

УДК 539.3

М.В. Чернобрычко, Ю.С. Воробьев*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины**ул. Дм. Пожарского 2/10, г. Харьков, Украина, 61046**E-mail: chernobryvko@ipmach.kharkov.ua, vorobiev@ipmach.kharkov.ua***АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Эффективный анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкций при импульсных нагрузках требует комплексного использования теоретических, экспериментальных и численных методов. Изложена методика таких исследований на основе динамической деформационной теории пластичности. Приводятся примеры практического использования результатов.

Введение. 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]. Исследования в этой области являются весьма сложными, так как необходим анализ нестационарного упругопластического напряженно-деформированного состояния элементов конструкций с учетом динамических характеристик материала, что приводит к существенно нелинейным задачам. Причем, для эффективного решения возникающих проблем необходимо комплексное использование теоретических, экспериментальных и численных методов.

Несмотря на многочисленные работы в этой области проблема остается актуальной и требует дополнительных исследований.

Целью работы является совершенствование методики анализа напряженно- деформированного состояния элементов конструкций при импульсных нагрузках на основе динамической деформационной теории пластичности.

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.

Динамические характеристики материалов, которые связывают интенсивность напряжений, деформаций и скоростей деформаций, как правило, определяются на основании экспериментальных исследований. В Институте проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины для этой цели используются специальные установки для испытаний линейных и кольцевых образцов [1]. Многоканальная широкополосная аппаратура позволяет синхронно получать и обрабатывать данные о скоростной упругопластической деформации образца и упругой деформации штанги-динамометра, отражающей изменение динамических усилий, действующих на образец. Это позволяет построить эмпирические зависимости напряжений от деформаций и их скоростей. В частности, определяется зависимость динамического предела пластичности от скорости деформации.

При математическом моделировании скоростных процессов деформирования в упругопластической стадии применяется динамическая деформационная теория пластичности, которая позволяет использовать эмпирические зависимости для динамических характеристик материала [1]. Численное решение задачи ведется, как правило, методом конечных разностей с линеаризацией определяющих уравнений на каждом шаге конечно-разностной сетки. Это позволяет решать существенно нелинейную задачу в полилинейном приближении. На каждом шаге проверяется характер деформации (упругой или пластической) и возможность достижения динамического предела прочности.

В зоне локального контактного взаимодействия на элемент конструкции или больших пластических деформаций задачу необходимо решать в трехмерной постановке. В зоне распространения волновых процессов необходимо использовать теории пластин или оболочек.

Такой подход позволяет получить картину динамического напряженно-деформированного состояния для достаточно сложных элементов конструкций с использованием расчета системы по частям, что существенно сокращает объем вычислений.

В некоторых случаях удается провести численные исследования скоростного деформирования элементов конструкций с использованием метода конечных элементов.

Для проверки достоверности численных результатов желательно сопоставлять их с экспериментальными.

1. Экспериментальные исследования. Комплексные исследования в области скоростного деформирования элементов конструкций невозможны без экспериментальных данных о динамических характеристиках материалов, которые отражают зависимости напряжений σ от деформаций ϵ ,

скоростей деформаций $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ и температуры T : $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$. Кроме того, сложность процессов скоростного деформирования, проходящего в упругопластической стадии, требует постоянной экспериментальной проверки новых теоретических результатов в этой области [2].

Проводились экспериментальные исследования специальных образцов и элементов конструкций, а также натуральных объектов [2].

2. Математическое моделирование. Скоростное деформирование элементов конструкций под действием кратковременных нагрузок различной физической природы (механических, импульсных, ударных, подвижных, магнитоимпульсных, тепловых и т. д.) проходит в упругопластической стадии. При этом необходимо учитывать динамические характеристики материалов типа $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$, которые находятся экспериментально [1]:

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

Такие процессы сопровождаются большими перемещениями и деформациями, изменением формы и структуры материала. Задача является существенно нелинейной и физически, и геометрически. Получение решения представляет большие трудности. Аналитические решения возможны только в отдельных редких случаях [1]. Численные исследования также связаны с большими проблемами [3, 4].

