

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,  
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՄՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ ՄԻՀՐԱՆ ԱՌՆԱԿԻ

ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԳԼԱՆԱԶԵՎ ՄԵՔԵՆԱՄԱՍԵՐԻ ՊԼԱՍՏԻԿ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՄԱՐ  
ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՈՒՄԸ

Ե.02.01 - <<Մեքենագիտություն>> մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների  
թեկնածուի զիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2023

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ,  
КУЛЬТУРЫ И СПОРТА РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

МАРГАРЯН МИГРАН АРНАКОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ  
СПЕЧЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПЛАСТИЧЕСКОЙ  
ДЕФОРМАЦИЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.02.01 - “Машиноведение”

ЕРЕВАН 2023

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի գիտական խորհրդի կողմից

**Գիտական ղեկավար՝** տ.գ.դ., պրոֆեսոր Գևորգ Լյուդվիկի Պետրոսյան  
**Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝** տ.գ.դ. Կորյուն Աշոտի Կարապետյան,  
տ.գ.թ. Մարտին Գալերիկի Արզումանյան

**Առաջատար կազմակերպություն՝** Երևանի պետական համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 11 դեկտեմբերի 2023թ. - ին, ժ. 11:00 ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող 034 մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2023թ - ի նոյեմբերի 10 - ին

034 Մասնագիտական խորհրդի  
Քարտուղար՝ տ.գ.թ., դոցենտ



Մ.Գ. Հարությունյան

---

Тема диссертации утверждена Ученым советом Национального политехнического университета Армении (НПУА)

**Научный руководитель:** д.т.н., профессор Геворг Людвилович Петросян  
**Официальные оппоненты:** д.т.н. Корюн Ашотович Карапетян  
к.т.н Мартин Галерикович Арзуманян

**Ведущая организация:** Ереванский государственный университет

Защита состоится 11-го декабря 2023г. в 11:00 ч. на заседании Специализированного совета 034, действующего при Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 10-го ноября 2023г.

Ученый секретарь Специализированного  
совета 034 к.т.н., доцент



М.Г. Арутюнян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** При исследовании технологических процессов обработки спеченных материалов давлением важное значение имеют задачи пластического формования цилиндрических деталей машин. Для решения задачи с учетом пористости материалов существуют достаточно сложные уравнения теории текучести пористых материалов (ТТПМ) и упрощенные уравнения деформационной теории пластичности (ДТПМ), созданные Г.Л. Петросяном.

Проблемы пластического формования цилиндрических деталей машин были решены Г.Л. Петросяном и Г.В. Мусаеляном с использованием как аналитических методов, основанных на уравнениях ТТПМ, так и метода конечных элементов (МКЭ). Однако эти решения довольно сложны, нуждаются в упрощении и затратны по времени. Следовательно, моделирование процессов пластического формования спеченных цилиндрических деталей машин в автоматизированной программной среде (АПС) “ABAQUS”, а также исследование и совершенствование решения задач аналитическим методом на основе ДТПМ имеет актуальное значение.

**Цель и задачи диссертации.** Целью диссертации является исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрических деталей машин из спеченного материала в процессе их формования в конической пресс-форме путем компьютерного моделирования и с использованием упрощенных аналитических методов.

Исходя из цели работы, были поставлены и решены следующие задачи:

1. Определение компонентов НДС процесса экструзии спеченных цилиндрических стержней в конической матрице при различных значениях противодавления с учетом упрочнения материала аналитическим методом и в АПС “ABAQUS”, а также сопоставление полученных результатов с данными эксперимента.

2. Аналитическое исследование задач пластического деформирования тонкостенных труб в конической матрице, в частности, исследование волочения труб с различной начальной пористостью и экструзии труб, нагруженных высоким внутренним давлением.

3. Моделирование в АПС “ABAQUS” процесса экструзии цилиндрических стержней на трех участках пресс-формы при различных углах конусности матрицы.

4. Расчет значений изменения пористости по формулам ДТПМ, сравнение и анализ полученных данных.

5. Исследование НДС процессов открытой прошивки спеченных образцов круглого сечения и деформированного состояния начального неустановившегося процесса экструзии ступенчатого круглого стержня путем компьютерного моделирования.

**Методы исследования.** Исследования НДС процессов формования пластического деформирования цилиндрических деталей машин (под давлением стержней и труб) из спеченных материалов проводились упрощенными аналитическими методами и компьютерным моделированием в АПС “ABAQUS”. Численные расчеты были выполнены в программной среде MS EXCEL.

Для изучения аналитическими методами процессов обработки цилиндрических образцов под давлением использовались формулы ДТППМ и метод тонких сечений. При этом задачи решались с безразмерными величинами напряжений, что дает возможность, имея значения пределов текучести материалов образцов, определять реальные величины пластического деформирования любых твердых, а также спеченных материалов.

**Научная новизна.** В процессе исследования были получены результаты, отличающиеся существенной новизной:

1. Разработан метод определения компонентов напряжённого состояния процесса экструзии с противодавлением в конической матрице цилиндрического упрочняемого спеченного стержня, смоделированного в АПС “АВАQUS”, и выявлены особенности процесса прессования при большом противодавлении.

2. Аналитическим методом на основе формул ДТППМ и с применением безразмерных величин напряжений при наличии и отсутствии трения исследованы напряжённые состояния процессов волочения тонкостенных пористых труб и экструзии трубы, нагруженной высоким внутренним давлением.

3. Впервые в АПС “АВАQUS” разработаны методы определения компонентов напряжённого состояния и текущей пористости в следующих процессах:

- экструзии биметаллического стержня с наружной тонкостенной пористой трубой при больших значениях предела текучести внутреннего стержня (450, 550 и 650 МПа);
- экструзии спеченного цилиндра в пресс-форме из трех частей (контейнер, матрица с различными углами конусности  $\alpha$ , калибровочная часть). Это позволяет оценить роль калибровочной части пресс-формы и влияние  $\alpha$  на величины компонентов НДС;
- открытой прошивки сплошных и пористых образцов круглого сечения.

4. Разработан метод определения компонентов деформированного состояния начального неустановившегося процесса экструзии ступенчатого круглого стержня, смоделированного в АПС “АВАQUS”, и изменения начальной пористости материала по формулам ДТППМ.

#### ***Практическое значение работы***

1. Исследование процесса экструзии пакета, состоящего из спеченного образца с начальной пористостью 20% и высоким значением противодействия (800 МПа), помещенного в цилиндрическую оболочку, показало, что можно получить полностью уплотненный материал, что экспериментально возможно путем прессования вышеуказанного пакета, помещенного на шайбу. Данный материал можно будет в дальнейшем применять в соответствующих технологических процессах.

2. Детальное изучение процесса экструзии спеченной заготовки круглого поперечного сечения позволяет получить стержни переменной пористости в зависимости от их радиуса, которые можно будет применять в различных отраслях современной промышленности.

3. Показано, что в случае прошивки цилиндра из спеченного материала результаты определения пористости  $\nu$ , полученные в АПС и аналитическим методом, качественно описывают процесс уплотнения спеченного материала. Эти результаты

позволяют при проектировании технологического процесса прогнозировать полученные характеристики. Предлагается осуществить равномерное перемещение материала под пуансоном с использованием пуансона, состоящего из трех жестких цилиндрических частей, оказывающих три разных давления.

4. Данные о распределении компонентов деформированного состояния начального неустановившегося процесса экструзии ступенчатого круглого стержня ранее были получены на ЭВМ ЕС 1022 с помощью программного средства, составленного на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV, и используются для получения высококачественных композиционных материалов, армированных однонаправленными волокнами. Однако зоны компонентов деформированного состояния неполные. Путем моделирования в АПС были получены все данные о деформированном состоянии, а также данные для важнейшей контактной зоны технологического процесса. Показано, что в центральной зоне радиусом, равным половине радиуса образца, опасных деформаций скольжения намного меньше, чем в области контакта с матрицей, т.е. в этой зоне должно быть установлено армирование однонаправленными волокнами.

