

30. Писаренко Г. С., Можаровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести.— Киев: Наук. думка, 1981.
31. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопроотивление материалов.— М.: Наука, 1986.
32. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела.— М.: Наука, 1973.
33. Жилкин В. А., Попов А. М. Голографический муаровый метод // Завод. лаб.— 1979.— Т. 45, № 11.
34. Петров В. Д. Скоростная обработка фотографических слоев при получении отражательных голограмм // ЖНПФК.— 1976.— Т. 21, № 3.
35. Биргер И. А. Остаточные напряжения.— М.: Машгиз, 1963.

Поступила 4/XI 1986 г.

УДК 532.593

ПЕРЕДАЧА УДАРНО-ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ НАСЫПНЫМИ СРЕДАМИ

Б. Е. Гельфанд, С. П. Медведев, А. Н. Поленов,
С. М. Фролов
(Москва)

В [1] исследовано скольжение воздушной ударной волны (ВУВ) вдоль поверхности пылевого слоя. Показано, что характер изменения давления на подложке при наличии слоя существенно отличается от распространения ВУВ вдоль чистой поверхности. В связи с практической важностью обнаруженного эффекта в настоящей работе проведено подробное экспериментальное изучение параметров волн давления, действующих на жесткую стенку, покрытую слоями различных сыпучих веществ, при ударно-волновом нагружении. Рассмотрены случаи как нормального падения ВУВ на слой, так и распространения ВУВ вдоль поверхности слоя.

1. Нормальное падение ВУВ на слой. Эксперименты проводились на вертикальной ударной трубе с внутренним диаметром 50 мм, длиной 3 м. Схема установки приведена на рис. 1, а. Камера высокого давления (КВД) 1 длиной 1,5 м отделена от камеры низкого давления (КНД) 2 разрывной мембраной 3. КНД оснащена пьезоэлектрическими датчиками давления 4—6. На торец КНД с смонтированным датчиком 6 помещали слой сыпучих материалов. Характеристики исследуемых веществ (ρ_p , ρ_n , φ , d — соответственно плотность материала частиц, насыпная плотность, объемная доля твердой фазы и средний размер частиц) приведены в таблице. Для рассеивания использовались калиброванные сита. В опытах применялись пьезодатчики типа ЛХ с диаметром чувствительной поверхности 1 см, что много больше d . Датчик 5 помещался вблизи поверхности слоя, 4 — запускающий датчик. В КВД азот или гелий, в КНД воздух при давлении $p_0 = 0,1$ МПа. Сигналы пьезодатчиков регистрировались на осциллографах С8-17. Избыточное давление на фронте падающих ВВ $\Delta p = p_1 - p_0$ (p_1 — давление за фронтом волны) варьировалось в диапазоне 0,05—1 МПа.

Эксперименты показали, что при ударно-волновом нагружении характер давления на торце, покрытом сыпучим веществом, отличается от известного случая взаимодействия ВУВ с жесткой стенкой. После отражения падающей ВУВ от свободной поверхности насыпной среды на торец под слой приходит возмущение давления, характеризующееся выбросом на фронте и дальнейшим спадом с быстрозатухающими колебаниями до давления отражения на поверхности слоя p . Длительность выброса пропорциональна высоте слоя, а его амплитуда может в несколько раз превышать «стационарное» значение p , которое незначительно (на 10—20%) меньше давления отражения на жесткой стенке.

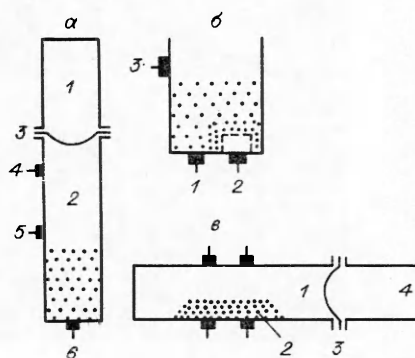


Рис. 1

№ п/п	Исследуемое вещество	ρ_p , г/см ³	ρ_n , г/см ³	φ	d , мм
1	Плексиглас	1,48	0,34	0,29	0,01
2	Полистирол 1	1,06	0,52	0,49	0,1
3	Полистирол 2	1,06	0,50	0,48	0,2
4	Песок	2,45	1,78	0,73	0,3
5	Полиэтилен	0,82	0,55	0,67	4,5

