

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ
КРУГЛОГО СПЕЧЕННОГО ОБРАЗЦА В КОНИЧЕСКИХ МАТРИЦАХ**

Маргарян М.А.

Ключевые слова: спеченный неупрочняемый материал, пористость, прессование, напряжённо-деформированное состояние, компьютерное моделирование.

Margaryan M.A.

Computer modeling the process of pressing a round sintered sample in conical die

Keywords: sintered material, porosity, pressing, stress-strain state, computer simulation

The process of pressing a round sintered sample in conical dies with different tapering was modeled in the ABAQUS software environment. On the upper butt-end of the cylindrical sample, displacement in the vertical direction is given, with which it passes through the container, the die, and calibration part of the press mould. The zones of the distribution of Mises stress, the main components of the stress state, the strain intensity and porosity of the material are obtained, from which the data in zone of the conical die are analyzed. The values of the components of the stress state and porosity are determined. The graphs of these quantities were plotted at the entrance to the die and at the exit from the die, as well as graphs of averaged data over the cross section along the die. Based on the obtained data, the features of the effect of the angle tapering of die on the pressing process are revealed and some assumptions used in solving the problem by the analytical method are confirmed.

Մարգարյան Մ.Ա.

**Կոնական մամլամայրերում եռակալված կլոր նմուշի
մամլման գործընթացի համակարգչային մոդելավորումը**

Հիմնաբառեր. եռակալված նյութ, ծակոտկենություն, մամլում, լարվածադեֆորմացիոն վիճակ, համակարգչային մոդելավորում

Եռակալված կլոր հատույթով նմուշի տարբեր կոնականությամբ մամլամայրերում մամլման գործընթացը մոդելավորվել է «ABAQUS» ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում: Գլանական նմուշի վերևի ճակատին տրվել է վերտիկալ ուղղությամբ հավասարաչափ տեղափոխություն, ինչի պատճառով այն անցնում է մամլակաղապարի կոնտեյներով, կոնական մամլամայրով և չափաբերման մասով: Ստացվել են Միզեսի լարման, լարվածային վիճակի հիմնական բաղադրիչների, դեֆորմացիաների ինտենսիվության և նյութի ծակոտկենության բաշխման գոտիները, որոնցից վերլուծվել են միայն մամլակաղապարի կոնական մամլամայրում գտնվող նմուշի տվյալները: Որոշվել են լարվածային վիճակի բաղադրիչների և ծակոտկենության արժեքները և կառուցվել են դրանց մամլամայր մտնելիս և դուրս գալիս, ինչպես նաև մամլամայրի երկայնքով գլանական նմուշների լայնական հատույթներում միջինացված արժեքների բաշխման գրաֆիկները: Ստացված տվյալների հիման վրա բացահայտվել են մամլամայրի կոնականության անկյան մեծության ազդեցության առանձնահատկությունները մամլման գործընթացի վրա և հաստատվել են խնդրի վերլուծական եղանակով լուծման ժամանակ ընդունվող մի քանի ենթադրություններ:

В программной среде «ABAQUS» смоделирован процесс прессования спечённого образца круглого сечения в конических матрицах различной конусности. К его верхнему торцу подаётся равномерное перемещение в вертикальном направлении, в результате чего образец проходит через контейнер, коническую матрицу и калибровочную части пресс-формы. Получены зоны распределения напряжения Мизеса, основных компонентов напряжённого состояния, интенсивности деформаций и пористости материала, на основе которых были проанализированы только данные для образца, находящегося в конической матрице. Определены значения компонентов напряжённого состояния и пористости, построены

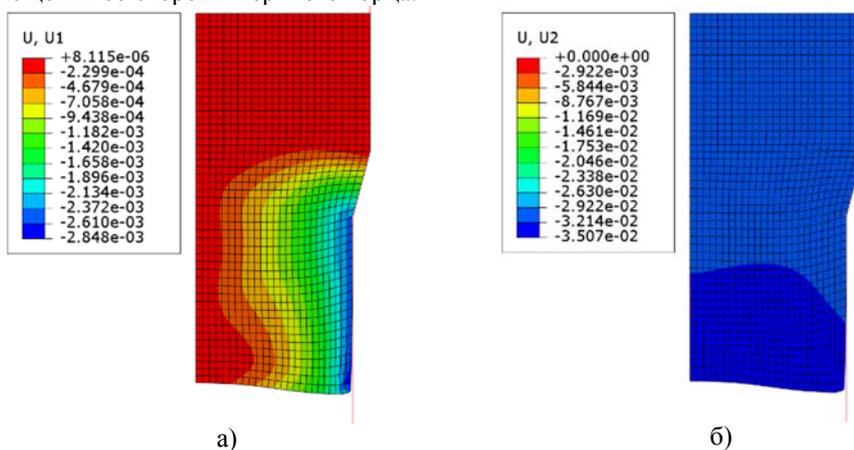
графики этих величин при входе в матрицу и на выходе из неё, а также графики усреднённых данных по поперечному сечению вдоль матрицы. На основе полученных данных выявлены особенности влияния величины угла конусности матрицы на процесс прессования и подтверждены некоторые допущения, используемые при решении задачи аналитическим методом.