#### ***Основные положения, выносимые на защиту:***

1. Методика определения в АПС “ABAQUS” компонентов НДС процесса экструзии спеченных цилиндрических стержней в конической пресс-форме при различных значениях противодействия, а также определения текущей пористости упрочняемого материала  $\nu$  по формулам ДТППМ, обоснование получения уплотненных стержней путем подбора больших противодействий и сравнением полученных результатов с экспериментальными данными.

2. Упрощенный аналитический метод исследования процесса волочения тонкостенных цилиндрических труб при наличии и отсутствии трения, а также процесса экструзии труб, нагруженных высоким внутренним давлением, путем предварительного моделирования процесса прессования биметаллических стержней в конической матрице в АПС “ABAQUS”.

3. Алгоритм и результаты моделирования в АПС “ABAQUS” процессов пластического деформирования спеченных цилиндрических стержней, а именно - процесса экструзии с учетом разных углов конусности матрицы и выявления особенностей в трех участках пресс-формы, процесса открытой прошивки жестким пуансоном и начального состояния неустановившегося процесса экструзии ступенчатого круглого стержня.

***Апробация результатов работы и публикации.*** Научные результаты и основные положения диссертации были доложены и обсуждены на:

- ежегодных конференциях НПУА (Ереван, 2017, 2019гг.);
- Международной научно-технической конференции “Машиностроение и технопромышленность XXI века” (Донецк, 2017г.).

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в девяти (9) научных работах, список которых представлен в конце автореферата.

***Структура и объем диссертации.*** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 96 наименований и двух приложений. Основной текст изложен на 102 страницах, а вместе с приложениями на – страницах, включает 75 рисунков и 13 таблиц. Диссертация написана на армянском языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены методы исследования, научная новизна работы, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ литературы по теме диссертации, изучены методы решения задач прессования с противодавлением сплошных и спеченных стержней в конической матрице, основанные на обобщенной характеристике напряженного состояния – напряжении Мизеса, с помощью которого формируется важнейшее условие пластичности (УП) сплошных материалов, выраженное главными напряжениями  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_h, \quad (1)$$

где  $\sigma_h$  - предел текучести сплошных материалов.

На основании (1) создано УП пористых материалов:

$$\sqrt{0,5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} + v_0^m (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 = \sigma_{hv},$$

где  $\sigma_{hv}$  - предел текучести пористых материалов:

$$\sigma_{hv} = (1 - v)^{(n+0.5)} \sigma_h; \quad (2)$$

$v_0$  – начальная пористость материала;  $m$  и  $n$  – параметры пористости.

В ДТППМ текущая пористость спеченного материала определяется по формуле

$$v = 1 - (1 - v_0) \exp\left(-\frac{9v_0^m \sigma_0 \varepsilon_{eq0}}{(1-v)^{3n} \sigma_{eq0}}\right), \quad (3)$$

где  $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  – среднее напряжение;  $\sigma_{eq0}$  и  $\varepsilon_{eq0}$  – эквивалентные напряжения и деформации.

Для решения задач экструзии стержней с противодавлением необходимо также иметь уравнение равновесия (УР) их элементов. Для этого предполагается, что осевые силы  $p_z$  в поперечном сечении круглого стержня распределены равномерно, а его радиальное  $\sigma_r$  и окружное  $\sigma_\theta$  напряжения равны:  $\sigma_\theta = \sigma_r$ .

Обсуждаются также особенности определения напряжений и деформаций аналитическим методом при волочении сплошных и спеченных труб.

УР элемента, выделенного главными сечениями из осесимметрично нагруженной оболочки вращения, имеют следующий вид:

$$\frac{d}{dr} (\sigma_m r h) - \sigma_\theta h + \frac{p_m r}{\sin \alpha} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = -\frac{p_v}{h}, \quad (5)$$

где  $\sigma_m$  - меридиональное напряжение;  $\rho_m, \rho_\theta$  - радиусы кривизны меридионального сечения оболочки и сечения конической поверхности, перпендикулярной его дуге;  $r$  - радиус окружности в сечении, перпендикулярном оси оболочки;  $h$  - толщина стенки оболочки;  $p_m, p_v$  - силы, распределенные в меридиональном и нормальном направлениях;  $\alpha$  – угол конусности матрицы.

Учитывая влияние внутреннего давления  $p_r$ , а также принимая во внимание, что на внутренней и внешней поверхностях трубы возникают тангенциальные напряжения  $p_m = f p_v$ , получены следующие УР при  $h = const$ :

$$\frac{d}{dr} (\sigma_m r) - \sigma_\theta + \frac{2p_m}{\sin 2\alpha} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\rho_{\theta}} = -\frac{p_v - p_r}{h} - \frac{p_v + p_r}{2\rho_{\theta}}. \quad (7)$$

Во второй главе на основании данных компонентов напряженного состояния контура и оси по 10 узлам образца, полученного моделированием цилиндрического стержня в АПС “АВАQUS”, при  $v_0=0,2$  и противодавлении  $t = 0, 120, 400$  и  $800$  Мпа с помощью формулы ДТППМ определены изменения величины  $v_0$  и обосновано получение уплотненных стержней выбором больших противодавлений. На рис. 1 представлены зоны  $\sigma_{\theta}$  и  $\sigma_m$  при противодавлении  $t = 800$  МПа. При этом приближенное значение  $\sigma_m$  видно в нижней части осевого сечения модели прессования.

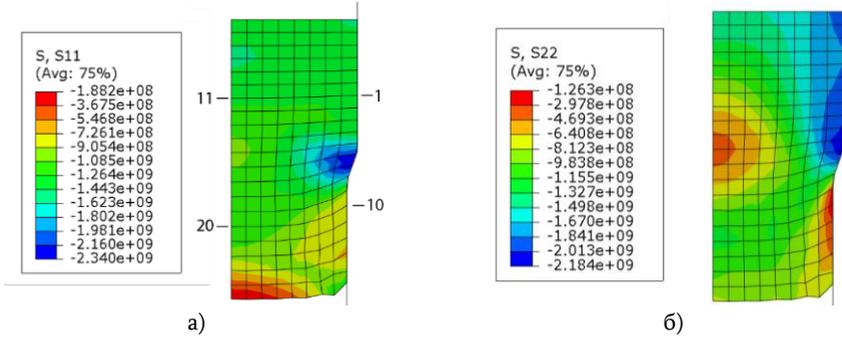


Рис. 1. Зоны  $\sigma_{\theta}$  (а) и  $\sigma_m$  (б) при  $t=800$  МПа

Отметим, что при моделировании в АПС “АВАQUS” по формуле (3) ДТППМ были получены значения всех компонентов напряженного состояния и  $v$ . На рис. 2 приведены графики окружных напряжений  $\sigma_{\theta}$  для 10 узлов контура деформированного очага образца: кривая 1 -  $t = 0$ , кривая 2 -  $t = 400$  МПа, а кривая 3 -  $t = 800$  МПа. Как видно, на границе очага деформации образца возникает концентрация напряжений сжатия  $\sigma_{\theta}$ , значения которых существенно выше соответствующих напряжений на оси. При  $t=800$  МПа наибольшее окружное напряжение сжатия наблюдается в седьмом узле:  $\sigma_{\theta 7} \approx -2340$  МПа.

