

частичная разгрузка, производимая через малые времена после окончания нагружения, имеет результатом полную приостановку ползучести); прекращение ползучести сплава Д16Т наступает по прошествии около 580 ч (5%-ная разгрузка приводит к значительному снижению ползучести); ползучесть сплава Д16Т начинается при напряжениях, больших или равных пределу текучести; условный предел прочности сплава Д16Т уменьшается за счет накопленной при ползучести деформации; металлы, подвергшиеся ползучести, имеют закон разгрузки, отличный от линейного с начальным модулем упругости.

За участие в опытах и обработке их результатов благодарю В. Б. Сопотову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков А. М. Деформационная анизотропия и ползучесть малоуглеродистой стали при нормальной температуре. — Инж. ж., 1961, т. 1, № 4, с. 150—153.
2. Жуков А. М. Ползучесть цветных металлов при комнатной температуре за пределами упругости. — Инж. ж., 1963, т. 3, № 2, с. 409—413.
3. Жуков А. М. Зависимость модуля упругости и коэффициента линейного расширения от температуры для некоторых металлов. — Изв. АН СССР. ОТН. Механ. и машиностр., 1959, № 4, с. 173—175.
4. Жуков А. М. Деформирование малоуглеродистой стали при фиксированных скоростях нагружения. — Проблемы прочности, 1974, № 12, с. 26—30.

Москва

Поступила в редакцию
9.VIII.1983.

УДК 539.3:534.1

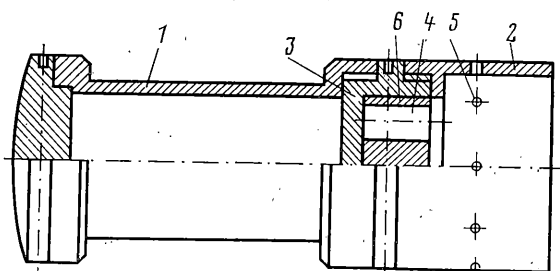
ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ОСЕВОМ УДАРЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, НЕСУЩЕЙ МАССУ НА НЕКОНТАКТИРУЕМОМ ТОРЦЕ

БРИГАДИРОВ Г. В., ТОЛОКОННИКОВ Л. А.

Приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований эффектов осевого удара о жесткую преграду цилиндрической оболочки, несущей массу на неконтактируемом торце.

1. Специальная установка позволяла создавать разнообразные вертикальные скорости движения цилиндрической оболочки вдоль ее оси. Можно изменять геометрические параметры оболочки, материал, величину присоединенной массы. Кинематические характеристики движения точек оболочки регистрировались посредством фотоприборов.

Теоретическому и экспериментальному изучению поведения цилиндрических оболочек при ударном нагружении посвящен ряд публикаций советских и зару-



Фиг. 1

бежных авторов [1—7]. В большинстве из них исследования связаны с упругими состояниями достаточно тонких неподвижных цилиндрических оболочек, по которым наносится удар падающей массой. Основное внимание при исследованиях уделялось анализу процессов поперечного волнообразования.

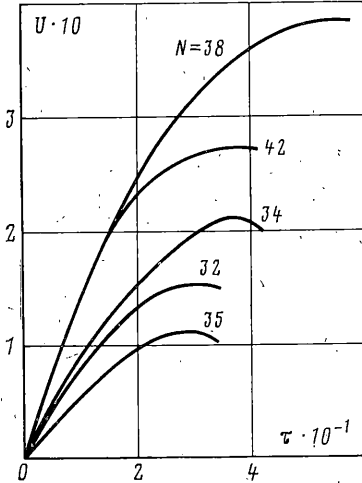
Описываемые эксперименты проводились с подвижными образцами при изменении параметров оболочки и условий нагружения в достаточно широком диапазоне. Проводилась регистрация продольных перемещений присоединенной массы, отмечалась качественная картина форм выпучивания оболочек и остаточных деформаций.

Динамические состояния цилиндрической оболочки описывались дифференциальными уравнениями теории гиперболического типа [8]. Начальные условия соответствуют скачку скорости продольных перемещений на ударяемом торце оболочки. Граничными условиями являются заделка ударяемого торца и подвижное в продольном направлении защемление неконтактируемого торца.

