

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ СРЕДНИХ СКОРОСТЯХ
ДЕФОРМАЦИИ

*А. П. Бронский, В. Д. Ключников, Р. И. Мазинг,
Ю. Н. Работнов, С. А. Шестериков*

(Москва, Новосибирск)

В литературе широко освещены свойства строительных материалов в двух диапазонах скоростей деформаций: в диапазоне медленных скоростей 10^{-3} — 10^{-5} 1/сек (статические испытания) и в диапазоне скоростей больших, чем 10^3 1/сек (ударные испытания). Как это отмечается в ряде работ, при ударных испытаниях временное сопротивление значительно возрастает по сравнению со значением, найденным при статическом испытании. Средний диапазон скоростей (10 — 10^{-1} 1/сек), промежуточный между двумя вышеуказанными, в особенности для строительных материалов таких, как бетон, кирпич и т. д. остается почти не изученным. Это по всей вероятности объясняется тем, что при таких довольно низких скоростях мощность обычных испытательных машин оказывается недостаточной для поддержания постоянной скорости деформации вплоть до разрушения.

Эта трудность, которая в случае достаточно однородных материалов (типа металлов) может быть обойдена уменьшением эффективных размеров образца, для строительных материалов приводит к необходимости создавать специальные испытательные устройства.

§ 1. Описание экспериментальной установки. В данной работе для исследований применялся копер. Для того чтобы использовать копер при прямом ударе, при относительно малых скоростях деформации необходимо использовать очень большой груз (для десятисантиметрового бетонного кубика, при условии, что скорость деформации при испытании падает не более чем на 10%, вес груза должен быть порядка 60 т). Уменьшение веса груза приводит к значительному затуханию скорости в процессе испытания. Так в известной работе [1], где испытывались бетонные образцы диаметром 76,2 мм по приведенным данным косвенно можно оценить, что в отдельных экспериментах скорость деформации падала более чем в 4 раза.

В данной работе применялся копер, в котором энергия падающего груза передается на образец через редуктор, позволяющий в несколько раз снизить скорость удара. Измерение силы осуществлялось титанат-бариевым динамометром при помощи специальной тарировки пьезоэлектрических датчиков, описанной ниже в § 3. Для измерения деформации применялся фотоэлемент.

Конструкция копра обычна: по двум направлениям скользит груз, максимальный вес которого равен 100 кг. Максимальная высота падения зависит от размера груза и меняется от 2 до 2,8 м. Груз поднимается лебедкой и срывается автоматически на заданной высоте. Неизрасходованная энергия падающего груза воспринимается массивной опорной рамой.

Специальное приспособление — редуктор позволяет редуцировать большую скорость падающей массы в достаточно малую скорость на образце. Этим самым преодолена основная трудность, которая, как уже было сказано, заключается в создании большого запаса энергии при относительно малой скорости деформирования.

Редуктор представляет собой клиновой механизм, сечение которого представлено на фиг. 1.

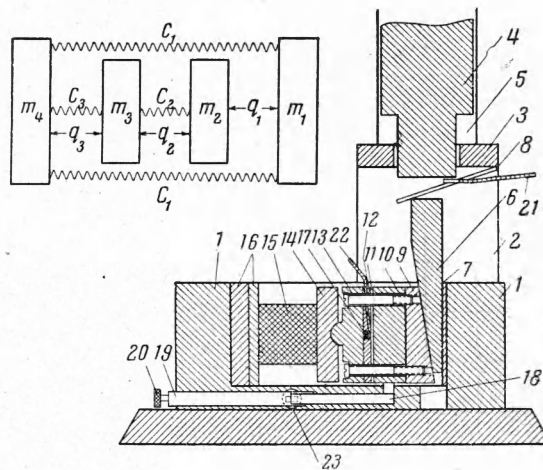
Основанием редуктора является массивная и жесткая коробка 1 с открытым верхом, эта коробка ставится в строго фиксированное положение внутри опорной рамы копра 2, 3. В верхней панели 3 последней сделано отверстие, сквозь которое проходит нижняя узкая часть груза — боек. Сама опорная рама примыкает к внутренним плоскостям стоек копра — швеллерам 5. Боек ударяет по клину 6, который скользя по прокладке 7 давит на клин 9 и через посредство пластины 10, изоляционной прокладки 11, гетинаксовой пластины 12, прижимной пластины 13 и давящей пластины 14, передает усилие на образец 15. Пластины 16 служат для того, чтобы обеспечивать одинаковый уровень верхнего среза клина 6 во взведенном состоянии для различных образцов.

В гетинаксовую пластину вставлена таблетка титаната бария 17, одна плоскость которого закорочена на массу, а другая соединена с выводным проводом 22. Детали 9, 10, 11, 12 и 13 стягиваются болтами и образуют массивную подвижную колоду. В нижней части коробки редуктора сделан узкий продольный паз, в котором могут двигаться язычок 18, соединенный с подвижной колодой, и обойма с квадратным окошком 19, соединенная с коробкой редуктора при помощи регулировочного винта 20. Паз пересекает перпендикулярное к нему световое отверстие 23, пронизывающее поперек всю нижнюю часть коробки редуктора. Конец язычка 8 приблизительно на $\frac{1}{3}$ перекрывает это отверстие.

На фиг. 1 показаны также механические части системы пускового сигнала: к верхней панели основной рамы крепится на оси пластинка 8, лежащая другой стороной свободно на клине, в ней сделан вырез с таким расчетом, чтобы при ударе по клину боек не задевал этой пластины. На пластине крепится вращающийся зуб — контакт, который может фиксироваться в верхнем положении и при соприкосновении с бойком поворачиваться вниз и больше бойка не касаться. Зуб контакта имеет выводной провод 21.

На фиг. 1 приведена также расчетная схема редуктора, которая будет пояснена в следующем параграфе. Редуктор снабжен сменными парами клиньев с углами уклона 2° , 5° , 10° и 15° и сменными обоймами с различной величиной окошек.

