

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ КРУГЛОГО  
СТЕРЖНЯ В КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ  
ПРОТИВОДАВЛЕНИЙ**

**Г.Л. Петросян<sup>1</sup>, Г.Г. Хачатрян<sup>2</sup>, М.Б. Сафарян<sup>1</sup>,  
А.Г. Петросян<sup>1</sup>, М.А. Маргарян<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Национальный политехнический университет Армении*  
<sup>2</sup>*ООО "Саймотек"*

В автоматизированной программной среде (АПС) "ABAQUS" проведено моделирование процесса прессования цилиндрического спеченного стержня в конической матрице в условиях больших противодавлений. Для определения текущей пористости материала использован упрощенный метод, разработанный авторским коллективом, и обоснован выбор величин больших противодавлений. На основе анализа полученных данных компонентов напряженного состояния и численных результатов пористости материала сформулированы некоторые особенности процесса прессования. Проведены соответствующие экспериментальные исследования, в результате чего получены прессовки, сопоставлением которых доказана правильность выбора методики решения данной задачи.

**Ключевые слова:** цилиндрический стержень, прессование, большое противодавление, спеченный материал, пористость, напряжение Мизеса.

**Введение.** В [1] проведен анализ основных результатов работ авторского коллектива в АПС "ABAQUS". Процесс прессования спеченного стержня моделирован как при отсутствии ( $t = 0$ ), так и при наличии ( $t = 80, 160$  и  $240$  МПа) противодавлений. Получены картины изменения напряжений и деформаций. Для случаев прессования при  $t = 0$  и  $240$  МПа из этих картин измерены соответствующие напряжения и деформации и построены графики их изменения.

Процесс прессования цилиндрического спеченного стержня в конической матрице исследован в АПС с использованием метода [2], разработанного для решения задач аналитическими методами: определение напряжений в АПС сначала осуществляется моделированием по схеме компактного материала, имеющего различные пористости; далее, используя упрощенную формулу определения пористости [2] деформационной теории пластичности пористых материалов (ДТПМ) [3], определяются значения пористости для различных

точек деформированного стержня и произведен анализ полученных результатов. Показано, что при величине противодействия  $t = 240 \text{ МПа}$  в некоторых деформируемых узлах конической части образца исходная пористость 20% уменьшается до нулевых значений. При выходе из конического участка пористость этого уплотненного материала повышается до 22%, т.е. превосходит начальное значение. В случае отсутствия противодействия величина пористости превращается в ноль только в одном узле конической части и в дальнейшем возрастает до 32%. Сказанное является доказательством справедливости выводов об описании процесса прессования с противодействием в конической матрице, а также результатов аналитического решения задачи процесса прессования с безразмерным противодействием [4,5]. Приведенные в [4] результаты технологических испытаний также обосновывают продуктивность процесса прессования с противодействием. Однако ответов на ряд вопросов до сих пор не получено. Особенно это касается процесса общего уплотнения материала, что представляется возможным при проведении исследований в условиях высоких давлений. Эти исследования немногочисленны, так как являются достаточно сложными. Исходя из вышесказанного, представленные в работе вопросы весьма актуальны.

**Целью данной работы** является определение компонентов напряженного состояния процесса прессования в конической матрице стержня круглого сечения в условиях больших противодействий в АПС “ABAQUS”, выявление особенностей учета пористости материала и проведение соответствующих экспериментальных исследований.

**Исходные данные при решении задачи прессования стержня круглого сечения с большими противодействиями.** При моделировании процесса прессования в программной среде SIMULIA (ABAQUS) были приняты следующие исходные данные: диаметр стержня  $D_0 = 24 \text{ мм}$ , диаметр после прессования – 22 мм, коэффициент вытяжки –  $\lambda = D_0^2 / d^2 = 1,19$ , коэффициент скольжения –  $f = 0,1$ , угол конусности матрицы –  $\varphi = 20^\circ$ , количество точек сетки разделения конечных элементов – 189, тип четырехугольного элемента – SAХ4R в количестве 160 штук.

В случае, когда плотность исходного материала составляет  $8000 \text{ кг/м}^3$ , относительная плотность – 0,8 (которой соответствует исходная пористость материала  $v_0 = 0$ ), модуль Юнга – 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3, числовые данные диаграммы деформирования материала [1] аппроксимируем следующей степенной функцией:

$$\sigma_i = 350 + 700\varepsilon_i^{0,446} \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$  – интенсивности напряжений (напряжение Мизеса) и деформаций.