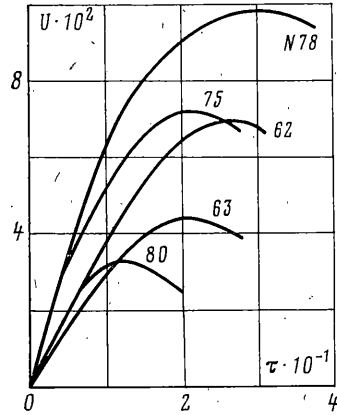
Дополнив эту систему соотношениями между силовыми и геометрическими параметрами деформирования при упругих и упругопластических состояниях, получим математическую постановку задачи удара оболочки о преграду.

Введем далее безразмерные координату и время $\xi = xl^{-1}$, $\tau = atl^{-1}$, где x — продольная координата точки оболочки, t — время, скорость распространения упругих продольных волн в оболочке $a = E^{1/2} [\rho(1-\nu^2)]^{-1/2}$, ρ — плотность, E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона материала оболочки.

Процесс удара рассматриваемой оболочки о жесткую преграду определяется системой безразмерных параметров подобия $\Pi_1 = hR^{-1}$, $\Pi_2 = lR^{-1}$, $\Pi_3 = Va^{-1}$, $\Pi_4 =$



Фиг. 2



Фиг. 3

$= m^* m^{-1}$, $\Pi_5 = E_1 E^{-1}$, $\Pi_6 = \nu$, $\Pi_7 = e_s$, где h , R , l — толщина, радиус, радиус срединной поверхности, длина оболочки, V — скорость удара, m^* — масса деформируемой части оболочки, m — величина присоединенной массы, E_1 и e_s — модуль упрочнения и динамический деформационный предел упругости материала оболочки.

Используя эти параметры, можно определить характеристики экспериментальных образцов и условия их нагружения.

Если материал проекта оболочки и экспериментального образца одинаков, то подобие процесса удара определяется равенством критериев Π_1 — Π_4 . Если экспериментальные образцы выполнены из другого материала, то удовлетворит равенству всех критериев подобия невозможно. Для многих материалов критерии Π_5 и Π_6 имеют достаточно близкие значения. Критерий Π_7 определяет упругий участок процесса деформирования, на котором деформации связаны со скоростью удара линейной зависимостью. В этом случае различие критериев может быть скомпенсировано соответствующим выбором критерия Π_3 . Результаты экспериментов удовлетворительно согласуются с этим положением.

2. При проведении экспериментов было исследовано влияние отдельных параметров процесса удара на характер изменения во времени продольных перемещений, скоростей и усилий, развивающихся в оболочке. Для этого была изготовлена партия образцов, выполненных из алюминиевых сплавов АМГ6 и Д16Т.

Экспериментальные образцы (фиг. 1) представляют собой цилиндрическую оболочку 1, заключенную между жесткими днищами, моделирующими защемление ее торцов. К неконтактирующему диску при помощи переходника 3 крепится стакан 2, имеющий восемь боковых отверстий 5 для создания светящейся точки от источника света 4. Стакан вместе с переходником и источником света моделирует присоединенную массу. Для варьирования величины массы внутри стакана размещались сменные стальные диски 6.

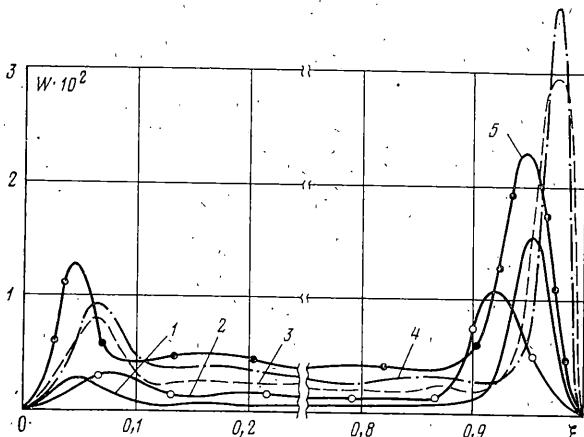
Установка для испытаний представляет собой стальную вышку высотой 10 м, смонтированную на четырех железобетонных опорах. На вершине вышки смонтирован сменный лафет, на котором может быть проведен монтаж артиллерийских ствол с противооткатным устройством. Вышка относительно опор может поворачиваться на цапфах в вертикальной плоскости. Угол наклона ствола при эксперименте фиксировался артиллерийским квадрантом, точность установки угла $\pm 1^\circ$.

