

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.982.5  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-128-138



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МОНОЛИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Пашков А.Е., Пашков А.А., Исаченко А.С., Дук А.А., Рыбак А.М.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Крупногабаритные монолитно-фрезерованные панели являются одними из наиболее сложных элементов в конструкции самолета. Совокупность больших габаритных размеров вместе с переменной кривизной на фоне малой жесткости обуславливает сложность изготовления данных деталей. В силу необходимости достижения высокой точности формы данных панелей процесс их производства также осложняется за счёт конструктивных особенностей – тонкостенности, наличия подкрепляющих ребер и малых значений кривизны, для достижения которой нужна общая деформация, соизмеримая с упругой составляющей. Результаты формообразования панелей зависят от большого количества взаимовлияющих факторов, которые, в свою очередь, влияют на формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) и формы деталей. Одним из перспективных методов изготовления данных деталей является использование метода посадки ребер. Данный процесс широко применяется для формообразования профилей и балок. Имеющиеся публикации методик расчёта режимных параметров процесса посадки ребер монолитных панелей в настоящее время имеют малое освещение. **Цель работы.** Совершенствование методик расчёта режимных параметров обработки металлов методами локального пластического деформирования на примере посадки ребер панелей. **Используемые методы.** Конечно-элементное моделирование процесса локального пластического деформирования. **Новизна.** Концепция моделирования формообразования монолитно-фрезерованных панелей методом посадки. **Практическая значимость.** Разработанная конечно-элементная модель представляет собой входные данные для расчета режимных параметров процесса посадки ребер монолитно-фрезерованных панелей. **Результаты.** Разработана методика построения и анализа конечно-элементной модели с целью определения внутренних силовых факторов, возникающих в монолитно-фрезерованных панелях в процессе их обработки методом посадки.

**Ключевые слова:** посадка ребер панелей, пластическое деформирование, обработка металлов давлением, остаточные напряжения, напряженно деформированное состояние

*Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».*

© Пашков А.Е., Пашков А.А., Исаченко А.С., Дук А.А., Рыбак А.М., 2024

### Для цитирования

Исследование процесса посадки крупногабаритных монолитных панелей / Пашков А.Е., Пашков А.А., Исаченко А.С., Дук А.А., Рыбак А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 128-138. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-128-138>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## STUDY ON A FITTING PROCESS OF LARGE-SIZED MONOLITHIC PANELS

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Isachenko A.S., Duk A.A., Rybak A.M.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Large-sized monolithic machined panels are one of the most complicated elements in the plane design. A set of large overall dimensions and variable camber of low rigidity determine difficulties with manufacturing such parts. As it is required to achieve high accuracy of the shape of such panels, their manufacturing process is also complicated by structural features, namely thin walls, stiffening ribs and low camber, to whose achievement total deformation should be proportional to an elastic component. The results of the panel geometry generation depend on many interdependent factors, which, in their turn, influence the stress and strain state and shape of parts. One of promising methods of manufacturing such parts is a method of fitting of ribs. This process is widely used for the geometry generation of sections and beams. Now, available methods for calculating mode parameters of fitting ribs of monolithic parts are not enough covered in publications. **Objective.** The research is aimed at improving procedures for calculating mode parameters of metal treatment by local plastic deformation methods. **Methods Applied.** Finite element modeling of a local plastic deformation process using the example of fitting of panel ribs. **Originality.** A concept of simulation of the geometry generation of monolithic machined panels by a fitting method. **Practical Relevance.** The developed finite element model represents input data for calculating mode parameters of the process of fitting ribs of monolithic machined panels. **Results.** The authors developed a procedure for building and analyzing the finite element model to determine internal force factors, occurring in monolithic machined panels during their fitting.

**Keywords:** fitting of panel ribs, plastic deformation, metal forming, residual stresses, stress and strain state

*The research was carried out within the framework of the Priority-2030 academic leadership program.*

### For citation

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Isachenko A.S., Duk A.A., Rybak A.M. Study on a Fitting Process of Large-Sized Monolithic Panels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 128-138. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-128-138>

### Введение

В современном авиастроении для повышения эксплуатационного ресурса и снижения веса планера самолета широко применяются крупногабаритные монолитные панели. Данные детали характеризуются большими габаритными размерами, переменной кривизной и наличием элементов внутреннего набора в виде ребер в продольном и поперечном направлении, осложняющих процесс формообразования [1]. Классический подход к формообразованию панелей, а именно прессовая гибка, отличается сравнительно высокой трудоемкостью и в некоторых случаях может привести к возникновению огибки и трещин [2]. Альтернативным способом придания пространственной формы панелям является использование метода локальных деформаций ребер с помощью процессов посадки или раскатки.

Раскатка ребра – это процесс непрерывной обработки участка ребра детали, при котором деформируемое ребро зажимается с регулируемым давлением парой роликов с перемещением раскатного инструмента за счет вращения роликов. Перемещение раскатного инструмента вдоль деформируемого ребра за счет самозатягивания роликов приводит к его удлинению и

вызывает формирование выпуклой со стороны ребра поверхности детали [3]. Подходы к определению режимных параметров в рамках реализации комбинированного процесса формообразования, содержащего операции раскатки ребер роликами и дробеударного формообразования, приведены в работе [4].

Посадка ребра – это процесс дискретной (инкрементальной) обработки участка ребра детали, при котором деформируемое ребро подвергается сложному нагружению – одновременному сдавливанию и сведению двух пар контактных накладок инструмента для посадки ребер.

Определение зависимости получаемой кривизны детали от деформирующего воздействия является сложной технологической задачей, которую можно решить методом конечно-элементного моделирования по аналогии с раскаткой роликами [5].

### Конструктивно-технологические особенности панелей с поперечным оребрением

На рис. 1 представлен общий вид крупногабаритной монолитной панели с поперечными ребрами, подходящей под формообразование методом посадки ребер в целях получения поперечной кривизны.

