Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 http://naukovedenie.ru/

Том 9, №3 (2017) http://naukovedenie.ru/vol9-3.php

URL статьи: http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN317.pdf

Статья опубликована 15.06.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:
Кривошеин В.А., Рукавичко Е.А., Анцифиров А.А. Разработка технологии получения полусферических изделий методом инкрементальной формовки // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №3 (2017) http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN317.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.7.043

Кривошеин Виталий Александрович
ГОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва[1]
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: krivosheinvitaly@gmail.com

Рукавичко Елена Александровна
ГОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва
Студент
E-mail: rukavichko@mail.ru

Анцифиров Алексей Анатольевич
ГОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: aaleksei@inbox.ru

Разработка технологии получения полусферических изделий методом инкрементальной формовки

Аннотация. В работе представлено исследование формоизменения листовых материалов посредством инкрементальной формовки для изготовления деталей и полуфабрикатов типа полусфера. В силу ограниченности сведений в отечественной литературе, исследование процессов инкрементальной штамповки полусферических изделий производилось преимущественно на основе обзора зарубежных источников литературы. Основываясь на литературном обзоре зарубежных источников, предложены методы деформирования листового материала за счет обеспечения требуемой траектории перемещения инструмента с целью получения полусферических деталей. Разработана методика моделирования процессов инкрементальной формовки в программном комплексе Abaqus. Проведено моделирование и анализ представленных результатов штамповки полусферических изделий. Представлены выводы о перспективе использования процесса инкрементальной формовки.

Ключевые слова: инкрементальная формовка; локальный очаг деформирования; моделирование; штамповка

[1] 105005, Москва, 2-я бауманская ул, д.5, стр. 22, кафедра МТ6

Введение

В настоящее время проблема производства деталей сложных форм в условиях единичного и мелкосерийного производства решается обычно с использованием большого числа последовательных технологических операций, выполняемых вручную [1, 2]. В статье на примере изделия полусферы рассматривается технологический процесс инкрементальной формовки, с помощью которого становится возможным получение деталей сложной формы исключая значительное количество технологических переходов.

Отличие процесса инкрементальной формовки от традиционных схем листовой штамповки заключается в том, что в процессе инкрементальной формовки очаг пластической деформации локализован около пуансона. В следствии чего, сила деформирования уменьшается и отсутствует необходимость в использовании зачастую дорогой штамповой оснастки и мощного прессового оборудования [3]. Деталь получается не за счет совмещения верхней и нижней частей штампа, а за счет реализации перемещения инструмента по заданному контуру по ранее рассчитанным режимам. Во время процесса формовки инструмент используется для постепенного формирования листа в деталь, и его траектория задается с обрабатывающего центра с ЧПУ, а сам процесс инкрементальной формовки может быть осуществлен в автоматизированном режиме.

1. Общие сведения об инкрементальной формовке

Принципиальная схема процесса инкрементальной формовки [1] представлена на рис. 1: заготовка, удерживаемая прижимом, подвергается штамповке пуансоном, обеспечивающим локальный очаг пластической деформации, при этом осуществляется вращение пуансона для снижения сил контактного трения. Рассматриваемая технология формовки позволяет получать изделия типа полусфера из сталей с различными физическими свойствами [1, 4].

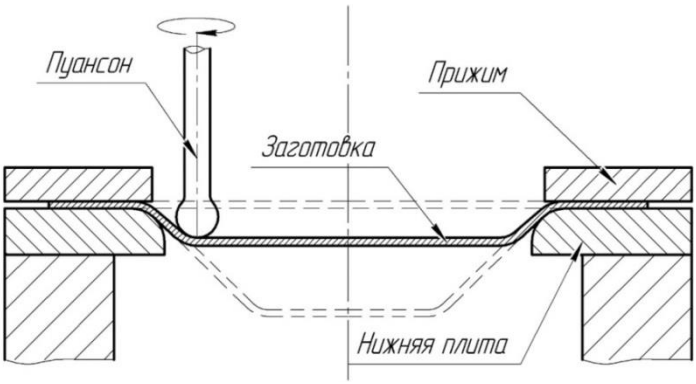


Рисунок 1. *Принципиальная схема инкрементальной формовки (источник: Кривошеин В.А., Анцифиров А.А., Майстров Ю.В. Перспективы использования технологий инкрементальной формовки в современном производстве // Известия высших учебных заведений. Машиностроение - 2014 - № 11. - С. 84-89)*

Традиционная схема штамповки, в частности традиционная схема формовки включает в себя следующие этапы: 1) проектирование формы; 2) моделирование изделия в программных комплексах и разработка технологического процесса; 3) проектирование оснастки; 4) изготовление оснастки; 5) наладка оборудования; 6) штамповка.

Предлагаемая схема инкрементальной формовки, включает такие этапы, как: 1) проектирование формы; 2) моделирование изделия в программном комплексе и получение программы для деформирования в виде G-кода; 3) изготовление изделия на универсальном

оборудовании. Технологический процесс с применением инкрементальной формовки уменьшает временные и материальные затраты при изготовлении изделия [5, 6, 7].

Для получения качественных изделий типа полусфера (рис. 2) необходимо решить такую задачу, как разнотолщинность получаемых изделий. Инкрементальная формовка, при которой очаг пластической деформации локализован около деформирующего инструмента [8], позволяет уменьшить разнотолщинность сферического изделия.

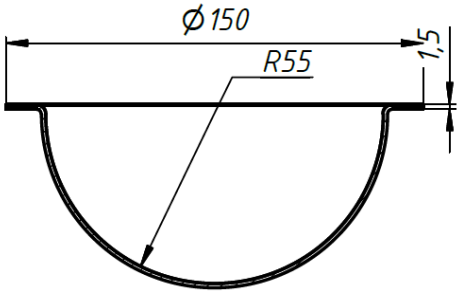


Рисунок 2. *Эскиз изделия типа полусферы (разработано авторами)*

Для получения изделий методом инкрементальной формовки предлагаются следующие схемы деформирования [12]:

- поэтапное расширение;
- метод двух путей.

