

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-4-565-572

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ВРЕМЕНЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ*

© 2023 г.

Макаров Н.С.

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

mak@rov-nik.ru

Поступила в редакцию 22.11.2023

Возникновение и развитие повреждений в бетонах и других хрупких материалах, подвергающихся механическим нагрузкам различной интенсивности и длительности, на макроскопическом уровне проявляется в виде растрескивания и фрагментации и вносит значительный вклад в несущую способность конструкций. Для количественной оценки деградации прочности повреждаемого материала часто используют скалярный параметр повреждения. Для экспериментального исследования процесса накопления поврежденности при высокоскоростных динамических нагрузках требуется инструмент, позволяющий при заданной скорости деформации останавливать процесс деформирования образца при заданной величине деформации. Предлагаемая статья посвящена проблеме экспериментального изучения процесса накопления повреждений в хрупких материалах. Описаны некоторые распространенные модели, используемые для прогнозирования процессов динамического деформирования и разрушения бетона с учетом поврежденности при нагружении. Для получения заданных степеней деформаций образца при различных скоростях деформации разработана экспериментальная установка, реализующая модификацию метода Кольского. Рассмотрено несколько схем формирования нагрузки. Две схемы позволяют ограничивать деформацию образца в эксперименте за счет регулировки длительности нагружающего импульса, одна – за счет наличия жесткого кольца, окружающего образец. Анализ процессов формирования нагрузки и динамического деформирования образца под действием этой нагрузки проводился с использованием инструментов численного моделирования. Динамические задачи решались с применением метода конечного элемента с явной схемой интегрирования уравнений по времени, реализованного в отечественном программном продукте «Логос». Использовались возможности модуля «Логос-Прочность». Задачи решались в осесимметричной постановке. Анализ результатов проводился с помощью программного продукта «Scientific View» из состава пакета программ «Логос».

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, моделирование, механика поврежденной среды, напряженно-деформированное состояние, поврежденность, разрушение, ресурс, динамические свойства, метод Кольского.

* Выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части государственного задания (проект FSWR-2023-0036).

Введение

Точное прогнозирование процесса возникновения и развития повреждений в хрупких материалах (в том числе в строительных бетонных материалах) при высокоинтенсивных нагрузках является крайне важной задачей для оценки последствий аварийных ситуаций, связанных с техногенными и природными катастрофами, а также террористическими актами. Для количественной оценки деградации прочности повреждаемого материала, как правило, используется скалярный, векторный или тензорный параметр, называемый поврежденностью. Кинетику изменения скалярной меры поврежденности часто связывают с необратимой (пластической) деформацией. Таким образом, для экспериментального изучения процесса накопления повреждений требуется инструмент, позволяющий оценивать накопленную поврежденность для заданной остаточной деформации.

В практике экспериментального исследования поведения материалов в динамическом диапазоне скоростей нагружения широко используется метод Кольского или метод разрезного стержня Гопкинсона [1–4]. В этом методе нагрузка формируется при упругом соударении стержней, а для регистрации процессов высокоскоростного деформирования образцов применяются современные методы тензометрии. Длительность нагрузки определяется длиной ударника. Режим нагружения (скорость деформации) определяется амплитудой падающей волны, которая зависит от скорости ударника. Этот метод используется для определения скоростных свойств хрупких материалов при сжатии [5] и растяжении [6]. Таким образом, при изменении скорости нагружения с сохранением ее длительности изменяется реализуемая деформация образца.

В попытке деформировать образцы хрупких материалов с постоянной скоростью деформации до достижения пикового напряжения применяются методы импульсного формирования модификации метода Кольского, специально разработанные для хрупких материалов [7–10], чтобы адаптировать профили падающей волны на основе динамического отклика образцов для испытаний. Метод формирования импульсов также обеспечивает лучшую однородность напряжений в образце [8, 9, 11], что является критическим требованием для определения характеристик метода Кольского.

