

УДК 621.7.04

**К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ**© 2023 И.Н. Петров^{1,2}¹ Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия² Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 29.03.2023

В данной статье на основании проведенных экспериментальных исследований определена схема напряженно-деформированного состояния заготовок при инкрементальном формообразовании. Определено, что для инкрементального формообразования конуса с прямолинейной образующей характерно двухосное растяжение с преобладанием растягивающих осевых деформаций.

Ключевые слова: инкрементальное формообразование, напряженно-деформированное состояние, алюминиевый сплав Д16АМ

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-5-9

EDN: JDROIZ

*Исследование выполнено в рамках гранта (номер гранта: МД-936.2022.4).***ВВЕДЕНИЕ**

Инкрементальное формообразование листового металла представляет собой процесс, в котором заготовка локально деформируется пуансоном путем его перемещения вдоль заданного направления.

Главной особенностью инкрементального формообразования, теоретическому и экспериментальному исследованию которой посвящены многие работы, является более высокие значения предельных деформаций материала по сравнению с традиционными процессами листовой штамповки [1-2]. Известно, что в значительной степени предельные деформации материала, достижимые при обработке металлов давлением, определяются напряженно-деформированным состоянием [3-4], поэтому основным направлением исследований инкрементального формообразования является изучение схемы напряжений и деформаций.

Анализ зарубежной литературы показал, что при инкрементальном формообразовании преобладающими механизмами деформации являются сдвиг, растяжение и изгиб. Так в работе [5] показано, что при инкрементальном формообразовании наблюдается растяжение и сдвиг

в плоскости, перпендикулярной направлению движения инструмента, а также сдвиг в плоскости, параллельной направлению движения инструмента. В работах [6-8] деформации сдвига по толщине рассматривались как преобладающий механизм, способствующий увеличению предельных деформационных возможностей. В работе [9] сделан вывод о том, что при инкрементальном формообразовании деформации растяжения определяют характер поведения материала. В работе [10] на основе испытания на изгиб с растяжением предположили, что основным фактором для увеличения деформационных возможностей при инкрементальном формообразовании является изгиб. Большое количество противоречивых результатов говорит о том, что необходимы дальнейшие исследования напряженно-деформированного состояния при инкрементальном формообразовании.

В связи с этим, в настоящей работе предпринята попытка экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния заготовки при инкрементальном формообразовании конической детали с прямолинейной образующей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Процесс инкрементального формообразования проводился на специальном стенде с использованием промышленного робота-манипулятора KUKA KR 160 R 1570 nano (рисунок

Петров Илья Николаевич, инженер кафедры обработки металлов давлением, аспирант Самарского университета, инженер отдела металлофизики и авиационных материалов СамНЦ РАН.

E-mail: ilpetrof110895@yandex.ru

1). Фиксация заготовки осуществлялась на горизонтальном столе с помощью механических зажимов. Для построения траектории движения деформирующего инструмента при инкрементальном формообразовании использовался программный комплекс SprutCAM. Формообразование проводилось послойно, шаг перемещения деформирующего инструмента - 0,5 мм, диаметр инструмента - 12 мм. Скорость перемещения пуансона задавалась равной 50 мм/с.



Рисунок 1 – Стенд инкрементального формообразования на базе промышленного робота-манипулятора KUKA KR 160 R 1570 nano

В качестве изготавливаемой детали был выбран усеченный конус с прямолинейной образующей, угол наклона которой составляет 55° (рисунок 2). В качестве заготовок использовались

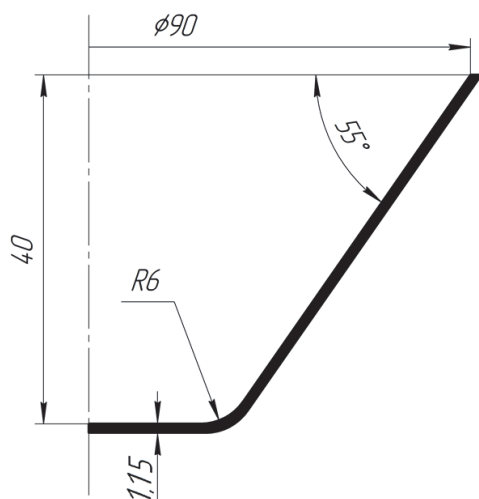


Рисунок 2 – Коническая деталь с прямолинейной образующей

листы из алюминиевого сплава Д16АМ толщиной $S_0 = 1,15$ мм.

