ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2017. Т. LXX, N2.

УДК 539.3 МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.А. АНАНЯН

РАЗДАЧА ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ ДАВЛЕНИЕМ ИМПУЛЬСНО-МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрена возможность деформирования тонкостенной трубчатой заготовки раздачей импульсным магнитным полем с целью решения технологически особой задачи с получением трубчатой детали сложной конфигурации с большими относительными деформациями без повреждения обработанных поверхностей и с отверстиями без заусениц. Выявлено напряженно-деформированное состояние детали, а также приведена расчётная формула работы деформирования с целью определения предварительно накопленной электроэнергии в конденсаторной батарее магнитно-импульсной установки.

Ключевые слова: импульсно-магнитное поле, раздача, тонкостенная заготовка, матрица, напряженное состояние, работа.

Введение. Импульсные методы деформирования отличаются мобильностью, простотой и низкой стоимостью применяемой оснастки, не требуют установки громоздкого оборудования, при этом дают значительную экономию.

Развитие авиационной и ракетной техники, приборостроения, химического, пищевого машиностроения и других отраслей промышленности требует дальнейшего внедрения современных импульсных методов деформирования для осуществления всевозможных операций, в частности, формоизменения и разделительных операций, особенно в тонкостенных заготовках. Многие из этих операций не могут быть осуществлены из-за технологически обусловленной труднодоступности и специфики условий деформирования, а также налагаемых на деталь жестких ограничений технических условий.

Наиболее прогрессивным из этих методов для формоизменения и штамповки тонкостенных и полых небольших заготовок является их деформирование энергией импульсно-магнитного поля (ИМП). Этот метод имеет ряд преимуществ по сравнению с известными методами. При деформировании ИМП давление на заготовку принципиально отличается от нагружения при взрыве взрывчатого вещества (ВВ) в жидкости и электрогидравлического способа нагружения тем, что проникновение электромагнитного поля в материал приводит к возникновению объемно-распределенной нагрузки по толщине заготовки. Сказанное дает возможность достижения значительных относительных деформаций без повреждения предварительно обработанных поверхностей,

качественно изменяет характер концентрации напряжений, существенно влияет на показатели особенностей напряжений и их распределения в зонах концентрации [1-4].

Постановка задачи. Рассмотрим местное формоизменение локальной части трубки раздачей ИМП в зависимости от запасаемой в конденсаторной батарее электроэнергии. Выявим напряжённое состояние деформируемой стенки, работу деформирования, а также произведем расчёт необходимой запасаемой энергии в конденсаторной батарее для осуществления процесса. На рис. 1 показана находящаяся в трубке катушка индуктивности, на которую разряжается накопленная в конденсаторной батарее электроэнергия.