При испытаниях необходимо обеспечить такие соотношения между массами и жесткостями частей редуктора, чтобы период его собственных колебаний был много меньше, чем время разрушения. Для этого был проведен расчет редуктора, описанный в § 2. По теоретическому решению задачи, для поддержки постоянной скорости деформирования масса коробки редуктора должна быть как можно большей. Поэтому желательно коробку редуктора выполнить из сплошного бруска с отверстием для монтажа передающих клиньев, динамометров и образцов. В настоящем варианте редуктор собран из пакета плит с отверстиями, что также обеспечивает достаточную надежность работы системы. Для измерения напряжений между образцом и горизонтальным клином помещается дина-

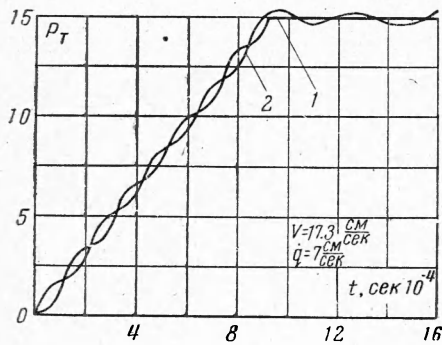


Фиг. 1

мометр, основанный на титанате бария. Вопрос о согласованности показаний динамометра и напряжений в образце также рассмотрен во втором параграфе.

Меняя угол клина и высоту поднятия груза, можно получить достаточно широкий диапазон скоростей деформации от $0,5 \text{ сек}^{-1}$ до 10 сек^{-1} . Сами величины скоростей деформации приходится измерять отдельно, так как, зная только скорость падения груза нельзя получить скорость сближения давящих пластин. Это видно и из теоретического решения задачи. Поэтому скорость деформирования приходится измерять непосредственно у образца по сближению давящей и опорной пластин. Измерение скоростей производится при помощи фотоэлемента.

§ 2. Расчет передающего приспособления (редуктор). При расчете передающее приспособление моделируется системой масс и пружинок, представленной на фиг. 1. Здесь m_1 и m_2 массы, представляющие детали,



Фиг. 2

испытываемым образцом. Элемент φ представляет собой образец, поведение которого при нагружении предполагается идеально-упруго-пластическим, т. е. до некоторого значения сжимающей силы Q_s чисто упругим, а затем чисто пластическим. Следовательно, сила между массами m_3 и m_4 (масса краевых частей установки) равна:

$$P = c_3 q_3 \text{ для } |c_3 q_3| < Q_s, \quad P = Q_s \text{ для } |c_3 q_3| > Q_s \quad (2.2)$$

$$(q_3 = (q_3' - q_3''))$$

Пружина c_1 моделирует упругое действие стенок коробки редуктора.

Целью дальнейшего исследования является определение соотношений между силами, замеряемыми на упругом элементе, и силами, развиваемыми в образце в процессе испытания.

Для решения поставленной задачи необходимо исследовать уравнения движения, составленные с учетом масс, показанных на фиг. 2. Напишем уравнения Лагранжа для данной системы

$$\begin{aligned} m_1 \dot{q}_0 + m_2 (\dot{q}_0 + \dot{q}_1) + m_3 (\dot{q}_0 + \dot{q}_1 + \dot{q}_2) + m_4 (\dot{q}_0 + \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) &= 0 \\ m_3 (\ddot{q}_0 + \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + m_4 (\ddot{q}_0 + \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) &= -c_1 (q_1 + q_2 + q_3) - c_2 q_2 \\ m_4 (\ddot{q}_0 + \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) &= -c_1 (q_1 + q_2 + q_3) - \varphi \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\varphi = c_3 q_3 \text{ для } |c_3 q_3| \leq Q_s, \quad \varphi = Q_s \text{ для } |c_3 q_3| \geq Q_s$$

Эти уравнения вместе с уравнением (2.1) дадут полную систему уравнений для определения q_3 и q_2 . Начальные условия при $t = 0$

$$\dot{q}_0 + \dot{q}_1 + \dot{q}_2 = 0, \quad \dot{q}_0 + \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 = 0 \quad (2.4)$$

раздвигаемые при внедрении клина. Массу падающей бабы и ее энергию считаем настолько большими, что передвижение клина принимаем равномерным, т. е. массы m_1 и m_2 отходят одна от другой с постоянной заданной скоростью v , следовательно

$$q_1' = q_1'' + vt, \quad q_1 = vt \quad (2.1)$$

Пружина c_3 моделирует упругий элемент, по которому определяется значение силы в процессе испытания, в данном случае это титанат бария. Масса m_3 — промежуточная между измеряющим упругим элементом и

или с учетом (2.1) и (2.3)

$$q_i = 0 \quad (i=0,1,2,3), \quad \dot{q}_0 = \frac{m_2}{m_1+m_2} v, \quad \dot{q}_2 = -\frac{m_1}{m_1+m_2} v, \quad \dot{q}_3 = 0 \quad (2.5)$$

Из уравнений (2.3) можно получить

$$(c_2 m_4 - c_1 m_3) q_2 = m_3 m_4 \ddot{q}_3 + c_1 m_3 (q_1 + q_3) + \Phi (m_3 + m_4) \quad (2.6)$$

Предполагая

$$c_2 m_4 - c_1 m_3 \neq 0 \quad (2.7)$$

для q_3 получим

$$\ddot{q}_3 + \left\{ c_1 \left(\frac{1}{m_4} + \frac{1}{m_1+m_2} \right) + c_2 \left(\frac{1}{m_3} + \frac{1}{m_1+m_2} \right) \right\} \ddot{q}_3 + \left\{ \frac{1}{m_4} + \frac{1}{m_3} \right\} \ddot{\Phi} + \frac{c_1 c_2 M}{m_3 m_4 (m_1+m_2)} \ddot{q}_3 + \frac{M (c_3 + c_4)}{m_3 m_4 (m_1+m_2)} \Phi = \frac{c_1 c_2 M}{m_3 m_4 (m_1+m_2)} q_1 \quad (2.8)$$

В начале испытаний $\Phi = c_3 q_3$; уравнение (2.8) примет вид

$$\ddot{q}_3 + \left\{ c_1 \frac{1}{m_4} + \frac{1}{m_1+m_2} \right\} + c_2 \left(\frac{1}{m_3} + \frac{1}{m_1+m_2} \right) + c_3 \left(\frac{1}{m_3} + \frac{1}{m_4} \right) \ddot{q}_3 + \frac{M c_0^2}{m_3 m_4 (m_1+m_2)} \ddot{q}_3 - \frac{M c_1 c_2}{m_3 m_4 (m_1+m_2)} q_1$$

Здесь

$$c_0^2 = c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_3 c_1, \quad M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$q_3 = A_1 \sin k_1 t + A_2 \cos k_1 t + A_3 \sin k_2 t + A_4 \cos k_2 t - \frac{c_1 c_2}{c_0^2} q_1 \quad (2.9)$$

