

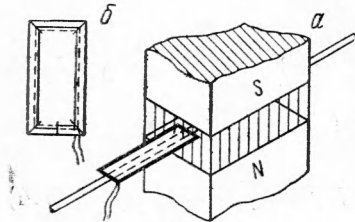
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Б. М. Малышев

(Москва)

Описываются результаты экспериментального изучения распространения продольных упруго-пластических волн в тонком стержне путем регистрации скорости перемещений отдельных сечений при помощи индукционных датчиков. Регистрация скорости при изучении волновых процессов для получения динамических характеристик материала имеет ряд преимуществ по сравнению с известными методами регистрации перемещений [1-3]. При продольном ударе по предварительно деформированной алюминиевой проволоке обнаружен ряд особенностей в поведении материала в пластической области, определены повышение динамического предела текучести и зависимость натяжения от деформации при ударной догрузке.

1°. Индукционный датчик (фиг. 1) представляет собой прямоугольную рамку, состоящую из 20—30 витков тонкого провода, которая приклеивается к стержню (проволоке) и помещается одним концом в однородное магнитное поле постоянного магнита. При перемещении рамки вдоль большей оси в ней индуцируется э. д. с., пропорциональная скорости перемещения.



Фиг. 1

Для изготовления рамки бралась прямоугольная слюдяная пластинка толщиной 0.03—0.04 мм, размеры которой были несколько больше размеров рамки. На пластинке делались пять надрезов до будущего внутреннего витка рамки. При намотке провод (ПЭЛ 0.05) через очередную прорезь пе-

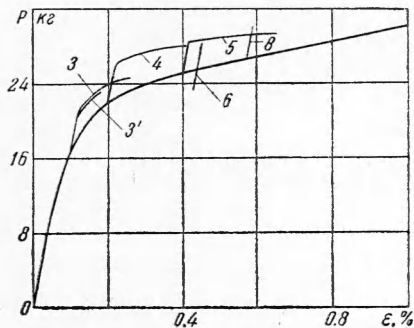
реводится с одной стороны (поверхности) пластинки на другую, так что в результате соседние витки рамки находятся по разные стороны пластинки. На фиг. 1, б схематически показаны два витка. После намотки витки приклеиваются к пластинке; свободные от провода края обрезаются и получается легкая (50—60 мг), но достаточно жесткая рамка. Сигнал от датчика, даже при скорости значительно меньшей 1 м/сек без дополнительного усиления, вызывает вполне достаточное отклонение луча осциллографа (ЭО-7).

Постановка опытов отличается от ранее описанных [3] методом измерения (флажки с фотоэлементами заменены рамками с магнитами). Продольный растягивающий удар по натянутой проволоке производился массивным бойком (2.8 кг) со скоростью 3.2—3.5 м/сек. Удар воспринимался легкой муфтой, которая жестко крепилась на проволоке на расстоянии 5 м от закрепленного конца. Длительность нагружения регулировалась расположением массивной наковальни, о которую ударялся боек после того, как он вместе с муфтой проходил некоторое расстояние (15 мм).

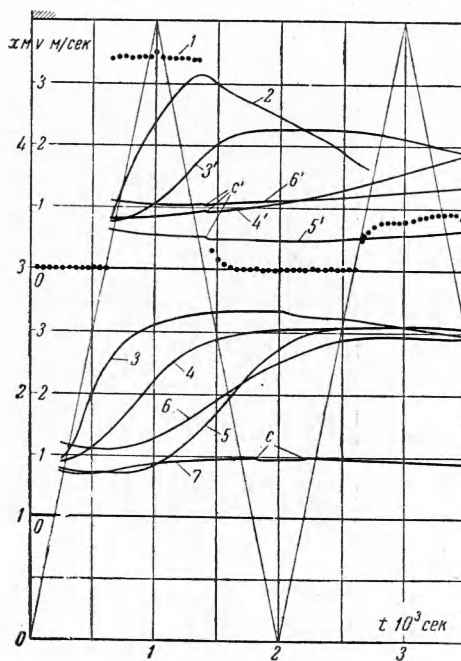
Приведенные ниже результаты испытаний относятся в основном к алюминиевой проволоке диаметром 2 мм, отожженной при 320° в течение 1 ч; ее статическая диаграмма «натяжение-деформация» приведена на фиг. 2. При изучении распространения упруго-пластических волн проволоке предварительно перед ударом сообщалась определенная деформация. При каждом испытании бралась новая проволока.