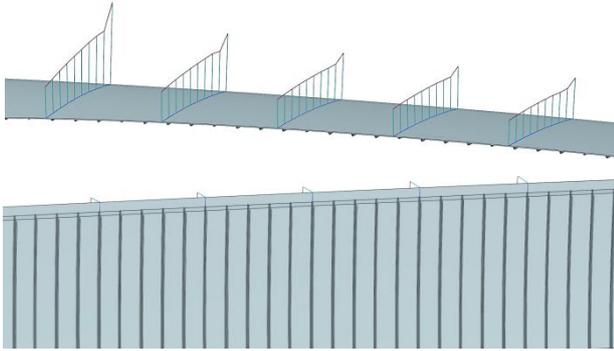


Рис. 1. Общий вид панели с поперечными ребрами  
Fig. 1. General view of the panel with transverse ribs

Для проведения моделирования крупногабаритные панели разбиваются на множество элементарных образцов, а именно пластин с полотном (деталь таврового сечения). Геометрические формы длинномерных панелей могут достигать длины до 30 м и более и делятся на следующие типы:

- сравнительно узкие (до 1000 мм) панели с монолитным оребрением;
- обшивки панелей большой ширины (до 2500-4500 мм) в виде разнотолщинных плит с усилениями;
- клиновые плиты шириной около 1500 мм.

Панели данного типа можно представить как совокупность взаимосвязанных участков в виде полотна с ребром (рис. 2), где  $A$  – ширина полотна,  $H$  – толщина полотна,  $L$  – длина полотна,  $B$  – высота ребра,  $h$  – толщина ребра,  $R$  – радиус скругления.

Ввиду того, что монолитные панели конструктивно представляют собой обшивку, подкрепленную продольными ребрами жесткости, и в случае когда жесткость ребер превосходит изгибную жесткость полотна, панель с оребрением рассматривают чаще всего как систему балок на упругом основании, в качестве которого выступает полотно панели [6], исследование процесса посадки целесообразно начать с определения зависимости кривизны участка детали в виде полотна с ребром от деформирующего воздействия процесса посадки.

#### Теоретические основы процесса посадки

Исследования, приведенные в [7], основаны на аналитических расчетах потенциальной энергии деформирования монолитной ребристой панели. Энергия

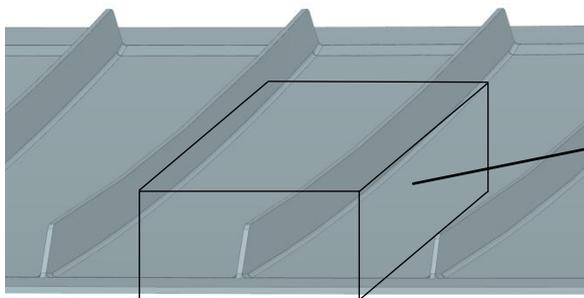


Рис. 2. Размерные параметры элементарного образца  
Fig. 2. Dimensional parameters of an elementary sample

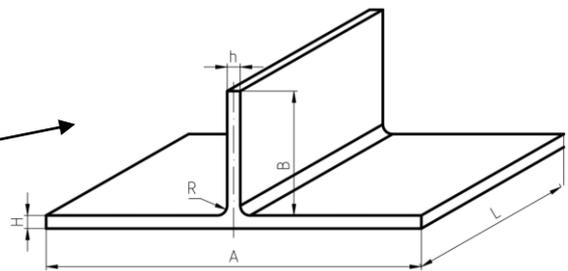
одного воздействия штампа, необходимого для формообразования панели двойной кривизны с оребрением, с заданными поперечными и продольными радиусами кривизны, имеет вид

$$W_i^t = \frac{KSR_n}{L_p^i R_c} \left[ \sum_{n=1}^{2n} \left( \cos \frac{y_i}{R_c} - \cos \frac{l}{R_c} \right) \right]^{-1} \times \left\{ \sum_{i=1}^n EF_p \int_{-l}^l e_{i1}^2 dx + \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p \left( e_1^2 + 2\nu e_1 e_2 + e_2^2 + \frac{1-\nu}{2} e_{i2}^2 \right) dx dy + \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p (a^2 + 2\nu ab + b^2) dx dy + \sum_{i=1}^n Ei \left[ F_p e^2 + I_p - 2eS_p \right] \int_{-l}^l b^2 dx \right\},$$

где  $W_i^t$  – энергия одного воздействия штампа;  $a$ ,  $b$  – параметры, подлежащие определению;  $E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $F_p$  – площадь одного ребра;  $e_{i1}$  – продольная деформация растяжения-сжатия  $i$ -го ребра панели, равная продольной деформации срединной поверхности полотна панели на уровне расположения ребра;  $2n$  – общее число ребер панели;  $I_p$  и  $S_p$  – соответственно момент инерции и статический момент сечения ребра панели относительно нейтральной оси полотна;  $L_p^i$  – длина  $i$ -го ребра;  $K$  – допускаемая относительная деформация;  $S$  – величина деформируемого участка панели вдоль оси ребра при одном технологическом воздействии.

В работе [8] описываются результаты моделирования в системе ANSYS процесса посадки ребер, содержащие данные деформаций, напряжений и прогибов образца панели в момент действия нагрузки и после снятия. Схема процесса посадки, применяемая при моделировании, представляющая из себя схему местной гибки, приведена на рис. 3, а. Результаты моделирования в виде величины остаточных деформаций в ребре панели, вызванных приложением момента к ребру после снятия нагрузки, показаны на рис. 3, б.

Работа [9] посвящена исследованиям производственных параметров процесса крафт-формования, определению производственных стратегий обработки методом посадки и разводки и использует результаты имитационной модели процесса посадки/разводки, созданной в программе PamStamp 2G. Схема процесса посадки/разводки приведена на рис. 4.