где

$$k_1^2 = A + \sqrt{A^2 - B}, \quad k_2^2 = A - \sqrt{A^2 - B}, \quad B = \frac{M c_0^2}{m_3 m_4 (m_1+m_2)} \\ 2A = c_1 \left(\frac{1}{m_4} + \frac{1}{m_1+m_2} \right) + c_2 \left(\frac{1}{m_3} + \frac{1}{m_1+m_2} \right) + c_3 \left(\frac{1}{m_3} + \frac{1}{m_4} \right) \quad (2.10)$$

Из начальных условий (2.5) получим два уравнения для определения коэффициентов

$$A_2 + A_4 = 0, \quad A_1 k_1 + A_3 k_2 = \frac{c_1 c_2}{c_0^2} v \quad (2.11)$$

Используя (2.6), получим

$$q_2 = (c_2 m_4 - c_1 m_3)^{-1} \{ A_1 [-k_1^2 m_3 m_4 + c_1 m_3 + c_3 (m_3 + m_4)] \sin k_1 t + \\ + A_2 [-k_1^2 m_3 m_4 + c_1 m_3 + c_3 (m_3 + m_4)] \cos k_1 t + \\ + A_3 [-k_2^2 m_3 m_4 + c_1 m_3 + c_3 (m_3 + m_4)] \sin k_2 t + \\ + A_4 [-k_2^2 m_3 m_4 + c_1 m_3 + c_3 (m_3 + m_4)] \cos k_2 t + \\ + [c_1 c_3 (c_1 m_3 - c_2 m_4) / c_0^2] q_1 \} \quad (2.12)$$

Воспользовавшись начальными условиями, получим еще два уравнения для определения коэффициентов

$$A_2 [-k_1^2 m_3 m_4 + c_1 m_3 + c_3 (m_3 + m_4)] + A_4 [-k_2^2 m_3 m_4 + \\ + c_1 m_3 + c_3 (m_3 + m_4)] = 0$$

$$A_1 k_1 [-k_1^2 m_3 m_4 + c_1 m_3 + c_3 (m_3 + m_4)] + A_3 k_2 [-k_2^2 m_3 m_4 + c_1 m_3 + \\ + c_3 (m_3 + m_4)] = \frac{c_1 c_3 m_2 - c_1 c_2 m_1 - c_2 c_3 m_1}{c_0^2 (m_1 + m_2)} (c_2 m_4 - c_1 m_3) v \quad (2.13)$$

или с учетом (2.12) имеем

$$A_2 k_1^2 + A_4 k_2^2 = 0, \quad A_1 k_1 k_2 + A_3 k_2 k_2^2 = \frac{c_1 m_2 m_3 + c_2 m_1 m_4}{m_3 m_4 (m_1 + m_2)} v \quad (2.14)$$

Выделим случай, когда $k_1^2 = k_2^2$; это имеет место лишь в случае

$$c_1 m_3 = c_2 m_4 = c_3 (m_1 + m_2)$$

при этом

$$A_2 = A_4 = 0 \quad (2.15)$$

Выражения для двух других коэффициентов будут

$$A_1 = \frac{v}{2k_1 \sqrt{A^2 - B}} \left\{ \frac{c_1 m_2 m_3 + c_2 m_1 m_4}{m_3 m_4 (m_1 + m_2)} - \frac{c_1 c_3}{c_0^2} k_2^2 \right\} \quad (2.16)$$

$$A_3 = \frac{v}{2k_2 \sqrt{A^2 - B}} \left\{ \frac{c_1 c_1}{c_0^2} k_1^2 - \frac{c_1 m_2 m_3 + c_2 m_1 m_4}{m_3 m_4 (m_1 + m_2)} \right\} \quad (2.17)$$

Окончательно для q_2 и q_3 получим

$$\begin{aligned} \frac{q_2}{v} &= \frac{1}{2k_2 \sqrt{A^2 - B}} \left\{ \left[\frac{c_1 c_3}{c_0^2} - \frac{m_1}{m_0} \right] k_1^2 + c_2 \frac{m_1}{m_0} \left(\frac{1}{m_0} + \frac{1}{m_3} \right) - \frac{m_2}{m_0^2} c_1 \right\} \sin k_2 t + \\ &+ \frac{1}{2k_1 \sqrt{A^2 - B}} \left\{ - \left[\frac{c_1 c_3}{c_0^2} - \frac{m_1}{m_0} \right] k_2^2 - c_2 \frac{m_1}{m_0} \left(\frac{1}{m_0} + \frac{1}{m_3} \right) + \frac{c_1 m_2}{m_1^2} \right\} \sin k_1 t - \frac{c_1 c_3}{c_0^2} t \\ \frac{q_3}{v} &= \frac{1}{2k_1 \sqrt{A^2 - B}} \left\{ \frac{c_1 m_2}{m_4 m_0} + \frac{c_2 m_1}{m_2 m_0} - \frac{c_1 c_2}{c_0^2} \right\} \sin k_1 t + \\ &+ \frac{1}{2k_2 \sqrt{A^2 - B}} \left\{ - \frac{c_1 c_2}{c_0^2} k_1^2 - \frac{c_1 m_2}{m_3 m_4} - \frac{c_2 m_1}{m_0 m_3} \right\} \sin k_2 t - \frac{c_1 c_2}{c_0^2} t \end{aligned} \quad (2.19)$$

Таким образом, решение уравнений движения в общем случае, когда образец деформируется упруго, нами получено. Теперь перейдем к случаю, когда в образце наступило чисто пластическое состояние. В этих условиях необходимо решать уравнение (2.8) при условии, что $\varphi = Q_s$. Введем обозначения

$$\begin{aligned} 2A' &= C_1 \left(\frac{1}{m_4} + \frac{1}{m_1 + m_2} \right) + c_2 \left(\frac{1}{m_3} + \frac{1}{m_1 + m_2} \right) \\ B' &= \frac{c_1 c_2 M}{(m_1 + m_2) m_3 m_4} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Тогда общее решение уравнения для q_3 имеет вид

$$\begin{aligned} q_3' &= B_1 \sin k_1' (t - t_0) + B_2 \cos k_1' (t - t_0) + B_3 \sin k_2' (t - t_0) + \\ &+ B_4 \cos k_2' (t - t_0) - q_1 - \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) Q_s \end{aligned} \quad (2.21)$$

где

$$k_1' = A' + \sqrt{A'^2 + B'}, \quad k_2' = A' - \sqrt{A'^2 - B'} \quad (2.22)$$

Постоянные B_1, B_2, B_3, B_4 определяются из условия сопряжения решений для упругой и пластической областей:

$$\begin{aligned} q_2 |_{t=t_0} &= q_2' |_{t=t_0}, & \dot{q}_2 |_{t=t_0} &= \dot{q}_2' |_{t=t_0}, \\ \dot{q}_3 |_{t=t_0} &= \dot{q}_3' |_{t=t_0}, & q_3 |_{t=t_0} &= q_3' |_{t=t_0} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Время t_0 определяется из условия, что в образце наступило предельное состояние:

$$c_3 q_3 = Q_s \quad (2.24)$$

Отсюда, используя (2.19) для t_0 имеем трансцендентное уравнение

$$A_1 \sin k_1 t_0 + A_3 \sin k_2 t_0 - \frac{c_1 c_2}{c_0^2} v t_0 = \frac{Q_s}{c_3} \quad (2.25)$$

Воспользуемся теперь условиями сопряжения для определения постоянных интегрирования.