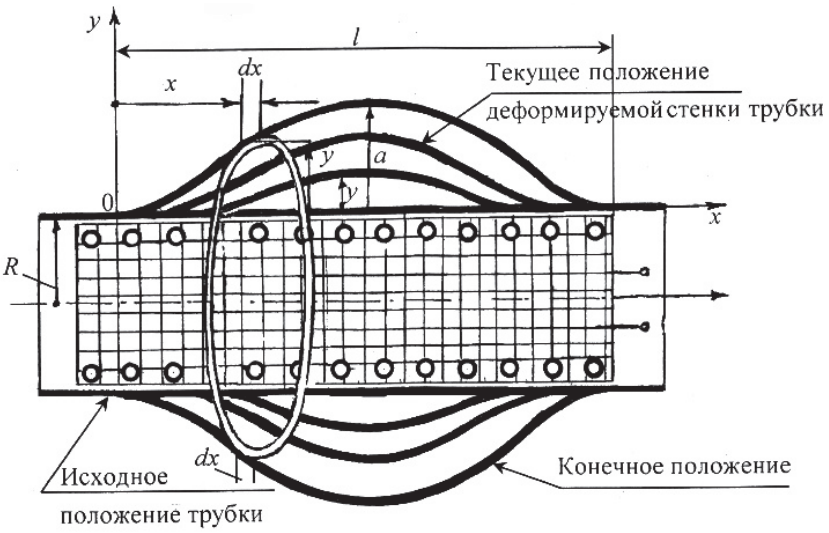

Рис. 1. Раздача трубки давлением ИМП

Принимая число витков катушки (число проводников с током) равным числу наведенных токов стенки трубки, в качестве зеркального отображения получим ту же модель взаимодействия, что и в случае вырубки-пробивки тонкостенной заготовки [5]. Силовое воздействие в середине зоны нагружения максимально, а по краям, наоборот, минимально. Больше всего от раздачи пройденный путь будет у срединных кольцевых элементов с уменьшением раздачи до нуля у крайних элементов.

Решение. Рассмотрение опытных образцов [1, 4] показывает, что часть трубки при свободной раздаче (концы трубки не защемлены), по всей вероятности, в сечении примет форму, близкую к синусоиде (см. на рис. 1 текущее положение деформируемой стенки). Выбрав координатную систему Oxy для деформирующихся кольцевых профилей элементов трубки, можем записать

$$y = a \sin kx, \tag{1}$$

где a - максимальная амплитуда раздачи у кольцевых элементов, равная $0 \le a \le a_{\max}$.

На рис. 2 показан кольцевой элемент трубки, равномерно нагруженный текущим давлением p, откуда видно, что имеет место напряженное состояние, которое можно представить уравнением Лапласа

$$\frac{p}{s} - \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} - \frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = 0. \tag{2}$$

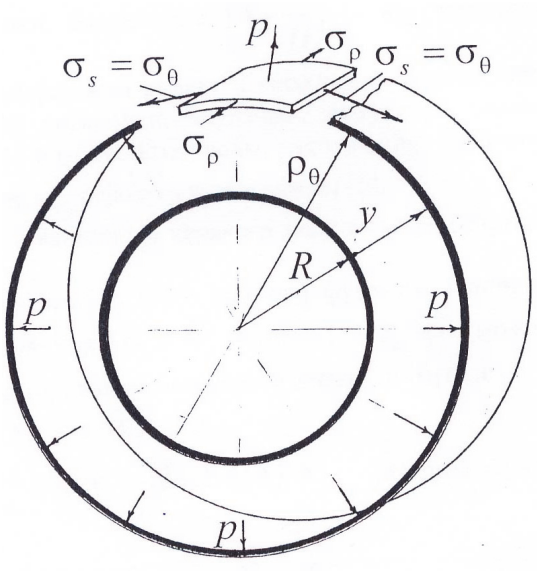

Рис.2. Кольцевой элемент трубки, нагруженный импульсным давлением p

Согласно принятой схеме, когда концы трубки свободны (не защемлены), имеем

$$\sigma_\rho << \sigma_\theta, \;\; R_\rho >> \rho_\theta = R + y.$$

Принимая $\sigma_\rho = 0$, уравнение (2) примет вид

$$\frac{p}{s} - \frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = 0, \;\; \sigma_\theta = \frac{p}{s}\rho_\theta. \tag{3}$$

При $\Delta << s$ (Δ - глубина проникновения магнитного поля в материал деформируемой заготовки) давление магнитного поля выражается равенством [5,6]

$$p = \frac{\mu H^2}{2}, \tag{4}$$

где μ - относительная магнитная проницаемость; H - напряженность магнитного поля.

Глубина проникновения магнитного поля в материал деформируемой заготовки выражается формулой [5,6]

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}, \tag{5}$$

где ω - круговая частота разряда; γ - удельная электрическая проводимость материала заготовки.

