

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОЙ ФОРМОВКИ НА ОБОРУДОВАНИИ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

В.А. Смирнов, Л.Н. Петрова

В работе рассматривается вопрос повышения эффективности выполнения инкрементальной формовки на оборудовании с параллельной кинематикой гексаподной структуры. Особенностью такого оборудования является нелинейная связь между его входными и выходными координатами, что ведет к зависимости величины энергии, потребляемой приводами, от положения заготовки. Этот фактор может быть использован для минимизации потребления энергии. Компьютерное моделирование показало возможность снижения энергопотребления в два и более раза. Дополнительное снижение энергопотребления можно обеспечить за счет оптимального управления приводами, при котором выходные угловые координаты изменяются по законам, обеспечивающим уменьшение потребления энергии.

Ключевые слова: инкрементальная формовка, оборудование с параллельной кинематикой, гексапод, повышение энергоэффективности.

INCREMENTAL FORMING POWER EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR EQUIPMENT WITH PARALLEL KINEMATICS

V.A. Smirnov, L.N. Petrova

The issue of incremental forming efficiency improvement for equipment with parallel kinematics of hexapod structure is considered. Feature of such equipment is non-linear connection among input and output coordinates that is leading to a dependence of power consumption by actuators on a billet position. This factor may be used for minimization of power consumption. Computer simulation has shown possibility for decreasing twice and more power consumption. Extra decreasing the power consumption can be realized with optimal actuator control, when output angular coordinates vary according to laws ensuring power consumption decrease.

Keywords: incremental forming, equipment with parallel kinematics, hexapod, power efficiency increase.

Введение

Инкрементальная формовка (*SPIF* – *single point incremental forming*) – относительно новая технология обработки листовых материалов [1], при которой заготовка локально деформируется инструментом – пуансоном. Технология активно изучается в различных странах [2–5], что объясняется рядом ее особенностей. Во-первых, технология достаточно проста в реализации – при наличии простейшей крепежной оснастки она может быть реализована на трехкоординатном фрезерном станке с ЧПУ [6]. Во-вторых, она идеально подходит для изготовления небольших партий деталей из листового материала, так как не требует изготовления штамповочной оснастки.

Основные потенциальные области применения *SPIF* – это аэрокосмическая и автомобильная промышленности, испытывающие потребности в изготовлении сложнопрофильных корпусных деталей из листовых материалов, часто в единичных экземплярах. Помимо того, эта технология востребована в задачах прототипирования, а также при изготовлении индивидуальных протезов.

Исследования в области *SPIF* осуществляются по следующим основным направлениям:

- исследование процессов, происходящих при взаимодействии листовой заготовки и пуансона, с целью получения изделий с заданными свойствами [7–9];
- моделирование процессов, происходящих при взаимодействии листовой заготовки и пу-

ансона [10–13], с целью определения возникающих при формовке силовых факторов.

Кроме того, исследуются вопросы создания специализированного оборудования для реализации *SPIF* [14–16]. В работах [15, 16] показано, что перспективным для этого является использование механизмов с параллельной кинематикой. При этом отмечается, что такие механизмы характеризуются повышенной удельной жесткостью и высокой точностью позиционирования.

Особенности механизмов с параллельной кинематикой, в частности – нелинейная связь между входными и выходными координатами, позволяют придать оборудованию, построенному на их основе, дополнительные качества, например, решать задачу снижения потребления энергии приводами подач. При реализации *SPIF* работа, совершаемая приводами подач, является основной работой по формообразованию в отличие от операции фрезерования, при которой существенно потребление энергии привода главного движения. Следовательно, уменьшение потребления энергии приводами подач может существенно улучшить эффективность выполнения *SPIF*.

Целью данной работы является анализ подходов к снижению потребления энергии приводами станка с параллельной кинематикой: за счет рационального выбора положения заготовки и за счет реализации оптимального управления приводами станка.

Постановка задачи

Инкрементальная формовка предполагает взаимодействие листовой заготовки и пуансона, в результате которого происходит пластическое деформирование заготовки (рис. 1), закрепленной в оснастке. Собственно формообразование осуществляется за счет перемещения пуансона, в общем случае по трем линейным координатам.

