

---

УДК 539.3

Ю.С. Воробьев<sup>1</sup>, М.В. Чернобрышко<sup>1</sup>, А.В. Ярышко<sup>1</sup>,  
Д.И. Степанченко<sup>1</sup>, Н.Ю. Евченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного  
НАН Украины, Харьков*

<sup>2</sup>*Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт", Украина*

## **ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА СКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Рассматриваются задачи скоростного деформирования элементов конструкций в упругопластической стадии при воздействии импульсных нагрузок. Эффективный анализ напряженно-деформированного состояния требует комплексного использования теоретических, экспериментальных и численных методов. Динамические характеристики материалов определяются на основе обработки результатов экспериментальных исследований. Численный анализ проводится методами конечных разностей и в некоторых случаях методом конечных элементов. При этом используются динамическая деформационная теория пластичности. Теоретические результаты сравниваются с экспериментальными. Приводятся примеры практического использования результатов.

**скоростное деформирование, динамические характеристики материалов, упругопластическое деформирование, эксперимент, метод конечных разностей, МКЭ, технологические процессы**

Для выбора рациональных параметров процессов обработки материалов и элементов конструкций с использованием импульсных источников энергии необходим анализ особенностей их скоростного деформирования в каждом конкретном случае [1, 2].

В отделе нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной Академии наук Украины ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области динамической прочности элементов конструкций и сложных механических систем под действием вибрационных, подвижных и кратковременных нагрузок [3, 4].

При математическом моделировании скоростных процессов деформирования в упругопластической стадии применяется динамическая дефор-

мационная теория пластичности, которая позволяет использовать эмпирические зависимости для динамических характеристик материала [5, 6].

Удается провести численные исследования скоростного деформирования элементов конструкций с использованием метода конечных элементов.

Комплексные исследования в области скоростного деформирования элементов конструкций невозможны без экспериментальных данных о динамических характеристиках материалов, которые отражают зависимости напряжений  $\sigma$  от деформаций  $\varepsilon$ , скоростей деформаций  $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$  и температуры  $T$ :  $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ .

Деформации и скорости деформаций регистрируются малобазными фольговыми, проволочными или полупроводниковыми (кремниевыми) тензодатчиками. Они являются практически безынерционными. Фольговые датчики работают до деформаций порядка  $\varepsilon = 0,02 - 0,1$  (до 10%) в диапазоне температур от  $-200$  до  $+5000$  °С. Ускорение измеряется пьезо-керамическими датчиками. Для измерения перемещений используются бесконтактные токовихревые датчики. Датчики параметрического типа работают в составе мостов с активной и реактивной составляющими (рис. 1).

Сигналы с датчиков поступают на тензоизмерительный компьютеризированный комплекс "Тензодин-12", предназначенный для регистрации, обработки и хранения полученной информации. Его основой является широкополосная тензометрическая восьмиканальная станция (ШТС-8), работающая на несущей частоте. Она обеспечивает линейность частотной характеристики всех каналов в диапазоне от 40 Гц до 200 кГц. Отклонение

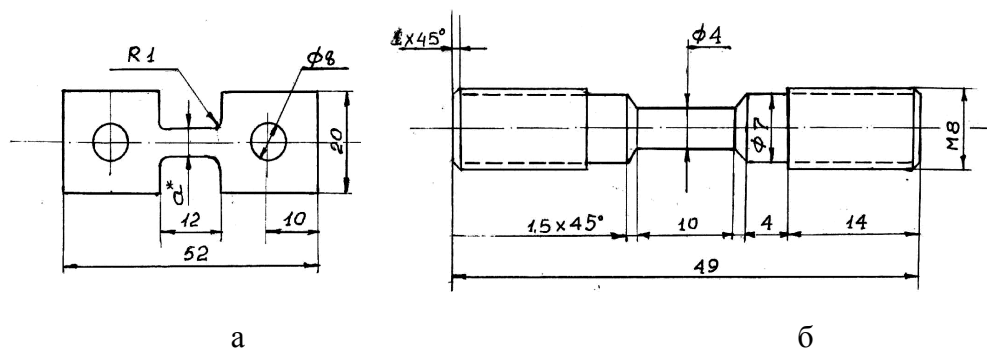


Рис. 1. Линейные плоские и цилиндрические образцы

от линейной амплитудной характеристики до 3%. Сигналы с тензотрической станции через аналого-цифровой преобразователь поступают на персональный компьютер, где с помощью специальной программы осуществляется обработка и визуализация информации в необходимом виде. Длина линий, соединяющих прибор с объектом исследования до 40 м. Коэффициент усиления  $k = 1000$ . Общая погрешность измерений до 7%.

