

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.98.042

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛИННОМЕРНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Пашков А.Е., Пашков А.А., Фалеев С.Ю., Самойленко О.В.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Актуальность. Формообразование длинномерных панелей является одним из наиболее сложных технологических процессов в самолётостроении. Традиционным подходом к формообразованию является использование методов прессовой гибки в сочетании с обработкой аэродинамической поверхности дробью. Альтернативным подходом является использование технологии комбинированного формообразования, разрабатываемой ИрНИТУ, в которой результирующая форма образуется в результате суперпозиции линейчатой поверхности, формируемой путём деформирования рёбер раскаткой роликами или посадкой, и поверхности двойной кривизны, получаемой при обработке дробью аэродинамической поверхности детали. На сегодняшний день технология комбинированного формообразования апробирована в производстве. Имеется специальное оборудование и методики расчёта режимных параметров процесса. Однако для перехода на программный режим управления необходимо решить ряд вопросов, связанных с назначением режимных параметров процесса обработки дробью с учетом конструктивных особенностей детали. Цель работы. Повышение точности расчета режимных параметров процесса обработки дробью в комбинированном технологическом процессе формообразования длинномерных панелей на основе анализа их геометрических параметров. Используемые методы. Использовано автоматизированное программирование в процессе трехмерного моделирования крупногабаритных деталей сложной формы. Новизна. Предложена методика автоматизированного определения геометрических параметров длинномерных панелей для расчета режимных параметров процесса комбинированного формообразования детали. Результаты. Разработана методика автоматизированного анализа геометрических параметров детали, создано программное обеспечение, позволяющее определять момент инерции, толщину эквивалентного прямоугольного сечения и радиус кривизны поверхности участков детали, представляющие исходные данные для расчета режимов обработки. Практическая значимость. Разработанная методика позволяет повысить точность и снизить трудоёмкость расчета режимных параметров формообразования деталей панелей самолётов и решить комплекс задач, направленных на повышение эффективности производства длинномерных панелей.

Ключевые слова: дробеударное формообразование, двойная кривизна, средства автоматизации, моделирование, программный интерфейс, измерение формы

© Пашков А.Е., Пашков А.А., Фалеев С.Ю., Самойленко О.В., 2023

Для цитирования

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>



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

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR ANALYZING GEOMETRIC PARAMETERS OF LONG AIRCRAFT PANELS

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Faleev S.Yu., Samoylenko O.V.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Relevance. Forming of long panels is one of the most complex technological processes in aircraft manufacturing. A conventional approach to forming involves press bending methods in combination with shot peening of aerodynamic surfaces. An alternative approach is the use of combined forming technology developed by Irkutsk National Research Technical University, when the resulting shape is generated by superimposing a ruled surface, formed by deforming the edges with rollers or pressing, and a double curved surface formed by shot peening of the aerodynamic surface of a part. To date, the combined forming technology has been tested in production. There is special equipment and methodologies for calculating the process parameters. However, to transfer to a program control mode, we should solve several issues related to assigning the shot peening process parameters, taking into account the design features of the part. **Objective.** To improve accuracy of calculating the shot peening process parameters in the combined technological process of forming long panels based on the analysis of their geometric parameters. **Methods Applied.** Automated programming was applied in the three-dimensional modeling of large-sized parts with complex shapes. **Originality.** A methodology for the automated calculation of geometric parameters for long panels was proposed to calculate the process parameters for combined forming of parts. **Results.** The authors developed the methodology for an automated analysis of geometric parameters of parts; created software to calculate the moment of inertia, equivalent rectangular section thickness, and radius of curvature of the surface of the part sections, representing the initial data for calculating the processing modes. **Practical Relevance.** The developed methodology ensures improved accuracy and reduced labor intensity of calculating the process parameters for forming the aircraft panel parts and solves a set of tasks aimed at increasing efficiency of manufacturing the long panels.

Keywords: shot peening forming, double curvature, automation tools, modeling, software interface, shape measurement

For citation

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Faleev S.Yu., Samoylenko O.V. Development of a Methodology for Analyzing Geometric Parameters of Long Aircraft Panels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 102-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113>

Введение

Длинномерные панели самолётов могут иметь габаритные размеры – до 30 м в длину и 3 м в ширину (**рис. 1**). Форма деталей представляет сочетание линейчатых поверхностей с участками двойной кривизны [1].

Конструктивными элементами панелей являются продольные и поперечные рёбра разной конфигурации, карманы, образуемые их пересечением, местные утолщения полотна, окантовки люков и т.д. [2, 3].