Для оценки характера поведения материала в процессе инкрементального формообразования на поверхность заготовок были нанесены концентрические окружности с шагом $B_0 = 3$ мм (рисунок 3). После деформирования проводились замеры диаметров концентрических окружностей и расстояния между ними. Замеры проводились вдоль направления прокатки (НП) и поперек (ПН) листовой заготовки, а потом осреднялись. Измерение диаметров окружностей и расстояния между ними осуществлялось с помощью штангенциркуля (ШЦ-1-150, точность $\pm 0,05$ мм). Кроме того, с помощью стойки с электронным индикатором (ИЦ 0-12,7, точность $\pm 0,001$ мм) была измерена толщина полученной детали по образующей.

По полученным результатам были рассчитаны логарифмические деформации:

тангенциальная (окружная) деформация

$$e_\theta = \ln \frac{D_i}{D_{0i}}, \quad (1)$$

осевая деформация

$$e_z = \ln \frac{B_i}{B_0}, \quad (2)$$

деформация по толщине

$$e_s = \ln \frac{S_i}{S_0}, \quad (3)$$

где D_{0i}, D_i – диаметры концентрических окружностей до и после инкрементального формообразования, B_0, B_i – расстояние между концентрическими окружностями до и после инкрементального формообразования, S_0 – толщина листовой заготовки, S_i – толщина получаемой детали.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения толщины детали, диаметра концентрических окружностей и рас-

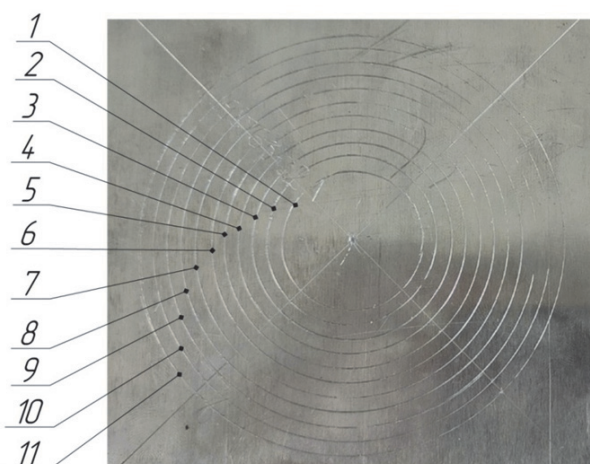


Рисунок 3 – Разметка заготовки

Таблица 1 – Результаты замеров

№	D ₀ , мм	D _i , мм	B ₀ , мм	B _i , мм	S ₀ , мм	S _i , мм
1	30	31,55	3	-	1,15	1,115
2	36	39,45		3,95		0,77
3	42	45,2		3,8		0,75
4	48	51,35		4,5		0,76
5	54	57,2		4,2		0,755
6	60	63,3		4,05		0,73
7	66	68,6		4,45		0,73
8	72	74,8		3,6		0,75
9	78	80,6		4,1		0,85
10	84	85,75		3,4		1,045
11	90	91,25		2,95		1,095

стояния между ними после инкрементального формообразования представлены в таблице 1.

По полученным значениям рассчитывались деформации, по которым построены зависимости распределения тангенциальной, осевой деформации и деформации по толщине вдоль образующей от края ко дну детали (рисунок 4).