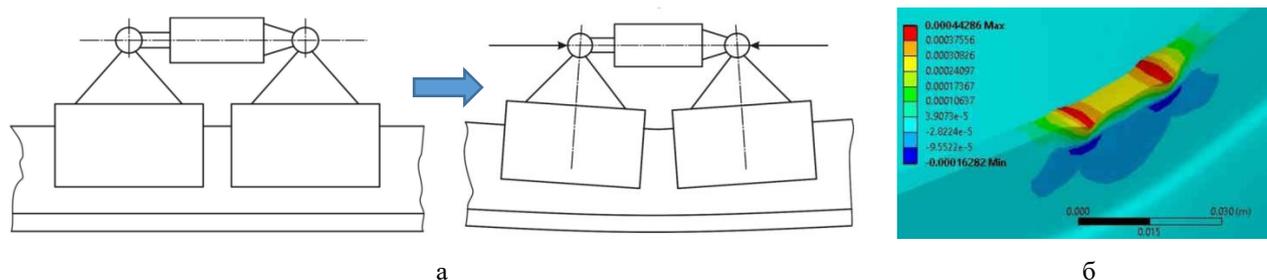


Рис. 3. Моделирование процесса посадки методом местной гибки: а – схема нагружения; б – результаты моделирования

Fig. 3. Modeling of the fitting process using the local bending method: а is a loading diagram; б is simulation results

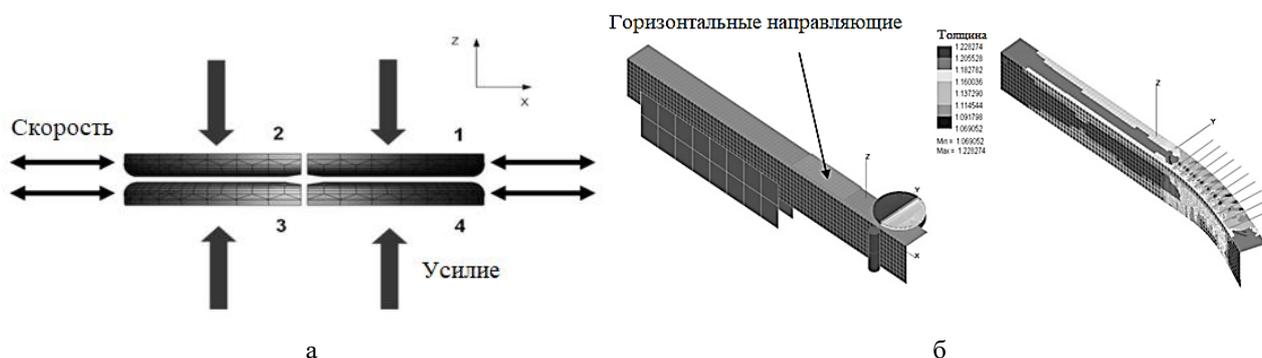


Рис. 4. Моделирование процесса посадки методом натурального нагружения: а – схема нагружения; б – результаты моделирования

Fig. 4. Modeling of the fitting process using the full-scale loading method: а is a loading diagram; б is simulation results

Таким образом, большинство исследований процесса посадки ребер направлено на моделирование формоизменения образца без исследования напряженного и деформационного состояния сжатой/растянутой области.

#### Оборудование для реализации процесса посадки

Лидером в области производства оборудования для местной посадки является компания Eckold [10].

На рис. 5 представлен станок для посадки/разводки деталей типа полотна с подкреплением KF 675 (см. рис. 3, а). Схема процесса посадки, реализуемая на представленном оборудовании, приведена на рис. 3, б.

Данное оборудование может оснащаться сменным инструментом (рис. 6) для обработки уголков (рис. 6, а), оболочек (рис. 6, б), швеллеров и тавров (рис. 6, в) [11] толщиной до 6 мм. Однако обработка габаритных панелей на данном оборудовании представляется невозможной ввиду конструктивных особенностей.

Патентный анализ решений в области посадки конструктивных элементов деталей (рис. 7) показывает, что большинство изобретений представляет из себя наборы матриц с установленными в них пакетами направляющих клиньев, которые устанавливаются в кривошипные прессы. Общее качество, связывающее все разработки компании Eckold в области оборудования для посадки/разводки, – это возможность обработки деталей типа полотна с ребром ограниченных габаритных размеров.

#### Разработка конечно-элементной модели процесса единичного нагружения ребра методом посадки

Входными данными для построения модели процесса посадки являются:

- кинематическая схема нагружающего инструмента;
- величина нагрузки, действующей на инструмент в процессе обработки;
- параметры и свойства материала детали и инструмента.

За основу была взята кинематическая схема, широко используемая фирмой Eckold, показанная на рис. 8, а. Принцип действия инструмента для посадки ребер заключается в одновременном воздействии на ребро сжимающей по толщине  $F_x$  и растягивающей вдоль ребра  $F_y$  компонентами нагрузки  $F$  (рис. 8, б), приводящей к деформации сжатия обрабатываемого участка детали (рис. 9) и сокращению общей длины ребра, что влечет за собой общую изгибную деформацию полотна.

Таким образом, для проведения моделирования была разработана схема инструмента для посадки, показанная на рис. 10, а. Модель упрощалась путем создания оболочечных объектов по срединным поверхностям [15]. На основе предложенной схемы была создана конечно-элементная сетка нажимных элементов инструмента для посадки (рис. 10, б) в среде ANSYS LS-Dyna.



