

УДК 539.3

Модель бетона при расчете высокоскоростного проникания тел

# 03, март 2012

Дудик Д.Е.

Студент,  
кафедра «Высокоточные летательные аппараты»

Научный руководитель: Велданов В.А.,  
к.т.н., доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты»

Бетоны – искусственные каменные материалы, получают в результате затвердевания бетонной смеси, составляемой из крупного и мелкого заполнителя, воды и специальных добавок. Затвердевший бетон приобретает довольно сложную структуру (внутреннее строение). В таком строении укрупнено выделяют две основные компоненты – матрицу в виде окаменевшего цементно-песчаного раствора и частые включения в нее зерен крупного заполнителя. Диапазон размеров таких зерен достаточно широк: 0.005-100 мм. Помимо этого в бетоне имеет место большое количество пор и микротрещин.

Рассмотрим поведение бетона при нагружении на примере одноосного напряженного состояния. Для этого случая на рис. 1 представлена диаграмма "напряжение-деформация" при различных скоростях деформации для бетона марки 350.

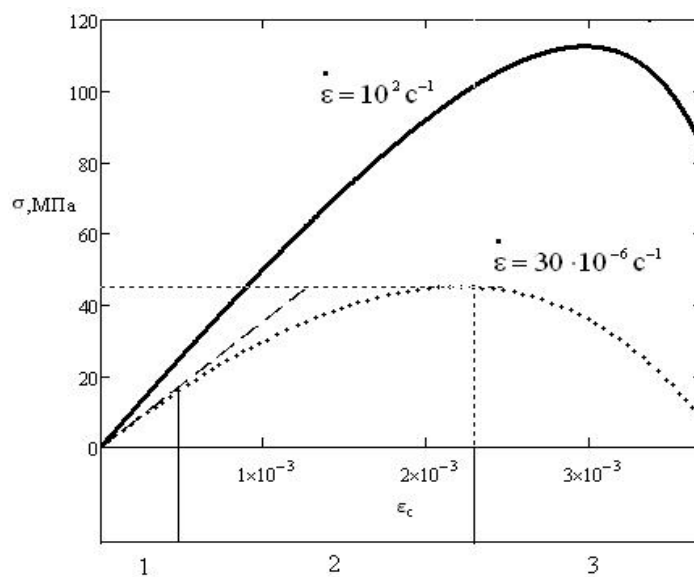


Рис.1 Диаграмма "напряжение-деформация" при различных скоростях деформации для бетона марки 350

Здесь можно выделить следующие характерные участки:

1 – бетон ведет себя как линейное упругое тело. Происходит частичное закрытие микротрещин и некоторое уплотнение структуры бетона.

2 – происходят “псевдопластические” деформации бетона (упрочнение), за счет развития трещин отрыва вдоль действия напряжений.

3 – участок “пост разрушение” – процесс неустойчивого образования микротрещин, ветвления и объединение в макротрещины.

При динамическом нагружении с различной скоростью проявляется большая упругость бетона (см. рис.1). Вследствие всего сказанного встает вопрос о правильном представлении бетона в расчетной модели. Наиболее широко используемой моделью является RHT concrete model (Riedel W., Hiermaier S. Thoma K.) реализуемая в программе AUTODYN.

Решение задачи динамического деформирования бетона предусматривает знание физического и механического поведения деформированного тела. Физическое поведение бетона в модели рассматривается в виде  $p-\alpha$  модель У.Херрманна [1] (см. рис.2 для бетона марки 350).

