

- контрольні обміри деталі для визначення товщини отриманого покриття;
- обкатка роликком циліндричної або обтискання плоскої поверхні деталі до необхідних розмірів і чистоти поверхні не нижче 7 класу;
- остаточне шліфування деталі до отримання розмірів, потрібних за кресленням.

#### **Висновки:**

1. Отримані результати представляють практичний інтерес для технологічних розробок, що забезпечують формування покриттів з необхідними експлуатаційними властивостями для різних умов роботи деталей машин, а також інформацію про можливість зміни властивостей покриттів методом варіювання електродними матеріалами.

2. Нанесення електроіскрових покриттів збільшує експлуатаційну стійкість деталей машин в 3–6 разів.

**Список літератури:** 1. Патент на корисну модель №40858 Україна, МПК В23Н 1/00. Спосіб електроіскрового зміцнення поверхні металів та сплавів / Маковей В.О., Бородій Ю.П., Куріхін В.С. (Україна) НТУУ. – № u2008 13977 Заявл. 04.12.2008; Опубл. 27.04.2009, Бюл. №8. 2. Самсонов Г.В. Електроіскрове легування металічних поверхонь/ Самсонов Г.В. та ін.// Київ: Наукова думка. – 1976, – с. 220. 3. Шнейдер Ю.Г. Чистовая обработка металлов давлением/ Шнейдер Ю.Г. // М. – Л: ГНТИ машиностроительной литературы, 1963. – 263 с., ил. 4. Бородий Ю.П. Экспериментальное исследование особенностей формирования поверхностного износостойкого слоя рабочих элементов разделительных штампов/ Бородий Ю.П., Маковей В.А.// Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 2 (37). – 2013. – ПолтНТУ.

*Надійшла до редколегії 24.05.2014*

УДК 534.2+539.14.01

**В. В. ЛОТОУС**, председатель правления ОАО «Полтавский ГОК»,  
Комсомольск;

**Е. А. НАУМОВА**, инженер, Кременчугский национальный университет  
им. М. Остроградского, Кременчуг;

**В. В. ДРАГОБЕЦКИЙ**, докт. техн. наук, проф., Кременчугский  
национальный университет им. М. Остроградского, Кременчуг.

### **ИМПУЛЬСНОЕ ОБЖАТИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ**

В статье приведено описание технологий основанных на действии кумулятивных зарядов взрывчатого вещества на обрабатываемый материал. Рассмотрены вопросы использования энергии взрыва для распада и синтеза химических элементов в кумулятивной струе. Приведено качественное описание процесса обжатию цилиндрической оболочки кумулятивным зарядом взрывчатого вещества. Образующиеся при обжатии оболочки гофры становятся источниками системы кумулятивных струй.

---

© В. В. Лотоус, Е. А. Наумова, В. В. Драгобецкий, 2014

Исследования позволили разработать новые технологии взрывного упрочнения и легирования и метод физического моделирования обжатия вязких материалов.

**Ключевые слова:** взрывные технологии, кумуляция, плазма, химические элементы, взрывчатые вещества, гофрообразование.

**Введение.** Импульсное обжатие цилиндрических оболочек в ряде случаев приводит к возникновению кумулятивных струй. Явление кумуляции находит применение в военном деле и при решении комплекса технических задач в горном деле, в процессах электрогидравлической и взрывной штамповки при взрывном плакировании и резке материалов. Новым направлением, связанным с использованием ударно-волновых процессов в условиях кумуляции ударных волн, нацелены на решении проблемы управляемого термоядерного синтеза для синтезирования химических элементов, поиском новых источников энергии и взрывного легирования материалов [1-3]. Появлению этих технологий предшествовали исследования по динамическому легированию материалов в режиме сверхглубокого проникновения микрочастиц [1].

