

---

УДК 620. 1787

Л.Д. Добрушин<sup>1</sup>, А.В. Колодяжный<sup>2</sup>, С.Н. Солодянкин<sup>3</sup>, В.Г. Ярещенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Украина*

<sup>2</sup>*Институт проблем машиностроения  
им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина*

<sup>3</sup>*ЧПФ «ФЕЛИС», Украина*

## **СКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ЗАГОТОВОК И МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Представлены математические модели процессов скоростного деформирования, которые характеризуют различные технологии взрывной обработки материалов давлением. Показано, что каждая технология характеризуется своим диапазоном скорости деформации. Приведены результаты расчета и эксперимента процессов взрывного формообразования, сварки, разделения взрывом.

**скоростное деформирование, гидровзрывная штамповка, сварка взрывом, плакирование, управляемое разделение, совмещенные технологии**

В технологиях взрывной обработки материалов давлением (ВОМД) – формообразование, сварка взрывом, динамическое деформационное упрочнение, управляемое разьединение – реализация техпроцессов происходит за счет скоростного деформирования конструкционного материала. Однако для каждого из перечисленных техпроцессов характерен свой диапазон интенсивности и локализации деформации и свои критерии реализации технологии.

Математическими моделями техпроцессов ВОМД являются краевые задачи для конструкционных элементов (балки, пластины, оболочки), поведение материала которых описывается фундаментальными зависимостями теории течения [1] и динамической деформационной теории пластичности [2]. В этой теории используется полилинейная функция для учета деформационного упрочнения при произвольных деформациях и кинематического упрочнения при скоростном деформировании материала элементов системы [3 – 6].

При осесимметричном приложении к оболочкам взрывных веществ (ВВ) физические уравнения можно представить в гуковской форме

$$\sigma_s = \frac{E^*}{1-\nu_*^2} (\varepsilon_s + \nu_* \varepsilon_\varphi); \quad \sigma_\varphi = \frac{E^*}{1-\nu_*^2} (\varepsilon_\varphi + \nu_* \varepsilon_s); \quad \tau_{s\zeta} = G^* \gamma_{s\zeta}, \quad (1)$$

$$\text{Здесь } E^* = \frac{\sigma_i / \varepsilon_i}{1 + m \sigma_i / \varepsilon_i}; \quad \nu_* = \frac{0,5 - m \sigma_i / \varepsilon_i}{1 + m \sigma_i / \varepsilon_i}; \quad G^* = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}; \quad m = \frac{1-2\nu}{3E},$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \left[ \sigma_3^2 + \sigma_4^2 - \sigma_3 \sigma_4 + 3\tau_{s\zeta} \right]^{1/2}; \\ \varepsilon_i &= \left[ (\varepsilon_s - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_s)^2 + (\varepsilon_\zeta - \varepsilon_s)^2 - \frac{3}{2} \gamma_{s\zeta}^2 \right]^{1/2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{3}; \\ \sigma_0 &= \frac{\sigma_\varphi + \sigma_s}{3}; \quad \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_\zeta}{3}. \end{aligned}$$

При  $\sigma_\zeta = 0$  поверхность свободна от нагружения получаем

$$\varepsilon_\zeta = -\frac{\nu_*}{1-\nu_*} (\varepsilon_s + \varepsilon_\varphi).$$

Пластические деформации в материале наступают при выполнении динамического деформационного критерия Мизеса

$$\sigma_{i \geq} \sigma_T^{cm} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} \right], \quad (2)$$

где  $D, n$  – параметры сопротивления конструктивных материалов скоростному деформированию, константы.

Упрочнение в динамической деформационной теории пластичности будет

$$\sigma_i = 3G\varepsilon_i \{1 - \omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)\}, \quad (3)$$

где  $\omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$  – функция упрочнения.

Для линейного упрочнения

$$\omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i) = \lambda \left\{ 1 - \varepsilon_T^{cm} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} \right] \frac{1}{\varepsilon_i} \right\}. \quad (4)$$

В этом случае можно построить безитерационный вариант расчета параметров скоростного деформирования системы, который существенно сокращает машинное время. Но билинейный закон физической нелинейности справедлив лишь для малых деформаций.