В отдельных опытах для выяснения природы наблюдаемого эффекта измерения проводились по схеме рис. 1, б, которая позволяла разделить влияние твердой фазы и газа в промежутках между частицами на характер записи давления. В торце ударной трубы размещали два датчика. Датчик 1 находился в непосредственном контакте с частицами насыпной среды (т. е. как датчик б). Чувствительная поверхность датчика 2 закрывалась перфорированной перегородкой, исключающей соприкосновение с твердой фазой, но проницаемой для газа. Отладочные эксперименты показали, что наличие перфорированной перегородки не искажает характер записи давления, если перегородка находится вблизи чувствительной поверхности датчика.

На рис. 2, а, б приведены записи давления в эксперименте по схеме рис. 1, б со слоем вещества 3 (см. таблицу) высотой $h = 20$ мм. Масштаб времени 0,5 мс в делении горизонтальной шкалы для рис. 2, а, б, масштаб давления 0,23 МПа в делении вертикальной шкалы для рис. 2, а и верхнего луча рис. 2, б и 0,3 МПа для нижнего луча рис. 2, б. Рис. 2, а представляет запись давления отражения на поверхности слоя датчиком 3 (рис. 1, б). Избыточное давление в падающей УВ $\Delta p = 0,1$ МПа. Верхний луч рис. 2, б — регистрация давления датчиком 1, а нижний — датчиком 2. Как видно, характер нагрузки существенно различен. При контакте чувствительной поверхности датчика с частицами насыпной среды наблюдаются значительная пульсация давления на фронте с амплитудой p_m и быстрый спад с затухающими колебаниями до значения давления на поверхности слоя p . В отсутствие контакта с твердой фазой давление на торце повышается относительно медленно. Это, видимо, обусловлено фильтрацией газа из ударно-сжатой пробки над поверхностью слоя.

Несмотря на относительную кратковременность (для условий эксперимента рис. 2, а, б около 300 мкс), импульс давления в ряде случаев мо-

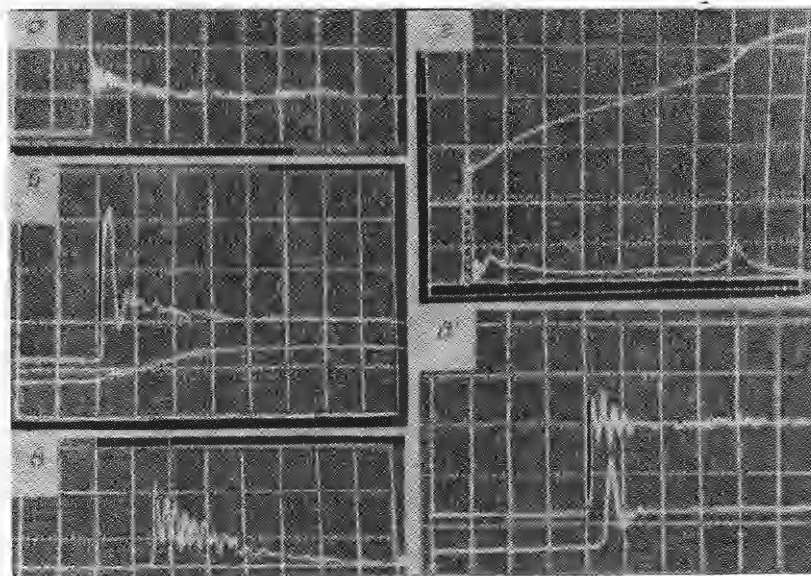


Рис. 2

жет оказывать реальное механическое действие. Это иллюстрируется следующим контрольным опытом. В торце ударной трубы крепилась мембрана из медной фольги толщиной 0,1 мм. Падающая ВУВ с избыточным давлением на фронте около 0,1 МПа не разрывала ее. На мембрану помещали слой вещества 2 высотой 20 мм. В этом случае волна с указанными параметрами разрывала мембрану.

