

УДК 539.374, 621.762

Г. Л. Петросян, д-р техн. наук, проф., А. А. Давтян, абитуриент магистратуры
Национальный политехнический университет Армении, Республика Армения
Тел./Факс: +374 (094)-754-103; E-mail: abo14arm@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОЛОЧЕНИЯ СПЕЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ В КЛИНОВИДНЫХ МАТРИЦАХ РАЗЛИЧНЫХ НАКЛОНОВ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

Проведены компьютерное моделирование и исследование процессов волочения спеченных образцов прямоугольного сечения в клиновидных матрицах различных наклонов комбинированным методом. Исследование проводилось в автоматизированной программной среде в условиях плоской деформации. Получены зоны распределения перемещений, интенсивностей напряжений и деформаций, а также компоненты напряженного состояния: растягивающих, формирующих со стороны матрицы, поперечных и касательных напряжений. В соответствии с этим определены значения компонентов напряженно-деформированного состояния и среднее нормальное напряжение в узлах контакта, входа и выхода образца. Определены также величины изменения пористости материала для спеченного образца с использованием деформационной теории пластичности пористых материалов. Выполнен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: клиновидная матрица, волочение, спеченный прямоугольный образец, напряженно-деформированное состояние, пористость материала.

G. L. Petrosyan, A. H. Davtyan

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE DRAWING PROCESSES OF RECTANGULAR SECTION SINTERED SAMPLES IN WEDGE-SHAPED DIES OF VARIOUS INCLINATIONS BY THE COMBINED METHOD

Computer simulation and investigation by the combined method of the drawing processes of a rectangular section sintered samples in wedge-shaped dies of various inclinations in the automated program environment under the conditions of flat deformation are carried out. The zones of distribution of displacements, the intensity of stresses and strains, and also the components of the stress state: tensile, forming from the die side, transverse, and shear stresses are obtained. In accordance with this, the values of the components of the stress-strain state and the average normal stress at the nodes of contact, input, and output of the sample are determined. The porosity change values of the material for the sintered sample are also determined using the deformation theory of plasticity of porous materials. The analysis of the obtained results is performed.

Keywords: wedge-shaped die, drawing, sintered rectangular sample, stress-strain state, the porosity of the material.

1. Введение

В современной металлургии и машиностроении особое место занимают высокоскоростные процессы прокатки, прессования и волочения заготовок различного поперечного сечения. Для решения этих задач во время технологических процессов необходимо определить величины компонентов напряженно-деформированного состояния (НДС) и распределения пористости материала заготовок по их объему. Существует множество экспериментальных и теоретических исследований, а также примеров проведения компьютерного моделирования процессов пластического деформирования литых и спеченных заготовок. При этом решения задач спеченных заготовок являются достаточно сложными из-за пористости материала.

Многочисленные исследования в разных областях науки доказали, что одним из наиболее оптимальных и распространенных методов решения инженерных задач является компьютерное моделирование в автоматизированной программной среде (АПС). При решении задач аналитическим методом достаточно сложно, а иногда даже и невозможно учитывать множество факторов, которые намного упрощают и уточняют решения в АПС. Существуют также комбинированные методы решения задач.

Решению задач процессов пластического деформирования спеченных заготовок компьютерным моделированием и комбинированным методом (сначала компьютерным моделированием, а затем - аналитическим методом) посвящены работы [1-5].

В работе [1] в программной среде "ABAQUS" смоделирован процесс прессования спеченного образца круглого сечения в конических матрицах различной конусности. Получены зоны распределения напряжения Мизеса, основных компонентов напряжённого состояния, интенсивности деформаций и пористости материала. Определены значения компонентов напряжённого состояния и пористости, построены графики этих величин при входе в матрицу и на выходе из нее, 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.

В работе [2] при моделировании процесса прокатки биметаллической полосы в АПС получены данные компонентов НДС. В четырех контактных с валкой точках полосы и в шести узлах при входе в зону прокатки и выходе из нее определены величины касательных, продольных, поперечных и средних напряжений, нормального контактного давления, эквивалентных напряжений и деформаций и величины текущей пористости. Составлены таблицы этих величин и построены графики изменения пористости материала. По данным моделирования в АПС и с использованием уравнения деформационной теории пластичности пористых материалов (ДТППМ) в вышеназванных точках и узлах аналитическим методом определены величины пористости материала. Численные расчеты проводились в программной среде MS EXCEL при начальной 20% пористости внутренней части биметаллической полосы. Полученные данные были сравнены с данными компьютерного моделирования.