Моделирование инженерных задач с использованием автоматизированных программных сред (АПС) позволяет в течение короткого времени получать результаты с достаточно большой точностью. При этом, возникаемые проблемы могут решаться как в области упругих деформаций (расчёт прочности), так и в области пластических деформаций (технологический расчёт). Целесообразность использования АПС подтверждена по результатам многочисленных научно-практических работ. В частности, можно отметить работы, проведённые в среде «ABAQUS» [1,2]. Иногда, в зависимости от типа задач, в их решениях используются методы сопоставления аналитического метода и АПС или сопоставления двух разных АПС [3].

Исследование процессов прессования стержней из спечённого материала аналитическим методом достаточно сложны и мало изучены из-за наличия пористости в материале [4-6]. Что касается компьютерного моделирования этих задач для матриц различной конусности, то таковое практически не применялось, следовательно, работы в этом направлении актуальны.

Цель работы – в автоматизированной программной среде «ABAQUS» исследование распределения напряжённо-деформированного состояния и пористости спечённых стержней при прессовании в матрицах различной конусности и выявление влияния угла конусности на параметры технологического процесса.

На фиг. 1 в трёх частях пресс-формы (контейнере, конической матрице и калибровочной части) показаны зоны перемещения в горизонтальном и вертикальном направлениях цилиндрического образца, полученные путём подачи равномерного перемещения со стороны верхнего торца.



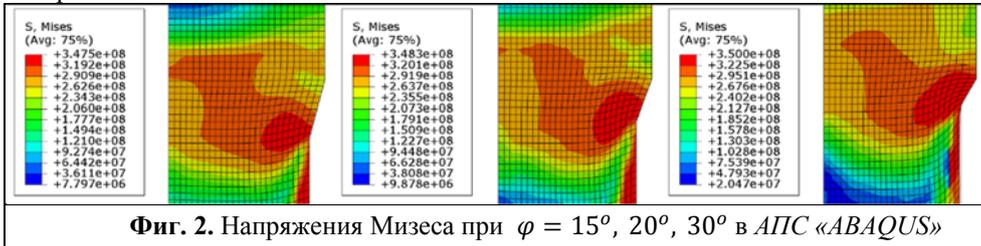
Фиг. 1. Зоны перемещения, полученные в АПС в горизонтальном (а) и вертикальном (б) направлениях

Моделирование задачи в АПС «ABAQUS». Начальные условия задачи: начальный и конечный (готовое изделие) диаметры стержня – $D_0=25$ мм и $d=22,5$ мм, коэффициент контактного трения – $f=0,1$, углы конусности матрицы – $\varphi =$

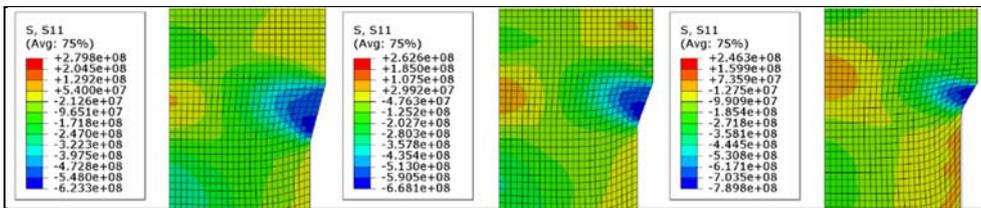
15°, 20°, 30°, тип четырёхугольных элементов сети при делении стержня конечным числом элементов – CAX4R, количество – 1250.

Параметры материала: плотность – 8000 кг/м³, относительная плотность – 0,9 (в соответствии с которой начальная пористость материала – $\nu_0 = 0,1$), модуль Юнга – 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3. Для решения задачи был выбран неупрочняемый материал с пределом текучести $\sigma_T = 350$ МПа.