Метод поэтапного расширения представляет собой процесс, в котором инструмент формирует изделие за ряд небольших последовательных шагов. Формовка происходит путем перемещения пуансона по трем координатным осям небольшими шагами, образуя конечную форму. Метод двух путей заключается в том, что на первом этапе образуется конус, а на втором формируется полусфера. Данная схема деформирования влияет на распределение толщины вдоль конечного изделия.

Так как при инкрементальной формовке инструмент перемещается по сложной траектории, то для моделирования операции использовался пакет программы Abaqus, основанный на расчете методом конечных элементов. Для создания проекта в данном программном комплексе принята следующая последовательность:

Подготовка моделей инструмента и заготовки.

1. Выбор стратегии деформирования:
   - выбор схемы деформирования;
   - задание точек перемещения в Excel;
   - проверка траектории в Wolfram Mathematica.
2. Задание параметров моделирования:
   - реология материала (модуль Юнга, коэффициент Пуансона, плотность, кривая упрочнения);
   - параметры расчета (количество конечных элементов, граничные условия, величина шага, время деформирования, амплитуды движения инструмента).
3. Анализ результатов полученной детали:
   - форма;

- толщина;
- деформации и напряжения.

Для определения размеров инструмента, необходимо основываться на габаритных размерах получаемого изделия. При достаточно большом радиусе скругления пуансона очаг пластической деформации не будет локализован, а малый радиус пуансона не обеспечит практического контакта с поверхностью заготовки. Радиус скругления необходимо выбирать из диапазона 0,05-0,08 $R_{заг}$.

2. Метод поэтапного расширения

Для первого способа деформирования рассматривается поэтапное расширение за несколько проходов. Проверку траектории движения инструмента для данного метода проводим в программном комплексе WolframMathematica, полученные амплитуды движения представлены на рис. 3.

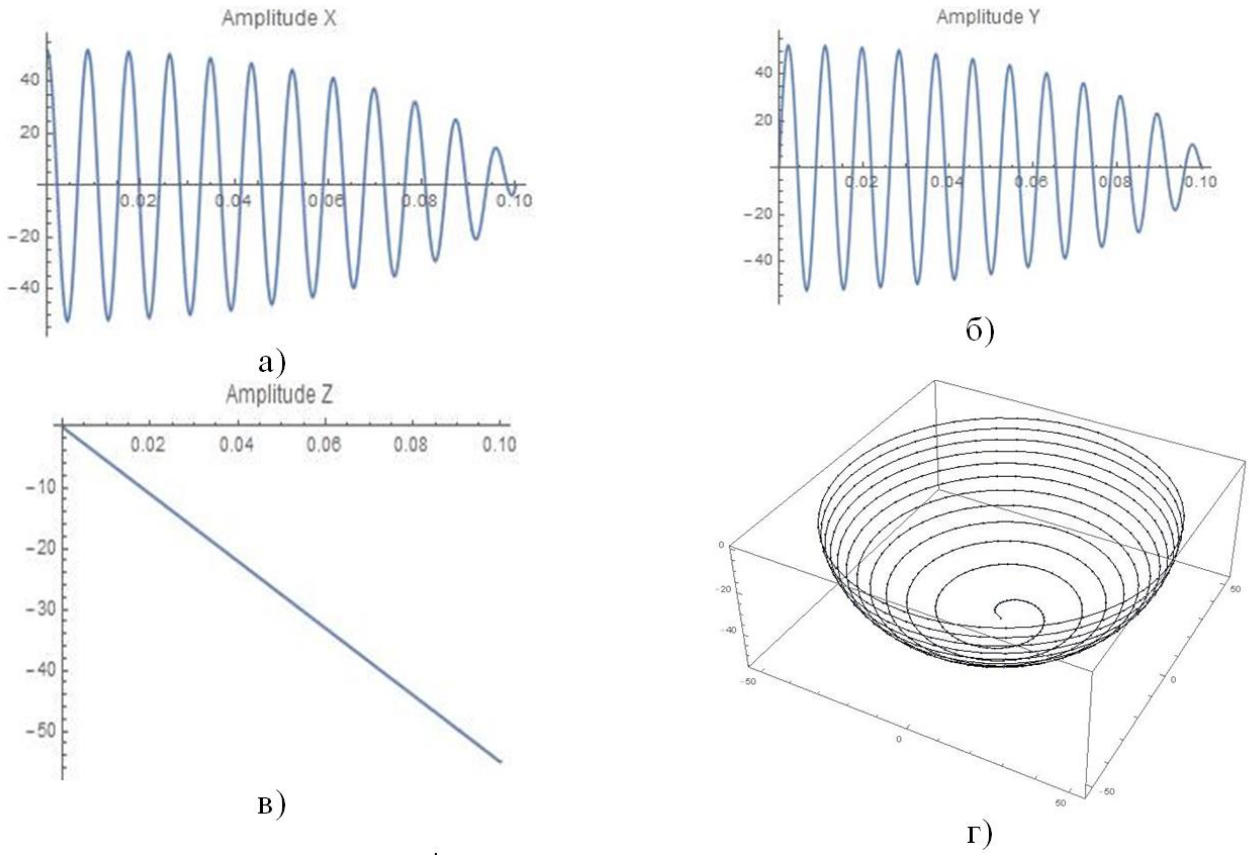


Рисунок 3. *Амплитуды движения инструмента: а), б), в) перемещение по осям X, Y, Z; г) перемещение в координатах XYZ (разработано авторами)*

Параметры моделирования реалогии материала:

1. Реология материала.

Расчет выполняется с моделью материала: 12Х18Н10Т:

- модуль Юнга - $210*10^9$ Па;
- коэффициент Пуасона - 0,3;
- плотность - 7920 $\frac{кг}{м^3}$.

