

двухбойковых машинах в связи с небольшими необходимыми усилиями обжатия [5]. Выбор количества бойков осуществляется в зависимости от необходимого усилия обжатия. Многобойковые машины более пригодны для обжатия заготовок с большими степенями деформации.

4. Механизм обжатия радиально-ковочных машин более надежен в сравнении с ротационно-ковочными. В связи с этим при изготовлении крупных заготовок, для обработки которых требуются большие усилия обжатия, следует ориентироваться на многобойковые (4 и более) радиально-обжимные машины, т. к. небольшие рабочие поверхности бойков не дают чрезмерных нагрузок на звенья обжимного механизма.

5. Для горячего обжатия применение вертикальных машин позволяет проще удалять окалину. В конструкции оборудования, предназначенного для горячего обжатия (в частности горизонтальных машинах), предусматривается возможность охлаждения механизма обжатия с помощью продувания воздуха или прокачивания жидкости через отверстие в шпинделе, при этом удаляется окалина в результате нагрева.

6. Машины с вертикальной подачей заготовок менее приспособлены к встраиванию в автоматические линии ввиду необходимости монтажа специальных устройств ориентации заготовки.

Литературный обзор позволил определить следующие недостатки оборудования для радиального обжатия: повышенный износ исполнительных органов обжимного механизма в результате сил трения между заготовкой и инструментом при значительных степенях деформации, а также значительный уровень шума и вибраций [5, 7]. Снижение сил трения достигается повышением качества изготовления исполнительных поверхностей бойков и применением смазок. Выбор смазки осуществляется в зависимости от температуры деформирования, удельного давления, трудности нанесения и стоимости. Коэффициент трения зависит от характера приложения усилия, режимов обработки, физико-химических свойств обрабатываемого материала, шероховатости поверхности инструмента и заготовки.

Основными источниками шума являются упругие деформации деталей и соударение роликов обжимного механизма. В современных конструкциях машин вводятся конструктивные решения, позволяющие исключить соударение роликов и ползунов. Использование гидропривода в обжимных машинах вместо механического привода снижает уровень шума [5, с. 75].

Заключение. Таким образом, в настоящее время модернизация и совершенствование оборудования для обжатия осуществляется в таких направлениях: увеличение производительности, повышение надежности и долговечности работы деталей и узлов в целом, расширение технологических возможностей машин, а также снижение уровня шума.

При снижении серийности выпускаемой продукции более пред-

почтительным является универсальное оборудование, способное обрабатывать сплошные и полые заготовки круглого и граненого сечения с достаточной производительностью [10]. Для данных требований применение радиально-обжимных и барабанных ротационно-обжимных машин является наиболее рациональным.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковка и штамповка: справочник : в 4 т. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Н. Семенова. – М. : Машиностроение, 2010. – Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. – 717 с., ил.
2. Низмеев, А. А. Применение комбинированных заготовок в условиях снижения серийности производства / А. А. Низмеев, С. Ю. Стародубов // 60 лет ДонГТУ. Наука и практика : сборник тезисов докладов Юбилейной международной научно-технической конференции 11 октября 2017 г. – Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. – С. 207–208.
3. Низмеев, А. А. Комбинированные заготовки как фактор адаптации производства к снижению серийности выпуска / А. А. Низмеев, С. Ю. Стародубов // Сборник научных работ студентов ДонГТУ. – Вып. 11. – Часть I. – Алчевск : ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. – С. 265–269.
4. Оценка эффективности радиального обжатия для получения заготовок ходовых винтов / И. Л. Бабичев, С. Н. Кучма, А. А. Низмеев, С. Ю. Стародубов // Сборник научных работ студентов ДонГТУ. – Вып. 10. – Часть I. – Алчевск : ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. – С. 157–162.
5. Радюченко, Ю. С. Ротационное обжатие / Ю. С. Радюченко. – М. : Машиностроение, 1972. – 176 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. – Т. 1 / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 656 с., ил.
7. Радюченко, Ю. С. Ротационная ковка / Ю. С. Радюченко. – М. : Машгиз, 1962. – 188 с., ил.
8. Ковка и штамповка на специализированном оборудовании / Б. П. Рудаков, А. Н. Силичев, Е. В. Степанов [и др.]; под общ. ред. П. В. Камнева, А. П. Атрошенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 96 с., ил.
9. Ковка и штамповка: справочник : в 4 т. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 2010. – Т. 2. Горячая объемная штамповка – 720 с., ил.
10. Гольшев, И. В. Ротационная ковка полых цилиндрических заготовок : автореф. дис. канд. техн. наук / И. В. Гольшев. – Тула : ТГУ, 2008. – 19 с.