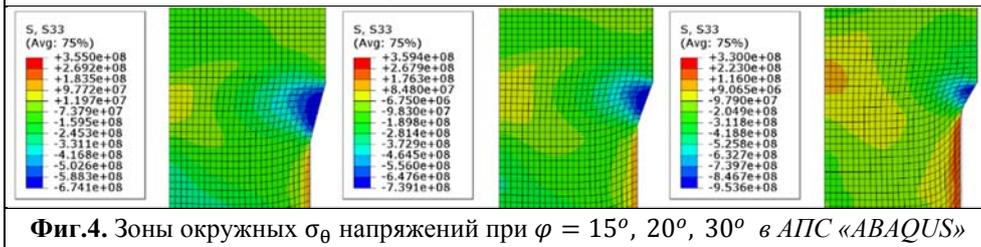
В результате решения задачи были получены все компоненты напряжённо-деформированного состояния. На фиг. 2-8 на половине осевого сечения цилиндра показаны зоны распределения характерных величин его напряжённо-деформационного состояния: интенсивностей напряжений σ_i (напряжения Мизеса) и деформаций ε_i [7], компонентов напряжённого состояния (радиальных $S_{11} = \sigma_r$, окружных $S_{33} = \sigma_\theta$, осевых $S_{22} = \sigma_z$ и касательных $S_{12} = \tau_{rz}$ напряжений) и пористости материала ν .



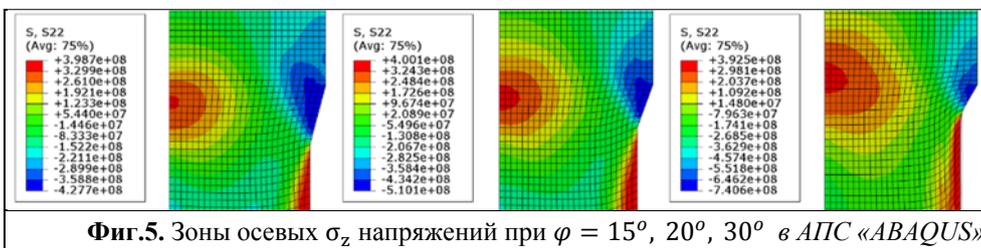
Фиг. 2. Напряжения Мизеса при $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ в АПС «ABAQUS»



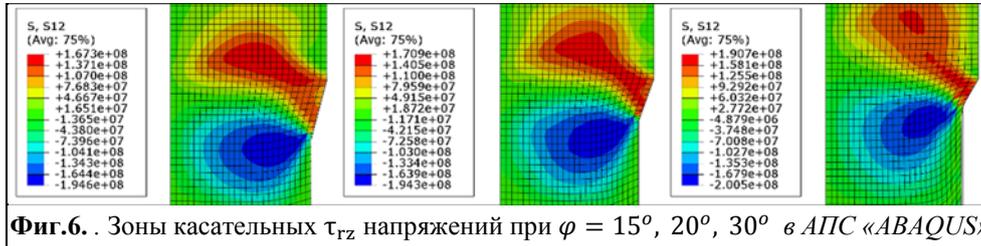
Фиг.3. Зоны радиальных σ_r напряжений при $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ в АПС «ABAQUS»



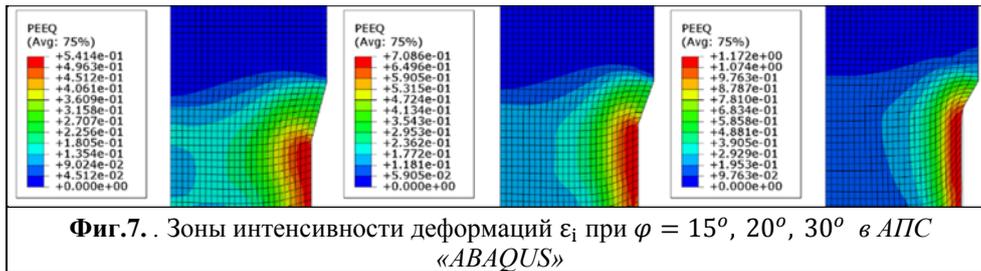
Фиг.4. Зоны окружных σ_θ напряжений при $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ в АПС «ABAQUS»