**Анализ последних исследований и литературы.** В процессах высокоэнергетического механического воздействия в металлах, подвергнутых действию кумулятивных зарядов взрывчатого вещества, чрезвычайно активно интенсифицируются химические реакции, возрастает скорость фазовых превращений, упругопластической деформации, наблюдаются явления жидкофазного спекания [3], нонизации и электрической поляризации. Кроме того, наряду с диспергированием вещества происходит разложение вещества, «разрыхление» химических связей в импульсно сжатом материале, излучение света и жестких фотонов (при  $\gamma$ -излучении), эмиссия звука (фононов) и высокоэнергетических электронов [3]. Традиционно в этих технологиях используются заряды взрывчатого вещества с конической или сферической кумулятивной полостью. Количественная теория кумуляции в первом приближении базируется на ряде гипотез, в одной из которых принимается, что материал кумулятивной оболочки и мишени считаются идеальными жидкостями. В рамках этой теории явление кумуляции представляется следующим образом. В начальный момент все элементы конической или сферической оболочки приобретают скорость более  $2 \cdot 10^3$  м·с<sup>-1</sup> в направлении оси конуса или сферы, и происходит обжатие поверхности с утолщением ее стенок. При подходе материала к оси поверхности часть материала выжимается и выплескивается вперед [4]. В результате этого из конуса или сферы выжимается струя.

Теория первого приближения нашла подтверждение в экспериментах в достаточно широких пределах варьирования зарядов взрывчатого вещества, материалов и геометрии оболочек и т.д. Однако тот факт, что с уменьшением угла конусности и диаметра струи скорость и давление возрастают до сколь угодно больших величин не нашел подтверждения. Тем не менее, проблема получения больших скоростей и давлений имеет чрезвычайно актуальное значение для реализации условий синтеза и выделения больших энергий. Решение этой проблемы позволит новые технологии образования различных наноструктур, дискретных и аморфных металлов и металлических частиц наноструктур, фуллеренов. Вызывают большой интерес экспериментальные исследования W.S.Koski по обжатию цилиндрических оболочек из бериллия специальным зарядом взрывчатого вещества. В этих условиях удалось получить поток частиц со скоростями около  $9 \cdot 10^3$  м·с<sup>-1</sup> [4]. Но в этом случае образуется не конденсированная струя, верхний предел скорости которой близок к удвоенной скорости звука облицовки, а газообразная струя потока частиц с малым атомным весом. Вызывает интерес факт образования не струи, а потока частиц. Создание потока частиц позволит интенсифицировать процессы взрывного (динамического) легирования материалов, получения высоких скоростей, синтеза материалов и выделения энергии.

Основными дополнительными факторами при моделировании процесса обжатию оболочек являются учет уравнения состояния материалов, скорости детонации взрывчатого вещества и механических характеристик материалов облицовки.

Получение кумулятивной струи из потока частиц возможно по схемам соответствующей процессам сварки взрывом пластин и оболочек. Т.е. при обжатию взрывом системы концентрично расположенных труб или пластинок [4] (соответствует вертикальной схеме сварки взрывом) на торце системы получаем концентрично или параллельно вылетающие кумулятивные потоки частиц. Однако при этом, как показывают многочисленные эксперименты и промышленные эксперименты по сварке взрывом внутренние плазмы, генерируемые детонацией между соударяющимися поверхностями металлов не возникают, а их скорость не превышает  $17 \cdot 10^3$  м·с<sup>-1</sup>. В этом случае возможно образование ударной плазмы при ударах кумулятивных струй с мишенью из свинца, цинка, мягкой стали и меди [1]. При использовании этого метода для динамического легирования материалов нет необходимости обеспечивать выдержку условий для образования сварного соединения концентрично или

параллельно расположенных пластин и оболочек. Наиболее эффективное образование системы кумулятивных струй происходит в условиях, когда к моменту прихода к поверхности металла растягивающих напряжений, образующихся на границе выхода ударной волны, расплавленный металл в зоне соударения не успеет застыть, что не допустимо при сварке взрывом.

**Целью исследования, постановкой проблемы** данной работы является исследование и качественное описание процесса импульсного обжата цилиндрической оболочки с объяснением факта образования дискретной кумулятивной струи. Для объяснения явления образования потока частиц в кумулятивной струе при обжатии цилиндрической оболочки, видимо необходимо учесть и ее процесс деформирования.