При неполном затухании магнитного поля в заготовке среднее давление определяется формулой [5,6]

$$p = \frac{\mu H_1^2}{2}\left(1 - \frac{H_2^2}{H_1^2}\right). \tag{6}$$

Здесь H_1 и H_2 - действующие значения напряженностей на входной и выходной поверхностях заготовки. Выражение $\left(1 - \frac{H_2^2}{H_1^2}\right) = k_{oc}$ называется коэффициентом ослабления. Этот коэффициент является сложной функцией, зависит от параметров импульсно-магнитной установки, заготовки, индуктора, взаимного расположения индуктора и заготовки и от свойств среды, находящейся за пределами заготовки. Для удобства определения k_{oc} строятся номограммы [5].

На рис. 3 показан известный характер зависимостей разрядного тока и давления ИМП во времени [4, 7].

Таким образом, формула (3) представляет собой сложную функцию. Принимая, что деформация происходит без упрочнения ($\sigma_i = \sigma_s = const$) и $\varepsilon_p \approx 0$, можем определить работу пластического деформирования кольцевого элемента трубки:

$$dA = \sigma_i \varepsilon_i d\mathrm{v}_i = \sigma_i \varepsilon_\theta d\mathrm{v}_i. \qquad (7)$$

В нашем случае $\varepsilon_\theta = \left|\varepsilon\right|_{\max}$, где $\varepsilon_i = (1 \div 1{,}155) \cdot \left|\varepsilon\right|_{\max}$ [3], поэтому принято $\varepsilon_i = \varepsilon_\theta$.

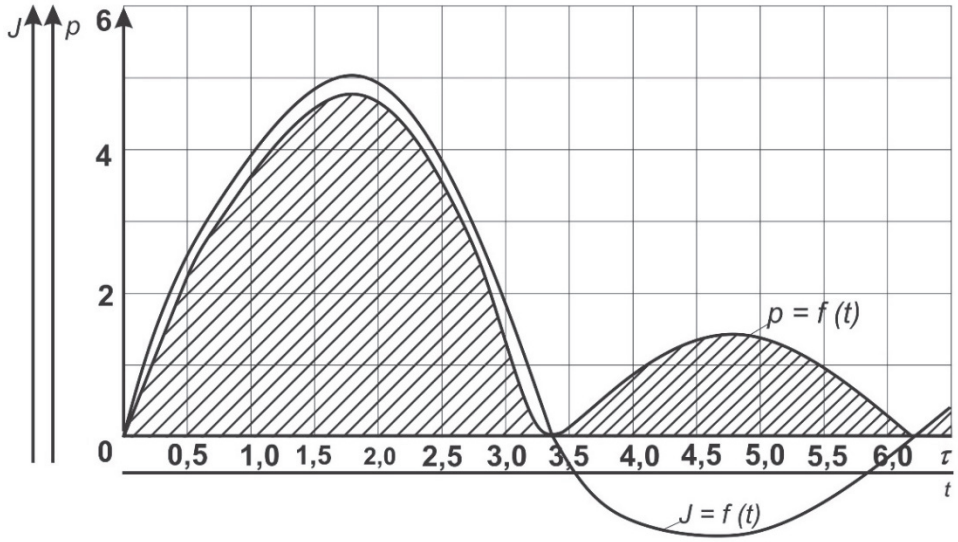

Рис.3. Характер зависимостей силы разрядного тока и давления поля от времени

Из рис. 2 можно определить

$$\varepsilon_\theta = \frac{2\pi(R+y) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{y}{R}. \qquad (8)$$

Особо отметим, что при импульсно-магнитном деформировании тонкая стенка заготовки по всей “толще” испытывает объемно-распределенную нагрузку. Исследования [1] показывают, что относительная деформация (ε) может достичь 100…150% и более. В нашем случае также ожидаются значительные деформации без разрыва стенки и без повреждения предварительной полированной поверхности.