**Определение компонентов напряженного состояния процесса прессования с большим противодавлением в АПС “ABAQUS”.** Решение задачи осуществлялось для двух значений противодавлений:  $t = 400$  и  $800$  МПа. Отметим, что в этих случаях материал подвергался большим пластическим деформациям, особенно в случае  $t = 800$  МПа.

На рис. 1 в верхней части половины осевого сечения модели прессования с противодавлением показано перемещение материала, а в нижней части - действие противодавления. На рис. 2 приведены зоны окружных напряжений  $\sigma_\theta$  для случая противодавления  $t = 800$  МПа. Узлы 1 и 10 находятся на краевой части образца, а узлы 11 и 20 - на оси.

Следует отметить, что моделированием в среде АПС “ABAQUS” получены все зоны изменения компонентов напряженного состояния, с помощью которых построены соответствующие графики. При этом все компоненты напряжений являются сжимающими. На рис. 3 показаны зоны осевых напряжений при  $t = 800$  МПа. В нижней части диаметрального сечения модели прессования замечается приближенная величина противодавления, равная  $800$  МПа.

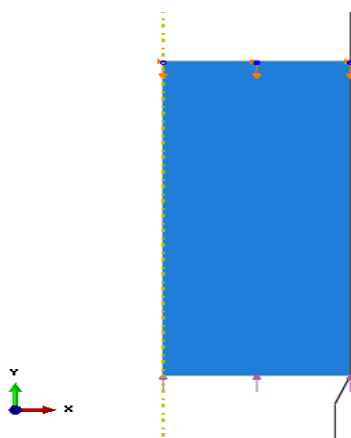


Рис. 1. Схема модели прессования с противодавлением

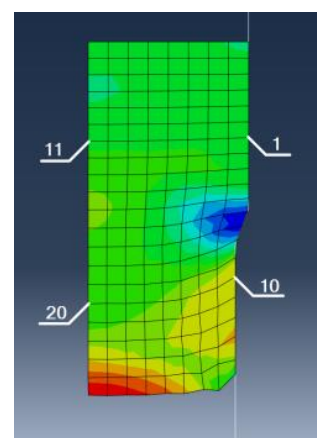


Рис. 2. Зоны  $\sigma_\theta$  при величине противодавления  $t = 800$  МПа с обозначением узлов 1, 10, 11 и 20

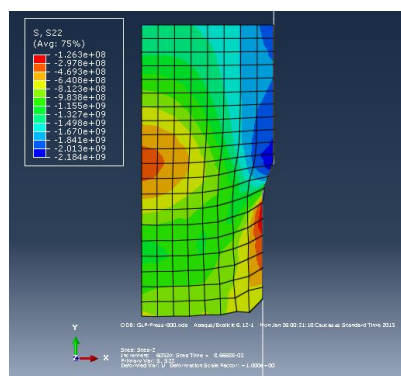


Рис. 3. Зоны осевых напряжений при противодавлении  $t = 800 \text{ МПа}$

На рис. 4 и 5 приведены графики окружных напряжений  $\sigma_\theta$  на краевой части модели и на 10 узлах его осевой части. При отсутствии противодавления ( $t = 0$ ) им соответствует кривая 1 [1], при  $t = 400 \text{ МПа}$  - кривая 2, а при  $t = 800 \text{ МПа}$  - кривая 3. Как следует из графиков, на краевой части образца возникает концентрация сжимающих напряжений  $\sigma_\theta$ , величина которых значительно превышает соответствующие напряжения на осевой части. При  $t = 800 \text{ МПа}$  значения окружных сжимающих напряжений являются четырехзначными цифрами, из которых наименьшее значение наблюдается в узле 7, где  $\sigma_{\theta 7} \approx -2400 \text{ МПа}$ .