03.12.2019

NIZMEYEV A. A. Ways to improve equipment for radial compression

The article presents a literature review of equipment for radial compression, a classification scheme of crimping machines, the main features of the process of radial compression, recommendations for the use of radial and rotary crimping machines, depending on the type of production, as well as the structural shape and technical requirements for the workpiece. Separately, the main advantages of the radial compression process are noted, the shortcomings of the equipment for compression and possible ways of their modernization are revealed.

620.178.7

• • • • •

Введение. Простым и удобным методом анализа контактных явлений при средних скоростях ударного столкновения частиц с деталями машин и механизмов является метод падающего шарика, который применяется обычно для определения доли энергии, поглощаемой

при ударе. В основу метода положено сопоставление скорости отскока шарика после удара со скоростью падения, которые, в свою очередь, вычисляются исходя из высоты падения и высоты отскока [1–4]. Наиболее полно разработаны методики расчета параметров контактного

Барсуков Владимир Георгиевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой технической механики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы; e-mail : v.g.barsukov@grsu.by.

Лежава Андрей Георгиевич, к.т.н., доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей Гродненского государственного университета имени Янки Купалы; e-mail : lataia@tut.by.
Беларусь, г. Гродно, ул. Ожешко, 22.

взаимодействия для условий, когда эквивалентные напряжения не превышают предела текучести пластичных или предела прочности хрупких материалов [5–8]. Однако многие вопросы, связанные с контактным взаимодействием, изучены недостаточно, что обусловлено сложностью протекающих в зоне контакта динамических явлений [9]. В частности, недостаточно изучено влияние аэродинамического сопротивления на силовые и кинематические параметры процесса испытаний. Работы в этом направлении только начаты и не доведены до удобных на практике методик расчетов [10]. Обычно вклад аэродинамического сопротивления игнорируется вследствие малости. Однако возможная оценка погрешности от такого не учета аэродинамического сопротивления не произведена.

Цель работы – разработать методику математического моделирования и произвести с ее помощью расчетную оценку влияния аэродинамического сопротивления на кинематические и силовые параметры процесса испытания материалов на удар по методу падающего шарика.

Постановка задачи и методика моделирования. Движение вниз. Расчетная кинематическая и силовая схемы для движения шарика вниз приведены на рис. 1.

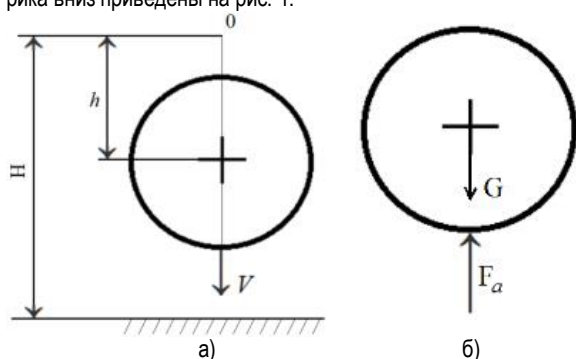


Рисунок 1 – Кинематическая (а) и силовая (б) расчетные схемы для движения шарика вниз

На шарик массой m действует направленная вниз сила тяжести G и направленная навстречу движению сила аэродинамического сопротивления F_a .

