

УДК.621.777

Калюжный В. Л.
Алиева Л. И.
Горностаев В. Н.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПУАНСОНА ИЗ ДЕФОРМИРОВАННОЙ ЗАГОТОВКИ И ВЫТАЛКИВАНИЯ ЗАГОТОВКИ ИЗ МАТРИЦЫ ПРИ ХОЛОДНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ ДЕФОРМАЦИИ

В настоящее время технология холодного выдавливания полых изделий, конструирование штамповой оснастки осуществляются с использованием экспериментальных данных и производственного опыта [1–4]. В указанных источниках практически отсутствуют данные по определению усилий извлечения пуансона из деформированной заготовки, которые необходимы для расчета напряжений в пуансоне при извлечении и проектирования пуансонодержателей в штамповой оснастке. Также мало сведений по усилию выталкивания деформированной заготовки из матрицы после выдавливания, что необходимо для выбора пресового оборудования и для проектирования штамповой оснастки, когда выталкивание происходит при помощи тяг и коромысла, связанных с верхней плитой штампа.

Применение метода конечных элементов (МКЭ) для анализа процессов холодного формоизменения позволяет создавать математические модели, которые достаточно точно описывают течение металла при обратном выдавливании полых изделий [5–10]. С помощью МКЭ установлено влияние геометрических (форма торца пуансона) и технологических (степень деформации, коэффициент трения, высота заготовки) факторов на зависимости усилия выдавливания от перемещения пуансона, распределения удельных усилий на матрице и пуансоне, напряженно-деформированное состояние заготовки и степень использования ресурса пластичности деформированного металла. Важным преимуществом использования МКЭ является возможность определения качества изделий, до показателей которого относятся форма и размеры деформированной заготовки с учетом упругой деформации, упрочнение деформированного металла также ресурс пластичности. Установление величины упрочнения необходимо для прогнозирования механических свойств деформированного металла. Выявление ресурса пластичности позволит оценить возможность дальнейшего деформирования полученных полуфабрикатов с целью утонения стенки изделий. Однако в проведенных расчетных исследованиях нет данных по усилиям извлечения пуансонов из деформированных заготовок и выталкивания изделий из матрицы, а также не определен разогрев металла при формоизменении.

Целью проведенных расчетных исследований с использованием МКЭ является определение усилий извлечения пуансона из деформированной заготовки и выталкивания заготовки из матрицы при холодном выдавливании полых изделий с разной степенью деформации.

Схема обратного выдавливания полого изделия коническим пуансоном приведена на рис. 1. Слева от оси симметрии приведено положение перед выдавливанием, справа – при выдавливании. Исходная заготовка 1 установлена в матрице 2 на выталкиватель 3. Выдавливание осуществляется пуансоном 4. Использовали заготовки из стали AISI 1010 COLD ($\sigma_{0,2} = 300$ МПа) с размерами $D_z = 40$ мм, $H_z = 50$ мм. Высота матрицы $H = 60$ мм. Деформирование осуществляли коническим пуансоном с $\alpha = 7^\circ$, $\beta = 5^\circ$, $r_p = 2$ мм, $l = 2$ мм и $z = 0,1$ мм. Диаметр пуансонов D_p определялся степенью деформации $\varepsilon = D_p^2 / D_z^2$. Расчеты проводили для $\varepsilon = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ и 80 %. Для указанных величин степеней деформации диаметры пуансона D_p соответственно составили: 12,64; 17,88; 21,91; 25,29; 28,28; 30,98; 33,47 и 35,78 мм. Моделирование обратного выдавливания с коэффициентом трения $\mu = 0,08$ выполняли с применением конечно-элементной программы DEFORM.