Для определения динамических характеристик материала используется вертикальная разгонная установка (рис. 2).

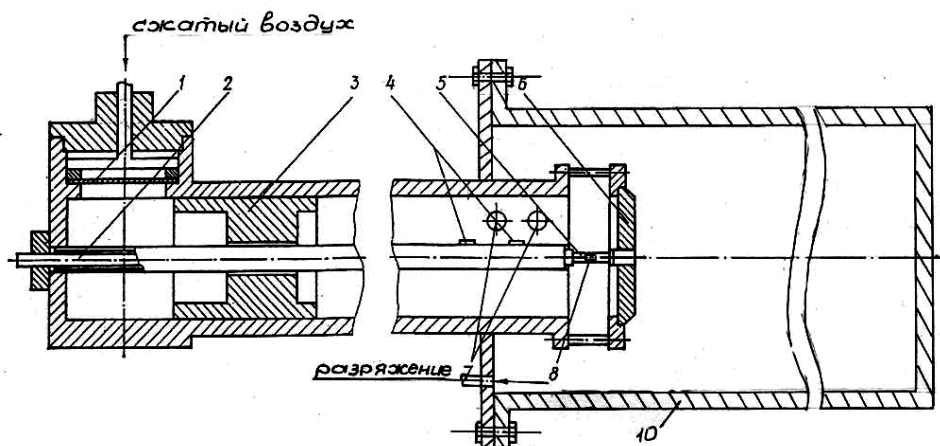


Рис 2. Установка для испытания линейных образцов

Линейные плоские или цилиндрические малогабаритные образцы (рис. 1) испытываются в условиях скоростного одноосного растяжения. Сжатый воздух воздействует на круглую пластину (1) с нанесенным на нее концентратором. Концентратор прорывается при заданном давлении, что обеспечивает изменение скоростей ударника в широком диапазоне (10 – 300 м/с). Ударник (3) под действием сжатого воздуха движется в корпусе диаметром 125 мм до встречи с наковальней (6). Образец (5), закрепленный в наковальне и стержне-динамометре (2), нагружается при воздействии ударника о наковальню. При этом синхронно регистрируются упругие деформации динамометра тензодатчиками (4), упругопластические деформации образца фольговыми тензодатчиками (8) и скорость ударника парой токовихревых датчиков (7) и контактными датчиками, работающими на разрыв. Рабочая часть установки закрыта защитным кожухом, в котором создается разрежение, порядка 10 Па. Диаметр стержня-динамомет-

ра рассчитан так, что он деформируется только в упругой области и дает усилие деформации образца  $N(t)$ , по которому определяется напряжение в образце  $\sigma(t)$ . А датчик на образце дает деформацию его рабочей части  $\varepsilon(t)$ . Таким образом, зависимость  $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  может быть построена по результатам непосредственных измерений без предварительных предположений о характере деформаций образца. Часто пользуются предположением о постоянной скорости деформации образца на основании того, что кинетическая энергия ударника на порядок и более превосходит энергию деформации образца. Однако записи процесса показывают, что это предположение справедливо не на всех стадиях деформирования образца. При скоростях ударника, обеспечиваемых сжатым воздухом, реализуются скорости деформации порядка  $6 \cdot 10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ .

Для уточнения динамических характеристик материала учитывается изменение его сечения в процессе деформации. Большие деформации (более 10%) при образовании шейки и разрыве образца определяются как разность перемещений двух сечений, отнесенная к расстоянию между этими сечениями  $\varepsilon \approx \frac{\Delta u}{\Delta x}$ .

По результатам измерений строится пространственная зависимость в координатах  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$ . (рис.3). Она наглядно демонстрирует путь деформации образца и объясняет возможность больших остаточных деформаций при скоростном нагружении конструкции.

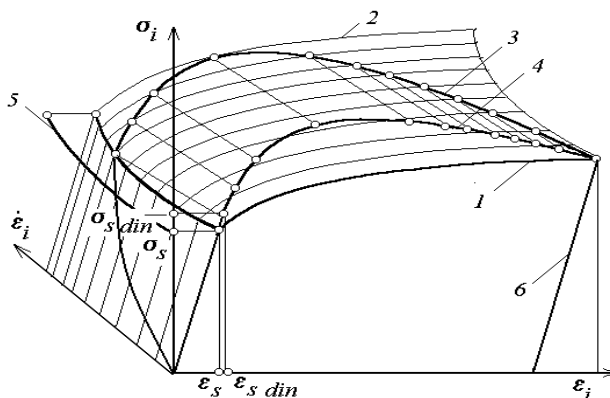


Рис. 3. Зависимость между интенсивностями напряжений, деформаций и скоростей деформаций