При этом сила тяжести G равна произведению массы шарика m на ускорение свободного падения g

$$G = mg. \quad (1)$$

Сила аэродинамического сопротивления F_a , согласно [11], определяется по формуле Ньютона

$$F_a = \frac{1}{2} \alpha A \rho V^2, \quad (2)$$

где α – коэффициент лобового сопротивления, A – площадь сечения обтекаемого тела по миделю (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную векторам скорости набегающего потока), ρ – плотность газа, в котором движется тело, V – скорость движения.

При исследовании движения шарообразных частиц диаметром d установлено существование трех типовых областей, каждой из которых соответствует определенный характер зависимости коэффициента лобового сопротивления α от числа Рейнольдса Re [11]:

- ламинарная область (область действия закона Стокса) при $Re \leq 2$

$$\alpha = 24 / Re; \quad (3a)$$
- переходная область $Re = 2 \dots 500$

$$\alpha = 18,5 / Re^{0,6}; \quad (3б)$$

- автомодельная область $500 \leq Re \leq 200000$

$$\alpha \approx 0,44 = const. \quad (3в)$$

Подстановка значений α в уравнение (2) показывает, что в ламинарной области сила аэродинамического сопротивления F_a пропорциональна скорости V в первой степени (подчиняется закону Стокса), во второй области – пропорциональна $V^{1,4}$ (не подчиняется закону Стокса и Ньютона), а в третьей – пропорциональна V^2 . Проанализируем этот аспект более подробно.

Поскольку при падении скорость шарика изменяется от нуля до некоторого максимального значения, то следует допустить поэтапное движение шарика в каждом из режимов – ламинарном, переходном, автомодельном. Произведем приближенную расчетную оценку характерных размеров этих зон с использованием известной из физики зависимости, связывающей скорость тела с высотой падения

$$V^2 = 2gh. \quad (4)$$

С другой стороны, известно [11], что число Рейнольдса находится по формуле

$$Re = \frac{Vdp}{\mu}, \quad (5)$$

где μ – динамическая вязкость среды (для воздуха $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{Па} \cdot \text{с}$ [11]). Из (5) следует, что

$$V^2 = \left(\frac{\mu Re}{dp} \right)^2 \quad (5a)$$

Совместное решение (4) и (5a) позволяет получить формулу, связывающую скорость движения с высотой падения шарика и числом Рейнольдса.

$$h = \frac{V^2}{2g} = \frac{1}{2g} \left(\frac{\mu Re}{dp} \right)^2. \quad (6)$$

Аналитическая зависимость (6) позволяет производить оценочные (приближенные) расчеты размеров зон ламинарного и переходного режимов движения при падении шарика (табл. 1).

Из таблицы 1 следует, что при использовании экспериментальных установок с высотой падения $h = 1000$ мм для шариков малых размеров (диаметром 1 или 1,5 мм) зоны ламинарного и переходного режимов движения займут все рабочее пространство. При увеличении диаметров шариков длина этих зон сокращается, однако их суммарный размер h становится малозначительным (менее 5,1% общей длины) только для диаметров шарика 8 мм и более. В последнем случае можно считать при технических расчетах, что практически на всей длине рабочей зоны справедлива формула (2) для определения силы аэродинамического сопротивления.

С целью упрощения математических выкладок, а также учитывая широкую распространенность шариков диаметрами 8, 10 и 12 мм при проведении испытаний, дальнейший анализ будем производить при расчетной схеме, соответствующей автомодельному режиму движения шарика.

На основе (1) и (2) дифференциальное уравнение движения шарика вниз может быть записано в виде

$$m \frac{dV}{dt} = mg - \frac{1}{2} \alpha A \rho V^2. \quad (7)$$

Для удобства интегрирования преобразуем левую часть уравнения (7)

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dh} \frac{dh}{dt} = V \frac{dV}{dh} = \frac{1}{2} \frac{d(V^2)}{dh}. \quad (8)$$

Таблица 1 – Оценочные размеры зон ламинарного h_l и переходного h_p режимов движения шарика при падении в воздухе, а также их суммарная длина h

Наименование зоны	Оценочные размеры зон (мм), при диаметре шарика d (мм)							
	1	1,5	2	4	6	8	10	12
Зона ламинарного режима h_l	450	176	112,5	28,1	12,5	7,0	4,5	3,1
Зона переходного режима h_p	2815	1094	703,8	175,9	78,2	44,0	28,2	19,6
Суммарная длина зон h	3265	1270	816,3	204,0	90,7	51,0	32,7	22,7

Подстановка (8) в (7) дает после деления на $m/2$ следующую зависимость

$$\frac{d(V^2)}{dh} = 2g - \frac{\alpha A \rho}{m} V^2. \quad (9)$$

Дифференциальное уравнение (9) может быть проинтегрировано путем замены переменной.