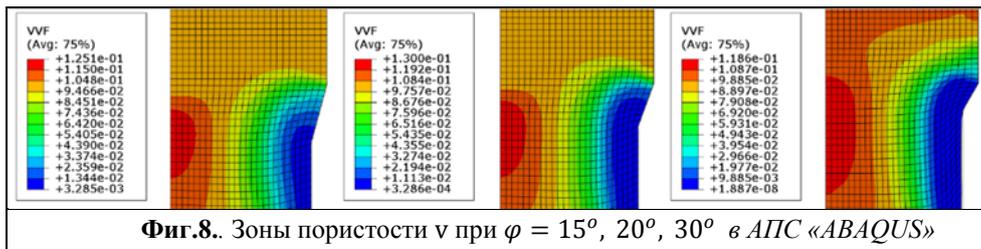
Фиг.5. Зоны осевых σ_z напряжений при $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ в АПС «ABAQUS»



Фиг.6. . Зоны касательных τ_{rz} напряжений при $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ в АПС «ABAQUS»



Фиг.7. . Зоны интенсивности деформаций ϵ_i при $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ в АПС «ABAQUS»

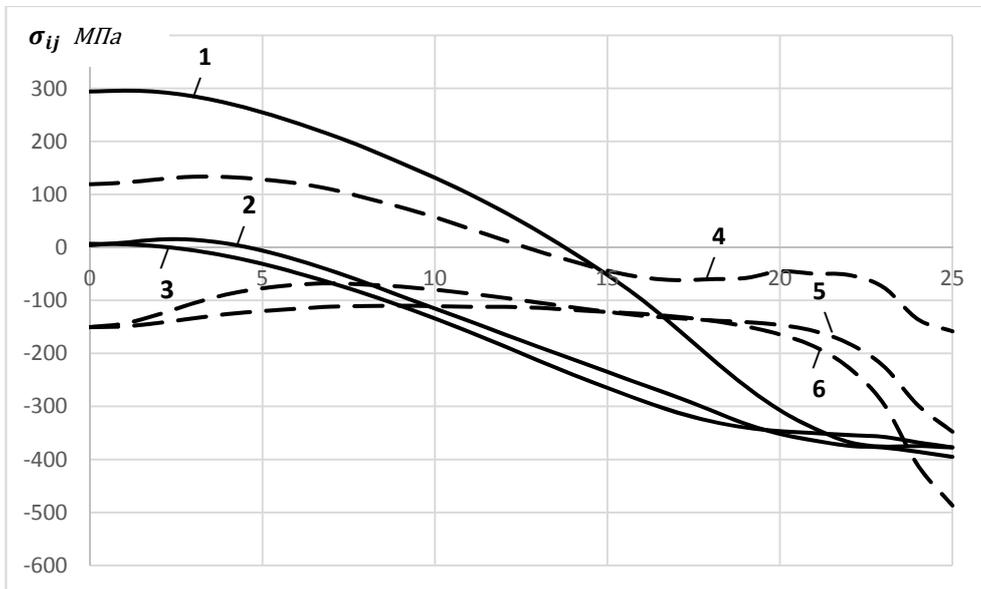


Фиг.8. . Зоны пористости v при $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ в АПС «ABAQUS»

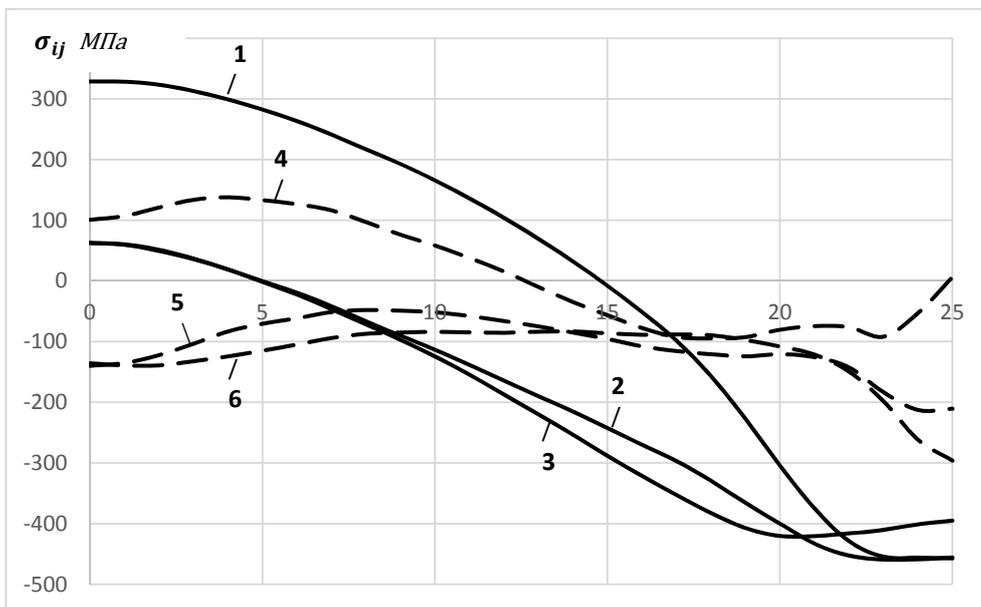
На фиг. 9-11 представлены графики распределения величин нормальных напряжений (величины касательных напряжений не обсуждаются, так как они в несколько раз меньше нормальных) в АПС при входе в матрицу и на выходе из неё (точка 0 находится на оси образца, а точка 25 – на его краевом контуре).