В работе [3] проведено компьютерное моделирование процессов экструзии биметаллических труб и стержней в конической матрице для случаев сплошных неупрочняемых материалов, имеющих различные пределы текучести их внутренних слоёв (стержня и трубы). Получены виды зон напряжений Мизеса и компонентов НДС и численные значения при отличающихся друг от друга определённо больших значениях пределов текучести внутреннего стержня и трубы. На основе данных полученных зон радиальных σ_r и окружных σ_θ напряжений предполагается, что давления p_v и p_r , действующие на внешнюю трубу, равны. В этом случае, определяя окружное напряжение внешней трубы, получаем упрощённое условие пластичности и аналитическим методом исследуем НДС внешней трубы.

Задача экструзии труб, нагруженных внутренним высоким давлением, была решена для случая наличия трения. Определены безразмерные меридиональные, окружные и средние напряжения в зависимости от степени деформирования трубы, которые позволили, используя формулы ДТППМ при различных начальных пористостях и коэффициентах трения, изучить процесс уплотнения материала трубы.

В [4] проведено моделирование и исследование НДС процессов волочения сплошного и спеченного образцов прямоугольного сечения в клиновидной матрице в

АПС “ABAQUS” в условиях плоской деформации. Получены значения компонентов НДС и среднее нормальное напряжение образца в осевых и контактных с матрицей узлах. Определены также величины изменения пористости материала для спеченного образца с использованием ДТППМ.

Результаты моделирования сравнены со значениями данных, полученных аналитическим методом. При аналитическом методе исследования поперечных напряжений в спеченном образце используется формула связи напряжений и деформаций ДТППМ. Полученные результаты сравнены с данными моделирования в АПС “ABAQUS”. Выполнен сравнительный анализ и показано, что при решении технологических задач с использованием АПС полученные результаты с достаточной точностью совпадают с данными, полученными при решении задачи аналитическим методом на основе ДТППМ.

В [5] проведено проектирование клиновидной матрицы с возможностью изменения углов наклона клина, получены зоны компонентов НДС процесса волочения образца прямоугольного сечения при разных углах наклона и проведен детальный анализ этих данных.

Отметим, что решения этих задач, имеющих большое практическое значение, довольно сложны и нуждаются в упрощении. Следовательно, работы в этом направлении весьма актуальны.

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния процесса волочения спеченных образцов прямоугольного сечения в клиновидных матрицах различных наклонов с использованием комбинированного метода.

Настоящая работа является продолжением работы [5]. В данной статье представлены дополнительные данные зон компонентов НДС с последующим детальным анализом всех зон, а также проведено исследование распределения пористости для спеченного материала.

2. Исходные данные задачи

Процесс смоделирован в программной среде SIMULIA 2019 (ABAQUS) при следующих исходных данных: начальная толщина $x_0 = 34,96$ мм, длина $l = 70$ мм и ширина образца $b = 25$ мм (остается постоянной из-за плоской деформации), толщина изделия $x_1 = 20$ мм, высота клиновидной части матриц: $H_1 = 30$ мм, $H_2 = 20,55$ мм, $H_3 = 16,04$ мм, углы наклона клинов: $\alpha_1 = 14^\circ$ [4, 6], $\alpha_2 = 20^\circ$, $\alpha_3 = 25^\circ$ и коэффициент трения между образцом и матрицей $f = 0,1$. Разделение сетки конечных элементов образца: количество узлов – 4785, тип кубических элементов – C3D8R и количество элементов – 3920. Моделирование проведено для $1/2$ толщины образца из-за симметрии (рис. 1-3).

Задача решена для неупрочняющегося материала со схемой идеального жестко-пластически деформируемого тела с использованием следующих исходных данных: плотность $\rho = 7800$ кг/м³, модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 370$ МПа [4, 5] и интенсивность напряжений $\sigma_i = \sigma_T$.

3. Моделирование процессов волочения при разных углах наклона клина

Для каждого случая углов наклона произведено моделирование процессов волочения. На рис. 1 представлены узловые точки сетки образца при $\alpha_2 = 20^\circ$, полученные в результате моделирования.

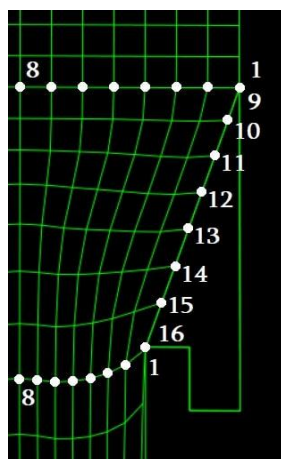


Рисунок 1. Узловые точки сетки образца при $\alpha_2 = 20^\circ$

Так как параллельно с изменением углов наклона меняются также высоты клиновидных частей матрицы, то в случае той же сетки, когда $\alpha_1 = 14^\circ$, $H_1 = 30$ мм, контактных узлов становится больше: 9 ...18, а при $\alpha_3 = 25^\circ$, $H_3 = 16,04$ мм - контактных узлов меньше: 9 ...15.