Поверхность пуансона, взаимодействующая с материалом заготовки, должна иметь сферическую форму. Пуансону придают вращение относительно его продольной оси, что формирует область локального нагрева заготовки и снижает усилия, необходимые для ее деформирования.

Необходимость в трех ортогональных перемещениях пуансона и в его вращении определяет требования к оборудованию, используемому при *SPIF* формовке. Этим требованиям удовлетворяют фрезерные станки, в которые

пуансон может устанавливаться вместо фрезы. Такой подход широко реализуется на практике.

В работе [15] отмечено, что силовые факторы, возникающие при фрезерной обработке, обычно существенно выше силовых факторов, возникающих при *SPIF*. Кроме того, фрезерный станок зачастую имеет функции, не востребованные при *SPIF*, например, сбор стружки. Поэтому промышленный фрезерный станок является не самым эффективным оборудованием для реализации *SPIF*. Более эффективным будет оборудование, специально разработанное для выполнения этой технологической операции.

В качестве основы для специализированного оборудования для *SPIF* в работах [15, 16] предлагается использовать механизмы с параллельной кинематикой гексаподного типа. Механизм-гексапод представляет собой совокупность платформы, связанной с основанием посредством шести штанг (рис. 2). Связь

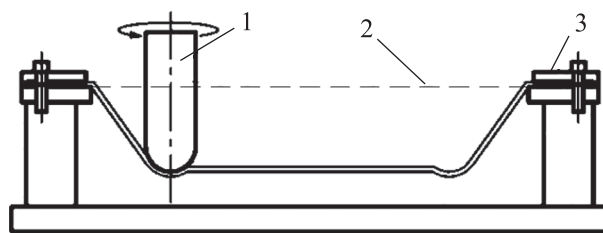


Рис. 1. Схема реализации инкрементальной формовки:

1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – оснастка

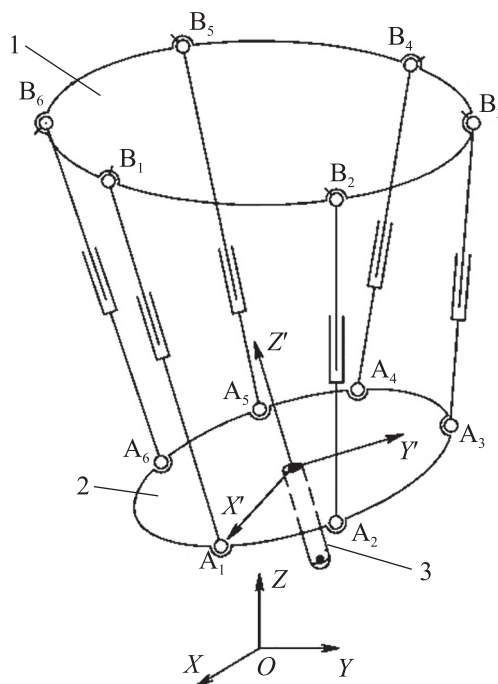


Рис. 2. Кинематическая схема механизма с параллельной кинематикой – гексапода:

1 – основание; 2 – подвижная платформа; 3 – инструмент

каждой j -й штанги с платформой реализована при помощи трехстепенного шарнира B_j , а каждой штанги с основанием – с помощью двухстепенного шарнира A_j . В качестве управляемых параметров (координат) выступают длины штанг L_j ; возможность изменения длин штанг на рис. 2 иллюстрируется наличием шести одностепенных поступательных кинематических пар.

За счет изменения длин шести штанг платформа может перемещаться в системе координат $OXYZ$ основания по шести независимым координатам: трем линейным и трем угловым. В качестве линейных выходных координат обычно выступают координаты некоторого полюса, связанного с платформой, – точка C , или характерная точка инструмента – точка K ; в качестве трех выходных угловых координат используют станочные углы, углы Эйлера или углы Крылова [17], описывающие разворот осей связанной с платформой системы координат $CX'Y'Z'$ относительно осей системы координат основания.

