

Оригинальная статья

УДК 621.7.04

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-2(44)-79-86

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 8011А НА ПРЕДЕЛЬНЫЙ УГОЛ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

© 2023 г. И. Н. Петров^{1,2}, В. А. Разживин^{1,2}, Д. И. Воробьев¹, А. В. Смальцер¹, Т. С. Саргаева¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, ул. Московское шоссе, 34)

²Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (Россия, 443001, Самара, Студенческий пер., 3А)

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования влияния анизотропии механических свойств листовых заготовок на предельный угол инкрементального формообразования. По разработанным маршрутам холодной прокатки в сочетании с термической обработкой листов из алюминиевого сплава 8011А получены образцы с различными коэффициентами поперечной деформации. Рассчитано усредненное значение показателей анизотропии в плоскости листа и коэффициент плоскостной анизотропии. На специальном стенде, состоящем из промышленного робота KR 160 R1570 nano, рамы для фиксации заготовки и бесконтактной оптической системы измерения деформаций Vis 3D, получены значения предельного угла инкрементального формообразования. На основании полученных значений были построены зависимости распределения главных деформаций e_1 и e_2 в направлении прокатки по образующей для листов с различными показателями анизотропии. Определено, что характер распределения деформации одинаков для рассматриваемых образцов. От центра к краю заготовки деформации увеличиваются до предельной величины (участок криволинейной образующей), а затем уменьшаются до нуля (область перехода от образующей ко дну). Однако, главные деформация и положение максимума для листов с показателем анизотропии $\Delta\mu > 0$ выше, чем для листов с $\Delta\mu < 0$. Затем для изготовленных листов был определен предельный угол инкрементального формообразования, равный $67,8^\circ$ для образцов с положительным показателем плоскостной анизотропии и $47,6^\circ$ для образцов с отрицательным. Полученные результаты в совокупности с положением трещины на конических деталях свидетельствуют о существенном влиянии анизотропии механических свойств на процесс инкрементального формообразования.

Ключевые слова: инкрементальное формообразование, предельные деформационные возможности, алюминиевый сплав 8011А, анизотропия механических свойств

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке гранта Президента МД-936.2022.4.

Для цитирования: Петров И.Н., Разживин В.А., Смальцер А.В., Саргаева Т.С., Воробьев Д.И. Исследование влияния исходной анизотропии механических свойств листов из алюминиевого сплава 8011А на предельный угол инкрементального формообразования // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 2 (44). С. 79–86. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-79-86](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-79-86)

Original article

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE INITIAL ANISOTROPY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY SHEETS 8011A ON THE CRITICAL ANGLE OF INCREMENTAL FORMING

© 2023 I. N. Petrov^{1,2}, V. A. Razzhivin^{1,2}, D. I. Vorob'ev¹, A.V. Smal'tser¹, T. S. Sargaeva¹

¹Samara National Research University (34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086 Russian Federation)

²Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (3A Studentskiy Lane, Samara, 443001, Russian Federation)

Abstract. The results of an experimental study of the effect of anisotropy of the mechanical properties of sheet blanks on the limiting angle of incremental shaping are presented. According to the developed cold rolling routes in combination with heat treatment of aluminum alloy 8011A sheets, samples with different coefficients of transverse deformation were obtained. The average value of the anisotropy indicators in the plane of the sheet and the coefficient of planar anisotropy are calculated. The values of the limiting angle of incremental shaping were obtained on a special stand consisting of an industrial robot KR 160 R1570 nano, a frame for fixing the workpiece and a non-contact optical deformation measurement system Vic 3D. Based on the obtained values, the dependences of the distribution of the main deformations e_1 and e_2 in the direction of rolling along the generatrix for sheets with different anisotropy indices were constructed. It is determined that the nature of the strain distribution is the same for the samples under consideration. From the center to the edge of the workpiece, the deformations increase to the maximum value (the section of the curved generatrix), and then decrease to zero (the transition area from the generatrix to the bottom). However, the main deformation and the position of the maximum for sheets with an anisotropy index $\Delta\mu > 0$ is higher than for sheets with $\Delta\mu < 0$. Then, for the manufactured sheets, the limiting angle of incremental shaping was determined, equal to 67.8° for samples with a positive index of planar anisotropy and 47.6° for samples with a negative one. The obtained results, together with the position of the crack on the conical parts, indicate a significant influence of the anisotropy of mechanical properties on the process of incremental shaping.