2°. Проверка метода регистрации и тарировка датчиков производились при упругих ударах с постоянной скоростью; при работе материала в упругой области, согласно теории распространения волн, осциллограммы должны иметь прямоугольную форму. Ширина П-образных выбросов должна зависеть от места установки датчика на проволоке и скорости распространения упругих волн. Согласие опытов с теорией распространения упругих волн получилось удовлетворительное, поэтому отклонение от картины распространения упругих волн связывалось с возникновением пластических деформаций.

На фиг. 3 воспроизведен вид типичных осциллограмм, полученных при различных ударах, для сечений на расстоянии 1 и 3 м от места удара. Осциллограммы получались точечными (с отметками времени $1/20\ 000$ сек). В таком виде и приведена одна из осциллограмм 1 (фиг. 3), которая получена при упругом ударе для сечения, расположенного на расстоянии 3 м от места удара. Перед ударом проволока имела деформацию 2% и была почти совсем разгружена. Осциллограмма показывает, что при



Фиг. 2



Фиг. 3

достижении возмущением данного сечения оно скачком (с ускорением больше $60\ 000$ м/сек²) приобретает скорость бойка и сохраняет ее до прихода отражения переднего фронта возмущения от закрепленного конца, после чего сечение останавливается на некоторое время.

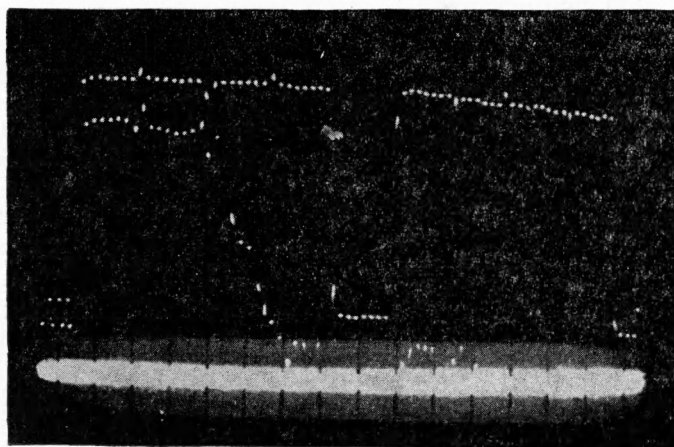
По теории распространения волн скачкообразным изменениям скорости сечений соответствуют распространяющиеся скачки натяжения. В результате прохождения двух скачков натяжения (прямого и отраженного) натяжение проволоки увеличилось на 27 кг. Поэтому при отражении переднего фронта от бойка материал выводится в пластическое состояние, на что указывает искаженная форма второго выброса. При меньшей скорости удара (~ 1 м/сек) получается два или три неискаженных П-образных выброса.

В рассматриваемом случае возможно, что пластические деформации возникли уже при отражении переднего фронта возмущения от закрепленного конца, так как при прохождении этого отражения сечение останавливается не мгновенно.

Аналогичные осциллограммы получались одновременно и для сечения на расстоянии 1 м от места удара, но невозмущенное состояние и остановки сечения были соответственно менее продолжительными.

На фиг. 4 приведена осциллограмма (фото), полученная на расстоянии 1 м от закрепленного конца при упругом ударе со скоростью 1 м/сек по разгруженной проволоке, имеющей остаточную деформацию около 2%.

Осциллографирование производилось при помощи осциллографов с непрерывной разверткой, снабженных фотоприставками. Специально сделанное реле [3] включало луч осциллографа только на время удара. При ударе, во время соприкосновения бойка с муфтой, к входу одного осциллографа подключалось небольшое напряжение от отдельной батареи и луч осциллографа во время записи процесса получал дополнительно небольшое постоянное смещение вверх (смещение нулевой линии). Это позволяло более четко записать небольшие скорости сечения, включая и невозмущенное состояние от начала удара до прихода возмущения.



Фиг. 4

Непрерывная развертка как бы разрезает осциллограмму на части (строчки) и накладывает их одну на другую; начало процесса может быть при любом отклонении луча по горизонтали. На фиг. 4 начало удара имело место при нахождении луча в крайнем правом положении (одна изолированная точка справа), затем луч мгновенно переходил влево и продолжал записывать процесс. Три точки слева соответствуют также невозмущенному состоянию сечения. После этого сечение скачком приобрело скорость бойка и сравнительно долго сохраняло почти постоянную скорость. Некоторое заметное убывание скорости сечения связано с уменьшением скорости бойка при ударе. Из-за торможения бойка, которое было заметным при таких малых скоростях удара, в момент прохождения отражения переднего фронта от закрепленного конца сечение не останавливается, а получает небольшую скорость в направлении от бойка (семь точек в средней части несколько ниже нулевой линии, которая проходит через точки, соответствующие невозмущенному состоянию). После прихода отражения переднего фронта от бойка возникает второй П-образный выброс, а затем и третий.