Проанализируем зависимость максимального избыточного давления на подложке p_m от параметров слоя насыпной среды — высоты слоя h , размера и материала частиц. Повышение давления охарактеризуем максимальным коэффициентом относительной нагрузки δ_m , равным отношению p_m к избыточному давлению отражения ВУВ на поверхности слоя: $\delta_m = p_m/p$. В верхней части рис. 3 приве-

дена зависимость δ_m от высоты слоя для различных сыпучих материалов. Избыточное давление в падающей УВ 0,1 МПа. Номер кривой соответствует номеру вещества в таблице. Как видно, имеется «оптимальная» высота h , при которой нагрузка максимальна. С уменьшением размера частиц насыпной среды коэффициент δ_m увеличивается. Сравнение кривых 3 и 4 позволяет предположить, что параметры нагрузки несущественно зависят от материала частиц.

Значительное влияние на коэффициент нагрузки оказывает исходное состояние насыпной среды перед экспериментом. Установлено, что δ_m уменьшается после предварительной подпрессовки слоя, производимой либо механически перед опытом, либо многократными воздействиями УВ. Например, в эксперименте с веществом 1 при $h = 20$ мм путем механического сжатия увеличили объемную долю твердой фазы в смеси с исходной 0,29 до 0,41. Это привело к падению коэффициента δ_m в 2,5 раза.

Одним из параметров, определяющих разрушительную силу УВ, является импульс фазы сжатия. Для установления характера трансформации импульса насыпной средой проведены эксперименты с ВУВ конечной длительности на установке, аналогичной изображенной на рис. 1, а, но с КВД длиной 1 см, заполняемой гелием. Давление разрыва мембраны в КВД около 5 МПа. При названных параметрах КВД на торец КВД приходила волна треугольного профиля давления с $\Delta p \approx 0,1$ МПа и длительностью фазы сжатия 1,2—1,4 мс. Для удобства обработки результатов эксперимента параллельно с методом непосредственного вычисления площади по осциллограмме давления использовался электронный интегратор сигнала торцевого датчика. Для веществ 4,5 (см. таблицу) получено, что максимальный импульс, передаваемый подложке, превышает импульс, передаваемый в отсутствие насыпной среды, на 15—20%. Больше отличие импульсов наблюдалось для веществ 1—3. На рис. 2, в, г приведены типичные записи давления в опыте с веществом 3 при $h = 20$ мм. Рис. 2, в соответствует записи сигнала датчика, расположенного вблизи поверхности слоя, и представляет отраженную волну треугольного профиля давления (масштаб времени 0,2 мс в делении горизонтальной шкалы, масштаб давления 0,2 МПа в делении вертикальной шкалы). Нижний луч рис. 2, г отвечает записи давления торцевым датчиком, а верхний — записи импульса с помощью интегратора. Здесь масштаб времени 0,5 мс в делении горизонтальной шкалы, масштаб импульса (верхний луч) 115 Па·с и масштаб давления (нижний луч) 0,3 МПа в делении вертикальной шкалы. Видно, что, в то время как давление на поверхности слоя уже практически отсутствует, торец продолжает подвергаться действию нагрузки. В соответствии с этим растет и импульс, который может значительно пре-

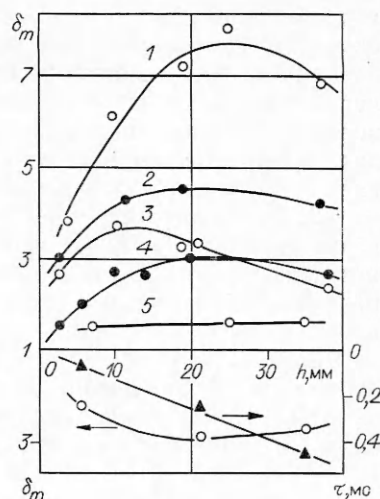


Рис. 3

высить импульс в отраженной от поверхности слоя волне. Микроскопическое исследование частиц плексигласа, полистирола показало, что поверхность частиц в отличие от песка полиэтиленовых гранул существенно негладкая. В процессе взаимодействия таких частиц между собой и с поверхностью трубы могут возникать значительные силы сцепления, приводящие к необратимому характеру сжатия насыпной среды и, как следствие, к эффектам остаточного нагружения подложки.