Используя уравнение (2.6), получим первые два условия сопряжения из (2.23) в виде:

$$\ddot{q}_3|_{t=t_0} = \ddot{q}_3'|_{t=t_0}, \quad \dot{q}_3|_t = \dot{q}_3|_{3t=t_0} + c_3 \left(\frac{1}{m_3} + \frac{1}{m_4} \right) \dot{q}_3|_{t=t_0} \quad (2.26)$$

Из условий (2.23) и (2.26) можно получить уравнения для определения постоянных

$$\begin{aligned} B_2 + B_4 &= \{A_1 \sin k_1 t_0 + A_3 \sin k_2 t_0\} \frac{c_0^2}{c_1 c_2} \\ B_1 k_1' + B_3 k_2' &= A_1 k_1 \cos k_1 t_0 + A_3 k_2 \cos k_2 t_0 + v \left(1 + \frac{c_1 c_2}{c_0^2} \right) \\ B_2 k_1'^2 + B_4 k_2'^2 &= A_1 k_1^2 \sin k_1 t_0 + A_3 k_2^2 \sin k_2 t_0 \frac{1}{4} \\ B_1 k_1'^3 + B_3 k_2'^3 &= A_1 k_1 (k_2^2 k_1' - k_1'^2 - k_2'^2) \cos k_1 t_0 \\ &+ A_3 k_2 (k_1^2 - k_1'^2 - k_2'^2) \cos k_2 t_0 + \frac{c_1 c_2}{c_0^2} v (k_1'^2 + k_2'^2 - k_1^2 - k_2^2) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Из этих четырех уравнений окончательно можно получить

$$\begin{aligned} B_1 &= A_1 \frac{k_1}{k_1'} \frac{k_2^2 - k_1'^2}{k_2'^2 - k_1'^2} \cos k_1 t_0 + A_3 \frac{k_2}{k_1'} \frac{k_1^2 - k_1'^2}{k_2'^2 - k_1'^2} \cos k_2 t_0 + \\ &+ \frac{v k_2'^2 (k_2^2 - k_1'^2) (k_1^2 - k_1'^2)}{k_1^2 k_2^2 k_2' (k_1'^2 - k_2'^2)} \\ B_2 &= \left\{ A_1 \frac{k_2'^2 - k_1^2}{k_2'^2 - k_1'^2} \sin k_1 t_0 + A_3 \frac{k_2'^2 - k_2^2}{k_2'^2 - k_1'^2} \sin k_2 t_0 \right\} \frac{c_0^2}{c_1 c_2} \\ B_3 &= A_1 \frac{k_1}{k_2} \frac{k_2^2 - k_2'^2}{k_2'^2 - k_2'^2} \cos k_1 t_0 + A_3 \frac{k_2}{k_2'} \frac{k_1^2 - k_2'^2}{k_2'^2 - k_2'^2} \cos k_2 t_0 + \\ &+ \frac{v k_1'^2 (k_1^2 - k_2'^2) (k_2^2 - k_2'^2)}{k_1^2 k_2^2 k_2' (k_1'^2 - k_2'^2)} \\ B_4 &= \left\{ A_1 \frac{k_1'^2 - k_1^2}{k_1'^2 - k_2'^2} \sin k_1 t_0 + A_3 \frac{k_1'^2 - k_2^2}{k_2'^2 - k_1'^2} \sin k_2 t_0 \right\} \frac{c_0^2}{c_1 c_2} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Подставляя эти значения в (2.21) можно получить окончательное выражение для q_3 , куда входят только известные величины. Используя уравнение (2.6), можно получить выражение для q_2 , которое ввиду его громоздкости выписывать явно не будем.

Перейдем теперь к исследованию полученного решения. Общее решение было получено в предположении, что выполнено условие (2.7). Случай, когда не выполняется это условие, не представляет большого интереса в силу того, что в реальной конструкции величины c_1 и c_2 одного порядка, а величина m_3 много меньше m_4 .

Исследование сначала будем проводить на упругом участке. Из уравнений (2.18) видно, что сила в образце, равная $q_3 c_3$ и показания динамометра, определяемые соотношением $q_2 c_2$ состоят из существенно различных частей: 1) слагаемого, пропорционального задаваемому перемещению и 2) слагаемых, характеризующих колебание отдельных частей приспособления. Если рассматривать слагаемые, пропорциональные задаваемому перемещению, которые при достаточно больших относительно определенных параметров, временах t являются доминирующими, то видно, что в выражениях для силы на образце и в показаниях динамометра они равны. Это, конечно, и должно было иметь место, так как эти слагаемые представляют собой эффект статического нагружения, а в этом случае показания динамометра полностью соответствуют нагрузке на образец.

Слагаемые, представляющие колебательный процесс, характеризуют два интересующих нас явления.

Это, во-первых, слагаемые в выражении для q_3 , которые показывают, насколько отличается действительное нагружение от равномерного, которое было бы в случае, когда не было бы колебания отдельных частей приспособления (волновые процессы при нагружении вообще не рассматриваются, так как исследуемый интервал скоростей нагружения лежит много ниже скоростей распространения волн). Эти отклонения неизбежны при любых испытаниях и важно иметь возможность оценить их величину.

Во-вторых, наибольший интерес представляет разность показаний динамометра и действительных напряжений в образце. Необходимо, чтобы эта разность была мала по сравнению со средним значением нагрузки, так как только в этом случае можно говорить о том, что показания динамометра соответствуют действительным напряжениям на образце. Следовательно, дальнейшее исследование должно идти в направлении определения таких параметров нагружающего приспособления чтобы величина

$$u = \frac{q_2 c_2 - q_3 c_3}{(c_1 c_2 c_3 + v / c_0^2)} \quad (2.29)$$

была мала по сравнению с единицей во время процесса нагружения до достижения на образце предельной нагрузки.