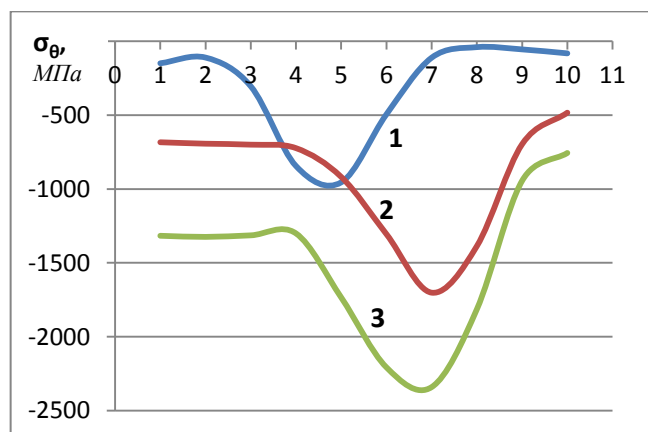


Рис. 4. Графики  $\sigma_\theta$  на краевой части образца в узлах 1...10

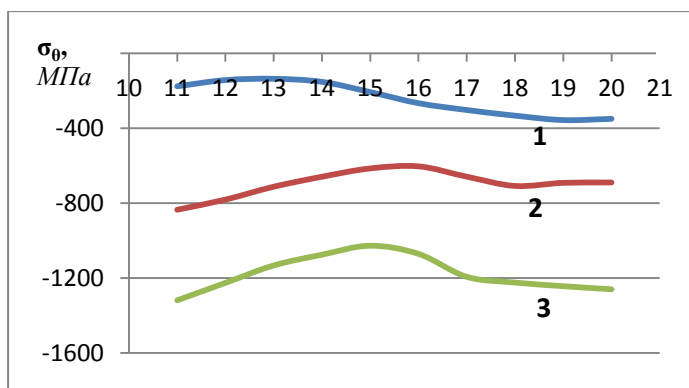


Рис. 5. Графики  $\sigma_\theta$  на оси в узлах 11...20

На рис. 6 показаны зоны напряжения Мизеса  $\sigma_i$  при величине противодействия  $t = 800$  МПа. В отличие от компонентов напряжения здесь имеются только положительные, малые по отношению к компонентам напряжений трехзначные цифры, что объясняется характером применяемой формулы Мизеса, записанной в главных напряжениях:

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

Отметим, что при дальнейшем увеличении величины противодействия процесс по характеру приближается к гидропрессованию (к приравнению главных напряжений), при котором величина напряжения Мизеса будет продолжать падать и в пределе превратится в ноль (процесс гидропрессования).

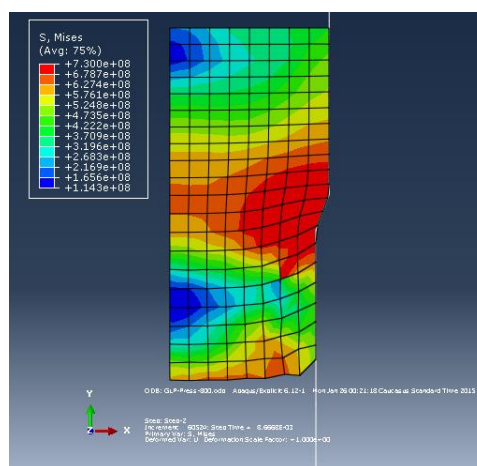


Рис. 6. Напряжения Мизеса при величине противодействия  $t = 800$  МПа

**Особенности учета пористости.** Для получения численных данных процесса уплотнения спеченного образца круглого сечения при прессовании в условиях больших противодавлений был использован метод, представленный в [1, 2].

В ДТГПМ наиболее простая формула для определения величины текущей пористости  $v$  [1,2] выражается через начальную пористость, интенсивности деформаций и напряжений, а также среднее напряжение:

$$\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 \quad (3)$$

и имеет следующий вид:

$$v = 1 - (1 - v_0) \exp(-9v_0^m \sigma_0 \varepsilon_i / \sigma_i). \quad (4)$$

В таблице приведены данные компонентов напряженного состояния при моделировании процесса прессования с противодавлением  $t = 800 \text{ МПа}$  в АПС “АВАQUS” и расчетные величины среднего напряжения  $\sigma_0$  и текущей пористости  $v$ .

Таблица

Численные значения процесса уплотнения при противодавлении 800 МПа

№ узла	$-\sigma_0, \text{ МПа}$	$-\sigma_z, \text{ МПа}$	$-\sigma_r, \text{ МПа}$	$\sigma_i, \text{ МПа}$	$\varepsilon_i$	$-\sigma_0, \text{ МПа}$	$v$
1	1317	1901	1556	585	0,0865	1591	0
2	1324	1946	1603	622	0,1206	1624	0
3	1314	1997	1651	660	0,1606	1654	0
4	1301	2031	1695	699	0,2098	1675	0
5	1734	2184	2038	725	0,2470	1985	0
6	2206	2150	2348	730	0,2541	2235	0
7	2340	1841	2295	730	0,2542	2158	0
8	1813	1092	1607	730	0,2542	1504	0
9	944	229	664	730	0,2542	612	0
10	757	126	403	632	0,1302	429	0,0622
11	1318	810	1302	508	0,0356	1144	0,0758
12	1225	679	1232	556	0,0642	1045	0,0057
13	1132	542	1129	597	0,0966	934	0
14	1075	448	1060	622	0,1204	861	0
15	1027	394	1035	637	0,1357	819	0
16	1071	439	1057	629	0,1272	856	0
17	1193	587	1166	601	0,1005	982	0
18	1224	753	1233	492	0,0279	1070	0,1078
19	1243	976	1259	306	-	1159	0,2
20	1260	1173	1292	145	-	1241	0,2

