

УДК 539.3

А.В.Бизюк, В.В.Бизюк

УЧЁТ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Постановка проблемы. В технике находят широкое применение технологии импульсной (взрывной) обработки металлов, проходящие при высоких скоростях деформаций (10^2-10^5 с^{-1}). Экспериментально исследовано влияние скорости деформации на характеристики прочности и пластичности металлов [1]. В теоретических расчетах при разработке математических моделей, описывающих процессы высокоскоростной обработки металлов, возникает необходимость учета скорости деформации, что усложняет расчеты [2]. Поэтому выбор зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформаций и их скоростей обычно проводят в соответствии с конкретной задачей.

К примеру, в работе [3] зависимость $\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)$ рассматривается в весьма полном объеме и с учетом температурного режима деформирования. Аналогичные соотношения в разных вариациях использовались в математических моделях, описывающих большие упругопластические деформации тонкостенных конструкций ([4], [5]).

Цель статьи. Представляет интерес использование зависимости $\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ для описания математических моделей поведения и прочностного состояния при реализации технологий импульсного формообразования, сварки взрывом, взрывного упрочнения, взрывного разделения конструкционных элементов.

Технология управляемого разделения взрывом – это реализация разрушения за счёт прохождения по толщине магистральной трещины нормального отрыва. Процесс характеризуется очень большими скоростями деформации

$$\sigma_i = \sigma_B^D = \sigma_B^{ст} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} \right], \quad (1)$$

где $\sigma_B^{ст}$ – статический предел выносливости материала преграды;

D, n – параметры скоростной зависимости характеристик преграды.

При детонации заряда ВВ ударная волна воздействует на зону концентратора, вызывая изгиб и растяжение преграды. Параметры заряда выбираются такими, чтобы между усилием растяжения Nx и моментом изгиба Mx было соответствие $Nx \geq Mx/2$. Существенное превышение момента Mx приводит к возникновению в нижней части сечения преграды зон сжатия, которые блокируют сквозное прохождение трещины по толщине.

Аналогичные процессы сопровождают обработку поверхности объектов ударно-импульсными нагрузками с целью деформационного упрочнения. Технология состоит в приложении такого уровня давления на единицу поверхности, при котором генерируемые ударные волны вызывают остаточные деформации в поверхностном слое объекта. Эта технология также характеризуется большими скоростями деформации $\dot{\varepsilon}_i \approx 10^5 \text{ с}^{-1}$ и малыми деформациями $\varepsilon_i \approx \sigma_T^D / E$.

Для описания математической модели поведения и прочностного состояния при реализации технологий взрывной обработки металлов давлением – импульсного формообразования, сварки взрывом, взрывного упрочнения, используется динамическая деформационная теория в варианте метода фиктивных нагрузок с билинейным деформационным упрочнением и со степенной зависимостью от скорости деформаций

$$\sigma_i = E \varepsilon_i [1 - \omega(\varepsilon_i)] \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} \right], \quad (2)$$

где $\omega(\varepsilon_i) = \lambda (\varepsilon_i - \varepsilon_s) / \varepsilon_i$, в расчётах принималось $\lambda = 0,992$.

Результаты расчетов показывают, что учет скорости деформации, в частности, существенно снижает значение интенсивности напряжений в конструкции.

Используя динамическую деформационную теорию пластичности, зависимость $\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ примем в виде ([4]):

$$\sigma_i = E \varepsilon_s [1 - \omega(\varepsilon_i)] \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} \right] \quad (3)$$

где $\omega(\varepsilon_i)$ – функция упрочнения, имеющая различные выражения в зависимости от вида нагружения. Для нагружения, близкого к простому, выбирается степенная зависимость

$$\omega(\varepsilon_i) = 1 - \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_T} \right)^{m-1} \quad (4)$$

где m – постоянная материала, $0 \leq m \leq 1$.

Для малых упругопластических деформаций применяют билинейную зависимость или более общую полилинейную

$$\omega(\varepsilon_i) = 1 - \sum_{k=1}^N \lambda_k \prod_{i=0}^{k-1} (1 - \lambda_i) \left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{ik}}{\varepsilon_T} \right) \quad (5)$$

Приведем результаты расчёта упругопластического деформирования круглой пластины, заземленной по контуру, под воздействием импульсной нагрузки $P(t) = P_m e^{-\alpha t}$

Зависимость $\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ примем в виде

$$\sigma_i = E \varepsilon_i^m \left\{ \varepsilon_s \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} \right] \right\}^{1-m} \quad (6)$$

В расчётах значения констант для стали X18P10T $m=0,124$, $D=396c^{-1}$, $n=7,14$.

На рис. 1. представлены характерные графики изменения во времени интенсивности деформации (крупный пунктир) и её скорости (сплошная линия). Мелким пунктиром показан график изменения интенсивности напряжений. Чётко виден прямой участок упругих деформаций, затем участок пластического деформирования, отличающийся существенным снижением уровня напряжений по сравнению с чисто упругой моделью процесса.