Традиционным подходом к формообразованию является использование методов прессовой гибки в сочетании с обработкой аэродинамической поверхности дробью. Свободная гибка на прессах является одним из наиболее универсальных методов формообразования. Эта технология применяется как самостоятельный процесс формообразования деталей одинарной кривизны, для правки заготовок, а также для подгибки мест усиливий перед дробеударным формообразованием (ДУФ) [4]. После гибки на прессе детали имеют такой дефект формы, как огранка [5]. Однако для участков пан-

лей, как стык крыла и центроплана с толщиной 30 мм и более, прессовый метод является единственно возможным. В то же время для него характерны отсутствие стабильности, большая трудоемкость и потребность в высокой квалификации персонала.

Альтернативным подходом является использование технологии комбинированного формообразования, разрабатываемой ИрНИТУ, в которой результирующая форма образуется в результате суперпозиции линейчатой поверхности, формируемой путём деформирования рёбер раскаткой роликами или посадкой, и поверхности двойной кривизны, получаемой при обработке дробью аэродинамической поверхности детали.

На **рис. 2** представлена схема процесса комбинированного формообразования со следующими обозначениями: R_{pac} – радиус продольной кривизны, полученный в результате раскатки ребер; $R_{\text{ДУФ}x}$ – радиус поперечной кривизны, получаемый на этапе дробеударного формообразования; $R_{\text{пос}}$ – радиус поперечной кривизны, формируемый методом посадки ребер; $R_{y \text{ теор}}$ – радиус теоретической продольной кривизны детали; $R_{x \text{ теор}}$ – радиус теоретической поперечной кривизны.

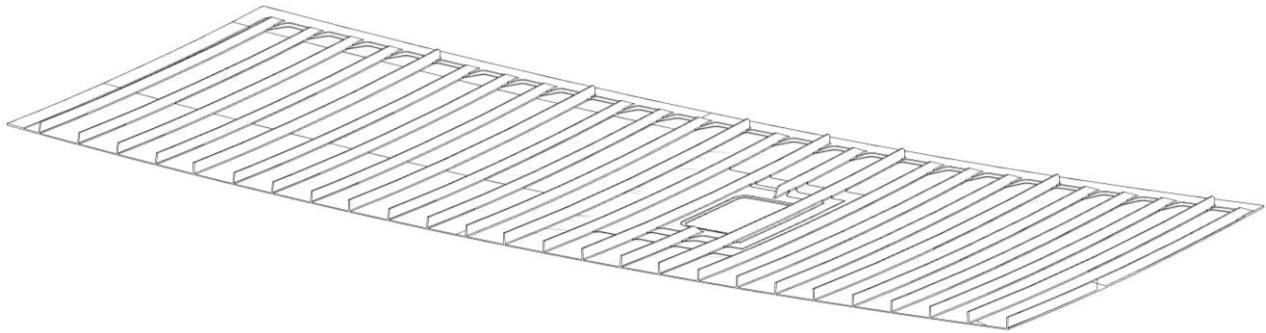


Рис. 1. Трехмерная модель типовой панели
Fig. 1. A three-dimensional model of a typical panel

