

УДК 539.3

М.В. ЧЕРНОБРЫВКО

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

*Рассматривается задача упругопластического деформирования и соединения конструкционных элементов под действием импульсного нагружения с учетом влияния температурных параметров. Проводится анализ влияния локального повышения температуры в зоне пластического течения на прочностные параметры материала. Математическая модель задачи строится с учетом особенностей, вызванных высокой скоростью деформаций и адиабатического повышения температуры. Приводятся примеры численных исследований. В результате работы построены математические модели и разработаны методы расчетов для анализа динамической прочности конструкций и выбора рациональных параметров эффективных технологических процессов соединения элементов конструкций, которые используют импульсные источники энергии.*

**Ключевые слова:** импульсные источники энергии, скоростное деформирование, динамическое упрочнение металла, метод конечных разностей, сварка взрывом.

### Введение

В аэрокосмической отрасли в настоящее время все более широкое применение получили технологические процессы, базирующиеся на использовании импульсных источников энергии: сварка взрывом, высокотемпературная пайка, штамповка, обработка металлов давлением, формообразование и другие. Технологические основы этих процессов отражены в целом ряде работ отечественных и зарубежных авторов [1 – 5].

Эффекты, связанные с упрочнением металлов при высокоскоростных деформационных процессах, хорошо известны и широко применяются в технологиях импульсного соединения конструкционных элементов [6]. Нужно отметить, что для такого класса процессов также характерно влияние температуры на изменение механических свойств металла. Причем, воздействие температуры отслеживается дважды. Во-первых, физические постоянные металла зависят от общей температуры протекания технологического процесса, вызывая общее разупрочнение металла в случае, если температура превышает 2000С; а во-вторых, на процессы в локальной области больших пластических деформаций влияет локальный разогрев, связанный со скоростным деформированием материала, который вызывает образование адиабатических полос сдвига [7, 8].

Таким образом, при математическом моделировании процессов соединения элементов конструкций с помощью импульсных источников энергии

необходимо учитывать все особенности физического процесса: нелинейность характера изменения напряженно-деформированного состояния по пространству и во времени; динамических свойств материала и влияния температурных параметров.

Неразъемные конструкционные элементы, полученные путем взрывной сварки, а также в результате объединенного процесса сварки и высокотемпературной пайки аморфными припоями никелевой группы, характеризуются целым рядом преимуществ, однако, необходимо строгое соблюдение всех технологических параметров и температурного режима. Это вызвано тем, что деформирование элементов конструкций при импульсном нагружении сопровождается физическими эффектами, вызванными высокой скоростью деформации от  $10^3 \text{ с}^{-1}$  до  $10^6 \text{ с}^{-1}$ .

Естественно, что теоретические исследования физики процесса на макро уровне базируется на использовании и обработке большого количества экспериментальных данных.

### 1. Анализ и обработка данных экспериментальных исследований

В данной работе использовались результаты экспериментальных исследований на сжатие образцов из мягкой стали 34GS [9]. Испытания на сжатие были проведены на установке с разрезным стержнем Гопкинсона диаметром 10 мм и 20 мм. Эксперименты проводились при скоростях деформации от  $2 \cdot 10^3$

до  $7 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Характерной особенностью экспериментальных динамических диаграмм деформирования является наличие на них "Зуба текучести". Экспериментальные исследования проводились для образцов при температурах  $27^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$  и  $200^\circ\text{C}$ . Исследовалось влияние повышения температуры на динамические характеристики стали.

Моделирование импульсного деформирования элементов конструкций затруднено следующими факторами: кратковременностью всего процесса в целом и действия нагрузки в частности, послойным изменением физических свойств материала при переходе из упругой стадии деформирования в пластическую и появлении адиабатических полос сдвига, сложности физических процессов в зоне соединения.

