

УДК 539.374

© 1996 г. Ю. К. БИВИН

ПРЯМОЕ ПРОНИКАНИЕ ГРУППЫ ТЕЛ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКУЮ СРЕДУ

Проникание тел различной конфигурации в упругопластическую среду изучалось многими авторами. Обзор исследований представлен в [1]¹.

В отношении проникающих тел рассматривались случаи, когда тело в процессе внедрения не деформируется, и тогда изучались силы сопротивления его движению. Либо тело деформируется и тогда исследовались деформации среды и тела. В этой области в последние годы появились новые задачи, в которых рассматривается проникание с высокими скоростями деформируемых стержней, разделенных на не связанные или слабо связанные части [2, 3].

Промежуточная ситуация возникает, если тело состоит из твердых не связанных друг с другом тел. Тогда такая группа тел в процессе погружения в среду может терять свою первоначальную форму, отдельные его элементы будут взаимодействовать со средой как твердые тела, а между собой — как упругие или слабо пластически деформируемые так, что эти деформации не изменяют их геометрической формы.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования прямого проникания по инерции в упругопластическую среду группы тел. В качестве элементов группы использовались стальные шарики и цилиндрические стержни из материала мишени или металлического порошка. В первом случае имеет место проникание группы твердых тел, в остальных — деформируемых. Выявлены некоторые параметры, влияющие на процесс проникания, отмечается как схожесть, так и различие в глубинах и формах каверны при проникании отдельного тела или группы жестких и деформируемых тел. Замена сплошного тела на группу тел той же суммарной массы, удельной плотности, материала и формы приводит к снижению глубины проникания. Рассматриваются возможные причины этого.

1. Внедрение происходило в пластилин, заформованный в винипластовую трубу, внутренний диаметр которой был 150 мм. Пластилин выдерживался до эксперимента при температуре $20 \pm 0,5^\circ \text{C}$ не менее четырех часов, что обеспечивало небольшой разброс результатов.

Для тел, состоящих из шариков, рассматривалось два случая. В одном шарики до соударения со средой двигались с одинаковой скоростью гуськом. Расстояние между ними могло быть различным. В другом шарики располагались послойно, плотно прилегая друг к другу. Направление движения до соударения было нормальным к плоской свободной поверхности пластилина и к плоскости, в которой лежали центры шариков в слое. Основная часть экспериментов проведена при скорости соударения (скорости входа) 250 м/с. Это практически предельная скорость, при которой стальные шарики диаметром 10 мм не раскалываются при столкновениях между собой в процессе погружения в пластилин гуськом, когда расстояние между ними на воздушном участке не превосходит полтора диаметра. Прямые опыты показали, что шарики раскалываются при скорости соударения около 170 м/с.

В экспериментах с шариками, расположенными гуськом, их диаметр был 10 мм. Они разгонялись пневмопушкой, диаметр ствола которой также был 10 мм. При

¹ См. также: Высокоскоростной удар. Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1975—1979 гг. Новосибирск: Изд-е Ин-та гидродинамики СО РАН, 1979. 45 с.

последним расположением шариков в основном использовались шарики диаметром 9,5 мм. Они укладывались в деревянный стакан, наружный диаметр которого был 30 мм, а внутренний 28,5 мм, толщина доньшка 2 мм. Это позволяло иметь в слое 7 шариков (один в центре и шесть вокруг), или 6, когда вместо центрального шарика вставляется цилиндр из пенопласта диаметром 9,5 мм и высотой, равной высоте слоев шариков. Этим же определялась и высота стакана. Стаканы с шариками разгонялись до требуемой скорости с помощью пневмопушки калибром 30 мм.

Скорость соударения измерялась с помощью фотодиодов, установленных вдоль оси стрельбы на фиксированном расстоянии. Сигнал с фотодиодов после прохождения преобразовательного блока поступал на частотомер и параллельно на осциллограф С9-16. Это позволяло не только определить скорость соударения, но и расстояние между шариками при их движении гуськом на воздушном участке.