Сначала моделирование проводилось по схеме сплошного материала. На рис. 2 представлены зоны распределения перемещений в горизонтальном направлении ($U_1 = U_x$) и в направлении волочения ($U_2 = U_z$).

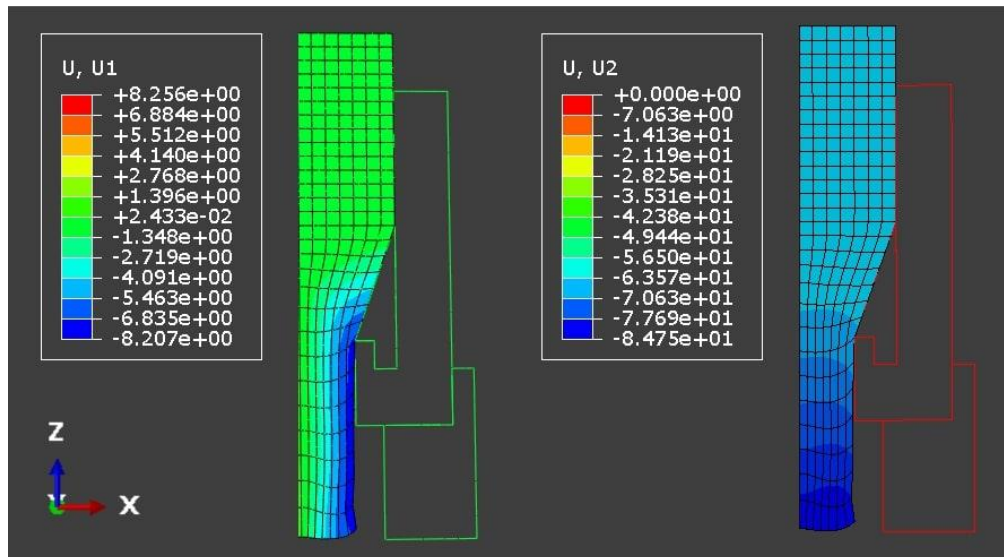


Рисунок 2. Зоны распределения перемещений в горизонтальном направлении и в направлении волочения при $\alpha_2 = 20^\circ$

Величины перемещений U_x и U_z для каждого узла рассчитаны относительно их начальной позиции и зависят от осей координат только направлением. Так как у входных узлов образца еще нет пластического течения, то по направлению волочения их перемещения будут равными, а у контактных и выходных узлов они постепенно растут

с ростом течения металла. Перемещения в горизонтальном направлении у входных узлов почти нулевые, а у контактных и выходных узлов они растут и в точке **16** достигают: **-7,48**.

Очевидно, что

$$U_x^{16} = H_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha = 20,55 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 7,48,$$

а знак “минус” говорит о перемещении в обратном направлении координаты x , т.е. все подтверждается.

На рис. 3 показаны интенсивности напряжения ($\sigma_i = Mises$) и деформации ($\varepsilon_i = PEEQ$), зоны распределения растягивающего ($\sigma_z = S22$), формирующего (горизонтально сжимающего со стороны матрицы) ($\sigma_x = S11$), поперечного ($\sigma_y = S33$) и касательного ($\tau_{xz} = S12$) напряжений.