Процесс динамического деформирования регистрировался на фотоленку. Для

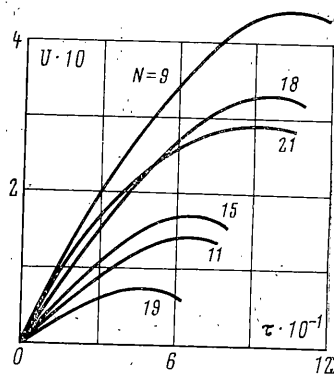
записи кривой изменения положений образца во времени были использованы специальные фотоприборы, позволяющие осуществить съемку жестко соединенной с образцом светящейся точки на движущуюся фотопленку.

При движении образца с точечным источником света перед объективом фотоприбора на фотопленке фиксируется след источника света. При равномерном движении фотопленки и образца на фотограмме фиксируется наклонная прямая. Варьируя скорость вращения барабана фотоприбора при заданной скорости движения образца, можно получить наиболее удобный для последующей обработки угол наклона этой прямой к горизонтальной линии.

При ударе образца о преграду происходит его торможение. Прямая на фотограмме искривляется, происходит запись кривой изменения во времени продольных перемещений неконтактирующего торца оболочки.



Фиг. 4



Фиг. 5

Последующая обработка этих кривых путем графического дифференцирования позволяет определить характер изменения скоростей, перегрузок и усилий в процессе удара.

Скорость подхода образца к преграде замерялась при помощи двух рам мишеней, установленных на расстоянии 3 м от преграды на пути его движения и работающих на разрыв электрической цепи. База между рамами составляла 2 м.

В качестве отсчетчика времени использовался электронный хронограф с точностью измерения $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ с.

Угол встречи экспериментальных образцов с преградой, а также перпендикулярность оптической оси фотоприборов и траектории образца контролировалась артиллерийским квадрантом.

Расшифровка фотограмм проводилась по специальной методике на универсальном инструментальном микроскопе с ценой делений $1 \cdot 10^{-6}$ м.

3. При проведении экспериментов было реализовано 15 вариантов экспериментальных образцов с достаточно широким диапазоном изменения критериев Π_k : $\Pi_1 = 3 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$, $\Pi_2 = 2 - 10$, $\Pi_3 = 4 \cdot 10^{-3} - 15 \cdot 10^{-3}$, $\Pi_4 = 4 \cdot 10^{-2} - 2,5 \cdot 10^{-1}$.

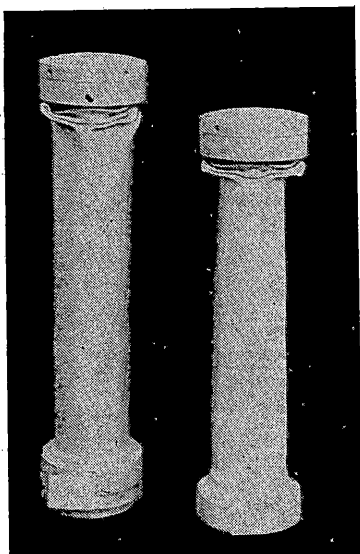
Каждый опыт повторялся два или три раза в зависимости от разброса результатов. Результаты экспериментов получались при помощи осреднения этих повторений.

Некоторые результаты обработки экспериментальных данных представлены на фиг. 2-5.