**Материалы исследований.** Эксперименты по обжатию тонкостенных труб энергией взрывчатого вещества, расположенного вблизи их конца, показывают, что трубка будет обжата так, что ее сечение будет волнистым с наибольшим количеством волн вблизи заряда (до восьми) [4]. По длине трубки число волн уменьшается с восьми до шести, четырех и двух (рис. 1). Это в том случае если материал трубки – упруго-пластический. Аналогичное явление наблюдается и при потере устойчивости трубки из вязкого материала. Опыт состоял в следующем – трубка изготавливалась из пластилина и охлаждалась. На конец трубки одевалась эластичная резиновая трубка. При этом силы обжата резины не вызывали деформаций испытуемой трубки из пластилина. Затем трубка помещалась в нагретую до 40°-50°С воду. По мере нагрева пластилинового тонкостенной трубки происходил процесс гофрообразования до 5 гофров.

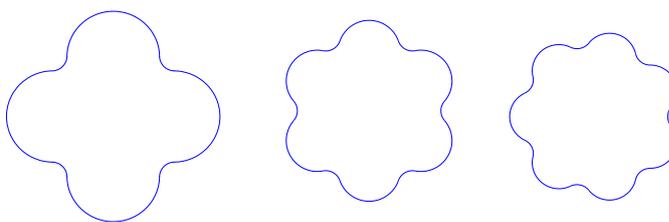


Рис. 1 – Последовательность изменений формы поперечного сечения трубы при импульсном нагружении ее торца

Учет механических характеристик необходим, так как количество вводимого продуктами детонации в кумулятивную оболочку тепла, отнесенного к единице поверхности, составляет не более 0,96 Дж/см<sup>2</sup> [4]. По сравнению с теплом, выделяемым при обжатии оболочки вследствие

пластической деформации и соударении ее поверхностей это количество тепла незначительно. При обжати оболочек происходит потеря устойчивости стенки с образованием гофров (волнистости). Гофрообразование конических, сферических и цилиндрических оболочек происходит по-разному (рис. 2) [5].



Рис. 2 – Образование гофров на конической, цилиндрической и сферической оболочках\*

Вершина конуса и сферы устойчивости не теряет. Кумулятивная струя образуется и начинает движение из этой области. Образующиеся гофры вливаются в струю до соударения внешних поверхностей гофров. Т.е. в направлении оси приближаются свободные поверхности струйных потоков. При обжати цилиндрической оболочки происходит соударение не стенки оболочки, а вершин гофров и их внутренних поверхностей. Стенки гофров становятся дополнительными источниками кумулятивных струй в поперечном направлении. Встречное соударение струй приводит к образованию мелкодисперсной пелены.

**Результаты исследований.** Моделирование процесса импульсного обжати цилиндрической оболочки с учетом потери устойчивости проведем при некотором заданном возмущении с использованием критерии начальных несовершенств. Рассмотрим влияние возмущающих факторов. Решая задачу об устойчивости, допускаем, что импульсное давление, приложенное к цилиндру, имеет некоторый эксцентриситет, либо оболочка имеет начальное волнообразование.

Эксцентриситет приводит к неравномерному распределению давления по окружности в фиксированный момент детонации в пределах изменения  $R_0 - e$  до  $R_0 + e$ , где  $R_0$  – начальный радиус оболочки;  $e$  – эксцентриситет в выражении [6]

\* Рисунки приведены из монографии А.С. Вольмира [5]

$$P(t) = \frac{16 \rho_o}{27 D} \left[ \frac{\delta_o + R_o \pm e - R(t)}{t} + \frac{dR}{dt} \right]^3, \quad (1)$$

где  $P(t)$  – давление, действующее на внешнюю поверхность оболочки;

$\rho_o$  – плотность взрывчатого вещества (ВВ);

$D$  – скорость детонации ВВ;

$\delta_o$  – толщина заряда ВВ;

$R_o$  – внешний радиус оболочки в начальный момент времени;

$R(t)$  – текущий радиус оболочки.

Начальное возмущение (волнообразование) задаем в виде ряда Фурье по синусам.

