

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА**

**И С С Л Е Д О В А Н И Е
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ИМПУЛЬСНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ
ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК**

**У т в е р ж д е н о
редакционно-издательским
советом института
в качестве методических
указаний
к лабораторной работе
для студентов**

КУЙБЫШЕВ 1985

УДК 621.9.044(07)

Даются физические основы процессов деформации эластичной средой и энергией импульсного магнитного поля и методика определения напряженно-деформированного состояния.

Рекомендуются студентам спец. 0535 технологической специализации и ЦИПС.

Составитель доцент А. А. Дудин

Под редакцией проф. В. А. Барвинка

Рецензенты: В. Ф. Лычев, Н. М. Гражданкин

Цель работы: практическое ознакомление студентов с вопросами статического и высокоскоростного деформирования; закрепление знаний, полученных на лекциях; экспериментальное изучение влияния скорости деформации на напряженно-деформированное состояние материала и предельные возможности процесса.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ

В практике обработки металлов давлением многие детали изготавливают раздачей из трубчатых заготовок. Операция раздачи представляет собой расширение пустотелых деталей или трубчатых заготовок, производимое за счет растяжения материала изнутри в радиальном направлении. Эта операция широко применяется для изготовления трубчатых деталей с раструбом или с фланцем на концах, для ступенчатых деталей, для конических, бочкообразных или более сложных форм обечаек, в том числе из сварных заготовок (обечайки подвесных баков, корпусные детали двигателей, детали воздухозаборников и др.).

Раздача может осуществляться как при статическом деформировании с помощью эластичного и жидкостного пуансонов и жесткого цельного пуансона различной конфигурации (или пуансона с раздвижными секциями, раздвигаемыми клиновой вставкой), так и при импульсном с помощью импульсных источников энергии взрыва, импульсного магнитного поля, высоковольтного электрического разряда.

В данной работе изучаются два способа раздачи: статический с помощью эластичной среды и динамический с помощью энергии импульсного магнитного поля.

1.2. РАЗДАЧА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние материала трубчатой заготовки при раздаче под действием равномерно распределенной нагрузки q . В стенке данной тонкостенной ци-

лиندрической трубы (рис. 1) под действием давления q возникают напряжения σ_θ , σ_z , σ_r и деформации δ_θ , δ_z , δ_r . Согласно условию равновесия

$$\sigma_\theta = qr/S. \quad (1)$$

Величина напряжения σ_z зависит от способа крепления стенки трубы к днищам. Если днища жестко скреплены друг с другом и не скреплены со стенками (см. схема I, рис. 1), $\sigma_z=0$. Если днища жестко скреплены со стенкой (схема II),

$$\sigma_z = qr/2S. \quad (2)$$

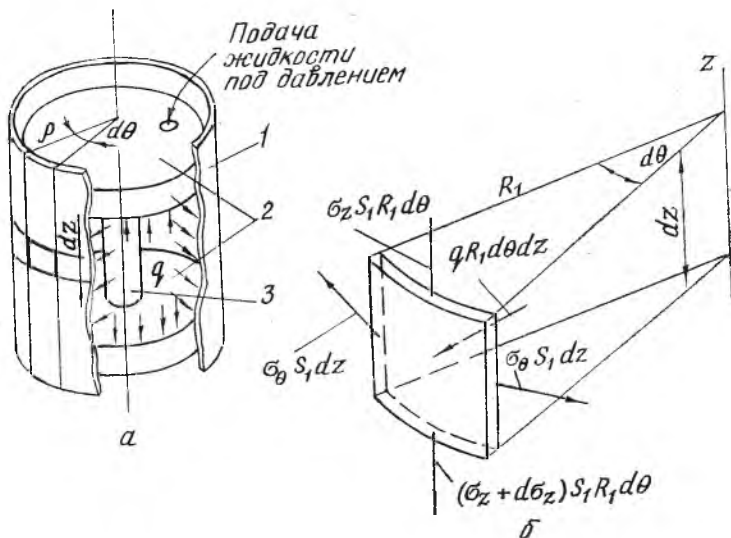


Рис. 1. Схема деформирования тонкостенной трубы под действием давления q при днищах, не скрепленных со стенкой: a — схема нагружения; b — действие сил на элемент; 1 — труба; 2 — днища; 3 — стержень, соединяющий днища