Так, введя новую переменную

$$W = 2g - \frac{\alpha A \rho}{m} V^2 \quad (10)$$

и, выполнив преобразования

$$d(V^2) = -\frac{m}{\alpha A \rho} dW, \quad (10a)$$

после интегрирования и возвращения к исходным переменным получаем

$$V = \sqrt{\frac{m}{\alpha A \rho} \left(2g - C_1 e^{-\frac{\alpha A \rho}{m} h} \right)}, \quad (11)$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Для определения постоянной интегрирования воспользуемся следующими начальными условиями: $h=0$; $V=0$. Выполнение этих граничных условий дает $C_1=2g$ и преобразует (11) к виду

$$V = \sqrt{\frac{2mg}{\alpha A \rho} \left(1 - e^{-\frac{\alpha A \rho}{m} h} \right)}. \quad (11a)$$

Скорость V_c в конечный момент времени (к моменту столкновения с препятствием) может быть вычислена, приняв в (11a) $h=H$, тогда

$$V_c = \sqrt{\frac{2mg}{\alpha A \rho} \left(1 - e^{-\frac{\alpha A \rho}{m} H} \right)}. \quad (12)$$

Проанализируем полученную формулу. Из разложения экспоненты в ряд Маклорена с удержанием вследствие малости первых двух слагаемых, получаем

$$e^{-\frac{\alpha A \rho}{m} H} \approx 1 - \frac{\alpha A \rho}{m} H. \quad (13)$$

Подставив (13) в (12) получаем для скорости соударения формулу, совпадающую с известной из физики для падения тела с высоты H в вакууме

$$V = \sqrt{\frac{2mg}{\alpha A \rho} \cdot \frac{\alpha A \rho}{m} H} = \sqrt{2gH}.$$

Этот результат свидетельствует о корректности принятой расчетной схемы и полученных на ее основе аналитических зависимостей.

Расчетная потеря скорости ΔV в сравнении со скоростью при движении в вакууме составляет

$$\begin{aligned} \Delta V &= \sqrt{2gH} - \sqrt{\frac{2mg}{\alpha A \rho} \left(1 - e^{-\frac{\alpha A \rho}{m} H} \right)} = \\ &= \sqrt{2gH} \left[1 - \sqrt{\frac{m}{\alpha A \rho H} \left(1 - e^{-\frac{\alpha A \rho}{m} H} \right)} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Расчетное усилие аэродинамического сопротивления F_a найдем из аналитической зависимости (2), подставив в нее значение V из (12):

$$F_a = mg \left(1 - e^{-\frac{\alpha A \rho h}{m}} \right). \quad (15)$$

На основании (12) кинетическая энергия шарика в момент удара с учетом влияния аэродинамического сопротивления будет

$$E = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{m^2 g}{\alpha A \rho} \left(1 - e^{-\frac{\alpha A \rho H}{m}} \right). \quad (16)$$

Потеря энергии шарика при движении вниз может быть расчи-

тана как разность потенциальной энергии $=mgH$ и кинетической энергии в момент удара, рассчитываемой по формуле (16)

$$\Delta E = mgH \left[1 - \frac{m}{\alpha A \rho H} \left(1 - e^{-\frac{\alpha A \rho H}{m}} \right) \right]. \quad (17)$$

Относительная потеря энергии шарика при движении вниз

$$\frac{\Delta E}{\Pi} = 1 - \frac{m}{\alpha A \rho H} \left(1 - e^{-\frac{\alpha A \rho H}{m}} \right). \quad (18)$$