Keywords: incremental forming, ultimate deformation capabilities, aluminum alloy 8011A, anisotropy of mechanical properties

Funding: the author expresses gratitude for the financial support of the research to the grant of the President MD-936.2022.4.

For citation: Petrov I.N., Razzhivin V.A., Vorob'ev D.I., Smal'tser A.V., Sargaeva T.S., Investigation of the effect of the initial anisotropy of the mechanical properties of aluminum alloy sheets 8011A on the limiting angle of incremental shaping. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 2 (44), pp. 79–86. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-79-86](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-79-86)

Введение

Основой успешного развития современного производства является возможность быстрого удовлетворения требований заказчика. При производстве изделий, в том числе сложной формы из листовых заготовок, используется большое количество штамповой оснастки, проектирование, изготовление, обслуживание и хранение которой требует значительных финансовых вложений. Установка и наладка штампов на гидравлических и кривошипных прессах являются трудоемкими процессами, требующими определенного штата вспомогательного персонала. Если в условиях массового и крупносерийного производства затраты окупаются за счет большой программы выпуска продукции, то при единичном и мелкосерийном производстве, к которым относятся авиационная отрасль и ракетостроение, расходы на штамповую оснастку значительно увеличивают себестоимость изделий. При этом имеют место случаи, когда штамповая оснастка используется всего несколько раз.

В связи с этим остро стоит вопрос перехода на новые технологии, позволяющие оперативно и гибко осуществлять переналадку оборудования с изделия на изделие и использовать универсальный инструмент, подходящий для всей номенклатуры деталей. Одной из таких технологий является инкрементальное формообразование (локальное поэтапное деформирование от-

дельных частей листовой заготовки по заданной программе) [1 – 3].

При разработке технологии инкрементального формообразования, как и любого другого процесса листовой штамповки, огромную роль играет анизотропия механических свойств заготовки. Она определяет поведение металла, в том числе его предельные деформационные возможности, при пластическом деформировании, а также эксплуатационные характеристики деталей [4, 5]. Однако, как показал анализ литературы, несмотря на то, что технологии инкрементального формообразования широко изучаются за рубежом и успешно внедряются в производство уже многие годы [6 – 13], практически отсутствуют работы, посвященные исследованию влияния анизотропии механических свойств на процесс инкрементального формообразования.

В настоящей работе проведено исследование влияния исходной анизотропии листовых заготовок из алюминиевого сплава 8011A на предельный угол инкрементального формообразования.

Материалы и методика исследований

Для формирования различной анизотропии механических свойств листов из алюминиевого сплава 8011A (0,5 – 1,0 % Fe; 0,4 – 0,8 % Si; 0,1 % Mn; 0,05 % Ti; 97,75 – 99,1 % Al; 0,1 % Cu; 0,1 % Mg; 0,1 % Zn) была выполнена холодная