Рис. 5. Крафт-формер Eckold KF 675 (а), схема посадки ребер инструментом Eckold (б)  
 Fig. 5. Eckold KF 675 Kraftformer (a), a diagram of fitting ribs with the Eckold tool (б)

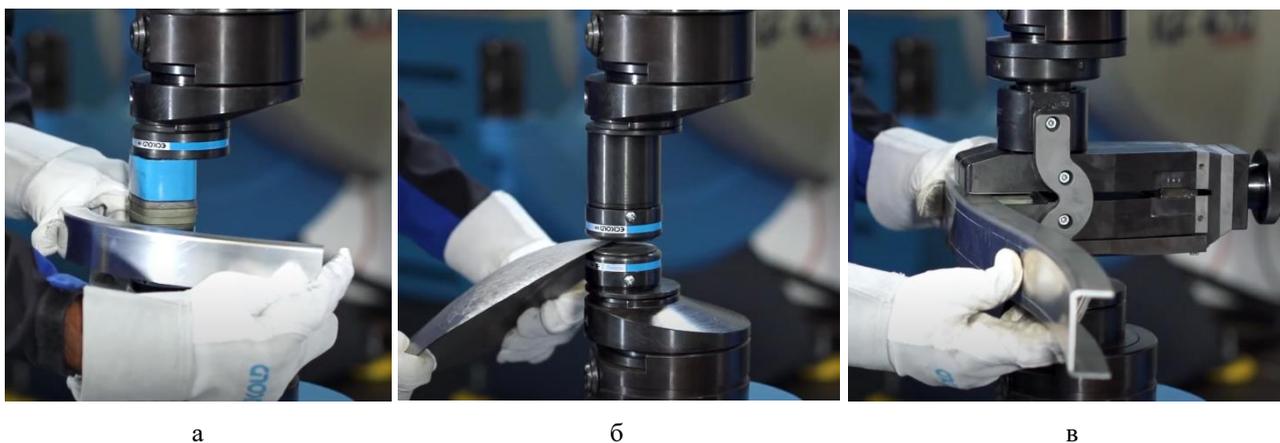


Рис. 6. Обработка уголков и тавров (а), оболочек (б), швеллеров (в) на Eckold KF 675  
 Fig. 6. Processing of corners and tees (a), shells (б), channels (в) on Eckold KF 675

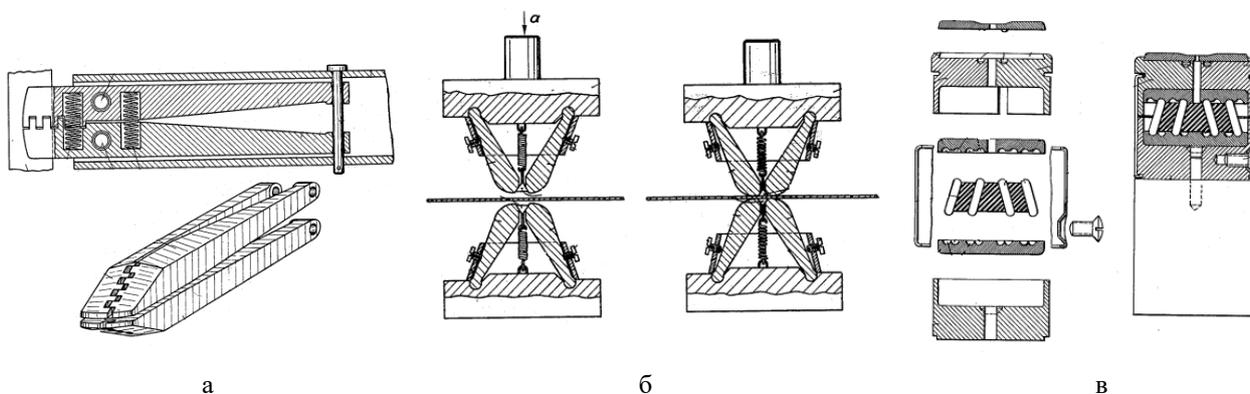


Рис. 7. Инструмент для правки или растяжки листового металла (а) [12], инструмент для формообразования листового металла (б) [13], инструмент для формообразования листового металла или профилей (в) [14]  
 Fig. 7. A tool for leveling or stretching sheet metal (a) [12] (a); a tool for changing the shape of sheet metal (б) [13]; a tool for changing the shape of sheet metal or sections (в) [14]

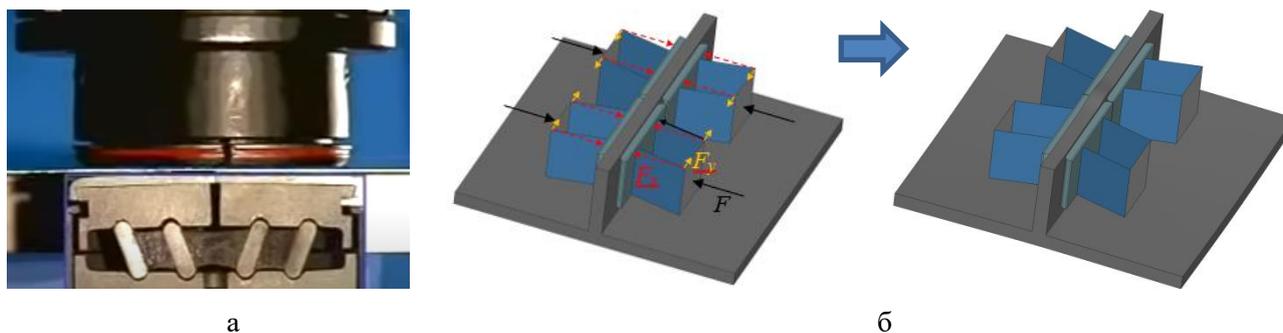


Рис. 8. Схема нагружения, применяемая для построения модели и компоненты нагрузки  $F$  при реализации операции посадки

Fig. 8. The loading diagram used to build the model and load component  $F$  during the fitting operation