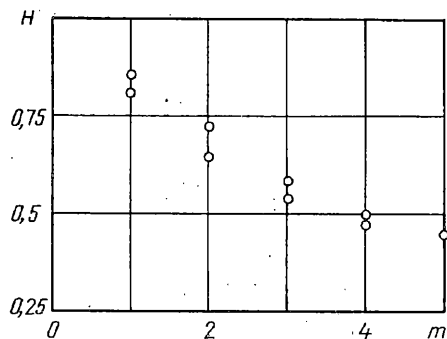
2. При проникании шариков, расположенных гуськом, размер каверны на входе не зависит от количества шариков, а определяется скоростью соударения. Глубина проникания первого шарика зависит от начальной скорости, количества шариков и от расстояния между ними на воздушном участке движения. При плотном прилегании двух шариков они движутся в среде гуськом вплоть до остановки и передний проникает на глубину вдвое большую, чем если бы он двигался один, т. е. на такую, на какую проник бы шарик вдвое большей массы. Второй шарик не взаимодействует со средой и его роль сводится к увеличению массы проникающего тела. Три плотно прилегающих шарика движутся в среде не строго друг за другом. Задние касаются стенок каверны, образованной первым шариком. В результате глубина проникания его может снизиться до 0,9 от той глубины, на которую он проник бы, если бы задние шарики в процессе проникания участвовали лишь как дополнительная масса. В случае четырех шариков уже с середины пути погружения их траектории могут разойтись, хотя и не сильно (порядка диаметра). И в результате в конце они располагаются почти рядом, а глубина проникания составляет 0,7 глубины проникания шарика учетверенной массы. Т. е. шарики, расположенные гуськом, не могут двигаться устойчиво друг за другом если их больше трех.

Если на воздушном участке траектории шарики не плотно прилегают друг к другу, то в процессе погружения в среду происходит их соударение. В этом случае глубина проникания переднего шарика всегда значительно меньше, чем та, которая имела бы место, если бы вся масса была сосредоточена в нем. Например, в случае двух шариков, движущихся в воздухе на расстоянии одного диаметра, глубина проникания первого составляет 0,7 от глубины проникания шарика двойной массы. При расстоянии бесконечно большом (выстрел вторым шариком вслед первому после его остановки в среде) первый оказывается на глубине 0,6 от глубины проникания шарика удвоенной массы. При большем числе шариков глубина проникания первого зависит от расстояния между всеми шариками. С увеличением этих расстояний она уменьшается. Например, в случае трех шариков, поочередно выстреливаемых в след друг другу, глубина первого, в результате, составляет 0,5 от глубины проникания шарика утроенной массы. Отметим, что, когда начальная скорость равна 250 м/с, при соударении двух шариков в каверне, в них появляются плоские трещины, проходящие через линию соударения, а при трех шариках в результате их соударения в процессе проникания средний может расколоться плоскими взаимно перпендикулярными трещинами, проходящими также через линию соударения.

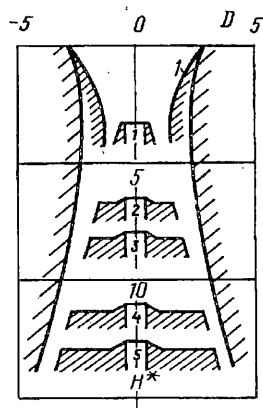
3. При последнем расположении шариков они всегда до начала проникания были плотно прижаты друг к другу в деревянном стакане. В этих опытах форма каверны сильно зависит от количества слоев. В начале образуется общая каверна в результате слияния каверн от прохождения отдельных шариков, и лишь на некоторой глубине, зависящей от числа слоев, сохраняются каверны за каждым шариком. Это видно на фиг. 1, где показан разрез каверны, образующейся в



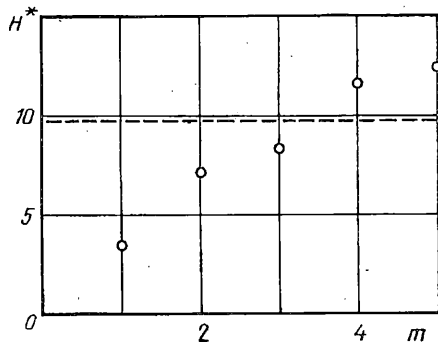
Фиг. 1



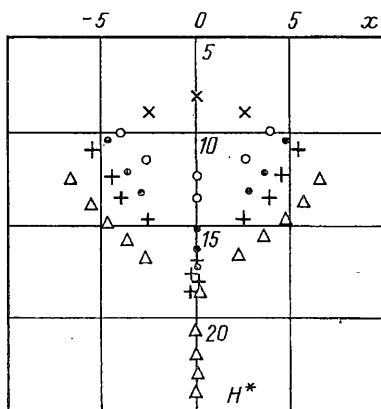
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