В оборудовании с параллельной кинематикой присутствует нелинейная связь между входными и выходными координатами, что видно из уравнений кинематической модели гексапода [17]:

$$\begin{aligned} L_j^2 = & x_{B_j}^2 + y_{B_j}^2 + z_{B_j}^2 + (x_C - x_{A_j})^2 + (y_C - y_{A_j})^2 + \\ & + (z_C - z_{A_j})^2 + 2[(C\psi C\gamma + S\psi S\theta S\gamma)x'_{B_j} + \\ & + S\psi C\theta y'_{B_j} + (S\psi S\theta C\gamma - C\psi S\gamma)z'_{B_j}](x_C - x_{A_j}) + \\ & + 2[(C\psi S\theta S\gamma - S\psi C\gamma)x'_{B_j} + C\psi C\theta y'_{B_j} + \\ & + (S\psi S\gamma + C\psi S\theta C\gamma)z'_{B_j}](y_C - y_{A_j}) + 2[C\theta S\gamma x'_{B_j} - \\ & - S\theta y'_{B_j} + C\theta C\gamma z'_{B_j}](z_C - z_{A_j}), j = 1 \dots 6. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $(x'_{B_j}, y'_{B_j}, z'_{B_j})$ – координаты j -го сферического шарнира B_j в системе координат $CX'Y'Z'$; $(x_{A_j}, y_{A_j}, z_{A_j})$ – координаты j -го карданового шарнира A_j в системе координат $OXYZ$; (x_C, y_C, z_C) – координаты полюса C в системе координат $OXYZ$; (ψ, θ, γ) – углы Крылова; $S\psi = \sin\psi$, $C\psi = \cos\psi$ и т. д.

Отмеченная нелинейность приводит к тому, что при реализации одинаковых траекторий движения инструмента, отличающихся начальными точками, будут наблюдаться различия в изменениях входных координат [17]. Эта особенность позволяет сделать предположение о том, что при реализации одинаковых траек-

торий движения инструмента, испытывающего одинаковые нагрузки, но начинающихся в разных точках, будут наблюдаться различия в потребляемой приводами оборудования энергии. Это предположение проверено с помощью математического моделирования.

Математическое моделирование процесса потребления энергии приводами

Для идеального привода потребляемая им энергия будет равна

$$W = |\Delta L \cdot F|, \quad (2)$$

где ΔL – изменение длины штанги, вызванное работой привода, F – продольная сила в этой штанге.

Для гексапода продольная сила в каждой штанге может быть определена из системы уравнений статики

$$\begin{cases} a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + a_{13}F_3 + a_{14}F_4 + a_{15}F_5 + a_{16}F_6 = -P_X; \\ a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + a_{23}F_3 + a_{24}F_4 + a_{25}F_5 + a_{26}F_6 = -P_Y; \\ a_{31}F_1 + a_{32}F_2 + a_{33}F_3 + a_{34}F_4 + a_{35}F_5 + a_{36}F_6 = -P_Z; \\ a_{41}F_1 + a_{42}F_2 + a_{43}F_3 + a_{44}F_4 + a_{45}F_5 + a_{46}F_6 = -M_X; \\ a_{51}F_1 + a_{52}F_2 + a_{53}F_3 + a_{54}F_4 + a_{55}F_5 + a_{56}F_6 = -M_Y; \\ a_{61}F_1 + a_{62}F_2 + a_{63}F_3 + a_{64}F_4 + a_{65}F_5 + a_{66}F_6 = -M_Z, \end{cases} \quad (3)$$

$$a_{ij} = \frac{k}{\sqrt{(x_{A_j} - x_{B_j})^2 + (y_{A_j} - y_{B_j})^2 + (z_{A_j} - z_{B_j})^2}},$$

$$k = \begin{cases} x_{B_j} - x_{A_j}, & \text{при } i = 1; \\ y_{B_j} - y_{A_j}, & \text{при } i = 2; \\ z_{B_j} - z_{A_j}, & \text{при } i = 3; \\ y_{A_j}(z_{B_j} - z_{A_j}) - z_{A_j}(y_{B_j} - y_{A_j}), & \text{при } i = 4; \\ z_{A_j}(x_{B_j} - x_{A_j}) - x_{A_j}(z_{B_j} - z_{A_j}), & \text{при } i = 5; \\ x_{A_j}(y_{B_j} - y_{A_j}) - y_{A_j}(x_{B_j} - x_{A_j}), & \text{при } i = 6. \end{cases}$$

Система (3) представляет собой уравнения проекций имеющихся в механизме сил на оси системы координат $OXYZ$ и уравнения моментов, записанные относительно осей этой же системы координат. Принято, что P и M – внешние силовые факторы, приведенные к полюсу C .