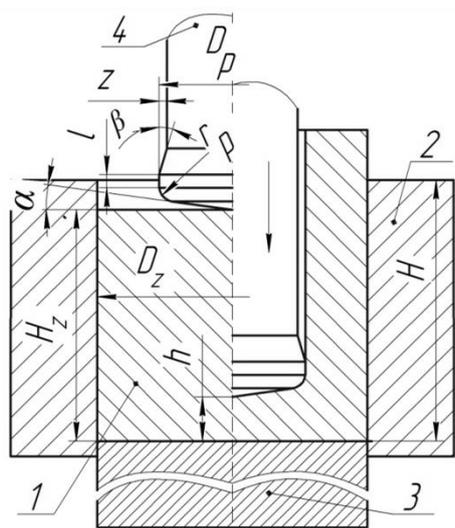


Рис. 1. Схема обратного выдавливания полого изделия коническим пуансоном

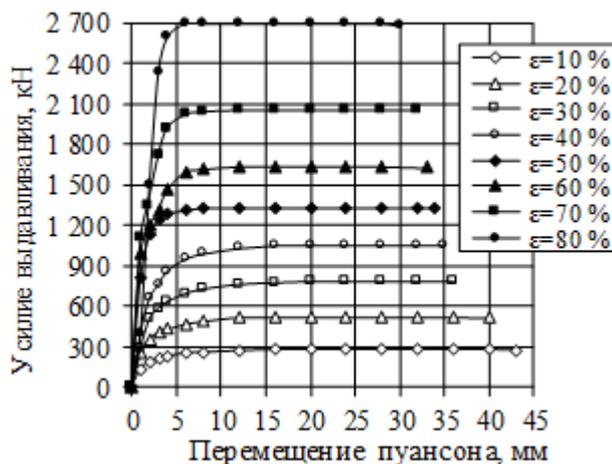


Рис. 2. Зависимости усилий выдавливания от перемещения пуансонов для выдавливания с разными степенями деформаций ϵ

Металл считался упруго-пластическим с упрочнением, а деформирующий инструмент – абсолютно жестким. При холодном формообразовании определялась температура сформированного металла. Для всех диаметров пуансонов D_p расчеты заканчивали при достижении толщины дна величиной $h = D_p / 2$ (см. рис. 1).

На рис. 2 приведены расчетные зависимости усилий выдавливания от перемещения пуансонов для обратного выдавливания полых изделий с разными степенями деформации ϵ . При увеличении степени деформации с 10 % до 40 % усилие выдавливания увеличивается в среднем на 270 кН с увеличением значения ϵ на 10 %. В интервале $\epsilon = 40 \dots 60$ % рост усилия составляет 300 кН. Дальнейшее увеличение величины ϵ приводит к существенному различию усилий выдавливания.

Моделирование с помощью МКЭ позволило выявить точные распределения нормальных напряжений на торцах пуансонов и на поверхности матрицы при максимальных значениях усилий, по которым можно оценить удельные усилия (рис. 3).

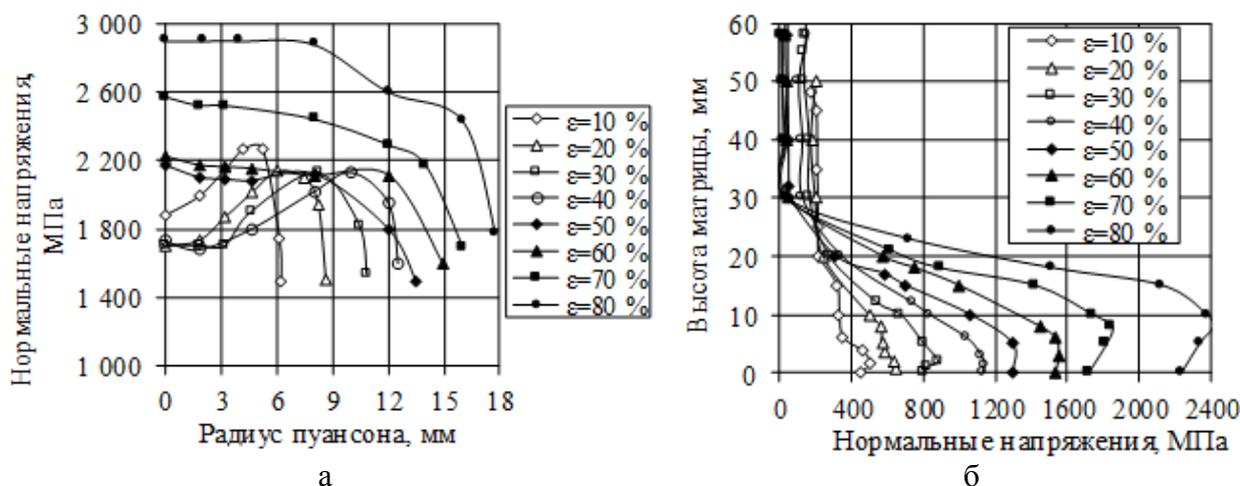


Рис. 3. Распределения нормальных напряжений по радиусу пуансонов (а) и по высоте матрицы (б) при максимальном усилии выдавливания полых изделий с разной степенью деформации ϵ