результате проникания 21 шарика, уложенных в три слоя. Центральные три шарика идут гуськом до остановки, а глубина проникания переднего примерно вдвое меньше, чем была бы для шарика утроенной массы. На снижение глубины проникания оказывает влияние в этом случае главным образом напряжение и движение среды, вызванные погружением соседних периферийных шариков. Это следует из того, что при одном слое нет контактного взаимодействия шариков,

и тем не менее глубина проникания центрального шарика в экспериментах составляла 0,84 от глубины проникания отдельного шарика при той же начальной скорости. Тот же качественно результат получается если происходит внедрение тела по инерции в предварительно напряженную среду. Это показали опыты, в которых шарик проникал в среду предварительно статически сжатую в направлении нормали к вектору скорости соударения. То же получалось, когда проникающее тело состояло из легкого магниевого цилиндра и шарика в три раза меньшего диаметра, свободно вставленного в углубление в центре торца цилиндра. Диаметр углубления был равен диаметру, а глубина половине диаметра шарика. Соударение происходило торцом цилиндра с шариком. Так как удельная массовая нагрузка на мидель у цилиндра была в четыре раза меньше, чем у шарика, к тому же коэффициент сопротивления шарика гораздо меньше, чем у диска, то после удара цилиндра торцом о поверхность пластины шарик уходил вперед. Но двигаться ему приходилось в волне напряжений, создаваемых движением цилиндра. При этом условия глубина проникания шарика также оказалась меньше, чем при движении в свободной среде.

На фиг. 2 показано, как снижается глубина проникания центрального переднего шарика с увеличением числа слоев. Глубины отнесены к глубине проникания одиночного шарика единичной массы и к его диаметру. Например, в случае двух слоев глубина проникания переднего шарика H , отнесенная к его диаметру, делилась на два и откладывалась по оси ординат. По оси абсцисс число слоев m .

На фиг. 3 показаны основные черты каверн, образующихся при проникании тел с различным числом слоев шариков. По горизонтали — диаметр каверны D , по вертикали — глубина H^* , отнесенные к диаметру шарика. Цифрами обозначены каверны, образующиеся в результате проникания тела с соответствующим числом слоев шариков. Диаметры каверн на входе почти не отличаются, т. е. не зависят от числа слоев, но зависимость от скорости сохраняется. При одном слое общая каверна имеет вид усеченного конуса. При двух слоях — почти цилиндрическая, имеется небольшое сужение на глубине дна каверны, образующейся при однослойном расположении шариков. С увеличением числа слоев шариков каверны не только становятся глубже, но и глубиной расширяются после небольшого сужения почти на одной и той же глубине.

Зависимость глубины общей каверны от количества слоев показана на фиг. 4. По оси ординат — глубина H^* , отнесенная к диаметру шарика, по оси абсцисс — число слоев m . Штриховой линией показана глубина проникания одного шарика при той же начальной скорости. Отметим, что точки для четного и нечетного числа слоев не ложатся на одну кривую. Первые расположены выше средней линии, вторые — ниже. Такую особенность можно объяснить расположением периферийных шариков в стакане. В данном случае шарики в слоях располагались не друг за другом, а между шариками соседних слоев. Таким образом при трех слоях периферийные шарики слоя, который первым ударяет по пластину, за собой имели один шарик. Шарика второго слоя не имели за собой шариков. При четырех слоях за шариками первого и второго слоя было по одному шарiku соответственно третьего и четвертого слоя, и т. д. Эта особенность укладки шариков проявлялась и в расположении их в конце проникания. Положение шариков соседних слоев в проекции на плоскость, нормальную к вектору скорости, было сдвинуто на 30° . Шарика слоя, который первым соударяется со средой, расходятся дальше остальных от оси симметрии каверны, а проникают меньше. На самой большой глубине и ближе всех к оси симметрии каверны останавливаются шарики слоя, который последним погружается в среду. Центральные шарики в данном случае движутся более устойчиво, чем при проникании гуськом. Даже при четырех слоях они могут двигаться гуськом вплоть до останков. В движении периферийных шариков в процессе проникания и в их окончательном положении в среде есть сходство со случаем проникания деформируемого цилиндрического стержня. Здесь также,



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8

чем ближе к переднему ударяющему торцу находится материал стержня, тем в конце проникания он оказывается ближе к свободной поверхности и дальше от оси симметрии каверны.