Для анализа больших пластических деформаций применяется полилинейная функция упрочнения

$$\sigma_i = 3G \left( \varepsilon_i - \lambda_k \prod_{j=0}^{k-1} (1 - \lambda_j) \cdot (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ik}) \left( 1 + \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1/n} \right) \right), \quad (5)$$

где  $\lambda_k = E_k/E_{k-1}$ ,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_T$ ,  $E_0 = E$ ,  $k$  – точки излома.

На рис. 1 приведены результаты расчета напряжений при скоростном деформировании взрывной нагрузкой балки-полосы по динамической деформированной теории пластичности с трехзвенным упрочнением. Кривые 1, 2 – без учета скорости с билинейным и трехзвенным деформационным упрочнением, 3, 4 – то же упрочнение с учетом скорости деформации.

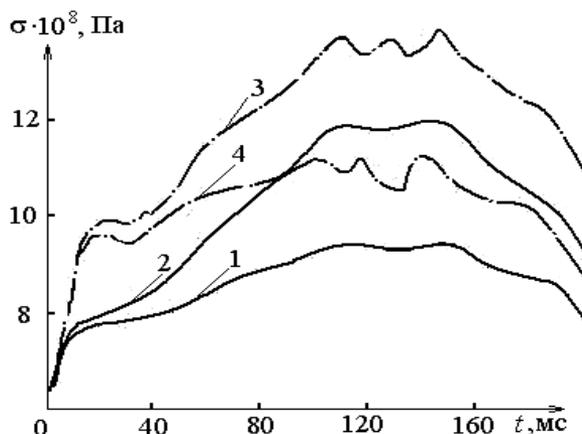


Рис. 1. Напряжения в балке-полосе при импульсном нагружении

Численные результаты скоростного деформирования объектов неоднократно проверялись экспериментом с применением метода широкополосного тензометрирования. Для этого имеется компьютеризированный многоканальный измерительно-вычислительный комплекс «Тензодин-12/1 (2)», малобазные тензорезисторы. Тензоусилитель на несущей частоте 1 МГц (2 МГц) имеет рабочую частоту в полосе от 60 Гц до 180 кГц (250 кГц) и приборную погрешность 3 % [4].

На рис. 2 приведены результаты расчета и эксперимента по удару в центре стальной балки длиной 80 см, сечением  $4 \times 4$  см сферическим ударником  $Q = 1,75$  кг с высоты  $h_{\text{сб.}} = 10$  см (расхождение  $\Delta_{\sigma} = 17\%$ ) и на расстоянии  $l = 23$  см от центра (расхождение  $\Delta_{\sigma} = 7\%$ ).

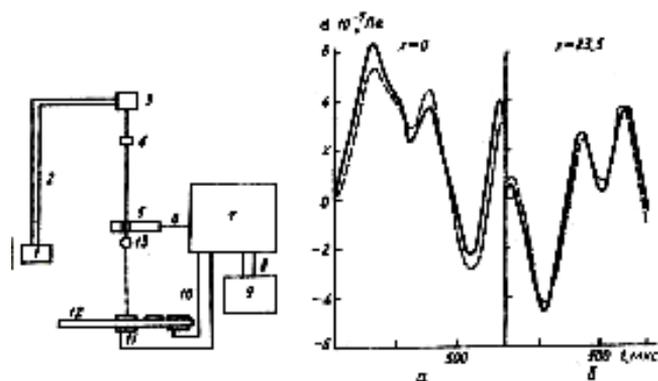


Рис. 2. Напряжения в шарнирно-опертой балке при ударе

Результаты применения метода широкополосного тензометрирования приводятся далее при рассмотрении соответствующих технологий ВОМД.

Технология гидровзрывной штамповки (ГВШ) разработана и развита, в основном, в трудах Р.В. Пихтовникова и его школы [7 – 9].

ГВШ состоит в приложении (через передающую среду) к заготовке такой нагрузки, которая придает ей форму матрицы при сохранении целостности и работоспособности будущей детали, т. е. нужно определить, какой брать заряд ВВ и сколько, как его разместить и оценить количество переходов. Матрица при этом должна оставаться упругой или получать допустимые остаточные деформации.

Расчет формообразования изделия производится в два этапа: для малых и умеренных деформаций на основе нелинейной волновой теории движения оболочки, для более развитых деформаций – переход к безмоментной теории оболочек [5].

На рис. 3 приведены результаты процесса поэтапного формообразования заполненной водой конической заготовки из стали ЭП 416 в соответствующую деталь под действием сферической волны давления. Сплошные линии соответствуют результатам расчета, штриховые – данным эксперимента.