На рис. 3а приведены распределения нормальных напряжений по радиусу торцов пуансонов. При степенях деформаций $\varepsilon = 10 \dots 40$ % максимальные значения этих напряжений получены в месте перехода конических поверхностей в радиус закругления пуансонов. При уменьшении радиуса пуансона нормальные напряжения уменьшаются, также напряжения снижаются при увеличении радиуса пуансона до величины $D_p/2$. При степенях деформации $\varepsilon = 50 \dots 80$ % максимальные значения нормальных напряжений получены на оси симметрии торцов пуансонов с последующим уменьшением при увеличении радиуса. По величине нормальных напряжений можно сделать вывод, что степень деформации $\varepsilon = 80$ % является предельной для данной стали. Распределения нормальных напряжений на матрице приведены на рис. 3б. Наибольшие значения этих напряжений получены на части поверхности матрицы, которая контактирует с очагом деформации в заготовке. Необходимо отметить, что для степеней деформаций $\varepsilon = 10 \dots 40$ % нормальные напряжения на части матрицы, которая контактирует со стенкой сформированной заготовки, больше чем для $\varepsilon = 50 \dots 80$ %. Такое распределение оказывает влияние на усилия извлечения пуансонов и выталкивания заготовок из матрицы.

Использование упругопластической модели металла в расчетном анализе позволило выявить разгрузку сформированного металла при извлечении пуансона из матрицы после окончания выдавливания полости. В табл. 1 приведены величины упругой деформации Δh в осевом направлении донной части сформированных заготовок высотой h (см. рис. 1) при обратном ходе пуансона.

Таблица 1

Величины упругой деформации донной части сформированной заготовки

$\varepsilon, \%$	10	20	30	40	50	60	70	80
$\Delta h, \text{мм}$	0,06	0,065	0,078	0,08	0,11	0,14	0,17	0,23



Рис. 4. Распределение нормальных напряжений по высоте матрицы после извлечения пуансона изделий с разной степенью деформации ε

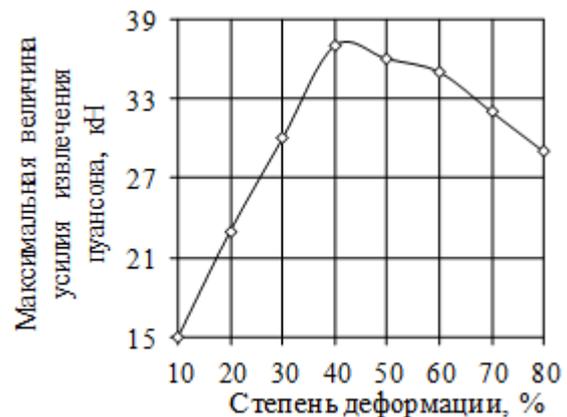


Рис. 5. Зависимость максимальной величины усилия извлечения пуансона от степени деформации ε

С ростом степени деформации увеличивается упругая деформация донной части выдавленных изделий. В результате разгрузки сформированного металла, сразу после движения пуансона в обратном направлении, существенно снижаются нормальные напряжения на поверхности контакта заготовки с матрицей. На рис. 4 приведены распределения нормальных напряжений на поверхности матрицы после извлечения пуансона из сформированной заготовки для величин $\varepsilon = 10, 30$ и 70 %. Напряжения снизились в 2–3 раза по сравнению с распределением при максимальном усилии выдавливания. При этом для больших сте-

пней деформаций нормальные напряжения на поверхности контакта стенок с деформированных заготовок с матрицей достигают значений 55–100 МПа.

На рис. 5 приведена зависимость максимальной величины усилия извлечения пуансона из деформированной заготовки, полученная с учетом действующих нормальных напряжений на поверхности матрицы. Наибольшая величина усилия имеет место при извлечении пуансона после выдавливания с $\varepsilon=40\%$.

