

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что при $\bar{q} \geq 3$ интенсивность подачи газа в грунт практически не влияет на размеры воронки, а результат газодинамического воздействия может быть определен по известным зависимостям для сосредоточенных зарядов выброса. Однако при $\bar{q} < 3$ со снижением расхода газа расстояние между газовыми источниками, при котором образуется общая воронка выброса, уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев Ф. А., Барон В. Л., Блейман И. Л. Производство массовых взрывов.— М.: Недра, 1977.— 312 с.
2. Арутюнов О. А., Григорян С. С., Камалин Р. З. Об эффективном взаимодействии сосредоточенных зарядов выброса // ФГВ.— 1985.— 21, № 4.— С. 104—110.
3. Адушкин В. В., Кривошеев С. Г. Моделирование промышленных взрывов на выброс в условиях несложного рельефа свободной поверхности грунта // Взрывное дело, № 73/30.— М.: Недра, 1974.— С. 161—170.
4. Адушкин В. В., Родионов В. Н. Моделирование взрывов на выброс при помощи лабораторной вакуумной установки // Там же, № 64/21.— М.: Недра, 1968.— С. 24—42.

г. Ленинград

*Поступила в редакцию 5/VI 1990,
после доработки — 13/XI 1990*

УДК 620.171.3

С. А. Новиков, В. А. Петров, Л. М. Тимонин

УСТАНОВКИ ВЗРЫВНОГО ТИПА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Дается описание принципов работы и конструкций ряда взрывных испытательных установок для динамических испытаний материалов и конструкций. Большая энергоемкость ВВ позволяет получать параметры нагружающих импульсов, практически недостижимые существующими механическими системами копрового типа. Описанные установки имеют малые габариты, стоимость их значительно меньше стоимости соответствующих копровых установок. Надежная локализация взрыва позволяет широко применять установки взрывного типа в лабораторных условиях. Опыт работы с такими установками свидетельствует о широких возможностях их применения в различных отраслях техники.

Способы формирования импульса давления заданной формы

В ряду технических решений, позволяющих создать сравнительно дешевые малогабаритные установки с большой энергоемкостью, стоит применение бризантных взрывчатых веществ (ВВ) в качестве энергоносителя. При этом обеспечивается выполнение точной синхронизации момента нагружения с другими процессами.

Основные задачи при создании установок взрывного типа: 1) растягивание импульса давления (снижение давления на фронте волны, увеличение длительности), 2) локализация эффекта взрыва, что существенно для стационарных установок в условиях лаборатории.

Способ растягивания импульса давления с помощью крешеров (демпферов), применяемый при обычных копровых испытаниях, успешно используется и при взрывном нагружении [1]. Принципиальная схема такого нагружающего устройства представлена на рис. 1, где 1 — заряд ВВ, 2 — ударник, 3 — демпфер, 4 — объект испытаний (ОИ). Для формирования ударного импульса трапецеидальной формы динамическая диаграмма сжатия демпфера должна соответствовать идеальному упругопластическому телу. Из реальных материалов близкой по форме диаграммой обладают некоторые пористые вещества и трубчатые крешеры

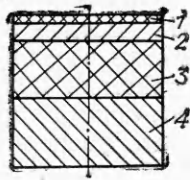


Рис. 1. Схема взрывного нагружающего устройства.

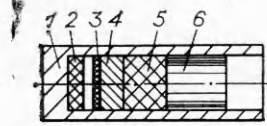


Рис. 2. Схема ударного стенда с размещением заряда ВВ в разгонном отсеке.
1 — ствол; 2 — торцевой демпфер; 3 — заряд ВВ; 4 — ударник; 5 — нагружающий демпфер; 6 — объект испытания.

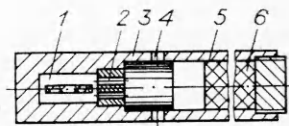


Рис. 3. Схема ударного стенда со взрывной камерой и глушителем ударных волн.

[2—4]. Импульс давления, близкий к трапецеидальному (или прямоугольному), формируется, если демпфер сжимается в пределах участка постоянного давления.