Напряжение σ_r изменяется в стенке от $\sigma_r = q$ на внутренней поверхности до $\sigma_r = 0$ на внешней. Среднее его значение равно $q/2$. Оно в $2r/S$ раз меньше σ_θ . Для тонкостенной трубы $r/S \geq 15$. Поэтому напряжением σ_r пренебрегают ($\sigma_r = 0$) и считают, что напряженное состояние плоское. Волокно l_{θ_0} , проходящее через рассматриваемую точку в направлении θ , становится длиной l_θ . Его деформация

$$\delta_\theta = \ln \frac{l_\theta}{l_{\theta_0}}. \quad (3)$$

Для волокна в направлении z

$$\delta_z = \ln \frac{l_z}{l_{z0}} \quad (4)$$

и для волокна в направлении ρ

$$\delta_\rho = \ln \frac{l_\rho}{l_{\rho 0}}. \quad (5)$$

Интенсивность напряжений и деформаций для плоского напряженного состояния

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_\theta^2 - \sigma_\theta \sigma_z + \sigma_z^2}; \quad (6)$$

$$\delta_i = \sqrt{2/3} \sqrt{\delta_\theta^2 + \delta_z^2 + \delta_\rho^2}. \quad (7)$$

По гипотезе единственности кривой упрочнения

$$\sigma_i = \sigma_i(\delta_i), \quad (8)$$

данное выражение не зависит от напряженно-деформированного состояния. При деформации по схеме I

$$\begin{aligned} \sigma_\theta \neq 0, \quad \sigma_z = \sigma_\rho = 0, \quad \delta_z = \delta_\rho = -1/2 \delta_\theta; \\ \sigma_i = \sigma_\theta, \quad \delta_i = \delta_\theta; \end{aligned} \quad (9)$$

а по схеме II

$$\begin{aligned} \sigma_\theta \neq 0, \quad \sigma_z = 1/2 \sigma_\theta, \quad \delta_z = 0, \quad \delta_\theta = -\delta_\rho; \\ \sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_\theta, \quad \delta_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \delta_\theta. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, согласно гипотезе, функция $\sigma_\theta = \sigma_\theta(\delta_\theta)$ для деформации по схеме I и функция $\sigma_\theta = 4/3 \sigma_\theta(\delta_\theta)$ для деформации по схеме II совпадают с функцией $\sigma_i = \sigma_i(\delta_i)$.

1.3. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ РАЗДАЧА

Магнитно-импульсный метод деформирования металла основан на преобразовании электрической энергии, накопленной в конденсаторной батарее (накопителе), при разряде через индуктор в энергию импульсного магнитного поля, совершающего работу деформирования заготовки. Электродинамические силы между индуктором и деформируемой металлической заготовкой зависят от характеристик магнитно-импульсной установки, электрических и магнитных характеристик индуктора и заготовки, а также от геометрических размеров и взаимного расположения последних.

Одним из наиболее важных параметров, характеризующих процесс, является величина энергии, запасаемой в батарее конден-

саторов,

$$W = \frac{c U^2}{2}, \quad (11)$$

где c — емкость батареи конденсаторов; U — напряжение заряда батареи конденсаторов.

Ток в цепи индуктора при разряде конденсаторной батареи может быть определен выражением

$$i = U \sqrt{c/L} \exp(-0,5 r_a t/L) \sin \omega t, \quad (12)$$

где t — время; L — индуктивность разрядного контура; r_a — активное сопротивление разрядного контура; $\omega = 1/\sqrt{Lc}$ — круговая частота разряда.

Давление магнитного поля в зазоре между индуктором и заготовкой прямо пропорционально квадрату разрядного тока

$$p = k U^2 (c/L) \exp(-r_a t/L) \sin^2 \omega t, \quad (13)$$

где k — коэффициент, учитывающий соотношение геометрических параметров системы индуктор-заготовка.

Характер изменения $i = f(t)$ и $p = f(t)$ показан на рис. 2.

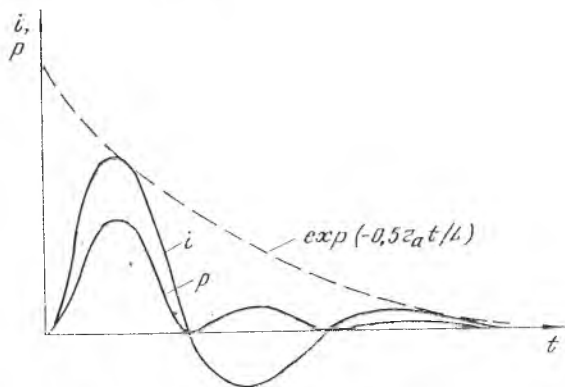


Рис. 2. Зависимости $i = f(t)$ и $p = f(t)$ при магнитно-импульсной обработке

Исследования магнитно-импульсного деформирования показали, что скорости перемещения деформируемого участка заготовки $v(t)$ имеют два временных интервала (рис. 3): а) при $0 \leq t \leq t_{vm}$ — участок ускорения, на котором $dv/dt > 0$; б) при $t_{vm} < t \leq t_d$ — участок торможения, на котором $dv/dt < 0$, где t_{vm} , t_d — момент времени, соответствующий максимальному значению скорости, и длительность перемещения участка заготовки.