В результате исследования графиков, полученных на фиг 9-11, можно сделать следующие выводы: напряжения σ_θ и σ_r почти одинаковы (что принимается при решении проблемы аналитическим методом [4,8,9]); абсолютные значения напряжений при входе в матрицу значительно выше по сравнению с напряжениями при выходе из матрицы; во всех точках контакта с матрицы все напряжения отрицательные, а на оси – в основном, положительные.

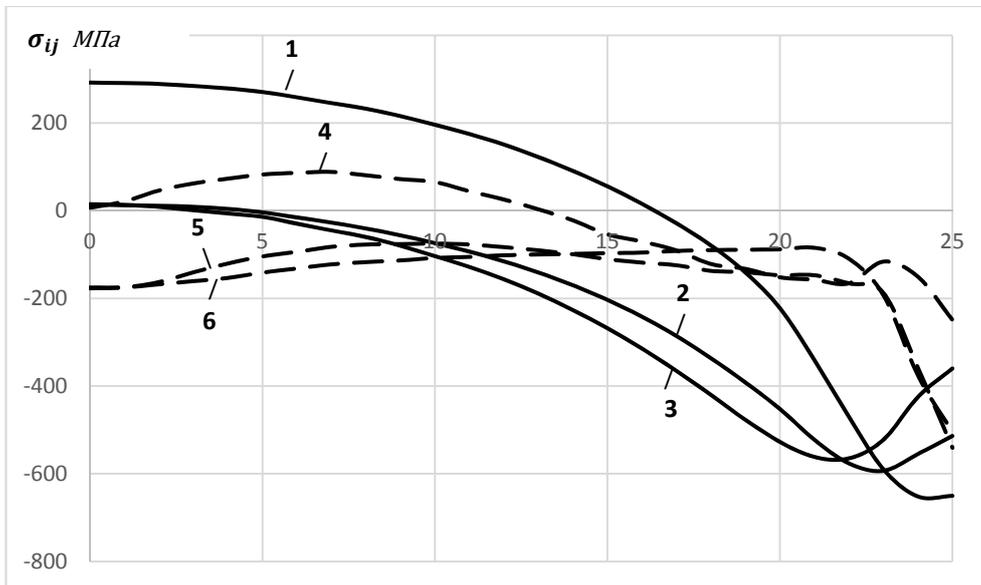
На фиг.12 представлены графики распределения усреднённых значений компонентов напряжённого состояния в поперечных сечениях цилиндрических образцов - вдоль матрицы.



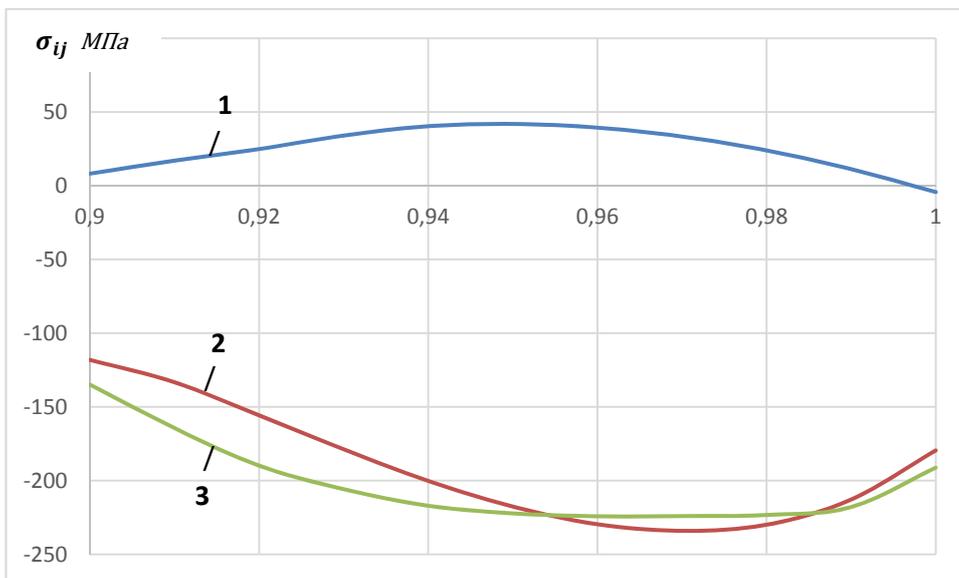
Фиг.9. Кривые компонентов напряжения при входе в матрицу (1 - σ_z , 2 - σ_r , 3 - σ_θ) и на выходе из неё (4 - σ_z , 5 - σ_r , 6 - σ_θ) при $\varphi = 15^\circ$