На рис. 4 представлена кривая упрочнения используемого материала.

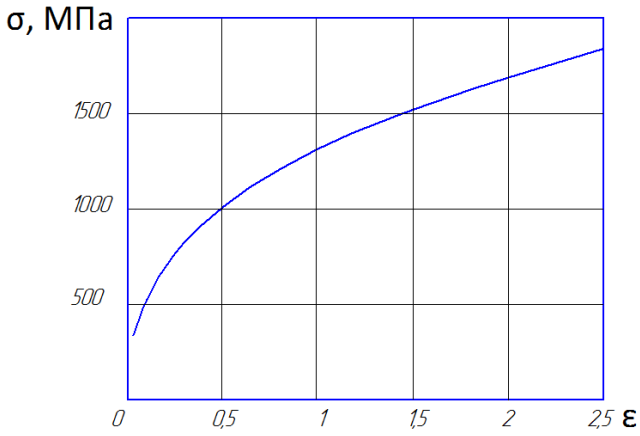


Рисунок 4. *Кривая упрочнения материала 12Х18Н10Т (разработано авторами)*

2. Параметры расчета:

- коэффициент трения - 0,15;
- размер конечного элемента 2 (1% от диаметра заготовки, при большем числе элементов точность уменьшается, при меньшем числе элеменов - большая длительность расчета);
- величина шага - 0,07 сек (0,02% от времени деформирования).

Моделирование процесса инкрементальной формовки полусферического изделия было проведено в программном комплексе Abaqus. Результаты распределения толщины по детали, представлены на рис. 5. На рис. 6. представлен график зависимости толщины изделия от радиуса полусферы, по которому видно, что толщина изделия уменьшается с увеличением радиуса, но ближе к вершине полусферы толщина вновь приобретает исходное значение. По полученным результатам можно сказать, что при самой простой схеме деформирования и применении траектории поэтапного расширения максимальное утонение составляет 65% [18].

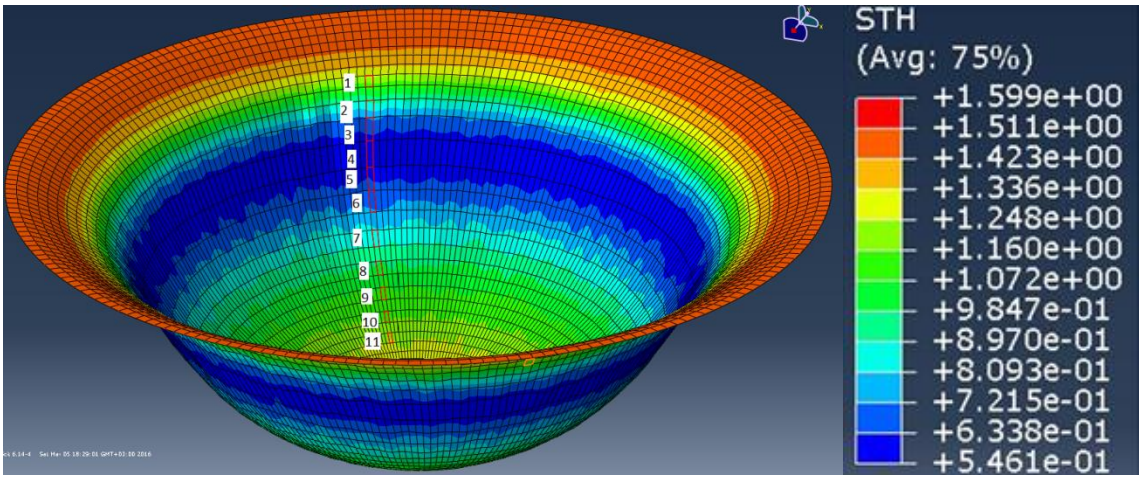


Рисунок 5. *Распределение толщины стенки по сечению полусферы (разработано авторами)*

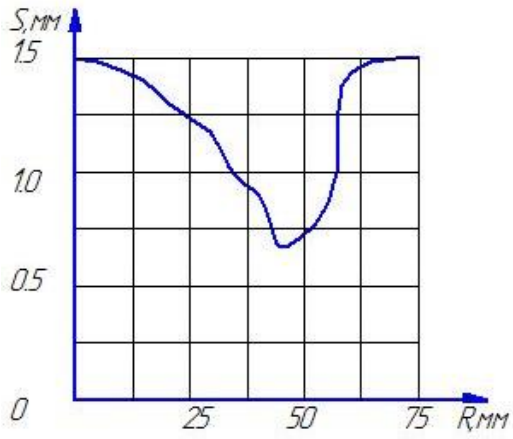


Рисунок 6. *График зависимости толщины изделия (s) от радиуса полусферы (R) (разработано авторами)*

На рис. 7 представлена диаграмма предельных деформаций для используемого материала. По результатам моделирования, используя полученные главные максимальные и минимальные деформации, можно построить точки на FLD-диаграмме, взятой из библиотеки материалов программного комплекса Autoform. Деформации в точках, указанных на рис. 5 перенесены на FLD (рис. 7). Видно, что полученные точки выходят за кривую предельных деформаций, но так как в процессе инкрементальной формовки очаг локализован около пуансона, то для оценки возможного разрушения используется предельная линия трещинообразования (FFL) для материала 12Х18Н10Т [9, 10]. Точки распределения деформаций по детали не выходят за FFL, следовательно, можно считать, что разрушения при получении полусферы методом инкрементальной формовки не произойдет [18].