Публикации [13–20] посвящены моделированию деформирования и разрушения бетона в условиях сложного нагружения.

Модели поврежденности

Одной из широко используемых моделей бетона с учетом его повреждаемости является модель Джонсона – Холмквиста (JH) [13, 21]. В этой модели используются две независимые поверхности прочности: максимальная поверхность максимальной прочности σ_m (отвечает за прочность неповрежденного материала) и поверхность остаточной прочности σ_r . Для моделей Riedel – Hiermaier – Thoma (RHT) [20] и Karagozian & Case (K&C) [15] дополнительно к указанным поверхностям вводится поверхность текучести σ_f . В модели JH предполагается, что пластическая деформация начинается только после достижения пикового напряжения (рис. 1а), в то время как модели RHT и K&C предполагают, что пластическая деформация появляется на более ранней стадии, когда материал достигает своего предела текучести до пика, соответствующего напряжению разрушения (рис. 1б).

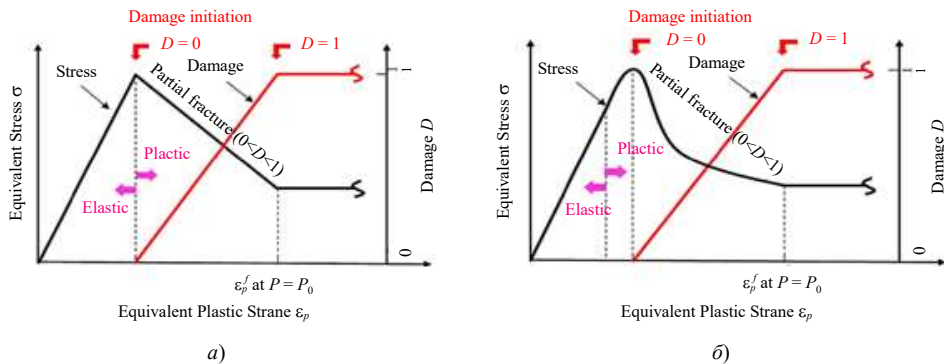


Рис. 1. Кривые напряжение–деформация и эволюция повреждений при постоянном давлении и скорости деформации: а) модель JH [13, 21]; б) модели RHT [20] и K&C [15]

В моделях повреждений бетона JH количественная оценка перехода прочности материала от поверхности максимальной прочности (для неповрежденного материала) к поверхности остаточной прочности (для полностью поврежденного материала) определяется скалярным параметром повреждения D :

$$\sigma^* = \sigma_m^* - D(\sigma_m^* - \sigma_r^*), \quad (1)$$

где σ_m^* и σ_r^* – нормированные прочности неповрежденного и полностью поврежденного материала соответственно.

Для моделей RHT и K&C поверхность напряжений после предела текучести определяется интерполяцией между поверхностью максимальных напряжений σ_m и поверхностью текучести σ_y :

$$\sigma = \eta_0(\sigma_m - \sigma_y) + \sigma_y,$$

где η_0 – параметр материала. В этой области поврежденности в материале не возникает.

После достижения поверхности σ_m деградация прочности описывается уравнением:

$$\sigma = \eta(\sigma_m - \sigma_y) + \sigma_r.$$

Сравнивая последнее уравнение с уравнением (1), получаем

$$\eta = 1 - D.$$

Экспериментальная установка

Для получения различных заданных степеней деформаций образца при разных скоростях деформации в лаборатории динамических испытаний материалов Научно-исследовательского института механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского создана экспериментальная установка, реализующая модификацию метода Кольского и позволяющая регулировать длительность нагружающего импульса (рис. 2). Ограничение смещения нагружающего стержня задается зазором между гайкой и массивной опорой.