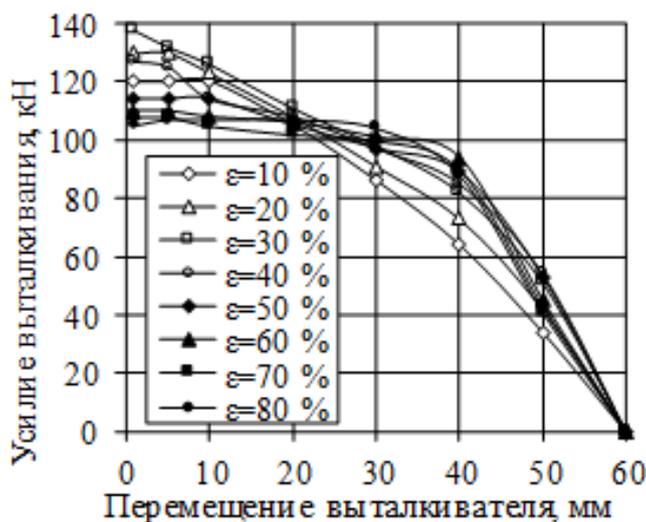


Рис. 6. Зависимости усилий выталкивания заготовки от перемещения выталкивателей

На рис. 6 представлены зависимости усилий выталкивания заготовок из матрицы от перемещения выталкивателей. Для малых степеней деформации ($\varepsilon=10\dots40\%$) наибольшие значения усилий получены в начале процесса выталкивания с последующим снижением по ходу выталкивания. Для выдавливания с $\varepsilon=50\dots80\%$ усилия остаются постоянными на половине пути выталкивания.

Моделированием определены конечные формы и размеры изделий после выдавливания с разной степенью деформации (рис. 7). При $\varepsilon=10\%$ на торце стенки изделия образуется выступ величиной 0,7 мм, а в угле донной части заготовки имеет место отставание заготовки от выталкивателя. После выдавливания с $\varepsilon=20\%$ торец стенки практически ровный и отсутствует отставание. Дальнейшее увеличение степени деформации приводит к образованию утяжины различной величины на торцах стенок. Полученные данные нужны для уточнения высоты исходных заготовок при необходимости использования механической обработки для достижения ровного торца стенок.

При холодном обратном выдавливании полых изделий происходит разогрев деформированного металла. Определение температуры при формоизменении позволит уточнить требования к смазкам для выдавливания. Расчетным путем установлены распределения температуры в деформированной заготовке при разных перемещениях пуансона, которые при выдавливании с $\varepsilon=30\%$ приведены на рис. 8. При перемещении пуансона $u=7$ мм, что соответствует началу перехода процесса выдавливания в установившуюся стадию, в очаге деформации под конической частью пуансона и вблизи радиуса скругления пуансона возникает температура величиной соответственно 76° и 93° . После завершения перехода в установившуюся стадию ($u=20$ мм) температура в этих местах увеличивается до 110° и 126° . На середине установившейся стадии процесса выдавливания ($u=26$ мм) максимальное значение температуры в очаге деформации составляет 142° . В конце процесса формообразования ($u=39$ мм) температура в указанном месте возрастает до 148° . По высоте стенки деформированной заготовки температура изменяется от 44° до 109° .