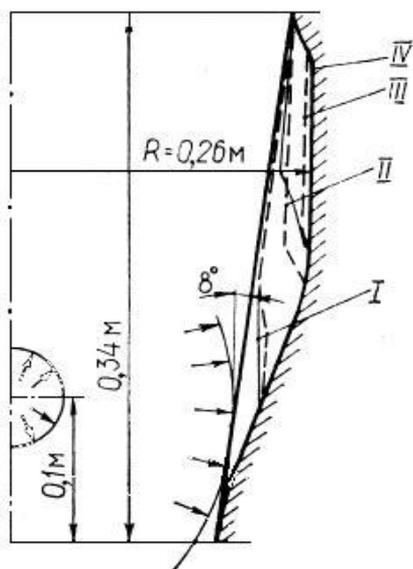


Рис. 3. Формообразование конической заготовки

Для экспоненциальной формы нагрузки

$$P(s, t) = P_m \exp[-t - t_0(s) / Q(s)] F(s, t),$$

( $P_m, Q$  – постоянные интенсивности и скорости спада давления,  $t_0(s)$  – время задержки действия давления,  $F(s, t)$  – функция распределения давления вдоль меридиана оболочки) получаем профили I – IV – заготовки для каждого из четырех этапов формообразования:

$$P_m^{(1)} = 65 \text{ МПа}, \quad Q^{(1)} = 12,5 \text{ мкс}; \quad P_m^{(2)} = P_m^{(3)} = 70 \text{ МПа}, \\ Q_m^{(2)} = Q_m^{(3)} = 13 \text{ мкс}; \quad P_m^{(4)} = 75 \text{ МПа}, \quad Q^{(4)} = 13,5 \text{ мкс};$$

коэффициент трения  $\mu = 0,04$ .

Параметры взрывной нагрузки в ГВШ играют определяющую роль. В работе [10] изложена методика оптимизации взрывной нагрузки при реализации технологий ГВШ, упрощающая режим отработки процесса.

Техпроцесс сварки взрывом разработан в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого века почти одновременно в США и СССР.

Сварку взрывом по областям применения можно сгруппировать: в соединительные операции, прецизионную (с ограниченной зоной воздействия на изделия) и плакирование взрывом протяженных объектов (би- и триметалл – листы, трубы и т.п.).

В последующие десятилетия процесс сварки взрывом совершенствовался как в направлении математического моделирования [11 – 13], развитии и совершенствовании методов экспериментального исследования и реализации техпроцесса.

Можно считать, что в области сварки взрывом хорошо разработаны критерии реализации техпроцесса, установлены границы его осуществления. Так, установлен факт равномерного относительного проскальзывания материала в зоне контактной поверхности [11, 14], обусловленный наличием в нагрузке нормальной и тангенциальной составляющих, а также взаимодействия локальных элементов контактирующих поверхностей (шероховатостей). Это установлено для всех схем взрывной сварки – косое соударение [11, 12] эквипотенциальная схема с зазором, схема без зазора предложена В. Филипчуком [11]. Как показано в работах [11, 12, 14] трение может быть источником разогрева узкой зоны контактного взаимодействия до фазового прихода (плавления). Существенным в этом случае является критерий превышения времени перехода в зону контакта волн растяжения  $\sigma_r$  над временем релаксации теплоты плавления в этой области. Этот критерий обеспечивает целостность зоны схватывания. Однако и в работе [11] и в настоящее время отмечается отсутствие решения динамической контактной задачи с учетом разрушения локальных неровностей контактной зоны, активацией молекулярно-атомного механизма схватывания.

Тем не менее, анализ высокоскоростного деформирования соударяющихся конструктивных элементов может сделать возможным более точно определять параметры, входящие в критерии реализации техпроцесса сцепления. Так, в работе [5] рассмотрено осесимметричное соударение эквивалентно расположенных цилиндрических слоев на базе деформационной теории пластичности. В результате установлено наличие и величины тангенциальной скорости смещения  $V_x$ , характер и уровень параметров напряженно-деформированного состояния в соударяющихся цилиндрах, время прихода волны растягивающих напряжений  $\sigma_r$  в зоне контакта со стороны свободной поверхности (рис. 4 – 6).