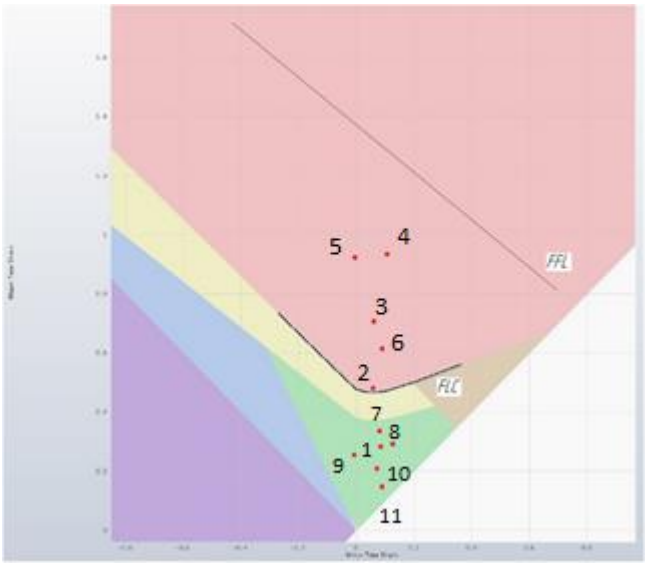


Рисунок 7. *FLD-диаграмма предельных деформаций (разработано авторами)*

3. Метод двух путей.

Второй способ деформирования состоит из двух этапов: 1 этап - формирование конуса; 2 этап - формирование полусферы. При формировании конуса на первом этапе, необходимо подобрать оптимальный угол наклона конуса, при котором распределение толщины будет равномерно [14]. Для этого с помощью программы Mathcad проведен теоретический расчет распределения толщины на двух этапах. Принято, что на первом этапе длина по направляющей конуса распределяется линейно по следующей функции:

$$dl(i) = dr + i * k * dr,$$

где: dr - длина 1-го элемента, i - число элементов, k - коэффициент удлинения (рис. 8).

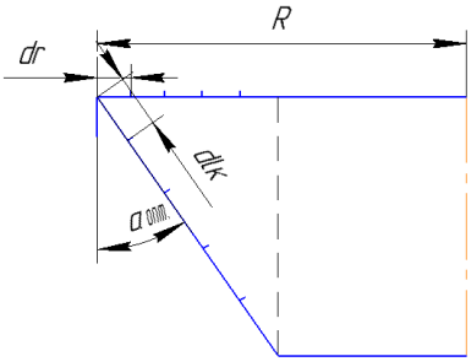


Рисунок 8. *Схема определения длины по конусу на 1-ом этапе деформирования (разработано авторами)*

По закону постоянства объемов определяем распределение толщины по конусу на 1-ом этапе деформирования (рис. 9).

$$ds(i) = \frac{s * (2r(i) * dr - dr^2)}{dl(i) * (2R - 2 * i * dr - dr)}$$

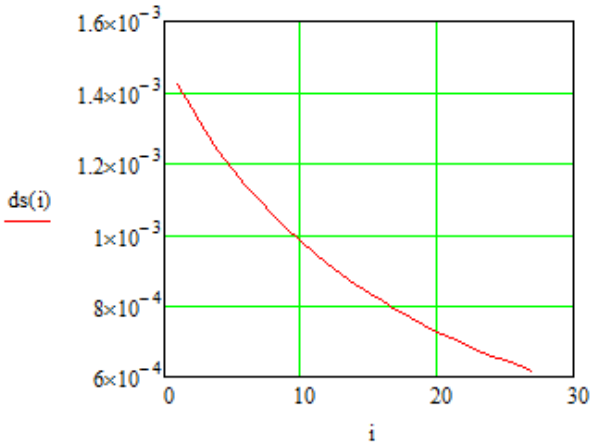
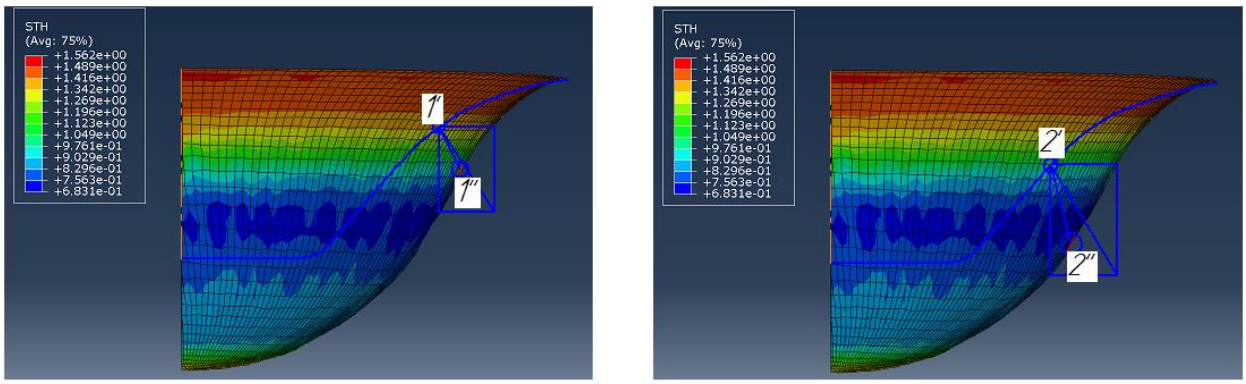


Рисунок 9. *Распределение толщины по конусу на 1-ом этапе деформирования (разработано авторами)*

Течение метала по полусфере, определяем с помощью математического моделирования в программном комплексе Abaqus (рис. 10) [15].