Фиг.10. Кривые компонентов напряжения при входе в матрицу (1 - σ_z , 2 - σ_r , 3 - σ_θ) и на выходе из неё (4 - σ_z , 5 - σ_r , 6 - σ_θ) при $\varphi = 20^\circ$



Фиг. 11. Кривые компонентов напряжения при входе в матрицу (1 – σ_z , 2 – σ_r , 3 – σ_θ) и на выходе из неё (4 – σ_z , 5 – σ_r , 6 – σ_θ) при $\varphi = 30^\circ$



Фиг. 12. Усреднённые значения напряжённого состояния σ_z (1), σ_θ (2) и σ_r (3) в поперечных сечениях цилиндрических образцов вдоль матрицы при $\varphi = 15^\circ$
 Как видно из фиг. 12, в случае $\varphi = 15^\circ$ максимальные значения сжатия напряжений σ_θ и σ_r получаются на отрезке $\sim r/r_0 = 0,97$, то есть в сечениях, близко расположенных к входу конической матрицы, что совпадает с данными [4].

Что касается данных кривой 1 осевых напряжений σ_z (рис. 12), построенной по таблице, то причиной ее малых положительных величин является неравномерное распределение σ_z в поперечном сечении (рис. 9-11). Это результат следующего основного граничного условия деформирования образца: к его верхнему торцу подается равномерное перемещение u_2 (рис. 16). В этом случае в образце сжимающие осевые напряжения возникают только в контактных с матрицей слоях.

Таблица
Данные σ_z (в МПа) вдоль высоты матрицы в шести линиях сетки конечных элементов по радиусу от оси образца

Номера точек \ Номера линии	1	2	3	4	5	6	Усредненные значения, Мпа
1	294	255	131	-52	-307	-378	-9,5
2	325	272	145	-31	-291	-393	4,5
3	340	281	155	-13	-267	-395	16,8
4	337	283	158	2	-230	-402	24,7
5	324	276	155	10	-176	-409	30
6	307	262	145	12	-115	-417	32,3
7	279	237	129	5	-71	-423	26
8	234	205	108	-8	-47	-428	10,7

На фиг. 13-16 показаны кривые распределения пористости в АПС при входе в матрицу и на выходе из неё и усреднённые значения пористости вдоль матрицы при разных φ .

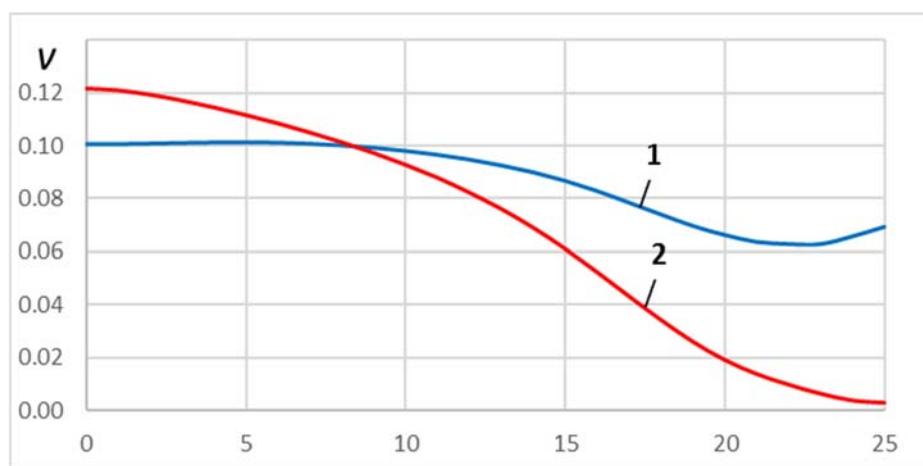


Рис. 13. Значения пористости v в поперечном сечении при входе в матрицу (1) и на выходе из нее (2) при $\varphi = 15^\circ$