Метод расчета основан на представлении всей оболочки в виде модели (что соответствует конечно-разностному подходу к решению дифференциальных уравнений), в которой заготовка разбивается на участки, масса каждого участка сводится в точку, полученные узлы соединены невесомыми растяжимыми звеньями, которые остаются прямыми между точками сосредоточения масс, внешние силы рассматриваются сосредоточенными в каждой массовой точке. Задачу считаем геометрически линейной, материал заготовки – упруго-вязко-пластическим.

Выделяем элемент оболочки  $R \times d\theta \times dS$  и рассматриваем его равновесие. Считаем, что на элемент действуют мембранные растягивающие (сжимающие) силы  $N_{\theta i}$ ,  $N_{\varphi i}$ , поперечные силы  $Q_{\varphi i}$ , моменты  $M_{\varphi i}$ ,  $M_{\theta i}$ . Уравнения движения (для узлов заготовки) имеют вид:

$$\frac{d}{dS} (N_{\varphi} R \cos \varphi) - \frac{d}{dS} (Q_{\varphi} R \sin \varphi) - N_{\theta} + F_r - \rho R \ddot{R} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dS} (N_{\varphi} R \sin \varphi) - \frac{d}{dS} (Q_{\varphi} R \cos \varphi) + F_z - \rho R \ddot{Z} = 0 \quad (3)$$

где  $S$  – координата по образующей профиля заготовки;

$R$  – координата точки по оси  $OR$ ;

$Z$  – координата точки по оси  $OZ$ ;

$F_r$  – проекция внешней силы на ось  $OR$ ;

$F_z$  – проекция внешней силы на ось  $OZ$ ;

$N_{\varphi}$  – сила растяжения по образующей;

$N_{\theta}$  – сила растяжения по окружности;

$Q_\varphi$  – поперечная сила;

$\varphi$  – угол между осью  $OZ$  и касательной к профилю заготовки;

$\rho$  – удельная масса заготовки (масса, отнесенная к площади).

Отметим, что условия равновесия сил записаны для массовых точек, стянутых в узлы модели, а уравнения моментов – для участка между массовыми точками. Уравнения (2) и (3) описывают движение многопараметрической модели заготовки. Принимаем во внимание деформации, связанные с удлинением элемента под действием мембранных сил, и деформаций, связанные с действием изгибных моментов. По координатам точек рассчитываем величины деформаций в узлах. Расчеты напряжений по деформациям основаны на зависимостях математической теории пластического течения. Поскольку уравнения движения записаны не для напряжений, а для усилий (что связано с тем, что модель учитывает изгиб, но не рассматривает сжимающие по толщине напряжения и касательные напряжения), то запишем соотношения для вычисления усилий и моментов.

$$N_\varphi^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_z^{i,j+1} \cdot \delta_e \quad (4)$$

$$N_\theta^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_\theta^{i,j+1} \cdot \delta_e \quad (5)$$

$$M_\varphi^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_z^{i,j+1} \cdot \delta_e \cdot f_k \quad (6)$$

$$M_\theta^{i,j+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_\theta^{i,j+1} \cdot \delta_e \cdot f_k \quad (7)$$

где  $\delta_e$  – толщина слоя пластины.

Величину преобразующей силы  $Q_\varphi$  определяем из уравнения равновесия моментов:

$$\frac{d(M_\varphi R)}{dS} - M_\theta \cdot \cos \varphi = Q_\varphi R \quad (8)$$

Цикл расчета повторяем до прекращения движения заготовки, когда пластические свойства материала приближаются к предельным.

Момент остановки заготовки определяется тогда, когда скорость перемещения узлов станет равной нулю. При этом следует заметить, что давление продуктов детонации действует на заготовку в течение времени

$$t_o = \frac{\delta}{a_m},$$

где  $a_m$  – скорость ударной волны в стенке оболочки.

По истечении этого времени внешняя нагрузка (давление продуктов детонации) приравнивается нулю. Заготовка двигается по инерции до полной остановки заготовки. В результате счета установлен характер перемещения узлов цилиндрической оболочки. При начальном возмущении в виде четырех симметричных волн с величиной прогиба  $0,5\delta$  на окончательной стадии получили 16 гофр. Форма поперечного сечения цилиндрической оболочки на заключительной стадии деформирования до схлопывания гофров представлена на рис. 3.