Используя законы сохранения импульса и энергии при заданных значениях величины перегрузки N на ОИ, имеющий массу M , и времени действия импульса τ , можно вывести формулу для необходимой величины деформации демпфера [1]

$$h = \frac{Ng\tau^2}{2} \left(1 + \frac{M}{m} \right), \quad (1)$$

где m — масса ударника; g — ускорение силы тяжести. Величина импульса, определяемая массой ВВ,

$$I = (m + M)Ng\tau. \quad (2)$$

Из (1) видно, что для повышения длительности импульса необходимо увеличивать массы ударника и ВВ. Этим трудностям удается избежать при размещении всей системы (нагружающего устройства и ОИ) в стволе с одним закрытым торцом (рис. 2). Пример такой установки приведен в [5]. При подрыве заряда ВВ начальный пик давления «срезается» демпфером при распространении по нему ударной волны (УВ), а движущаяся система разгоняется в основном за счет действия на ударник остаточного давления продуктов взрыва (ПВ). За счет этого аналогичные режимы нагружения ОИ обеспечиваются при массе заряда ВВ, в несколько раз меньшей, чем в первом способе, и примерно вдвое меньшей деформации демпфера.

Использование для создания ударных импульсов остаточного давления ПВ позволяет сравнительно просто проводить испытания конструкций на воздействие механических импульсов со спадающей во времени нагрузкой. Ударный стенд, основанный на этом принципе нагружения (рис. 3), состоит из взрывной камеры 1, глушителя УВ, выполненного в виде заглушки 2 с дроссельными отверстиями, разгонного отсека 3, устройства для сброса давления 4 и торможения 5. При подрыве заряда ВВ во взрывной камере (после затухания УВ) устанавливается избыточное давление ПВ, величина которого пропорциональна плотности заряжения камеры ρ (отношение массы заряда к объему камеры). Дросселирование газа через заглушку исключает воздействие на ОИ пиковых нагрузок и формирует требуемый фронт нарастания давления до максимума. По мере разгона ОИ нагрузка спадает, нагружение заканчивается после прохождения ОИ отсека сброса давления, после начинается его торможение, например, с помощью демпфера 6. (Перегрузка при торможении задается обычно на порядок меньше перегрузки при нагружении.)

Оценку параметров нагружающего импульса можно производить аналогично рассмотренному во внутренней баллистике [6] случаю мгновенного сгорания пороха и последующего адиабатического расширения газа по мере перемещения ОИ. Степень расширения газа $C = (l_k + l)/l_k$, где l_k — приведенная длина взрывной камеры, равная отношению объема

камеры к площади поперечного сечения разгонного отсека; l — перемещение ОИ. Для зависимости текущего нагружающего усилия P от перемещения l в виде $P(l) = P_0/C^\kappa$, скорость ОИ на выходе из разгонного отсека дается формулой

$$V = \sqrt{\frac{2P_0 l_\kappa \left[1 - \frac{1}{C_{\max}}\right]^{\kappa-1}}{M(\kappa-1)}}, \quad (3)$$

где P_0 — максимальная (начальная) величина нагружающего усилия; κ — показатель адиабаты ПВ (для ВВ на основе гэна $\kappa = 1,17$ [7]); C_{\max} — максимальная степень расширения ПВ в стенде. Учитывая, что во внутренней баллистике длительность импульса определяется численными методами (что не совсем удобно), параметры импульса для стендов данного типа определяются с помощью экспериментально полученных зависимостей $P(t)$ и $P(l)$ [8].

Плотность заряжения в опытах варьировалась в интервале 10—100 кг/м³. Для обеспечения режимов с интенсивным нагружением ОИ отработана конструкция глушителя УВ, состоящая из заглушки со степенью дросселирования 0,14—0,4, перед которой устанавливался набор стальных дисков, выполняющих роль раскрываемых диафрагм.

В исследованном интервале $C = 1,5 \div 5,0$ зависимости $P(t)$ и $P(l)$ оказались близкими к гиперболическим:

$$P(t) = P_0 \frac{\tau}{\tau + \alpha t}, \quad (4)$$

$$P(l) = \varphi P_0 \frac{l_\kappa}{l_\kappa + l}, \quad (5)$$

где $\alpha = (C - \varphi)/\varphi$; φ — коэффициент, определяемый экспериментально.