Преобразуем аналитическую зависимость (18). Для шара масса m и площадь сечения по миделю могут быть рассчитаны по следующим формулам

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \gamma, \quad (19a)$$

$$A = \pi R^2, \quad (19b)$$

где R – радиус шара, γ – плотность материала шара. В этом случае

$$\frac{m}{A} = \frac{4}{3} R \gamma \quad (19b)$$

С учетом (19b) зависимость (18) для определения потерь энергии на преодоление аэродинамического сопротивления при движении шарика вниз преобразовывается к виду

$$\frac{\Delta E}{\Pi} = 1 - \frac{4}{3} \frac{R \gamma}{\alpha \rho H} \left(1 - e^{-\frac{3 \alpha \rho H}{4 R \gamma}} \right). \quad (20)$$

Зависимость (20) для определения скорости удара

$$V_c = \sqrt{\frac{8 R \gamma}{3 \alpha \rho} \left(1 - e^{-\frac{3 \alpha \rho H}{4 R \gamma}} \right)}, \quad (20a)$$

а зависимость (14) для расчета относительной потери скорости

$$\frac{\Delta V}{V} = 1 - \sqrt{\frac{4 R \gamma}{3 \alpha \rho H} \left(1 - e^{-\frac{3 \alpha \rho H}{4 R \gamma}} \right)}. \quad (21)$$

Учитывая малость потерь скорости и энергии вследствие аэродинамического сопротивления при испытаниях материалов на удар по методу падающего шарика, разложив экспоненту в формулах (20) и (21) в ряд Маклорена с удержанием трех первых членов и проведя преобразования, получаем приближенные аналитические зависимости для расчета относительных потерь энергии и скорости вследствие аэродинамического сопротивления

$$\frac{\Delta E}{\Pi} = \frac{3 \alpha \rho H}{8 R \gamma}; \quad (22a)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3 \alpha \rho H}{16 R \gamma}. \quad (22b)$$

Движение шарика после отскока вверх. Расчетные кинематическая и силовая схемы приведены на рис. 2.

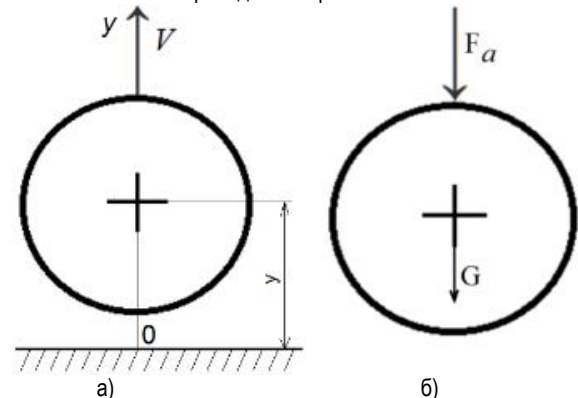


Рисунок 2 – Расчетные кинематическая (а) и силовая (б) схемы для движения шарика после отскока вверх

После столкновения с препятствием в результате потерь части энергии на пластическое деформирование подвергнутого ударному нагружению материала скорость отскока V обычно меньше скорости столкновения V_0 , и составляет некоторую долю от нее

$$V = \eta V_0, \quad (23)$$

где η – коэффициент восстановления скорости.

Движение вверх является замедленным под действием сил тяжести и аэродинамического сопротивления. Дифференциальное уравнение такого движения можно представить в следующем виде

$$m \frac{dV}{dt} = -mg - \frac{1}{2} \alpha A_p V^2. \quad (24)$$

Или, разделив (24) на m , получим

$$\frac{dV}{dt} = -\left(g + \frac{1}{2} \frac{\alpha A_p}{m} V^2\right). \quad (24a)$$

Выполнив преобразования по аналогии с (8), для дифференциального уравнения (24a) получим

$$\frac{d(V^2)}{dy} = -\left(2g + \frac{\alpha A_p}{m} V^2\right). \quad (25)$$

Интегрирование (25) с использованием метода замены переменной по аналогии с (10) дает

$$V^2 = \frac{m}{\alpha A_p} \left[C_2 e^{-\frac{\alpha A_p}{m} y} - 2g \right], \quad (26)$$

где C_2 – постоянная интегрирования.