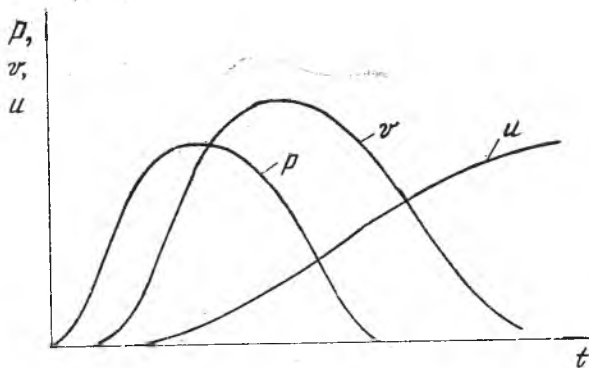


Рис. 3. Зависимости скорости v , перемещения u и давления p от времени t при магнитно-импульсной обработке

Распределение давлений внутри деформируемой заготовки при магнитно-импульсной обработке существенно отличается от распределения давлений при других методах обработки давлением. При магнитно-импульсной обработке давление на внешней поверхности деформируемой заготовки равно нулю и достигает максимального значения на внутренней поверхности. На рис. 4 показано распределение давлений в медной заготовке толщиной 3 мм при разных частотах и одинаковом значении магнитной индукции, равном 4Т.

Пространственное распределение давлений при магнитно-импульсной обработке существенно сказывается на процессах, проходящих в металле деформируемой заготовки. Остаточная деформация может произойти тогда, когда превзойден предел упругости. Но электромагнитные давления в частях металла, прилегающих к наружной поверхности заготовки, очень малы. Возникающие здесь напряжения сжатия лежат ниже предела упругости (рис. 5). Эти напряжения превосходят предел упругости только за некоторой границей, когда расстояние x становится больше x_k . Но деформация всей заготовки все же происходит. Это значит, что части металла, находящиеся в области, где $x < x_k$, увлекаются теми частями металла, которые лежат в области, где $x > x_k$. Таким образом, весь объем металла деформируемой заготовки можно разбить на две области: область III растяжения при $x < x_k$; область IV сжатия при $x > x_k$. Граница указанных областей на рис. 5 приближается к внешней поверхности обрабатываемой заготовки с повышением частоты разряда, при этом сокращаются размеры области растяжения и увеличиваются области сжатия.

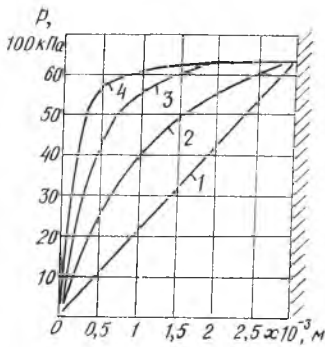


Рис. 4. Распределение давлений внутри медной заготовки толщиной 3 мм при различных частотах тока: 1 — низкая частота; 2 — $f_1 = 1000$ Гц; 3 — $f_2 = 5000$ Гц; 4 — $f_3 = 50000$ Гц

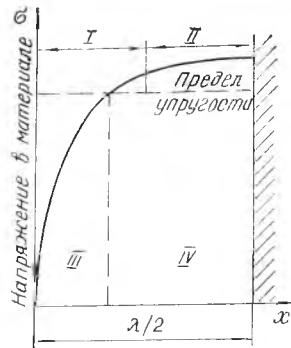


Рис. 5. Области механических напряжений и давлений внутри заготовки: I — область нарастающего давления; II — область постоянного давления; III — область растяжения; IV — область сжатия; λ — длина электромагнитной волны в материале

Рассмотрим задачу тонкостенного цилиндрического образца, нагруженного равномерно распределенным по внутренней поверхности изменяющимся во времени давлением (рис. 6). Вследствие симметрии образца и нагрузки относительно плоскости, нормальной к оси и проходящей через центр образца, распределение осевой деформации будет симметрично относительно этой плоскости. Вы-