Для удобства использования в расчетах результаты измерений обрабатываются и представляются в виде степенной зависимости [1]:

$$\sigma_i = \sigma_{ct} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] + \sigma_{ct} \left\{ \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{ct}} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^m ; \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sigma_{ct} K(\dot{\varepsilon}_i) + \sigma_{ct} \left[ \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{ct}} - K(\dot{\varepsilon}_i) \right]^m ,$$

где  $\sigma_{ct}$ ,  $\varepsilon_{ct}$  – статические пределы текучести по напряжениям и деформациям;  $D$ ,  $n$ ,  $m$  – параметры скоростного упрочнения материала; коэффициент

коэффициент  $K(\dot{\varepsilon}_i) = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$  может быть использован для определения дина-

мических пределов текучести, прочности и др. по их статическим значениям  $\sigma_{dt} = \sigma_{ct} \cdot K(\dot{\varepsilon}_i)$ .

Установка позволяет также при соединении ударника с деформируемой конструкцией проводить испытание удара, например, оболочек о грунт или жидкость.

Для высокоскоростного ударного и аэродинамического нагружения элементов конструкций использовалась горизонтальная разгонная установка (рис. 4). В режиме ударного нагружения сжатый воздух поступает в камеру высокого давления (1). При заданном давлении прорывается диафрагма (2) и ударник

движется по стволу диаметром 125 мм. Объект испытания (10) и монтажная плита (11) находится в расширительной камере (12), соединенной со стволом фланцем (6). Камера диаметром 1,6 м и длиной 2,2 м с толщиной стенки  $\delta = 0,014$  м позволяет разместить объекты испытания достаточ-

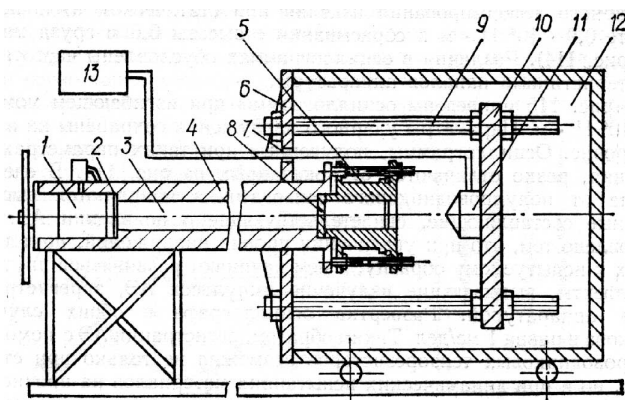


Рис. 4. Установка для испытания элементов конструкций при ударном нагружении

ных размеров. Камера обеспечивает разрежение до 10 Па и защиту помещения. Сжатый воздух позволяет достичь скоростей ударника до 300 м/с.

В режиме аэродинамического нагружения установка обеспечивает двухступенчатый разгон потока за счет двух диафрагм (2, 8). На пути аэродинамического потока может быть установлен турбулизатор.

Для ударного испытания образцов и элементов конструкций на растяжение и сжатие при сравнительно небольших скоростях ударника используется ударный стенд со свободно падающим грузом.

Проводились экспериментальные исследования специальных образцов и элементов конструкций, а также натуральных объектов [1, 3, 4].

Скоростное деформирование элементов конструкций под действием кратковременных нагрузок различной физической природы проходит в упругопластической стадии. При этом необходимо учитывать динамические характеристики материалов типа  $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ , которые находятся экспериментально.

Такие процессы сопровождаются большими перемещениями и деформациями, изменением формы и структуры материала. Задача является существенно нелинейной и физически, и геометрически. Аналитические решения возможны только в отдельных редких случаях [1]. Численные исследования также связаны с большими проблемами.

При математическом моделировании упругопластических процессов скоростного деформирования элементов конструкций кроме известных уравнений равновесия используются зависимости динамической деформационной теории пластичности:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x - \varepsilon_0 &= \psi(\sigma_x - \sigma_0); \\
 \varepsilon_y - \varepsilon_0 &= \psi(\sigma_y - \sigma_0); \\
 \varepsilon_z - \varepsilon_0 &= \psi(\sigma_z - \sigma_0); \\
 \gamma_{xz} &= 2\psi\tau_{xz}; \\
 \gamma_{yz} &= 2\psi\tau_{yz}; \\
 \gamma_{xy} &= 2\psi\tau_{xy}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