2. Распространение ВУВ вдоль поверхности слоя. В общем случае взаимодействие ВУВ от внешнего источника с объемами, частично заполненными насыпной средой, может происходить при произвольном угле падения ВУВ на слой. В связи с этим исследовано распространение УВ вдоль поверхности слоя. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, *в*. В КНД 1 горизонтальной ударной трубы квадратного сечения 40×40 мм длиной 2 м помещали слой испытываемых веществ 2 различной высоты. Длина слоя около 40 см. Расстояние от мембраны 3 до начала слоя 45 см. В КВД 4 длиной 0,5 м азот или гелий, в КНД воздух при $p_0 = 0,1$ МПа. Датчики давления располагаются попарно — над и под слоем. Это позволяло фиксировать давление в газе и на подложке одновременно. Расстояние между датчиками 20 см.

На рис. 2, *д* даны записи давления в опыте со слоем песка высотой $h = 6$ мм. Масштаб времени 0,2 мс в делении горизонтальной шкалы, масштаб давления 0,07 МПа в делении вертикальной шкалы для верхнего луча и 0,2 МПа для нижнего. Верхний луч соответствует записи давления в газе, нижний — регистрация нагрузки на стенку под слоем в том же месте трубы. Характер изменения давления на подложке аналогичен случаю нормального падения ВУВ (ср. с верхним лучом рис. 2, *б*). Особенностью процесса является то, что возмущение, приходящее на подложку, запаздывает по сравнению с возмущением в газе на значение τ , пропорциональное высоте слоя. Такой же результат получен в [1]. Отметим, что τ также отвечает длительности выброса давления. Как и при нормальном падении ВУВ на слой, введем коэффициент δ_m , равный отношению максимального избыточного давления на подложке к избыточному давлению на фронте волны в газе. В нижней части рис. 3 приведены зависимости δ_m и τ от высоты слоя для песка. Избыточное давление на фронте УВ, распространяющейся над слоем, $\Delta p = 0,15 - 0,2$ МПа. Зависимость максимального коэффициента относительной нагрузки от высоты слоя аналогична найденной при нормальном падении ВУВ. Разумно предположить, что механизм усиления ударно-волновой нагрузки один и тот же в обоих случаях.

3. Обсуждение результатов. Анализ полученных данных показывает, что процесс ударно-волнового нагружения поверхности, покрытой слоем сыпучего вещества, имеет те же особенности, что и взаимодействие ВУВ со стенкой, облицованной пористым сжимаемым материалом типа пенополиуретана с умеренной плотностью, не превышающей $30 - 50$ кг/м³ [2, 3]. В [4, 5] для описания явления использована модель, представляющая пористый сжимаемый материал эквивалентным газом с «равновесными» параметрами. Перенос этой методики на расчет для сред насыпной плотности не дает результата по ряду причин. В [6] показано, что использование «равновесных» параметров для описания насыпных сред правомерно лишь при размерах частиц менее 20 мкм. Кроме того, пока неясно, как на основе представлений об эквивалентном газе описать зависимость δ_m от высоты слоя. Рассмотрим модель явления, отличную от [4, 5] и основанную на анализе движения насыпной среды как целого под воздействием внезапно приложенной нагрузки.