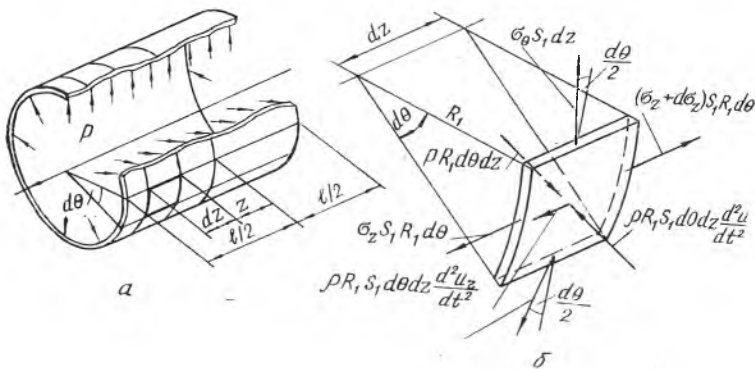


Рис. 6. Схема магнитно-импульсного деформирования тонкостенной трубы: а — схема нагружения; б — действие сил на элемент при динамическом деформировании тонкостенной трубы

брав начало координат в центре тяжести образца, представим действие сил на элемент, выделенный на расстоянии z двумя нормальными к оси и двумя радиальными сечениями, образующими между собой угол $d\Theta$. Направление инерционных сил соответствует стадии ускорения стенок образца, когда действующие силы превосходят силы сопротивления.

Примем следующие обозначения: R и R_1 — начальный и текущий радиусы образца; u — радиальное перемещение стенки образца; $\delta_\theta = \ln(R_1/R)$ — окружная деформация; $\delta_z = \mu_1 \delta_\theta$ — осевая деформация, где μ_1 — коэффициент связи осевой и окружной деформации, показывающий реальное соотношение между δ_z и δ_θ .

Влияние осевых инерционных напряжений, которые препятствуют развитию осевых деформаций во время разгона и способствуют им во время замедления скорости деформирования, вызывает отличие коэффициента μ_1 от коэффициента Пуассона.

На выделенный элемент действуют силы:

$\rho R_1 d\Theta dz$ — давления импульсного магнитного поля;

$\sigma_\theta S_1 dz$ — сопротивления, действующие в окружном направлении;

σ_θ — окружное напряжение;

$\sigma_z S_1 R_1 d\Theta$ — сопротивления, действующие в осевом направлении вследствие инерционного сопротивления материала;

σ_z — осевое инерционное напряжение;

$\rho R_1 S_1 d\Theta dz \frac{d^2 u}{dt^2}$ — радиальная сила энергии;

ρ — плотность материала образца;

$\frac{d^2 u}{dt^2}$ — ускорение элемента в радиальном направлении;

$\rho R_1 S_1 d\Theta dz \frac{d^2 u_z}{dt^2}$ — осевая сила инерции;

$\frac{d^2 u_z}{dt^2}$ — ускорение элемента в осевом направлении, u_z — перемещение рассматриваемого элемента вдоль оси z .

На стадии торможения направления сил инерции меняются и способствуют удлинению времени деформации. Для того, чтобы получить связь между мгновенными значениями компонентов напряжений и деформаций при магнитно-импульсном деформировании, необходимо все действующие на элемент силы спроектировать на направления радиуса и на ось z . В результате получаются дифференциальные уравнения второго порядка. Чтобы по этим уравнениям вычислить напряжения и деформации, необходимо экспериментально (с помощью скоростной фоторегистрации) определить ускорения, с которыми изменяются радиус и длина образца.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с соответствующими инструкциями по технике безопасности.

2. Получить у лаборанта 5 трубчатых образцов.

3. Пронумеровать образцы и на каждом из них около двух диаметрально противоположных точек в середине длины образующей нанести по паре рисок (примерно на расстоянии 3 мм одна от другой), фиксирующих длину $l_{\theta 0}$ волокна в тангенциальном направлении и $l_{z 0}$ — вдоль образующей.

4. Измерить у каждого образца радиус трубы $r_0 = d_0/2$, толщину стенки $S_0 = l_{\rho 0}$, расстояния между рисками $l_{\theta 0}$ и $l_{z 0}$.

5. Деформировать один образец (статически) на разрывной машине с помощью эластичной среды. Для этого приспособление с образцом установить на разрывной машине и провести раздачу образца в несколько ступеней вплоть до начала локализации деформации или разрушения (увеличение диаметра образца за одну ступень деформации примерно на 5%, рис. 7). На каждой ступени произвести замеры l_{θ} и l_z .