В зависимости от специфики технологического процесса, существует целый ряд моделей, описывающих соединения элементов при сварке взрывом. Большинство моделей построено на основе феноменологических законов. Естественно, что адекватность математической модели реальному процессу зависит в большой степени от выбранной феноменологической зависимости. Поэтому основным этапом моделирования является этап оценки влияния физических факторов при построении феноменологического закона деформирования.

Для описания механических свойств металлов и сплавов при пластическом деформировании связь между напряжениями и деформациями рассматриваем в виде нелинейной функции  $\sigma = f(\epsilon, \partial\epsilon/\partial t, T)$ , где  $t$  – время, а  $T$  – температура металла или сплава. Таким образом, выбранная зависимость позволяет учитывать влияние температурного режима системы «образец – окружающая среда», а также изменение скорости деформаций, значения которой можно определять экспериментально или оценить в результате последующей численной обработки результатов эксперимента.

Таким образом, возникает вопрос оценки степени влияния скорости деформации и температуры на свойства исследуемого металлического сплава.

На рис. 1 представлена суммарная экспериментальная диаграмма зависимости  $\sigma = f(\epsilon, T)$ , полученная в результате обработки данных выше описанного эксперимента.

Температурная зависимость модуля Юнга очень слаба в упругой области и повышается с ростом пластических деформаций. Характерно, что  $E(\epsilon, T) \approx E = \text{const}$  при  $-100^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$ . Значение модуля уменьшается с увеличением температуры, причем зависимость  $E(T)$  близка к линейной. В среднем уменьшение модуля при повышении температуры на  $1000 \text{ C}$  составляет  $2 - 4 \%$ .

В общем случае, структура пластического материала неоднородна, а способность к пластическому деформированию кристаллов является резко анизотропной. Эта неоднородность определяет тот факт, что пластическое течение в твердых телах описывается с позиций общих закономерностей, так как в деталях оно весьма сложно. Взаимодействие между отдельными объемами в процессе пластического течения приводит к получению нового структурного состояния после деформации. На рис. 2 представлена обобщенная для  $\sigma = f(\epsilon, \partial\epsilon/\partial t, T)$  диаграмма зависимости напряжения для различных скоростей деформирования.

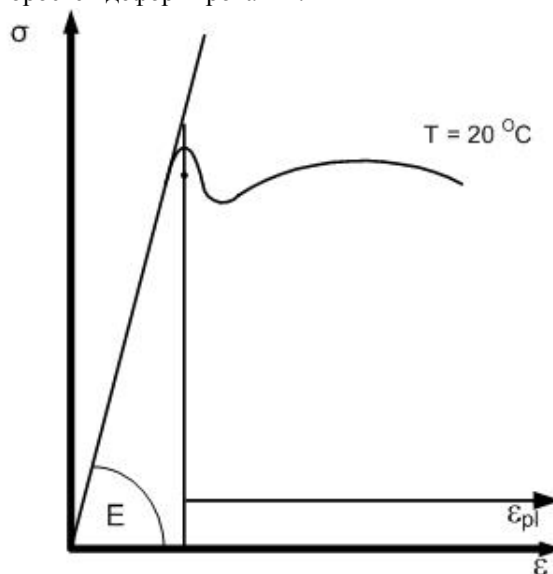


Рис. 1. Зависимость интенсивности напряжений от интенсивностей деформаций

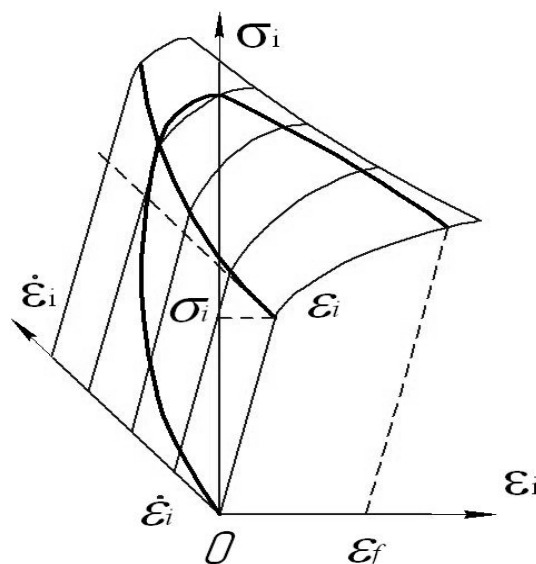


Рис. 2. Объемная зависимость интенсивности напряжений от интенсивностей деформаций и их скоростей

Анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод, что повышение температуры образца

до 200°C благоприятствует появлению «зуба» или просто отчетливой точки текучести.

Таким образом, наличие резкого предела текучести, проявляющегося в образовании зуба (площадки) текучести, также необходимо учитывать при моделировании высокоскоростных процессов соединения конструктивных элементов из мягких сталей, алюминия и других.

## 2. Математическое моделирование и численные исследования

Задача соединения трубчатых элементов моделируется как скоростное деформирование системы двух полых коаксиальных цилиндров конечной длины (рис. 3). На нее воздействует кратковременная внутренняя осесимметричная ударно-импульсная нагрузка, расположенная в торцевой части конструктивной системы. Зона воздействия нагрузки мала по сравнению с общей длиной, поэтому необходим учет воздействия движущейся ударной волны.

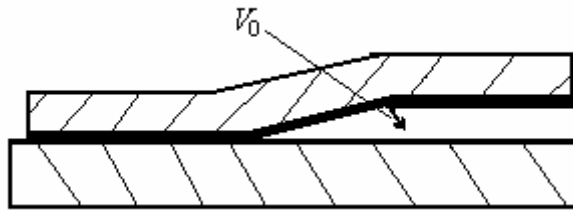


Рис. 3. Схема параллельной сварки взрывом

Задача моделируется с учетом региональности процесса деформирования. Рассматривается возможность образования зон пластического деформирования в области нагружения. Поэтому, в зоне локализации нагрузки используется трехмерная модель. Используются динамические свойства материала и термомеханические параметры. Применяется деформационная теория пластичности. Это позволяет достаточно адекватно моделировать физику процесса в зоне больших пластических деформаций. Региональная структура решения позволяет учитывать особенности скоростных деформационных процессов, избежав при этом излишней громоздкости задачи.

Математическая постановка задачи следующая:

$$T(r, \varphi, z, t) = \frac{f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})}{c_p} \int_0^{\varepsilon_f} \sigma(r, \varphi, z, t) d\varepsilon(r, \varphi, z, t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} - \\ & -(3\lambda + 2\mu)\alpha_T \frac{\partial T}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}, \\ & \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{z\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} - \\ & -(3\lambda + 2\mu)\alpha_T \frac{\partial T}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \\ & \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{z\varphi}}{\partial z} + \frac{2\sigma_{r\varphi}}{r} - \\ & -(3\lambda + 2\mu)\alpha_T \frac{\partial T}{\partial \varphi} = \rho \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  – функция влияния скорости деформации на адиабатическое повышение температуры в локальной области  $\delta$ -окрестности исследуемой точки. Как правило, задается эмпирически по результатам обработки экспериментальных данных. Иногда, для упрощения расчетов принимается константой.

Задача решается методами адаптированных конечных разностей [10]. Начальные и граничные условия дополняются исходя из конкретизации задачи. При исследовании напряженно-деформированного состояния при термоупругопластических деформациях используются динамические свойства материала, полученные экспериментально.

Для контроля температурного режима в области соединения решается задача нестационарной теплопроводности для толстых стержней в цилиндрической системе координат. В силу осевой симметрии конструкции выбираем систему уравнений в двумерной постановке. Математическая формулировка задачи имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \\ & + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{a_T} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $T=T(r, z, t)$  – температура системы;  $t$  – время;  $r, z$  – цилиндрические координаты;  $a_T$  – коэффициент температуропроводности.