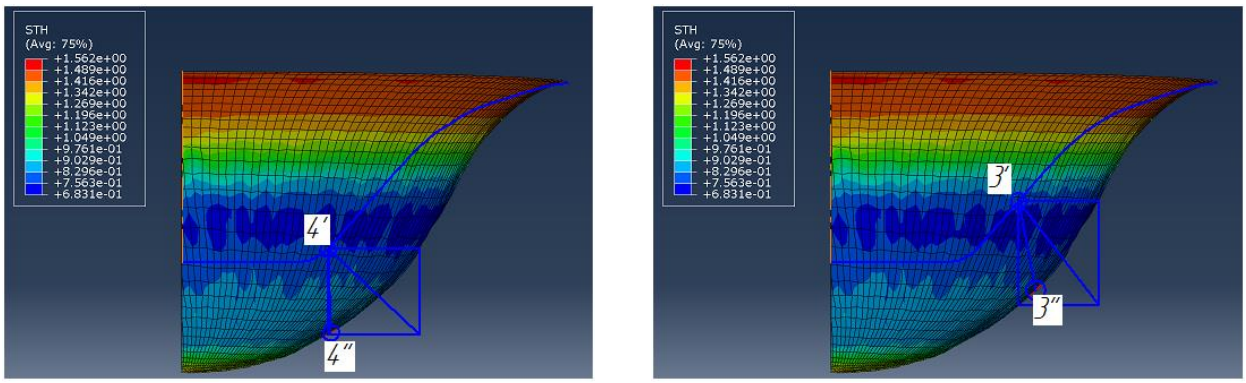
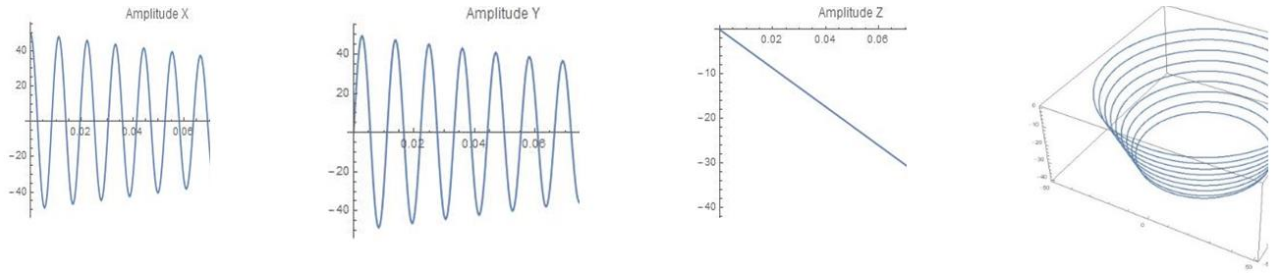


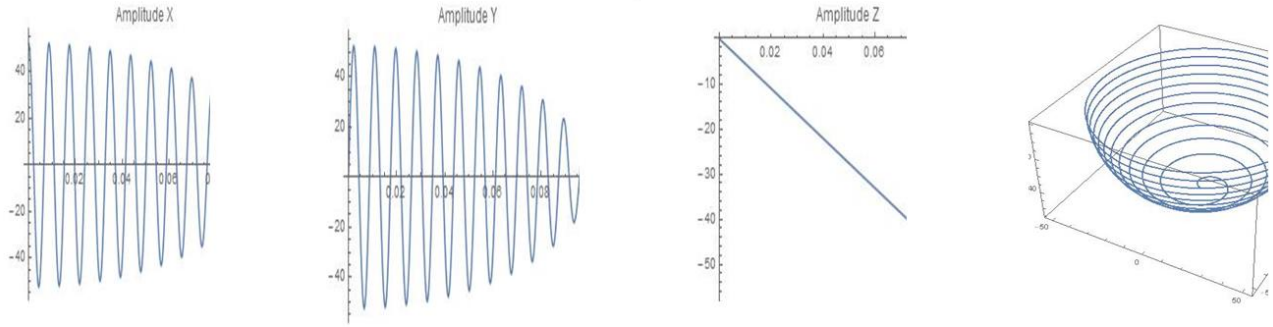
Рисунок 10. *Распределение толщины по полусфере на 2-ом этапе деформирования (разработано авторами)*

Из рис. 10 видно, что закон течения при переходе из конуса в полусферы выполняется по сложной функции, которую трудно выявить, в связи с чем теоретический расчет распределения толщины по полусфере выполнить не удалось.

Проверка траектории движения инструмента для рассматриваемого метода проводилась в программном комплексе WolframMathematica, полученные амплитуды движения представлены на рис. 11.