С использованием зависимостей (1)–(3) выполнено моделирование реализации SPIF на оборудовании с параллельной кинематикой. Геометрические параметры оборудования, необходимые для моделирования, приняты соот-

ветствующими параметрам координатно-измерительной машины КИМ-1000 фирмы Лапик (Россия). Машина построена по гексаподной схеме и может оснащаться обрабатывающей фрезерной головкой. Следовательно, ее конструкция позволяет формировать силовые воздействия, требуемые для *SPIF*.

Внешние силовые факторы, параметры инструмента и его траектории движения при моделировании приняты с учетом результатов работы [12]. В этой работе авторы провели экспериментальную оценку сил F_r , F_τ , F_z (рис. 3), возникающих при деформировании пуансоном заготовки из низкоуглеродистой стали DC01 толщиной 1,15 мм. Пуансон имеет на своем рабочем конце полусферу диаметром 25 мм. Глубина формования – 1,06 мм. Движение инструмента осуществляется по окружности радиусом $R = 75$ мм в плоскости OXY в направлении положительного изменения угла φ . При моделировании проекции силовых факторов P и M в системе (3) рассчитывались с учетом того,

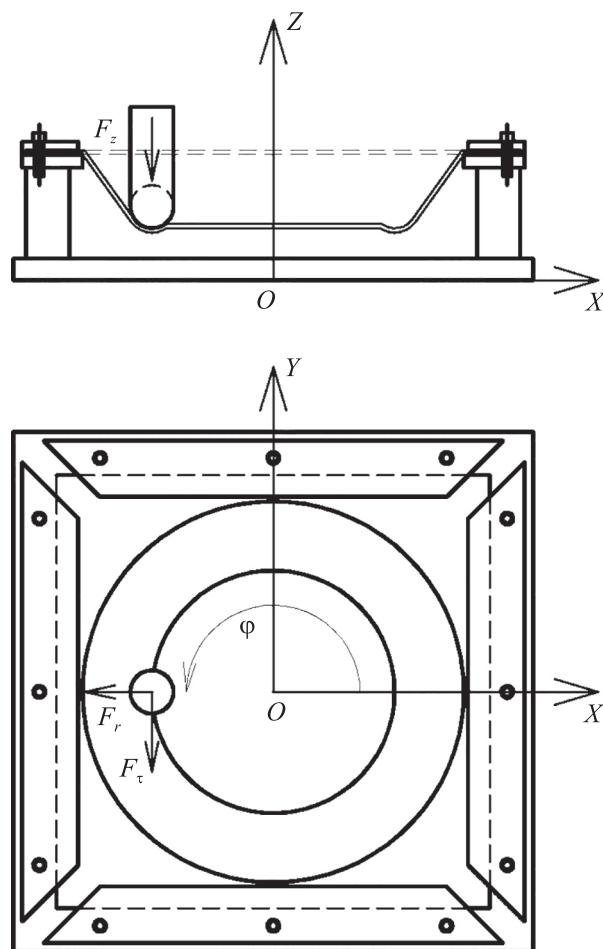


Рис. 3. Силовые факторы, возникающие при инкрементальной формовке

что пуансон имеет длину 150 мм, а $F_z = 2500$ Н, $F_r = 1400$ Н, $F_\tau = 350$ Н в соответствии с результатами работы [12].

Траектория движения инструмента при моделировании соответствует последовательному движению точки K по окружностям, лежащим в 21 плоскости, параллельной плоскости OXY . Плоскости отстоят друг от друга на величину глубины формования 1,06 мм, радиусы окружностей последовательно уменьшаются на 0,5 мм. Положение инструмента при его движении в первой плоскости и координата z_1 этой плоскости показаны на рис. 4.