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

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

Эти зависимости позволяют использовать динамические характеристики материала в форме (1) или других.

При больших деформациях используются нелинейные зависимости между компонентами тензора деформаций и вектора перемещений:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right), \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right), \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right), \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right). \end{aligned}$$

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 адаптивных конечных разностей [3]. 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.

Особый интерес представляет математическая модель подвижной ударной нагрузки. Представим ее в следующем виде:

$$P(x, y, t) = P(y) \left[H\left(t - \frac{x}{V}\right) - H\left(t - \frac{x + \Delta l}{V}\right) \right],$$

где V – скорость движения нагрузки.

Затухание нагрузки во времени выражается следующим образом

$$P_0 = P_{\max} \exp \left[-\frac{1}{Q} \left(t - \frac{x}{V} \right) \right],$$

где Q – показатель убывания величины нагрузки.

3. Численные исследования. Исследовалось влияние ширины зоны нагружения на напряженно-деформированное состояние элемента конструкции из стали X18H10T в области контактного взаимодействия.

Сравнительный анализ результатов расчетов показал, что расширение зоны нагружения при сохраненном суммарном импульсе нагрузки ведет к незначительному снижению максимальных растягивающих напряжений, однако, значительно усложняют протекающий в конструкционном элементе волновой процесс.

Некоторые задачи оказывается удобно решать с помощью модифицированного метода конечных элементов, учитывающего динамические характеристики материалов. На рисунке 1 представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния цилиндра из стали X18H10T под действием локальной ударной нагрузки, представлена интенсивность напряжений. Динамические характеристики материала определялись экспериментально [1]. На цилиндр воздействовал груз массой 1,7 кг, на скорости 5,77 м/с. При увеличении скорости ударника с 3,13 м/с до 5,77 м/с интенсивность напряжений в конструкции превысил предел прочности материала. Результаты расчета показаны на рисунке 2. Дальнейшие исследования напряженно-деформированного состояния целесообразно проводить для локальной зоны удара на основе адаптированного метода конечных разностей с учетом физической многослойности рассматриваемой зоны конструкции [4].

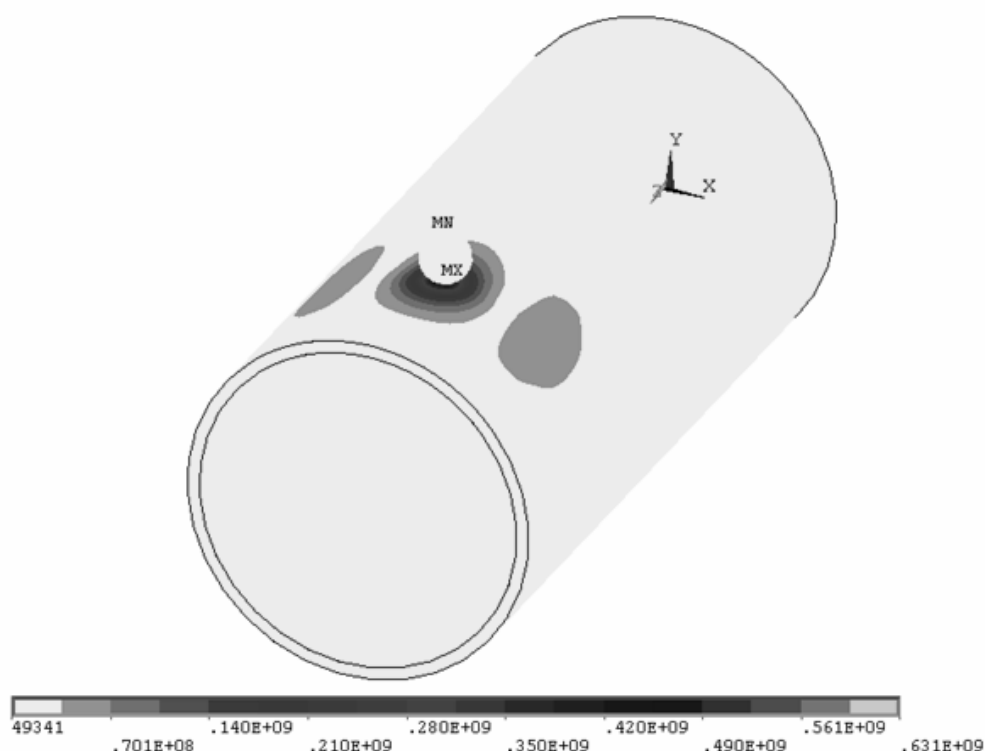


Рисунок 1 – Напряженно-деформированное состояние цилиндра под действием локальной ударной нагрузки