Исследуемую величину u можно записать в виде

$$u = \frac{c_0^2}{t c_1 c_2 c_3 \sqrt{A^2 - B}} \left\{ \left[-\frac{m_1}{m_0} c_2 k_1^2 + \frac{m}{m_0 m_4} c_0^2 + c_1 c_2 \frac{1}{m_0} - c_1 c_3 \frac{1}{m_4} \right] \frac{\sin k_1 t}{k_1} + \left[\frac{m_1}{m_0} c_2 k_2^2 - \frac{m_1}{m_0 m_4} c_0^2 + c_1 c_3 \frac{1}{m_4} - c_1 c_2 \frac{1}{m_0} \right] \frac{\sin k_2 t}{k_1} \right\} \quad (2.30)$$

Отметим, что в силу условий (2.10) имеем неравенство

$$k_1 > k_2 \quad (2.31)$$

поэтому два слагаемых, входящих в выражение для u , неравноправны. Необходимо указать, что время достижения предельной нагрузки должно быть таково, чтобы каждая синусоида отложила несколько раз. Для того чтобы вторая синусоида отложила столько же раз, сколько первая, необходимо больше времени (а это означает, что при прочих равных условиях должна быть больше разрушающая нагрузка) в силу неравенства (2.31). Поэтому, для того чтобы можно было проводить испытания на возможно больших скоростях, необходимо выполнение условия:

$$\frac{m_1}{m_0} c_2 k_2^2 - \frac{m_1}{m_0 m_4} c_0^2 + c_1 c_3 \frac{1}{m_4} - c_1 c_2 \frac{1}{m_0} = 0 \quad (2.32)$$

Оказывается, что это условие выполняется, когда:

$$\frac{c_2}{m_0} = \frac{c_3}{m_4} \quad (2.33)$$

Перейдем к исследованию фактически используемого приспособления, причем параметры редуктора и динамометра оценены следующим образом:

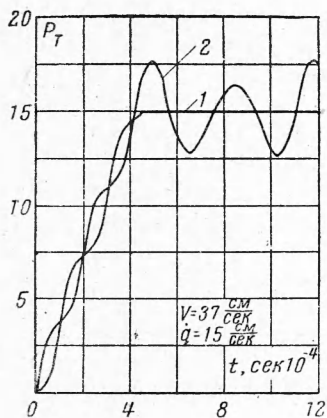
$$\begin{aligned} m_1 &= 0.027 \frac{\text{кг сек}^2}{\text{см}^2}, & m_2 &= 0.0047 \frac{\text{кг сек}^2}{\text{см}} \\ m_3 &= 0.0053 \frac{\text{кг сек}^2}{\text{см}}, & m_4 &= 0.025 \frac{\text{кг сек}^2}{\text{см}} \\ c_1 &= 7.4 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{см}}, & c_2 &= 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{см}} \end{aligned} \quad (2.34)$$

а жесткость образца была взята в двух вариантах $c_3 = 6 \cdot 10^6 \text{ кг / см}$ и $c_3 = 6 \cdot 10^5 \text{ кг / см}$. Такой выбор позволил оценить влияние жесткости как на тарировку, так и на реальные испытания.

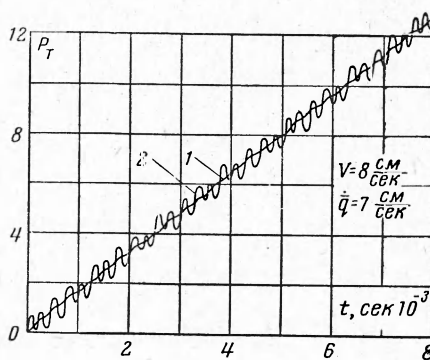
На фиг. 2—5 представлены результаты расчета предыдущего приспособления в предположении, что максимальная разрушающая сила равна 15 тонн.

На фиг. 5 кривая 1, построенная для жесткости $c_3 = 2.3 \cdot 10^5$ кг/см и кривая 2 — для $c_3 = 2.3 \cdot 10^6$ кг/см дают зависимость деформации $\theta = (q_2 + q_3) / V$ от времени.

Сравнение фиг. 2 и 3 дает представление влияния изменения скорости деформирования; фиг. 2 и 4 — влияния изменения жесткости.



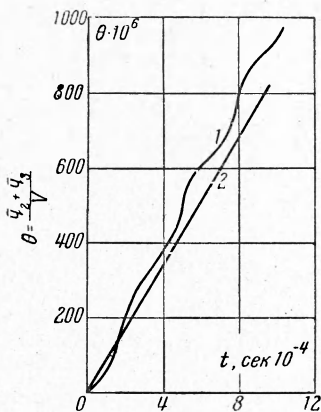
Фиг. 3



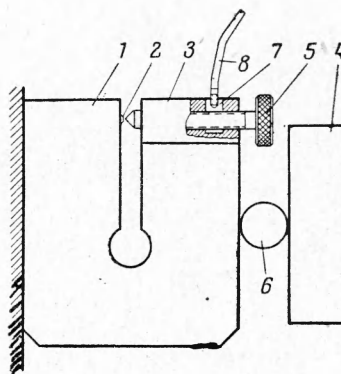
Фиг. 4

На этих фигурах кривая 1 относится к образцу при $c_3 = 2.3 \cdot 10^6$ кг/см, кривая 2 — к динамометру при $c_2 = 2.0 \cdot 10^6$ кг/см.

§ 3. Способ измерений и электрические части установки. Для возможности измерений сил при ударе экспериментальная установка снабжена безынерционным динамометром. Была проделана большая подготовительная работа, прежде чем мы остановились на определенном типе динамометра, основанного на пьезоэлектрическом эффекте. Место пьезокристалла в этом динамометре занимает таблетка титаната бария, что делает динамометр очень чувствительным. Импульс, возникающий на титанате бария, подается на один из входов осциллографа.