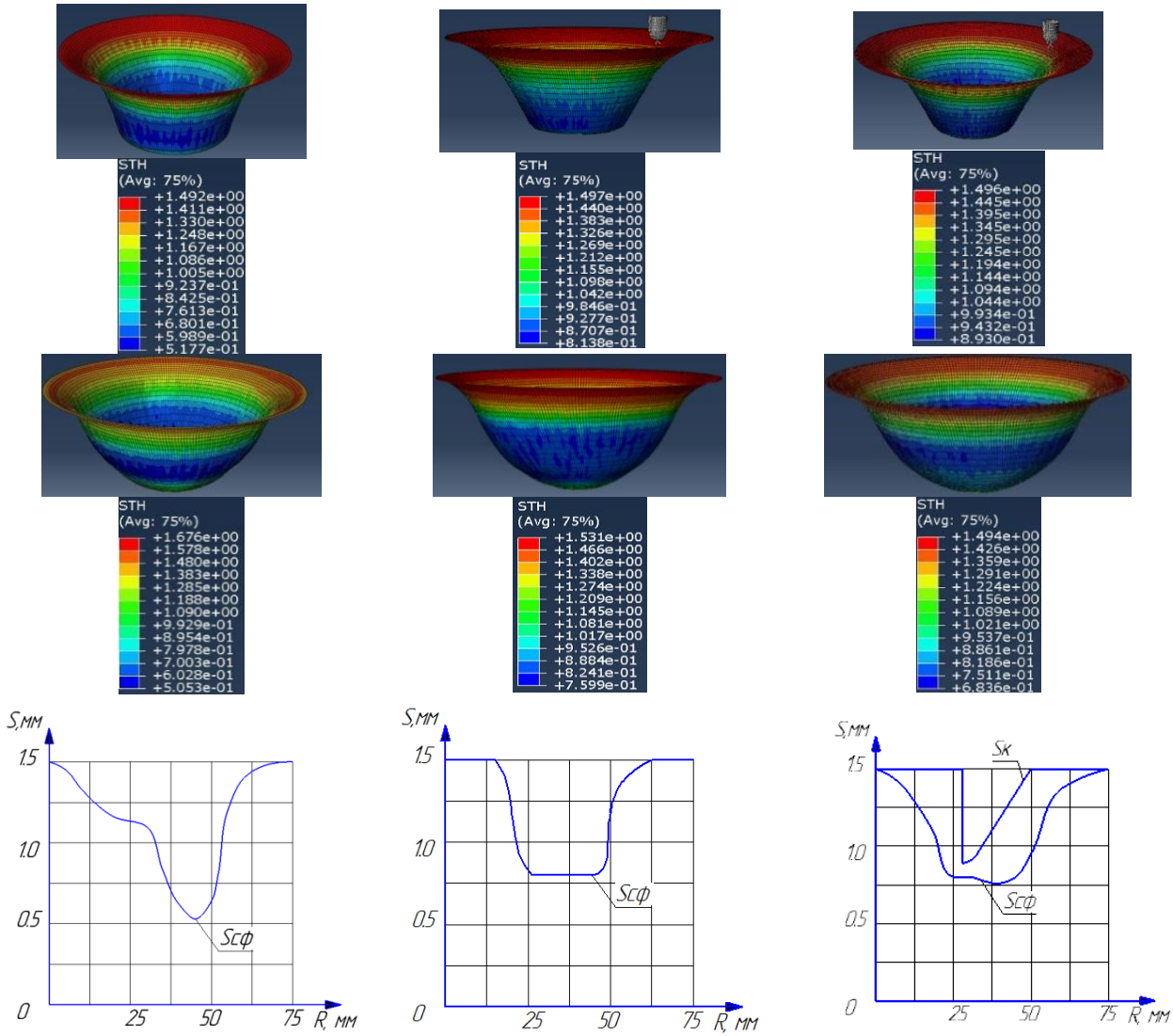
а)



б)

Рисунок 11. *Амплитуды движения инструмента: а) получение конуса; б) получение полусферы (разработано авторами)*

Моделирование процесса инкрементальной формовки полусферического изделия было проведено в программном комплексе Abaqus. Результаты распределения толщины по детали, на 1-ом и 2-ом этапе деформирования представлены на рис. 12. Было рассмотрено три угла наклона конуса: 25°, 35°, 40° [16, 17]. По представленным графикам зависимости толщины изделия от радиуса полусферы видно, что наименьшее утонение по полусфере, при угле наклона конуса на 1-ом этапе деформирования равном 35°. По полученным результатам можно сказать, что при использовании схемы метода «Двух путей» максимальное утонение по полусфере составляет 40% при заданном угле конуса 35°.



а) б) в)

Рисунок 12. *Распределение толщины по методу двух путей: а) с углом наклона конуса 25°; б) с углом наклона конуса 35°; в) с углом наклона конуса 40° (разработано авторами)*

На рис. 13 представлена диаграмма предельных деформаций для используемого материала для метода «Двух путей» с углом наклона конуса на первом этапе равном 35°. По результатам моделирования, используя полученные главные максимальные и минимальные деформации, можно построить точки на FLD-диаграмме. Видно, что полученные точки также выходят за кривую предельных деформаций, но не пресекают предельную линию трещинообразования (FFL), следовательно, разрушения при получении полусферы методом «Двух путей» формовки не будет. На рис. 14 представлено сравнение необходимой формы полусферы, с получаемой при моделировании. Максимальное расхождение составляет 1,6 мм и вызвано невысокой жесткостью листовой заготовки. Для снижения упругих деформаций следует использовать схему деформирования с контрпуансоном [1].

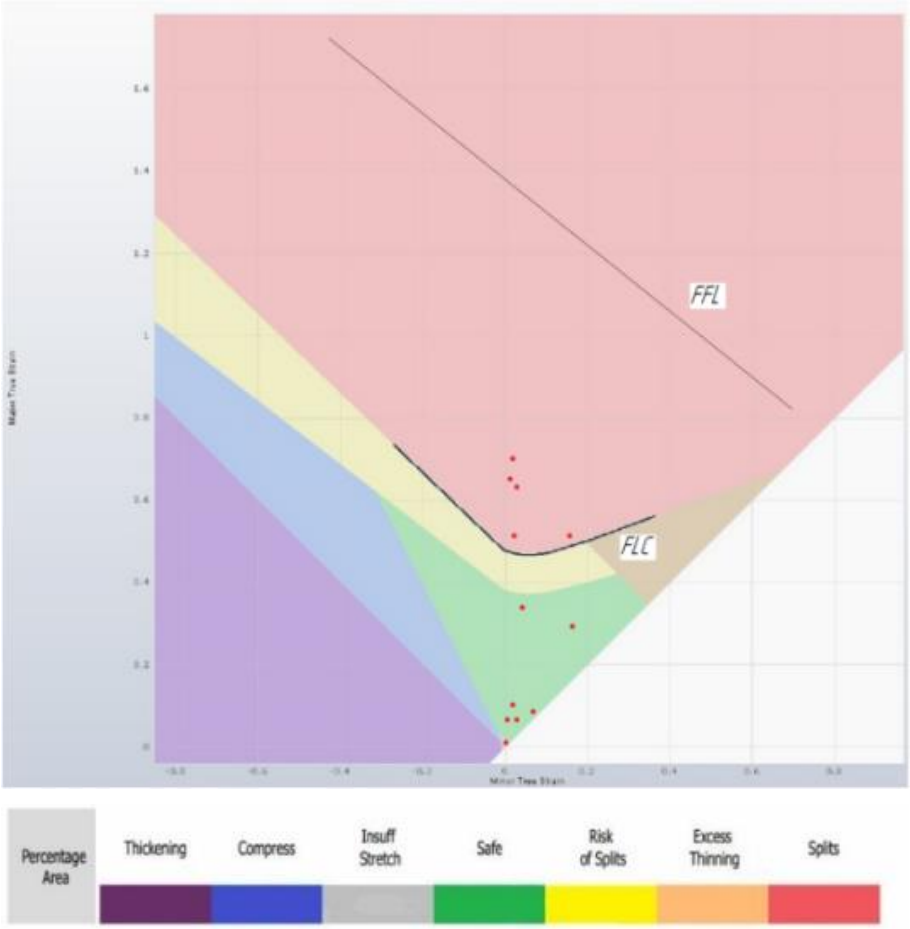


Рисунок 13. *FLD-диаграмма предельных деформаций (метод двух путей) (разработано авторами)*