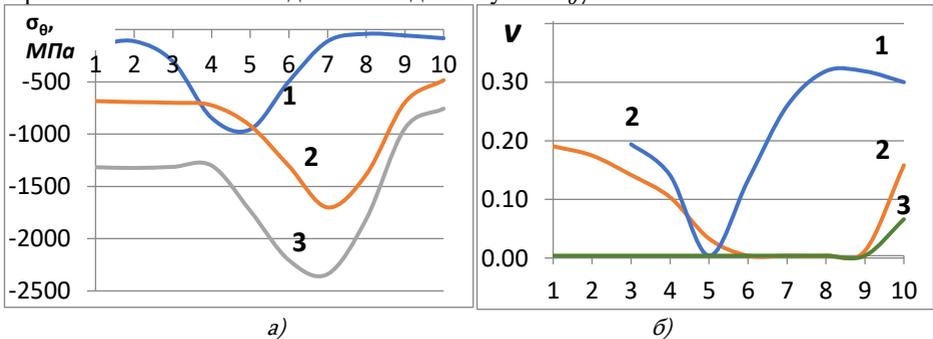


Рис. 2. Графики  $\sigma_{\theta}$  (а) и  $v$  (б) по контуру образца для узлов 1-10

На рис. 2 показаны также графики  $v$ , из которых видно, что при  $t=800$  МПа значения пористости в узлах от 1 до 9 по контуру деформированного очага образца становятся нулевыми, что подтверждается экспериментальными данными.

**Третья глава** посвящена исследованию упрощенными аналитическими методами процессов волочения цилиндрических тонкостенных труб и экструзии труб, нагруженных высоким внутренним давлением, а также их моделированию в АПС “АВАКУС”.

**1. Проблема волочения тонкостенных труб при наличии трения.** Используя УР (4) и (5) при  $h = const$  и приближенное УП Мизеса, получаем следующую систему уравнений:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_m r) - \sigma_\theta(1 + k_1) = 0, \quad \sigma_m - \sigma_\theta = m_1 \sigma_h, \quad (8)$$

где  $k_1 = f \operatorname{ctg} \alpha$ ;  $f$  – коэффициент трения;  $m_1$  – коэффициент У. Джонсона.

Константа интегрирования дифференциального уравнения определяется из следующего краевого условия:  $r = r_0$ ,  $\sigma_m = 0$ , где  $r_0$  – радиус трубы в сечении при входе в матрицу. В результате для  $\sigma_m$  и его безразмерной величины  $\bar{\sigma}_m$  получаются следующие формулы:

$$\sigma_m = m_1 \sigma_h \left( \frac{1}{k_1} + 1 \right) \left( 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^{k_1} \right), \quad \bar{\sigma}_m = \left( 1 + \frac{1}{k_1} \right) \left( 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^{k_1} \right). \quad (9)$$

Безразмерное окружное напряжение согласно (8) имеет вид

$$\bar{\sigma}_\theta = \bar{\sigma}_m - 1, \quad (10)$$

где  $\bar{\sigma}_m = \sigma_m / m_1 \sigma_h$  и  $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / m_1 \sigma_h$ , а для пористых материалов, используя формулу (2), получим:

$$\bar{\sigma}_m = \sigma_m / m_1 (1 - v)^{(n+0.5)} \sigma_h, \quad \bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / m_1 (1 - v)^{(n+0.5)} \sigma_h.$$

**При отсутствии трения** используется дифференциальное УР (8). Принимая  $k_1=0$ , получим

$$\frac{d}{dr}(\sigma_m r) - \sigma_\theta = 0. \quad (11)$$

Из уравнений (8) УП сначала определим  $\sigma_\theta$ . Подставив его в УР (11), путем постепенного преобразования и интегрирования получим

$$\sigma_m = m_1 \sigma_h \ln \frac{r_0}{r}, \quad \bar{\sigma}_m = \ln \frac{r_0}{r}. \quad (12)$$

Численные расчеты выполнялись в программной среде MS EXCEL для следующих заданных параметров процесса экструзии:  $m_1 = 1,1$ ,  $r_1 = 20$  мм,  $r_0 = 40$  мм,  $\alpha = 14^\circ$  и параметров пористости:  $m=1$  и  $n=0,25$ . Отметим, что численные расчеты дальнейших задач в основном выполнялись с использованием приведенных выше исходных данных.

На рис. 3 показаны графики  $v - \varepsilon_{eq}$  в случае исходной пористости материала тонкостенной трубы  $v_0 = 0,05$  и  $0,1$  при коэффициентах  $k_1 = f \operatorname{ctg} \alpha$  и  $f$  трения:  $f=0$  (кривые 1 и 3) и  $f=0,1$  (кривые 2 и 4).

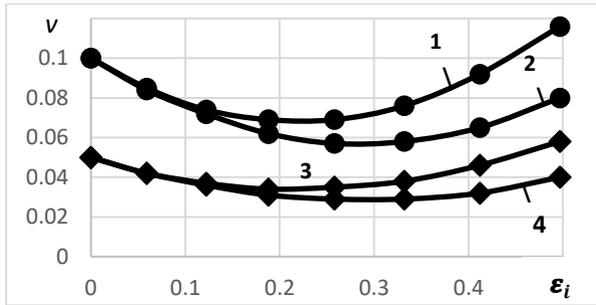


Рис. 3. Графики  $v - \epsilon_i$  в процессе волочения труб с начальной пористостью  $v_0 = 0,05$  и  $0,1$  при  $f=0$  (кривые 1 и 3) и  $f=0,1$  (кривые 2 и 4)

Показано, что в сечениях конической части трубы  $v_0$  постепенно изменяется: во входных сечениях уменьшается, а в выходных - увеличивается. Причем при учете трения пористости  $v$  становятся соответственно  $0,058$  и  $0,116$ .

2. Для решения упрощенным аналитическим методом задачи экструзии трубы, нагруженной внутренним высоким давлением, при наличии и отсутствии трения в АПС “ABAQUS” проведено моделирование процесса экструзии биметаллических стержней с наружной тонкостенной трубой в конической матрице. В трубе внутреннее давление  $p_r$  возникает из-за деформации стержня внутри нее. Показано, что при больших значениях предела текучести внутреннего стержня ( $450, 550$  и  $650$  МПа) по отношению к пределу текучести внешней трубы ( $\sigma_h = 350$  МПа) различия между соответствующими зонами и максимальными напряжениями внешней трубы  $\sigma_r = S11$  и  $\sigma_\theta = S33$  незначительны ( $\sigma_r = -1133$  МПа,  $\sigma_\theta = -1222$  МПа). Следовательно, напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  можно принять равными (рис.4)

$$\sigma_r = \sigma_\theta. \quad (13)$$

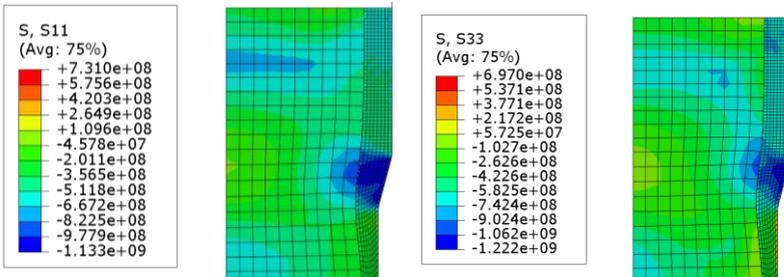


Рис.4. Данные процесса экструзии биметаллического стержня с пределом текучести внутреннего стержня 650 МПа

Из-за сложности задачи экструзии трубы, нагруженной внутренним высоким давлением, и с учетом (13) примем, что давления  $p_v$  и  $p_{r1}$ , действующие на внешнюю трубу, равны, т.е.  $p_v = p_{r1}$ . В таком случае из (7) получим

$$\sigma_{\theta 1} = -p_v = -p_{r1}. \quad (14)$$

При прессовании тонкостенной трубы главные напряжения будут

$$\sigma_1 = -\sigma_m < 0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_\theta = -p_v = -p_r < 0, \quad (15)$$

на основании значений которых УП (1) примет следующий вид:

$$\sigma_\theta = \sigma_m - \sigma_h. \quad (16)$$

Решив уравнение равновесия (6) с УП (16), получим формулы для определения компонентов НДС при **экструзии** в конической матрице тонкостенной трубы, **нагруженной высоким внутренним давлением**.