Начальное условие:

$$T(r, z, 0) = T_0 = \text{const} \quad , \quad (4)$$

где  $T_0$  – начальная температура конструкции.

Граничное условие по радиусу в предположении идеального теплового контакта между элементами конструкции запишутся в следующем виде:

$$T_1 = T_2, \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \quad (6)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности;  $T_1, T_2$  – температура составляющих конструкции.

Дальнейшее решение задачи проводится численно-аналитическими методами согласно известных методик решения задач нестационарной теплопроводности [11].

Рассмотрим процесс сварки двух коаксиальных патрубков теплообменного аппарата конечной длины  $L$  с толщиной стенки равной  $R=10$  мм, наружным радиусом  $R_n=5$  см и внутренним  $R_v=5$  см. В начальный момент времени цилиндр подвергается воздействию детонационного нагружения. Численная обработка функции нагружения  $P(r, \varphi, t)$  позволяет получить поверхность максимальных значений избыточного давления  $P(y, x)$  для всей зоны нагружения (рис. 4).

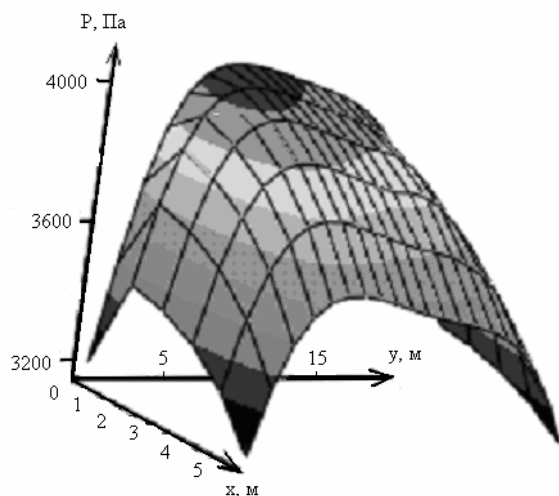


Рис. 4. Поверхность избыточного давления

Анализ поверхности, построенной по максимальным значениям избыточного давления на каждую исходную ячейку исследуемой конструкции, позволяет сделать вывод о достаточной гладкости функции  $P(y, x)$ . В силу этого, для дальнейшего исследования в поставленной задаче достаточно определить максимальный элемент поверхности, что будет соответствовать максимальной импульсной нагрузке.

Рассматривался случай, когда численное значение максимальной нагрузки соответствовало величине 0,4 атмосфер или  $0,4 \cdot 101325 = 40530$  Па.

На рис. 5 представлена поверхность напряжений в зоне соединения. Хорошо виден сложный физический процесс, соответствующий термоупругому и термопластическому деформированию.

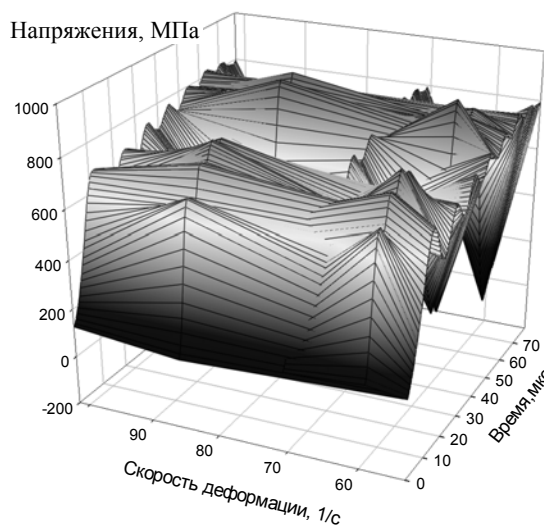


Рис. 5. Напряжения в зоне соединения

## Заключение

Анализ полученных результатов позволяет определять рациональные параметры исследуемого технологического процесса, делать выводы об уровне динамической напряженности конструкции и разрабатывать практические рекомендации.