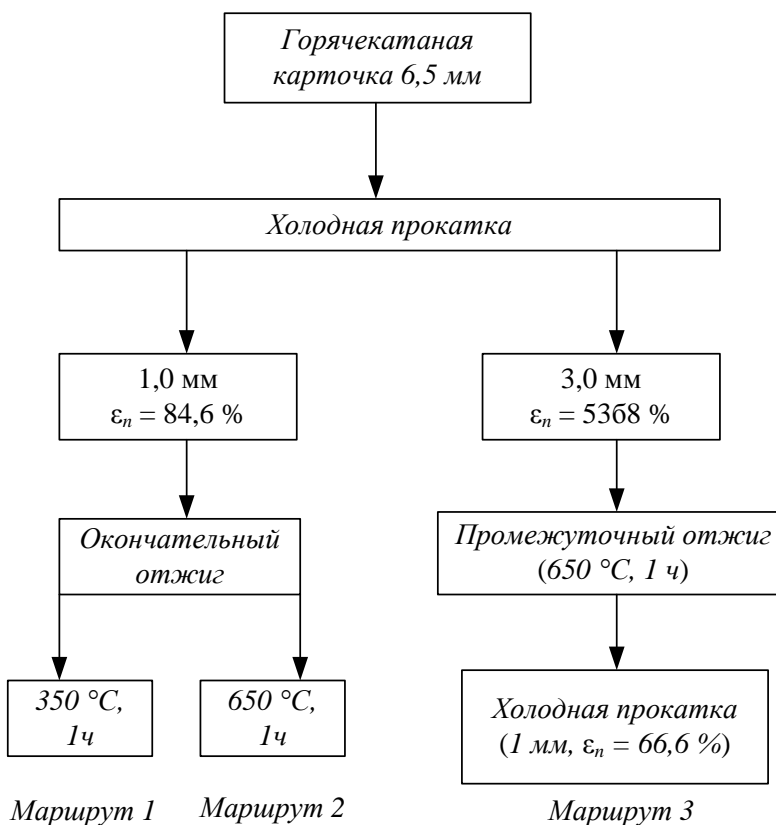


Рис. 1. Схема маршрутов прокатки
Fig. 1. Scheme of rolling routes

прокатка в сочетании с термической обработкой по различным маршрутам (рис. 1).

В качестве заготовки использовали горячекатаную карточку 200×250×6,5 мм. Прокатку осуществляли на одноклетьевом, двухвалковом реверсивном стане 300 фирмы DIMA Maschinen (Германия). Промежуточный и окончательный отжиг проводили в лабораторной печи СНОЛ 120/12-ИЗ с регулятором температуры ПТ 200-2 (Россия).

После прокатки с целью вычисления показателей анизотропии проводили испытание на одноосное растяжение на универсальной испытательной машине Tinius Olsen H5KT (Великобритания). Для этого из полученных листов отбирали образцы под углами 0, 45 и 90° к направлению прокатки. Размеры образцов выбирали по ГОСТ 11701 – 84. При растяжении, с помощью системы корреляции цифровых изображений Vic 3D, определяли коэффициенты поперечной деформации μ , которые представляют собой отношение приращения деформации по ширине образца к деформации вдоль действия силы [14 – 16].

Рассчитывали усредненное значение показателей анизотропии в плоскости листа (коэффициент нормальной анизотропии):

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_0 + 2\mu_{45} + \mu_{90}}{2}, \quad (1)$$

где μ_0 , μ_{45} и μ_{90} – коэффициент поперечной деформации в направлении 0, 45 и 90° к направлению прокатки.

Для оценки распределения показателя анизотропии μ в плоскости листа также рассчитывался коэффициент плоскостной анизотропии:

$$\Delta\mu = \frac{\mu_0 - 2\mu_{45} + \mu_{90}}{2}. \quad (2)$$

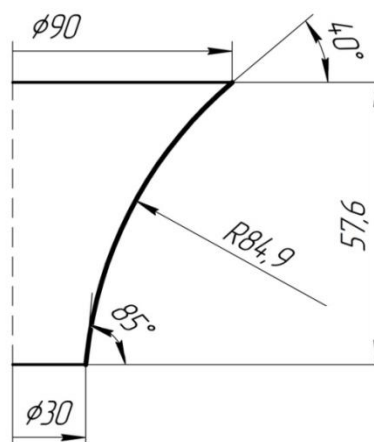


Рис. 2. Геометрия детали
Fig. 2. Part geometry

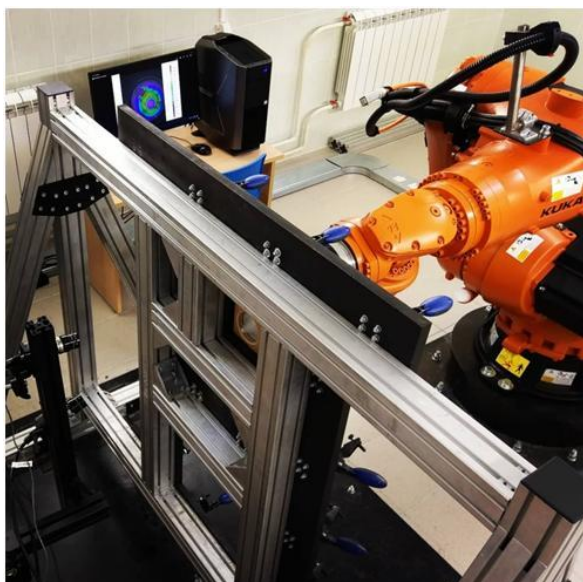


Рис. 3. Экспериментальный стенд инкрементального формообразования

Fig. 3. Experimental stand of incremental shaping

Определение предельного угла инкрементального формообразования проводили по методике с использованием конических деталей с криволинейной образующей [17] (рис. 2). Угол наклона касательной к образующей увеличивается от периферии к центру детали. При формообразовании детали на определенной глубине будет достигнуто предельное утонение и произойдет разрушение. Предельный угол легко определить из геометрических соображений по глубине расположения трещины на детали.