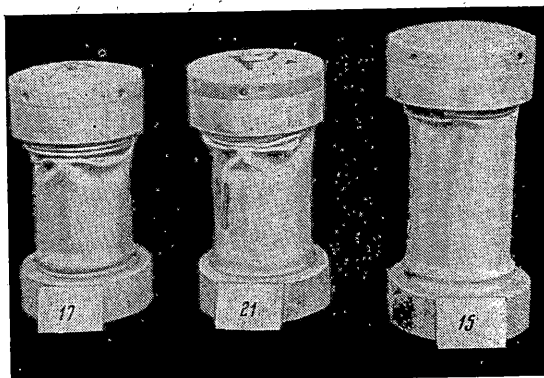
На фиг. 2 приводятся графики изменения во времени τ продольных перемещений присоединенной массы $U = ul^{-1}$, отнесенных к длине образца в зависимости от скорости удара и величины m . Геометрические характеристики образцов определяются параметрами $\Pi_1 = 3,25 \cdot 10^{-2}$ и $\Pi_2 = 10$; материал образцов - АМГ6. Числа у кривых соответствуют номеру образца N . При этом были реализованы следующие нагружения: кривые $N = 32, 42 - \Pi_4 = 2,25 \cdot 10^{-1}$, $\Pi_3 \cdot 10^3 = 8,42; 12,07$; кривые $N = 35, 34, 38 - \Pi_4 = 1,5 \cdot 10^{-1}$, $\Pi_3 \cdot 10^3 = 6,03; 8,44; 12,25$. Отметим, что при больших значениях скорости удара влияние параметра m более существенно.

Результаты экспериментов для образцов из сплава Д16Т представлены на фиг. 3. Характеристики экспериментальных образцов: $\Pi_1 = 5,5 \cdot 10^{-2}$, $\Pi_2 = 6$. Были реализованы следующие условия нагружения: кривые $N = 80, 75 - \Pi_4 = 2,4 \cdot 10^{-1}$, $\Pi_3 \cdot 10^3 = 6,24; 8,42$; кривые $N = 63, 62, 78 - \Pi_4 = 1,6 \cdot 10^{-1}$, $\Pi_3 \cdot 10^3 = 5,02; 6,15; 8,17$. Сравнение результатов показывает, что для этих образцов влияние параметра m практически не зависит от скорости удара.

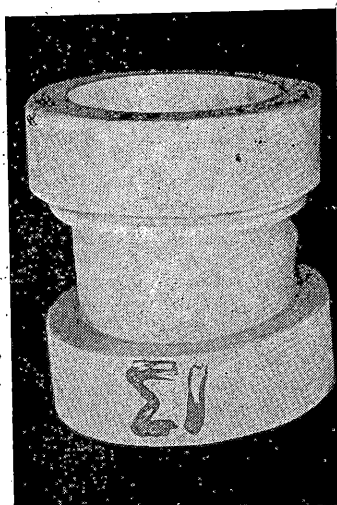
Для этих же образцов на фиг. 4 представлены экспериментальные данные распределения по длине оболочки предельных поперечных перемещений $W = wl^{-1}$,



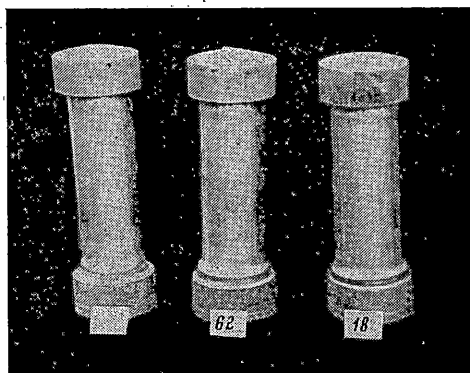
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9

отнесенных к длине образца. Кривые 1-5 соответствуют $N=63, 80, 62, 78, 75$. Анализ результатов свидетельствует о том, что для данного варианта оболочки с ростом скорости удара или параметра m наблюдается рост прогибов у неконтактирующего торца, в то время как у ударяемого торца величина прогибов практически не изменяется.