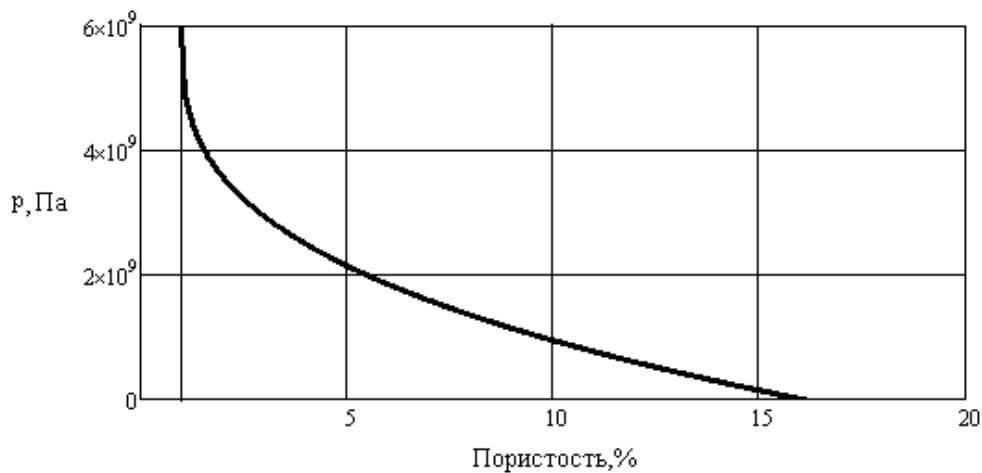


Рис.2. Изменение пористости по модели  $p-\alpha$  для бетона марки 350

Механическое поведение бетона описывается моделью упругопластического тела с упрочнением, а в качестве критерия прочности используется критерий, функционально связывающий октаэдрические нормальные ( $\sigma_0$ ), касательные напряжения ( $\tau_0$ ) и параметр Лоде-Надаи ( $\mu_\sigma$ ). Ранее используемый критерий прочности Г.А. Гениева и Н.А. Киссюка [2] не выполняется в некоторых условиях [2], что явилось причиной перехода на сложные критерии.

$$F(\sigma_0, \tau_0, \mu_\sigma, R) = 0$$

Для построения этого уравнения используется способ М.М. Филоненко-Бородича: на основе экспериментальных данных устанавливают две главные меридиональные кривые ( $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=60^\circ$ ), а остальные кривые находят по интерполяционной зависимости между главными кривыми. В интерполяционной зависимости отражают характер изменения девиаторных кривых (см. рис.3) [2], в модели RHT девиаторная кривая описывается уравнением Willam K.J.-Warnke E.P. [2].

Для учета изменения предельной поверхности при динамическом нагружении в модели RHT применяется коэффициент динамичности (отношение динамической прочности к статической), являющийся функцией скорости деформации. На основе

полученной предельной поверхности в модели RHT можно построить предельную упругую поверхность для описания стадии упрочнения (см. рис.1 участок 2). Для описания разрушения бетона в RHT будем использовать алгоритм линейного суммирования повреждений. При достижении критического значения поврежденности бетон разрушается и представляется в виде сыпучей среды. Так же параметром поврежденности воспользуемся для определения текущей поверхности разрыва (на ниспадающей ветви диаграммы деформирования), текущего модуля сдвига, для описания процесса распространения макротрещин.

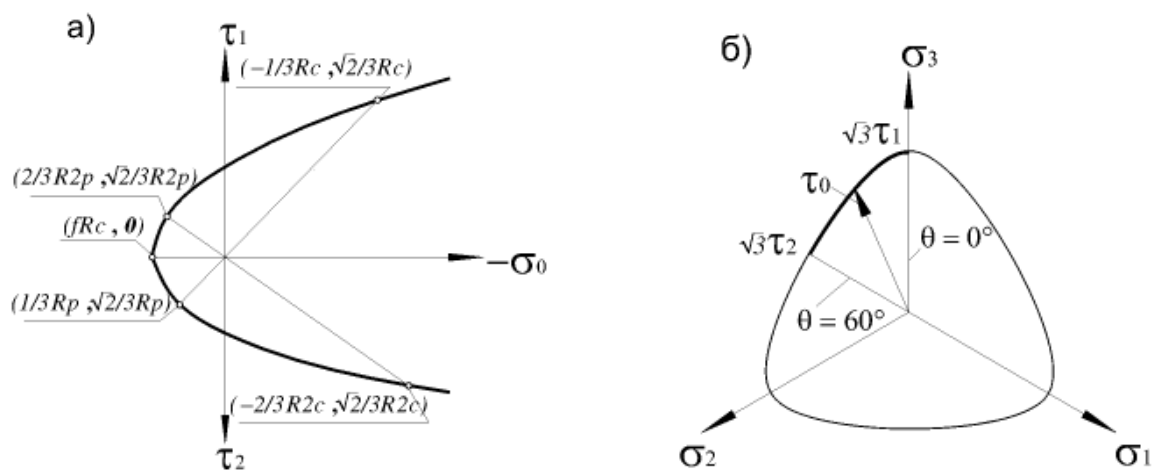


Рис.3 Вид главных меридиональных кривых (а) и девиаторное сечение (б) поверхности прочности