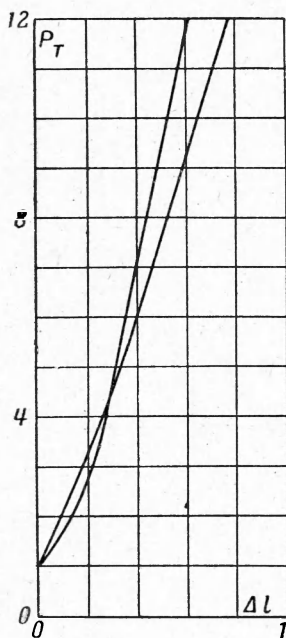
Фиг. 5



Фиг. 6

Динамометр с титанатом бария тарировался в динамическом режиме при помощи тарировочного контактного динамометра. Последний представляет собой массивную металлическую болванку 1 (фиг. 6) с разрезом, на которую крепится пластинка из изолятора 3 с контактным винтом 5. Против носика контактного винта на противоположной стороне щели на массу крепится упругая контактная пластинка 2. Сжимающее усилие

передается с давящей пластины 4 посредством шарика 6. Давящая пластина крепится к болванке 1 двумя болтами с большим люфтом; контактный винт проходит через металлическую пробку 7, которая имеет выводной провод 8. Было сделано два таких контактных динамометра, обладающих разными жесткостями. Зависимость силы P от относительного сближения давящих плоскостей Δl для них дана на фиг. 7, где кривая 1 соответствует большому, кривая 2 — малому контактному динамометрам.



Фиг. 7

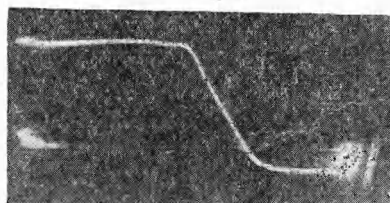
Тарировка динамометра производилась следующим путем. Контактный винт тарировочного динамометра ставился в положение, при котором между ним и контактной пластиной образовывался определенный зазор, затем тарировочный динамометр ставился на обычную испытательную машину, работающую на сжатие, и фиксировалась сила, при которой наступал контакт между носиком винта и контактной пластинкой (момент контакта отмечался обычным тестором). Затем без изменения положения контактного винта тарировочной динамометр ставился на место образца в редуктор. Вывод контактного винта подсоединялся к проводу, идущему от титаната бария к осциллографу (другой полюс титаната бария заземлен, так же как и вся масса редуктора). По клину редуктора производился удар, при этом на осциллографе диаграмма сила — время обрывалась в тот момент, когда происходил контакт между носиком винта и контактной пластиной тарировочного динамометра, поскольку в этот момент закорачивается цепь, идущая от титаната бария к осциллографу. Если период собственных колебаний тарировочного динамометра много меньше, чем время удара до контакта, а амплитуда его колебания достаточно мала, то полученная на осциллографе при данном усилении величина импульса должна мало отличаться от той, что зафиксирована при статическом сжатии тарировочного динамометра в момент контакта.

Влияние собственных колебаний тарировочного динамометра проверялось сравнением показаний на осциллографе большого и малого тарировочного динамометров, установленных статически на одну и ту же силу. Поскольку жесткость их отличалась достаточно сильно, то в случае заметного влияния собственных колебаний, показания должны были бы отличаться, чего на самом деле не наблюдалось.

Для замера деформации как функции времени при ударе лучшим был признан метод фотоэлемента. Принцип измерения деформации состоял в следующем. Пучок света, идущего от осветителя к фотоэлементу проходил через квадратное окошко в обойме (фиг. 1), связанной с одной давящей образец пластиной 16, и перекрывался в этом окошке язычком 18, связанным с другой давящей пластиной 14. В результате этого в системе фотоэлемента возникал ток, который подавался на вход осциллографа, и на экране наблюдалось изменение этого тока со временем.

Изменение деформации производилось следующим образом. Редуктор с образцом ставился по отношению к фотоэлементу в одно и то же строго фиксированное положение. Затем с помощью регулировочного винта обойма перемещалась так, что конец язычка полностью открывал квадратное окошко обоймы и, кроме того, несколько отстоял от края окошка. Это делается для того, чтобы в процессе удара кончик языка прошел полностью всю длину окошка. На осциллографе при этом получится

кривая, представленная на фиг. 8. На всех приведенных в этой работе осциллограммах луч движется справа налево. Сход с правого горизонтального участка на фиг. 8 соответствует моменту перекрытия окошка (момент *a*), выход на левый горизонтальный участок — концу перекрытия (момент *b*). В силу линейности характеристик фотоэлемента и развертки осциллографа, наклон в любой точке негоризонтального участка дает скорость перекрытия окошка или скорость язычка относительно обоймы. Эта скорость, ввиду сказанного выше о креплении язычка и обоймы и ввиду того, что деформация динамометра в сотни раз меньше деформации образца, принималась равной скорости сближения давящих пластин редуктора в данный момент. Ввиду того что по условиям эксперимента скорость деформирования должна быть постоянна и следовательно, негоризонтальный участок диаграммы на фиг. 8 должен быть прямолинейным (что и наблюдалось в большинстве экспериментов, за исключением незначительного искривления вблизи концов этого участка), то величина скорости определяется просто отношением длины окошка ко времени перекрытия окошка. Время перекрытия определялось количеством меток времени на горизонтальном участке. Длина окошка могла быть замерена непосредственно, но в силу изложенного выше обстоятельства мы поступали иначе.



Фиг. 8

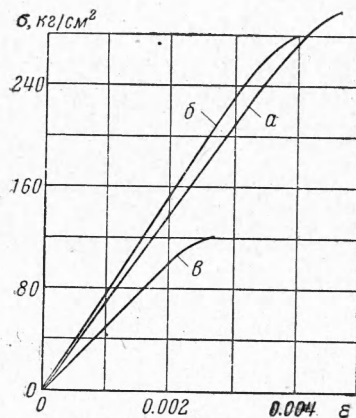
Хотя все детали, попадающие в световой пучок, были зачернены, все же полностью исключить блики невозможно так же, как невозможно исключить световые явления на краях окошка и язычка. В силу этого могло быть, что фотоэлемент «видит» цель несколько другой величины, чем на самом деле. Для того чтобы обезопасить себя на этот случай, а также частично учесть деформацию динамометра, мы применяли следующий способ измерения длины окошка. На место образца в редуктор ставился стакан довольно жесткий в направлении сжатия (вдоль оси) со вставленным в него обычным микрометрическим индикатором. Осветитель фотоэлемента запитывался переменным током, что позволяло в статических условиях фиксировать по осциллографу моменты *a* и *b*. Клинь редуктора медленно загонялся и в моменты *a* и *b* брались отсчеты индикатора, что и определяло длину окошка, которую «видит» фотоэлемент.

Для проведения измерений по данной работе был заказан и сделан в мастерских физического факультета МГУ специальный осциллограф с электронно-лучевой трубкой типа 31-ЛЮ-33, обладающий длительным послесвечением. Осциллограф имеет три усилителя, электронный коммутатор и ждущую развертку, срабатывающую от пускового сигнала.