## Литература

1. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А.А. Дерибас. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
2. Борисевич В.К. Многофакторность физических явлений при взрывной металлообработке / В.К. Борисевич, В.В. Драгобецкий, О.В. Троцко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 11(47). – С. 62-72.
3. Степанов Г.В. Упруго-пластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок / Г.В. Степанов. – К.: Наук. думка, 1979. – 189 с.
4. Харченко В.В. Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учетом вязкопластических эффектов / В.В. Харченко. – К.: ИПП НАН Украины, 1999. – 280 с.
5. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
6. Бизюк А.В. Анализ высокоскоростного термокинетического деформирования цилиндриче-

ских конструкционных элементов при соударении. / А.В. Бизюк, М.В. Чернобрышко // Вестн. ХГПУ. Сер. Динамика и прочность машин. – Вып.59. –Х., 2000. – С.18- 22.

7. Чернобрышко М.В. Термопружньо-пластичне швидкісне деформування циліндричних тіл при їх формоутворенні і з'єднанні: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Чернобрышко Марина Вікторівна; ІПМаш НАН України. – Х., 2001. – 16 с.

8. Анализ процесса пайки-сварки методом взрыва трубных досок теплообменных аппаратов / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, А.В. Колодяжний, Л. Крушка // Проблемы прочности. – 2002. – № 4. – С. 126-131.

9. Kruszka L. Thermoplastic analysis of normal

impact of long cylindrical specimen: experiment and comparison with the numerical calculation / L. Kruszka, W.K. Nowacki // J. of Thermal stresses. – 1995. – P. 313-334.

10. Чернобрышко М.В. Нестационарное термоупругопластическое деформирование многослойной составной оболочки / М.В. Чернобрышко // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2006. – Вип. 27. – С. 145-152.

11. Чернобрышко М.В. До питання про створення високоміцних конструкцій шляхом застосування високотемпературного паяння / М.В. Чернобрышко, Н.А. Шесточенко // Вісник УДАЗТ: збірник наукових праць. – Х., 2003. – Вип. 56. – С. 83-87.

Поступила в редакцию 30.09.2008

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

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

*М.В. Чернобрышко*

Розглядається задача пружно-пластичного деформування й з'єднання конструкційних елементів під дією імпульсного навантаження з урахуванням впливу температурних параметрів. Проводиться аналіз впливу локального підвищення температури в зоні пластичного плину на міцнісні параметри матеріалу. Математична модель задачі будується з урахуванням особливостей, викликаних високою швидкістю деформацій й адіабатичного підвищення температури. Приводяться приклади чисельних досліджень. В результаті роботи побудовані математичні моделі та розроблені методи розрахунків щодо аналізу динамічної міцності конструкцій й вибору раціональних параметрів ефективних технологічних процесів по з'єднанню елементів конструкцій, які використовують імпульсні джерела енергії.

**Ключові слова:** імпульсні джерела енергії, швидкісне деформування, динамічне зміцнення металу, метод скінчених різниць, сварка вибухом.

### MATHEMATICAL MODELING OF CONNECTION OF DESIGNS ELEMENTS WITH USE OF PULSE ENERGY SOURCES

*M.V. Chernobryvko*

The method of definition stress - strain conditions of a local zone of constructional elements under the impact of a local shock load is researched. The research is conducted theoretically and used experimentally results. The area of load application is modeled as a 3-D body. The theoretical research is made using a finite-difference method with the implicit difference scheme. The area of load application is modeled as a 3-D body. As a result of work is mathematical models and methods of calculation for the analysis of researches of construction dynamical strength and a choice of rational parameters of effective technological processes on form building, to division and connection of elements of the designs using pulse energy sources are developed.

**Key words:** pulse energy sources, high-speed deformation, dynamic hardening of metal, a method of final differences, welding by explosion.

**Чернобрышко Марина Викторовна** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: chernobryvko@ipmach.kharkov.ua.