6. Результаты измерений занести в протокол, табл. 1 и выполнить необходимые расчеты (σ_{θ} по формуле (1); δ_{θ} δ_z по формулам (3) и (4); δ_{ρ} из закона постоянства объема $\delta_{\rho} = -\delta_{\theta} - \delta_z$; σ_i и δ_i из соотношений (9)).

7. По данным табл. 1 построить график зависимости интенсивности напряжения σ_i от интенсивности деформации δ_i .

8. Провести раздачу оставшихся четырех образцов на магнитно-импульсной установке МИУ-20 на четырех уровнях энергии W_1, W_2, W_3, W_4 ($W_1 < W_2 < W_3 < W_4$). Величины энергии следует подобрать таким образом, чтобы при W_1, W_2, W_3 имела место остаточная деформация образца без разрушения, а при W_4 — образец разрушался (или имел следы начала разрушения).

9. Выполнить замеры l_{θ} и l_z у образцов, деформированных на каждом уровне энергии.

10. Результаты измерений занести в протокол, табл. 2 и выполнить необходимые расчеты δ_{θ} и δ_z по формулам (3) и (4); δ_{ρ} из закона $\delta_{\rho} = -\delta_{\theta} - \delta_z$.

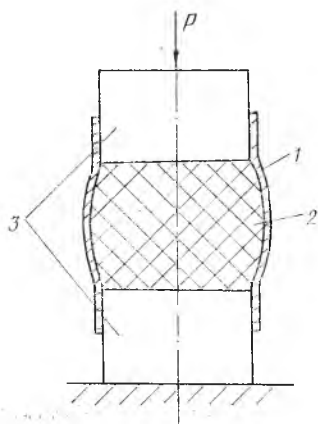


Рис. 7. Экспериментальная раздача трубчатого образца при статическом деформировании: 1 — трубчатый образец; 2 — полиуретановый пуансон; 3 — стальные вкладыши

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов параметров раздачи трубчатого образца с помощью эластичной среды

Образец № 1; $r_o =$; $l_{\theta o} =$; $l_{zo} =$; $l_{\rho o} =$

| № ступени нагрузки | q , | l_{θ} | l_z | δ_{θ} | δ_z | δ_{ρ} | σ_{θ} | σ_i | δ_i |
|-----------------------|-------|--------------|-------|-------------------|------------|-----------------|-------------------|------------|------------|
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |

Таблица 2

Результаты измерений и расчетов параметров магнитно-импульсной раздачи трубчатых образцов

$r_o =$; $l_{\theta o} =$; $l_{zo} =$; $l_{\rho o} =$

| № образца | W , | l_{θ} | l_z | δ_{θ} | δ_z | δ_{ρ} | | | |
|--------------|-------|--------------|-------|-------------------|------------|-----------------|--|--|--|
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |

11. На основании результатов обработки экспериментальных данных сравнить полученные показатели напряженно-деформированных состояний и предельные степени деформации.

3. ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА, ПРИБОРЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения первой части работы используется разрывная испытательная машина. В качестве инструмента для раздачи используются пуансон из полиуретана и два стальных вкладыша (см. рис. 7). Нанесение рисок на исследуемые образцы осуществ-

ляется с помощью штанген-рейсмуса. Замеры расстояний между рисками до деформации и после производятся с помощью инструментального микроскопа.

Для проведения второй части работы используется магнитно-импульсная установка (МИУ), представляющая собой генератор импульсных токов емкостного типа с индуктивной нагрузкой. На рис. 8 представлена функциональная схема МИУ. Установка со-

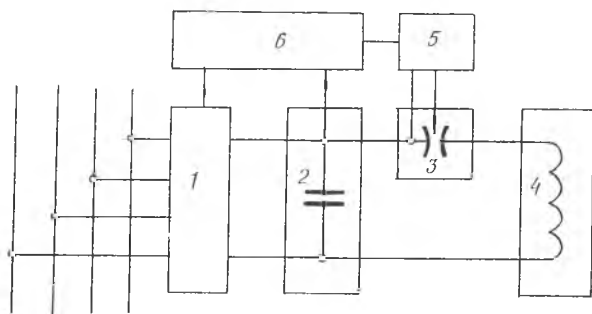


Рис. 8. Функциональная схема магнитно-импульсной установки: 1 — зарядное устройство; 2 — накопитель энергии; 3 — коммутирующее устройство; 4 — индуктор; 5 — блок поджига; 6 — задатчик напряжений;