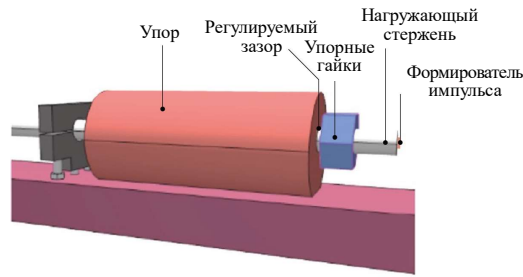


Рис. 2. Модификация экспериментальной установки метода Кольского

Численный анализ экспериментальных схем

Выполнено численное исследование формирования нагрузки в нескольких схемах, которые показаны на рис. 3. В первом случае (схема А) ограничение смещения нагружающего стержня задается зазором в зоне его уменьшенного сечения, а регулирование величины зазора обеспечено гайкой-втулкой, которая закреплена в опоре резьбовым соединением. Во втором случае (схема В) повторяется уже созданная модификация установки, представленная на рис. 2. В третьем же случае (схема С) ограничение смещения нагружающего стержня задается зазором в зоне установки самого образца, где размещается упорная шайба заданной толщины. Численное моделирование проводилось с использованием отечественного пакета программ «Логос-Прочность».

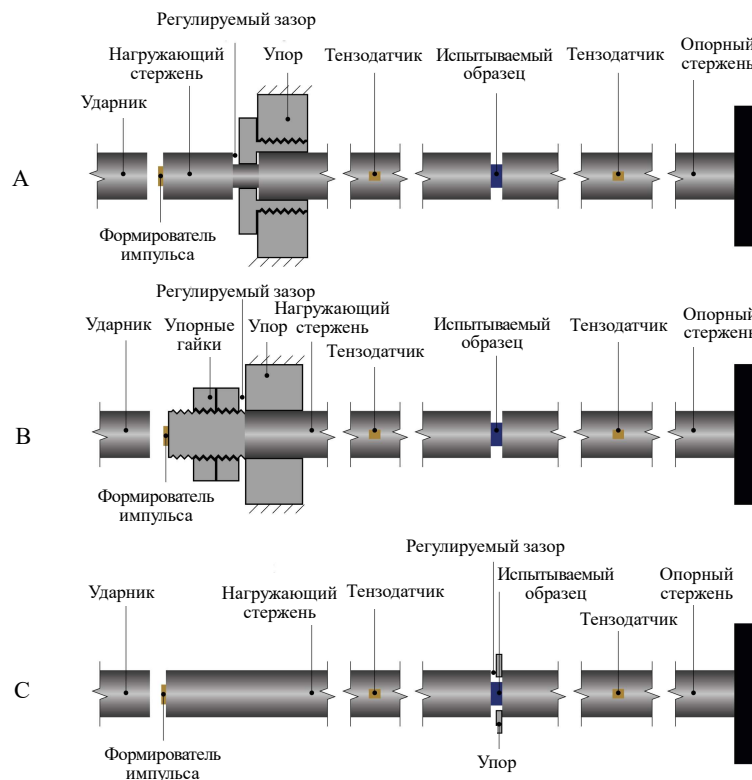


Рис. 3. Схемы модификаций экспериментальной установки метода Кольского

В ходе численного моделирования исследованы все предложенные схемы, показанные на рис. 3. В качестве образца был принят условный материал со следующими характеристиками: диаметр $d = 10$ мм, толщина $l_0 = 5$ мм, модуль упругости $E = 70000$ МПа, начальный предел текучести $\sigma_T = 200$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$, касательный модуль упругости $E_\tau = 1000$ МПа. После проведения расчета и сравнительного анализа полученных результатов, показанных на рис. 4, видно, что при заданном регулируемом зазоре, равном 0,3 мм, остаточная деформация будет разной в зависимости от примененной схемы. В первых двух случаях (схемы А, В) нагружающий импульс после прохождения ограничителя затухает плавно, что показывает более длительное время деформации в месте установки образца. Наиболее близкий результат расчета к теоретическому значению, вычисляемому по формуле

$$\xi = \ln \frac{l_0 - \Delta l}{l_0} \quad (2)$$

и равному $\xi = 0,062$ (горизонтальная черная линия на рис. 4), получен на одной из схем, где зазор, обеспечивающий требуемую длительность нагружающего импульса, реализован в месте установки испытуемого образца (схема С).