Начальные условия: $y = 0$, $V = V_0 = \eta V_c$. Подставив эти условия в (26), получим

$$C_2 = 2g + V_0^2 \cdot \frac{\alpha A_p}{m}.$$

Следовательно

$$V^2 = \frac{m}{\alpha A_p} \left[\left(2g + \frac{V_0^2 \alpha A_p}{m}\right) e^{-\frac{\alpha A_p}{m} y} - 2g \right]. \quad (27)$$

Наибольшую высоту подъема y_m определим из (27) при условии, что $V = 0$.

Решив уравнение (27) относительно $y = y_m$ запишем

$$y_m = \frac{m}{\alpha A_p} \ln \left(1 + \frac{V_0^2 \alpha A_p}{2gm} \right) = \frac{4}{3} \frac{R\gamma}{\alpha \rho} \ln \left(1 + \frac{3}{8} \frac{V_0^2 \alpha \rho}{g R \gamma} \right). \quad (28)$$

Анализ показывает, что из разложения логарифма в ряд Маклорена с удержанием слагаемых в первой степени следует

$$y_m = y_0 = \frac{m}{\alpha A_p} \cdot \frac{V_0^2 \alpha A_p}{2mg} = \frac{V_0^2}{2g}. \quad (29)$$

Выражение (29) совпадает с известной формулой для расчета высоты отскока шарика при движении в вакууме и свидетельствует о корректности принятой расчетной схемы.

Расчетное значение потери высоты подъема шарика Δy вследствие воздействия аэродинамического сопротивления может быть вычислено как разность значений, определяемых по формулам (29) и (28)

$$\Delta y = y_0 - y_m = \frac{V_0^2}{2g} \left[1 - \frac{2mg}{V_0^2 \alpha A_p} \ln \left(1 + \frac{V_0^2 \alpha A_p}{2mg} \right) \right]. \quad (30)$$

Или, подставив значение отношения массы шарика к площади сечения по миделю из (19в)

$$\Delta y = y_0 - y_m = \frac{V_0^2}{2g} \left[1 - \frac{8}{3} \frac{R\gamma}{V_0^2 \alpha \rho} \ln \left(1 + \frac{3}{8} \frac{V_0^2 \alpha \rho}{R\gamma} \right) \right]. \quad (30a)$$

С учетом (32) потеря энергии на преодоление аэродинамического сопротивления составляет

$$\Delta \Pi = mg \Delta y = mg \left[\frac{V_0^2}{2g} - \frac{m}{\alpha A_p} \ln \left(1 + \frac{V_0^2 \alpha A_p}{2gm} \right) \right].$$

Относительная потеря энергии / на преодоление аэродинамического сопротивления при движении шарика вверх

$$\frac{\Delta \Pi}{\Pi} = \frac{mg \Delta y}{mgy_0} = 1 - \frac{2mg}{\alpha A_p V_0^2} \ln \left(1 + \frac{V_0^2 \alpha A_p}{2gm} \right). \quad (31)$$

Принимая во внимание (19а) и (19б), формула (31) может быть преобразована к виду

$$\frac{\Delta \Pi}{\Pi} = 1 - \frac{8R\gamma g}{3\alpha \rho V_0^2} \ln \left(1 + \frac{3V_0^2 \alpha \rho}{8R\gamma g} \right). \quad (32)$$

После разложения логарифмической функции в ряд Маклорена с удержанием первых трех слагаемых зависимость (32) может быть представлена в следующем упрощенном виде

$$\frac{\Delta \Pi}{\Pi} \approx \frac{3\alpha \rho V_0^2}{16R\gamma g}. \quad (32a)$$

Приведенные выше формулы позволяют осуществлять расчетную оценку параметров аэродинамического сопротивления при движении шарика вниз и вверх и оценивать погрешность измерений, обусловленную не учетом такого сопротивления.

