

УДК 539.3
DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1055-1057

МЕХАНИЗМЫ ПРОБИТИЯ БЕТОННЫХ ПРЕГРАД КОМПАКТНЫМИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ УДАРНИКАМИ. ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© **В.И. Колпаков**¹⁾, **Г.Г. Савенков**²⁾, **В.А. Морозов**³⁾, **А.А. Лукин**³⁾

¹⁾ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: kolpakov54@mail.ru

²⁾ Санкт-Петербургский технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: sav-georgij@yandex.ru

³⁾ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: viktor.morozov@math.spb.ru

Рассмотрена физико-математическая постановка проникания компактного поражающего элемента (ударного ядра) в бетонную преграду. Проведены по различным моделям поведения бетона расчеты пробития преград и их сравнение с экспериментальными данными.

Ключевые слова: компактный ударник; высокоскоростное нагружение; преграда; электрический разряд.

Проводилось численное моделирование действия компактного поражающего элемента (КПЭ) (ударного ядра) по бетонной плите толщиной 250 мм. При этом рассматриваются две модели бетона, со значениями динамических пределов прочности, определенных либо путем экспериментов по разрушению бетона высоковольтным электрическим разрядом [1], либо по методу Кольского на разрезном стержне Гопкинсона [2].

Отметим, что бетон является искусственным хрупким структурно-неоднородным материалом, его поведение (в частности, чувствительность к скорости деформации и к влиянию примесей [3]) при воздействии динамических нагрузок существенно отличается от поведения в подобных условиях металлов и сплавов.

При анализе действия УКЗ по бетонной преграде проводился сравнительный анализ нескольких физико-математических моделей бетона, в качестве которых рассмотрены следующие [4].

Модель бетона Б1 (основная). Модель идеальной упругопластической среды со следующими параметрами: начальная плотность $\rho = 2,25 \text{ г/см}^3$; модуль сдвига $G = 16,7 \text{ ГПа}$; динамический предел текучести $\sigma_{td} = \text{const} = 0,0375 \text{ ГПа}$ (М375); баротропное уравнение состояния в виде линейной зависимости $p = K \cdot (\rho/\rho_0 - 1)$, где $K = 22,3 \text{ ГПа}$ – модуль объемного сжатия; коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$; предел прочности на разрыв $\sigma_{td} = \text{const} = 0,015 \text{ ГПа}$.

Модель бетона Б2 (CONCRETE-37,5 МПа (М 375)). Модель пористой упругопластической среды, в которой деформирование пористой среды при динамическом нагружении описывается соотношениями т. н. P - α модели Херрмана–Кэррола–Холта [4]. В данной модели зависимость давления в пористой среде от удельного объема представляется в параметрическом виде посредством введения некоторого α , характеризующего степень пористости материала, с помощью двух функций

$$P = f(\alpha, V, e) \text{ и } \alpha = g(P).$$

Здесь $V = 1/\rho$; $V_S = 1/\rho_S$ – удельный объем пористой и монолитной среды; e и $\alpha = V/V_S = \rho_S/\rho$ – удельная внутренняя энергия и степень пористости среды.

Зависимость $\alpha = g(P)$ определяется согласно выражению

$$\alpha = 1 + (\alpha_e - 1) \left[\frac{p_S - p}{p_S - p_e} \right]^2,$$

где p – текущее давление; p_S – давление, определяющее переход материала из пористого в сплошное состояние; p_e – давление, определяющее переход пористого материала из упругого в пластическое состояние; α_e – степень пористости, соответствующая давлению p_e . Для сплошного состояния в качестве уравнения состояния используется полиномиальная зависимость.

$$\text{При сжатии } \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 > 0,$$

$$p_S = f_1(\mu, e) = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e.$$

$$\text{При растяжении } \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 < 0,$$

$$p_S = f_2(\mu, e) = T_1\mu + B_0\rho_0 e.$$

Здесь $A_1 = 35,27 \text{ ГПа}$; $A_2 = 39,6 \text{ ГПа}$; $A_3 = 9,04 \text{ ГПа}$; $T_1 = 35,27 \text{ ГПа}$; $B_0 = B_1 = 1,22$.



Рис. 1. Отверстие в бетонной плите, пробито КПЭ со скоростью 1865 м/с

Остальные параметры модели принимались следующими: начальная плотность пористой среды $\rho_0 = 2,25 \text{ г/см}^3$; плотность сплошной среды $\rho_S = 2,75 \text{ г/см}^3$; $C_0 = 2,92 \text{ км/с}$; $p_e = 0,0233 \text{ ГПа}$; $p_S = 6,0 \text{ ГПа}$; $G = 16,7 \text{ ГПа}$. Прочность на сжатие данной марки бетона принималась равной $\sigma_{td} = 0,0375 \text{ ГПа}$; прочность на растяжение – $\sigma_p = 0,00375 \text{ ГПа}$ ($\sigma_p/\sigma_{td} = 0,1$); прочность на сдвиг – $\sigma_s = 0,00675 \text{ ГПа}$ ($\sigma_s/\sigma_{td} = 0,18$).

