



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В Г. БИШКЕКЕ (НС РАН)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР -
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН (МНИЦ - ГП)

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ**



**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ
В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

**18 - 20 апреля 2018 года
г. Бишкек**



**УДК 001
ББК 30.6
С56**

Ответственные редакторы:

Забинякова О.Б., Матюков В.Е., Имашев С.А.

Редакционная коллегия:

Лашин О.А., Чешев М.Е., Лисимов М.О., Саламатина Ю.М., Непеина К.С.

**С56 Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов
X Междунар. конф. молодых ученых и студентов. – Бишкек: НС РАН, 2018. – 430 с.**

ISBN 978-9967-12-728-9

В данный сборник включены материалы X Международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», которая была проведена Научной станцией РАН и Международным научно-исследовательским центром – геодинамическим полигоном в г. Бишкеке, Кыргызская Республика. В сборнике представлены работы молодых ученых и студентов из Кыргызстана, Узбекистана, Казахстана, Таджикистана и России, охватывающие исследования в области мониторинга геосреды, физики и механики горных пород, оценки сейсмического и геологического риска, математического моделирования различных процессов и других научных направлений.

Сборник может быть полезен студентам, аспирантам и специалистам, занимающимся исследованиями в области наук о Земле, механики и прикладной математики.

Издание сборника материалов конференции и иной печатной продукции осуществлялось при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (субсидия № 007-02-2018-653)

Утверждено к печати Ученым советом
ФГБУН НС РАН в г. Бишкеке

**УДК 001
ББК 30.6**

**С 2001000000-18
ISBN 978-9967-12-728-9**

©ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке

©Международный научно-исследовательский
центр - геодинамический полигон в г. Бишкеке

© Коллектив авторов, 2018

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Хохлова Ю. А.

Ch.ulenkakh_97@mail.ru

Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызская Республика

Научный руководитель:

*заведующий кафедрой механики Кыргызско-Российского Славянского университета,
д.ф.-м.н., проф. Рудаев Я.И.*

Аннотация: Рассматривается задача нагружения толстостенной алюминиевой трубы наружным давлением и растягивающей силой. Компоненты напряжений, скоростей деформаций и перемещений определяются с привлечением динамической модели, обобщенный на пространственный случай соотношениями теории упругопластических процессов малой кривизны.

Ключевые слова: сверхпластичность, толстостенная труба, алюминиевые сплавы, напряжение, скорость деформации, температура

Введение. Математическая постановка и строгое решение задач о развитом пластическом формоизменении, к которым относится процессы обработки металлов давлением, обусловлены физико-механической неоднородностью реализуемых операций. Технологические операции горячего объемного формование сопровождаются большими деформациями, неоднородностью и не стационарностью полей температур, напряжений и скоростей деформации, как в объеме деформируемого тела, так и в системе «инструмент – заготовка», существенно влияющих на формирование физико-механических свойств изделий и полуфабрикатов.

Естественной представляется попытка теоритически прогнозировать получение конечного продукта с качественными структурными показателями, в частности с мелкозернистой структурой. Такой тип структуры образуется при низком уровне напряжений в температурно-скоростных условиях сверхпластичности, особенности, проявление которых в промышленных алюминиевых сплавах изложены в [1]. При этом открывается возможность использовать эффект для разработки таких уникальных операций, как обжатие, раздача, волочение труб, автофритирование. Базовой здесь можно считать задачи об изотермической деформации толстостенной трубы при температуре сверхпластичности.

Постановка задачи. Бесконечная цилиндрическая труба постоянного сечения длиной $\bar{L}$ растягивается осевой силой $\bar{F}$ и подвергается внешнему давлению интенсивностью $\bar{q}$ (рисунок 1). Заданной считается скорость радиального перемещения наружной поверхности $\bar{V}_0$.

Рассмотрим задачу определение давления $\bar{q}$ и осевой силы $\bar{F}$ в зависимости от механических и кинематических параметров процесса деформирования.

Предполагается, что материалом трубы является алюминиевые сплавы, а напряжение осуществляется в изотермических условиях при температурах, не выходящих за рамки термического диапазона сверхпластичности [1].