Испытания по определению предельного угла инкрементального формообразования осуществляли на специальном стенде, состоящем из промышленного робота KR 160 R1570 nano, рамы для фиксации заготовки и бесконтактной оптической системы измерения деформаций Vic 3D (рис. 3).

В качестве инструмента использовали пуансон диам. 12 мм. Траектория для обработки – послойная, с шагом перемещения деформирующего инструмента 0,5 мм. В качестве смазки использовали индустриальное масло марки QH 2875 BLR.

С помощью бесконтактной оптической системы измерения деформации Vic 3D в процессе формообразования оценивали деформированное состояние (главные деформации в плоскости листа). Кроме того, на основании моделей конических деталей с криволинейной образующей, полученных с помощью системы Vic 3D, определен предельный угол инкрементального формообразования.

Результаты и их обсуждение

В результате испытания на растяжения получены коэффициенты анизотропии для листов, изготовленных по различным маршрутам (см. таблицу).

Листовые заготовки, полученные по разработанным маршрутам, склоны к преимущественной деформации по толщине ($\mu < 0,5$). Плоскостная анизотропия характеризует направления наиболее интенсивного течения металла относительно направления прокатки в процессах последующей обработки листов [18]. Лист, полученный по маршруту 1, является трансверсально-изотропным ($\Delta\mu \approx 0$). Для листовых заготовок, полученных по маршруту 2 ($\Delta\mu > 0$), предпочтительна деформация в направлениях 0 и 90° к направлению прокатки, а для листов, полученных по маршруту 3 ($\Delta\mu < 0$), – под углом 45°.

Наибольший интерес представляет исследование формообразования листов с ярко выраженной плоскостной анизотропией. В связи с этим дальнейшие исследования проводили на листах, полученных по маршрутам 2 и 3.

В результате проведения эксперимента по определению предельного угла инкрементального формообразования была получена зависимость распределения главных деформаций e_1 и e_2 в направлении прокатки по образующей для листов с различными показателями анизотропии.

Для рассматриваемых образцов характер распределения деформации одинаков. От центра к краю заготовки деформации увеличиваются до предельной величины (участок криволинейной образующей), а затем уменьшаются до нуля (область перехода от образующей ко дну). Главные деформации и положение максимума для листов с показателем анизотропии $\Delta\mu > 0$ выше (рис. 4), чем для листов с $\Delta\mu < 0$ (рис. 5). Эти результаты хорошо согласуются со значением предельного угла инкрементального формообразования. В первом случае предельный угол составляет 47,6°, во втором – 67,8°.

На рис. 6 представлены полученные в результате проведения эксперимента конические детали с криволинейной образующей.

Область разрушения на конусе, полученном из листовой заготовки по маршруту 2, расположена под углом 45° относительно направления проката, тогда как, для детали, полученной из листовой заготовки по маршруту 3, развитие трещины наблюдается в поперечном направлении. Положение трещин на полученных заготовках хорошо сочетаются с полученными показателями поперечной деформации (см. таблицу).

Коэффициенты поперечной деформации Coefficients of transverse deformation

Маршрут	Угол к направлению прокатки	Значение μ при					$\bar{\mu}$	$\Delta\mu$
		1	2	3	4	среднее		
1 (окончательный отжиг 350°)	0°	0,42	0,41	0,45	–	0,426	0,396	0,073
	45°	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36		
	90°	0,43	0,42	0,45	0,46	0,44		
2 (окончательный отжиг 650°)	0°	0,39	0,38	0,37	0,39	0,382	0,319	0,178
	45°	0,23	0,23	0,23	–	0,23		
	90°	0,45	0,42	0,43	0,44	0,435		
3 (промежуточный отжиг 650°, прокатка до 1 мм)	0°	0,32	0,36	0,2	0,25	0,282	0,395	–0,248
	45°	0,55	0,5	0,46	0,57	0,52		
	90°	0,35	0,25	0,20	–	0,26		