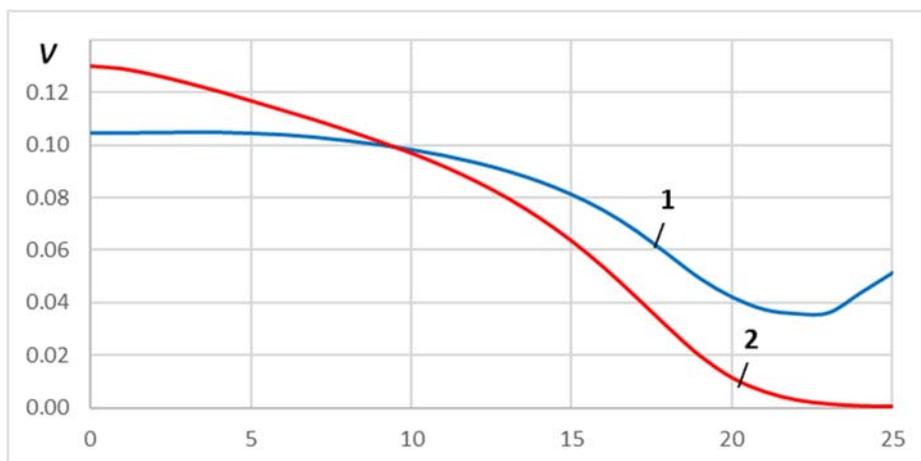


Рис. 14. Изменение значения пористости v при $\varphi = 20^\circ$

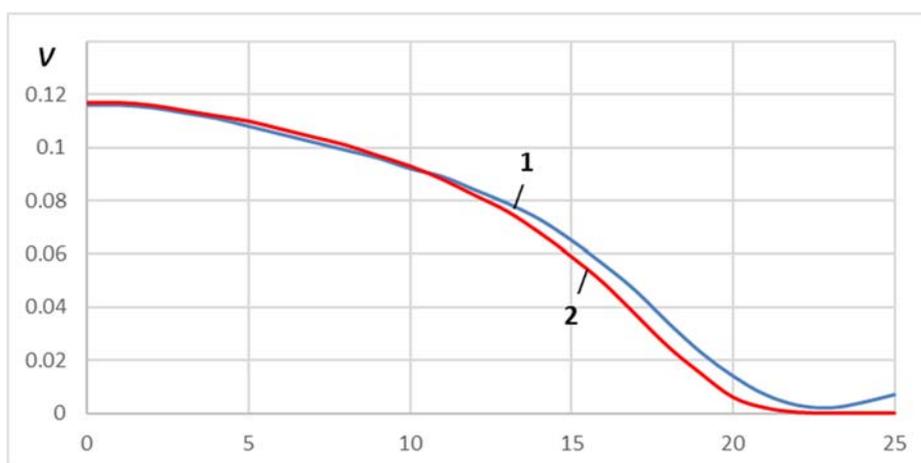


Рис. 15. Изменение значения пористости v при $\varphi = 30^\circ$

Сравнительные данные, приведённые на фиг. 13-15, показывают, что уплотнение образцов начинается с контактирующих с матрицей слоёв, причём при $\varphi = 15^\circ$ на выходе из матрицы эти слои полностью уплотняются, при вхождении в матрицу в центральной части материала пористость не меняется, а при выходе из нее - она увеличивается. При $\varphi = 20^\circ$ на входе в матрицу пористость материала начинает увеличиваться, при $\varphi = 30^\circ$ в результате процесса прессования наружная поверхность материала полностью уплотняется, а в центре пористость увеличивается, и кривые 1 и 2 совпадают. Фактически, при прессовании образца с начальной пористостью $v_0 = 10\%$ в матрице с конусностью $\varphi = 30^\circ$, образец превращается в стержень с переменной пористостью в зависимости от его радиуса.