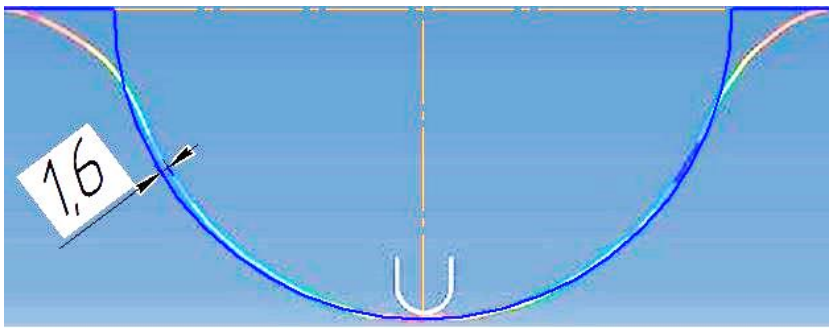
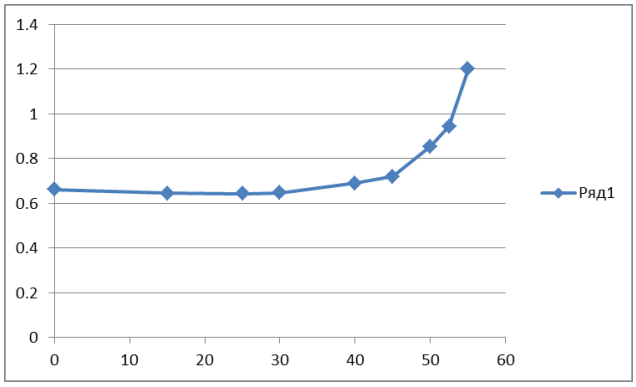
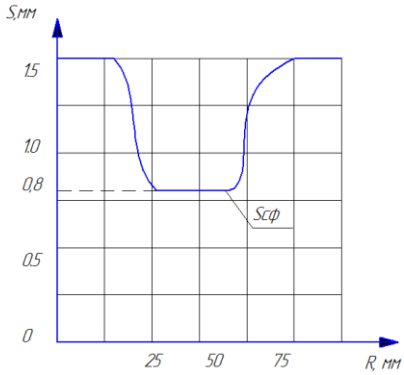


Рисунок 14. *Упругие деформации (метод двух путей) (разработано авторами)*

На рис. 15 приведено сравнение графиков толщин для полусферы при применении традиционного метода штамповки (формовка) и инкрементальной формовки (методом двух путей). По графику видно, что толщина изделия, полученного методом инкрементальной формовки выше на 18%.



а)



б)

Рисунок 15. *Графики распределения толщины: а - традиционный метод, б - инкрементальная формовка (разработано авторами)*

Выводы

1. Программный комплекс Abaqus позволяет проводить моделирование процессов ОМД со сложным перемещение рабочего инструмента путем задания поля точек перемещения.
2. Закон течения при переходе из конуса в полусферы выполняется по сложной функции, которую трудно выявить, в связи с чем теоретический расчет распределения толщины по полусфере выполнить не удалось.
3. На основе расчетов моделирования показано, что при использовании схемы деформирования поэтапного расширения, получаем максимальное утонение равное 65% от начальной толщины, а при использовании схемы двух путей можно добиться утонения равного 40% при заданном угле конуса 35°.
4. При моделировании оптимальной схемы, учета упругих деформаций и жесткости сферы, можно разработать технологический режим инкрементальной формовки для получения деталей типа полусфера, с наименьшей разнотолщинностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривошеин В.А., Анцифиров А.А., Майстров Ю.В. Перспективы использования технологий инкрементальной формовки в современном производстве // Известия высших учебных заведений. Машиностроение - 2014 - № 11. - С. 84-89.
2. Кривошеин В.А. Интенсификация процесса обжима посредством выбора геометрии поверхности контакта заготовки с матрицей // Заготовительные производства в машиностроении, 2011, № 6, с. 15-18.
3. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки / Учебник для вузов. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000 г. 480 с. ил.
4. Кривошеин В.А. Теоретический расчет силы при обжиме в профилированной матрице // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, № 9.

5. Kitazawa, K., Wakabayashi, A., Murata, K., Yaejima, K. Metal flow phenomena in computerized numerically controlled incremental stretch - expanding of aluminum sheets. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 46, pp. 65-70, 1996.

6. Kitazawa, K., Nakane, M. Hemi-ellipsoidal stretch expanding of aluminum sheet by CNC incremental forming process with two path method. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 47, pp. 440-445, 1997.

7. Kitazawa, K. Limit strains for CNC incremental stretch-expanding of aluminum sheets. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 47, pp. 145-150, 1997.

8. Matsubara, S. Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool. Journal of the JSTP, vol. 35, pp. 1311-1316, 1994.

9. Martins P.A.F., Bay N., Skjoedt M., Silva M.B. Theory of single point incremental forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 57, pp. 247-252, 2008.

10. Silva M.B., Skjoedt M., Atkins A.G., Bay N., Martins P.A.F. Single Point Incremental Forming / Formability / Failure Diagrams. Journal of Strain Analysis for Angineering Design 43(1): 15-36, 2008.