§ 4. Описание экспериментов. На обычной испытательной машине измерялась статическая прочность образцов и определялась их диаграмма «сила — деформация» ($\sigma \sim \epsilon$). Затем контактный динамометр устанавливался на определенный зазор, при котором сила соответствующего контакта динамометра была равна или несколько выше средней статической прочности данного вида образцов. После наладки всей аппаратуры и выяснения того, что усиление входов по отдельности и при работе электрического коммутатора совпадают, начинались динамические испытания. В начале фотографировался тарировочный импульс при тех же условиях (высота поднятия и вес груза, номер клина), что и последующая партия образцов. Затем при работе электрического коммутатора и развертки фотографировались кривые сила — время и деформация — время на образцах, причем время от времени снова давалась тарировка. Для одного типа образцов изменением высоты поднятия груза и номера клина проводились опыты с тремя — четырьмя фиксиро-

ванными скоростями деформации в пределах от 0,5 до 9,0 сек^{-1} . Надо отметить, что увеличить скорость на машине проще, чем ее уменьшить. Так диапазон скоростей от 0,1 до 0,5 сек^{-1} не исследовался, но полученные кривые легко экстраполировать на этот участок.

Одновременно с фотографированием производился визуальный контроль осциллограммы. По окончании серии динамических экспериментов



Фиг. 9

каждый раз убеждались, что статическая тарировка контактного динамометра не сбивалась и оставалась прежней. Обработка эксперимента осуществлялась по фотографии; вычислялись средняя динамическая прочность и % разброса.

§ 5. Образцы и результаты статических испытаний. Экспериментальные образцы были следующих видов: белый силикатный кирпич $6 \times 6 \times 6 \text{ см}$, цемент $7 \times 7 \times 7 \text{ см}$, бетон $7 \times 7 \times 7 \text{ см}$ и бетон $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$.

Кирпичные образцы вырезались наждачным кругом из строительного силикатного кирпича и в экспериментах деформировались в направлении наименьшего размера исходного кирпича. Колебания в размерах поперечного сечения в плоскости, перпендикулярной сжатию, были не больше 5%. Цементные образцы изготовлялись в лаборатории в металлических формах по 5 образцов в день из смеси следующего состава: одна часть цемента, три части песка. Цементные образцы были использованы для наладки аппаратуры и предварительных экспериментов. Средняя статическая прочность их была 4,8 тонны. Статические испытания дали очень большой разброс.

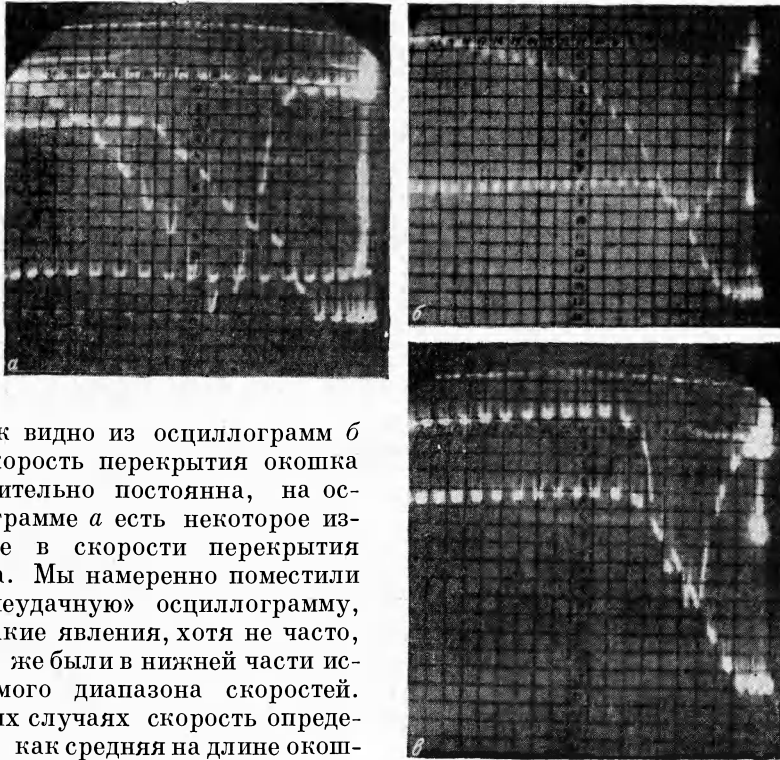
Было испытано 36 кирпичных образцов; 25 бетонных размером $7 \times 7 \times 7 \text{ см}$ и 14 размером $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$. Среднестатическая прочность оказалась равной 4,3 т для кирпичных образцов, 15,0 т и 28,1 т для бетонных. Среднее отклонение нагрузки разрушения достигало 16% для кирпичных, 13% и 22% для бетонных образцов. Как видно, разброс данных был довольно большим, поэтому группа образцов, испытываемых динамически, при данной скорости деформирования должна быть достаточно большой. На фиг. 9 даны диаграммы — полученные на статической машине: а) бетон $7 \times 7 \times 7 \text{ см}$, б) бетон $10 \times 10 \text{ см}$, в) кирпич.

§ 6. Результаты динамических испытаний. Предварительные испытания на цементных образцах, с помощью которых одновременно отлаживалась аппаратура и отработывалась методика измерений, показали, что завышение прочности в рассматриваемом диапазоне скоростей действительно имеет место. Опыты на цементе проводились в основном без замера скоростей деформирования и поэтому точно указать соответствие между разрушающими усилиями P и $\dot{\epsilon}$ нельзя.

Средний процент превышения в диапазоне скоростей от 1 до 10 сек^{-1} был около 70. Нужно отметить, что часть результатов на цементе была получена на отличном от принятого в дальнейшем динамометре. Отметим, также, что цементные образцы давали очень большой разброс как в статическом, так и в динамических испытаниях.

Первая же группа бетонных образцов в динамических условиях дала несравненно более высокую стабильность показаний. Конечно, и здесь не обошлось без отдельных выбросов, но однако, они были очень редки: из общего количества разбитых при протоколируемых испытаниях 168 образцов не учитывалось при обработке за явной негодностью только 7 (4 — кирпичных, 3 — бетонных $7 \times 7 \times 7 \text{ см}$).

На фиг. 10 приведены характерные осциллограммы для этих трех видов образцов: а) бетон $7 \times 7 \times 7$ см, клин $\alpha = 5^\circ$, высота падения груза $h = 50$ см, длина окошка $l = 1.8$ мм, б) бетон $10 \times 10 \times 10$ см, $\alpha = 5^\circ$, $h = 100$ см, $l = 1$ мм, в) кирпич $\alpha = 10^\circ$, $h = 30$ см, $l = 1$ мм. Всюду нижний луч — деформация, движения справа — налево.



