

УДК 621.735.32.001.8

Денищенко П. Н.
Коваленко В. М.
Королёв К. Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ВЫТЯЖКИ В ШТАМПЕ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ПРИЖИМОМ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

Уменьшение усилий деформирования, а, следовательно, и нагрузок на рабочие части штампов и оборудования при листовой штамповке – одно из приоритетных направлений в области теории обработки металлов давлением.

Перспективным способом уменьшения усилия деформирования в процессах обработки металлов давлением является комбинированное нагружение деформируемой заготовки, заключающееся в сочетании возвратно-поступательного движения деформирующего инструмента и вращения его вокруг своей оси и соответственно в сочетании линейной и сдвиговой деформации заготовки [1–3].

Однако в этих работах анализ силового режима выполнялся с использованием инженерного метода, особенно это касается процессов вытяжки в штампах с вращающимся прижимом.

Целью данной работы является оценка и сравнение методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния в заготовке и силового режима при классическом процессе вытяжки и вытяжке в штампе с вращающимся прижимом.

С учетом целесообразности трехмерного анализа напряженно-деформированного состояния металла при вытяжке в штампе с вращающимся прижимом в рамках данного исследования была разработана соответствующая численная математическая модель, основанная на использовании метода конечных элементов.

В качестве критериальной оценки напряженно-деформированного состояния металла при реализации процессов вытяжки с вращающимся прижимом использовались результаты, полученные на основе метода конечных элементов, который является наиболее распространенным методом решения прикладных задач теории обработки металлов давлением. Суть данного метода заключается в разбиении некой области на несколько не перекрывающихся между собой подобластей (элементов) с последующей аппроксимацией функций [4].

Для построения дискретной модели поступают следующим образом: в рассматриваемой области фиксируется конечное число точек, эти точки называются узлами; значение непрерывной величины в каждом узле считается переменной, которая должна быть определена; область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами, эти элементы имеют общие узловые точки, и в совокупности аппроксимируют форму области; непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом, который определяется при помощи узловых значений этой величины, для каждого элемента определяется свой полином, но полиномы определяются таким образом, чтобы сохранить непрерывность величины вдоль границ элемента.

Следует отметить, что метод конечных элементов является приближенным методом и его точность зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов. Так, например, более частая сетка требуется там, где ожидается большой градиент деформаций или напряжений, в тоже время более редкая сетка может применяться в зонах с более или менее постоянными деформациями или напряжениями, а также в областях, не представляющих особого интереса. Форма конечных элементов также влияет на точность вычислений [4].

При этом было учтено, что в процессе действия на тело внешних нагрузок его точки перемещаются относительно друг друга в новые положения, а вектор перемещения имеет вид [5, 6]:

$$|u| = |u_x, u_y, u_z|, \quad (1)$$

где u_x, u_y, u_z – проекции вектора перемещений на соответствующие координатные оси x, y, z .

Деформации в материале, а также соответствующие им напряжения, вызывает разность перемещений двух соседних точек. В соответствии с основными положениями теории обработки металлов давлением [7] известно, что деформации и напряжения в материале состоят из шести компонентов:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – для напряжений

и

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – для деформаций.

При математическом моделировании напряженно-моделированного состояния металла листовых заготовок, подвергаемых вытяжке в штампе с вращающимся прижимом, был выполнен расчет в системе конечно-элементного моделирования ABAQUS [5, 6].

Расчетная схема, применительно к данному математическому моделированию и само решение заключалось в построении конечно-элементной сетки и разбиении ее на конечное множество элементарных элементов. Модель листовой заготовки была выполнена с использованием восьмиточечных элементов с контролем разрушения типа C3D8R [5, 6].

Данные расчеты были выполнены применительно к вытяжному штампу для которого были приняты диаметр матрицы и диаметр пуансона соответственно $D_m = 26$ мм, $D_p = 23$ мм. Радиусы скруглений кромки пуансона и вытяжной кромки матрицы 3 мм и 5 мм соответственно. Непосредственно математическое моделирование процесса было выполнено для листовой заготовки с диаметром 50 мм и толщиной 1 мм.

Исходная конечно-элементная модель имеет следующие граничные условия: пуансон имеют одну поступательную степень свободы, прижим имеет две степени свободы, включающих в себя возможность вращения вокруг своей оси, а также возможность перемещения по оси Y глобальной системы координат. Скорость перемещения пуансона 2 мм/с. Угловая скорость вращения прижима 2 рад/с. Усилие прижима – 13 кН.