На рис. 7 показаны графики изменения величин пористости на 10 узлах контура деформированного очага образца. При отсутствии противодействия ( $t = 0$ ) им соответствует кривая **1** [1], при  $t = 400 \text{ МПа}$  – кривая **2**, а при  $t = 800 \text{ МПа}$  – кривая **3**. Таким образом, при противодействии  $t = 800 \text{ МПа}$  в узлах 1...9 на контуре деформированного очага образца значения величин пористости превращаются в ноль.

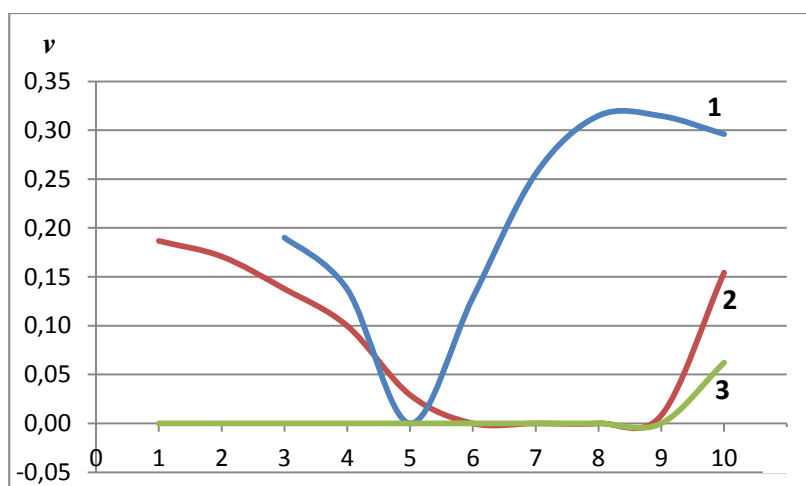


Рис. 7. Графики изменения пористости на контуре образца

**Экспериментальное исследование процесса прессования в конической матрице стержня круглого сечения в условиях больших противодействий.**

Для экспериментального моделирования процесса прессования с большими противодействиями были изготовлены образцы, состоящие из кожуха и сердечника. При этом роль противодействия играют днища кожухов. На рис. 8 показаны образцы в собранном виде (внутри медного и алюминиевого кожухов помещены свинцовые и алюминиевые сердечники), а также прессовки, полученные при проведении экспериментов. Из-за недостаточного значения противодействия кожух первой прессовки разорвался. Для его увеличения в нижние части днища кожухов были помещены металлические подкладки (на рис. 8 слева видна подкладка под алюминиевым кожухом).

Для изготовления свинцовых сердечников были использованы цилиндрические литые заготовки, поверхности которых сначала были подвергнуты обточке на токарном станке для удаления шлаков и окислов, а затем - выдавливанию для измельчения структуры и повышения плотности отливки.



*Рис. 8. Образцы и прессовки, полученные прессованием с различными противодавлениями. Темным сердечникам соответствует материал из свинца*

На рис. 9 показаны спрессованные (с большим противодавлением) образцы с подкладками в диаметральном разрезе. Как видно из рисунка, внутри прессовки отсутствуют трещины, что подтверждает правильность выбора методики моделирования.



*Рис. 9. Разрезанные прессовки, полученные при прессовании с большим противодавлением с различным сочетанием подкладки, кожуха и сердечника*

На универсальном гидрпрессе усилием 1000 кН были проведены испытания на сжатие материалов сердечников и построены их кривые упрочнения, а также замерены усилия прессования. При прессовании образца, кожух и подкладка которого изготовлены из меди, а стержень – из алюминия, усилие составило 110 кН; в случае образца, у которого кожух и подкладка из меди, а стержень – из свинца, усилие составило 82,5 кН; в случае образца, у которого кожух и подкладка из алюминия, а стержень – из свинца, усилие составило 50 кН.