**Решение задачи с учетом наличия трения при  $f \neq 0$ , т.е. в (6):  $p_m = fp_v$ .** При прессовании тонкостенной трубы система уравнений для решения задачи примет вид

$$\begin{cases} r \frac{d\sigma_m}{dr} + \sigma_m - \sigma_\theta(1+k) = 0, \\ \sigma_\theta = \sigma_m - \sigma_h, \end{cases} \quad (17)$$

где  $k = 2f/\sin 2\alpha$ .

Отметим, что константа, возникающая при интегрировании дифференциального уравнения, определяется в случае отсутствия осевых сил в сечении при выходе из матрицы:

$$r = r_1, \quad \sigma_m = 0. \quad (18)$$

В результате для  $\sigma_m$  и его безразмерной величины  $\bar{\sigma}_m$  получаются следующие формулы:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h(1+k)}{k} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_1} \right)^k \right], \quad \bar{\sigma}_m = \frac{(1+k)}{k} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_1} \right)^k \right]. \quad (19)$$

**Решение задачи с учетом отсутствия трения при  $f = 0$ .** Отметим, что при наличии трения ( $k \neq 0$ ) из общей формулы (19) для определения полученного меридионального напряжения  $\bar{\sigma}_m$  невозможно решить формулу в случае отсутствия трения ( $k = 0$ ), так как коэффициент  $k$  находится в знаменателе.

Поэтому, пользуясь системой уравнений (17) для решения задачи при  $k = 0$ , получим

$$r \frac{d\sigma_m}{dr} + \sigma_h = 0. \quad (20)$$

Для решения задачи, постепенно видоизменяя и интегрируя уравнение равновесия (20), получим формулу для определения меридионального напряжения  $\sigma_m$ :

$$\bar{\sigma}_m = \ln \left( \frac{r_1}{r} \right). \quad (21)$$

Показано, что при отсутствии трения формула (21) также получается путем преобразования формулы меридионального напряжения  $\sigma_m$  (19), получения экспоненциальной функции и преобразования ее в ряд.

На рис.5 приведены полученные данные по безразмерным величинам компонентов НДС в зависимости от интенсивности деформации.

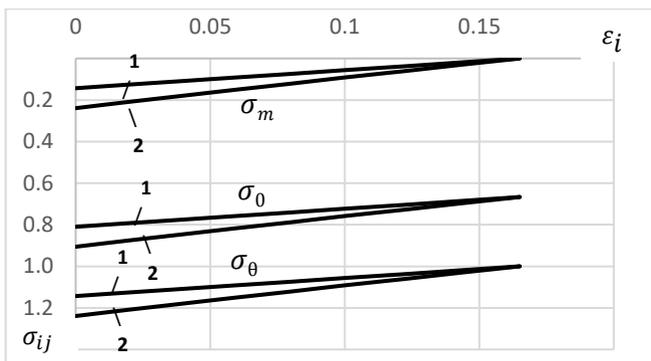


Рис.5. Данные безразмерных величин компонентов НДС в зависимости от интенсивности деформаций: 1 – при отсутствии трения ( $f=0$ ), 2 – при наличии трения ( $f=0,15$ )

**В четвертой главе** в АПС “АВАQUS” изучено распределение величин компонентов НДС и пористости в задачах экструзии цилиндрических стержней при углах конусности матрицы  $\alpha = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ , а также обсуждены особенности учета трех частей пресс-формы (контейнера, матрицы и калибровочной части).

**1. Исследование процесса экструзии цилиндрических пористых образцов при различных углах конусности матрицы.** На рис. 6 показаны зоны пористости материала при  $\alpha = 30^\circ$  и графики распределения в поперечном сечении основных компонентов НДС стержня при  $\alpha = 15^\circ$  на входе и выходе из матрицы. На графиках видно равенство окружного  $\sigma_\theta$  и радиального  $\sigma_r$  напряжений, что принято при решении задач аналитическим методом.

Следует отметить, что абсолютные значения напряжений при входе в матрицу намного больше, чем при выходе из нее. Кроме того, все напряжения в точках контакта с матрицей отрицательные, а на оси - в основном положительные.

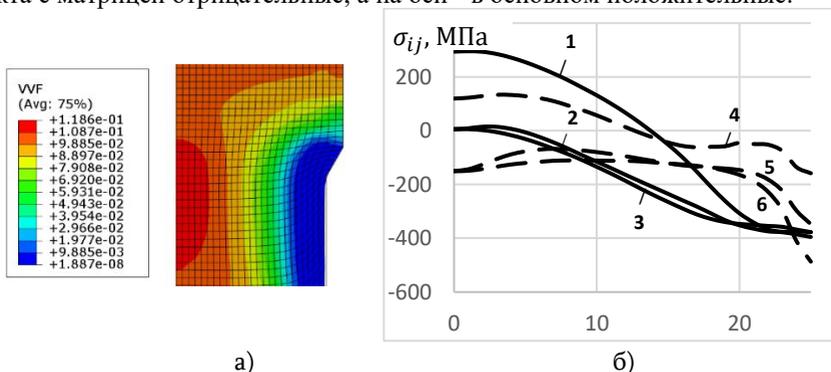


Рис. 6. а - зоны вв АПС при  $\alpha = 30^\circ$ ; б - графики напряжений при  $\alpha=15^\circ$  на входе в матрицу (1- $\sigma_z$ , 2- $\sigma_r$ , 3- $\sigma_\theta$ ) и выходе из нее (4- $\sigma_z$ , 5- $\sigma_r$ , 6- $\sigma_\theta$ )

Сравнительные данные значений пористости при различных углах конусности  $\alpha$  матрицы показывают (рис. 7), что при больших значениях  $\alpha$  процесс уплотнения материала протекает более интенсивно.

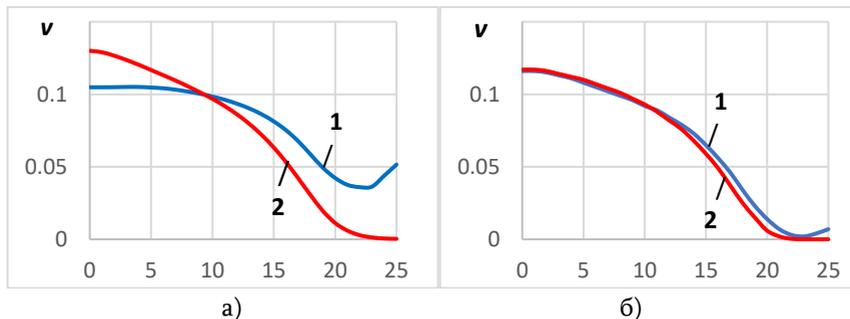


Рис. 7. Изменение значения  $v$  в поперечном сечении на входе (1) и выходе (2) из матрицы: а) при  $\alpha = 20^\circ$  б) при  $\alpha = 30^\circ$

При использовании процесса экструзии с углом конусности  $\alpha = 30^\circ$  внешняя поверхность образца полностью уплотняется -  $v \approx 0$ , а пористость в центре увеличивается -  $v \approx 11,86\%$  и кривые 1 и 2 на рис.7б совпадают.

Фактически образец с начальной пористостью  $v_0 = 10\%$  при прессовании в матрице с конусностью  $\alpha = 30^\circ$  превращается в стержень с переменной пористостью в зависимости от радиуса матрицы.

**2. Особенности учета трех частей пресс-формы (контейнера, матрицы и калибровочной части).** В контейнере для прессования зоны напряженности в основном простые, а значения напряжений - довольно низкие. Значения интенсивности деформаций и напряжений Мизеса, а также компонентов НДС в контактной зоне калибровочной части достаточно велики, за исключением малых касательных напряжений  $\tau_{rz}$  с разными знаками, которые распределяются в виде очагов.