Из рисунка 4 видно, что осевые деформации, действующие в плоскости заготовки и тангенциальные, являются растягивающими, а по толщине – сжимающими. При этом осевые деформации, также как и деформации по толщине вначале резко увеличиваются, а затем по мере удаления от края получаемой детали ко дну практически не изменяются. Это объясняется наличием на расстоянии около 10 мм от края детали радиусной части, на которой угол наклона образующей изменяется от нуля до заданного угла прямолинейной образующей (рисунок 5). Наличие данного радиусного участка связано с упругой деформацией

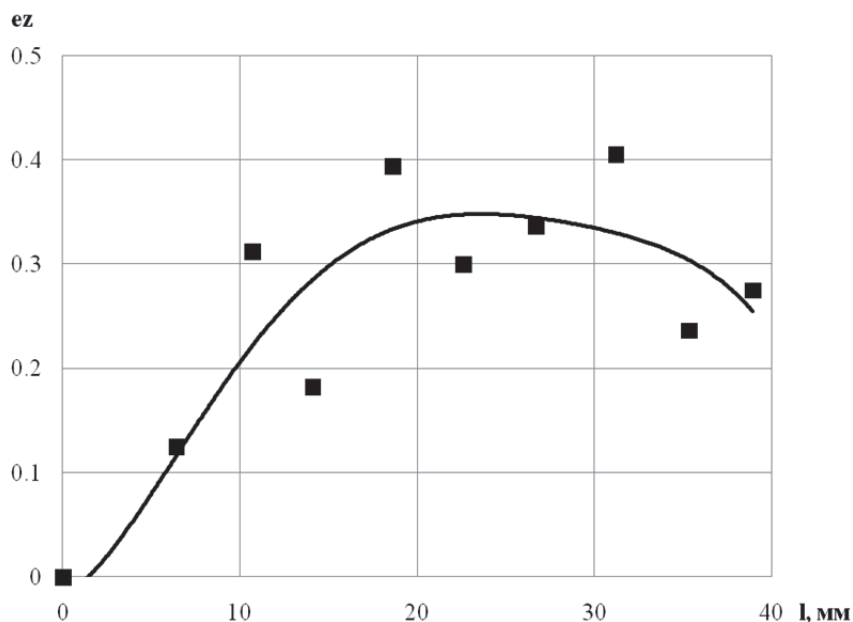
оснастки и жесткостью робота. Полученные результаты распределения деформации по толщине на прямолинейном участке должны подчиняться закону косинуса, как следует из [11]:

$$s_i = s_0 \cdot \cos \theta, \tag{4}$$

где θ угол наклона прямолинейной образующей.

Однако, решая уравнение (4) с учетом толщины заготовки и угла наклона образующей конической детали, получим, что толщина на прямолинейном участке должна быть равна 0,65 мм. Таким образом, относительная погрешность аналитически полученного значения толщины по сравнению с экспериментальным (0,76 мм) составляет 15%.

Величина тангенциальной деформации увеличивается практически линейно от края и достигает максимума у дна детали. Очевидно, что наличием тангенциальной деформации нельзя пренебрегать, как это делается во многих исследова-