Объем кольцевого элемента шириной *dx* будет

$$d\mathrm{v}_i = 2\pi(R+y)sdx. \qquad (9)$$

Подставив (8), (9) и (1) в равенство (7), получим

$$dA_{пл} = \sigma_S \frac{y}{R} 2\pi(R+y)sdx = \frac{\sigma_S 2\pi s a \sin kx}{R}\left(R + a\sin kx\right)dx.$$

Полная работа пластической деформации будет

$$A_{пл} = 2\int_0^{l/2} \frac{\sigma_S 2\pi s a}{k}\left(\sin kx + \frac{a}{R}\sin^2 kx\right)dkx. \qquad (10)$$

Здесь

$$\int \sin^2 kx dkx = \int \frac{(1-\cos 2kx)}{2}dkx = \frac{1}{2}\left(kx - \frac{\sin 2kx}{2}\right) = \frac{kx}{2} - \frac{\sin 2kx}{4},$$

$$\int \sin kx dkx = -\cos kx.$$

Подставив последние уравнения в (10), после интегрирования получим

$$A_{пл} = \frac{4\pi a s}{k}\sigma_S\left[1 - \cos\frac{kl}{2} + \frac{a}{R}\left(\frac{kl}{4} - \frac{\sin kl}{4}\right)\right]. \qquad (11)$$

При раздаче трубки до максимальной амплитуды $a_{\max}$ в (1), когда $x = \frac{l}{2}$, $y = y_{\max} = a_{\max}$, получим $y_{\max} = a_{\max}\sin k\frac{l}{2}$, откуда $\frac{kl}{2} = \frac{\pi}{2}$, $k = \frac{\pi}{l}$.

Подставляя последнее уравнение в (11), окончательно получим

$$A_{пл} = 4als\left(1 + \frac{\pi\alpha}{4R}\right)\sigma_S. \qquad (12)$$

Исходя из опыта деформирования тонкостенной заготовки при раздаче ИМП, можем определить КПД процесса раздачи: ≈10% от W_0 (запасаемой энергии в конденсаторной батарее), следовательно,

$$W_0 = \frac{A_{пл}}{\eta_{пц}}. \qquad (13)$$

На практике могут быть использованы охватывающие трубку внешние штампы (рис. 4), где происходит комбинированное деформирование: раздача трубки с одновременным формоизменением и пробивкой отверстий.

Таким образом, получается трубка сложной конфигурации без повреждения полированных поверхностей, а также с пробитыми отверстиями без заусениц [1, 2, 6].