На рис. 8 видны зоны окружного напряжения. Их величины в контейнере и калибровочной части довольно малы, а наибольшее значение они принимают в контактной части матрицы - 674 МПа.

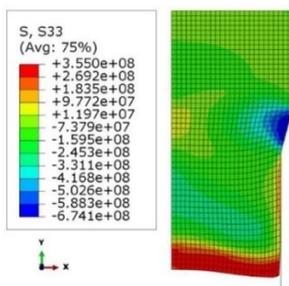


Рис. 8. Зоны распределения окружных напряжений  $\sigma_\theta = S33$

В контактной зоне калибровочной части значения пористости уменьшаются до нуля (рис. 9), т.е. материал полностью уплотняется, а в центральной части стержня значения пористости увеличиваются, т.е. получается стержень с переменной пористостью в зависимости от радиуса. Таким образом, из приведенных результатов видно, что при решении задачи прессования стержня в конической матрице очень важно изучать НДС не только в матрице, но и в калибровочной части.

Для объяснения процесса изменения пористости материала стержня используется формула ДТППМ по определению пористости (3), согласно которой при положительных средних напряжениях  $\sigma_0$  пористость материала увеличивается, а при отрицательных - уменьшается. При этом на значения пористости, кроме величин компонентов напряженного состояния, большое влияние оказывает также интенсивность деформаций  $\varepsilon_i$ . Это означает, что с помощью  $\sigma_0$  и  $\varepsilon_i$  можно регулировать пористость материала образца в калибровочной части, тем самым увеличивая или уменьшая длину калибровочной части. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о важности изучения процесса экструзии калибровочной части.

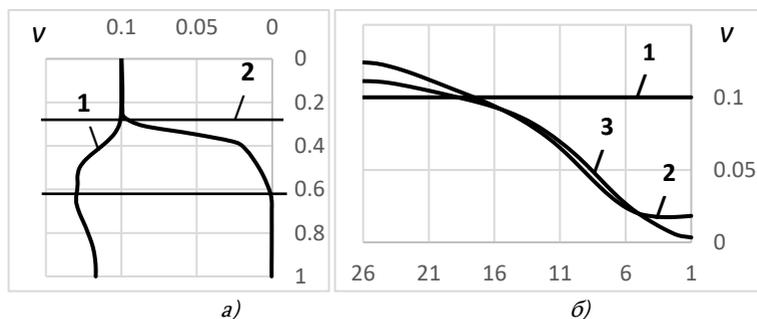


Рис. 9. Графики распределения пористости: а) 1 – по оси образца, 2 – по краю при  $\alpha = 15^\circ$  и б) на соответствующих линиях сетки при  $\alpha = 30^\circ$  (1 – контейнер, 2 – матрица, 3 – калибровочная часть)

**В пятой главе** в АПС “ABAQUS” проведено моделирование и исследование компонентов НДС процесса открытой прошивки цилиндрических образцов из сплошных и спеченных материалов. Получены зоны распределения текущей пористости материала  $v$  по формуле ДТППМ. Показано, что результаты определения пористости в АПС и аналитическим методом расчета качественно описывают процесс уплотнения спеченного материала. В результате решения задачи были получены все компоненты НДС при открытой прошивке цилиндра, когда происходит равномерное опускание материала цилиндра под жестким пуансоном. На рис. 9, на половине осевого сечения цилиндра, показаны зоны распределения интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  (PEEQ) и пористости материала  $v$  (VVF).

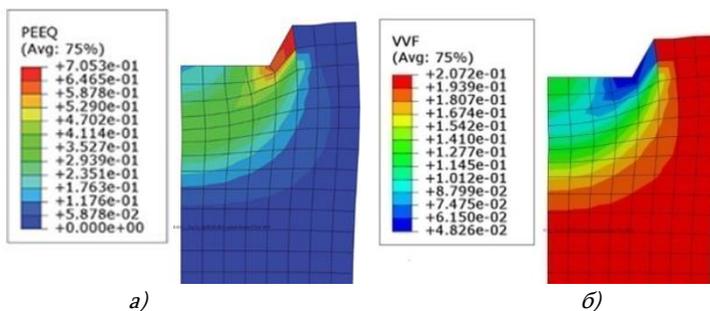


Рис.9. Данные зон  $\varepsilon_i$  (а) и  $v$  (б) при открытой прошивке цилиндра

Данные по зонам распределения пористости материала показывают, что процесс уплотнения материала под пуансоном осуществляется неравномерно (рис. 9), а у края пуансона величина начальной пористости материала  $v_0 = 0,2$  уменьшается до  $v_{min} = 0,048$ .

Для равномерного опускания материала образца рекомендуется использовать пуансон, состоящий из трех жестких цилиндрических частей, оказывающих различное давление.

**Моделирование начального (нестабилизованного) деформированного состояния процесса экструзии цилиндрического ступенчатого стержня из спеченного материала в АПС “АВАQUS”.** Ранее данные, рассчитанные на ЭВМ ЕС 1022, составленной на основе МКЭ на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV, использовались для получения высококачественных композиционных материалов, армированных однонаправленными волокнами. Эти вычисления происходили довольно медленно и не давали полного ответа на все вопросы. В отличие от этого, моделирование в АПС “АВАQUS” выполняется очень быстро и в полной мере. В частности, получены результаты для важнейшей контактной зоны технологического процесса.

По данным моделирования в АПС в семи узлах сечений на входе в матрицу и выходе из нее, а также в верхних и нижних элементах (рис. 10а) определены значения напряжения Мизеса, интенсивности деформаций и компонентов, а также пористости материала.

На рис. 10б показаны опасные деформации скольжения при входе в матрицу, которые очень велики по отношению к деформациям скольжения при выходе из матрицы и имеют обратный знак.

Другие данные, полученные в АПС, качественно совпадают с данными, полученными ранее.

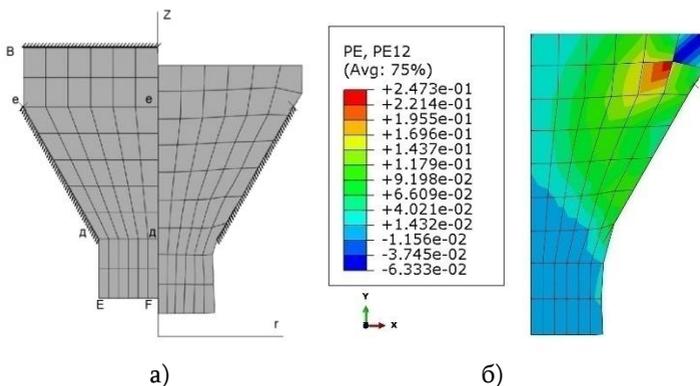


Рис.10. Схема компьютерного моделирования (а), зоны напряжения скольжения: 350 МПа (б)

На рис. 11а приведены графики: 1 - деформации скольжения, 2 - радиальной, 3 - окружной и 4 - осевой деформаций, построенные по данным элементов верхней части на входе в матрицу е-е, а на рис. 11б - графики изменения начальной пористости 16%, построенные по данным узлов сечений е-е на входе в матрицу и выходе из нее.