В качестве меры повреждения материала использовалась величина наносимого ущерба D (damage), рассчитываемая по формуле

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon^f}, \quad 0 \leq D \leq 1.$$

Здесь $\Delta \varepsilon_p$ – накопленные пластические деформации; ε^f – предельные пластические деформации, при которых происходит разрушение хрупкого материала. Величина предельных деформаций рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon^f = D_1(p^* - p_{spall}^*)^{D_2} \geq \varepsilon_{\min}^f,$$

где $p^* = p/\sigma_p$; $p_{spall}^* = \sigma_p/\sigma_{td}$; $D_1 = 0,04$ (в настоящей работе варьировался в диапазоне 0,04–10), $D_2 = 1$ – параметры ущерба; $\varepsilon_{\min}^f = 0,01$ – минимально возможная деформация разрушения материала. Со-

гласно модели “damage” прочностные параметры материала корректировались в соответствии с условием

$$Y^* = (1 - D)Y_S + DY_r.$$

Например,

$$G^* = (1 - D)G_S + DG_r,$$

где G^* – скорректированное значение модуля сдвига; $G_S = G$ – модуль сдвига монолитного тела; $G_r = G_{residual} = 0,13$ – остаточное значение.

Эксперименты по пробитию преград КПЭ проводились на бетонных плитах толщиной 250 мм (рис. 1). Скорость КПЭ составляла 1865–1900 м/с, во всех случаях плита была пробита.

Сравнение численных расчетов с экспериментом показало, что лучшими результатами обладают расчетные данные, полученные в рамках идеальной упруго-пластической среды, т. е. в рамках нашей задачи данная модельная среда более реально отражает процессы высокоскоростного нагружения бетона.

На основании полученных результатов можно сделать следующие **выводы**.

1. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показало достаточно хорошее совпадение независимо от используемой модели поведения материала облицовки.

2. Динамические характеристики бетона, полученные в рамках метода Кольского и экспериментов с высоковольтным разрядом адекватно отражают поведение данного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов В.А., Савенков Г.Г., Лукин А.А., Рудометкин К.А. Динамическое разрушение бетона и горных пород при высокоскоростном электроимпульсном воздействии // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: сб. тез. докл. Междунар. конф. 17 Харитоновские чтения. Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2015. С. 242-243.
2. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Ломунов А.К. и др. Динамическое деформирование и разрушение хрупких структурно-неоднородных сред // Проблемы прочности и пластичности. 2012. Вып. 74. С. 59-67.
3. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, 1970. 274 с.
4. Бабкин А.В., Колтаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Численные методы в задачах физики быстротекущих процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 520 с.

Поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

UDC 539.4

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1055-1057

**MECHANISMS FOR BREAKING THROUGH CONCRETE BARRIERS
COMPACT HIGH SPEED DRUMMERS.
EXPERIMENT AND NUMERICAL MODELING**

© V.I. Kolpakov¹⁾, G.G. Savenkov²⁾, V.A. Morozov³⁾, A.A. Lukin³⁾

¹⁾ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation, e-mail: kolpakov54@mail.ru

²⁾ St. Petersburg Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: sav-georgij@yandex.ru

³⁾ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: viktor.morozov@math.spb.ru

The physical-mathematical formulation of the penetration of compact striking element (shock core) to concrete barrier is considered. Conducted on various models of the behaviour of concrete calculations of the breaking through of barriers and comparison with experimental data.

Key words: compact impactor; high-speed loading; barrier electric discharge.

REFERENCES

1. Morozov V.A., Savenkov G.G., Lukin A.A., Rudometkin K.A. Dinamicheskoe razrushenie betona i gornykh porod pri vysokoskorostnom elektroimpul'snom vozdeystvii. *Sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii XVII Kharitonovskie chteniya "Ekstremal'nye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny"*. Sarov, The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF), 2015, pp. 242-243.
2. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K. i dr. Dinamicheskoe deformirovanie i razrushenie khrupkikh strukturo-neodnorodnykh sred. *Problemy prochnosti i plastichnosti – Problems of Strength and Plasticity*, 2012, no. 74, pp. 59-67.
3. Bazhenov Yu.M. *Beton pri dinamicheskom nagruzhении*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1970. 274 p.
4. Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystro-protekayushchikh protsessov*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2006. 520 p.

Received 10 April 2016

Колпаков Владимир Иванович, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии космического машиностроения, e-mail: kolpakov54@mail.ru

Kolpakov Vladimir Ivanovich, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation, Doctor of Technics, Associate Professor, Professor of Space Engineering Department, e-mail: kolpakov54@mail.ru

Савенков Георгий Георгиевич, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор кафедры химической энергетики, e-mail: sav-georgij@yandex.ru

Savenkov Georgiy Georgievich, St. Petersburg Technological Institute (Technical University), Saint-Petersburg, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor of Chemical Energy Department, e-mail: sav-georgij@yandex.ru

Морозов Виктор Александрович, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой физической механики, e-mail: viktor.morozov@math.spb.ru

Morozov Viktor Aleksandrovich, St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Physical Mechanics Department, e-mail: viktor.morozov@math.spb.ru

Лукин Антон Александрович, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, научный сотрудник кафедры физической механики, e-mail: viktor.morozov@math.spb.ru

Lukin Anton Aleksandrovich, St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation, Research Worker of Physical Mechanics Department, e-mail: viktor.morozov@math.spb.ru