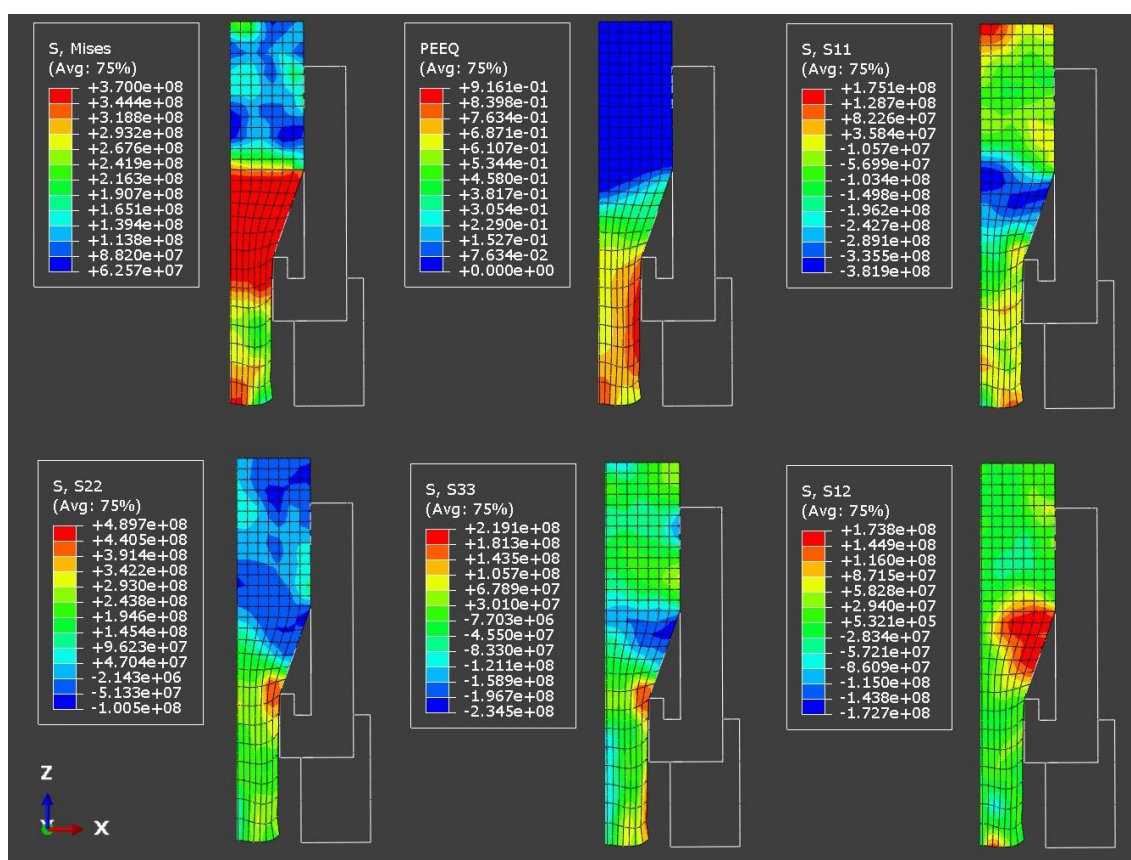


Рисунок 3. Зоны компонентов НДС образца прямоугольного сечения в процессе волочения в клиновидной матрице при $\alpha_2 = 20^\circ$ [5]

На основе результатов моделирования (рис. 2 и 3) в АПС были сняты данные с узловых точек сетки образца (рис. 1): при входе в матрицу (**1 ... 8**) (табл. 1), при выходе из матрицы (**1 ... 8**) (табл. 2) и в контактной части (**9 ... 16**) (табл. 3).

Из данных σ_i табл. 1 видно, что при входе в матрицу образец еще не находится в пластическом состоянии, а в контактных и выходных узлах он уже пластически деформирован, т.к. в них $\sigma_i = \sigma_r = 370 \text{ МПа}$.

Таблица 1. – Данные узловых точек при входе образца в матрицу в случае $\alpha_2 = 20^\circ$ (напряжения приведены в МПа, перемещения - мм)

Точки	1	2	3	4	5	6	7	8
σ_i	260,57	296,1	309,3	307,5	316,7	312,6	324,7	334,7
σ_x	-99,3	-139	-208,1	-250,9	-292,6	-344,1	-371,4	-376,6
σ_y	-45,9	-50,1	-72,3	-85,4	-102,6	-117,8	-118,9	-113
σ_z	-33,9	-18	-23	-27,2	-36,2	-45,2	-15	0,079
σ_0	-59,7	-69,03	-101,13	-121,17	-143,8	-169,03	-168,43	-163,17
τ_{xz}	128,9	147,4	147,6	131,7	123,3	86,7	34,7	1,15
ε_i	0,103	0,086	0,053	0,027	0,012	0,0049	0,0021	0,0013
U_x	0	-0,034		-0,021	-0,016	-0,011	-0,006	0
U_z	-64,38							
ν	0,079	0,082	0,085	0,091	0,095	0,098	0,099	

Таблица 2. – Данные узловых точек при выходе образца из матрицы в случае $\alpha_2 = 20^\circ$ (напряжения приведены в МПа, перемещения - мм)

Точки	1	2	3	4	5	6	7	8
σ_i	370							
σ_x	18,9	-20,78	-25,6	-107,7	-146,2	-141,4	-124,5	-118,4
σ_y	212,4	210,3	179,8	101	60,6	66,7	85,2	91,5
σ_z	441,5	437,5	386,4	307,8	271,4	276,8	294,9	301,2
σ_0	224,27	222,86	180,2	100,37	61,93	67,37	85,2	91,43
τ_{xz}	8,79	0,028	-6,55	-4,6	-5,8	-7	-3,4	-0,089
ε_i	0,759	0,743	0,716	0,696	0,686	0,675	0,657	0,647
U_x	-7,48	-6,56	-5,44	-4,35	-3,24	-2,15	-1,07	-0,001
U_z	-67,68	-68,91	-69,58	-69,99	-70,22	-70,31	-70,14	-70,04
ν	0,425	0,418	0,359	0,251	0,195	0,202	0,223	0,229