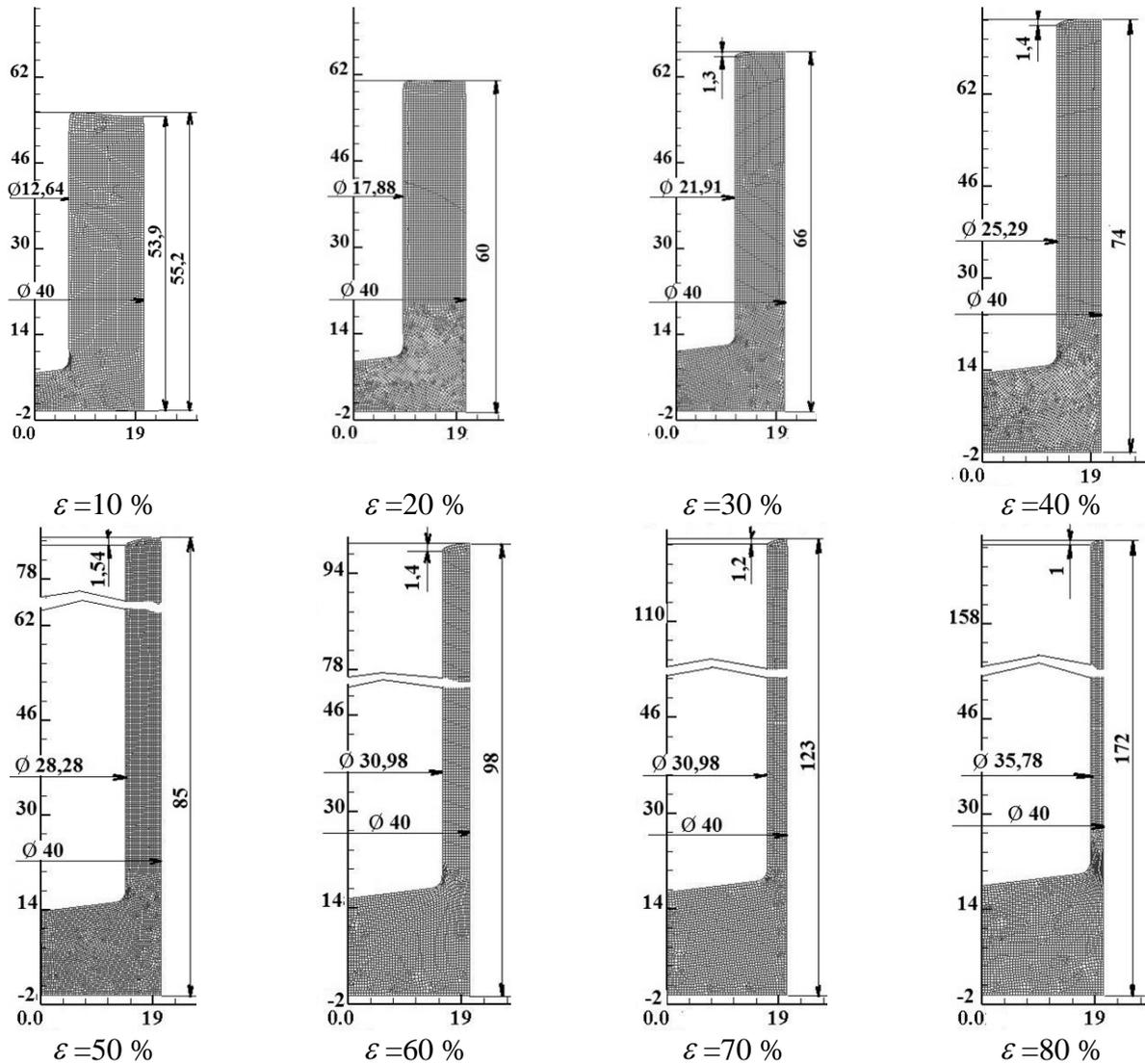


Рис. 7. Форма и размеры в миллиметрах изделий после выдавливания с разной степенью деформации ε