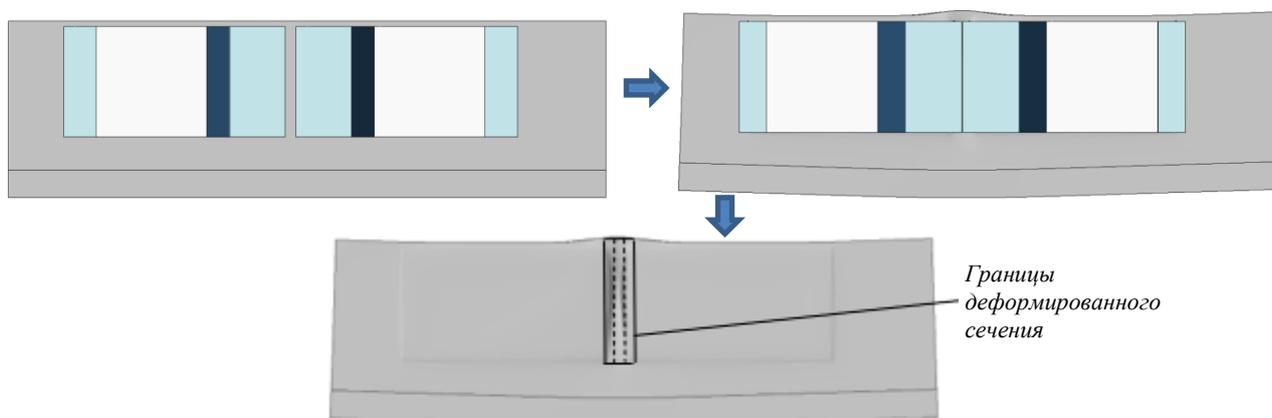


Рис. 9. Деформация сжатия участка детали при обработке методом посадки

Fig. 9. Deformation of compression of a section of a part during fitting

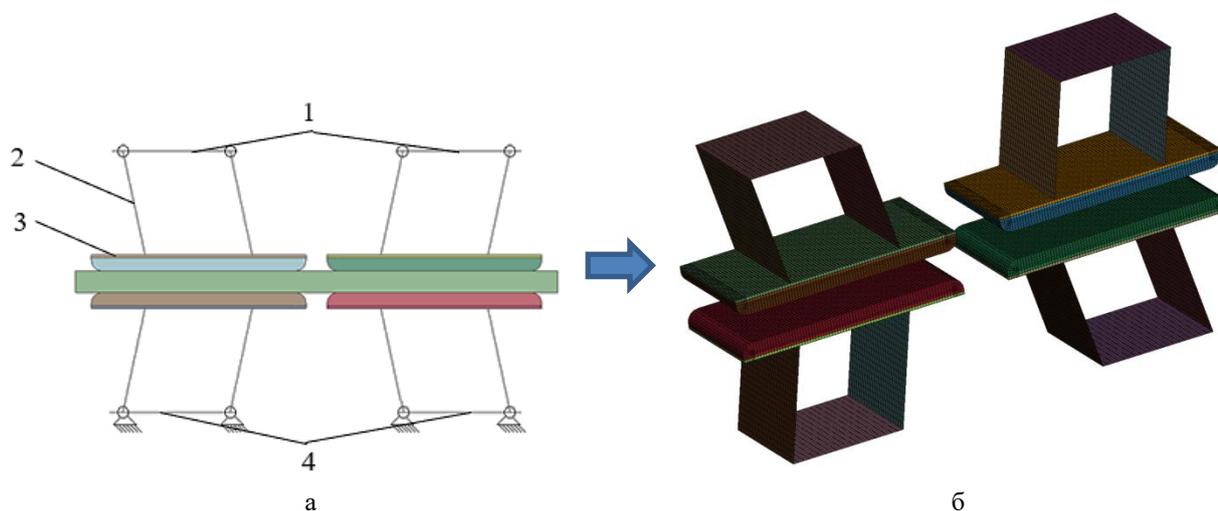


Рис. 10. Общий вид модели нажимных элементов инструмента для посадки (а) и конечно-элементная модель (б): 1 – нажимные элементы; 2 – клиновые элементы; 3 – контактные накладки; 4 – опоры

Fig. 10. General view of the model of the pressing elements of the tool for fitting (a) and the finite element model (б): 1 is pressing elements; 2 is wedge elements; 3 is contact pads; 4 is supports

Параметрирование модели выполнялось в следующей последовательности [16-18]:

- создание упругопластической модели материала для обрабатываемой детали и абсолютно упругой модели для контактных накладок;
- создание контактов между контактными накладками и обрабатываемой деталью типа «поверхность – поверхность» (surface to surface) с указанием параметров трения, определяемых экспериментально;
- создание демпфирования;
- создание нагружения. Нагружение осуществлялось путем задания перемещений нажимных элементов с последующей разгрузкой;
- создание параметров расчета, то есть настройка решателя в явной постановке задачи динамики.

Параметрирование модели материала В95пчТ2 для обрабатываемой детали: RO – массовая плотность – 2850 кг/м<sup>3</sup>; E – модуль упругости – 0,74·10<sup>5</sup> МПа; PR – коэффициент Пуассона – 0,33; SIGY – Предел текучести – 457 МПа.

Параметрирование модели материала Д19 для обрабатываемой детали: RO – массовая плотность – 2760 кг/м<sup>3</sup>; E – Модуль упругости – 0,7·10<sup>5</sup> МПа; PR – коэффициент Пуассона – 0,33; SIGY – предел текучести – 300 МПа.

В качестве допущения модель контактных накладок была определена как абсолютно упругая.

В ходе экспериментальных испытаний был определен коэффициент трения между контактными накладками и обрабатываемой деталью  $F_s = 0,5$ .

Нажимное усилие прикладывается на нажимную пластину размерами 20×73 мм и размерами элементов

1×0,5 мм. К каждому узлу данной пластины прикладываются силы, сумма которых эквивалентна усилию величиной в 25 т. График приложения нагрузки показан на рис. 11.