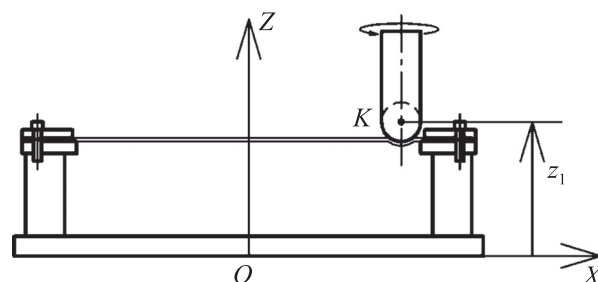


Рис. 4. Координата z_1 первой плоскости движения инструмента

С точки зрения требований к перемещениям пуансона при *SPIF* механизм-гексапод имеет избыточность – все выходные угловые координаты в этой технологической операции не используются. При моделировании всем этим координатам назначены нулевые значения.

На рис. 5 показаны графики потребления энергии приводами, полученные при моделировании. Проведено моделирование девяти вариантов расположения заготовки в системе координат $OXYZ$, отличающихся координатой z_1 первой плоскости: от 300 мм до 700 мм с шагом 50 мм.

Анализ графиков показывает существенную зависимость потребляемой приводами энергии от расположения заготовки: суммарное потребление энергии при $z_1 = 700$ мм более чем в два раза превышает аналогичный показатель для $z_1 = 300$ мм.

Результаты, аналогичные представленным на рис. 5, получены в многочисленных численных экспериментах при различных внешних силовых факторах и геометрических размерах механизма-гексапода. Следовательно, размещение заготовки должно рассматриваться как способ повышения эффективности *SPIF*.

Добиться дополнительного снижения энергии, потребляемой приводами оборудования с параллельной кинематикой, можно за счет реализации энергоэффективного управления [18]. Как отмечено выше, с точки зрения требований к перемещениям пуансона при *SPIF* механизм-гексапод имеет избыточность – все выходные угловые координаты в этой технологической операции не используются. Поскольку рабочий конец пуансона выполнен в виде полусферы, то в процессе работы эти координаты могут принимать произвольные значения в диапазонах, ограниченных конструкцией механизма-гекспода. Непостоянство выходных угловых координат не отразится на процессе формообразования. Аналогично рассмотренному в работе [18] энергоэффективному управлению, при *SPIF* может ставиться и решаться задача минимизации целевой функции

$$W_{\Sigma}(\psi, \vartheta, \gamma) = \sum_{j=1}^6 |\Delta L_j(\psi, \vartheta, \gamma) F_j(\psi, \vartheta, \gamma)|, \quad (4)$$

для каждого элементарного перемещения пуансона по траектории. Функция (4) характеризует работу приводов штанг на этом элементарном участке траектории. Здесь ψ, ϑ, γ – угловые выходные координаты, $\Delta L_j(\psi, \vartheta, \gamma)$ – изменение длины j -й штанги, $F_j(\psi, \vartheta, \gamma)$ – продольная сила, действующая в j -й штанге. Величины $\Delta L_j(\psi, \vartheta, \gamma)$ рассчитываются с использованием кинематической модели (1), для расчета значений $F_j(\psi, \vartheta, \gamma)$ используются уравнения (3).

Результаты моделирования энергоэффективного управления для случая $z_1 = 300$ мм показаны на рис. 6. Анализ результатов показал, что в численном эксперименте энергоэффективное управление обеспечило дополнительное снижение потребляемой энергии на 6,7 %.