а

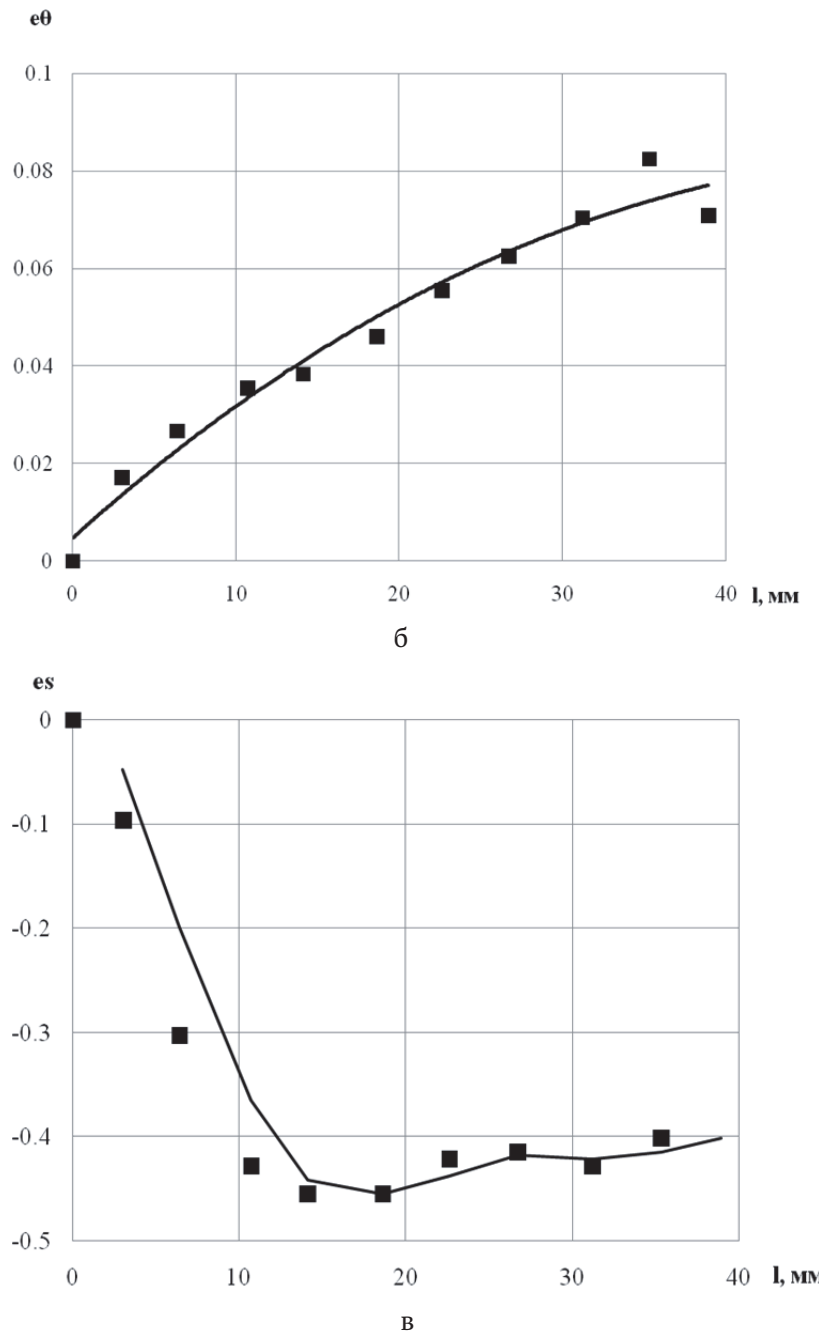


Рисунок 4 – Распределение деформаций вдоль образующей от края ко дну детали:
 а – осевая деформация; б – тангенциальная деформация; в – деформация по толщине

дованиях [5-11], так как ее величина превышает инженерную погрешность 5%. Кроме того, расхождение значений толщины, полученной экспериментально и рассчитанной теоретически, также связано с этим допущением, так как при выводе закона косинуса принимается плоское деформированное состояние, то есть тангенциальные деформации равны нулю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенной работе представлены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния ли-

стовых заготовок при инкрементальном формообразовании. Полученные данные свидетельствуют о наличии в процессе формообразования растягивающих деформаций в тангенциальном, то есть при инкрементальном формообразовании наблюдается двухосное растяжение с преобладанием растягивающих осевых деформаций. Это опровергает результаты большого количества исследований, в которых считается, что для инкрементального формообразования характерно плоское деформированное состояние заготовки, то есть тангенциальные деформации отсутствуют [11].