При расчетах была принята изотропная упругопластическая модель заготовки из материала, характеризуемого механическими свойствами с учетом упрочнения [5].

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}^{nl}, \dot{\bar{\varepsilon}}^{nl}, t, f_i), \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}^{nl}$ – эквивалентная пластическая деформация;

$\dot{\bar{\varepsilon}}^{nl}$ – скорость пластической деформации;

f_i – другие предопределенные переменные [6].

Контакт между заготовкой и прижимом учитывали при помощи модели контакта «surface-to-surface contact» путем задания коэффициента трения $\mu = 0,4$, используя «classical isotropic Coulomb friction model»

$$\tau_{крит} = \mu p, \quad (3)$$

где p – нормальные контактные напряжения в плоскостях сопряжения инструмента и деформируемой заготовки [6].

Моделирование рабочего инструмента было выполнено в виде аналитически жесткой недеформируемой поверхности, полученной путем вращения кривой профиля вокруг своей оси. В процессе моделирования деформации материала заготовки использовали адаптацию сетки в формулировке Лагранжа-Эйлера [8, 9].

В качестве выходных параметров в данном случае выбирались проекции реакций RF2 в контрольной точке пуансона в глобальной системе координат, а также перемещения, деформации и напряжения в узлах конечных элементов листовой заготовки.

Приведены результаты конечно-элементного математического моделирования на различных стадиях процесса в виде расчетных полей распределений интенсивности напряжений по Мизесу (рис. 1) и эквивалентной пластической деформации (рис. 2).