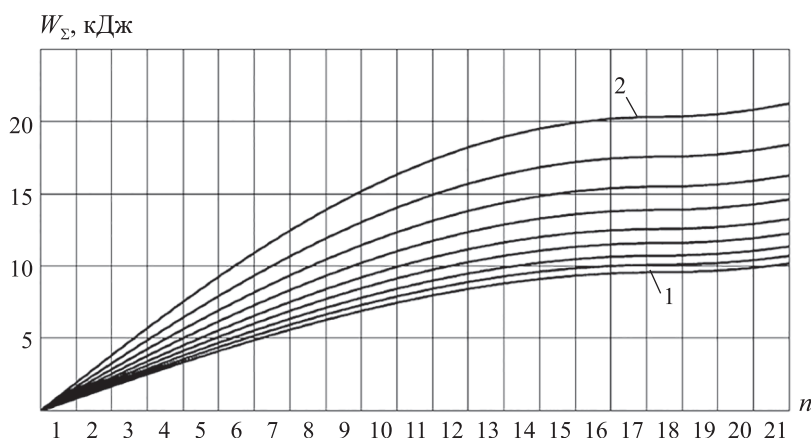


Рис. 5. Потребление энергии приводами оборудования с параллельной кинематикой при моделировании инкрементальной формовки:
1 – при $z_1 = 300$ мм; 2 – при $z_1 = 700$ мм; $n = 1, \dots, 21$ – номер плоскости

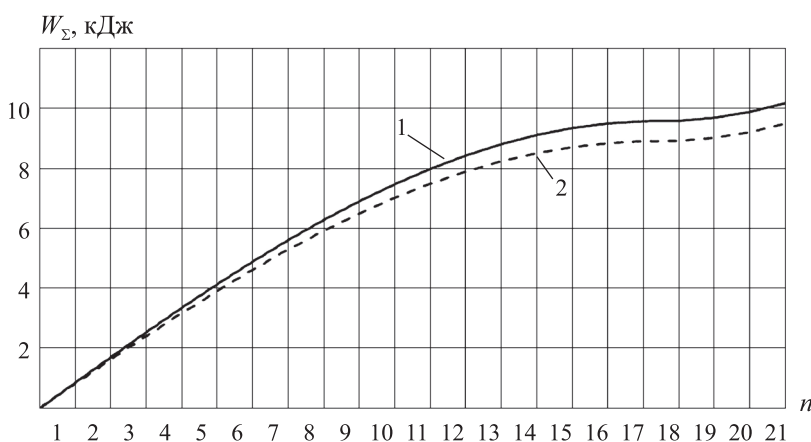


Рис. 6. Потребление энергии приводами оборудования с параллельной кинематикой при моделировании инкрементальной формовки при $z_1 = 300$ мм:
1 – равенство нулю выходных угловых координат, 2 – энергоэффективное управление;
 $n = 1, \dots, 21$ – номер плоскости

Следовательно, энергоэффективное управление по критерию (4) может использоваться для повышения эффективности реализации SPIF на оборудовании с параллельной кинематикой.

При моделировании было принято, что угловые координаты ψ и ϑ могут находиться в диапазоне $\pm 5^\circ$, угловая координата γ может находиться в диапазоне $\pm 20^\circ$, что допускается кинематикой станка-гексапода. На рис. 7 показан характер изменения этих углов при моделировании энергоэффективного управления применительно к движению инструмента в первой плоскости. При переходе к каждой последующей плоскости угловые координаты переводились в нулевые значения.

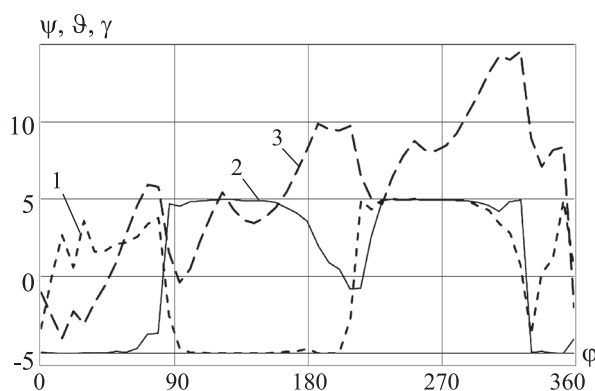


Рис. 7. Изменения угловых выходных координат при моделировании энергоэффективного управления:

1 – изменение угла ψ ; 2 – изменение угла ϑ ;
3 – изменение угла γ

Заключение

С использованием механизмов с параллельной кинематикой можно создавать специализированное оборудование для реализации SPIF. Эффективность выполнения этой технологической операции на таком оборудовании может повышаться за счет рационального расположения заготовки: моделирование показало, что этот фактор позволяет снижать потребление энергии приводами оборудования более чем в два раза. Дополнительное снижение энергопотребления можно обеспечить за счет энергоэффективного управления.

