строительстве».

E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Макаренко Сергей Юрьевич

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, Украина, ассистент кафедры технической и прикладной механики.

E-mail: makarenko_sergejj@mail.ru

Недорезов Андрей Владимирович

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, Украина, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных конструкций.

E-mail: nedorezov_a_v@mail.ru

Information about authors:

Korsun Vladimir I.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, doctor in technical sciences, professor, professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction.

E-mail: korsun_vi@mail.ru

Karpenko Sergey N.

Research Institute of Building Physics RAASN, Moscow, Russia, doctor in technical sciences, chief research engineer of the laboratory "Problems of strength and quality in construction".

E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Makarenko Sergey Yu.

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makiyivka, Ukraine, assistant in the department of Technical and Applied Mechanics.

E-mail: makarenko_sergejj@mail.ru

Nedoresov Andrej V.

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makiyivka, Ukraine, candidate in technical sciences, associate Professor of the department of Reinforced Concrete Structures.

E-mail: nedorezov_a_v@mail.ru