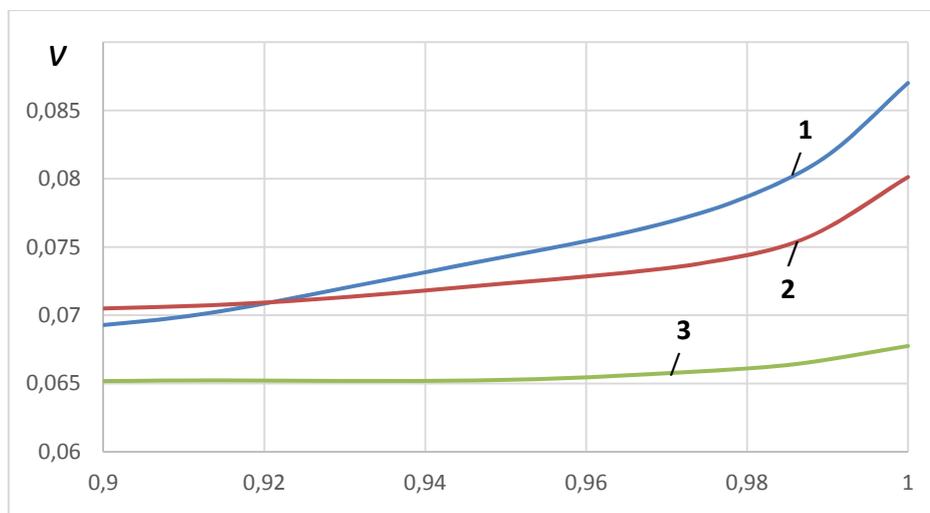


Рис. 16. Усредненные значения распределения пористости вдоль матрицы при $v_0 = 0,1$, $\varphi = 15^\circ$ (1), 20° (2), 30° (3)

Из фиг. 16 видно, что при углах 15° и 20° значения усреднённой пористости при входе в матрицу (v_1) и на выходе из неё (v_2) достаточно различаются ($v_1 > v_2$), а при 30° они почти совпадают ($v_1 \approx v_2$), то есть получается примерно равномерно распределённая вдоль деформированного образца усреднённая пористость и $v_3 = 6,5\%$.

Таким образом, при значениях угла конусности $\varphi = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ в АПС «ABAQUS» определены значения компонентов напряжённо-деформированного состояния образца и величины распределения пористости при входе в матрицу и на выходе из неё. На основе полученных данных построены соответствующие кривые и проведён анализ полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В автоматизированной программной среде «ABAQUS» выполнено моделирование компонентов напряжённо-деформированного состояния и величин распределения пористости в процессе прессования спечённого цилиндрического образца при различных углах конусности матрицы.

Показано, что напряжения σ_θ и σ_r почти одинаковы, в контактных слоях образца по всей протяжённости матрицы имеются достаточно большие сжимающие напряжения, и при входе в матрицу абсолютные значения напряжения намного больше, чем на выходе из неё. 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 на выходе из матрицы $v_3=6,5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Պետրոսյան Գ.Լ., Խաչատրյան Հ.Հ., Պետրոսյան Հ.Գ., Մարգարյան Մ.Ա.** Կոնական մամլամայրում զանական եռակավված ձողի հակաճնշմամբ մամլման գործընթացի «ABAQUS»-ով մոդելավորումը // ՀԱՊՀ-ի Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. - Երևան, 2015. – Մաս 2.- էջ 295-301:
2. **Петросян Г.Л., Хачатрян Г.Г., Сафарян М.Б., Маргарян М.А., Петросян А.Г.** Моделирование процесса прессования круглого стержня в конической матрице в условиях больших противодавлений // Вестник НПУА: Механика, машиноведение, машиностроение.- Ереван, 2015.- №1. - С. 26-35.
3. **Պետրոսյան Գ.Լ., Խաչեկյան Ն.Վ.** “ABAQUS” ծրագրային միջավայրում շերտի հարթ դեֆորմացիայի պայմաններում նստեցման իրական գործընթացի մոդելավորումը // Հայաստանի ճարտարագիտական ակադեմիայի Լրաբեր (ՀՃԱԼ). - 2010. - Հ.7, №3.- էջ 499-502:
4. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов. М.: Металлургия, 1988. 153 с.
5. **Петросян Г.Л., Мусаелян Г.В.** Исследование влияния схемы деформирования на уплотняемость спеченных цилиндрических заготовок // Известия вузов. Машиностроение. 1983. №10. С. 102-105.
6. **Петросян Г.Л., Мусаелян Г.В.** Напряженное состояние пористых осесимметричных заготовок при выдавливании // Порошковая металлургия. 1984. №11. С. 32-35.
7. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 399с.
8. **Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш.** Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1969. 504с.
9. **Hosford W.F., Caddell R.M.** Metal forming mechanics and metallurgy - Cambridge, 2007. 312p.

Сведения об авторе:

Маргарян Мигран Арнакович – аспирант Национального политехнического университета Армении, Институт механико-машиностроения, транспортных систем и дизайна.

Тел.: (+374 94) 10 74 36; E-mail: marg.mihran@gmail.com

Поступила в редакцию