Для проверки модели на адекватное описание высокоскоростного удара рассмотрим взаимодействие ударника с конической головной частью (угол при вершине  $60^0$ ) с неармированной бетонной плитой размером  $330 \times 330$ , скорость ударника в эксперименте равна  $237$  м/с (см. рис.4а). Численный расчет проводился в программе AUTODYN содержащий в стандартной библиотеке бетон марки 350.

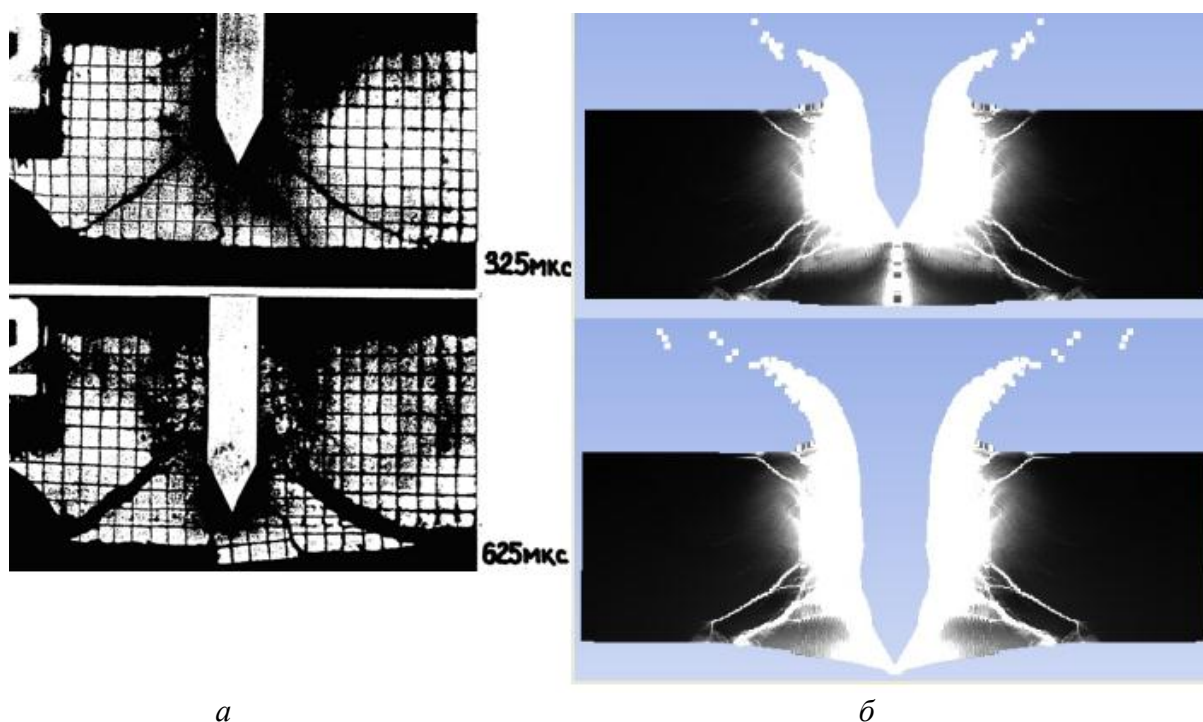


Рис.4 Экспериментальные результаты (а) и численное моделирование (б) проникания в бетонную преграду

В модель бетона было внесено изменение, позволяющее описывать образование трещин (напряжение растяжение и энергия разрушения). Расчетная сетка представляет собой объединение SPH (Smoothed-particle hydrodynamics) с лагранжевой сеткой, что позволяет избавиться от искажения лагранжевой сетки в области лицевого и тыльного откола. Размер ячейки, расчетной сетки, выбран так, что глубина пробития в численном моделировании близка к эксперименту. Таким образом, моделирование проведенное в AUTODYN (см. рис.4б) достаточно точно описывает поведение бетона в сложном напряженном состоянии.

#### Литература

1. Каннель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: «Янус-К», 1996.- 408 с.
2. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. - М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.