Было проведено сопоставление экспериментальных данных для образцов, выполненных из разных материалов. На фиг. 5 показаны графики продольных перемещений для образцов с параметрами $\Pi_1=3,25 \cdot 10^{-2}$, $\Pi_2=4,5$, $\Pi_4=1 \cdot 10^{-1}$. Кривые $N=11, 18, 9$ относятся к образцам из сплава АМГ6 при скоростях удара $\Pi_3 \cdot 10^3 = 4,58; 6,73; 8,09$, а кривые $N=19, 15, 21$ — к образцам из сплава Д16Т при скоростях удара $\Pi_3 \cdot 10^3 = 4,57; 6,68; 8,32$.

Геометрические характеристики оболочек оказывают основное влияние на формы их выпучивания.

Отметим некоторые качественные результаты наблюдений. В процессе динамического деформирования оболочки у ее торцов образовывались складки. Развитие прогибов, очевидно, связано с ростом напряжений при последовательных отражениях волн сжатия у торцов оболочки.

У тонких ($\Pi_1 < 4 \cdot 10^{-2}$) и длинных ($\Pi_2 = 5-10$) оболочек наблюдалась форма выпучивания с образованием складок у ударяемого торца, имеющих в плане форму,

близкую к треугольной. Главные оси плана отдельных складок взаимно перпендикулярны. С ростом скорости удара наблюдается образование кольцевой складки у неконтактирующего торца, а количество складок у ударяемого торца существенно растет (фиг. 6, 7). Так, например, при скорости удара $V=30$ м/с у ударяемого торца образовывались две складки, а при скорости $V=60$ м/с — уже пять.

При уменьшении длины оболочки ($\Pi_2=3-4$) складки у ударяемого торца имели в плане форму эллипсов, а затем ($\Pi_2=2$) становились кольцевыми. Количество складок существенно уменьшается. Например, при скорости удара $V=60$ м/с образовались лишь две кольцевые складки. При этом образования складок у неконтактирующего торца не наблюдалось (фиг. 8).

С ростом толщины оболочек ($\Pi_1>5\cdot 10^{-2}$) при сравнительно малых скоростях удара $V<25$ м/с наблюдалось образование кольцевой складки у неконтактирующего торца оболочки.

При увеличении скорости удара образовывалась кольцевая складка и у ударяемого торца (фиг. 9), причем с увеличением толщины оболочки величина прогибов у обоих торцов существенно уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агамиров В. Л., Вольмир А. С. Поведение цилиндрических оболочек при продольном ударе.— В кн.: Проблемы устойчивости в строительной механике. М.: Госстройиздат, 1965, с. 143—152.
2. Антонов А. М., Бригадиров Г. В. Экспериментальное исследование поведения цилиндрических оболочек при ударе о преграду.— В кн.: Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: Изд-е Тульск. политехн. ин-та, 1980, с. 19—23.
3. Гордиенко Б. А. Экспериментальное исследование поведения стержней и цилиндрических оболочек при ударе.— В кн.: Тр. VII Всес. конференции по теории оболочек и пластинок. М.: Наука, 1970, с. 190—193.
4. Кийко И. А. Цилиндрическая оболочка под действием осевой ударной нагрузки.— Изв. АН СССР. МТТ, 1969, № 2, с. 135—138.
5. Coppa A. P. On the mechanism of buckling of a circular cylindrical shell under longitudinal impact.— In: Applied Mechanics. Amsterdam — N. Y.: Elsevier, 1960, p. 274—276.— Рус. перев.: Механика: Период. сб. перев. иностр. статей, 1961, № 6, с. 145—164.
6. Lindberg H. E., Herbert R. E. Dynamical buckling of a thin cylindrical shell under axial impact.— Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech., 1966, v. 33, No. 1, p. 105—112.— Рус. перев.: Прикл. механика. Тр. Америк. об-ва инж.-механ. Сер. E, 1966, т. 33, № 1, с. 91—100.
7. Малышев А. П. Волновые процессы в упругой тонкостенной цилиндрической оболочке при внезапном приложении силы к ее торцу.— Изв. АН СССР. МТТ, 1969, № 2, с. 138—141.
8. Вольмир А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. М.: Наука, 1972. 432 с.

Тула

Поступила в редакцию
11.V.1983