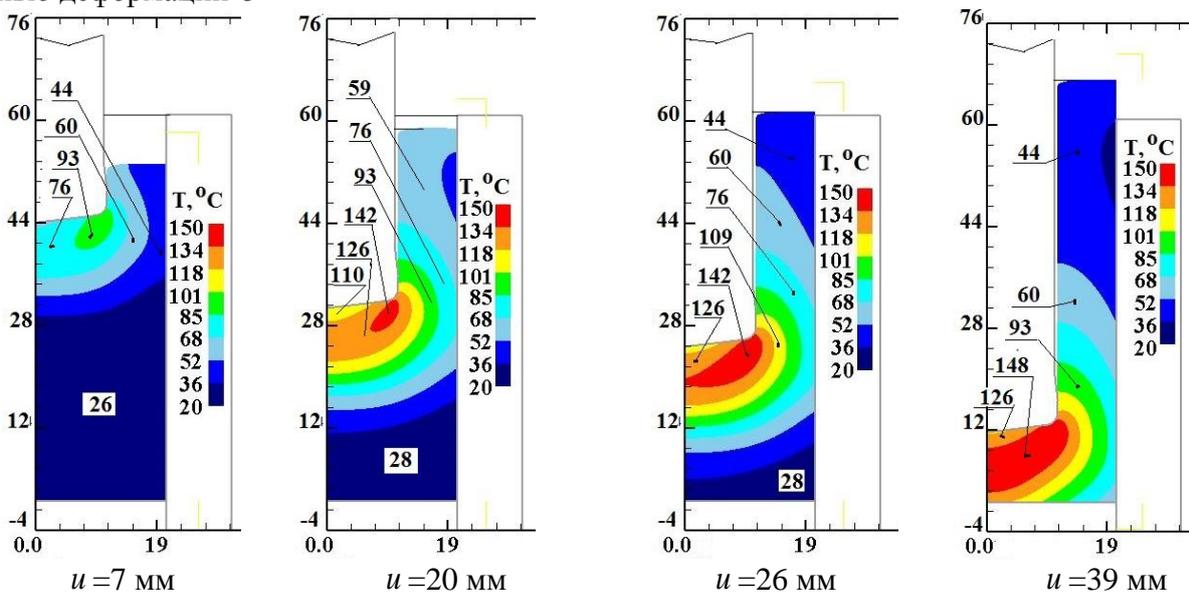


Рис. 8. Распределения температуры в сформированной заготовке при разных перемещениях пуансона. Размеры по осям координат приведены в миллиметрах

Температура сформированного металла в конце выдавливания со степенями деформации $\varepsilon = 10, 40$ и 80% приведена на рис. 9. При выдавливании с $\varepsilon = 10\%$ температура в очаге деформации достигает значений в пределах $110^\circ \dots 120^\circ$. В стенке сформированной заготовки температура повышается до $38^\circ \dots 62^\circ$. Формообразование с $\varepsilon = 40\%$ приводит к возрастанию температуры до $130^\circ \dots 170^\circ$ в очаге деформации и $43^\circ \dots 120^\circ$ в стенке. Выдавливание с $\varepsilon = 80\%$ приводит к разогреву металла до температуры $309^\circ \dots 350^\circ$ в месте перехода донной части в стенку, а в самой стенке получено $165^\circ \dots 245^\circ$.

Расчетным путем определено деформированное состояние металла после выдавливания с разными степенями деформаций. На рис. 10 показаны распределения интенсивности деформаций ε_i в изделиях после выдавливания со степенями деформации $\varepsilon = 10, 40$ и 80% . При выдавливании с $\varepsilon = 10\%$ имеет место неравномерная проработка структуры металла холодной пластической деформацией по ширине стенки изделия. Получены значения $\varepsilon_i = 1,4$ в слоях металла, находящихся вблизи полости, и $\varepsilon_i = 0,18$ на середине стенки изделия. Внешние слои металла стеки практически не деформируются. Интенсивная проработка металла пластической деформацией по ширине стенки изделий происходит при выдавливании со степенью деформации $\varepsilon = 30\%$ и выше. Формообразование полых изделий с $\varepsilon = 40\%$ приводит к достижению величины $\varepsilon_i = 1,5$ в слоях металла вблизи полости и $\varepsilon_i = 0,65$ во внешних слоях металла стенки изделия. Дальнейшее увеличение величины степени деформации ε приводит к выравниванию значений ε_i по ширине стенки изделий. Полученные значения интенсивности деформаций с использованием экспериментальной диаграммы истинных напряжений дают возможность прогнозировать предел текучести сформированного металла стенки и донной части изделий.

