

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКИ НА СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ СТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЕ

**Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-а, г. Николаев, 54018, Украина
**Николаевский политехнический институт,
ул. Никольская, 11-а, г. Николаев, 54030, Украина*

Многие технологические процессы сопровождаются появлением в отдельных деталях остаточных напряжений, приводящих чаще всего к уменьшению несущей способности и долговечности конструкций. Снижение уровня остаточных напряжений – важная практическая задача, решение которой осуществляется многими методами. Наиболее перспективны по затратам энергоресурсов методы, не использующие термических операций. К их числу относится импульсное нагружение элементов конструкций [1, 2].

В изучаемых процессах релаксация напряжений деформируемого твердого тела происходит в результате действия импульсной нагрузки на его поверхность, поэтому цель данной работы – исследование импульсного воздействия на напряженную деталь, в частности оценка влияния параметров нагрузки на изменение ее напряженно-деформированного состояния.

Постановка задачи и результаты численного эксперимента

Динамические процессы в объекте исследования моделировались на основе уравнений движения в напряжениях, отражающих связь между компонентами тензора напряжений и перемещениями [3]:

$$\rho_1 \dot{u}_1 = \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3}, \quad (1)$$

$$\rho_1 \dot{u}_2 = \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3}, \quad (2)$$

$$\rho_1 \dot{u}_3 = \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3}, \quad (3)$$

где u_1, u_2, u_3 – скорости перемещения; x_1, x_2, x_3 – координаты прямоугольной декартовой системы; ρ_M – плотность материала упругого тела; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений ($i, j = 1, 2, 3$), $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$.

Напряжения и деформации связаны между собой обобщенным законом Гука [3–5]. Его выражение в тензорном виде выглядит следующим образом:

$$\dot{S}_{ij} = 2G(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon} \frac{1}{3} \delta_{ij}), \sigma_{ij} = S_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij}. \quad (4)$$

Здесь S_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) – компоненты девиатора напряжений; ε_j ($i, j = 1, 2, 3$) – компоненты тензора деформаций; σ – гидростатическая составляющая напряжения, которая находится из дифференциального соотношения $\dot{\sigma} = -K \cdot \dot{\varepsilon}$; ε – объемная деформация; K – модуль объемного сжатия.

Точка над символами означает дифференцирование во времени.

Компоненты тензора деформаций определяются формулами Коши:

$$\dot{\epsilon}_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \quad \dot{\epsilon}_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \quad \dot{\epsilon}_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}, \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}_{13} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1}, \quad \dot{\epsilon}_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}, \quad \dot{\epsilon}_{23} = \frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3}.$$

Поверхность пластического течения задается условием текучести Губера-Мизеса [4–6]:

$$S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2 + 2(S_{12}^2 + S_{13}^2 + S_{23}^2) - \frac{2}{3}\sigma_T^2 \leq 0, \quad (6)$$

где σ_T – предел текучести материала.

Если условие (6) не выполняется, то все компоненты девиатора напряжений S_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) необходимо откорректировать – умножить на $\sqrt{2/3} \sigma_T / \sqrt{S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2 + 2(S_{12}^2 + S_{13}^2 + S_{23}^2)}$.

Система уравнений (1)–(6) дополнена соответствующими начальными и граничными условиями. Для процесса деформирования упругого тела удобно считать заданными напряжения на его поверхностях. На нагружаемых поверхностях напряжения полагаются равными давлению (с обратным знаком) нагрузки, а на свободных – приравняются нулю. На контурах закрепления расчет напряжений не проводится, так как здесь перемещения и скорости выражаются в явном виде из дополнительных кинематических граничных условий, соответствующих физике процессов.

Решение системы уравнений (1)–(6) выполнялось с применением численного метода, изложенного в работе [7]. Начальные упругие статические напряжения в материале, создаваемые одноосным растяжением, определяли тем же методом, выполняя расчет их значений во времени после изменения исходной контролируемой длины тела до величины, соответствующей пределу текучести.

Алгоритм отестирован на модельных задачах о распространении в твердом теле, имеющем форму параллелепипеда, волны давления с П-образным профилем и сдвиговой волны. Для комплексной проверки влияния нормальных и сдвиговых компонент тензора напряжений на динамическое деформирование твердого тела решалась задача о свободных поперечных колебаниях балки с прямоугольным поперечным сечением.