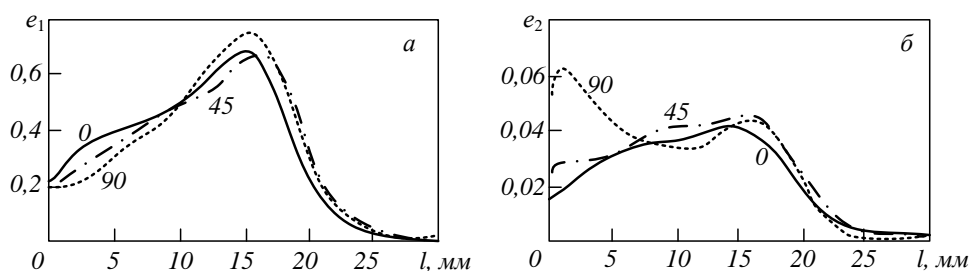


Рис.4. Распределение главных деформаций для листов с показателем плоскостной анизотропии 0,178 (маршрут 2)
Fig.4. Distribution of the main deformations for sheets with a flat anisotropy index of 0.178 (route 2)

Выводы

В результате проведенного исследования разработаны режимы прокатки в сочетании с термической обработкой, обеспечивающие различную анизотропию механических свойств. Для изготовленных листов определен предельный угол инкрементального формообразования, равный 47,6° для образцов с показателем анизотропии $\Delta\mu < 0$ и 67,8° – для образцов с показателем анизотропии $\Delta\mu > 0$. На основании полученных зависимостей и результатов можно сделать вывод, что анизотропия механических свойств оказывает существенное влияние на предельные деформационные возможности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривошеин В.А., Анцифиров А.А., Майстров Ю.В. Перспективы использования технологий инкрементальной формовки в современном производстве // Известия вузов. Машиностроение. 2014. № 11 (656). С. 84–89.
2. Гречников В.Ф., Сурудин С.В., Ерисов Я.А., Де Алваенга Р. Современное состояние теории и технологии инкрементального формообразования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20. № 3. С. 119–137. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2021-20-3-119-137>
3. Кугультинов С.Д., Малышев Г.Н. Симоненко К.Е. Повышение эффективности производства на основе укрупненного автоматизированного проектирования и нормирования технологических процессов // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007. № 4. С. 93.
4. Portman V.T. Stiffness evaluation of machines and robots: minimum collinear stiffness value approach // Journal of Mechanisms and Robotics. 2011. Vol. 3. No. 1. P. 9. <https://doi.org/10.1115/1.4003444>
5. Bhattacharya A., Maneesh K., Venkata – Reddy N., Cao J. Formability and surface finish studies in single point incremental forming // MSEC2011-50284. 2011. P. 621–627. <https://doi.org/10.1115/MSEC2011-50284>
6. Lu B., Fang Y., Xu D.K., Chen J., Ai S., Long H., Ou H., Cao J. Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. Vol. 93. P. 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.03.007>

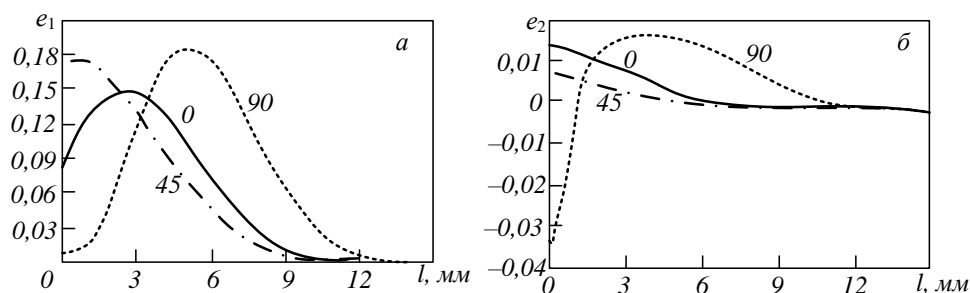


Рис. 5. Распределение главных деформаций для листов с показателем плоскостной анизотропии $-0,248$ (маршрут 3)
 Fig. 5. Distribution of the main deformations for sheets with a flat anisotropy index -0.248 (route 3)