стоит из накопителя энергии, коммутирующего устройства, зарядного устройства, задатчика напряжений, блока поджига, индуктора. Накопитель энергии представляет собой батарею импульсных конденсаторов, соединенных между собой ошиновкой. Для раздачи образцов используется многовитковый цилиндрический индуктор. Заготовка на-

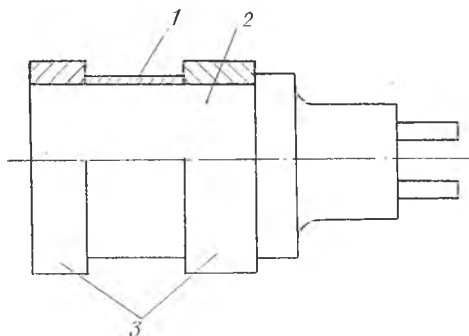


Рис. 9. Экспериментальная раздача трубчатого образца при магнитно-импульсном деформировании: 1 — трубчатый образец; 2 — индуктор; 3 — металлические кольца

девается на индуктор, закрепленный на выводах МИУ (рис. 9). Для снижения влияния краевого эффекта по концам заготовки на индуктор устанавливаются металлические кольца.

Учитывая, что к работе на МИУ допускаются лица, сдавшие техминимум по эксплуатации установок с напряжением свыше 1000 В, экспериментальные исследования по

магнитно-импульсной раздаче трубчатых образцов студенты выполняют с операторами-электриками. Все работы, связанные с подготовкой образцов и их метрологическими исследованиями, выполняют студенты, а подготовку оборудования к работе, установку образца на индуктор, раздачу и снятие образца, отключение установки выполняют операторы лабораторий.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схемы деформирования при статическом и импульсном нагружении.
2. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
3. График $\sigma_i = f(\delta_i)$.
4. Перечень необходимого оборудования, приборов и инструментов.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Для изготовления каких авиационных деталей применяется операция раздачи?
2. Какие схемы деформирования применяются при раздаче?
3. Назовите напряжение, зависящее от способа крепления стенки трубы к днищам при статическом деформировании.
4. Какое напряженно-деформированное состояние испытывает материал тонкостенного трубчатого образца при раздаче эластичной средой?
5. Каков характер изменения разрядного тока и давления при магнитно-импульсной обработке и чем он вызван?
6. Чем объяснить отсутствие движения заготовки в начальной стадии магнитно-импульсного деформирования и ее перемещение в момент, когда давление уменьшается до нуля?
7. Как изменяется напряжение σ_r по толщине заготовки при статическом и магнитно-импульсном деформировании?
8. Каков характер изменения напряжения σ_z по длине образующей заготовки при магнитно-импульсном деформировании?
9. Как изменяется распределение давления магнитного поля по толщине заготовки с изменением частоты тока разряда?
10. В чем отличие коэффициента связи осевой и окружной деформаций μ_1 от коэффициента Пуассона?
11. Каково влияние сил инерции на напряженно-деформированное состояние материала при магнитно-импульсной раздаче трубчатых заготовок?
12. С какой скоростью деформации проводились эксперименты, если принять, что при статическом нагружении радиальная ско-

рость стенок трубчатой заготовки составляла $0,08 \cdot 10^{-3}$ м/с, а при динамическом — 150 м/с?

13. Как отличаются полученные экспериментальные значения степеней деформации δ_0 при статическом и динамическом нагружении?

14. Каково влияние скорости деформации на прочность и пластичность металлов?

Л и т е р а т у р а

1. *Сторожев М. В., Попов Е. А.* Теория обработки металлов давлением. — М.: Машиностроение, 1971.
2. *Исаченков Е. И.* Штамповка резиной и жидкостью. — М.: Машиностроение, 1967.
3. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. — Киев: Наукова думка, 1979.
4. *Высокоскоростное деформирование металлов.* / Под ред. *А. М. Шахназарова.* — М.: Машиностроение, 1966.
5. *Дудин А. А.* Магнитно-импульсная сварка металлов. — М.: Металлургия, 1979.

Составитель *Анатолий Алексеевич Дудин*

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ИМПУЛЬСНОМ
ДЕФОРМИРОВАНИИ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

Редактор Л. М. Балькова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 30.11.85 г. Подписано в печать 16.12.85 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.
Печать высокая. Гарнитура литературная.
Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,6. Т. 500 экз.
Заказ 900. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.