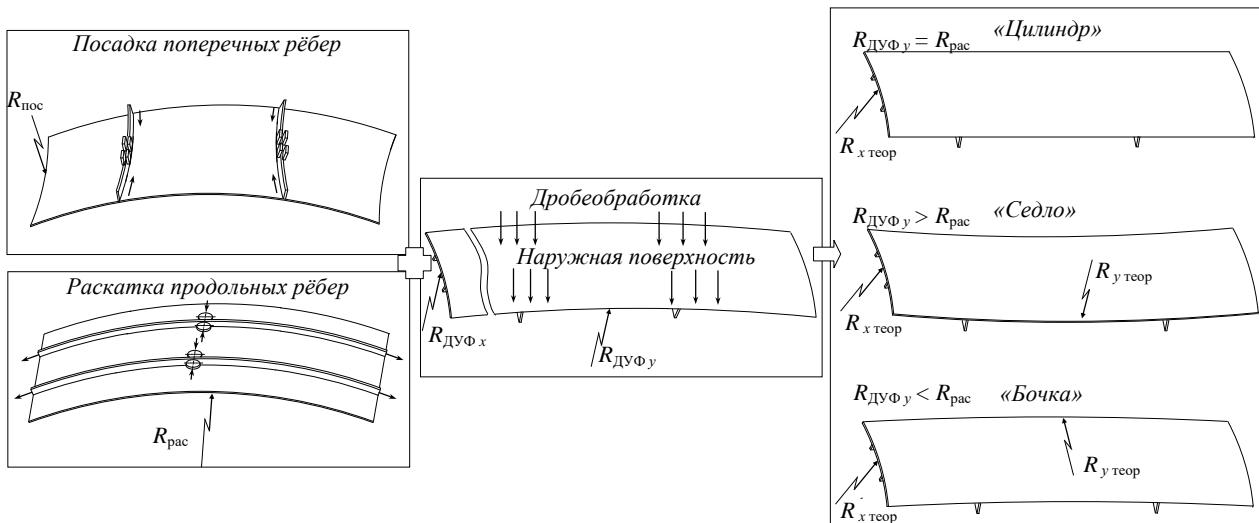


Рис. 2. Схема комбинированного формообразования панелей
Fig. 2. The scheme of combined forming of the panels

Для реализации данной технологии в ИрНИИ ТУ был разработан комплекс технологического оборудования, который включает в себя установку для раскатки ребер роликами, установку для дробеударного формообразования контактного типа [6], ведутся работы по созданию инструмента для посадки ребер панелей. Схема обработки на установке контактного типа приведена на рис. 3: деталь 1 закрепляется в неподвижной системе фиксации деталей, обеспечивающей позиционирование стоек 2 в зависимости от пространственной формы детали; дробеметный аппарат 3 прижимается к обрабатываемой поверхности при помощи сменных эластичных уплотнений и перемещается по координатам X, Y, Z, образуя на поверхности детали полосы от обработки дробью 4 различной высоты.

Также можно отметить, что для дробеударного формообразования существуют установки проходного типа отечественной разработки, в

которых деталь, закрепленная в траверсе, перемещается через неподвижную камеру, оснащенную дробеметными аппаратами и (или) роботизированными ячейками с дробеструйными соплами (рис. 4).

Режимными параметрами процесса обработки дробью является частота вращения дробеметного аппарата (или давление в пневмосистеме и ориентация сопла для случая обработки дробеструйным методом) и время обработки, а также фракция дроби [7].

Входными параметрами для расчета режимных параметров являются геометрические параметры обрабатываемых деталей, а именно:

- требуемая кривизна κ_j , определяемая с учетом исходных отклонений формы детали;
- момент инерции сечения J_j ;
- приведенная толщина детали $H_{\text{прj}}$, определяемая с учетом жесткости ее сечения.

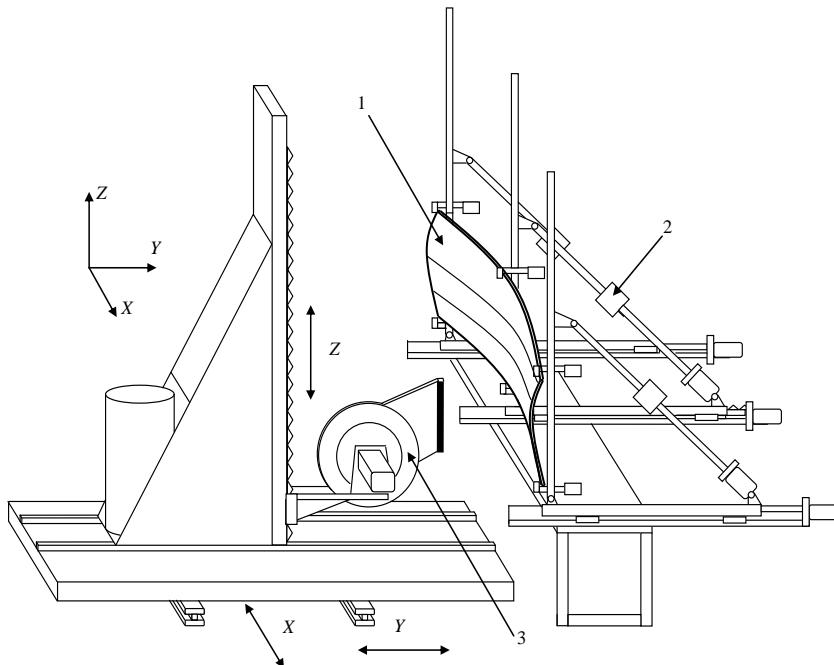


Рис. 3. Схема дробеударного формообразования деталей на установке серии УДФ разработки ИрНИТУ

Fig. 3. The scheme of shot peening forming of the parts on the UDF series installation developed by Irkutsk National Research Technical University