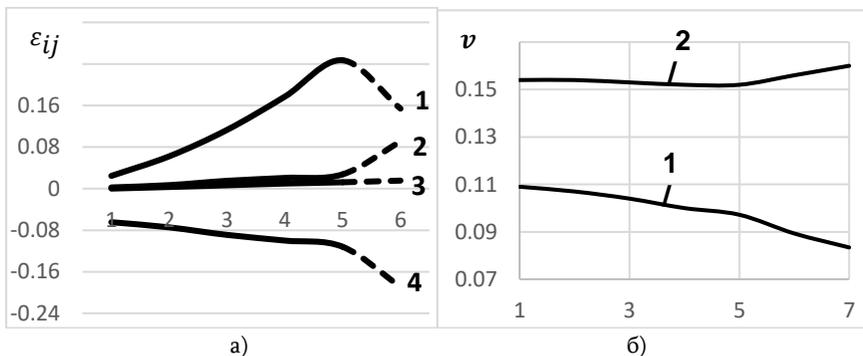


Рис.11. Графики компонентов деформированного состояния (а) и пористости узлов (б)

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Путем моделирования цилиндрического стержня в АПС “АВАКУС” при разных величинах противодействия получены данные компонентов напряженного состояния контура и оси по 10 узлам образца при  $v_0=0,2$  и противодействии  $t = 0, 120, 400$  и  $800$  Мпа, на основе которых аналитическим методом по формулам ДТШММ определены величины уменьшения начальной пористости материала. Показано, что

при противодавлении 800 МПа можно получить полностью уплотненный материал, что обосновано экспериментальными данными. При этом наибольшее окружное напряжение сжатия наблюдается в седьмом узле:  $\sigma_{\theta 7} \approx -2400$  МПа.

2. Аналитическими методами исследованы безразмерные величины компонентов НДС процессов волочения и экструзии тонкостенных труб из спеченного материала в конической матрице при высоком внутреннем давлении. Это позволило использовать формулы ДТППМ для изучения процессов уплотнения материала труб при различных значениях начальной пористости и коэффициентов трения.

- В случае волочения тонкостенной трубы начальная пористость материала равная  $v_0 = 0,05$  и  $0,1$  при коэффициентах трения:  $f = 0$  и  $f = 0,1$ . Показана, что в сечениях конической части трубы  $v_0$  постепенно изменяется: во входных сечениях уменьшается, а в выходных - увеличивается. Причем при учете трения значения пористости становятся соответственно  $0,058$  и  $0,116$ .

- В случае экструзии при высоком внутреннем давлении получены и интегрированы дифференциальные уравнения меридионального напряжения при наличии и отсутствия трения. При этом задача сначала полностью решается с учетом трения, а затем достаточно упрощенным методом – без учета трения. Это обусловлено тем, что в формуле для определения меридионального напряжения  $\sigma_m$  имеется коэффициент трения  $k$ , и невозможно непосредственно из общей формулы при наличии трения ( $k \neq 0$ ) определить величины меридионального напряжения  $\sigma_m$ , так как коэффициент  $k$  находится в знаменателе  $\sigma_m$ . Численные расчеты проводились в программной среде MS EXCEL с учетом отсутствия трения ( $f = 0$ ) и при значении коэффициента трения  $f = 0.15$ . Начальная пористость материала принята равной 10%, угол конусности матрицы - 15°. Определены безразмерные значения меридиональных, окружных и средних напряжений в зависимости от степени деформации трубы, а также значения изменения пористости материала по формулам ДТППМ. Данные представлены в виде графиков и таблиц. Полное уплотнение материала происходит при интенсивности деформации  $\varepsilon_i \approx 0,165$ . При этом моделирование процесса экструзии заготовки с учетом наличия и отсутствия трения осуществлялось в соответствующей конической матрице.

3. В АПС “АВАQUS” разработаны методы определения компонентов напряженного состояния и текущей пористости в следующих процессах:

- Процесс экструзии цилиндрических стержней из спеченного материала в пресс-форме с конической матрицей при  $\alpha = 15^\circ, 20^\circ$  и  $30^\circ$ . При  $\varphi = 15^\circ$  максимальные значения сжатия напряжений  $\sigma_\theta \approx \sigma_r$  получаются на близлежащих к входу конической матрицы участках, что совпадает с имеющимися в литературе данными. Полученные значения изменения пористости свидетельствуют о том, что пористость в поперечном сечении образца распределяется неравномерно: при угле конусности  $\varphi = 30^\circ$  и начальной пористости материала  $v_0 = 10\%$  в результате прессования внешняя поверхность образца полностью уплотняется -  $v \approx 0$ , а в центре пористость увеличивается -  $v \approx 11,8\%$ . Анализ распределения усреднённой пористости вдоль конической матрицы в деформированном образце при  $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  показал, что в случае  $\varphi = 30^\circ$  получается примерно равномерное

распределение средней пористости в деформированном образце - вдоль матрицы и при выходе из нее  $v_2 = 6,5\%$ .

- Выявление особенностей учета трех частей пресс-формы (контейнера, матрицы и калибровочной части) в процессе экструзии цилиндрических стержней. Поля напряжений в контейнере в основном простые и имеют небольшие значения. Осевые напряжения в контактной зоне немного увеличиваются и распределены неравномерно. В контактной зоне калибровочной части значения компонентов НДС довольно велики. Возле контактной зоны калибровочной части значения пористости уменьшаются, достигая нуля, т.е. стержень полностью уплотняется, а у оси значения пористости увеличиваются: получается стержень с переменной пористостью. Результаты показывают важность изучения калибровочной части в процессе прессования.

- Процесс экструзии биметаллического стержня с наружной тонкостенной пористой трубой. Показано, что в задаче экструзии при больших значениях предела текучести внутреннего стержня (450, 550 и 650 МПа) по отношению к пределу текучести внешней трубы ( $\sigma_h = 350$  МПа) различия между соответствующими зонами и максимальными напряжениями внешней трубы  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  незначительны ( $\sigma_r = -1133$  МПа,  $\sigma_\theta = -1222$  МПа).

- Процесс открытой прошивки цилиндрических образцов из сплошных и спеченных материалов путем прошивки абсолютно жестким пуансоном. Данные по зонам распределения пористости материала показывают, что процесс уплотнения материала под пуансоном осуществляется неравномерно, а у края пуансона величина начальной пористости материала  $v_0 = 0,2$  уменьшается до  $v_{min} = 0,048$ . Предлагается осуществить равномерное перемещение материала под пуансоном с использованием пуансона, состоящего из трех жестких цилиндрических частей, оказывающих три разных давления.

**4.** Разработан метод определения компонентов деформированного состояния начального неустановившегося процесса экструзии ступенчатого круглого стержня, смоделированного в АПС “ABAQUS”, и изменения начальной пористости материала по формулам ДТППМ, которые используются для получения высококачественных композиционных материалов, армированных однонаправленными волокнами. Путем моделирования в АПС были получены все данные о деформированном состоянии. Из компонентов деформированного состояния наибольшими являются деформации сдвига (0,247) на контактной поверхности при входе в матрицу и осевые сжимающие деформации (-0,19), вследствие чего начальная пористость материала (16%) уменьшается до 8,3%. Показано, что в центральной зоне с радиусом, равным половине радиуса образца ( $r \approx 0,5 R$ ), опасных деформаций сдвига намного меньше, чем в области контакта с матрицей.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих статьях:**