На фиг. 5 показано положение шариков в среде после остановки при проникании тел с различным числом слоев шариков. Косые кресты — один слой, светлые точки — два, темные точки — три, прямые кресты — четыре, треугольники — пять. По оси ординат — глубина проникания H^* , по оси абсцисс — расстояние до оси симметрии каверны x . Обе величины отнесены к диаметру шарика. В случае одного слоя центральный шарик проникает на меньшую глубину, чем одиночный, глубина проникания которого отмечена пунктирной линией. По мере

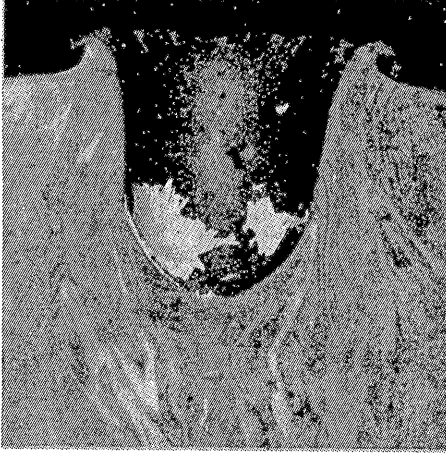
увеличения числа слоев расстояние шариков первого слоя от оси каверны увеличивается. Верхний же слой шариков останавливается фактически на том же диаметре, что и периферийные шарики однослойного тела. Шарики промежуточных слоев располагаются близко к поверхности конуса, на которую попадают шарики первого и последнего слоя. Угол раствора этого конуса слабо зависит от числа слоев.

4. Были проведены эксперименты, когда вместо центральных шариков помещался пенопластовый цилиндр. Его роль — удержать периферийные шарики на месте в стакане в процессе разгона в стволе. В пластилин пенопласт не внедряется из-за малой плотности и прочности. Это приводит к тому, что в центре общей каверны сохраняется пластилин в виде конического столбика. На фиг. 6 это показано для случая трехслойной упаковки шариков. Отсутствие центральных шариков мало сказывается на глубине проникания периферийных, но расходятся они гораздо меньше, чем при проникании с центральным шариком.

5. Для сравнения проникания твердых составных тел (шарики гуськом) и деформируемых были проведены опыты, в которых пластилиновые цилиндры внедрялись в пластилин той же температуры. На фиг. 7 показана каверна, образующаяся при соударении со скоростью 260 м/с пластилинового стержня длиной 3,6 диаметра с пластилином. Диаметр каверны на входе получился 2,3 диаметра стержня, а глубина 3,2. На фиг. 8 показана каверна, образующаяся при четырех отдельных выстрелах со скоростью 260 м/с в одну каверну цилиндрами из пластилина длиной 0,9 диаметра. После первого выстрела образуется почти полусферическая каверна глубиной 1,8 диаметра цилиндра. Последующие выстрелы в эту же каверну лишь углубляют ее, не меняя диаметра каверны на входе. Глубина каверны после четвертого выстрела составляет два диаметра цилиндра.

Таким образом, если при проникании твердого тела диаметр каверны на входе зависит только от формы тела и его скорости, то для деформируемого тела и от его массы, или, как в данном случае со стержнями, от их длины. Глубина проникания для расчлененных тел значительно меньше в обоих случаях. По-видимому, основной причиной уменьшения глубины проникания расчлененного цилиндра по сравнению со сплошным является то, что каждый следующий цилиндр начинает проникание сквозь часть материала, остающегося на дне каверны от предыдущего стержня. В эксперименте, результат которого показан на фиг. 8, первый цилиндр был из белого пластилина, второй — из черного, затем снова — из белого и черного. Видно, что на дне каверны остается материал последнего черного цилиндра и даже предпоследнего белого. Их суммарная толщина составляет 0,4 диаметра цилиндра. Таким образом от глубины проникания в мишень следующего цилиндра каждый раз отнимается именно эта величина. Если бы материал цилиндров удалялся со дна каверны после каждого выстрела, то глубина проникания после четырех выстрелов могла быть $2 + 3 \times 0,4 = 3,2$ диаметра цилиндра, что совпадает с глубиной проникания сплошного цилиндра длиной 3,6 диаметра. Различие в ширине каверн сплошного и расчлененного цилиндров сохранилось бы при этом. По мере увеличения скорости соударения на дне каверны остается все меньше материала стержня. На фиг. 9 показана каверна, образующаяся при соударении со скоростью 435 м/с стержня из белого пластилина длиной 3,5 диаметра с мишенью из темного пластилина. Видно, что пластилин стержня растекся по стенкам каверны тонким слоем. Глубина каверны и ее диаметр на входе составили 4,3 диаметра стержня.