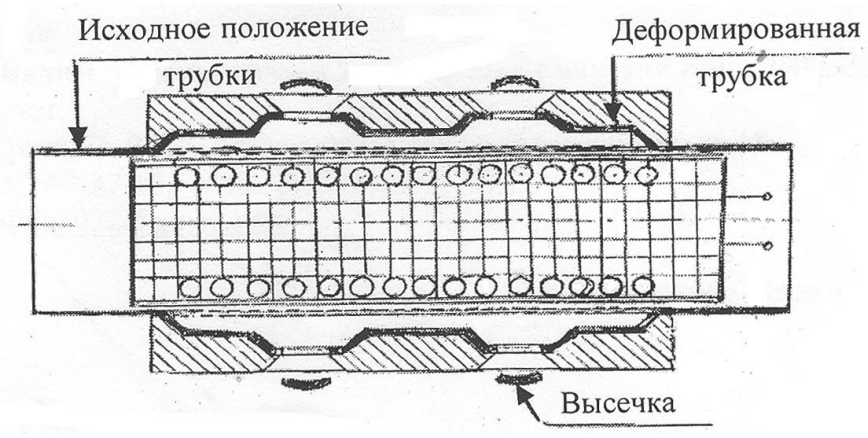

Рис. 4. Раздача трубки с комбинированным деформированием

При такой пробивке работа на деформирование запишется в виде

$$A = A_{пласт} + A_{изгиба} + A_{пробивки}\,, \qquad (14)$$

т.е. надо учесть также работу на изгибы и на пробивку [1, 3, 7, 8], после чего можно определить предварительно запасаемую энергию в конденсаторной батарее. Окончательный точный расчёт может быть произведен с учетом практики деформирования конкретной детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кононенко В.Г., Ананян В.А.** Экспериментальные исследования к анализу процессов вырубки-пробивки тонкостенной листовой заготовки импульсным магнитным полем, сконцентрированным по контуру вырубки // В сб.: Самолётостроение. Техника воздушного флота. – Харьков, 1980. – Вып. 47. – С. 109-116.
2. Опыт формирования металлических деталей сложной конфигурации / **О.Г. Цыплаков и др.** – ЛДНТП, 1968. – 24 с.
3. **Сторожев М.В., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
4. **Батыгин Ю.В., Левинский В.И.** Диффузионные процессы при раздаче трубчатых заготовок в магнитно-импульсной обработке металлов // Електротехніка і Електромеханіка. – Харьков: ХПИ, 2005. – N 2. – С. 72-77.
5. **Кононенко В.Г., Ананян В.А.** К анализу динамики процесса вырубки-пробивки тонкостенной листовой заготовки импульсным магнитным полем, сконцентрированным по контуру вырубки // Обработка металлов давлением в машиностроении. – 1982. – Вып. 18. – С. 3-8.
6. **Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т.** Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. - 168 с.

7. **Ананян В.А.** Магнитно-импульсная пробивка тонколистовой заготовки метанием пуансона // Изв. НАН Армении. Механика. - 2008. - Т.61, №4. - С.52-59.
8. **Ананян В.А.** Деформированное состояние в очаге деформации на кромке отверстия и работа деформирования при магнитно-импульсной пробивке тонколистовой заготовки // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2002. - Т.55, №3. - С.385-391.

Национальный аграрный университет Армении. Материал поступил в редакцию 11.06.2016.

Վ.Ա. ԱՆԱՆՅԱՆ

ԽՈՂՈՎԱԿԱՁԵՎ ԲԱՐԱԿԱՊԱՏ ՆԱԽԱՊԱՏՐԱՍՏՈՒԿԻ ԸՆԴԱՐՁԱԿՈՒՄԸ ՄԱԳՆԻՍԱ-ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԴԱՇՏՈՎ

Դիտարկված է իմպուլսամագնիսական դաշտով ընդարձակված խողովակաձև բարակապատ նախապատրաստուկի դեֆորմացման հնարավորությունը՝ լուծելու համար տեխնոլոգիական հատուկ խնդիր՝ ստանալ հարաբերականորեն մեծ դեֆորմացումներով բարդ ձևափոխություններով խողովակաձև դետալներ՝ առանց վնասելու մշակվող մակերևույթները և անձլեպ անցքերով: Բացահայտվել է դետալի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը, ինչպես նաև ներկայացված է դեֆորմացման աշխատանքի հաշվարկային բանաձևը՝ որոշելու համար մագնիսաիմպուլսային տեղակայանքի կոնդենսատորային մարտկոցում նախնական կուտակված էլեկտրաէներգիան:

Առանցքային բառեր. իմպուլսա-մագնիսական դաշտ, ընդարձակում, բարակապատ նախապատրաստուկ, մատրից, լարվածային վիճակ, աշխատանք:

V.A. ANANYAN

EXPANSION OF A THIN-WALLED PIPE BLANK BY THE PRESSURE OF A MAGNETIC-PULSE FIELD

The possibility of deformation of a thin-walled pipe blank is considered by a magnetic pulse field aimed at solving the specific technological practical problem in order to obtain complex structure pipe parts which have large relative deformation, without damaging the polished surface, and without filing the holes. The pipe part stress-strain state is revealed, as well as the calculation formula for the deformation impact is given to determine the needed energy accumulated in the magnetic-impulse battery.

Keywords: magnetic-pulse, distribution, thin-sheet, blank, matrix, stress state, operation.