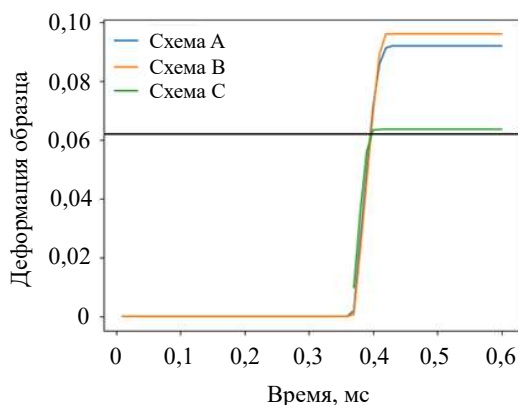


Рис. 4. Эффективная деформация образца

Заключение

После сравнения результатов, полученных путем проведения испытаний на модификации метода Кольского в лаборатории динамических испытаний материалов Научно-исследовательского института механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского, и результатов, которые получены путем численного моделирования с использованием отечественного пакета программ «Логос-Прочность», была выбрана схема, позволяющая достаточно точно получать заданные степени деформации образца при разных скоростях деформации.

Список литературы

1. Gonov M.E., Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., Filippov A.R. Features of high-speed deformation and fracture of fine-grained concrete under tensile stress. In: *Advanced Structured Materials, Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications*. Eds. H. Altenbach, V.A. Eremeyev, A. Galybin, A. Vasiliev. 2022. Vol. 155. P. 193–211.

2. Bragov A.M., Gonov M.E., Lomunov A.K., Balandin V.I. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load. Chapter 23. In: *Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials*. Eds. B.E. Abali, I. Giorgio. 2020. Vol. 130. P. 403–412.
3. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Gonov M.E. Determination of the mechanical properties of concrete using the split Hopkinson pressure bar method. *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 2174–2180. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.11.045.
4. Bragov A.M., Gonov M.E., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression. *Materials Physics and Mechanics*. 2021. Vol. 47. Iss. 6. P. 962–967. http://dx.doi.org/10.18149/MPM.4762021_14.
5. Гонов М.Е. Механические свойства фибробетонов при динамическом сжатии. *Проблемы прочности и пластичности*. 2022. Т. 84. №1. С. 130–148. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-130-148.
6. Гонов М.Е. Комплексное исследование свойств мелкозернистого бетона при динамическом растяжении и срезе. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №4. С. 442–457. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-4-442-457.
7. Petrov Y.V., Karihaloo B.L., Bratov V.V., Bragov A.M. Multi-scale dynamic fracture model for quasi-brittle materials. *International Journal of Engineering Science*. 2012. Vol. 61. P. 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2012.06.004>.
8. Smirnov I., Petrov Y., Volkov G., Abramian A., Verichev S., Bragov A., Konstantinov A., Lamzin D. Dynamic strength of limestone in terms of the incubation fracture time criterion. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 3. P. 778–83. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.127>.
9. Loeffler C., Sun Q., Heard W., Martin B., Williams B., Nie X. The effect of loading duration on damage initiation in high-strength concrete. *Mechanics of Materials*. 2020. Vol. 140. Article No 103216. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103216>.
10. Chen W.W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar*. Springer, 2010. 388 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7982-7>.
11. *C39 ASTM. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, 2014. <https://doi.org/10.1520/C0039>.
12. Guo Y.B., Gao G.F., Jing L., Shim V.P.W. Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2017. Vol. 108. P. 114–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.04.015>.
13. Holmquist T.J., Johnson G.R., Cook W.H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures. *Proceedings 14th International Symposium "Ballistics '93"*. Quebec City, Canada, 26–29 Sept. 1993. P. 591–600.
14. Lemaitre J., Chaboche J.L. *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 120 p.
15. Malvar L.J., Crawford J.E., Wesevich J.W., Simons D. A plasticity concrete material model for DYNA3D. *International Journal of Impact Engineering*. 1997. Vol. 19. P. 847–873. [https://doi.org/10.1016/s0734-743x\(97\)00023-7](https://doi.org/10.1016/s0734-743x(97)00023-7).
16. Mazars J., Hamon F., Grange S. A new 3D damage model for concrete under monotonic, cyclic and dynamic loadings. *Materials and Structures*. 2015. Vol. 48. P. 3779–3793. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0439-8>.
17. Narayan S., Anand L. A gradient-damage theory for fracture of quasi-brittle materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019. Vol. 129. P. 119–146. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.05.001>.
18. Oesch T.S., Landis E.N., Kuchma D.A. Conventional concrete and UHPC performance damage relationships identified using computed tomography. *Journal of Engineering Mechanics*. 2016. Vol. 142. Iss. 12. Article No 04016101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001168).
19. Parisio F., Tarokh A., Makhnenko R., Naumov D., Miao X.Y., Kolditz O. et al. Experimental characterization and numerical modelling of fracture processes in granite. *International Journal of Solids and Structures*. 2018. Vol. 163. No 1. P. 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.12.019>.
20. Riedel W., Thoma K., Hiermaier S., Schmolinske E. Penetration of reinforced concrete by