11. Jeswiet J, Micari F., Bramley A., Duflou J., Allwood J. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. Annals of CIRP 54(1): 623-650, 2005.

12. Hagan E., Jeswiet J. A review of conventional and modern single point sheet metal forming methods. Department of Mechanical Engineering, Queen's University, Canada. 1-14, 2006.

13. Батурин Д.А. Хроника развития основных способов послойного деформирования // Кузнечно-Штамповочное производство. Обработка Материалов давлением. №2, стр. 43-47, 2015.

14. Emmens W.C., Sebastiani G., van den Boogaard A.H. The technology of Incremental Sheet Forming - A brief review of the history / Journal the University of Twente, Netherlands.

15. Mason B. Sheet metal forming for small batchers; Bachelor thesis, Univ. of Nottingham. May 1978.

16. Mason B., Appleton E. Sheet metal forming for small batches using sacrificial tooling; Proc. 3rd Int. Conf. on Rotary Metal working, Kyoto, Japan. 1984. Pp. 495-511.

17. Martins P.A.F., Montanari L., Cristino V.A.M., Silva M.B. Formability and simulative tests in modern sheet metal formingeducation. Modern mechanical engineering: materials forming, machiningand tribology. Springer. 2014. Pp. 411-447.

Krivoshein Vitaliy Aleksandrovich
Bauman Moscow state technical university (national research university of technology), Russia, Moscow
E-mail: krivosheinvitaly@gmail.com

Rukavichko Elena Aleksandrovna
Bauman Moscow state technical university (national research university of technology), Russia, Moscow
E-mail: rukavichko@mail.ru

Antsifirov Aleksei Anatol'evich
Bauman Moscow state technical university (national research university of technology), Russia, Moscow
E-mail: aaleksei@inbox.ru

Development of the technology of obtaining hemispherical products by the method of incremental forming

Abstract. The paper presents an research of the shaping of sheet materials by means of incremental forming for the manufacture of hemispherical products. Due to limited information in the domestic literature, the research of incremental stamping processes of hemispherical products was carried out mainly on the basis of foreign sources of literature. On the basis of research deformation methods of a sheet material are offered at the expense of maintenance of a necessary trajectory of moving of the tool with the purpose for reception of hemispherical details. A technique for modeling the incremental forming processes in the Abaqus software is developed. Modeling and analysis of the presented results of stamping hemispherical products is carried out. The conclusions about the perspective of using the incremental forming process are presented.

Keywords: incremental forming; localized deformation center; modeling; stamping

REFERENCES

1. Krivoshein V.A., Antsifirov A.A., Maistrov Iu.V. Prospects of using incremental forming technologies in modern production. Izvestiya vysshyh uchebnyh zavedeniy. Mashinostroenie. = News of higher educational institutions. Mechanical engineering, 2014, no. 11, pp. 84-89. (in Russian).
2. Krivoshein V.A. Intensification of the crimping process by selecting the geometry of the contact surface of the workpiece with the matrix. Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii = Blank production in mechanical engineering, 2011, no. 6, pp. 15-18. (in Russian).
3. Popov E.A., Kovalev V.G., Shubin I.N., *Technoligia I avtomatizacia listovoi shtampovki* [Technology and automation stamping] / Textbook for high schools. Moscow, MSTU Bauman Publ., 2000. 480 p. (in Russian).
4. Krivoshein V.A. Theoretical calculation of the force during crimping in a profiled matrix. Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU, 2011, no. 9, pp. 1-8, Available at: http://technomag.bmstu.ru/doc/215636.html, accessed 29.03.2017. (in Russian).
5. Kitazawa, K., Wakabayashi, A., Murata, K., Yaejima, K. Metal flow phenomena in computerized numerically controlled incremental stretch - expanding of aluminum sheets. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 46, pp. 65-70, 1996.

6. Kitazawa, K., Nakane, M. Hemi-ellipsoidal stretch expanding of aluminum sheet by CNC incremental forming process with two path method. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 47, pp. 440-445, 1997.

7. Kitazawa, K. Limit strains for CNC incremental stretch-expanding of aluminum sheets. Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 47, pp. 145-150, 1997.

8. Matsubara, S. Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool. Journal of the JSTP, vol. 35, pp. 1311-1316, 1994.

9. Martins P.A.F., Bay N., Skjoedt M., Silva M.B. Theory of single point incremental forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 57, pp. 247-252, 2008.

10. Silva M.B., Skjoedt M., Atkins A.G., Bay N., Martins P.A.F. Single Point Incremental Forming / Formability / Failure Diagrams. Journal of Strain Analysis for Angineering Design 43(1): 15-36, 2008.

11. Jeswiet J., Micari F., Bramley A., Duflou J., Allwood J. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. Annals of CIRP 54(1): 623-650, 2005.

12. Hagan E., Jeswiet J. A review of conventional and modern single point sheet metal forming methods. Department of Mechanical Engineering, Queen's University, Canada. 1-14, 2006.

13. Baturin D.A. Chronicle of the development of the basic methods of layer-by-layer deformation. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem = Forging and stamping production. Processing of materials by pressure, 2015, no. 2, pp. 43-47. (in Russian).

14. Emmens W.C., Sebastiani G., van den Boogaard A.H. The technology of Incremental Sheet Forming - A brief review of the history / Journal the University of Twente, Netherlands.

15. Mason B. Sheet metal forming for small batchers; Bachelor thesis, Univ. of Nottingham. May 1978.

16. Mason B., Appleton E. Sheet metal forming for small batches using sacrificial tooling; Proc. 3rd Int. Conf. on Rotary Metal working, Kyoto, Japan. 1984. Pp. 495-511.

17. Martins P.A.F., Montanari L., Cristino V.A.M., Silva M.B. Formability and simulative tests in modern sheet metal formingeducation. Modern mechanical engineering: materials forming, machiningand tribology. Springer. 2014. Pp. 411-447.