Аналитические зависимости для скорости ОИ и длительности импульса имеют вид

$$V = \sqrt{\frac{2P_0 l_\kappa \varphi \ln C_{\max}}{M}}, \quad (6)$$

$$\tau = \frac{C_{\max} - \varphi}{\ln C_{\max} - \ln \varphi} \sqrt{\frac{2M l_\kappa \ln C_{\max}}{P_0 \varphi}}. \quad (7)$$

Отличие величин, рассчитанных по этим формулам, от экспериментально измеренных не превышает 10 %.

Установки для динамических испытаний конструкционных материалов при одноосном растяжении и сжатии

В основе применяемых для динамических испытаний материалов при одноосном сжатии и растяжении в интервале скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 10^2 \div 10^4$ 1/с используется метод составного стержня Гопкинсона (ССГ), описанный в [9]. Впервые при взрывном нагружении этот метод применен в [10]. Сущность его при испытаниях на сжатие состоит в том, что образец в форме короткого цилиндра, помещенный между торцами двух мерных стержней (передающим и опорным), подвергается действию волны напряжения, генерируемой в передающем стержне с помощью описанного выше взрывного нагружающего устройства (нагружение взрывом через демпфер). При испытаниях на растяжение используется образец в виде шляпки, а опорный стержень имеет трубчатую форму.

Аналогичная схема проведения испытаний применяется в экспериментах по определению динамической трещиностойкости материалов [11, 12]. Используются специальные образцы расклинивания, конец нагружающего стержня имеет форму клина. С помощью тензометров реги-

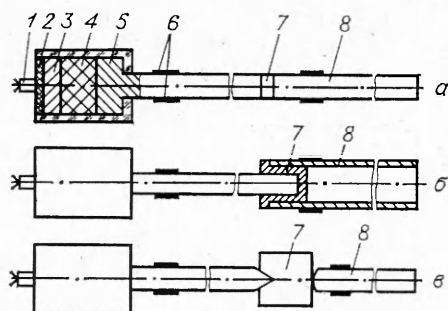


Рис. 4. Устройства для динамических испытаний материалов по методу ССГ на сжатие (а), растяжение (б) и трещиностойкость (в).

стрируется форма импульсов напряжения в опорном и передающем стержнях. Обработка полученных записей с учетом одномерной теории упругих волн дает возможность построить динамические диаграммы напряжение — деформация и определить (в последнем из отмеченных видов испытаний) динамическую трещиностойкость материалов. Схемы таких испытаний приведены на рис. 4. Здесь 1—4 — элементы нагружающего устройства, 5, 8 — передающий и опорный стержни, 7 — образец, 6 — тензометры.

Некоторые результаты проведенных испытаний даются в обзоре [13]. На рис. 5 схематично изображена установка для динамических испытаний на сжатие в непосредственной близости от активной зоны реактора. Здесь применена двойная герметизация образцов 2 из активных материалов (с помощью резиновой манжеты и специального герметизирующего корпуса 3). Локализация действия взрыва осуществлена с помощью стальной камеры 1. Результаты применения таких установок приведены в [14].

Установки для динамических испытаний материалов при сложном напряженном состоянии

На рис. 6 приведена схема установки для испытания трубчатых образцов [15], где использованы независимые взрывные системы нагружения в продольном и радиальном направлениях со скоростями деформации $\dot{\epsilon} = 10^2 \div 10^4$ 1/с.

Динамометр 3, подвешенный на кронштейне и соединенный с помощью муфты 5 с трубчатым образцом 7, расположен соосно в нерабочей полости взрывной камеры 1, закрепленной на опорах 14. На нижнем фланге образца установлена наковальня 11 с демпфирующим элементом 6, который служит для изменения амплитуды и длительности удара. Для продольного нагружения образца в рабочей полости взрывной камеры расположены заряд ВВ 2 и ударник 4 в виде кольца. При этом кинетическая энергия ударника значительно превышает потери на разрушение образца, что реализует испытания при $\dot{\epsilon} = \text{const}$. Для нагружения образца в радиальном направлении в его полости установлены соосно заряд ВВ 10, трубка-ударник 9 и демпфирующий элемент 8. Для обеспечения синхронного нагружения образца применяется взрывная линия задержки 12.