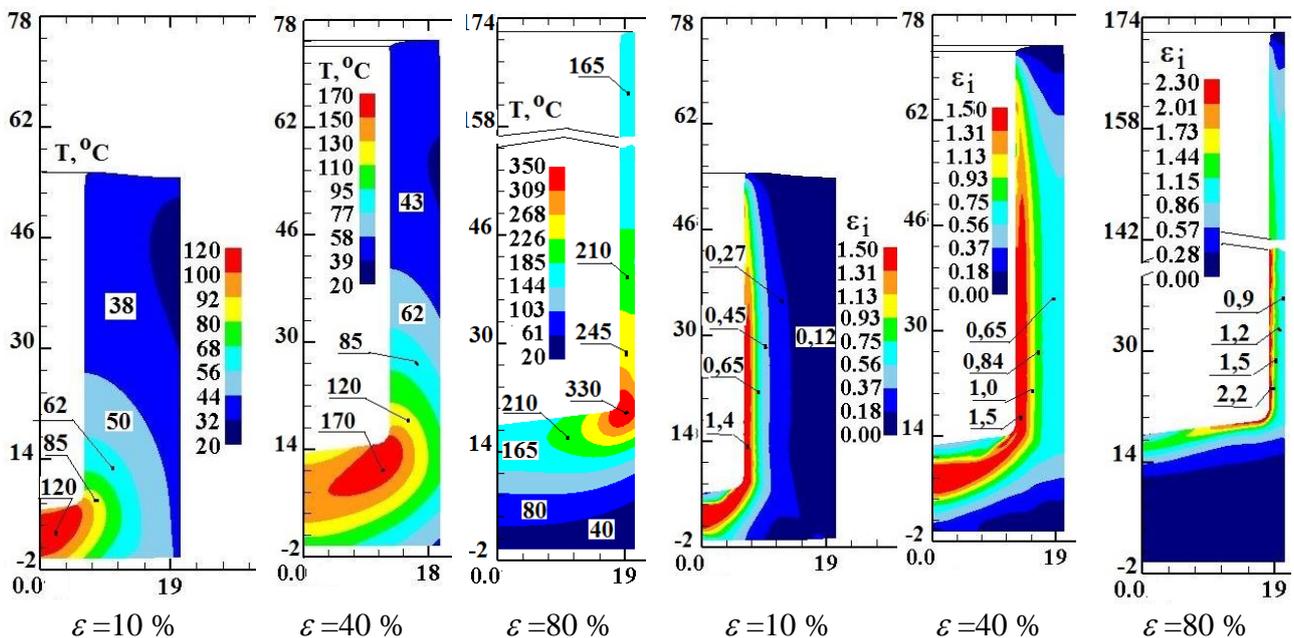


Рис. 9. Температура сформированного металла в конце выдавливания со степенями деформации $\varepsilon = 10, 40$ и 80%

Рис. 10. Распределения интенсивности деформаций ε_i в изделиях после выдавливания со степенями деформации $\varepsilon = 10, 40$ и 80%

ВЫВОДЫ

В работе выполнен анализ методом конечных элементов холодного обратного выдавливания коническим пуансоном полых изделий с разной степенью деформации из малоуглеродистой стали. Использована упруго-пластическая с упрочнением модель металла. Определены зависимости усилий выдавливания от перемещений пуансонов, распределения нормальных напряжений на деформирующем инструменте при максимальном усилии выдавливания и после извлечения пуансонов из сдеформированных заготовок. Установлены величины усилий извлечения пуансонов и усилий выталкивания сдеформированных заготовок из матрицы. Выявлены конечные формы и размеры изделий после выдавливания. Расчетным путем определен разогрев металла при холодном формообразовании полых изделий с разными степенями деформации. Полученные результаты существенно дополняют необходимые данные для разработки технологических процессов холодного выдавливания полых изделий, проектирования штамповой оснастки и выбора прессового оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодная объемная штамповка. Справочник под. ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1972. – 495с.
2. Ковка и объемная штамповка: Справочник. В 4-хт. / Ред. Совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. . – Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
3. Овчинников А.Г. Основы теории холодного выдавливания на прессах / А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1987. – 205 с.
4. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В.А. Евстратов. – Харьков.: Вища школа, 1987. – 142 с.
5. Калюжный В.Л. Влияние геометрии рабочего торца плоско-конусного пуансона на силовые режимы и качество изделий при холодном выдавливании стаканов / В.Л. Калюжный, А.В. Шапочка // Усовершенствование процессов и оборудования для обработки давлением в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2001. – С. 214–216.
6. Калюжный В.Л. Влияние контактного трения на процесс обратного выдавливания стаканов / В.Л. Калюжный, В.Н. Горностай // Вестник Житомирского инженерно-технологического института. – Житомир: ИТИ, 2001. – №19. – С. 36–39.
7. Калюжный В.Л. Расчетный анализ влияния рабочего торца пуансона на процесс обратного выдавливания стаканов / В.Л. Калюжный, В.Н. Горностай // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Днепропетровск, 2002. – №8–9. – С. 519–523.
8. Калюжный В.Л. Расчетный анализ обратного выдавливания стаканов из заготовок разной высоты / В.Л. Калюжный, В.Н. Горностай // Технологические системы. – Киев, 2002. – №3(14). – С. 73–77.
9. Калюжный В.Л. Сравнительный анализ процессов обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздачей изделий с полостью постоянного диаметра / В.Л. Калюжный, Л.И. Алиева, И.П. Куликов // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. – №4(37). – С. 87–92.
10. Алиева Л. И. Экспериментальное исследование процессов штамповки полых деталей типа стакана / Л. И. Алиева, О. В. Чучин // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VI Международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию кафедры «Обработка металлов давлением» 19–21 ноября 2014 года. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. – С. 8–10.