Фиг. 10 а, б, в

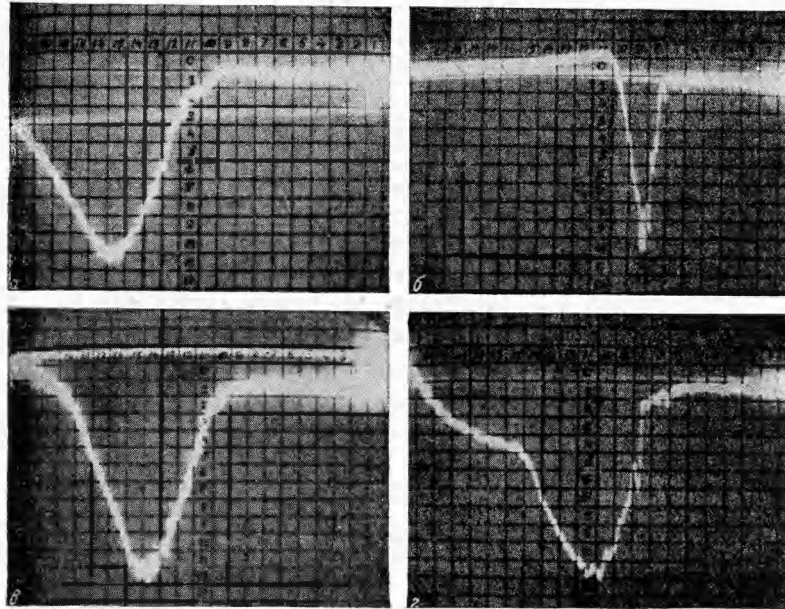
Как видно из осциллограмм б и в, скорость перекрытия окошка действительно постоянна, на осциллограмме а есть некоторое изменение в скорости перекрытия окошка. Мы намеренно поместили эту «неудачную» осциллограмму, ибо такие явления, хотя не часто, но все же были в нижней части исследуемого диапазона скоростей. В таких случаях скорость определялась как средняя на длине окошка и в данном случае была равна 250 мм/сек (число меток 7, длительность меток всегда была 0.001 сек) или для образца длиной в 7 мм $\dot{\epsilon} = 3.5$ сек $^{-1}$.

Отметим еще следующее. Понятно, что подсчет времени полного перекрытия окошка тем точнее, чем больше число меток попадает на рабочую часть кривой. В данном исследовании в силу определенных причин (сравнительно невысокая частота коммутации, ограниченность длины окошка) число меток изменялось от 3 до 12. Для того чтобы уменьшить возможную ошибку в измерении скорости деформирования, мы старались получить как можно больше осциллограмм деформации и принимали за истинное в данной серии испытаний среднее количество меток, с некоторой ошибкой подсчитанное для каждой отдельной осциллограммы. Поскольку осциллограмма силы на этих фотографиях несколько затемнена работой коммутатора, на фиг. 11 приводятся отдельно осциллограммы сил:

- | | | | | |
|----|---------------------------------|-----------------------|--------------|------------------------------------|
| а) | кирпич | $\alpha = 5^\circ$, | $h = 20$ см, | $\dot{\epsilon} = 1.5$ сек $^{-1}$ |
| б) | кирпич | $\alpha = 15^\circ$, | $h = 30$ см, | $\dot{\epsilon} = 5.5$ сек $^{-1}$ |
| в) | бетон $7 \times 7 \times 7$ см, | $\alpha = 2^\circ$, | $h = 90$ см, | $\dot{\epsilon} = 1.2$ сек $^{-1}$ |
| г) | бетон $7 \times 7 \times 7$ см, | $\alpha = 15^\circ$, | $h = 80$ см, | $\dot{\epsilon} = 10$ сек $^{-1}$ |

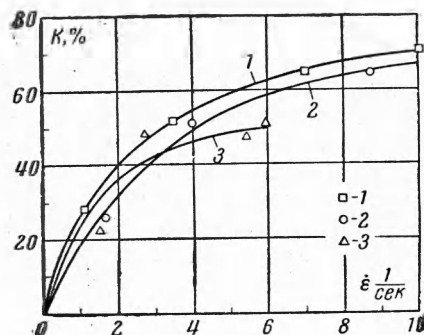
Видно, что увеличение скорости деформирования, так же как и увеличение жесткости образца, приводит к тому, что зубцы на кривой становятся более резкими, а количество их уменьшается, что совпадает с результатами расчета, проведенного в § 2.

Кирпичные образцы испытывались при $\epsilon = 1.5, 2.8, 5.5, 6.0 \text{ сек}^{-1}$; среднединамические разрушающие усилия оказались равными 5.3, 6.4, 6.2, 6.5 t с разбросом значений 25—30%. Бетонные образцы $7 \times 7 \times 7 \text{ см}$ испытывались при $\epsilon = 1.14, 3.5, 7.0 \text{ сек}^{-1}$; среднединамические разрушающие нагрузки оказались равными 19.3, 22.8, 24.8, 25.4 t с разбросом значений 8—19%. Бетонные образцы $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ испытывались при $\epsilon = 1.65, 4.0, 8.8 \text{ сек}^{-1}$; среднединамические разрушающие нагрузки оказались равными 34.9, 42.3, 46.1 t с разбросом значений 10—16%. Число образцов в каждой серии испытаний достигало 10—25 штук.



Фиг. 11 а, б, в, г

На основании полученных результатов были построены зависимости процента превышения статической прочности от скорости деформирования. Кривые, представляющие такую зависимость, даны на фиг. 12,



Фиг. 12

где кривая 1 соответствует бетону $7 \times 7 \times 7$ со средней статической прочностью $s = 300 \text{ кг/см}^2$; кривая 2 — бетону $10 \times 10 \times 10$ при 280 кг/см^2 ; кривая 3 — кирпичу $6 \times 6 \times 6$ при 120 кг/см^2 . Результаты для бетона хорошо ложатся на кривые, для кирпича дают разброс.

Таким образом, динамическая прочность испытанных материалов даже при достаточно медленных скоростях деформирования до 10 сек^{-1} ощутимо превращает статическую и на краю диапазона может достигать величины в

1.5—1.7 раз большей статической прочности.

Поступила 1 XI 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Watstein D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete. J. of the American concrete Institute, 1953, vol. 24, April, № 8,