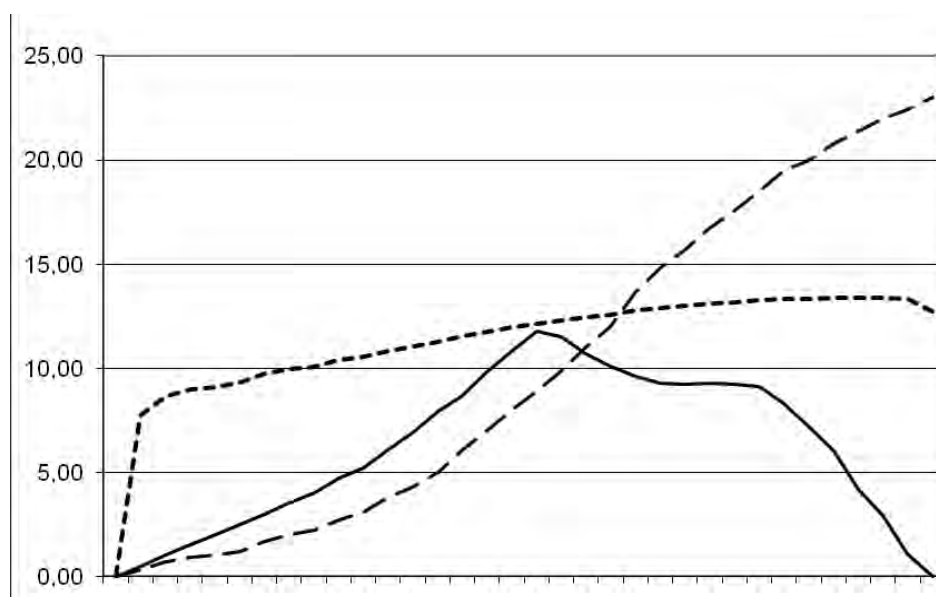


Рис. 1. Зависимость интенсивности деформации и её скорости от времени.

На рис. 2 представлена зависимость $\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ как пространственная линия, расположенная на цилиндрической поверхности, образуя от которой есть проекция этой линии на плоскость $(\sigma_i, \varepsilon_i)$. Эта линия соответствует зависимости (7) в привычном виде $\sigma_i - \varepsilon_i$.

Ось абсцисс соответствует интенсивности деформаций, ось ординат – скорости интенсивности деформаций в данный момент времени, ось аппликат – уровню интенсивности напряжений.

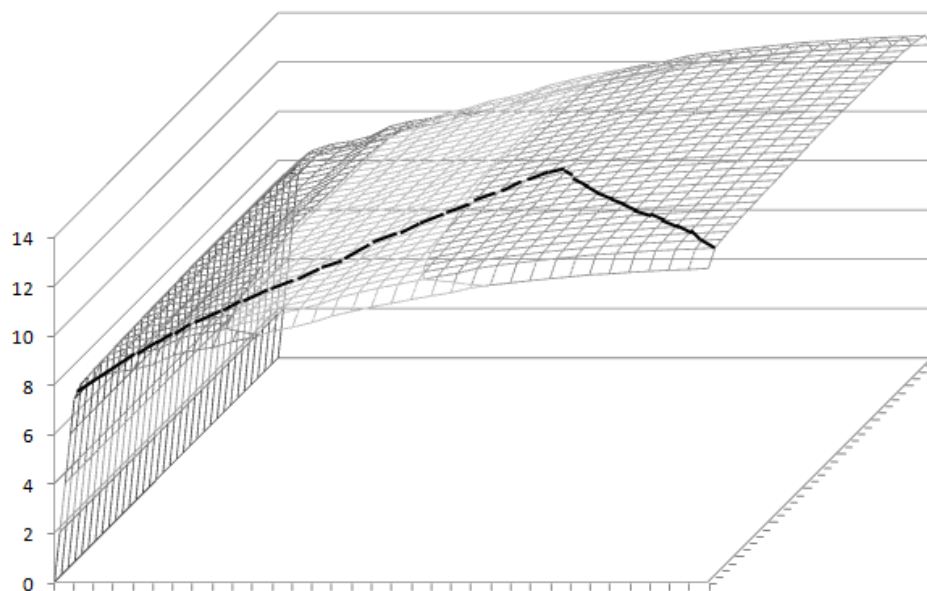


Рис. 2. График состояния $(\sigma_i, \varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$

Выводы. Пространственное изображение состояния $(\sigma_i, \varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ позволяет наблюдать развитие деформаций и их скоростей в процессе деформирования. Например, при малых деформациях могут развиваться большие скорости деформации или наоборот, что позволяет точнее определять параметры напряженно-деформированного состояния пластины для оптимизации нагружения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Степанов Г.В. Уругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок [текст] / Г.В. Степанов. – К.: Наук. Думка, 1979. – 268 с.
2. Воробьёв Ю.С. Скоростное деформирование элементов конструкций [текст] / Ю.С. Воробьёв, А.В. Колодяжный В.И.Севрюков, Е.Г.Янютин. – К.: Наук. Думка, 1989. – 192 с.
3. Чернобрычко М.В. Модель скоростного уругопластического деформирования элементов конструкций при импульсном нагружении [текст] // Вісник СевНТУ: зб. Наук. Пр., вип. 133 / 2012. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь, 2012. – С. 21-26.
4. Бизюк В.В. Локальное ударно-импульсное нагружение тонкостенных элементов конструкций [текст] / В.В. Бизюк, А.В. Колодяжный, В.Г.Ярещенко // Вестник Херсонского национального технического университета. Вып. 2(22). – Херсон: ХНТУ, 2005. – С.53-57.
5. Бизюк А.В. Скоростной удар по тонкостенным конструкциям [текст] / А.В. Бизюк, В.В. Бизюк, А.В. Колодяжный // Вісник Харківського національного університету №775. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – Харків: ХНУ, 2007. – С. 29-35.

БИЗЮК Андрей Валериевич – к.т.н., доцент кафедры медиасистем и технологий Харьковского национального университета радиозлектроники.

Научные интересы:

– математическое моделирование процессов скоростного уругопластического деформирования.

БИЗЮК Валерий Васильевич – к.т.н., доцент кафедры высшей математики Харьковской национальной академии городского хозяйства.

Научные интересы:

– математическое моделирование процессов скоростного уругопластического деформирования.