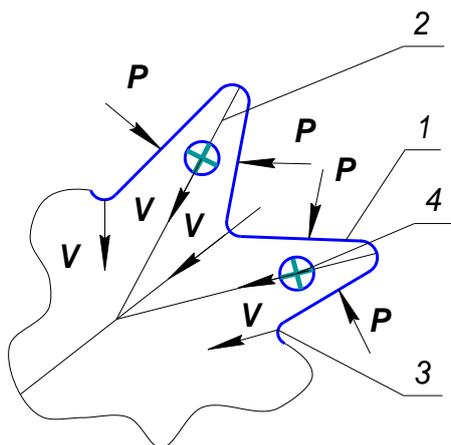


Рис. 3 – Форма поперечного сечения цилиндрической оболочки на заключительной стадии деформирования до схлопывания гофров (1 – стенка гофра; 2 – направление перемещения поперечных кумулятивных струй; 3 – направление перемещения выпуклости гофра; 4 – направление продольных кумулятивных струй)

Это объясняет эффект создания множества кумулятивных струй и их дисперсность. Наличие эксцентриситета сказывается на процессе гофрообразования, когда его величина превышает 10-12 толщин облицовки. При этом гофрообразование происходит с одной стороны цилиндрической облицовки.

**Выводы.** В результате моделирования процесса импульсного обжатия тонкостенной цилиндрической облицовки кумулятивного заряда взрывчатого вещества происходит гофрообразование, при котором гофры и их вершины

становятся источниками возникновения системы кумулятивных струй, при столкновении которых происходит образование пелены потока частиц (диспенсирование струи).

Моделирование процесса обжата позволило выявить новые технологии импульсного упрочнения и легирования цилиндрических деталей с использованием гофрированных облицовок кумулятивных зарядов взрывчатого вещества.

**Список литературы:** 1. *Соболев В. В.* Сверхглубокое проникновение микрочастиц в металлы / В. В. Соболев, С. М. Ушеренко, Н. В. Билан, Л. Ю. Чебенко // Журнал «Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва». – Науково-виробничий журнал: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Випуск 2 (10). – С. 96-105. 2. *Соболев В. В.* Закономерности изменения энергии химической связи в поле точечного заряда // Доклады НАН Украины. – 2010. – №4. – С. 88-95. 3. *Борисевич В. К.* Исследование возможности получения новых материалов при помощи импульсных сверхвысоких давлений / В. К. Борисевич, А. И. Долматов, И. В. Скорченко, А. И. Сабакар, В. В. Третьяк // Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология». – Х. «ХАИ», 2012. – С. 7-10. 4. *Лаврентьев М. А.* Проблемы гидродинамики и их математические модели / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 416 с. 5. *Вольмир А. С.* Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с. 6. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.

Поступила в редколлегию 25.05.2014

УДК 621.9.06

**В. Н. ПАВЛЕНКО**, д-р техн. наук, доц., НАУ «ХАИ», Харьков

## **ИСТИРАНИЕ И СМЯТИЕ, КАК ДВА ВИДА ИЗНОСА ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА**

Статья посвящена результатам исследования распределения степени деформаций по объему деформируемых поковок методом координатной сетки. Установлено, что наиболее интенсивно элементы штампа искажаются в начальный период. Определено, что истирание и смятие являются основным видом износа штампового инструмента. Исследования показали о крайне неравномерное распределении деформаций по штампу, вследствие чего высокая неравномерность деформации снижает стойкость штампа.

**Ключевые слова:** высокоскоростное объемное деформирование, поковка, деформация, смятие, истирание, штамп.

**Введение.** Возможность использования высоких скоростей деформирования, быстроходность современных кузнечных машин и небольшое число необходимых относительно несложных технологических операций обуславливает кратковременность рабочего цикла и высокую производительность кузнечно-штамповочного производства. Кованые и штампованные изделия отличаются высокими механическими свойствами.