

К.В. ВАКУЛЕНКО; С.Ю. СОТРИХИН, канд. техн. наук.;
М.В. ЧЕРНОБРЫВКО, канд. техн. наук.; ИПМаш НАН Украины

К ВОПРОСУ ОБ УПРОЧНЕНИИ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ

Розглядається задача зміцнення елементів конструкцій, що підлягали впливу імпульсного навантаження. Будується математична модель процесу з варіацією навантаження. Розв'язано хвильове рівняння та проведено чисельний експеримент для виробів із рейкової сталі.

The problem of strengthening constructions elements, which were subject to influencing of the impulsive loading is examined. The mathematical model of process with variation of loading is built. Wave equalization is decided and the numeral experiment for rail steel is conducted.

1. Постановка проблемы. Эксплуатация металлических изделий в промышленности приводит к повреждениям контактирующих поверхностей. Это вызывает необходимость ремонта отдельных частей механизмов или даже их замены. Если же конструкционные элементы дорогостоящие или громоздкие, то появляется необходимость упрочнения их контактирующих поверхностей, так как это значительно экономичнее, чем производство всей детали из более прочного и дорогого металла.

В настоящее время существует много методов упрочнения металлических материалов: созданием пленки на поверхности детали, изменениями химического состава, структуры, энергетического запаса поверхностного слоя металла, шероховатости поверхности, структуры всего объема металла и др. [1-9]. Различное сочетание внешних условий составляет особенности технологических процессов. Одним из которых является процесс пластического деформирования, а его разновидностью – импульсное нагружение поверхности обрабатываемой детали [10]. Упрочнение поверхностным пластическим деформированием используется для повышения сопротивления усталости и твердости поверхностного слоя металла, а также для формирования в нем поверхностных внутренних напряжений (преимущественно сжатия) [1]. Для этого исследовались физико-механические свойства металла в момент действия нагрузки [11, 12], процесс распространения в них волн и распределения напряжений и деформаций [13, 14]. При этом, результат упрочнения в зависимости от вариации нагружения во внимание не принимался.

Исследование времени воздействия и максимальной величины импульса намного проще производить методами математического моделирования, а не путем реального и зачастую дорогостоящего эксперимента. Тем более, что математическое моделирование данного процесса не требует конкретизации вида взрывчатого вещества или электромагнитного воздействия.

В данной работе рассмотрено упрочнение металлических материалов

сильным воздействием импульсной нагрузки. В результате такого специально подобранного воздействия, металлическая поверхность деформируется сначала в упругой зоне, потом в пластической. А в результате снятия импульса нагрузки остаточные напряжения позволяют получить новые прочностные свойства для имеющегося изделия. Однако, чтобы данная схема привела к упрочнению, а не разрушению конструкции, необходим предварительный расчет максимальной величины прикладываемой нагрузки, времени и зоны ее воздействия.

2. Математическое исследование упрочнения конструкционных материалов под действием кратковременного импульсного нагружения. Итак, для решения поставленной задачи необходимо определить напряженно деформированное состояние (НДС) толстой пластины под действием импульсной нагрузки, сосредоточенной на некоторой прямоугольной области. Не умаляя общности задачи декартову систему координат выбираем так, что начало координат совпадает с зоной приложения активной нагрузки. В результате сильного кратковременного локального воздействия пластина деформируется. Как показали исследования Г.В. Степанова [12] в зоне нагружения возникают большие пластические деформации. Это обуславливает необходимость решения задачи в упругопластической постановке. Данное исследование учитывает также и влияние скорости деформации на прочностные свойства материала. Поэтому компоненты тензоров напряжений, деформаций и ее скоростей выражаем через величину внешней нагрузки. Дальнейший этап исследования предполагает путем математического моделирования выразить параметры НДС через величину импульсной нагрузки. Таким образом, проварьировав параметры нагружения, определяем их оптимальную величину, по сути дела решая обратную задачу.