Характерные особенности изменения давления на поверхность исследуемого объекта во времени для рассматриваемого вида нагружения (волна давления от электрического разряда в воде на поверхность тела) можно отобразить с помощью экспоненциальной зависимости:

$$p = p_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot f(x_1, x_2, t_0), \quad (7)$$

где p_m – амплитуда давления; τ – время релаксации давления (характерная длительность разряда); $f(x_1, x_2, t_0)$ – функция распределения давления по поверхности тела; t_0 – время, за которое волна давления проходит расстояние от источника до заданной точки с координатами x_1, x_2 .

Действие нагрузки на тело можно охарактеризовать величиной импульса давления на его поверхность:

$$I = \int_0^{\infty} f(x_1, x_2, t_0) \cdot p(t) \cdot dt = f(x_1, x_2, t_0) \cdot p_m \cdot \tau, \quad (8)$$

и в качестве параметров нагрузки использовать I, p_m и τ .

Объектом исследования выбрана узкая металлическая полоса из стали Ст 3 (предел текучести 250 МПа) длиной 360, шириной 40, толщиной 4 мм. Длина контрольного участка, на котором выполнялась проверка изменения деформаций, составляла 180 мм. Давление на поверхность полосы задавалось зависимостью (7). В ней в качестве $f(x_1, x_2, t)$ использовали функцию

$$f(x_1, x_2, t) = \chi \left(\tilde{n} \cdot t - \sqrt{(x_1 - x_{10})^2 + (x_2 - x_{20})^2} \right) \cdot \frac{2 \cdot \Delta r_0}{\Delta r_0 + \sqrt{(x_1 - x_{10})^2 + (x_2 - x_{20})^2}}, \quad (9)$$

где x_{10}, x_{20} – координаты центра поверхности полосы; Δr_0 – коэффициент пространственной

релаксации волны давления; χ – функция Хевисайда; c – скорость фронта волны давления.

Полоса подвергалась одноосному растяжению до предела текучести (после чего ее соответствующие торцы жестко закреплялись), а затем действию давления, задаваемого функциями (7) и (9). После этого на контрольном участке полосы определяли величину изменения (по сравнению с пределом текучести) среднего продольного напряжения $\Delta\sigma_{11}$ и средних остаточных деформаций ϵ_{11} . Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2 в виде зависимостей указанных величин от удельного импульса I при варьировании времени релаксации давления τ в интервале 10–40 мкс, характерном для электрического разряда в воде. Величина удельного импульса I , приведенного на рисунках, определена в центральной точке контрольного участка полосы ($x_1 = x_{10}$, $x_2 = x_{20}$). В этой точке $f(x_1, x_2, t) = 1$, поэтому удельный импульс достигает максимального значения.

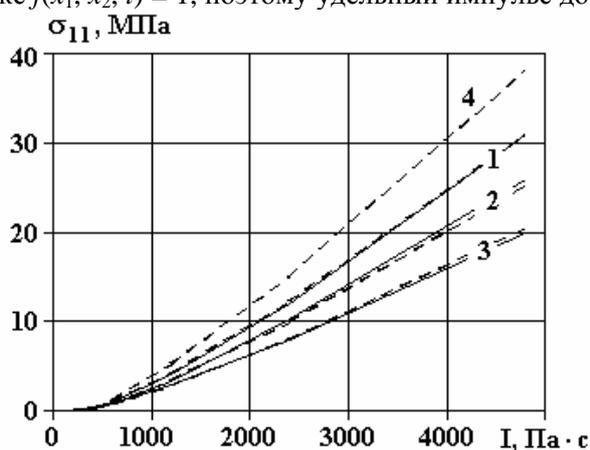


Рис. 1. Изменение средних остаточных напряжений.
 τ , мкс: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 5