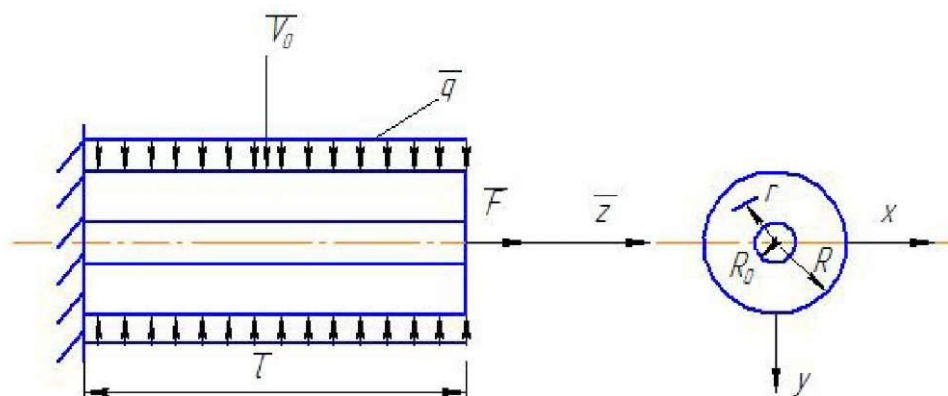


Рисунок 1 - Бесконечная цилиндрическая труба постоянного сечения длиной $\bar{L}$, растягиваемая осевой силой $\bar{F}$ и подвергаемая внешнему давлению интенсивностью $\bar{q}$

Решение задачи будем искать в рамках динамической модели [1], обобщенной на пространственный случай и использованием соотношений теории упругопластических процессов малой кривизны [2]. В цилиндрической системе координат (рисунок 1) основные уравнения будут иметь вид:

– дифференциальные уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\alpha}{r} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0; \quad (1.1)$$

– кинематические соотношения, устанавливающие связь между скоростями деформацией и перемещением

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial V_r}{\partial r}; \quad \dot{\epsilon}_\alpha = \frac{V_r}{r}; \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \quad \dot{\gamma}_{rz} = \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z}; \quad (1.2)$$

– условия не сжимаемости в скоростях

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0; \quad (1.3)$$

– определяющие соотношения [2]

$$\sigma_r - \sigma_0 = \frac{2\sigma_u}{3\dot{\epsilon}_u} \dot{\epsilon}_r; \quad \sigma_\alpha - \sigma_0 = \frac{2\sigma_u}{3\dot{\epsilon}_u} \dot{\epsilon}_\alpha; \quad \sigma_z - \sigma_0 = \frac{2\sigma_u}{3\dot{\epsilon}_u} \dot{\epsilon}_z; \quad \tau_{rz} = -\frac{\sigma_u}{3\dot{\epsilon}_u} \dot{\gamma}_{rz}; \quad (1.4)$$

– уравнения состояния в виде зависимости интенсивности напряжений оси, интенсивности скоростей деформаций [1]

$$\sigma_u = 1 - m_0 - \beta + (3m_0 + \beta)\dot{\epsilon}_u - 3m_0\dot{\epsilon}_u^2 + m_0\dot{\epsilon}_u^3. \quad (1.5)$$

Здесь $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$ – соответственно составляющие тензоров напряжений и скоростной деформаций; V_i – компоненты вектора скорости перемещений; σ_0 – среднее напряжение; m_0 – материальная постоянная; β – управляющий параметр (при сверхпластичности $\beta < 0$); компоненты напряжений и скоростей деформаций предполагаются поделенными на альтернативные внутренние параметры состояния $\sigma^*, \dot{\epsilon}^*$, а скорости перемещений на $\dot{\epsilon}^* R$. Заметим, что в изотермических условиях параметры $\beta, \sigma^*, \dot{\epsilon}^*$ принимают постоянные значения.

Введем следующие безразмерные параметры

$$q = \frac{\bar{q}}{\sigma^*}; \quad F = \frac{\bar{F}}{A\sigma^*}; \quad V_0 = \frac{\bar{V}_0}{\dot{\epsilon}^* R}; \quad z = \frac{\bar{z}}{R}; \quad r = \frac{\bar{r}}{R}; \quad \lambda = \frac{R_0}{R}; \quad A = \pi R^2(1 - \lambda^2), \quad l = \frac{\bar{L}}{R}. \quad (1.6)$$

Задача подобного типа рассмотрена в [3, 4] и решена методами, традиционными для теории обработки металлов давлением, при этом предполагается отсутствие сдвигающих сил на наружной поверхности трубы. Последнее приводит к приемлемости гипотезы плоских

сечений. Иными словами, показано, что скорость перемещения V_z может считаться линейной функцией абсциссы z . Далее будем полагать, что линейность функции скорости продольных перемещений в рассматриваемом здесь случае вполне оправдана тем, что сверхпластичность в сечениях трубы возникает при невысоких значениях осевой силы F [5].