При больших деформациях используются зависимости вида:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \right); \\
\varepsilon_\varphi &= \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{r \partial \varphi} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \right)^2 \right); \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right), \\
\gamma_{r\varphi} &= \frac{\partial u}{r \partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{r \partial \varphi} \frac{\partial u}{\partial r} + \left( \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} \right) \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) + \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \frac{\partial w}{\partial r} \right); \\
\gamma_{z\varphi} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{r \partial \varphi} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} \right) \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{r \partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \right); \\
\gamma_{zr} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial r} \right).
\end{aligned} \tag{3}$$

Процессы скоростного деформирования при кратковременных нагрузках происходят практически адиабатически. При этом возникает связанная задача термоупругопластического деформирования, для решения которой необходимо дополнительно учесть уравнения баланса энергии. Для решения таких задач используются методы конечных разностей в неявной форме [2, 6, 7]. В связи со сложностью математических моделей задача решается по частям, изменяющимся в пространстве и во времени. В зоне пластических деформаций и возможных разрушений используются трехмерные модели с учетом динамических свойств материалов и пошаговый итерационный вычислительный процесс. На каждом шаге разностной сетки, как по пространственным координатам, так и по временной, проверяются величины интенсивностей деформаций, скоростей деформаций и напряжений, и сопоставляются с динамическим пределом текучести. В зависимости от результатов проверки осуществляется переход от соотношений для упругой к соотношениям для пластической стадии деформирования и дробление или увеличение шага. В зоне, где превышен динамический предел прочности, используются критерии прочности материала. В зоне упругих деформаций для тонкостенных конструкций используются волновые уравнения типа

Тимошенко. В области, куда не дошла волна деформаций, могут быть использованы обычные уравнения для тонкостенных конструкций.

Некоторые задачи оказывается удобно решать с помощью модифицированного метода конечных элементов, учитывающего динамические характеристики материалов. На рис. 5 представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния стального цилиндра под действием локальной ударной нагрузки. Параметры нагрузки следующие: масса – 0,35 кг; высота сбрасывания груза – 0,5 м; время воздействия нагрузки – 0,001 с; сила – 1095,5 Н, скорость соударения – 3,13 с.



Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние цилиндра под действием локальной ударной нагрузки

Использование всех приемов позволяет решать задачи скоростного деформирования. К ним относятся задачи динамической прочности элементов конструкции под действием кратковременных нагрузок и задача определения рациональных характеристик технологических процессов с импульс-

ными источниками энергии: задача скоростного деформирования, проникновения, пробития или разделения, образование неразъемных соединений (сварка и сварка-пайка взрывом), задача упрочнения, ремонтно-восстановительных работ или очистки.

Комплексное теоретическое и экспериментальное исследование скоростного деформирования элементов конструкций с учетом динамических характеристик материалов позволяют выявлять основные закономерности этих процессов в конкретных случаях. Сопоставление резуль-



татов численных и экспериментальных исследований обеспечивает их достоверность.

Результаты фундаментальных и прикладных исследований позволяют проводить анализ и выбор рациональных параметров эффективных технологических процессов по формообразованию, разделению и соединению элементов конструкций, использующих импульсные источники энергии. Приводятся примеры анализа реальных конструкций и технологических процессов.

### Литература

1. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
2. Колодяжный А.В., Чернобрышко М.В. Термокинетический анализ соударения плоских и цилиндрических слоев // Проблемы машиностроения. – 1999. – Т. 2. – С.78-80.
3. Теоретико-экспериментальный анализ разделения элементов конструкций при локальном импульсном нагружении / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, М.В. Чернобрышко, В.Г. Ярещенко, Л. Крушка // Проблемы прочности. – 2002. – № 5. – С. 100-104.
4. Испытания металлических материалов при магнитно-импульсном нагружении / Ю. Воробьев, А. Колодяжный, М. Чернобрышко, К. Вакуленко, Л. Крушка // Biuletyn WAT. – 2003. – Nr 05(LII). – S. 177-185.
5. Vorobiev Yu.S., Chernobryvko M.V. Nonlinear high-strain-rate elastic-plastic deformation of structural elements under impulsive loading // The Int. Conf. on Nonlinear Dynamics. – Kharkov, 2004. – P. 164-167.
6. Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Крушка Л. Особенности численного анализа скоростного деформирования элементов конструкций под действием локальных импульсных нагрузок // ix KNT «Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania». – Warsaw, Poland, 2005. – P. 545-551.
7. Ярышко А.В., Чернобрышко М.В., Воробьев Ю.С. Воздействие локальной ударной нагрузки на цилиндрическую оболочку // Автомобильный транспорт. – 2005. – Вып. 17. – С. 89-91.

*Поступила в редакцию 15.03.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.