REFERENCES

1. *Holodnaja obemnaja shtampovka. Spravochnik pod. red. G.A. Navrockogo. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 495s.*
2. *Kovka i obemnaja shtampovka: Spravochnik. V 4-ht. / Red. Sovet: E.I. Semenov (pred.) i dr. . – T. 3. Holodnaja obemnaja shtampovka / Pod red. G.A. Navrockogo. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 384 s.*
3. *Ovchinnikov A.G. Osnovy teorii holodnogo vydavlivanija na pressah / A.G. Ovchinnikov. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 205 s.*
4. *Evstratov V.A. Osnovy tehnologii vydavlivanija i konstruirovanija shtampov / V.A. Evstratov. – Har'kov.: Vishha shkola, 1987. – 142 s.*

5. Kaljuzhnyj V.L. Vlijanie geometrii rabocheho torca plosko-konusnogo puansona na silovye rezhimy i kachestvo izdelij pri holodnom vydavlivanii stakanov / V.L. Kaljuzhnyj, A.V. Shapochka // *Usovershenstvovanie processov i oborudovanija dlja obrabotki davleniem v metallurgii i mashinostroenii: sb. nauch. trudov.* – Kramatorsk : DGMA, 2001. – S. 214–216.

6. Kaljuzhnyj V.L. Vlijanie kontaktного trenija na process obratnogo vydavlivaniija stakanov / V.L. Kaljuzhnyj, V.N. Gornostaj // *Vestnik Zhitomirskogo inzhenerno-tehnologicheskogo instituta.* – Zhitomir: ITI, 2001. – №19. – S. 36–39.

7. Kaljuzhnyj V.L. Raschetnyj analiz vlijaniija rabocheho torca puansona na process obratnogo vydavlivaniija stakanov / V.L. Kaljuzhnyj, V.N. Gornostaj // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'.* – Dnepropetrovsk, 2002. – №8–9. – S. 519–523.

8. Kaljuzhnyj V.L. Raschetnyj analiz obratnogo vydavlivaniija stakanov iz zagotovok raznoj vysoty / V.L. Kaljuzhnyj, V.N. Gornostaj // *Tehnologicheskie sistemy.* – Kiev, 2002. – №3(14). – S. 73–77.

9. Kaljuzhnyj V.L. Sravnitel'nyj analiz processov obratnogo vydavlivaniija i prjamogo vydavlivaniija s razdachej izdelij s polost'ju postojannogo diametra / V.L. Kaljuzhnyj, L.I. Aliieva, I.P. Kulikov // *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. trudov.* – Kramatorsk: DGMA, 2013. – №4(37). – S. 87–92.

10. Aliieva L. I. Jeksperimental'noe issledovanie processov shtampovki polyh detalej tipa stakana / L. I. Aliieva, O.V. Chuchin // *Resursosberezhenie i jenergojeffektivnost' processov i oborudovanija obrabotki davleniem v mashinostroenii i metallurgii. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvjashhennoj 85-letiju kafedry «Obrabotka metallov davleniem» 19–21 nojabrja 2014 goda.* – Har'kov : NTU «HPI», 2014. – S. 8–10.

Калюжный В. Л. – д-р техн. наук, проф. каф. МПМиРП НТУУ «КПИ»

Алиева Л. И. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ДГМА, докторант

Горностай В. Н. – канд. техн. наук, доц. каф. МПМиРП НТУУ «КПИ»

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: kwl_2011@ukr.net, omd@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 21.03.2016 г.