Как показано выше (см. рис. 2, *б*), основной вклад в импульсное давление на фронте возмущения вносит твердая фаза, составляющая насыпную среду. В соответствии с этим сущность процесса опишем следующим образом. Пока слой сыпучего материала не находится под давлением ВУВ, отдельные частицы удерживаются в равновесии силами трения. При отражении ВУВ от границы газ — насыпная среда слой мгновенно

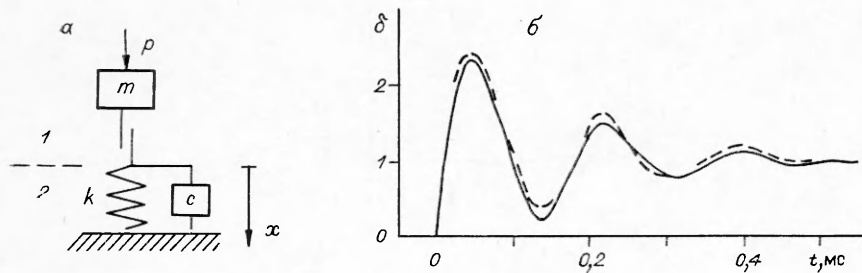


Рис. 4

нагружается газовым поршнем с избыточным давлением p . Под действием этого давления частицы смещаются из своих положений равновесия и располагаются более плотно. Для этого достаточно уже небольшого давления, что по [7] справедливо для веществ типа песка и т. п. В процессе дальнейшей деформации сопротивление насыпной среды возрастает по закону, в основном определяемому упругими свойствами материала частиц.

Согласно приведенной схеме, представим столбик массы m единичной площади поперечного сечения, «вырезанный» в слое насыпной среды высотой h , эквивалентной механической системой с одной степенью свободы, состоящей из груза массы m и комбинации идеально пластического элемента Кулона с нулевой восстанавливающей силой (участок 1 на рис. 4, а) и упругого элемента с упругостью k и демпфированием c (участок 2). Рассмотрим движение массы m под действием внезапно приложенной постоянной нагрузки p . На участке 1 тело приобретает скорость v_0 . Дальнейшее движение груза описывается уравнением

$$(3.1) \quad m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p$$

с начальными условиями

$$(3.2) \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = v_0.$$

При различных соотношениях между c и c_0 ($c_0 = 2(km)^{1/2}$ — критический коэффициент демпфирования) можно выделить три класса решений уравнения (3.1). Для рассматриваемой задачи характерно решение при $c < c_0$. Нагрузка на жесткую подложку в произвольный момент времени $t > 0$ есть $R = kx$. Для коэффициента $\delta = Rp^{-1}$ решение уравнения (3.1) с учетом (3.2) имеет вид

$$(3.3) \quad \delta = \exp(-\alpha t)[(\gamma - \alpha)\beta^{-1}\sin\beta t - \cos\beta t] + 1,$$

где $\alpha = c(2m)^{-1}$; $\beta = (km^{-1} - \alpha^2)^{1/2}$; $\gamma = kv_0p^{-1}$. Максимальное значение коэффициента δ_m достигается в момент времени $t_m = \beta^{-1}\arctg\{\beta\gamma[(\gamma - \alpha)\alpha - \beta^2]^{-1}\}$.

Основную трудность в применении «механической» модели к описанию процесса передачи ударно-волновой нагрузки насыпной средой представляет определение k , c , v_0 . На основании одного из экспериментов (песок, $h = 14$ мм, $p = 0,32$ МПа) и уравнения (3.3) найдены примерные значения k , c , v_0 . На рис. 4, б штриховая линия соответствует этому эксперименту, сплошная — расчет зависимости $\delta = \delta(t)$ по (3.3) при $k = 3,3 \cdot 10^{10}$ Н/м³, $c = 0,2c_0$, $v_0 = 0,6$ м/с. На рис. 5, а, б приведены результаты опытов (штриховые линии) и расчетов (сплошные) для песка при $p = 0,32$ МПа и соответственно $h = 20$ и 5 мм. В расчетах использовались значения k , c , v_0 , найденные по эксперименту с $h = 14$ мм. Как видно, результаты расчетов находятся в хорошем согласии с опытными данными, правильно описывают амплитудно-частотные характеристики процессов.