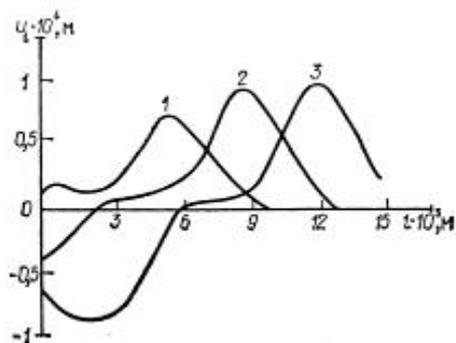


Рис. 4. Осевые смещения в зоне контакта:  
 1 –  $t_1 = 1,5 \cdot 10^{-6}$  с; 2 –  $t_2 = 2,0 \cdot 10^{-6}$  с; 3 –  $t_3 = 2,5 \cdot 10^{-6}$  с

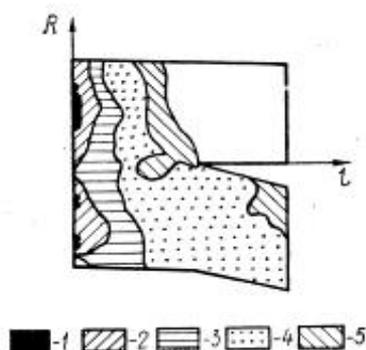


Рис. 5 – Интенсивность деформаций в соударяющихся слоях  
 при  $t = 2,08 \cdot 10^{-6}$  с в зонах:  
 1 –  $\varepsilon_i > 0,1$ ; 2 –  $0,06 \leq \varepsilon_i \leq 0,1$ ; 3 –  $0,04 \leq \varepsilon_i \leq 0,06$ ; 4 –  $0,02 \leq \varepsilon_i \leq 0,04$

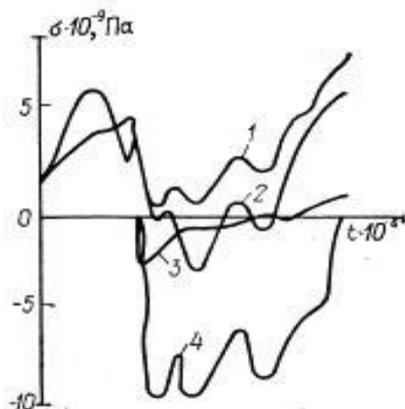


Рис. 6. Изменения окружных  $\sigma_\phi$ , осевых  $\sigma_l$ , сдвиговых  $\sigma_{l}$  и радиальных  $\sigma_r$  напряжений напряжений в зоне контакта

В технологии взрывного разделения элементов тонкостенных конструкций с использованием линейных концентраторов и зарядов ВВ применяются как конструктивные элементы (балки, пластины и оболочки), так и слои конечной толщины с привлечением для описания их скоростного деформирования теории течения [1] либо динамической деформационной теории пластичности [2, 5]. Сначала производится расчет параметров напряженно-деформированного состояния изделия с учетом локальной нагрузки, но без учета концентратора. В отчете о НИР [15] нами было показано, что при условии выполнения на линии разделения  $F(x, y)$

$$\frac{R_{\min}(x, y)}{r_0} \gg 1$$

( $R_{\min}(x, y)$  – минимальный радиус кривизны  $F(x, y)$ ,  $r_0$  – характерный размер поперечного сечения концентратора) в каждом нормальном сечении этой линии процесс деформирования представляет плоскую деформацию. Затем нагрузка доводится до значения интенсивности, при которой выполняется условие нормального отрыва [16]. Для примера рассматривается разделение слоя конечной толщины [4]. На слой, с одной стороны, нанесен концентратор, под концентратором с другой – локально распределенное давление от заряда ВВ (рис. 7). Применяя теорию течения, находим напряженно-деформированное состояние слоя в зоне нагрузки (рис. 8).

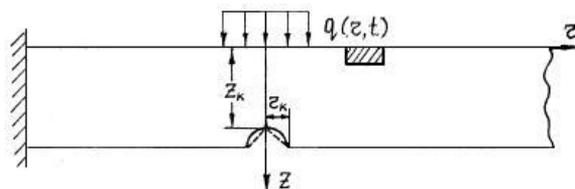


Рис. 7. Схема нагружения слоя с концентратором

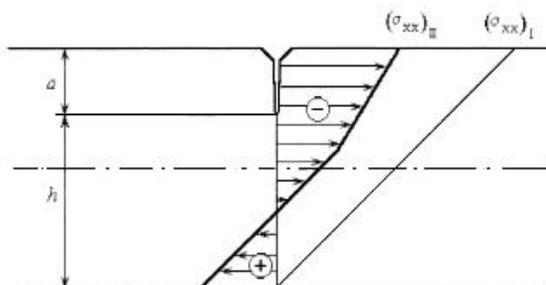


Рис. 8. Эпюры напряжений в слое при локальном нагружении

В работе [16] приведены данные о концентрации напряжений в зоне углового концентратора при изгибе и растяжении. Умножая расчетные напряжения  $\sigma_s$  на коэффициент концентрации  $K_1$ , проверяем условие страгивания трещины