BETA-B-500. *Numerical Analysis Using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes: Proceeding*. Berlin, 1999. P. 315–322.

21. Parisio F., Tarokh A., Makhnenko R., Naumov D., Miao X.Y., Kolditz O. et al. Experimental characterization and numerical modelling of fracture processes in granite. *International Journal of Solids and Structures*. 2018. Vol. 163. Iss. 1. P. 102–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.12.019>.

References

1. Gonov M.E., Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., Filippov A.R. Features of high-speed deformation and fracture of fine-grained concrete under tensile stress. In: *Advanced Structured Materials, Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications*. Eds. H. Altenbach, V.A. Eremeyev, A. Galybin, A. Vasiliev. 2022. Vol. 155. P. 193–211.

2. Bragov A.M., Gonov M.E., Lomunov A.K., Balandin V.I. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load. Chapter 23. In: *Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials*. Eds. B.E. Abali, I. Giorgio. 2020. Vol. 130. P. 403–412.

3. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Gonov M.E. Determination of the mechanical properties of concrete using the split Hopkinson pressure bar method. *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 2174–2180. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.11.045.

4. Bragov A.M., Gonov M.E., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression. *Materials Physics and Mechanics*. 2021. Vol. 47. Iss. 6. P. 962–967. http://dx.doi.org/10.18149/MPM.4762021_14.

5. Gonov M.E. Mekhanicheskie svoystva fibrobetonov pri dinamicheskom szhatii [Mechanical properties of concrete under dynamics compression]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2022. Vol. 84. No 1. P. 130–148 (In Russian).

6. Gonov M.E. Kompleksnoe issledovanie svoystv melkozernistogo betona pri dinamicheskom rastyazhenii i sreze [Comprehensive study of properties of fine-grained concrete under dynamics tension and shear]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 4. P. 442–457 (In Russian).

7. Petrov Y.V., Karihaloo B.L., Bratov V.V., Bragov A.M. Multi-scale dynamic fracture model for quasi-brittle materials. *Int. J. Eng. Sci.* 2012. Vol. 61. P. 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2012.06.004>.

8. Smirnov I., Petrov Y., Volkov G., Abramian A., Verichev S., Bragov A., Konstantinov A., Lamzin D. Dynamic strength of limestone in terms of the incubation fracture time criterion. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 3. P. 778–783. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.127>.

9. Loeffler C., Sun Q., Heard W., Martin B., Williams B., Nie X. The effect of loading duration on damage initiation in high-strength concrete. *Mech. Mater.* 2020. Vol. 140. Article No 103216. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103216>.