Наружное давление будем считать результатом контакта поверхности трубы с инструментом, скорости перемещения которого равняется V_0 . В связи со сказанным возникновения на наружной поверхности трубы контактных сил не вызывает сомнений. Влияние указанных сил будем учитывать введением в компоненту скорости продольного перемещения радиального составляющего в форме

$$V_z = b[z - \psi(\rho)], \quad (1.7)$$

где $\psi = \psi(\rho)$ – неизвестная функция, подлежащая определению; b – материальная константа

К определению функции $\psi(\rho)$. Рассмотрим условие не сжимаемости (1.3). Если учесть, что на основании (1.7) производная $\frac{\partial V_z}{\partial z} = b$, уравнения (1.3) примет вид

$$\frac{dV_\rho}{d\rho} + \frac{V_\rho}{\rho} + b = 0. \quad (2.1)$$

Решение уравнения (2.1) при выполнении условия $V_\rho|_{\rho=1} = -V_0$ запишем так

$$V_\rho = \frac{b}{2\rho}(C - \rho^2), \quad (2.2)$$

где постоянная интегрирования определяется выражением

$$C = 1 - \frac{2V_0}{b}. \quad (2.3)$$

При известной скорости радиального смещения (2.2) компоненты скоростей деформаций (1.2) будут равны

$$\dot{\varepsilon}_\rho = -\frac{b}{2\rho^2}(C + \rho^2); \quad \dot{\varepsilon}_\alpha = \frac{b}{2\rho^2}(C - \rho^2); \quad \dot{\varepsilon}_z = b; \quad \dot{\gamma}_{\rho z} = -b\psi'(\rho). \quad (2.4)$$

Интенсивность скоростей деформации определяются формулой

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{b}{\sqrt{3}} \left[\frac{C^2}{\rho^4} + 3 + \psi'^2(\rho) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.5)$$

или

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{b}{\sqrt{3}} L^{\frac{1}{2}}(\rho), \quad (2.6)$$

где

$$L(\rho) = \left[\frac{C^2}{\rho^4} + 3 + \psi'^2(\rho) \right]. \quad (2.7)$$

Перейдем теперь к определяющим соотношениям (1.4). Представим их с привлечением (2.4) в виде

$$\begin{aligned} \sigma_\rho - \sigma_0 &= -\frac{1}{3}bT(\rho)\left(1 + \frac{C}{\rho^2}\right); & \sigma_\alpha - \sigma_0 &= -\frac{1}{3}bT(\rho)\left(1 - \frac{C}{\rho^2}\right); \\ \sigma_z - \sigma_0 &= \frac{2}{3}bT(\rho); & \tau_{\rho z} &= -\frac{1}{3}bT(\rho)\psi'(\rho), \end{aligned} \quad (2.8)$$

где через $T = T(\rho)$ обозначено

$$T(\rho) = \frac{\sqrt{3}}{b}(1 - m_0 - \beta)L^{-\frac{1}{2}}(\rho) + 3m_0 + \beta - \sqrt{3}m_0bL^{\frac{1}{2}}(\rho) + \frac{m_0}{3}b^2L(\rho). \quad (2.9)$$

Перейдем теперь непосредственно к задаче установления вида $\psi(\rho)$.

Рассмотрим второе дифференциальное уравнение равновесия (1.1). Перепишем его так

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = -\frac{\partial \tau_{pz}}{\partial \rho} - \frac{\tau_{pz}}{\rho}. \quad (2.10)$$

Подставим в (2.10) последнюю зависимость (2.8) и получим

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{1}{3}b \left[T'\psi' + T(\psi'' + \frac{\psi'}{\rho}) \right], \quad (2.11)$$

здесь и далее $T' = T'(\rho)$, $\psi = \psi(\rho)$.