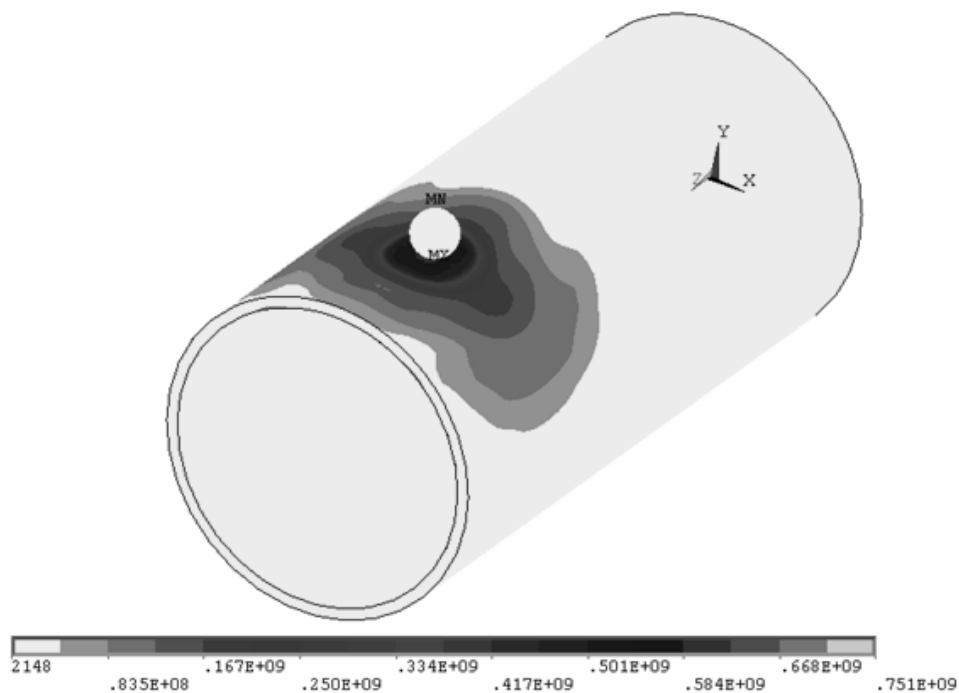


Рисунок 2 – Интенсивность напряжений в конструкции

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

Заклучение. Комплексное теоретическое и экспериментальное исследование скоростного деформирования элементов конструкций с учетом динамических характеристик материалов позволяет выявлять основные закономерности этих процессов в конкретных случаях. Сопоставление результатов численных и экспериментальных исследований обеспечивает их достоверность.

Результаты выполненных исследований позволяют эффективно решать прикладные задачи выбора рациональных параметров технологических процессов по формообразованию, разделению и соединению элементов конструкций, использующих импульсные источники энергии. Решение подобных задач и составляет предмет дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. — К.: Наук. думка, 1989. — 192 с.
2. Теоретико-экспериментальный анализ разделения элементов конструкций при локальном импульсном нагружении / Ю.С. Воробьев [и др.] // Проблемы прочности. — 2002. — № 5. — С. 100–104.
3. Чернобрышко М.В. Нелинейные деформационные процессы при высокоскоростных испытаниях материалов / М.В. Чернобрышко // Вестник ХНАДУ. — 2007. — Вып. 38. — С. 140–142.
4. Чернобрышко М.В. Математическое моделирование соединения элементов конструкций с использованием импульсных источников энергии / М.В. Чернобрышко // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — № 6 (53). — С. 25–29.

Поступила в редакцию 16.03.2009 г.