Если считать среду однородной и изотропной, то перемещения находим из волнового уравнения [15]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \Delta u + P(x, y, z, t), \quad (1)$$

где u – вектор перемещения; $a = \sqrt{(1/\rho)(d\sigma_i/de_i)}$; P – импульсная нагрузка; с начальными:

$$u(x, y, z, t) = u(x, y, z, 0) = 0; \quad \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial u(x, y, z, 0)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

и граничными условиями:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t)|_{x=0} &= u(x, y, z, t)|_{x=a} = 0; \\ u(x, y, z, t)|_{y=0} &= u(x, y, z, t)|_{y=b} = 0; \\ u(x, y, z, t)|_{z=0} &= u(x, y, z, t)|_{z=h} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Математическое выражение для приложенной нагрузки записываем следующим образом:

$$P_z(l, t) = P_m \exp\left[-\frac{1}{Q}(t - l/D)\right] H(t - l/D), \quad (4)$$

где P_m – максимальное давление на фронте волны; Q – показатель убывания давления за фронтом; $l(x, y)$ – направление распространения нагрузки; D – скорость распространения фронта нагрузки; $H(\tau)$ – функция Хэвисайда.

Такой вид (4) позволяет учесть как кратковременность, так и интенсивность нагружения, а также предусмотреть распространение и быстрое затухание внешнего воздействия [16].

Смешанную задачу (1) – (3) решаем методом Фурье. Сходимость решения проверяется путем численного эксперимента. В результате исследования получаем следующую зависимость для вектора перемещений:

$$u(x, y, z, t) = \sum_{k,n,m=1}^{\infty} T_{knm}(t) X_k(x) Y_n(y) Z_m(z), \quad (5)$$

где

$$T_{knm}(t) = C_{knm}^1 \cos \omega_{knm} t + C_{knm}^2 \sin \omega_{knm} t + \int_0^t P_{knm}(\tau) \frac{\sin \omega_{knm}(t - \tau)}{\omega_{knm}} d\tau.$$

Процесс скоростного упрочнения рассматриваем с учетом больших пластических деформаций в течение очень короткого времени. В качестве основной физической закономерности принимаем условие совпадения направляющего тензора напряжений с направляющим тензором деформаций и с направляющим тензором скоростей деформаций. Такое положение справедливо в условиях простого нагружения и, как показали исследования В.Г. Кононенко [15] может быть применимо к исследованию изотропного деформирования металлов. Поэтому компоненты тензора деформаций находим согласно следующих известных зависимостей [16].

При дальнейших исследованиях переходим к интенсивностям деформаций, а интенсивности напряжений ищем исходя из следующих соображений.

Зависимость $\sigma_i - e_i$ для упругой области вычисляется по закону Гука, а для области разгрузки аппроксимируется линейным законом.

Зависимость $\sigma_i - e_i$ для пластической области строим на основе модели материала со степенным законом деформационного упрочнения [16]:

$$\sigma_i = 3Ge_i [1 - \omega(e_i)]$$

где $\omega(e_i) = 1 - \left(e_i/e_s^{\partial_{ин}}\right)^{m-1}$ - кинематическое упрочнение, выражающее

зависимость прочностных и деформационных характеристик материала от скорости деформации.

В результате анализа e_i для конкретной области выбираем свой закон вычисления σ_i :

$$\sigma_i = \begin{cases} E_{\text{упр}} e_i & \text{при } 0 \leq e_i \leq e_s \left[1 + \left(\frac{e_i}{D} \right)^{1/n} \right], \\ E_{\text{упр}} e_i^m \left\{ e_s \left[1 + \left(\frac{e_i}{D} \right)^{1/n} \right] \right\}^{1-m} & \text{при } e_i > e_s \left[1 + \left(\frac{e_i}{D} \right)^{1/n} \right], \\ E_{\text{упр}} e_i + E_{\text{упр}} e_i^{*m} \left(e_s^{1-m} - e_i^{*1-m} \right) & \text{при } \tilde{\epsilon} \leq 0, \end{cases}$$

где $\tilde{\epsilon}_i$ - скорость интенсивности деформации; e_i^* - значение интенсивности деформации в момент начала разгрузки.