Третий выброс заметно ниже первого в основном из-за уменьшения скорости бойка и он неполный, так как пришла волна разгрузки, которая образовалась в результате удара бойка о наковальню, после того как боек с муфтой переместился на 5 мм.

Интересно отметить, что при упругих ударах регистрируются даже небольшие отражения возмущений от сечений, к которым приклеены рамки (присоединенные массы). На осциллограммах (1, фиг. 3; фиг. 4)

заметны небольшие выбросы, так, например, восьмая точка после скачка скорости несколько выше соседних из-за влияния массы рамки, приклеенной к сечению на расстоянии 1 м от места удара, шестнадцатая — ниже и т. д. Но, как только материал выводится в пластическое состояние, эти выбросы и даже сильные разрывы (ударные волны) размываются.

На осциллограмме 1 отметим тот факт, что в момент прохождения второго отражения переднего фронта возмущения от закрепленного конца со скоростью упругих волн (этот момент легко определить методом характеристик) наблюдается уменьшение скорости сечения. Таким образом, несмотря на то, что в этом случае волны от закрепленного конца до данного сечения распространяются по пластически деформируемому материалу (пластические волны по пластическим волнам), передний фронт их распространяется со скоростью упругих волн.

К аналогичному выводу приводит и рассмотрение осциллограммы 2, полученной при ударе по проволоке при очень малой предварительной деформации (сила натяжения ~ 13 кг). В этом случае сразу же за передним фронтом возмущения материал выводится в пластическое состояние; сечение при прохождении упруго-пластических волн сравнительно быстро приобретает значительную скорость, но, начиная с момента прихода отражения переднего фронта от закрепленного конца со скоростью упругих волн, наблюдается уменьшение скорости сечения.

3°. Метод суперпозиции элементарных волн позволяет по записи скорости сечений при ударе определить динамические характеристики материала. Простейшая теория распространения волн в тонком стержне, которая учитывает лишь зависимость напряжения от деформации, на прямых характеристиках дает два дифференциальных соотношения

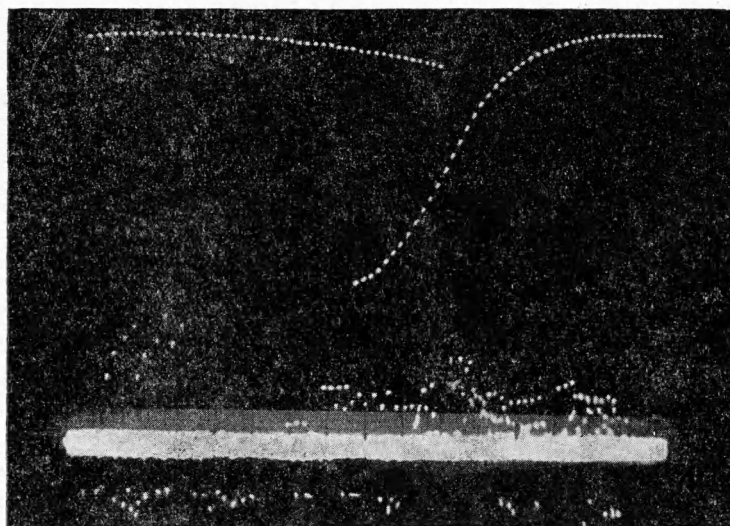
$$d\varepsilon = \frac{dv}{c}, \quad dP = m_1 c dv \quad (1)$$

где v — скорость сечения, ε — деформация, P — натяжение, m_1 — масса единицы длины стержня, c — скорость распространения элементарной волны. По записи скорости сечения, расположенного на расстоянии x_0 от места удара, определим приращения деформации и натяжения, подставляя в соотношение (1) приращения скорости Δv за малый промежуток Δt ; скорость распространения соответствующей элементарной волны, которая в рассматриваемый момент t (от начала удара) проходит данное сечение, равна: $c = x_0/t$. Таким образом, по осциллограмме последовательно, через малые промежутки времени Δt , можно определить приращения деформации и натяжения. Просуммировав последовательно эти приращения и прибавив еще деформацию ε_0 и натяжение P_0 , характеризующие состояние проволоки перед ударом, будем знать в различные моменты времени общую деформацию и натяжение. Это позволяет построить графически зависимость натяжения от деформации при ударном нагружении.