Таблица 3. – Данные узловых точек образца в контактной части матрицы в случае $\alpha_2 = 20^\circ$ (напряжения приведены в МПа, перемещения - мм)

Точки	9	10	11	12	13	14	15	16
σ_i	260,57	370						
σ_x	-99,3	-331,6	-351	-306,5	-277	-204,9	-169,4	18,9
σ_y	-45,9	-208,1	-191,9	-176,6	-151,1	-143	85,6	212,4
σ_z	-33,9	-83,2	-34,6	-42,8	-21,1	-80,7	337	441,5
σ_0	-59,7	-207,63	-192,5	-175,3	-149,73	-89,07	84,4	224,27
τ_{xz}	128,9	160,5	160,2	160,4	162,9	153,1	84,6	8,79
ε_i	0,103	0,262	0,343	0,372	0,388	0,428	0,585	0,759
U_x	0	-0,92	-1,94	-3	-4,07	-5,14	-6,2	-7,48
U_z	-64,38	-64,48	-64,79	-65,22	-65,62	-66,07	-66,48	-67,68
ν	0,079	0				0,005	0,209	0,425

Многочисленные исследования подтверждают, что значения поперечных напряжений σ_y во время плоской деформации образца находятся в диапазоне значений напряжений σ_x и σ_z [7]. Следовательно, полученные данные σ_y можно проверить с по-

мощью условия плоской деформации ($\varepsilon_y = 0$) и формулы связи деформаций и напряжений:

$$\begin{aligned} \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] = 0, \\ \sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z) &= 0 \text{ (т.к. } \frac{1}{E} \neq 0), \\ \sigma_y &= \mu(\sigma_x + \sigma_z), \end{aligned} \tag{1}$$

где μ – коэффициент Пуассона, который в пластическом состоянии образца принимает значение $\mu = 0.5$ [4, 7]. Таким образом,

$$\sigma_y = (\sigma_x + \sigma_z)/2. \tag{2}$$

С помощью уравнения (1) можно проверить данные поперечных напряжений в тех узлах, где $\sigma_i < \sigma_T$, а с помощью (2) - в узлах, где $\sigma_i = \sigma_T$. Если взять данные σ_x и σ_z из таблиц и рассчитать поперечные напряжения по формулам (1) и (2), то они довольно хорошо совпадут с данными моделирования в АПС, т.е. подтверждается высокий уровень моделирования процесса.

Для углов $\alpha_1 = 14^\circ$, $\alpha_2 = 20^\circ$, $\alpha_3 = 25^\circ$ были извлечены данные интенсивностей деформаций и касательных напряжений. На основе этих данных построены графики, которые наглядно описывают влияние изменения углов наклона (рис. 4).

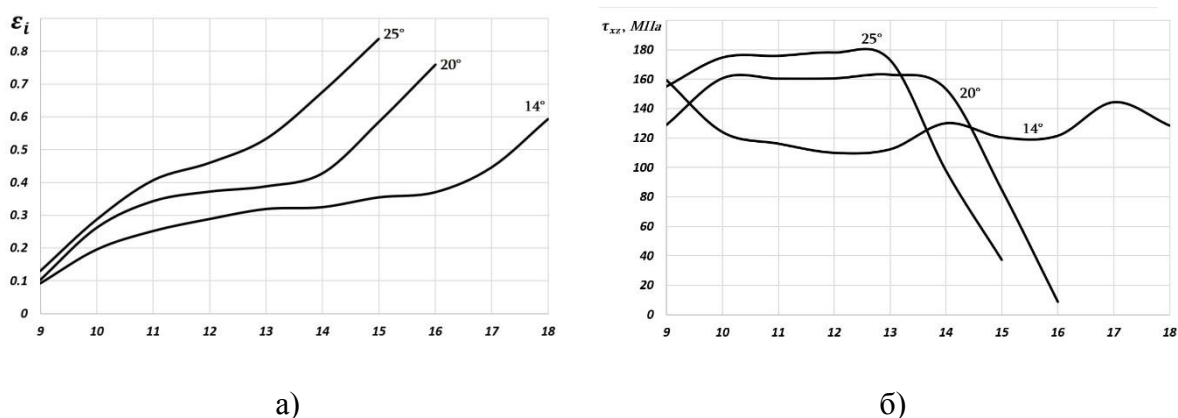


Рисунок 4. Графики данных контактных узлов для углов $\alpha_1 = 14^\circ$, $\alpha_2 = 20^\circ$, $\alpha_3 = 25^\circ$: а - для интенсивностей деформаций, б - для касательных напряжений