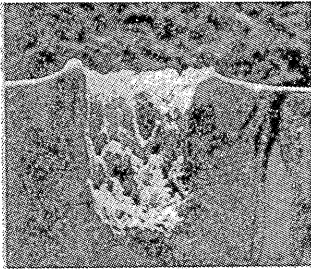
6. При проникновении с начальной скоростью 425 м/с цилиндрического тела длиной, равной диаметру, состоящего из металлического порошка удельной плотностью в 3,9 раза большей чем пластилин, образуется каверна, показанная на фиг. 10. Поверхностный слой каверны состоит из смеси порошка и пластилина. Толщина этого слоя увеличивается по мере приближения ко дну каверны. На дне каверны в центре возвышается конус из пластилина. Это может свидетельствовать о том, что в процессе проникания частички порошка приобретают, как



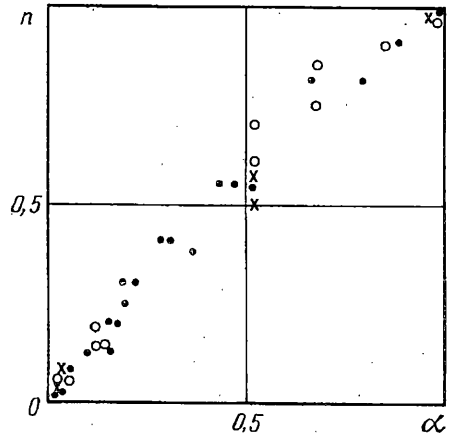
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12

и шарики, радиальное движение и по оси цилиндра плотность порошка резко падает. Это и приводит на какой-то стадии к образованию каверны, схожей с каверной, возникающей при проникании тела, состоящего из многих слоев шариков без центральных (фиг. 6). При проникании тела, состоящего из 130 шариков, засыпанных хаотично в деревянный стакан глубиной, равной внутреннему диаметру, при скорости соударения 435 м/с образуется каверна фиг. 11, имеющая некоторое сходство с каверной, возникающей при проникании порошкового тела, фиг. 10. В этом случае на дне каверны в центре образуется небольшое возвышение, все шарики сосредоточены вблизи поверхности каверны (не далее одного — двух диаметров). Отдельный шарик при скорости входа 435 м/с проникает в пластилин на 17,5 диаметров. В данном случае, при групповом проникании, шарики были обнаружены на наибольшей глубине 20 диаметров и наименьшей — 7,5.

В [4] рассматривался косой вход группы тел в упругопластическую среду. В этом случае интерес представляет изучение явления рикошета. Для группы тел возможен частичный рикошет, когда часть тел рикошетирует, а часть внедряется. На фиг. 12 показана зависимость доли внедрившихся шариков n от параметра $\alpha = (\beta - \beta_1) / (\beta_2 - \beta_1)$, где β_1 — угол входа, при котором все шарики рикошетируют, β_2 — угол входа, при котором все шарики внедряются. Зависимость получена

при послыном расположении шариков по 7 штук в слое. Соударение происходило с пластилином при 20°C со скоростью 250 м/с. Темными точками отмечены результаты для тела, состоящего из 28 шариков, светлыми — из 21, крестами — из 14. Результаты для всех трех тел мало отличаются. Характерно, что почти все экспериментальные точки лежат выше диагонали координатного угла, но близко к ней. Это дает возможность оценить минимальное количество шариков, внедряющихся при промежуточных углах входа, если известны β_1 и β_2 .

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16530 и Международного научного фонда (MN 1000)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Backman M. E., Goldsmith W.* The mechanics of penetration of projectiles into targets//Int. J. Engng. Sci. 1978. V. 16, P. 1—99.
2. *Евстропьев-Кудреватый В. В., Кожушко А. А., Сапожников Г. А., Фомин В. М.* Последовательное соударение ударников с преградой//Численные методы решения задач теории упругости и пластичности. 12 Всес. конф. Новосибирск, 1992, 217 с.
3. *Holland P. M., Gordon J. T., Menns T. L., Charters A. C.* Hydrocode results for the penetration of continuous, segmented and hybrid rods compared with ballistic experiments//Int. J. Impact Engng. 1990. V. 10. P. 241—250.
4. *Бивин Ю. К.* Косой вход группы тел в упругопластическую среду.//Изв. РАН. МТТ. 1993. № 4. С. 170—173.

Москва

Поступила в редакцию
4.I.1994