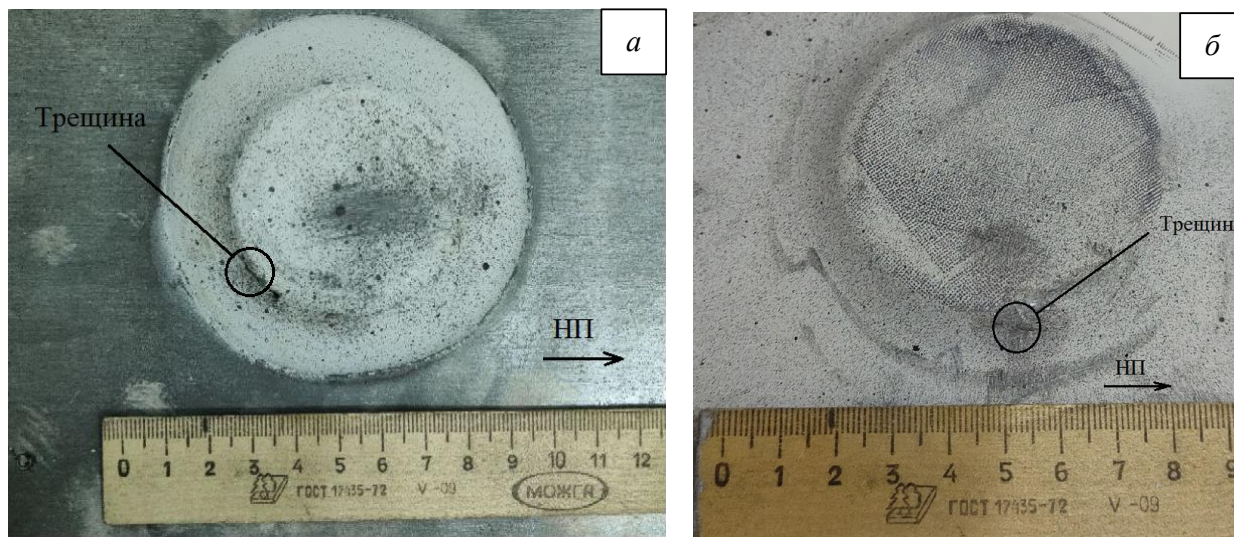


Рис. 6. Положение трещины на конических деталях полученных инкрементальным формообразованием листов с показателем плоскостной анизотропии $0,178$ (а) и $-0,248$ (б)

Fig. 6. The position of the crack on the conical parts obtained by incremental shaping of sheets with a planar anisotropy index of 0.178 (a) and -0.248 (b)

7. Gatea S., Lu B., Ou H., McCartney G. Numerical simulation and experimental investigation of ductile fracture in SPIF using modified GTN model // MATEC Web of Conferences. 2015. Vol. 21. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152104013>
8. Silva M.B., Nielsen P.S., Bay N., Martins P.A.F. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 56. P. 893–903. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3254-1>
9. Schafer T., Schraft R.D. Incremental sheet metal forming by industrial robots // Rapid Prototyping Journal. 2005. Vol. 11. No. 5. P. 278–286. <https://doi.org/10.1108/13552540510623585>
10. Ham, M., Jeswiet, J. Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003 // CIRP ANNALS. 2006. Vol. 5. No. 1. P. 241–244. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60407-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60407-7)
11. Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufloy, J., Allwood, J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal // CIRP ANNALS. 2005. Vol. 54. No. 2. P. 88–111. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3)
12. Verbert J. Computer aided process planning for rapid prototyping with incremental sheet forming techniques. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, 2010.
13. Allwood J.M., Braun D., Music O. The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. No. 11. P. 1501–1510. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.04.008>
14. Третьяков, Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. 2011. № 2. С. 92–100.
15. Vic-3D Correlated Solutions. Руководство по проведению испытаний. 2009. 64 с.

16. Vic-3D Correlated Solutions. Справочное руководство. 2010. 109 с.
17. Hussain G., Gao L. A novel method to test the thinning limit of sheet metal in negative incremental forming // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. Vol. 47. No. 3-4. P. 419–435. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.06.015>
18. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации). Москва: Машиностроение, 1998. 448 с.