Образец нагружается следующим образом. При подрыве заряда 2 разгоняется ударник 4, который через демпфер и наковальню 11 нагру-

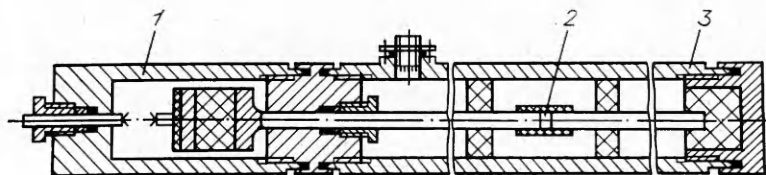
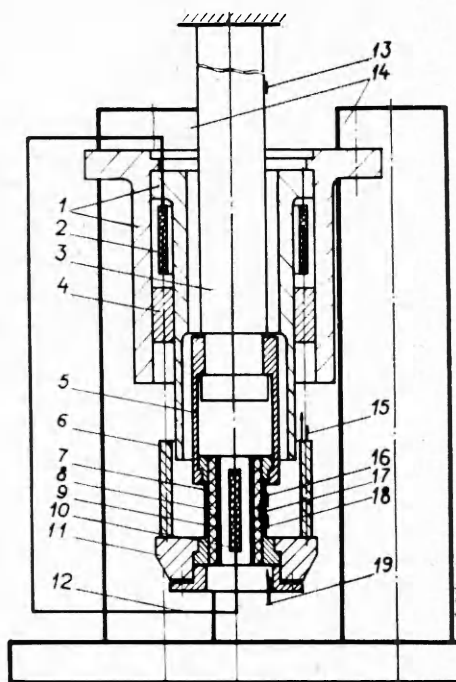


Рис. 5. Установка для реакторных испытаний по методу ССГ.

Рис. 6. Устройство для испытания трубчатых образцов.

жает образец в продольном направлении. При подрыве заряда 10 трубка-ударник 9 через демпфер 8 нагружает образец в радиальном направлении. Параметры нагружения измеряются с помощью электрических контактов, тензометров и манганиновых датчиков давления (на рис. 6 — 13, 16, 18 — тензометры для измерения деформаций динамометра, продольных и радиальных деформаций образца соответственно, 15, 19 — электроконтакты для измерения скорости ударника и перемещения нижнего торца образца, 17 — манганиновый датчик для измерения давления на внутренней поверхности образца). Масса заряда 3—5 г.

Некоторые результаты исследований приведены в [15, 16]. В [15] описана взрывная установка для динамических испытаний образцов в виде тонких полусферических оболочек. Нагружение осуществляется внутренним давлением при взрыве в центре небольшого сферического заряда. Скорость деформации $\sim 3 \cdot 10^3$ 1/с. Результаты испытаний трубчатых и полусферических образцов согласуются между собой. Отмечено, что при переходе от одноосного растяжения к двухосному пластические свойства материалов существенно уменьшаются. Применение установок такого типа в опытах на импульсных реакторах описано в [15, 17].



Малогабаритные ударные стенды для испытаний элементов конструкций на воздействие механических перегрузок

В работе [8] представлены два типа конструкций малогабаритных ударных стендов для испытаний элементов конструкций на действие сравнительно небольших перегрузок (до 10^3g); длительность трапецидального импульса давления $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ с, перепад скорости ОИ за время нагружения ~ 50 м/с. (В установках копрового типа подобные испытания могут быть проведены при высоте сброса ОИ со 120 м.)

Пример наиболее простого по конструкции ударного стенда приведен на рис. 7. Корпус стенда выполнен из Ст. 20 в виде ствола 2 с внутренним диаметром 140 и толщиной стенки 25 мм. Предусмотрена возможность изменения длины ствола. С одного торца ствола установлена дроссельная заглушка — глушитель УВ. Стенд снабжен четырьмя взрыв-

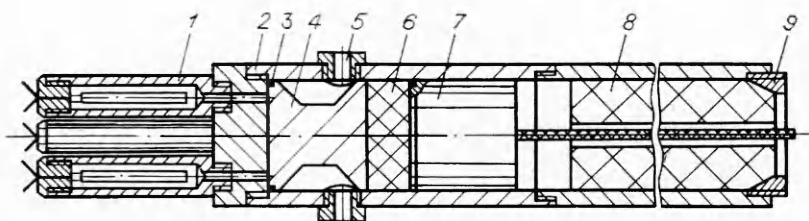


Рис. 7. Конструкция малогабаритного ударного стенда с размещением объекта испытания внутри разгонного отсека.