Из рис. 4, а видно, что параллельно с увеличением угла наклона клиновидной матрицы растут также и интенсивности деформаций. Из рис. 4, б очевидно, что в случае угла $\alpha_1 = 14^\circ$ касательные напряжения самые низкие и, можно сказать, более-менее равномерно распределены по всей поверхности контакта, а в случае углов $\alpha_2 = 20^\circ$ и $\alpha_3 = 25^\circ$ касательные напряжения с увеличением достигают своих максимальных значений, затем остаются постоянными и в узлах ближе к выходу резко уменьшаются. Из вышесказанного можно предположить, что в диапазоне $\alpha = 14 \dots 20^\circ$ начиная с какого-то угла касательные напряжения по контактной поверхности вместо равномерного распределения накапливаются на каком-то участке, а при $\alpha = 20 \dots 25^\circ$ касательные напряжения локализуются, накапливаясь соответственно в узлах 10 ... 14 и 10 ... 13.

Теперь рассмотрим более подробно случай, когда $\alpha_2 = 20^\circ$ (промежуточный случай).

Для наглядности (на основе данных таблиц) построены графики распределения напряжений σ_x , σ_z и τ_{xz} (рис. 5-7).

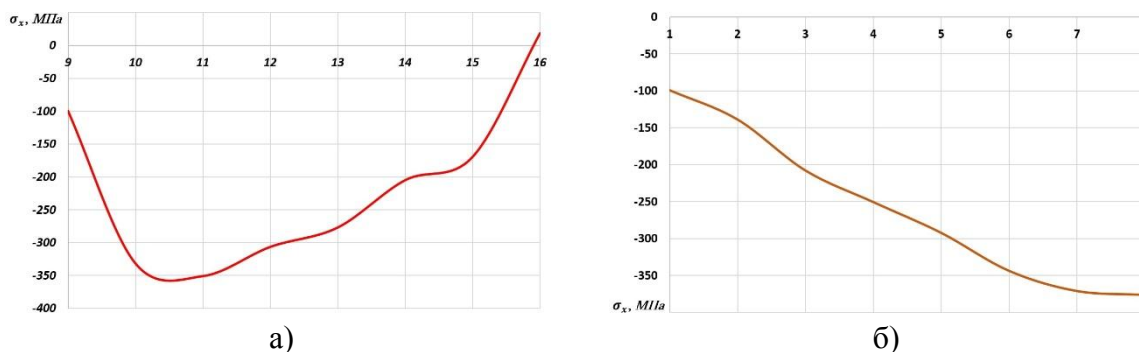


Рисунок 5. Графики распределения напряжений σ_x , построенные на основе данных АПС:
а – для контактных узлов; б – для входных узлов образца

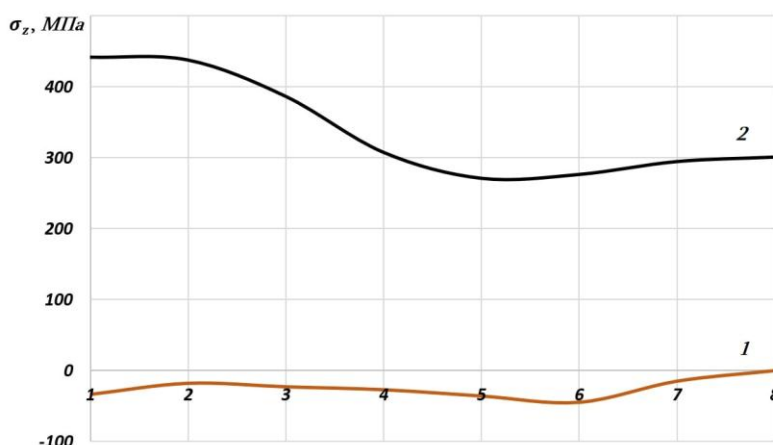


Рисунок 6. Графики распределения напряжений σ_z , построенные на основе данных АПС:
1 – для входных узлов, 2 – для выходных узлов образца

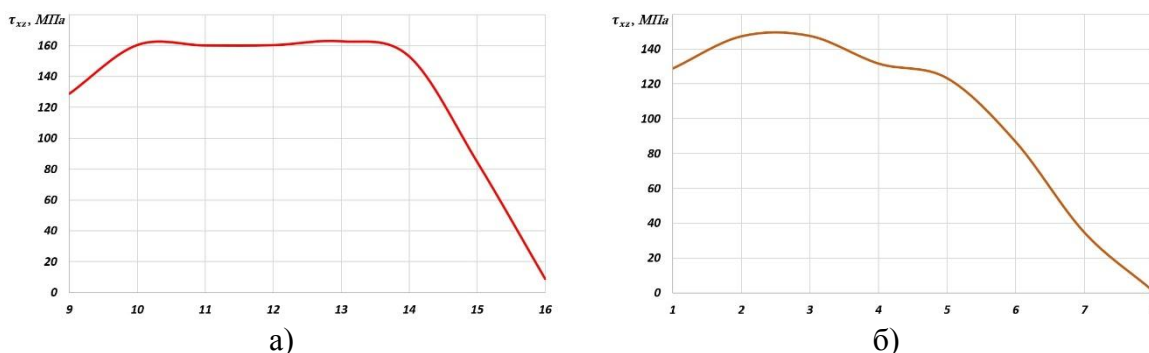


Рисунок 7. Графики распределения напряжений τ_{xz} , построенные на основе данных АПС:
а – для контактных узлов; б – для входных узлов образца