Результаты исследований и их обсуждение. Произведем количественную оценку потери скорости шарика к моменту ударного столкновения с испытуемым материалом и потерь энергии на примере широко используемого в практике стального шарика ($\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$) для ряда типоразмеров диаметра $d = 2R$ при падении с различных высот в воздухе. Примем при расчетах значение плотности стандартной атмосферы на высоте уровня моря $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ [12], а значение коэффициента лобового сопротивления, в соответствии с формулой (3в), для сферы $C_x = 0,44$. Результаты расчетов представлены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2 – Влияние диаметра шарика d и высоты падения H на относительную потерю скорости V/V_0 на стадии движения вниз в сравнении с расчетной скоростью при падении в вакууме

Диаметр шарика, мм	Относительная потеря скорости V/V_0 (%), при высоте падения H , мм					
	200	400	600	800	1000	2000
8	0,065	0,129	0,194	0,259	0,323	0,644
10	0,052	0,104	0,155	0,207	0,259	0,516
12	0,043	0,087	0,129	0,173	0,216	0,43

Таблица 3 – Влияние диаметра шарика d и высоты падения H на относительные потери энергии / в сравнении с энергией при движении шарика в вакууме

Диаметр шарика, мм	Относительные потери энергии / (%), при высоте падения H , мм					
	200	400	600	800	1000	2000
8	0,129	0,259	0,387	0,517	0,645	1,283
10	0,104	0,207	0,311	0,414	0,517	1,029
12	0,087	0,173	0,258	0,345	0,432	0,86

Сравнительные значения расчетных кинематических показателей при падении стального шарика с высоты $H = 1000 \text{ мм}$ на образец из меди в вакууме и воздухе приведены в таблице 4. Коэффициент восстановления скорости при ударном взаимодействии стали с медью принят $\eta = 0,55$ [2].

Из представленных данных видно, что в исследованном диапазоне изменения d и H с увеличением высоты падения шарика, а также при уменьшении диаметра шарика d потери энергии на преодоление аэродинамического сопротивления возрастают. При этом для шариков диаметром 8, 10 и 12 мм при высоте падения 1 м и

Таблица 4 – Сравнительные значения расчетных кинематических показателей при падении стального шарика с высоты $h = 1000$ мм на образец из меди в вакууме и в воздухе

Диаметр шарика, мм	Скорость падения, м/с		Скорость отскока, м/с		Высота отскока, мм		Относительная потеря энергии / , %
	V_{cv}	V_{ca}	V_{ov}	V_{oa}	U_{mv}	U_{ma}	
8	4,427	4,413	2,435	2,427	302,88	300,5	0,19
10	4,427	4,416	2,435	2,429	302,88	301	0,16
12	4,427	4,417	2,435	2,430	302,88	301	0,13

Примечание: V_{cv} , V_{ov} , U_{mv} – соответственно расчетная скорость падения, скорость отскока, высота отскока при движении шарика в вакууме, V_{ca} , V_{oa} , U_{ma} – соответственно расчетная скорость падения, скорость отскока, высота отскока при движении шарика в воздухе

выше эти потери не превышают 0,65% при движении вниз и 0,19% при движении вверх. Полученный вывод подтверждает допустимость не учета аэродинамического сопротивления при проведении испытаний для таких типоразмеров шариков и позволяет оценивать возникающую измерительную погрешность.