Дальнейшее решение задачи проводится численными методами, в частности, методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы, что позволяет обеспечить сходимость решения и удовлетворению полному набору начальных и граничных условий, вплоть до вторых производных от заданных функций.

3. Примеры численных исследований. Рассмотрим упрочнение прямоугольной пластины длиной 30 мм, шириной 70 мм и толщиной 5 мм (рис. 1). Материал пластины – сталь со следующими характеристиками: модуль упругости – $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона – $\nu = 0,3$; плотность – $0,0078$ кг/см³; статический предел текучести – $\sigma_{\tau}^{\text{ст}} = 204$ МПа; модуль упрочнения – $E_{\tau} = 58 \cdot 10^2$ МПа; динамический предел текучести – $\sigma_{\tau}^{\text{д}} = 240$ МПа.

Нагрузка варьировалась при $1,0 \cdot 10^9 < P_0 < 3,0 \cdot 10^9$; $Q = 1 \cdot 10^{-6}$ с; $D = 3 \dots 9 \cdot 10^3$ м/с. Использовалась равномерная прямоугольная сетка. Размер ячейки выбирался из соображений устойчивости разностной схемы. Выбор шага по времени определялся условием Куранта-Фридрихса:

$$h_{\tau} \ll h_x h_y h_z / (h_x + h_y + h_z) c,$$

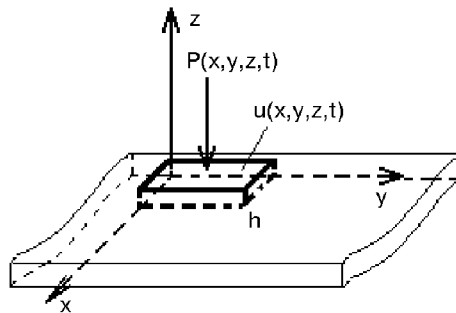


Рис.1. Схема расчета задачи

где c – скорость волны растяжения-сжатия или скорость распространения волны в материале.

В результате исследования получены зависимости деформаций на промежутке $0 - \bar{h}$ от времени для различных величин давления (рис. 2).

Кривая 1 соответствует давлению в $3 \cdot 10^9$ Па, кривая 2 — давлению в $2 \cdot 10^9$ Па, кривая 3 — давлению в $1.5 \cdot 10^9$ Па и кривая 4 — давлению в $1 \cdot 10^9$ Па. На графике хорошо просматривается, что повышение давления влечет за собой рост деформаций по толщине пластины, что в свою очередь влияет на упрочнение конструкции в процессе импульсного нагружения.

Также проведенные исследования показали, что повторное нагружение увеличивает зону упрочнения по толщине пластины.

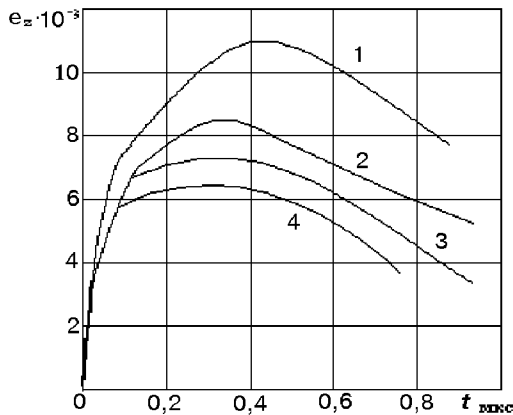


Рис. 2. Развитие во времени деформаций по толщине пластины.