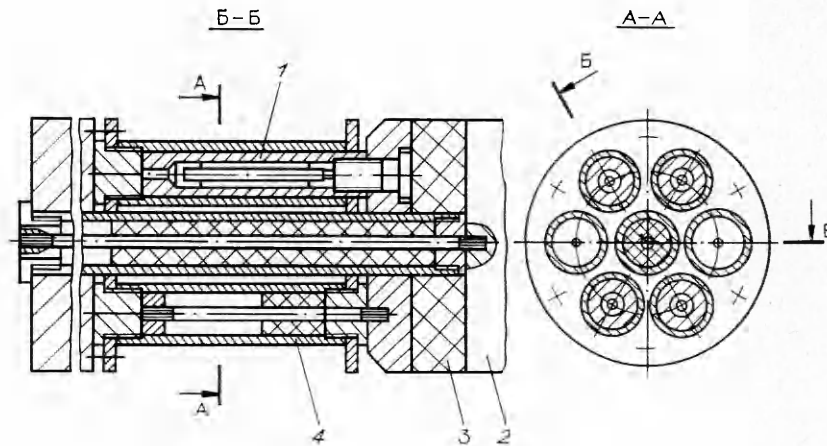


Рис. 8. Конструкция малогабаритного многомодульного ударного стенда.

ными камерами 1 из стали 30Х13 (наружный диаметр 70, толщина стенки 18, длина 500 мм). Заряд ВВ изготавливается в виде трубки из листового ВВ на основе тэна. Внутри ствола установлены поршень-ударник 4, нагружающий демпфер 6 и объект испытаний 7. Для уменьшения утечек газа поршень снабжен самоуплотняющейся прокладкой 3. Нагружение заканчивается при проходе поршнем-ударником дроссельных отверстий 5 и сбросе ПВ из полости разгонного отсека. ОИ тормозится пенополистироловым демпфером 8, продавливаемым через конусную втулку 9 (с заданным усилием). Допустимая плотность $\rho = 200 \text{ кг/м}^3$, при этом начальное нагружающее усилие составляет 250 т. (Масса ОИ и поршня в опытах соответственно 50 и 40 кг.) К недостаткам этой конструкции стенда относятся ограничения по габаритам ОИ и нагружающего демпфера.

Во втором малогабаритном стенде (рис. 8) эти недостатки устранены (за счет некоторого усложнения конструкции). Объект испытаний 2 и нагружающий демпфер 3 в этом варианте располагаются вне разгонного отсека, что снимает жесткие требования по их габаритам. Отсек сброса давления в стенде отсутствует. ПВ локализуются за счет торможения камер 1 внутри труб 4. Поэтому такие стенды используются в лабораторных условиях.

Ударные стенды для создания интенсивных механических импульсов

Для испытаний достаточно крупногабаритных объектов разработан и действует ряд ударных стендов, в которых с помощью взрывных камер создаются импульсные усилия до нескольких сотен тонн длительностью до 10^{-2} с. В отличие от описанных выше эти стенды обладают значительно большим запасом газа и имеют большую длину разгонного и тормозного отсеков. В качестве глушителя УВ в них использованы дроссельные заглушки с большой степенью дросселирования и раскрываемыми диафрагмами.

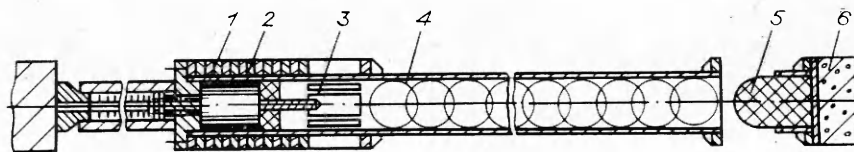


Рис. 9. Конструкция ударного стенда для создания интенсивных перегрузок (калибр 400 мм).