Заключение. Результаты выполненных исследований позволили разработать методику и произвести расчетную оценку значений характерных размеров зон ламинарного, переходного и автомодельного режимов движения шарика в воздухе для широкого диапазона изменения его диаметра. Показано, что с уменьшением размера шариков длина зон ламинарного и переходного режимов движения возрастает. При этом для шариков диаметром свыше 8 мм при высоте падения 1 м и более доминирующим является автомодельный режим движения с пренебрежимо малым вкладом ламинарного и переходного режимов. Разработана также методика и произведена расчетная оценка потерь энергии, скорости и усилия на преодоление аэродинамического сопротивления для автомодельного режима движения падающего шарика. Показано, что для шариков диаметром 8 и 10 мм при высоте падения 1 м и выше эти потери не превышают 0,65% при движении вниз и 0,19% при движении вверх. Полученный вывод подтверждает допустимость не учета аэродинамического сопротивления при проведении испытаний для таких типоразмеров шариков и позволяет оценивать возникающую измерительную погрешность.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голдсмит, В. Удар и контактные явления при средних скоростях // Физика быстротекающих процессов. – М.: Мир, 1971. – С.172–180.
2. Клейс, И. Экспериментальное и расчетное определение коэффициента восстановления скорости при ударе / И. Клейс, Х. Кангур // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. 8. – 1988. – № 4. – С.182–185.
3. Kleis, I. Method and installation for studying hard particle kinematic and impact / I. Kleis, F. Frishman, T. Pappel // OST – 95. Symposium on Machine design proceeding. – Oulu, 1995. – P. 15–22.
4. Petrak, D. Experimental investigation of the particle-wall collision under particular consideration of the wall roughness / D. Petrak, K. P. Schade // ASME Meeting. – San Diego, 1966. – P. 1–8.
5. Богданович, П. Н. Трение и износ в машинах: учеб. для вузов / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск: Выш. шк., 1999. – 374 с.
6. Мышкин, Н. К. Механика фрикционного контакта / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец – Гомель: ИММС НАНБ, 2000. – С. 58.
7. Свириденко, А. И. Механика дискретного фрикционного контакта / А. И. Свириденко, С. А. Чижик, М. И. Петроковец – Минск: Наука и техника, 1990 – 272 с.
8. Смирнов, С. В. Влияние радиуса скругления вершины индентора на напряженно-деформированное состояние при внедрении индентора в упруго-пластический материал / С. В. Смирнов, Е. О. Экземплярова // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. – 12. – № 6. – С. 73–78.
9. Крулич, Б. Моделирование микроконтактных взаимодействий при газообразном изнашивании сталей с учетом деформационного упрочнения / Б. Крулич, В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко // Трение и износ. – 2019. – Том 40. – № 6. – С. 644–653.
10. Барсуков, В. Трибомеханика дисперсных материалов. Технологические приложения: монография / В. Барсуков, Б. Крулич. – Гродно: ГрГУ, 2004. – 260 с.
11. Колесник, М. А. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов и изделий / Н. А. Колесник – Брест: БрГТУ, 2010. – 192 с.
12. Енохович, А. С. Справочник по физике. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Просвещение, 1990. – 384 с.

03.12.2019

BARSUKOV V. G., LEZHAVA A. G., KHVISEVICH V. M. Modeling and calculation estimation of aerodynamic drag parameters when testing materials for impact using the falling ball method

The falling ball method is widely used in determining the rate of the velocity recovery, as well as the fraction of energy absorbed by an elastic-plastic impact, and is based on comparing the speed of the ball rebound after the impact with the speed of fall, which are calculated based on the height of the drop and the height of the rebound. However, many issues related to contact interaction have not been studied enough, due to the complexity of the dynamic phenomena occurring in the contact zone. In particular, the effect of aerodynamic drag on the force and kinematic parameters of the test process has not been sufficiently studied. The purpose of the work is to develop a mathematical modeling technique and use it to calculate the effect of aerodynamic drag on the kinematic and force parameters of the process of testing materials for impact using the falling ball method. A calculation was made of the values of the characteristic sizes of the zones of laminar, transitional, and self-similar modes of motion of the ball in air for a wide range of changes in its diameter. It is shown that with a decrease in the size of the balls, the length of the zones of the laminar and transitional motion modes increases. Moreover, for balls with a diameter of more than 8 mm with a drop height of 1 m or more, the self-similar mode of motion with a negligible contribution of the laminar and transitional modes is dominant. A technique has been developed and a calculated estimate of energy, speed and effort losses to overcome aerodynamic drag for a self-similar mode of motion of a falling ball has been made. It is shown that for balls with a diameter of more than 8 mm and a drop height of 1 m, such losses do not exceed 0.65% and may not be taken into account when performing technical calculations.