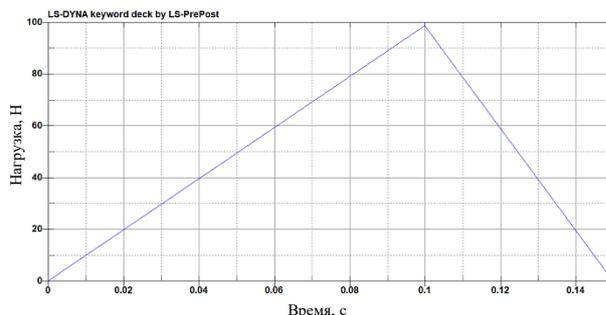


Рис. 11. График приложения нагрузки  
Fig. 11. Loading chart

Размерные параметры элементарного образца, мм:

- ширина полотна  $A = 200$ ;
- толщина полотна  $H = 2$ ;
- длина полотна  $L = 90$ ;
- высота ребра  $B = 38$ ;
- толщина ребра  $h = 5$ .

С использованием приведенной расчетной модели была выполнена симуляция единичного хода нагружения деформируемой детали при помощи нажимных элементов инструмента для посадки (рис. 12) для пяти пластин с разными толщинами ребер – 2,5, 3, 3,5, 4, 5 мм и двух материалов В95пчТ2, Д19Т и были измерены относительные сужения деформированной области после разгрузки (рис. 13).

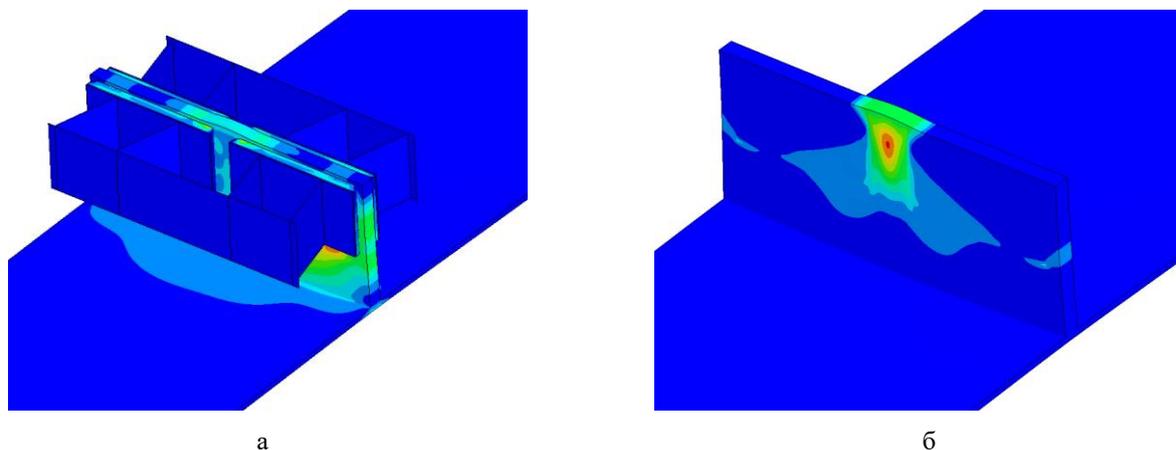
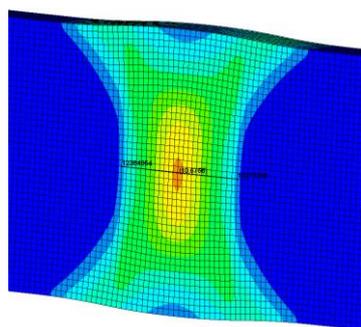
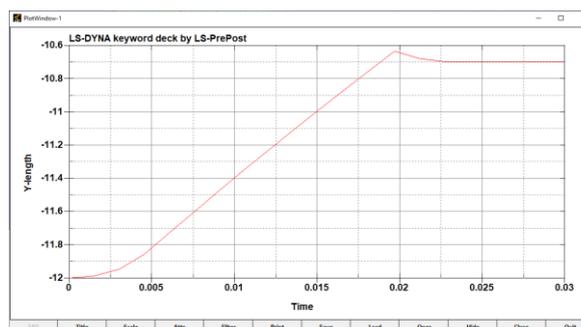


Рис. 12. Результаты моделирования в виде распределений интенсивности напряжений по Мизесу для участков деталей типа тавра (а) и местных пластических деформаций (б)

Fig. 12. Simulation results as the von Mises stress intensity distributions for sections of tee-type parts (a) and local plastic deformations (б)



а



б

Рис. 13. Измерение сужения по границам области остаточных пластических деформаций (а) и график расстояния между измеряемыми узлами (б)

Fig. 13. Measurement of narrowing along the boundaries of the area of residual plastic deformations (a) and a graph of the distance between the measured nodes (б)

### Анализ результатов моделирования

По результатам работы можно сформулировать следующие положения:

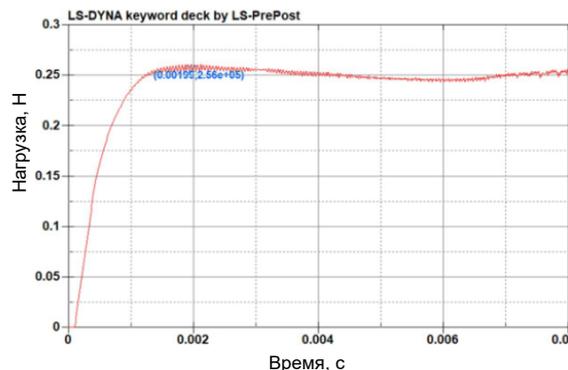
- размеры конечных элементов детали, обеспечивающих оптимальное соотношение времени расчетов и адекватности картины остаточного напряженно-деформированного состояния детали, составляют  $0,5-0,7 \text{ мм}^3$ ;
- расчетная величина нагрузки на нажимные элементы при обработке детали с толщиной ребра 5 мм достигают 25 т, что подтверждается данными диссертационного исследования [9] (рис. 14);
- одного локального воздействия недостаточно для получения значимой компоненты кривизны на конструктивном элементе детали [19]. Поэтому требуется применять итерационную обработку участка детали [20].