4. Обсуждение полученных результатов. В настоящей работе изложен еще один подход к исследованию упрочнения материалов. Это математический подход, который позволяет заменить ряд трудоемких и дорогостоящих экспериментов численными исследованиями. Еще одно преимущество изложенного метода заключается в том, что проводя численный эксперимент мы не ориентируемся на конкретный вид нагружения, а используем в вычислениях только математическую интерпретацию вида импульсной нагрузки. Таким образом, всегда можно адаптировать уже проведенные исследования к новому типу взрывчатого вещества или электромагнитному импульсу. Однако, следует заметить, что для этого необходимо провести дополнительное экспериментальное исследование.

Список литературы: 1. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение машиностроительных материалов. – М.: Машиностроение, 1994. – 496 с. 2. Умански В.Б., Маняк Л.К. Новые способы упрочнения деталей машин. – Донецк: Донбас, 1990. – 114 с. 3. Шинко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. – Минск:

Наука и техника, 1995. – 280 с. **4.** *Холевин В.В.* Электрофизические методы упрочнения деталей и нанесения покрытий. – М.: Машиностроение, 1991. – 78 с. **5.** *Белый А.В.* Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии. – Минск: Наука и техника, 1990. – 78 с. **6.** *Белоцкий А.В., Винниченко В.Н., Муха И.М.,* Ультразвуковое упрочнение металлов. – Киев: Техніка, 1989. – 167 с. **7.** *Мальгин Б.В.* Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с. **8.** Работы в области восстановления и упрочнения деталей. Материалы семинара. – М.: ротاپринт МДНТП, 1991. – 114 с. **9.** Методы повышения конструктивной прочности металлических материалов. Материалы семинара. – М.: ротاپринт МДНТП, 1988. – 143 с. **10.** *Бабей Ю.И.* Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – Киев: Наук. думка, 1988. – 240 с. **11.** *Степанов Г.В.* Модель механического поведения металлических материалов при действии нагрузок импульсного характера. // Проблемы прочности, 1978. – № 5. – С. 99-104. **12.** *Степанов Г.В.* Уруго-пластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. – К.: Наук. думка, 1979. **13.** *Степанов Г.В.* Распространение плоских волн в вязкопластичном материале с линейным упрочнением // Проблемы прочности, 1975. – № 8. – С. 68 - 71. **14.** *Ольсон Г.Б., Мескал Дж. Ф., Азрин Л.* Локализация деформаций при ударном нагружении / Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. – М.: Металлургия, 1984. – С. 67-89. **15.** *Кононенко В.Г.* Высокоскоростное формоизменение и разрушение металлов. – Харьков: Вища школа, 1980. – 232 с. **16.** *Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В. и др.* Скоростное деформирование элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.

Поступила в редакцию 07.05.2003

УДК 62-135

В.И.ГНЕСИИ, докт. техн. наук; *Ю.А.БЫКОВ*, ИПМаш НАН Украины

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ РЕШЕТКУ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ ПРОФИЛЕЙ

Пропонується чисельна схема рішення рівнянь Нав'є-Стокса, осереднених по Рейнольдсу для моделювання самозбудних коливань лопаток турбомашини у транзвуковому потоці в'язкого газу. Метод базується на схемі Годунова другого порядку точності. Наведено порівняння чисельних результатів течії газу з експериментальними та теоретичними даними.

The numerical scheme of solving Reynolds-averaged Navier-Stokes equations for simulation of self-exciting oscillations of turbine blade row in transonic viscous gas flow is proposed. The method is based on second order Godunov's scheme. Comparison of numerical results with experimental and theoretical ones is given.

Введение

Предсказание аэроупругого поведения лопаток требует разработки вычислительных методов для расчета нестационарных потоков через колеблющиеся решетки турбомашин. Для приемлемого моделирования флаттера и решения задачи силового взаимодействия в данной конфигурации требуется точный и эффективный аэродинамический метод, правильно определяющий нестационарные нагрузки