1. **Պետրոսյան Գ.Լ., Խաչատրյան Հ.Հ., Պետրոսյան Հ.Գ., Մարգարյան Մ.Ա.** Կոնական մամլամայրում գլանական եռակաված ձողի հակաճնշմամբ մամլման գործընթացի «ABAQUS»-ով մոդելավորումը // ՀԱՊՀ-ի Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. – Երևան, 2015. N2. – էջ 295-301:
2. **Петросян Г.Л., Хачатрян Г.Г., Сафарян М.Б., Петросян А.Г., Маргарян М.А.** Моделирование процесса прессования круглого стержня в конической матрице в условиях больших противодавлений // Вестник НПУА: Механика, машиноведение, машиностроение. – Ереван, 2015. – N1. – С. 26-35.
3. **Պետրոսյան Գ.Լ., Մարգարյան Մ.Ա., Գալոյան Հ.Ա.** Հոծ և եռակաված կլոր հատույթով նմուշների բաց միջասեղման գործընթացի համակարգչային մոդելավորումը // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխնիկական գիտությունների սերիա. – 2017. – Հատոր 70, N3. – էջ 259-271:
4. **Պետրոսյան Գ.Լ., Մարգարյան Մ.Ա., Վարդանյան Գ.Գ., Բարսյան Ա.Ա.** Բարակապատ եռակաված խողովակի կոնական մամլամայրում կորզանման գործընթացի հետազոտումը // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխնիկական գիտությունների սերիա. 2019. – Հատոր 72, N1. – էջ 5-14:
5. **Маргарян М.А.** Компьютерное моделирование процесса прессования круглого спеченного образца в конических матрицах // Известия НАН РА и НПУА. Серия технических наук. – 2020. – Том 73, №3. – С. 44-53.
6. **Петросян Г.Л., Бабалян А.А., Маргарян М.А.** Компьютерное моделирование и аналитическое исследование процесса экструзии тонкостенной трубы, нагруженной внутренним высоким давлением // Вестник НПУА: Механика, Машиноведение, Машиностроение. – Ереван, 2020. – №2. – С. 9-22.
7. **Պետրոսյան Գ.Լ., Պետրոսյան Հ.Ա., Մարգարյան Մ.Ա., Բարսյան Ա.Ա.** Եռակաված ասիիճանաձև կլոր ձողի արտամղման գործընթացի դեֆորմացիոն վիճակի համակարգչային մոդելավորումը // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխնիկական գիտությունների սերիա. – 2022. – Հատոր 75, N1. – էջ 5-15:
8. **Մարգարյան Մ.Ա.** Եռակաված գլանի երեք մասերից բաղկացած մամլակաղապարում մամլման գործընթացի ԼԴԿ հետազոտումը // ՀՀ Ճարտարագիտական ակադեմիայի Լրաբեր. – 2021. – Հատոր 18, N2. – էջ 223-231:
9. **Маргарян М.А.** Об одном подходе к аналитическому решению задачи экструзии труб при наличии внутреннего высокого давления // Известия НАН РА, Сер. Механика. – Ереван, 2022. – Т. 75, №3. – С. 55-63.

## ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ ՄԻՆԸՆ ԱՌՆԱԿԻ

### ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԳԼԱՆԱԶԵՎ ՄԵՔԵՆԱՄԱՍԵՐԻ ՊԼԱՍՏԻԿ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՄԲ ԶԵՎԱԿՈՐՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՈՒՄԸ

#### ԱՍՓՈՓԱԳԻՐ

Եռակալված նյութերի ճնշման միջոցով մշակման տեխնոլոգիական գործընթացների հետազոտման բնագավառում շատ կարևոր են գլանական մեքենամասերի պլաստիկ ձևավորման խնդիրները, որոնք բավականին բարդ են և քիչ ուսումնասիրված: Ատենախոսությունը նվիրված է եռակալված գլանաձև մեքենամասերի պլաստիկ դեֆորմացմամբ ձևավորման գործընթացների պարզեցված վերլուծական և համակարգչային մոդելավորման մեթոդներով հետազոտմանը, ինչը բավականին արդիական է:

**Ատենախոսության նպատակն է** եռակալված նյութից գլանաձև մեքենամասերի կոնական մամլակաղապարում պլաստիկ դեֆորմացմամբ ձևավորման գործընթացների համակարգչային մոդելավորմամբ և վերլուծական պարզեցված մեթոդներով լարվածադեֆորմացիոն վիճակի (ԼԴՎ) հետազոտումը ու կատարելագործումը:

**Նախաբանում** հիմնավորվել է խնդրի արդիականությունը, ձևակերպվել են հետազոտության նպատակն ու խնդիրները, ներկայացվել են հետազոտման մեթոդները, աշխատանքի գիտական նորոյթը, գործնական նշանակությունը և պաշտպանությանը ներկայացվող հիմնական դրույթները:

**Առաջին գլխում** կատարվել է ատենախոսության թեմայի վերաբերյալ գրականության վերլուծություն: Ուսումնասիրվել են կոնական մամլամայրում եռակալված ձողերի հակաճնշմամբ մամլման խնդիրների լուծման մշակված մեթոդները, ինչպես նաև քննարկվել են հոծ և եռակալված խողովակների մամլման դեպքում վերլուծական մեթոդով լարումների և դեֆորմացիաների որոշման առանձնահատկությունները:

**Երկրորդ գլխում** «ABAQUS» ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում (ԱՕՄ)  $t = 0, 120, 400, 800 \text{ ՄՊա}$  հակաճնշման դեպքերում մոդելավորմամբ ստացված նմուշի դեֆորմացված օջախի եզրագծի և առանցքի 10 հանգույցների լարվածային վիճակի բաղադրիչների տվյալների հիման վրա վերլուծական մեթոդով ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության (ՄՆՊՄՏ) բանաձևերով որոշվել են նյութի սկզբնական ծակոտկենության փոքրացման մեծությունները և դրանց օգտագործմամբ հիմնավորվել է մեծ հակաճնշումների ընտրությունը (400 և 800 ՄՊա), որոնց օգտագործմամբ կարելի է ստանալ փոքր ծակոտկենության և ամբողջապես խտացված նյութ, ինչը հիմնավորվում է փորձնականորեն:

**Երրորդ գլուխը** նվիրված է գլանական բարակապատ խողովակների կորզանման և ներքին բարձր ճնշումով բեռնավորված արտամղման գործընթացների վերլուծական պարզեցված մեթոդներով ԼԴՎ չափագուրկ մեծություններով հետազոտմանը: Դրանք հնարավորություն են տվել օգտագործելով ՄՆՊՄՏ բանաձևերը տարբեր սկզբնական ծակոտկենությունների և շփման գործակիցների դեպքերում ուսումնասիրել խողովակների նյութի խտացման գործընթացները:

Բավականին բարդ արտամղման խնդրի լուծման համար նախօրոք կատարվել է կոնական մամլամայրում երկմետաղական ձողերի «ABAQUS» ԱՕՄ-ում մամլման

գործընթացի մոդելավորում՝ դրանց ներքին ձողի տարբեր հոսունության սահմաններ ունեցող չամրացվող հոծ նյութերի դեպքերում, որոնք արտաքին բարակապատ խողովակների համար առաջացնում են ներքին ճնշում: Ներքին ձողերի հոսունության սահմանների որոշակի մեծ արժեքների դեպքերում ստացվել են արտաքին խողովակի Միգեսի լարումների և ԼԴՎ բաղադրիչների գոտիների տեսքերը և թվային տվյալները: Դրանց հիման վրա ցույց է տրվում, որ խողովակի շրջանային և շառավղային լարումները հավասար են:

**Չորրորդ գլխում** «ABAQUS» ԱՕՄ – ում գլանական ձողերի մամլման խնդիրներում ԼԴՎ բաղադրիչների և ծակոտկենության մեծությունների բաշխվածությունները ուսումնասիրվել են մամլամայրի կոնականության  $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  անկյունների դեպքերում, ինչպես նաև քննարկվել են մամլակապարի կոնտեյնների, մամլամայրի ու չափաբերման մասի հաշվառման առանձնահատկությունները:

$\varphi = 15^\circ$  - ի դեպքում  $\sigma_\theta \approx \sigma_r$  լարումների սեղմող մաքսիմում արժեքներ ստացվում են կոնական մամլամայրի մուտքին մոտ հատույթներում, ինչը համընկնում է գրականությունում հայտնի փորձարարական տվյալների հետ:

$\varphi = 30^\circ$  - ի դեպքում  $v_0 = 10\%$  սկզբնական ծակոտկենության նմուշի արտաքին մակերևույթը լրիվ խտանում է, իսկ կենտրոնում այն մեծանում է:

Կոնտեյններում լարվածային դաշտերը հիմնականում պարզ և փոքր արժեքներով են: Չափաբերման մասի հպակային գոտում Միգեսի լարումների և դեֆորմացիաների ինտեսիվության արժեքները բավականին մեծ են, ինչպես նաև մեծ արժեքներ ունեն առանցքային, շրջանային և շառավղային լարումները, իսկ ներքևի հատվածում առաջանում է շրջափող լարումների օջախ: Չափաբերման մասի հպակային գոտում մոտ ծակոտկենության արժեքները բավականին փոքրանում են, հասնելով 0-ի, այսինքն նյութն ամբողջությամբ խտանում է, իսկ առանցքում ծակոտկենության արժեքները մեծանում են . այսպիսով ստացվում է շառավղից կախված փոփոխական ծակոտկենությամբ ձող: Կարելի է նշել, որ կոնական մամլակաղապարում ձողի մամլման խնդիրը լուծելիս շատ կարևոր է ուսումնասիրել ԼԴՎ ոչ միայն մամլամայրում, այլ նաև չափաբերման մասում:

**Հինգերորդ գլխում** «ABAQUS» ԱՕՄ-ում մոդելավորվել են հոծ և եռակալված նյութերից գլանական նմուշների բացարձակ կոշտ մամլամատով բաց միջատեղման և գլանական աստիճանաձև ձողի արտամղման սկզբնական (չկայունացված) դեֆորմացիոն վիճակը:

**Գլանի բաց միջատեղման դեպքում** քննարկվել են միայն առաջին պլաստիկ դեֆորմացման առաջացման արդյունքները և դրանք բավականին լավ համընկնում են գրականությունում նշված տվյալների հետ: Մամլամատի տակ նմուշի նյութի հավասար տեղափոխման համար առաջարկվում է օգտագործել շառավղի ուղղությամբ երեք տարբեր ճնշում հաղորդող երեք կոշտ գլանական մասերից բաղկացած մամլամատ:

Եռակալված նյութից գլանական աստիճանաձև ձողի արտամղման գործընթացի սկզբնական դեֆորմացիոն վիճակի «ABAQUS» ԱՕՄ-ում մոդելավորումը իրականացվում է բացարձակ կոշտ մամլամատին *3-in* վերտիկալ ուղղությամբ տեղափոխություն հաղորդման դեպքում: ԱՕՄ-ում մոդելավորմամբ ստացվել են արդյունքներ տեխնոլոգիական գործընթացի ամենակարևոր հպակային գոտու համար: Ցույց են տրվել, որ ամենավտագավորը մամլամայր մտնելու գոտու մամլամայրի հետ հպակային մասի սահքի դեֆորմացիաներն են, որոնք աստիճանաձև ձողի արտամղման գործընթացի

դեպքում դրա կենտրոնական մասի  $r = 0,5R$  գոտում շատ փոքր են: Ընդ որում, մամլամայրից դուրս գալու գոտում սահքի դեֆորմացիաները բավականին փոքր են մամլամայր մտնելու գոտու տվյալների նկատմամբ: Նշենք, որ «ABAQUS» ԱՕՄ-ում ստացված արդյունքների մեծ մասը դրակապես համընկնում են ՅBM EC 1022-ի վրա ՓՕՄՄԱԻՎ-IV ալգորիթմական լեզվով կազմված ծրագրով հաշվարկած տվյալների հետ:

**Mihran Arnak Margaryan**

**RESEARCH AND IMPROVEMENT OF PROCESSES OF  
PLASTIC FORMING OF CYLINDRICAL MACHINE PARTS FROM  
SINTERED MATERIAL**

**SUMMARY**

In the field of research on technological processes of pressure processing of sintered materials, the tasks of plastic molding of cylindrical parts of machines, which are quite complex and little studied, are of great importance. The dissertation is devoted to the study of plastic deformation (DP) forming processes of sintered cylindrical machine parts using simplified analytical methods and computer modeling, which is highly relevant.

**The purpose of the dissertation** is to study the stress-strain state (SSS) of the processes of forming cylindrical machine parts from sintered material in a conical extrusion press by computer modeling and using simplified analytical methods.

**In the introduction**, the relevance of the problem is substantiated, the purpose and objectives of the research are formulated, the research methods, scientific novelty of the work, the practical significance and the main arguments for the defense are presented.

**In the first chapter**, an analysis of the literature on the topic of the dissertation was conducted. The developed methods for solving the problems of pressing sintered rods with back pressure in a conical matrix are considered, as well as the features of the analytical method for determining stresses and deformations during the extrusion of solid and sintered pipes.

**In the second chapter**, in order to obtain SSS components, the process of extrusion of round samples was modeled in ABAQUS CAE under different counter pressures of  $t = 0, 120, 400$ , and  $800$  MPa. The values of the reduction of the initial porosity of the material were determined using the Plastic deformation theory of porous materials (PDTPM) analytical method, and the choice of large counter pressures ( $400$  and  $800$  MPa) was justified. These counter pressures allow for obtaining small porosity and fully compacted material, which is supported experimentally.

**The third chapter** is devoted to the investigation of the processes of drawing cylindrical thin-walled pipes and extrusion of pipes loaded with high internal pressure using simplified analytical methods. In this case, dimensionless values of SSS components were used, enabling the use of PDTPM formulas with different values of initial porosity and friction coefficients and study the processes of compaction of the pipe material.

To solve a rather complex extrusion problem, the modeling of the process of extrusion of bimetallic rods in conical matrices was performed in ABAQUS CAE in cases of unreinforced solid

materials with different yield limits of the inner rod, which creates internal pressure for external thin-walled pipes. In cases of certain large values of the yield limits of the internal rods, types and numerical data of the Mises stresses of the outer pipe and zones of the SSS components were obtained. Based on them, it was shown that the circumferential and radial stresses of the pipes are equal.

**In the fourth chapter**, the distribution of the values of the components of SSS and porosity in the problems of extrusion of cylindrical rods was obtained in ABAQUS CAE, at the conicity angles of the matrix  $\alpha = 15^\circ, 20^\circ$  and  $30^\circ$ . Additionally, the features of calculating the components of the press-form, including the container, matrix, and calibration part, were discussed.

At  $\alpha = 15^\circ$ , the maximum values of stresses  $\sigma_\theta$  and  $\sigma_r$  are obtained in sections close to the entrance to the conical matrix, which coincides with the experimental data known in the literature.

At  $\alpha = 30^\circ$ , the outer surface of the sample with initial porosity  $v_0 = 10\%$  is completely compacted, while it increased in the center.

Stress zones in the container are mostly represented by simple and small values. In the contact zone of the calibration part, the values of the SSS components are quite large. Porosity values near the contact zone of the calibration part decrease significantly, reaching 0, which means the material is completely compacted, while the values of the porosity along the axis increase, resulting in a rod with variable porosity depending on the radius. It should be noted that when solving the task of pressing a rod in a conical matrix, it is very important to study SSS not only in the matrix but also in the calibration part of the press-form.

**In the fifth chapter**, SSS of open piercing of cylindrical rods made of solid and sintered materials with an absolutely rigid punch and the initial (unstabilized) state during the extrusion of stepped cylindrical rods were modeled in ABAQUS CAE.

In the case of open piercing of a cylinder, only the results of the occurrence of the first plastic deformation were discussed, and they coincide quite well with the data indicated in the literature. For the uniform movement of the sample material under the punch, it is suggested to use a punch consisting of three rigid cylindrical parts that exert different pressure.

The modeling of the initial (unstabilized) deformation state of the process of extrusion of a cylindrical stepped rod from sintered material in ABAQUS CAE is carried out when an absolutely rigid punch of vertical displacement of 3 mm is applied.

Results of the technological process for the most important contact zone were obtained by modeling in ABAQUS CAE. It was shown that the most dangerous are the sliding deformations in the contact part in the zone of the entrance to the matrix. At the same time, the sliding deformation in the zone  $r = 0.5R$  of its central part and the exit from the matrix is quite small compared to the data in the zone of the entrance to the matrix. It is worth noting that most of the results obtained in ABAQUS CAE qualitatively coincide with the data calculated on the ES EVM 1022, with a program compiled in the FORTRAN-IV algorithmic language.