Из рис. 5, а видно, что в контактных узлах **10 ... 11** формирующие напряжения достигают максимального значения, после из-за роста пластических деформаций напряжения начинают снижаться. Из рис. 5, б и табл. 1-3 видно, что в процессе волочения образца прямоугольного сечения наибольшие сжимающие напряжения возникают в узлах входа **7 ... 8**, т.к. деформации у входа еще упругие.

На рис. 6 приведены графики растягивающих напряжений, или напряжений волочения. Очевидно, что процесс волочения проводится путем вытягивания образца из матрицы, поэтому в выходных узлах (кривая 2) растягивающие напряжения будут максимальными, а минимальные (почти нулевые) значения примут входные узлы (кривая 1).

На рис. 7а приведен график касательных напряжений в узлах контакта. Как видно, наибольшие значения принимают касательные напряжения в узлах **10 ... 14**, после чего они угасают. Такая же картина наблюдается для входных узлов на рис. 7б, т.е. ближе к зоне контакта касательные напряжения достаточно увеличиваются, так как сечение образца прямоугольное и угол наклона клина не маленький: $\alpha = 20^\circ$. Следовательно, во избежание сдвига желательнее прибегнуть к двукратному или многократному волочению образца прямоугольного сечения с более малыми углами наклона клина.

4. Методика исследования распределения пористости спеченного образца

Методика заключается в том, что для исследования процесса обработки давлением спеченных образцов моделирование можно проводить по схеме сплошного материала и правильно определить его НДС, далее с использованием ДТППМ рассчитать распределение пористости во время процесса для спеченного образца [4, 8]. В работе [4] уже доказано, что данные распределения пористости, полученные моделированием спеченного образца, и данные, полученные аналитическим методом на основе ДТППМ, как по качеству, так и по количеству довольно близки друг к другу, что подтверждает достоверность вышесказанного.

Значения среднего нормального напряжения (σ_0) определяются по следующей формуле:

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

Что касается определения значений изменения пористости (v) для спеченного образца, то можно прибегнуть к ДТППМ [7, 8]. Для этого случая начальная пористость равна $v_0 = 0,1$ [4] при $m = 1$, $n = 0,25$ [4, 7]. Текущие значения пористости при 10% начальной пористости образца рассчитаны по формуле.

$$v = 1 - (1 - v_0) \exp\left(-\frac{9v_0^m \sigma_0 \varepsilon_i}{(1-v_0)^{3n} \sigma_i}\right), \quad (4)$$

где m и n – параметры пористости.

На основе этих значений были построены графики (рис. 8).

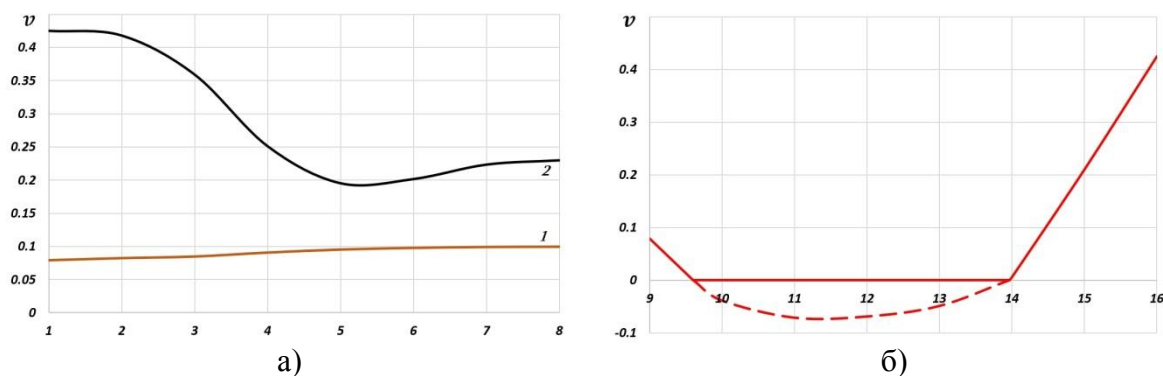


Рисунок 8. Графики распределения пористости, рассчитанные на основе данных АПС:
 а – для входных (кривая 1) и выходных (кривая 2) узлов;
 б – для контактных узлов