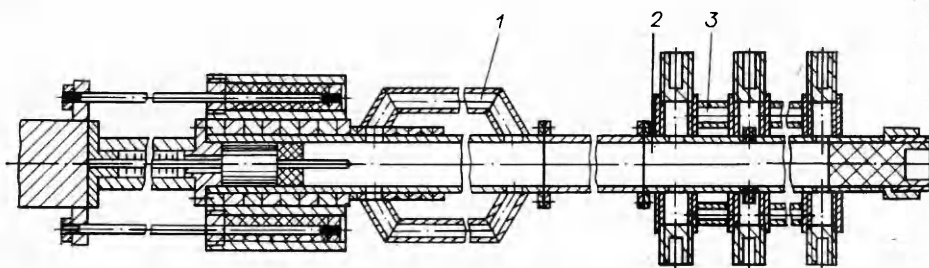


Рис. 10. Лабораторный вариант стенда (калибр 400 мм).

На рис. 9 приведена схема одного из наиболее простых по конструкции и в изготовлении стенда, позволяющего проводить испытания конструкций с размерами до 400 мм [8]. Практически все основные узлы выполнены из стандартного проката. Взрывная камера изготовлена из трубы 325×60 (Ст. 20), проточенной внутри до диаметра 220 мм. Рабочий объем камеры $6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$, допустимая плотность заряжения 85 кг/м^3 , что обеспечивает создание нагружающего усилия 1100 т. Часть трубы, выполняющая роль разгонного отсека 1, усилена набором колец 2 из листовой стали. В отсеке выпуска газа 3 (длиной $\sim 0,5 \text{ м}$) выполнено шесть прямоугольных отверстий. Часть трубы, где происходит торможение ОИ, заполняется полиэтиленовой стружкой 4. В конце тормозного отсека установлен пенопластовый демпфер 5, упирающийся в массивный бетонный откатник 6. Такая конструкция тормозной системы обеспечивает плавное торможение ОИ массой 100 кг, разогнанных до скорости 300 м/с. Стенды такого типа используются главным образом в условиях полигона.

В лабораторных условиях применяются более сложные установки. В стенде, конструкция которого представлена на рис. 10, после нагружения ПВ перепускаются через трубы 1 в полость тормозного отсека и участвуют в торможении ОИ. Для того чтобы после остановки ОИ сжатый газ не разгонял его в обратном направлении, конечный участок тормозного отсека снабжен еще одним перепускным отсеком 2 длиной 2 м. Он представляет собой ресивер из труб 3. Предусмотрено перекрытие труб ресивера.

Описанные взрывные установки являются отдельными примерами из серии действующих стендов. Помимо них на тех же принципах созданы конструкции, позволяющие проводить испытания на знакопеременные нагрузки. Опыт работы с подобными установками свидетельствует о широких возможностях их применения в различных отраслях науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков С. А., Синицын В. А., Погорелов А. П. Расчет взрывного нагружающего устройства для создания импульса деления заданных параметров // ФГВ.— 1980.— 16, № 6.— С. 111—113.
2. Крысанов Ю. А., Новиков С. А. и др. Исследование динамической сжимаемости пенополистирола // Пробл. прочности.— 1977.— № 8.— С. 121—123.
3. Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Об ударном сжатии пористых материалов // ПМТФ.— 1988.— № 6.— С. 57—61.
4. Абакумов А. П., Квасков Г. А., Новиков С. А. и др. Исследование упругопластического деформирования цилиндрических оболочек при осевом нагружении // Там же.— 1988.— № 3.— С. 150—153.
5. Новиков С. А., Петров В. А., Багрянов Б. В. Установка взрывного типа для создания инерционных перегрузок // Пробл. прочности.— 1982.— № 2.— С. 97—100.
6. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет.— М.: Оборонгиз, 1962.
7. Лин Э. Э., Сиренко А. В., Фунтиков А. И. Экспериментальное изучение расширения продуктов взрыва листового заряда в камере // ФГВ.— 1980.— 16, № 4.— С. 44—56.
8. Новиков С. А., Петров В. А., Сушков В. А. и др. Установки взрывного типа для механических испытаний // Там же.— 1989.— 25, № 4.— С. 147—151.

9. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // *Механика*.— Вып. 4.— М.: ИЛ, 1950.— С. 108—119.
10. Большаков А. П., Новиков С. А., Сеницын В. А. Исследование динамических диаграмм одноосного растяжения и сжатия меди и сплава АМг6 // *Пробл. прочности*.— 1979.— № 10.— С. 87—88.
11. Еременко А. С., Новиков С. А., Сеницын В. А. Трещиностойкость поликарбоната и полиметилметакрилата при высоких скоростях нагружения // *Физико-химическая механика материалов*.— 1985.— № 4.— С. 80—83.
12. Еременко А. С., Новиков С. А., Сеницын В. А. Корреляция релаксационных и энергетических характеристик разрушения полимеров при высоких скоростях нагружения // *Докл. АН СССР*.— 1986.— 286, № 6.— С. 1320—1323.
13. Большаков А. П., Новиков С. А., Сеницын В. А. Прочность конструкционных материалов при динамических нагрузках (обзор): Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов.— 1989.— Вып. 1.— С. 24—46.
14. Новиков С. А., Сеницын В. А., Ной П. А. Взрывные устройства для механических испытаний материалов в экспериментах на импульсных реакторах // Там же. Сер. ИРПКС.— 1986.— Вып. 1.— С. 26—31.
15. Багрянов Б. В., Квасков Г. А., Новиков С. А. и др. Методы внутрореакторных испытаний конструкционных материалов в условиях двухосного динамического растяжения при скоростях деформации 10^2 — 10^4 с⁻¹ // Там же.— 1988.— Вып. 2.— С. 44—49.
16. Багрянов Б. В., Квасков Г. А., Новиков С. А. Устройство для испытания трубчатых образцов в условиях двухосного динамического растяжения // *Пробл. прочности*.— 1988.— № 6.— С. 108—110.
17. Багрянов Б. В., Большаков А. П., Новиков С. А. Прочность стеклоэпоксида при импульсном нейтронном облучении // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. ИРПКС*.— 1987.— Вып. 1.— С. 57—61.

г. Москва

Поступила в редакцию 6/II 1990

УДК 539.89 : 662.215.2

*В. К. Голубев, Ю. А. Крысанов, С. А. Новиков,
А. И. Рябикин*

О МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ПРЕГРАД СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИЕЙ ТОНКОГО СЛОЯ ВВ

Представлены результаты исследования механического нагружения преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ. В результате численного расчета построены зависимости параметров нагружения от акустического импеданса преград. Получены экспериментальные результаты по влиянию размера нагружаемой поверхности и толщины слоя ВВ на значение импульса, переданного преградам из алюминия и текстолита. Рассмотрено распределение механического импульса в двухслойной системе текстолит — алюминий. Экспериментальные результаты объясняются существенной затянутостью нагружающего механического импульса.

Метод нагружения преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ широко применяется в практике динамических испытаний материалов и конструкций, а также в ряде импульсных технологических операций [1—3]. Он позволяет нагружать поверхности большого размера и сложной формы механическим импульсом высокой интенсивности и малой длительности. Особенно удобны для этих целей пластические ВВ, которые имеют малую критическую толщину детонации и легко наносятся на поверхность произвольной формы. Так, еще в [1] описывалось пластическое ВВ С-4 на основе тэна, имеющее плотность 1,5 г/см³, скорость детонации 6,7 км/с и устойчиво детонирующее при толщине слоя 0,4 мм. Отдельные вопросы механического нагружения преград скользящей детонацией исследовались расчетным [4, 5] и экспериментальным [6] методами. В данной работе поставлена задача более детального рассмотрения некоторых связанных с процессом нагружения эффектов, для чего оба эти метода используются в совокупности.

Слой ВВ толщиной h_e располагался на плоской поверхности преграды. Плоский детонационный фронт, перпендикулярный поверхности раздела ВВ — преграда, имел скорость распространения D_e . Течение продуктов детонации (ПД) рассматривалось в системе координат, связанной