REFERENCES

1. Krivoshein V.A., Antsifirov A.A., Maistrov Yu.V. Prospects for the use of incremental molding technologies in modern production. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2014, no. 11 (656), pp. 84–89. (In Russ.).
2. Grechnikov V.F., Surudin S.V., Erisov Ya.A., De Alvaenga R. The current state of the theory and technology of incremental shaping. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*. 2021, vol. 20, no. 3, pp. 119–137. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2021-20-3-119-137>
3. Kugul'tinov S.D., Malyshev G.N. Simonenko K.E. Increase of production efficiency based on enlarged computer-aided design and standardization of technological processes. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2007, no. 4, pp. 93. (In Russ.).
4. Portman V.T. Stiffness evaluation of machines and robots: minimum collinear stiffness value approach. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2011, vol. 3, no. 1, pp. 9. <https://doi.org/10.1115/1.4003444>
5. Bhattacharya A., Maneesh K., Venkata – Reddy N., Cao J. Formability and surface finish studies in single point incremental forming. *MSEC2011-50284*. 2011, pp. 621–627. <https://doi.org/10.1115/MSEC2011-50284>
6. Lu B., Fang Y., Xu D.K., Chen J., Ai S., Long H., Ou H., Cao J. Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015, vol. 93, pp. 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.03.007>
7. Gatea S., Lu B., Ou H., McCartney G. Numerical simulation and experimental investigation of ductile fracture in SPIF using modified GTN model. *MATEC Web of Conferences*. 2015, vol. 21. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152104013>
8. Silva M.B., Nielsen P.S., Bay N., Martins P.A.F. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011, vol. 56, pp. 893–903. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3254-1>
9. Schafer T., Schraft R.D. Incremental sheet metal forming by industrial robots. *Rapid Prototyping Journal*. 2005, vol. 11, no. 5, pp. 278–286. <https://doi.org/10.1108/13552540510623585>
10. Ham, M., Jeswiet, J. Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003. *CIRP ANNALS*. 2006, vol. 5, no. 1, pp. 241–244. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60407-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60407-7)
11. Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufloy, J., Allwood, J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP ANNALS*. 2005, vol. 54, no. 2, pp. 88–11. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3)
12. Verbert J. Computer aided process planning for rapid prototyping with incremental sheet forming techniques. PhD Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, 2010.
13. Allwood J.M., Braun D., Music O. The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, no. 11, pp. 1501–1510. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.04.008>
14. Tret'yakov, T.V., Tret'yakov M.P., Vil'deman V.E. Evaluation of measurement accuracy using the motion and strain field analysis video system. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2011, no. 2, pp. 92 – 100. (In Russ.).
15. *Vic-3D Correlated Solutions. Test Guide*. 2009. 64 p.
16. *Vic-3D Correlated Solutions. Reference Guide*. 2010. 109 p.
17. Hussain, L. Gao, A novel method to test the thinning limit of sheet metal in negative incremental forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007, vol.47, no 3-4, pp. 419–435. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.06.015>
18. Grechnikov, F.V. *Deformation of anisotropic materials (Intensification reserves)*. Moscow: Mashinostroenie, 1998. 448 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Илья Николаевич Петров, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
E-mail: ilpetrof110895@yandex.ru

Василий Андреевич Разживин, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Самарский национальный исследовательский университет имени ака-

демика С.П. Королева, Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru

Тамара Сергеевна Саргаева, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: sargaeva1999@mail.ru

Дмитрий Игоревич Воробьев, студент кафедры обработки металлов давлением, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: dvorobev84@gmail.com

Алексей Валерьевич Смальцер, студент кафедры обработки металлов давлением, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: lex.oma@mail.ru

Information about the authors

Il'ya N. Petrov, Postgraduate of the Chair Metal Forming, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
E-mail: ilpetrof110895@yandex.ru

Vasilii A. Razzhivin, Postgraduate of the Chair Metal Forming, Samara National Research University named

after Academician S.P. Korolev, Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru

Tamara S. Sargaeva, Postgraduate of the Chair Metal Forming, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev
E-mail: sargaeva1999@mail.ru

Dmitrii I. Vorob'ev, student of the Chair Metal Forming, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev
E-mail: dvorobev84@gmail.com

Aleksei V. Smal'tser, student of the Chair Metal Forming, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev
E-mail: lex.oma@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 30.05.2023

После доработки 13.06.2023

Принята к публикации 16.06.2023

Received 30.05.2023

Revised 13.06.2023

Accepted 16.06.2023