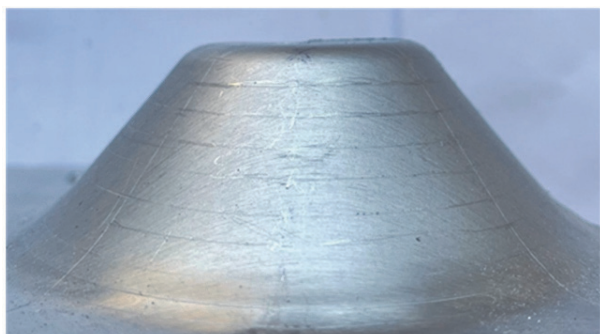


Рисунок 5 – Концентрические окружности после инкрементального формообразования

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено в рамках гранта (номер гранта: МД-936.2022.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shim M-S, Park J-J. The formability of aluminum sheet in incremental forming // J Mater Process Technol. 2001. №113. P. 654–8.
2. Park J-J, Kim Y-H. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique // J Mater Process Technol. 2003. №140. P. 447–53.
3. Томленов, А.М. Теория пластического деформирования металлов [Текст] / А.М. Томленов. – М. : Металлургия, 1972. – 408 с.
4. Колмогоров, В.Л. Пластичность и разрушение [Текст] / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев и др.; Под науч. ред. В.Л. Колмогорова. – М. : Металлургия, 1977. – 336 с.
5. Jackson K., Allwood J. The mechanics of incremental sheet forming // Journal of Materials Processing Technology. 2009. V. 209, Iss. 3, P. 1158-1174.
6. Eyckens P., Belkassam B., Henrard C., Gu J., Sol H., Habraken A.M., Duflou J.R., van Bael A., van Houtte P. Strain evolution in the single point incremental forming process: digital image correlation measurement and finite element prediction // International Journal of Material Forming. 2011. V. 4, Iss. 1. P. 55-71. DOI: 10.1007/s12289-010-0995-6
7. Eyckens P., Van Bael A., Van Houtte P. An extended Marciniak–Kuczynski model for anisotropic sheet subjected to monotonic strain paths with through-thickness shear // International Journal of Plasticity. 2011. V. 27, Iss. 10. P. 1577-1597. DOI: 10.1016/j.ijplas.2011.03.008
8. Eyckens P., He S., Van Bael A., Van Houtte P., Duflou J. Forming limit predictions for the serrated strain paths in single point incremental sheet forming // AIP Conference Proceedings. 2007. V. 908. P. 141-146. DOI: 10.1063/1.2740802
9. Filice L., Ambrogio G., Micari F. Online control of single point incremental forming operations through punch force monitoring [Text] // Cirp. Ann.-Manuf. Techn. 2006. №55. P. 245-248.
10. Emmens W.C., Van den Boogaard A. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming [Text] // Journal of Materials Processing Technology.– 2009. – №209. – P. 3688-3695.
11. Wei H.Y., Gao L., Li S.G., Investigation on thickness distribution along bulge type incrementally formed sheet metal part with irregular shapes // Proceedings of the International Manufacturing Conference. pp. 1672–3961 (Supp-01).

TO DETERMINE THE STRESS-STRAIN STATE DURING INCREMENTAL FORMING

© 2023 I.N. Petrov^{1,2}

¹Samara National Research University, Samara, Russia

²Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Abstract. In this article, based on the experimental studies carried out, the scheme of the stress-strain state of workpieces during incremental forming is determined. It is determined that the incremental forming of a cone with a rectilinear generatrix is characterized by biaxial stretching with a predominance of tensile axial deformations.

Keywords: incremental forming, stress-strain state, aluminum alloy.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-5-9

EDN: JDROIZ

Ilya Petrov, Engineer at the Metal Forming Department, Graduate Student of the Samara National Research University, Engineer of the Department of Metal Physics and Aviation Materials, Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences.
E-mail: ilpetrof110895@yandex.ru