На фиг. 3 осциллограммы 3 и 3' получены одновременно при ударе со скоростью 3.5 м/сек; проволока перед ударом имела деформацию $\varepsilon_0 = 0.1\%$. Осциллограммы показывают, что передний фронт возмущения по предварительно пластически деформированной проволоке распространяется со скоростью упругих волн в виде ударной волны. При прохождении сечений передним фронтом их скорость изменяется скачком, что соответствует определенному скачку напряжения на ударной волне. После скачка скорость сечений, по мере прохождения их пластическими волнами, возникшими в месте удара, постепенно нарастает. Так как скорости пластических волн различны (чем больше напряжение, тем меньше скорость), то у второго сечения нарастание скорости происходит гораздо медленнее, чем у первого, так как второе сечение в три раза дальше от места удара, чем первое.

На фиг. 2 приведены результаты обработки осциллограмм 3 и 3' и некоторых других. Кривая 3 показывает, что при ударной догрузке натяжение вначале возрастает по упругой прямой на 3.8 кг (повышение динамического предела текучести), а затем наклон кривой $P - \epsilon$ постепенно уменьшается и через некоторое время становится даже меньше соответствующего наклона статической диаграммы.

Опыты показывают, что скачок натяжения по мере распространения несколько уменьшается, у второго сечения он равен 3.3 кг. При других испытаниях наблюдалось, что у второго сечения величина скачка



Фиг. 5

скорости также несколько меньше, чем у первого. В силу этого кривая $P - \epsilon$, построенная по осциллограмме 3', проходит несколько ниже кривой 3.

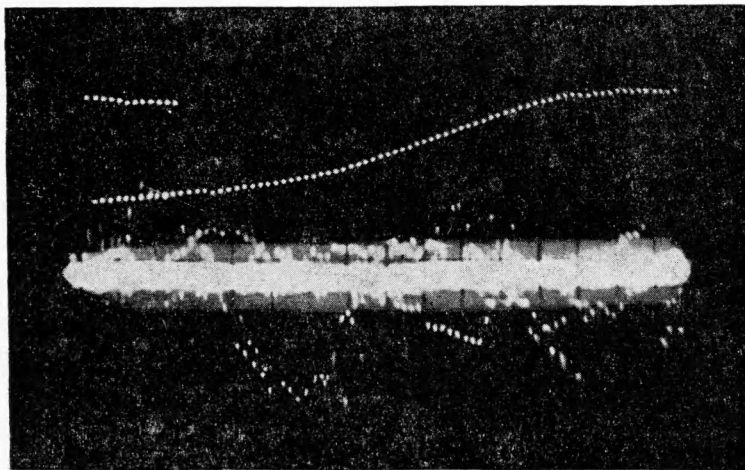
Кривая 4, полученная по осциллограмме 4, соответствует удару со скоростью 3.3 м/сек при $\epsilon_0 = 0.2\%$.

На фиг. 5 и 6 приведены осциллограммы, полученные при этом испытании, которые частично воспроизведены на фиг. 3 (4, 4'). Смещение луча (нулевой линии) во время удара было у осциллографа, записывающего скорость сечения на расстоянии 1 м от места удара; поэтому на фиг. 5 видно и невозмущенное состояние (четыре точки в средней части).

Осциллограммы (фиг. 5 и 6) позволяют проследить изменение скорости сечений до прихода волны разгрузки, который отмечается значительным скачком (уменьшением) скорости. На основании большого числа испытаний установлено, что ударная волна разгрузки распространяется со скоростью упругих волн, так что на осциллограммах, полученных одновременно для различных сечений, промежутки времени — от прихода переднего фронта возмущения до прихода волны разгрузки — одинаковые.