### Заключение

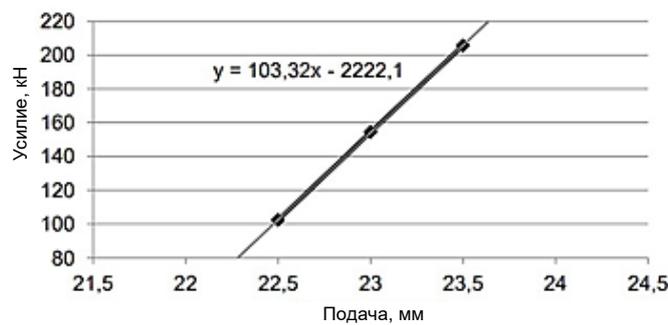
В современном мире важность совершенствования методов расчета режимных параметров обработки металлов становится все более актуальной. В данной работе исследуется метод локального пластического деформирования на основе конечно-элементного моде-

лирования процесса посадки ребер крупногабаритных панелей. Разработанная в среде конечно-элементного моделирования и анализа ANSYS LS-Dyna модель процесса посадки позволяет оценить напряженно-деформированное состояние и силовые параметры нагружения локального участка детали.

Новизна исследования заключается в разработке концепции и методики моделирования формообразования монолитно-фрезерованных панелей методом посадки. Полученные данные позволят более тонко изучить процесс посадки, что в перспективе даёт возможность прогнозировать и управлять напряженно-деформированным состоянием деталей для достижения максимальной производительности и точности процесса. Выполненная работа является отправной точкой для комплексного исследования процесса посадки ребер, включающего исследование контактных взаимодействий детали и инструмента, конструктивных особенностей инструмента, разработки методик инкрементального нагружения. Для полноценного анализа требуется дальнейшее исследование, которое позволит углубить понимание процесса и повысить эффективность методик.



а



б

Рис. 14. Величина нагрузки при обработке детали с толщиной ребра 5 мм (а) и результаты моделирования [9] в виде зависимости усилия от подачи величины хода нажимного элемента (б)

Fig. 14. Structural load when processing a part with a rib thickness of 5 mm (a) and simulation results [9] as a relation between force and the feed of the stroke of the pressing element (б)

Список источников

1. Разработка методики анализа геометрических параметров длинномерных панелей / Пашков А.Е., Пашков А.А., Фалеев С.Ю., Самойленко О.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 102-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113>
2. Hamouche E., Loukaides E.G. Classification and selection of sheet forming processes with machine learning // *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 2018, vol. 31, no. 9, pp. 921-932. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1429668>
3. Макарук А.А., Минаев Н.В. Повышение эффективности формообразования и правки мало жестких подкрепленных ребрами деталей раскаткой роликами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №12(107). С. 63-70.
4. Определение внутренних силовых факторов, возникающих при упрочнении подкрепленных ребрами деталей / Макарук А.А., Пашков А.А., Хамаганов А.М., Самойленко О.В. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. №10(141). С. 29-37. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-29-37. EDN: QKKZCJ.
5. Минаев Н.В. К созданию предсказательной модели процесса формообразования и правки подкрепленных панелей раскаткой роликами // Современные авиационные технологии. 2023. С. 15-25.
6. Баушев В.Н., Львин Я.Б., Кушнаренко С.Г. Расчет параметров технологического процесса формообразования монолитных ребристых панелей отрицательной гауссовой кривизны больших прогибов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1985. С. 123-133.
7. Сикульский В.Т., Кашеева В.Ю., Сикульский С.В. Методика расчета осесимметричного формоизменения монолитных ребристых панелей двойной кривизны с жесткими ребрами последовательным деформированием // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2016. №74. С. 78-87.
8. Сикульский В.Т., Сикульский С.В. Моделирование процесса формообразования монолитных панелей локальным деформированием ребер // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2018. №80. С. 63-70.
9. Hoffmann H., Hautmann R., & Petry R. Studies for the Development of a Simulation Basis for Numerically Controlled Driving of Sheet Metal // *Advanced Materials Research.* (2005). no. 6-8, pp. 517-524. <https://doi:10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.517>
10. From art to part: Learning from the traditional smith in developing flexible sheet metal forming processes / Daniel T. Bowen, Iacopo M. Russo, Christopher J. Cleaver, Julian M. Allwood, Evripides G. Loukaides // *Journal of Materials Processing Technology.* January 2022, vol. 299, 117337.
11. Универсальные станки для холодного формования листового металла и профилей без стружки: холодная обработка листов и профилей ECKOLD Kraftformer KF 675: Каталог. Германия, 10.06.2023. 28 с.
12. Пат. 1,809,168, Германия. Tool for upsetting or stretching sheet metal / Н. Junkers; заявл. 12.12.1929, Serial No. 413,604; опублик. 09.06.1931.
13. Пат. 2,010,996, Германия. Tool for producing a change of form in sheet metal / Н. Junkers; заявл. 24.09.1932, Serial No. 634,737; опублик. 13.08.1935.
14. Пат. 2,798,388, Германия. Apparatus for deforming, especially upsetting or stretching, sheets or profiles / W. Eckold; заявл. 12.05.1954, Serial No. 452,195; опублик. 09.07.1957.
15. Shell Models with Enhanced Kinematics for Finite Elements in Sheet Metal Forming Simulations / Tobias Willmann, Manfred Bischoff // *The 12th European LS-DYNA Conference At: Koblenz. Germany, 2019.*
16. Numerical modelling and deformation mechanics of the english wheel process / Bowen D.T., Music O., Shokrani A., Loukaides E.G. // *The 13th International Conference On the Technology of Plasticity, Ohio State University, 2021.*
17. Oliveira M.C., & Fernandes J.V. Modelling and Simulation of Sheet Metal Forming Processes // *Metals.* 2019, vol. 9, no. 12, 1356. <https://doi.org/10.3390/met9121356>
18. Cherouat A., Borouchaki H., & Jie Z. Simulation of Sheet Metal Forming Processes Using a Fully Rheological-Damage Constitutive Model Coupling and a Specific 3D Remeshing Method // *Metals.* 2018, vol. 8, no. 12, 991. <https://doi.org/10.3390/met8120991>
19. Gatea S., Ou H., McCartney G. Review On the influence of process parameters in incremental sheet forming // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, vol. 87, no. 1-4, pp. 479-499. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8426-6>
20. Gohil A., Modi B. Review of the effect of process parameters on performance measures in the incremental sheet forming process // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: Eng. Manuf.* 2021, vol. 235, no. 3, pp. 303-332. <https://doi.org/10.1177/0954405420961215>