$$K_1 \sigma_s \geq I_1,$$

где  $I_1$  – интенсивность напряжений при страгивании трещины.

Изменение  $I_1$  для различных видов концентраторов приведены на рис. 9.

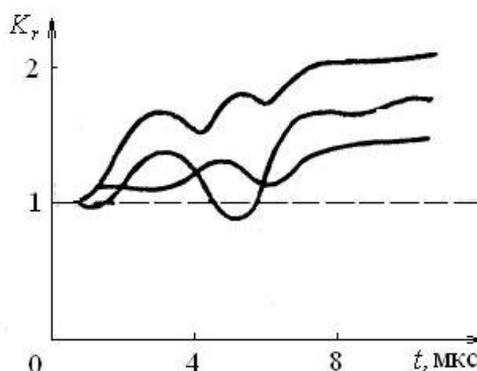


Рис. 9. Зависимость коэффициентов концентрации от времени

Таким образом, вероятность разделения слоя конечной толщины на ответственных объектах была доведена до  $P = 0,999$ , что проверено методом широкополосного тензометрирования. Детонационный характер нагружения слоя конечной толщины определяет диапазон скоростей деформаций в этом случае  $\dot{\epsilon} \approx 10^4 - 10^5 \text{ с}^{-1}$ .

### Выводы

При исследовании и реализации технологий взрывной обработки материалов давлением существенно используется математическое моделирование скоростного деформирования объектов для оценки напряженно-деформированного состояния и определения параметров техпроцессов. Поскольку взрывное вещество является альтернативным источником энергии, необходимо шире развивать применение технологий взрывной обработки материалов давлением в промышленности.

## Литература

1. Качанов Л.Н. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 311 с.
2. Ильющин А.А. Пластичность. – М.; Л.: Гостехиздат, 1948. – 378 с.
3. Пежина П.П. Основы вязкопластичности. – М.: Мир, 1971. – 218 с.
4. Колодяжный А.В., Севрюков В.И. Ударное и импульсное воздействие на конструкции и материалы. – К.: Наук. думка, 1986. – 172 с.
5. Скоростное деформирование элементов конструкций и материалов / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
6. Волошенко-Климовицкий Ю.Я. Динамический предел текучести. – М.: Наука, 1965. – 179 с.
7. Пихтовников Р.В., Завьялова В.И. Штамповка листового металла взрывом. – М.: Машиностроение, 1965. – 175 с.
8. Пихтовников Р.В., Хохлов Б.А. Безбассейновая листовая штамповка взрывом. – Х.: Прапор, 1972. – 168 с.
9. Борисевич В.К. Обработка металлов давлением. Т. 2. Импульсная обработка. – Х.: ХАИ, 2006. – 372 с.
10. Борисевич В.К., Сабелькин В.П., Солодянкин С.Н. О численном моделировании взрывной штамповки на ЭВМ // Прикл. мат. и техн. физика. – 1979. – № 25. – С. 165-171.
11. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Н-ск: Наука, 1968. – 312 с.
12. Сварка взрывом / В.С. Седых, А.А. Дерibas, Е.И. Биченков, Ю.А. Тришин. – Н-ск: СО АН СССР, 1962. – Вып. 22. – С. 1-26.
13. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 289 с.
14. Колодяжный А.В. О роли трения при сварке взрывом / А.В. Колодяжный, М.В. Чернобровка // Проблемы машиностроения. – 2001. – Т. 4, № 3-4. – С. 127-130.
15. Оценка разделения панелей МК и НЧФ изделия 11Ф35 при срабатывании ЛУР СВ24: Отчет о НИР (заключительный) / ИПМаш АН УССР; Рук. А.В. Колодяжный; № ГР 0292005887. – Х., 1991. – 128 с.
16. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. – 304 с.

*Поступила в редакцию 17.04.2007*

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