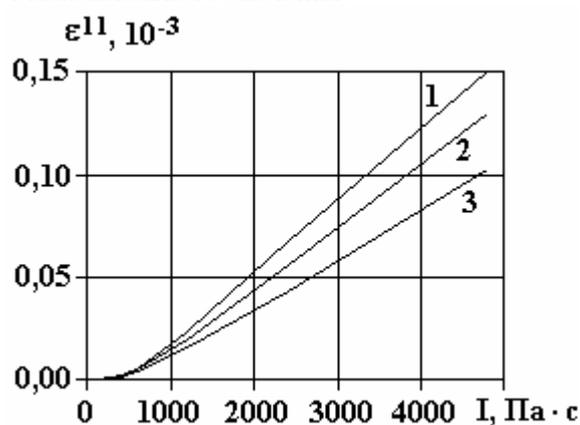


Рис. 2. Зависимость средних остаточных деформаций от удельного импульса.
 τ , мкс: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 40

Анализ результатов позволил выявить характерные особенности влияния параметров нагрузки на снижение продольного напряжения и величину остаточных деформаций.

Величина изменения напряжения и остаточные деформации равны нулю при любых значениях τ , если удельный импульс меньше 300 Па·с. При его возрастании их значения увеличиваются, а с ростом времени τ – уменьшаются по степенным зависимостям. При уменьшении τ от 40 до 10 мкс величина $\Delta\sigma_{11}$ возрастает на 30%, например для удельного импульса 2400 Па·с она изменяется от 8 до 12 МПа (от 3 до 4,5% по сравнению с пределом текучести) в заданном интервале изменения.

Зависимость величины изменения среднего напряжения (в МПа) от удельного импульса и времени релаксации давления аппроксимировали с погрешностью (не превышающей 2,5%) в интервале изменения I от 500 до 5000 Па·с и τ от 10 до 40 мкс следующей степенной зависимостью:

$$\Delta\sigma_{11} = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot (I - 350)^{1,2} \cdot \left(\frac{10^{-5}}{\tau} \right)^{0,3}, \quad (10)$$

из анализа которой видно, что снижение остаточных напряжений пропорционально величине удельного импульса в степени 1,2 ($\Delta\sigma_{11} \sim I^{1,2}$). Существенное значение имеет длительность разряда. Остаточные напряжения релаксируют быстрее при уменьшении времени τ ($\Delta\sigma_{11} \sim \tau^{-0,3}$). На рис. 1 штриховыми линиями показаны аппроксимирующие кривые. Экстраполяция по формуле (10) на более короткое время показывает, что при постоянном значении импульса I и уменьшении τ от 40 до 5 мкс величина изменения средних напряжений вырастает приблизительно в два раза.

Заключение

На основе численного решения системы уравнений теории упругости с учетом пластического деформирования материала выявлены характерные особенности влияния параметров нагрузки на процесс снижения уровня статических напряжений. Установлено, что

для реализации процесса перераспределения напряжений в напряженно-деформированном теле необходимо воздействовать на него импульсом давления, превышающим 300 Па·с. При нагружении давлением, импульс которого ниже указанного уровня, процессы релаксации напряжений в материале не происходят.

Получены зависимости величин изменения средних остаточных напряжений и деформаций от импульса и времени релаксации давления.

Таким образом, можно сделать вывод, что для ускорения процесса релаксации остаточных напряжений в элементах стальных конструкций необходимо уменьшать продолжительность действия нагрузки при сохранении величины импульса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чачин В.Н., Богоявленский К.Н., Вагин В.А. Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении. Минск: Наука и техника, 1987.
2. Петушков В.Г. Применение взрыва в сварочной технике. Киев: Наукова думка, 2005.
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.2. М.: Наука, 1976.
4. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений// Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
5. Косенков В.М., Каменская Л.А. Математическое моделирование релаксации напряжений в металлической полосе под действием волн давления// Труды международной конференции. VII Харитоновские тематические научные чтения "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2005. С. 457–462.
6. Мажаровский Н.С. Теория пластичности и ползучести в инженерном деле. Ч. 1. Киев: Вища школа, 1991.
7. Косенков В.М., Каменская Л.А. Расчет расширения канала электрического разряда в жидкости, описываемой в потенциальном приближении // Акустичний вісник. 2001. Т. 4. № 2. С. 47–53.

Поступила 04.12.06

Summary

The theoretical study of the impact of the characteristics of the impulse load on the relaxation of residual stress in materials with the help of the mathematical modelling is executed.