Если допустить, что масса m (рис. 4, а) первоначально расположена в центре масс исходного столбика насыпной среды, то максимальная ско-

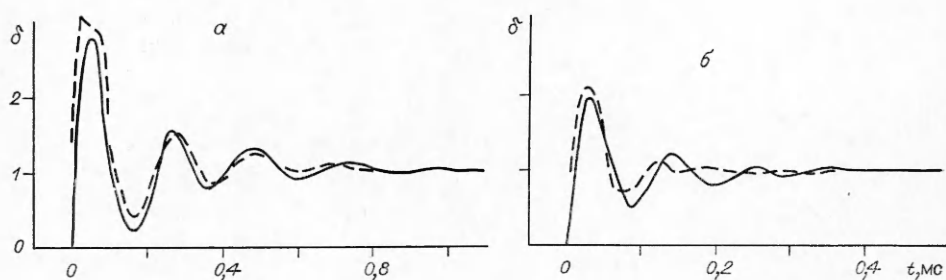


Рис. 5

рость свободной границы слоя есть $2v_0$. Кроме того, если известно значение v_0 , то можно определить расстояние, на которое сместится свободная граница до начала процесса упругого сжатия, т. е. длину участка l на рис. 4, а. Обозначим ε отношение длины участка l к высоте h исходного столбика. Скорость v_0 описывается выражением $v_0 = (\varepsilon p \rho_n^{-1})^{1/2}$ и, как видно, не зависит от высоты слоя. Для условий эксперимента рис. 4, б вычисленное значение $\varepsilon \approx 0,0025$, т. е. смещение границы слоя песка при действии давления $p = 0,32$ МПа не превышает 1%. С помощью высокоскоростной кинокамеры ФК-1М проведена визуализация движения границы насыпной среды под действием ВУВ для указанного случая. Видимых изменений в положении границы не обнаружено.

Отметим, что предложенная «механическая» модель основана на простейших предположениях относительно характера движения насыпной среды под действием ВУВ. В частности, ограниченность модели проявляется в том, что она правильно описывает зависимость δ_m от высоты слоя только при относительно небольших значениях h ($h \approx 20 - 25$ мм). Для уточнения определяющих зависимостей необходим более полный учет специфики конкретной среды. Например, при больших h следовало бы принять во внимание способность насыпной среды уплотняться под действием собственного веса. При этом значение ε падает, что приводит к уменьшению коэффициента δ_m .

Как видно из соотношения (3.3), с увеличением давления максимальный коэффициент относительной нагрузки падает. Однако, как показано в [8, 9], для нагружения пористого слоя мощными УВ (давление свыше 10 ГПа) возможны эффекты усиления ударно-волнового воздействия, связанные с динамической жесткостью среды и ее прочностными характеристиками.

Таким образом, при действии УВ умеренной интенсивности на жесткую стенку, покрытую слоем сыпучего вещества, изменяется характер нагружения. Если в отсутствие слоя подложка нагружается квазистатически, то наличие слоя приводит к появлению импульсной составляющей, учет которой необходим в ряде случаев при расчетах на прочность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adachi T., Suzuki T., Tanabe K. The pressure waves in a dust layer over which a shock wave is propagating // Theoretical and Applied Mechanics.— Tokyo: Univ. of Tokyo Press, 1984.— V. 32.
2. Гельфанд Б. Е., Губин С. А. и др. Исследование особенностей распространения и отражения волн давления в пористой среде // ПМТФ.— 1975.— № 6.
3. Гвоздева Л. Г., Фаресов Ю. М., Фокеев В. П. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористыми сжимаемыми материалами // ПМТФ.— 1985.— № 3.
4. Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1983.— № 4.
5. Гвоздева Л. Г., Фаресов Ю. М. О расчете параметров стационарных ударных волн в пористой сжимаемой среде // ЖТФ.— 1985.— Т. 55, вып. 4.
6. Гельфанд Б. Е., Медведев С. П. и др. Измерение скорости слабых возмущений в пористых средах насыпной плотности // ПМТФ.— 1986.— № 1.
7. Компанец А. С. Ударные волны в пластической уплотняющейся среде // ДАН СССР.— 1956.— Т. 109, № 1.

8. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. и др. Возможная схема описания ударно-волнового сжатия пористых образцов // ДАН СССР.— 1977.— Т. 236, № 1.
 9. Костюков Н. А. Критерий усиления косо́й ударной волны с помощью слоя пористого вещества // ФГВ.— 1980.— Т. 16, № 5.

Поступила 25/XII 1986 г.

УДК 539.4

ПРОЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6 ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

В. К. Голубев, А. И. Коршунов, С. А. Новиков,
Ю. С. Соболев, Н. А. Юкина
(Москва)

Алюминиевый сплав АМг6 — один из наиболее широко применяемых конструкционных материалов современной техники. Это обусловлено его высокими физико-механическими и технологическими свойствами и, как и для других алюминиевых сплавов, малой плотностью и хорошей коррозионной стойкостью. Задачи оптимального проектирования современных конструкций потребовали более детальных данных по механическим свойствам конструкционных материалов, в частности сплава АМг6, в широком диапазоне условий нагружения, характеризующихся прежде всего температурой испытания и скоростью деформации. Комплексное исследование механических свойств сплава АМг6 в статических условиях испытаний в широких диапазонах скоростей деформации $10^{-6} \dots 0,3 \text{ с}^{-1}$ и температур $80 \dots 850 \text{ К}$ проведено в [1]. Данные по механическим свойствам сплава в диапазонах скоростей деформации $5 \cdot 10^{-4} \dots 20 \text{ с}^{-1}$ и температур $0 \dots 500^\circ\text{С}$ приведены в [2]. Для условий одноосного растяжения при нормальной температуре получен также ряд результатов при более высоких скоростях деформации, вплоть до $4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ [3—6]. Отдельно следует выделить условия ударно-волновых испытаний, характеризующиеся высокоинтенсивным и кратковременным нагружением материала при одномерной деформации. Здесь можно отметить ряд работ по влиянию на откольную прочность сплава АМг6 характерного времени нагружения и температуры испытаний [7—11]. Частные аспекты откольного разрушения сплава рассматривались также в [12, 13].

В настоящей работе ставится задача получения новых экспериментальных данных по влиянию температуры испытаний на прочность и разрушение алюминиевого сплава АМг6 при ударно-волновом нагружении. Рассматривается возможность определения остаточных механических свойств откольно-поврежденного материала на микрообразцах, изготовленных из макрообразцов, подвергнутых ударно-волновому нагружению. Предпринимается попытка предварительной систематизации данных по откольной прочности алюминиевого сплава АМг6 с учетом влияния характерного времени нагружения, температуры испытания и технологии материала.

Образцы для ударно-волновых испытаний толщиной 10 мм и диаметром 80 мм вырезались из листа и подвергались отжигу при температуре 320°С в течение часа. Постановка опытов та же самая, что и в [10]. Ударно-волновое нагружение образцов осуществлялось ударом пластины из алюминиевого сплава АМц толщиной 4 мм, разгоняемой до необходимой скорости w посредством скользящей детонации листового заряда ВВ. Нагрев образцов до 500°С производился электронагревателем. Оценки давления в нагружающих импульсах делались, как и в [10], по формуле $p = \rho(c_0 + \lambda w/2)w/2$, где $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, $c_0 = 5,25 \text{ км/с}$, $\lambda = 1,39$. Характерное время нагружения, оцениваемое как время циркуляции пластической волны в алюминиевом ударнике, составляет 1,5 мкс. Степень и характер

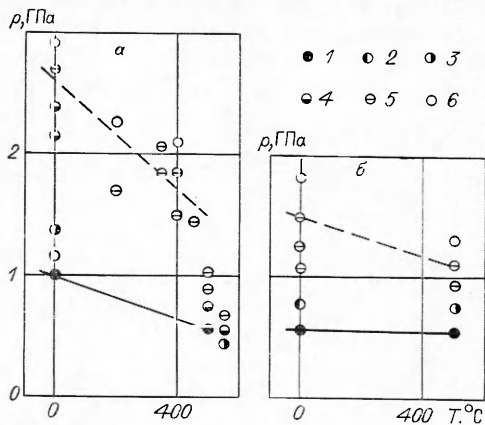


Рис. 1