### **Выводы**

1. Обоснован выбор величин с большими противодавлениями  $t = 400$  и  $800$  МПа и определены компоненты напряженного состояния моделированием процесса прессования круглых стержней в среде АПС “ABAQUS”.
2. На основе анализа полученных данных вычислены соответствующие численные величины текущей пористости  $\nu$  материала и сформулированы некоторые особенности процесса. При величине противодавления  $t = 800$  МПа:
  - значения окружных сжимающих напряжений являются четырехзначными цифрами;
  - напряжения Мизеса  $\sigma_i$  имеют только положительные, малые по отношению к компонентам напряжений значения;
  - в узлах конической части на контуре деформированного очага образца значения величин текущей пористости превращаются в ноль.
3. Проведены соответствующие экспериментальные исследования. Сборные образцы были укомплектованы различными сочетаниями материалов кожуха, сердечника и подкладки. Путем прессования их в конической матрице с различными противодавлениями получены прессовки, сопоставлением которых доказывалась правильность выбора методики моделирования данной задачи в среде АПС “ABAQUS”.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта N 13-2Д161.*

### **Литература**

1. Պետրոսյան Գ.Լ., Խաչատրյան Հ.Հ., Պետրոսյան Հ.Գ., Մարգարյան Մ.Ա. Կոնական մամլամայրում գլանական եռալայված ձողի հակաճնշմամբ մամլման գործընթացի “ABAQUS”-ով մոդելավորումը // ՀԱՊՀ-ի ԼՐԱԲԵՐ. Գիտական հոդվածների ժողովածու. – Երևան, 2015: – էջ 295 - 301:
2. Петросян Г.Л., Петросян А.С., Левонян Г.Л. Усовершенствование инженерного метода использования формулы для определения пористости спеченных материалов // Материалы секции “Наука и технологии будущего” Международного конгресса, посвященного 160-летию со дня рождения выдающегося русского инженера В.Г. Шухова, 17-18 апреля 2014 года. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – С. 211-217.
3. Петросян Г.Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. – М.: Металлургия, 1988. – 153 с.
4. Петросян Г.Л., Петросян А.С., Барсебян А.А. Особенности моделирования процесса гидропрессования заготовки круглого сечения // Вестник ГИУА (Политехник). Серия “Механика, машиноведение, машиностроение”. – 2013. – Вып. 16, № 2. – С. 30-38.

5. **Петросян Г.Л., Барсегян А.А., Петросян А.Г.** Метод определения пористости гидропрессованной цилиндрической спеченной заготовки с малым проходом // Известия НАН РА и ГИУА. Серия технических наук . – 2014. – Т. 67, № 3. – С. 265-273.

*Поступила в редакцию 20.03.2015.  
Принята к опубликованию 26.05.2015.*

#### **ԿՈՆԱԿԱՆ ՄԱՍԼԱՄԱՅՐՈՒՄ ԿԼՈՐ ԶՈՂԻ ՄԵԾ ՀԱԿԱՃՆՇՈՒՄՆԵՐՈՎ ՄԱՍԼՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ**

**Գ.Լ. Պետրոսյան, Հ.Հ. Խաչատրյան, Մ.Բ. Սաֆարյան,  
Հ.Գ. Պետրոսյան, Մ.Ա. Մարգարյան**

Գլանակաճ եռակալված ձողի մեծ հակաճնշումներով մամլման գործընթացը մոդելավորվել է “ABAQUS” ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում (ԱԾՄ): Օգտագործվել է հեղինակային խմբի կողմից մշակված խնդրի լուծման մեթոդը: Հիմնավորվել է մեծ հակաճնշման արժեքների ընտրության հարցը: Ստացված լարվածային վիճակի բաղադրիչների և նյութի ծակոտկենության թվային արդյունքների վերլուծության հիման վրա բացահայտվել են գործընթացի որոշ առանձնահատկություններ: Կատարվել են համապատասխան փորձարարական հետազոտություններ, որոնց արդյունքում ստացվել են մամլվածքներ, և դրանց համադրությամբ ապացուցվել է տվյալ խնդրի լուծման մեթոդի ընտրությունը:

**Առանցքային բառեր.** գլանակաճ ձող, մամլում, մեծ հակաճնշում, եռակալված նյութ, ծակոտկենություն, Միզեսի լարում:

#### **MODELING THE PRESSING PROCESS OF A ROUND BAR IN A CONICAL MATRIX OF HIGH BACKPRESSURES**

**G.L. Petrosyan, H.H. Khachatryan, M.B. Safaryan, H.G. Petrosyan, M.A. Margaryan**

The pressing process of the cylindrical sintered bar in a conical matrix at high backpressures is modeled in the automated software environment (ASE) “ABAQUS”. A method developed by a team is used; the choice of the high backpressure values is substantiated. Based on the analysis of the components’ data of the stress state and the numerical results of the material porosity, some features of the pressing process are formulated. Appropriate experimental studies are carried out as a result of which, pressings are obtained whose comparison proves the truth of the choice of the modeling method for given task in the automated software environment “ABAQUS”.

**Keywords:** cylindrical bar, pressing, high backpressure, sintered body, porosity, Mises stress.