На фиг. 6 обратим внимание на небольшой скачок скорости между 15-й и 16-й точками после первого скачка, связанного с прохождением отражения переднего фронта возмущения. Такие же скачки в момент прохождения отражения переднего фронта от закрепленного конца со скоростью упругих волн наблюдались и при других испытаниях (на фиг. 3 они указаны значком c'). У сечений, расположенных ближе к закрепленному концу, наблюдаются скачки, значительно большие по величине. На осциллограмме 3' такого скачка не заметно. При перемещении от

закрепленного конца до данного сечения по значительным пластическим волнам (деформациям) скачок, видимо, размылся. Начиная с момента его прихода ко второму сечению, можно отметить лишь уменьшение наклона осциллограммы. Эти факты указывают на то, что резкие изменения нагружения, какие имеют место при отражении скачка от закрепленного конца, даже по пластически деформируемому в процессе испытания материалу, распространяются со скоростью упругих волн. Этот факт не объясняется простейшей теорией, которая в явном виде не учитывает влияния скорости нагружения. Поэтому кривые при ударных догрузках



Фиг. 6

по осциллограммам определялись до момента, когда к данному сечению приходит отражение переднего фронта возмущения, распространяясь со скоростью упругих волн. Для осциллограммы 4' за это время имело место очень небольшое приращение скорости, а поэтому и кривая $P - \epsilon$ для 4' очень мала (на графике не нанесена), но, так как отражение от закрепленного конца возвращается со скоростью упругих волн, то кривая $P - \epsilon$ в соответствующем месте должна касаться упругой прямой.

При ударе по проволоке ($\epsilon_0 = 0.4\%$) со скоростью 3.4 м/сек получены осциллограммы 5 и 5'. Как и в предыдущих случаях, передний фронт возмущения также распространяется со скоростью упругих волн в виде ударной волны ($\Delta P = 3.3 \text{ кг}$), но после скачка наблюдается некоторое уменьшение скорости сечения. Уменьшение скорости сечения после прохождения переднего фронта возмущения наблюдалось и при больших предварительных деформациях: $\epsilon_0 = 0.57\%$ и $\epsilon_0 = 1\%$ (для первого испытания на фиг. 2 нанесено только упругое приращение натяжения). Простейшая теория не объясняет наблюдаемого в некоторых случаях уменьшения скорости сечений после скачка.

Пренебрегая этим небольшим уменьшением скорости и считая, что сечение после скачка сохраняет некоторое время постоянную скорость до прихода пластических волн, можно обычным путем построить кривую $P - \epsilon$. В этих предположениях и построена кривая 5, она имеет точку излома.

Как показывают испытания при скорости удара $\sim 1 \text{ м/сек}$ (осциллограмма 7), повышение динамического предела текучести не так сильно зависит от скорости удара, так как скачок натяжения лишь немного меньше ($\Delta P = 3 \text{ кг}$), чем это получалось раньше при такой же деформации ($\epsilon_0 = 0.2\%$). Но в этом случае после скачка уже заметно убывание

скорости сечения и заметны отражения скачка от закрепленного конца и от бойка, которые на осциллограмме указаны значком c .

Осциллограммы b и b' получены при испытании ($V = 3.3$ м/сек) проволоки, которой была сообщена деформация $\epsilon_0 = 0.44\%$, а затем несколько разгружена, так что перед ударом натяжение было 23.3 кг. В этом случае скачок скорости, а следовательно, и скачок натяжения получился значительно больше (5.1 кг). Динамический выход в пластическое состояние произошел хотя и явно выше статической диаграммы, но это повышение несколько меньше, чем получается при ударе по неразгруженной проволоке (b , фиг. 2).

4°. Проводились также испытания латунной и медной проволок. Латунная проволока при ударах качественно ведет себя так же, как и алюминиевая. Несколько по-особому ведет себя медная проволока. Передний фронт возмущения по медной проволоке, пластически деформированной перед ударом, распространяется также со скоростью упругих волн, но он не является ударной волной, так как скорость сечений нарастает постепенно, без скачка. Поэтому, имея в виду динамическую зависимость напряжения от деформации, можно утверждать, что кривая догрузки для меди пойдет выше статической диаграммы, и в точке, характеризующей состояние материала перед ударом, касательная к кривой будет иметь наклон упругой прямой.

Результаты испытаний показывают, что тот или иной материал не имеет какой-то единой динамической диаграммы $\sigma - \epsilon$. Напряжение в материале, выведенном в пластическое состояние при динамическом нагружении, зависит не только от деформации, но существенно зависит и от скорости нагружения; возможно, также сказывается зависимость напряжения от времени, подобная запаздыванию текучести, релаксации.

НИИ механики МГУ

Поступила 25 III 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Riparbelli C. On the Relation among Stress, Strain and Strain Rate in Copper Wires, Submitted to Longitudinal Impact. Proc. Soc. Exper. Stress Analysis, 1956, 14, № 1.
2. Шестопалов Л. М. Деформирование металлов и волны пластичности в них. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1958.
3. Малышев Б. М. Распространение догрузочных импульсов по натянутой проволоке. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1960, № 2.