Из рис. 8а видно, что во входных узлах (кривая 1) пористость ближе к точке 8 почти постоянна, а с приближением к зоне контакта (к точке 1) образец немного уплотняется до 7,9%. В выходных узлах (кривая 2) пористость увеличена из-за наличия больших растягивающих напряжений и пластических деформаций. Следует отметить, что в точке 1 пористость самая высокая (42,5%) и растягивающие напряжения максимальные ($\sigma_z = 441,5 \text{ МПа}$). Далее пористость начинает падать с точек 1 ... 5 (до 19,5%), а напряжения волочения падают до $\sigma_z = 271,4 \text{ МПа}$, после растягивающие напряжения растут до величины $\sigma_z = 301,2 \text{ МПа}$ с ростом пористости до 22,9%. Следовательно, график распределения пористости в выходных узлах образца по форме такой же, как и график распределения растягивающих напряжений в тех же узлах, что довольно очевидно (см. рис. 8а, кривая 2 и рис. 6, кривая 2).

При построении графика рис. 8б было принято допущение, согласно которому пористость не может иметь отрицательные значения, и, следовательно, в этих точках происходит уплотнение (“залечивание” пор) спеченного образца. Поэтому расчетные отрицательные значения показаны штриховой линией графика, т.е. контактные узлы спеченного образца с 10% (в процессе волочения - уже 7,9%) пористости быстро уплотняются (узлы 10 ... 14) из-за наличия больших формирующих (сжимающих) напряжений, а уже ближе к выходной части матрицы (узлы 15 и 16) (с ростом растягивающих напряжений) пористость резко увеличивается и достигает максимальной величины 42,5%.

5. Заключение

Проведено моделирование процесса волочения образца прямоугольного сечения в клиновидной матрице при разных углах наклона клина и исследованы напряженно-деформированное состояние и перемещения узлов материала с последующим расчетом распределения пористости для спеченного образца. Выявлено, что волочение образца прямоугольного сечения с большим углом наклона клина имеет опасность появления сдвига из-за наличия больших касательных напряжений. Сравнение данных распределения пористости с данными, полученными авторами в работе [4], позволяет сделать выводы, что с ростом угла наклона клина в процессе волочения растет и средняя пористость полученного изделия: при $v_0 = 0,1; \alpha = 14^\circ \Rightarrow v_{\text{сред.}}^{\text{изд.}} = 0,23$ [4], $v_0 = 0,1; \alpha = 20^\circ \Rightarrow v_{\text{сред.}}^{\text{изд.}} = 0,29$ (среднее значение кривой 2 на рис. 8а). Следова-

тельно, возникает опасность увеличения углов наклона клина. Исходя из вышесказанного, рекомендуется проводить двукратное или многократное волочение с малыми углами наклона клина, особенно для образца прямоугольного сечения с острыми краями.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Маргарян, М. А. Компьютерное моделирование процесса прессования круглого спеченного образца в конических матрицах / М. А. Маргарян // Известия НАН РА. Механика. - 2020. - Том 73. – №3.– С. 44-53.
2. Маргарян М. А., Бабаян А. А. Моделирование процесса прокатки биметаллической полосы в автоматизированной программной среде / М.А. Маргарян, А.А. Бабаян // Известия НАН РА и НПУА. Серия Техн. Науки. – 2020. – Том 73. – №.4 – С. 365-377. (на арм. яз.)
3. Петросян, Г. Л. Компьютерное моделирование и аналитическое исследование процесса экструзии тонкостенной трубы, нагруженной внутренним высоким давлением / Петросян Г. Л., Бабаян А. А. Маргарян М. А // Вестник НПУА: Механика. Машиноведение. Машиностроение. – Ереван, 2020. – №2. – С. 9-22.
4. Петросян, Г. Л. Компьютерное моделирование процессов волочения сплошного и спеченного образцов прямоугольного сечения в клиновидной матрице / Петросян Г. Л., Давтян А. А. // Вестник НПУА: Механика. Машиноведение. Машиностроение. – Ереван, 2020. – №1. – С. 37-47.
5. Давтян, А. А. Компьютерное моделирование волочения образца прямоугольного сечения в клиновидной матрице при разных углах наклона клина / Давтян А. А. // Вестник НПУА: Сборник научных статей. – Ереван, 2021. – находится в редакции (на арм. яз.)
6. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
7. Петросян, Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. – М.: Металлургия, 1988. – 153 с.
8. Петросян, Г. Л. Усовершенствование инженерного метода использования формулы для определения пористости спеченных материалов / Петросян Г. Л., Петросян А. С., Левонян Г. Л. // 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.

Поступила в редколлегию 07.05.2021г.