Список литературы

1. Emmens W.C., Sebastian G., van den Boogaard A.H. The technology of incremental sheet forming – a brief review of the history // Journal of Materials Processing Technology. № 210 (2010). P. 981–997.

2. Karbowski K. Application of incremental sheet forming // Management and Production Engineering Review. 2015. Vol. 6. No. 4. P. 55–59.
3. Tisza M. General overview of sheet incremental forming // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2012. Vol. 55. No 1. P. 113–120.
4. Theory of single point incremental forming / P.A.F. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, M.B. Silva // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2008. No 57. P. 247–252.
5. Перспективы использования технологий инкрементальной формовки в современном производстве / В.А. Кривошеин, А.А. Анцифиров, Ю.В. Майстров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. No 11 (656). С. 84–89.
6. Patel Ketul, Kalaichelvi V., Karthikeyan R., Bhattathiri Sriparvathi Modelling, simulation and control of incremental sheet metal forming process using CNC machine tool // Procedia Manufacturing. 2018. No 26. P. 95–106.
7. Кривошеин В.А., Рукавичко Е.А., Анцифиров А.А. Разработка технологии получения полусферических изделий методом инкрементальной формовки // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. Т. 9. № 3. <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN317.pdf> (дата обращения: 01.03.2019).
8. Jackson K., Allwood J. The mechanics of incremental sheet forming // Journal of Materials Processing Technology. 2009. 209. P. 1158–1174.
9. Memicoglu P., Musicb O., Karadogan C. Simulation of incremental sheet forming using partial sheet models // Procedia Engineering. 2017. 207. P. 831–835.
10. Oraon M., Sharma V. Predicting force in single point incremental forming by using artificial neural network // IJE TRANSACTIONS A: Basics. 2018. Vol. 31. No. 1. P. 88–95.
11. Kyung Hee Koh, Jae-Gwan Kang, Jong-Yun Jung. The analysis of forming forces in single point incremental forming // MATEC Web of Conferences 81, 05004 (2016) ICTTE 2016. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168105004> (дата обращения: 01.03.2019).
12. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations / R. Aerens, P. Eyckens, A. Van Bael, J.R. Dufloy // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. No 46 (9). P. 969–982.

13. Numerical Study of Incremental Sheet Forming Processes/ *H Kim I, T Park I, R Esmailpour I and F Pourboghrat* // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series Volume 1063 (2018) 012017. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1063/1/012017>. (дата обращения: 01.03.2019).
14. *Kumar Y, Kumar S*. Design and development of single point incremental sheet forming machine // 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014). 2014. P. 94-1–94-4.
15. Finding the best machine for SPIF operations – a brief discussion / *S. R. Marabuto, D. Afonso, J.A.F. Ferreira, F.Q. Melo, M. Martins, R.J. Alves de Sousa* // Key Engineering Materials. 2011. Vol. 473. P. 861–868.
16. SPIF-A: on the development of a new concept of incremental forming machine / *R.J. Alves de Sousa, J.A.F. Ferreira, J.B. Sá de Farias, J.N.D. Torrão, D.G. Afonso, M.A.B.E Martins* // Structural Engineering and Mechanics. 2014. Vol. 49. No. 5. P. 645–660.
17. *Смирнов В.А.* Научные основы и алгоритмы управления оборудования с параллельными приводами. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 164 с.
18. *Смирнов В.А.* Кинетостатическое моделирование энергоэффективного управления оборудованием с параллельной кинематикой // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2010. Вып. 16. № 29 (205). С. 65–70.

**СМИРНОВ
Владимир Алексеевич**

E-mail: smirnovva@susu.ru
Тел.: (905) 830-73-08

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Сфера научных интересов: управление многокоординатным технологическим оборудованием. Автор 45 публикаций.

**ПЕТРОВА
Лина Николаевна**

E-mail: petrovaln@susu.ru
Тел.: (905) 839-30-63

Старший преподаватель кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Сфера научных интересов: исследование механизмов с параллельной кинематикой. Автор 23 публикаций.