References

1. Pashkov A.E., Pashkov A.A., Faleev S.Yu., Samoilenko O.V. Development of a methodology for analyzing geometric parameters of long panels. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(2):102-113. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113>
2. Hamouche E., Loukaides E.G. Classification and selection of sheet forming processes with machine learning. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 2018;31(9):921-932. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1429668>
3. Makaruk A.A., Minaev N.V. Increasing efficiency of shaping and straightening low-rigid parts reinforced with ribs by rolling with rollers. *Vestnik Irkutskogo*

- gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2015;(12(107)):63-70. (In Russ.)
4. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Khamaganov A.M., Samoilenko O.V. Determination of internal force factors arising during hardening of parts reinforced with ribs. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2018;22(10(141)):29-37. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-29-37. EDN: QKKZCJ.
  5. Minaev N.V. Towards the creation of a predictive model of the process of shaping and straightening reinforced panels by rolling with rollers. *Sovremennye aviatsionnye tekhnologii. International Conference on Aviation Engineering: Materialy XVI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern Aviation Technologies. International Conference on Aviation Engineering: Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2023, pp. 15-25. (In Russ.)
  6. Baushev V.N., Lvin Ya.B., Kushnarenko S.G. Calculation of the parameters of the technological process of forming monolithic ribbed panels of negative Gaussian curvature of high deflection. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksiy letatelnykh apparatov: temat. sb. nauch. tr.* [Issues of designing and manufacturing of aircraft structures]. Kharkiv: Kharkiv Aviation Institute, 1985, pp.123-133. (In Russ.)
  7. Sikulsky V.T., Kashcheeva V.Yu., Sikulsky S.V. Methodology for calculating the axisymmetric shape change of monolithic ribbed panels of double curvature with rigid ribs by sequential deformation. *Otkrytye informatsionnye i kompyuternye integrirovannye tekhnologii* [Open Information and Computer Integrated Technologies]. 2016;(74):78-87. (In Russ.)
  8. Sikulsky V.T., Sikulsky S.V. Modeling of the process of shaping monolithic panels by local deformation of the ribs. *Otkrytye informatsionnye i kompyuternye integrirovannye tekhnologii* [Open Information and Computer Integrated Technologies]. 2018;(80):63-70. (In Russ.)
  9. Hoffmann H., Hautmann R., Petry R. Studies for the development of a simulation basis for numerically controlled driving of sheet metal. *Advanced Materials Research*. 2005;(6-8):517-524. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.517>
  10. Daniel T. Bowen, Iacopo M. Russo, Christopher J. Cleaver, Julian M. Allwood, Evripides G. Loukaides. From art to part: Learning from the traditional smith in developing flexible sheet metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022;299:117337.
  11. Universal machines for cold forming of sheet metal and sections without chips: Cold processing of sheets and sections. ECKOLD Kraftformer KF 675: Catalog. Germany, 10.06.2023, 28 p.
  12. Junkers H. Tool for upsetting or stretching sheet metal. Patent Germany, no. 1,809,168, 1931.
  13. Junkers H. Tool for producing a change of form in sheet metal. Patent Germany, no. 2,010,996, 1935.
  14. Eckold W. Apparatus for deforming, especially upsetting or stretching, sheets or profiles. Patent Germany, no. 2,798,388, 1957.
  15. Tobias Willmann, Manfred Bischoff. Shell models with enhanced kinematics for finite elements in sheet metal forming simulations. The 12th European LS-DYNA Conference. Koblenz, Germany, 2019.
  16. Bowen D.T., Music O., Shokrani A., Loukaides E.G. Numerical modelling and deformation mechanics of the English wheel process. The 13th International Conference on the Technology of Plasticity. Ohio State University, 2021.
  17. Oliveira M.C., Fernandes J. V. Modelling and simulation of sheet metal forming processes. *Metals*. 2019;9(12):1356. <https://doi.org/10.3390/met9121356>
  18. Cherouat A., Borouchaki H., Jie Z. Simulation of sheet metal forming processes using a fully rheological-damage constitutive model coupling and a specific 3D remeshing method. *Metals*. 2018;8(12):991. <https://doi.org/10.3390/met8120991>
  19. Gatea S., Ou H., McCartney G. Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016;87(1-4):479-499. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8426-6>
  20. Gohil A., Modi B. Review of the effect of process parameters on performance measures in the incremental sheet forming process. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: Eng. Manuf.* 2021;235(3):303-332. <https://doi.org/10.1177/0954405420961215>

Поступила 12.01.2024; принята к публикации 08.02.2024; опубликована 27.06.2024  
Submitted 12/01/2024; revised 08/02/2024; published 27/06/2024

**Пашков Андрей Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: pashkov@istu.edu.

**Пашков Александр Андреевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: pashk0ff@mail.ru.

**Исаченко Алексей Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: isachenkoas@ex.istu.edu.

**Дук Андрей Александрович** – научный сотрудник, кафедра технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: dukaa@ex.istu.edu.

**Рыбак Антон Михайлович** – научный сотрудник, кафедра технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: antoxa.rybak.bik@gmail.com.

**Andrei E. Pashkov** – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: pashkov@istu.edu.

**Aleksandr A. Pashkov** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: pashkOff@mail.ru.

**Aleksei S. Isachenko** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: isachenkoas@ex.istu.edu.

**Andrei A. Duk** – Researcher, Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: dukaa@ex.istu.edu.

**Anton M. Rybak** – Researcher, Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: antoxa.rybak.bik@gmail.com.