Интеграл уравнения (2.11) вычислим при граничных условиях

$$\sigma_z|_{z=0} = F. \quad (2.12)$$

Имеем

$$\sigma_z = \frac{1}{3}b \left[T'\psi' + T(\psi'' + \frac{\psi'}{\rho}) \right] z + F. \quad (2.13)$$

При известном напряжении σ_z несложно определить величину среднего напряжений σ_0 . На основании формулы (2.8) получим

$$\sigma_0 = \sigma_z - \frac{2}{3}bT', \quad (2.14)$$

или, принимая во внимание (2.13),

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}b \left\{ \left[T'\psi' + T(\psi'' + \frac{\psi'}{\rho}) \right] z + \frac{3F}{b} - 2T' \right\}. \quad (2.15)$$

Обратимся теперь к первому дифференциальному уравнению равновесия (1.1).

Подставляем в него зависимость (3.8) и, решая относительно $\frac{\partial \sigma_0}{\partial \rho}$, можем записать

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial \rho} = bT'(1 + \frac{C}{\rho^2}). \quad (2.16)$$

Продифференцировав по ρ выражение (2.15) и приравняв его к (2.16), будем иметь

$$\left[T''\psi'' + T'\psi'' + T'(2\psi'' + \frac{\psi'}{\rho}) + T(\psi''' + \frac{\psi''}{\rho} - \frac{\psi'}{\rho^2}) \right] z - T'(3 + \frac{C}{\rho^2}) = 0. \quad (2.17)$$

Уравнение (2.17) должно удовлетворяться при всех значениях z . Поэтому можно положить

$$T''\psi'' + T'\psi'' + T'(2\psi'' + \frac{\psi'}{\rho}) + T(\psi''' + \frac{\psi''}{\rho} - \frac{\psi'}{\rho^2}) = 0; \quad (2.18)$$

$$T' = 0. \quad (2.19)$$

При удовлетворении условия (2.19) уравнения для определения функции $\psi = \psi(\rho)$ примет вид

$$\psi''' + \frac{\psi''}{\rho} - \frac{\psi'}{\rho^2} = 0. \quad (2.20)$$

Интеграл уравнения (2.20) будет равен

$$\psi(\rho) = \frac{C_1}{2}\rho^2 + C_2 \ln \rho + C_3, \quad (2.21)$$

где C_1, C_2, C_3 – произвольная постоянная интегрирования.

К постоянным, подлежащим определению, относятся также константа b и величина C , для которой имеем (2.3).

С учетом решения (2.21) составляющие напряжений на основании (2.8), (2.15) запишем так

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{b}{3} \left\{ \left[T'(C_1 \rho + \frac{C_2}{\rho}) + 2TC_1 \right] z - 3T - \frac{C}{\rho^2} + \frac{3F}{b} \right\}; \\ \sigma_\alpha &= \frac{b}{3} \left\{ \left[T'(C_1 \rho + \frac{C_2}{\rho}) + 2TC_1 \right] z - 3T + \frac{C}{\rho^2} + \frac{3F}{b} \right\}; \\ \sigma_z &= \frac{b}{3} \left\{ \left[T'(C_1 \rho + \frac{C_2}{\rho}) + 2TC_1 \right] z + \frac{3F}{b} \right\}; \\ \tau_{rz} &= -\frac{b}{3} T'(C_1 \rho + \frac{C_2}{\rho}),\end{aligned}\tag{2.22}$$

здесь, как и выше, $T = T(\rho)$ определяется формулой (2.9).

Граничные условия запишутся в виде

$$\tau_{rz}|_{\rho=\lambda} = 0; \quad \sigma_r|_{\rho=\lambda} = 0; \quad \tau_{rz}|_{\rho=1} = -\chi \tau_{\max}; \quad \sigma_r|_{\rho=1} = -q,\tag{2.23}$$

где $\tau_{\max}$ – максимальное касательное напряжение на наружной поверхности трубы; χ – коэффициент пропорциональности, определенный экспериментально.

Удовлетворения граничных условий позволит оценить напряженное состояние, возникшее в толстостенной трубе.

Литература

1. Рудаев Я.И. Введение в механику динамической сверхпластичности. Бишкек: КРСУ. 2003. 134 с.
2. Гунн Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия. 1980. 456 с.
3. Рудской А.И., Рудаев Я.И. Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов. СПб: Наука. 2009. 217 с.
4. Рудаев Я.И., Сулайманова С.М., Тамбаев Ч.К. Теория обратного выдавливания в режимах сверхпластичности // НТВ СПб ГПУ. 2010. № 1 (94). С. 91-102.
5. Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение. 1983. 200 с.