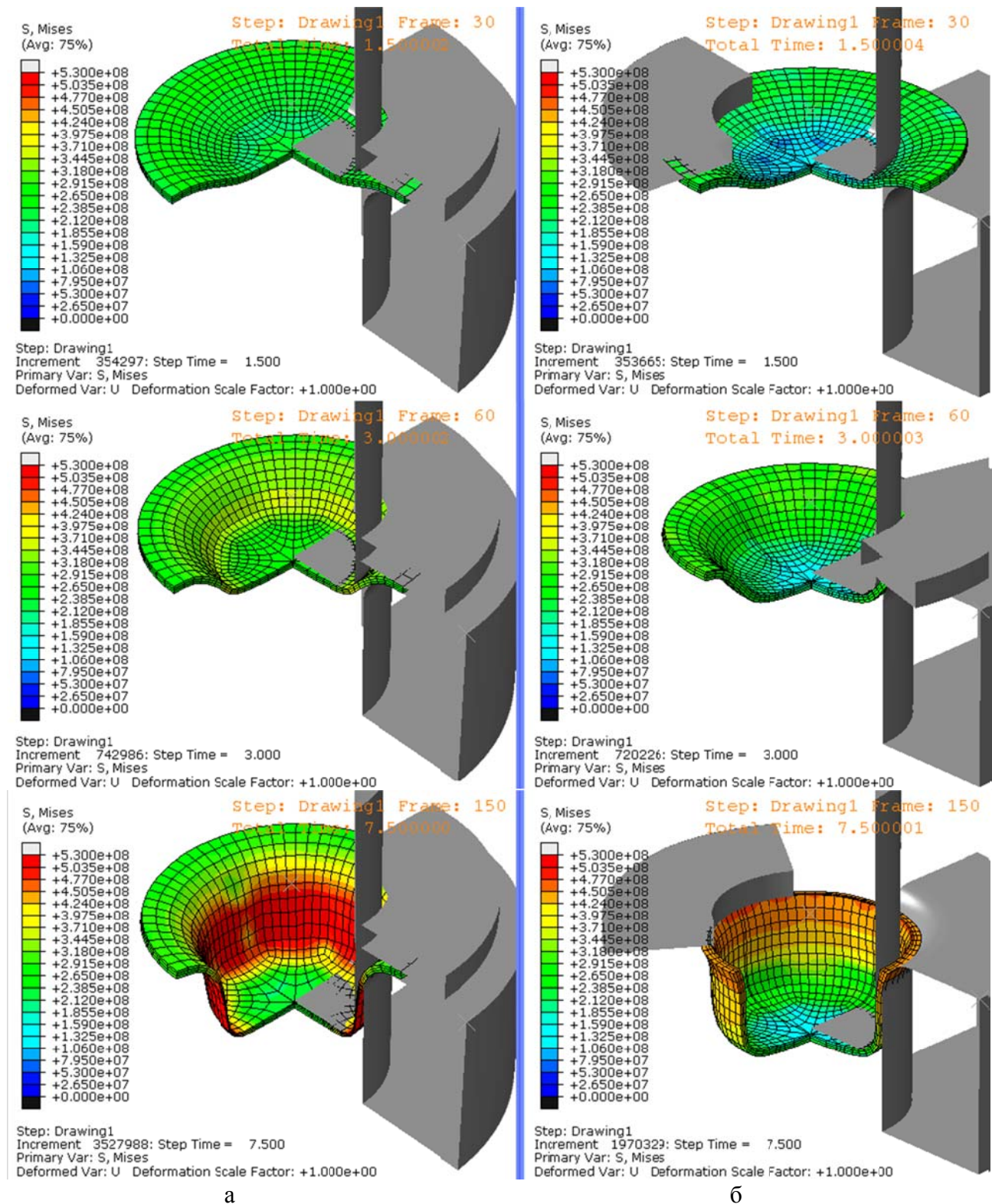


Рис. 1. Поле распределений интенсивности напряжений по Мизесу на различных стадиях процесса вытяжки в штампе (Па):

а – без вращения прижима; б – с вращением прижима

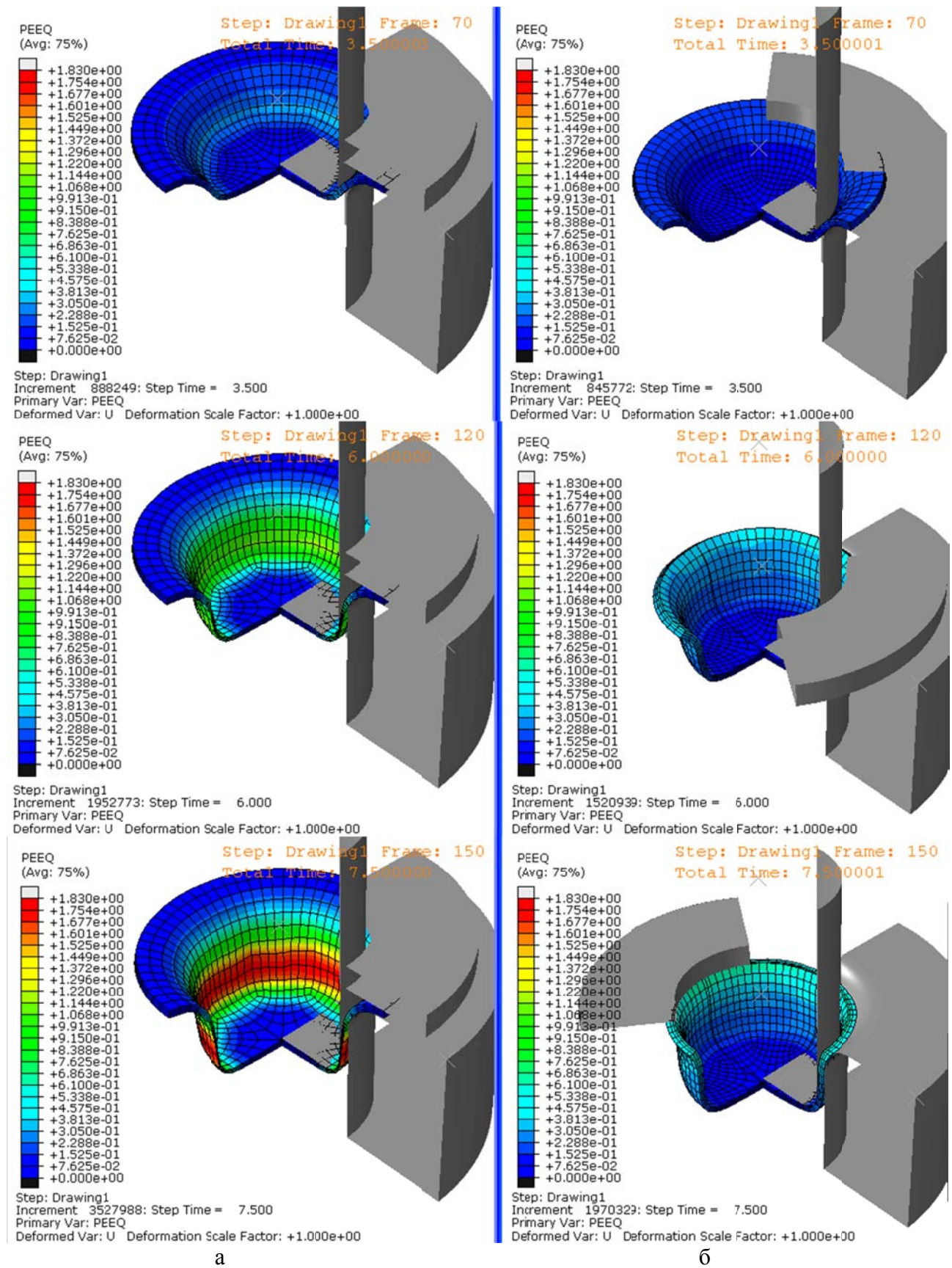


Рис. 2 – Поле распределений эквивалентной пластической деформации на различных стадиях процесса вытяжки в штампе:

а – без вращения прижима; б – с вращением прижима

Их анализ показал, что при классической схеме вытяжки происходит интенсивное утонение заготовки в области скругления кромки пуансона, чего не наблюдается при вытяжке в штампе с вращающимся прижимом. Кроме того, при вытяжке в штампе с вращающимся прижимом, максимальные напряжения и деформации действует ближе к радиусу закругления кромки матрицы, а уменьшение усилия вытяжки происходит примерно в 1,29 раза (рис. 3). Это подтверждается результатами исследований приведенных в работе [3]. На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что механизм формирования напряженно-деформированного состояния металла в данном случае имеет достаточно сложный характер, что подтверждает целесообразность использования конечно-элементного подхода в качестве критериального применительно к расчету технологических режимов процесса вытяжки листовых заготовок в штампах с осевым вращением прижима.

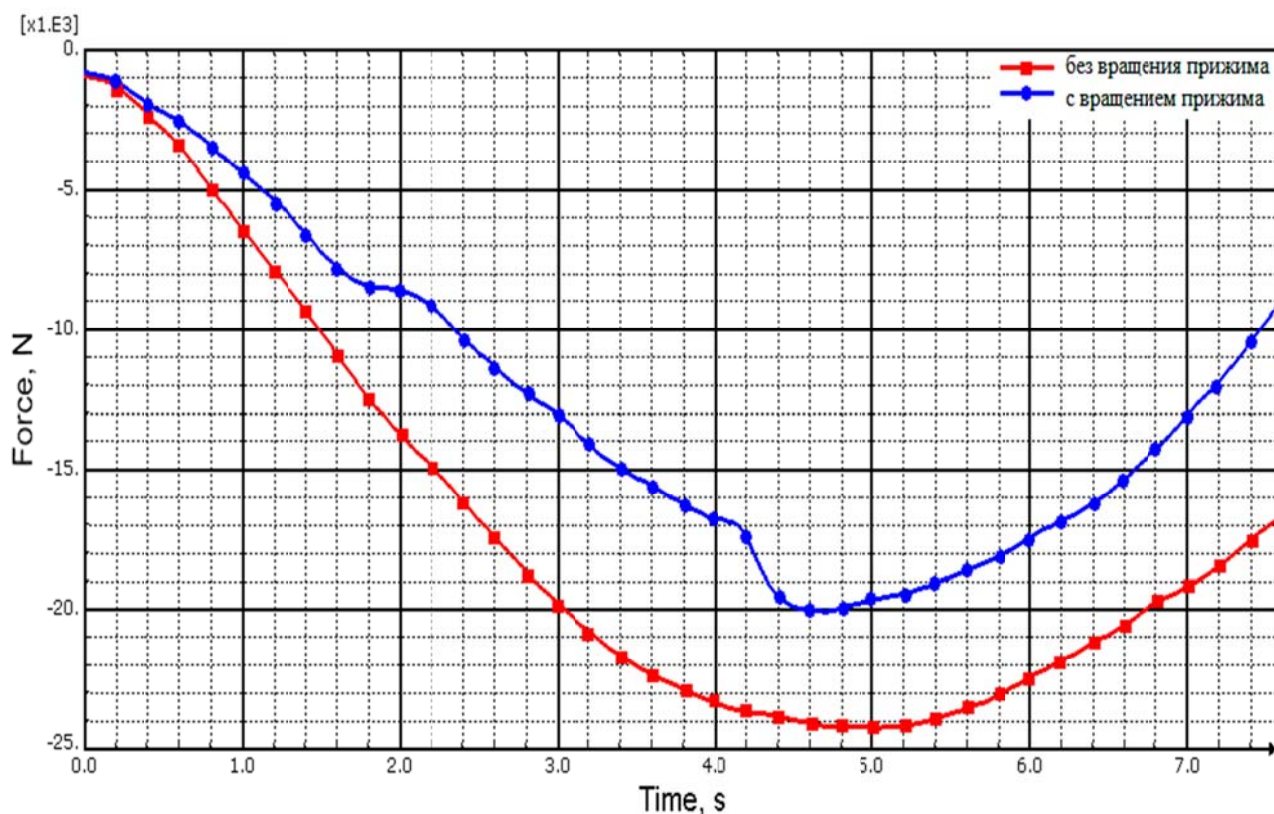


Рис. 3. Графики изменения усилий вытяжки с вращением и без вращения прижима

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что:

1. при вытяжке в штампе с осевым вращением прижима, максимальные напряжения и деформации действуют ближе к радиусу закругления кромки матрицы;
2. утонение стенки заготовки равномерно распределяется по всей её высоте;
3. уменьшение усилия в случае вытяжки с вращающимся прижимом происходит примерно в 1,29 раза.

Результаты работы могут быть использованы при совершенствовании процессов осесимметричной вытяжки, а также при развитии методов управления пластическим формоизменением при листовой штамповке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов А. Л. Теория осадки с кручением заготовки / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением, 2007. – № 6. – С. 3–9
2. Воронцов А. Л. Теория малоотходной штамповки / А. Л. Воронцов. – М. : Машиностроение, 2005. – 859 с.

3. Коваленко В. М. Оценка влияния комбинированного нагружения при вытяжке на величину усилия прижима / В. М. Коваленко, П. Н. Денищенко // *Досягнення та проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 4. – С. 133–136.
4. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гриневич. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 448 с.
5. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния металла при правке непрерывнолитых заготовок / В. А. Федоринов, А. А. Завгородний, С. М. Стриченко, Е. Г. Литвинова // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2 (27). – С. 58–62.
6. Манилык Т. Практические рекомендации программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.6. / Т. Манилык, К. Ильин. – М. : МФТИ, Тесис, 2006. – 68 с.
7. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
8. Rodriguez-Ferran A. Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation for hyperelastoplasticity / A. Rodriguez-Ferran, A. Perez-Foguet, A. Huerta // *Int. J. Numer. Methods Eng*, 2002. – № 53 (8). – P. 1831–1851.
9. Armero F. An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for finite strain plasticity / F. Armero, E. Love // *Int. J. Numer. Methods Eng*. – 2003. – № 57 (4). – P. 471–508.

REFERENCES

1. Vorontsov A. L. Teoriya osadki s krucheniem zagotovki / A. L. Vorontsov // *Kuznechno-shtampovnochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*, 2007. – № 6. – S. 3–9.
2. Vorontsov A. L. Teoriya malootkhodnoy shtampovki / A. L. Vorontsov. – М. : Mashinostroenie, 2005. – 859 s.
3. Kovalenko V. M. Otsenka vliyaniya kombinirovannogo nagruzheniya pri vytyazhke na velichinu usiliya prizhima / V. M. Kovalenko, P. N. Denishchenko // *Dosyagnennyya ta problemi rozvitku tekhnologiy i mashin obrobki tiskom* : zб. nauk. pr. – Kramators'k : DDMA, 2011. – № 4. – S. 133–136.
4. Komp'yuternoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem / V. N. Danchenko, A. A. Milenin, V. I. Kuz'menko, V. A. Grinevich. – Dnepropetrovsk : Sistemnye tekhnologii, 2005. – 448 s.
5. Konechno-elementnoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metala pri pravke nepreryvnolitykh zagotovok / V. A. Fedorinov, A. A. Zavgorodniy, S. M. Strichenko, E. G. Litvinova // *Obrabotka materialov davleniem* : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2011. – № 2 (27). – S. 58–62.
6. Manilyk T. Prakticheskie rekomendatsii programmnogo kompleksa ABAQUS v inzhenernykh zadachakh. Versiya 6.6. / T. Manilyk, K. Il'in. – М. : МФТИ, Тезис, 2006. – 68 с.
7. Storozhev M. V. Teoriya obrabotki metallov davleniem / M. V. Storozhev, E. A. Popov. – М. : Mashinostroenie, 1977. – 423 s.
8. Rodriguez-Ferran A. Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation for hyperelastoplasticity / A. Rodriguez-Ferran, A. Perez-Foguet, A. Huerta // *Int. J. Numer. Methods Eng*, 2002. – № 53 (8). – P. 1831–1851.
9. Armero F. An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for finite strain plasticity / F. Armero, E. Love // *Int. J. Numer. Methods Eng*, 2003. – № 57 (4). – P. 471–508.

Денищенко П. Н. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ
Коваленко В. М. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ
Королёв К. Г. – аспирант ДонГТУ

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: kovalenko.vick@yandex.ru