10. Chen W.W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar*. Springer. 2010. 388 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7982-7>.

11. *C39 ASTM. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. 2014. <https://doi.org/10.1520/C0039>.

12. Guo Y.B., Gao G.F., Jing L., Shim V.P.W. Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading. *Int. J. Impact Eng.* 2017. Vol. 108. P. 114–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.04.015>.

13. Holmquist T.J., Johnson G.R., Cook W.H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures. *Proceedings 14th International Symposium "Ballistics '93"*. Quebec City, Canada, 26–29 Sept. 1993. P. 591–600.

14. Lemaitre J., Chaboche J.L. *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge. Cambridge University Press. 1994. 120 p.

15. Malvar L.J., Crawford J.E., Wesevich J.W., Simons D. A plasticity concrete material model for DYNA3D. *Int. J. Impact Eng.* 1997. Vol. 19. P. 847–873. [https://doi.org/10.1016/s0734-743x\(97\)00023-7](https://doi.org/10.1016/s0734-743x(97)00023-7).

16. Mazars J., Hamon F., Grange S. A new 3D damage model for concrete under monotonic,

cyclic and dynamic loadings. *Mater. Struct.* 2015. Vol. 48. P. 3779–3793. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0439-8>.

17. Narayan S., Anand L. A gradient-damage theory for fracture of quasi-brittle materials. *J. Mech. Phys. Solids.* 2019. Vol. 129. P. 119–146. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.05.001>.

18. Oesch T.S., Landis E.N., Kuchma D.A. Conventional concrete and UHPC performance damage relationships identified using computed tomography. *J. Eng. Mech.* 2016. Vol. 142. Iss. 12. Article No 04016101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001168).

19. Parisio F., Tarokh A., Makhnenko R., Naumov D., Miao X.Y., Kolditz O. et al. Experimental characterization and numerical modelling of fracture processes in granite. *Int. J. Solids Struct.* 2018. Vol. 163. No 1. P. 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.12.019>.

20. Riedel W., Thoma K., Hiermaier S., Schmolinske E. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500. *Numerical Analysis Using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes: Proceeding.* Berlin. 1999. P. 315–322.

21. Parisio F., Tarokh A., Makhnenko R., Naumov D., Miao X.Y., Kolditz O. et al. Experimental characterization and numerical modelling of fracture processes in granite. *Int. J. Solids Struct.* 2018. Vol. 163. Iss. 1. P. 102–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.12.019>.

EXPERIMENTAL SETUP FOR DYNAMIC LOADING TIME-CONTROLLED*

Makarov N.S.

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

mak@rov-nik.ru

Received by the Editor 2023/11/22

The occurrence and development of damage in concrete and other brittle materials subjected to mechanical loads of varying intensity and duration, at the macroscopic level manifests itself in the form of cracking and fragmentation and makes a significant contribution to the load-bearing capacity of structures. To quantify the strength degradation of the damaged material, a scalar damage parameter is often used. Experimental investigation of the damage accumulation process under high-speed dynamic loads requires a tool that allows stopping the deformation process of a specimen at a given strain rate at a given strain magnitude. The proposed work is devoted to the problem of experimental study of damage accumulation process in brittle materials. Some common models used to predict the processes of dynamic deformation and fracture of concrete taking into account damage under loading are described. An experimental setup realizing a modification of the Kolsky method is developed to obtain the specified degrees of deformation of the specimen at different strain rates. Several load shaping schemes are considered. Two schemes allow limiting the deformation of the specimen in the experiment by adjusting the duration of the loading pulse, and one scheme allows limiting the deformation of the specimen due to the presence of a rigid ring surrounding the specimen. The processes of load formation and dynamic deformation of the specimen under the action of this load were analyzed using the following methods.

Keywords: computational experiment, modeling, mechanics of damaged medium, stress-strain state, damage, fracture, resource, dynamic properties, Kolsky method.

*Completed with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the basic part of the State Assignment (project FSWR-2023-0036).