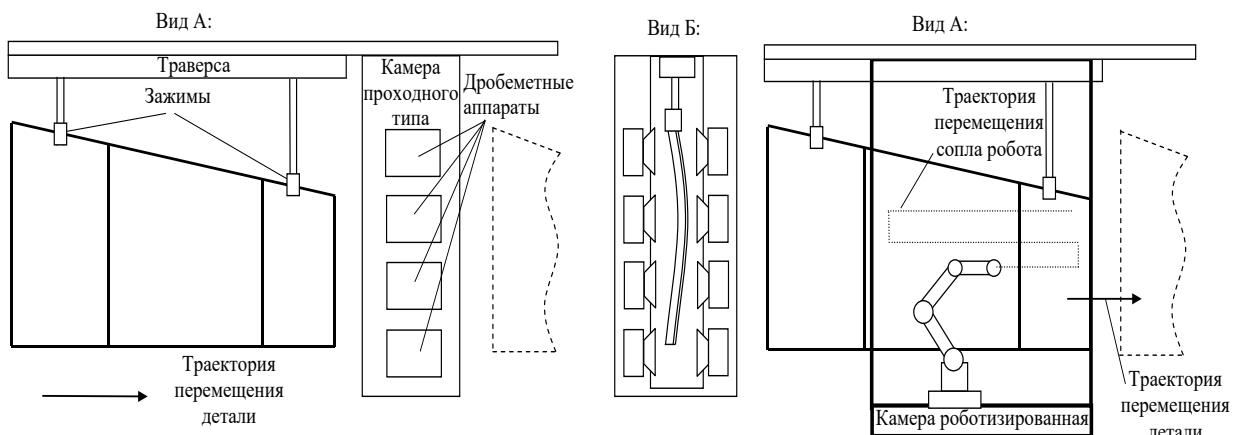


Рис. 4. Схема дробеударного формообразования деталей на установках проходного типа:

а – обработка дробеметными аппаратами; б – обработка при помощи роботизированных ячеек с дробеструйными соплами

Fig. 4. The scheme of shot peening forming of the parts on through-type installations: a is forming with shot peening machines; b is forming using robotic cells with shot blasting nozzles

Ввиду того, что геометрические параметры детали являются переменными от сечения к сечению детали, определение данных параметров вручную является долгим и трудоёмким процессом, требующим от технолога высокой концентрации и больших временных затрат. Решение данной проблемы лежит в использовании комплексной автоматизации получения режимных параметров обработки процесса ДУФ [8] с ис-

пользованием CAD-систем.

Расчет режимных параметров обработки начинается с анализа продольной и поперечной кривизны, момента инерции и приведенной толщины прямоугольного сечения детали. После получения этих входных данных возможно составить управляющую программу для обработки панели с заданной точностью [9]. Для анализа указанных параметров необходимо использовать со-

временные CAD-системы для получения быстро-го и качественного результата.

Создание методики анализа геометрии длинномерных панелей

Алгоритм анализа геометрии детали унифицирован в зависимости от типа детали с продольным или поперечным оребрением. Для корректного анализа необходимо разделять деталь на элементарные участки. Определение геометрических параметров длинномерных панелей выполняется в следующей последовательности:

1. Назначение локальной системы координат. Располагать систему координат необходимо в углу детали. Направление осей должно соответствовать правилам: ось X назначается вдоль нижней линейчатой образующей (от точки 1 к точке 2) – продольное направление, ось Y – от точки 1 к точке 3 – поперечное направление (рис. 5).

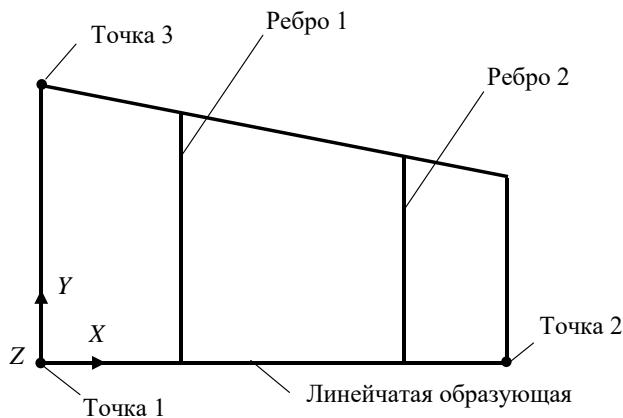


Рис. 5. Назначение системы координат
Fig. 5. Coordinate system assignment

2. Создание плоскости в межреберном пространстве детали для определения границы участка вдоль оси X (рис. 6).

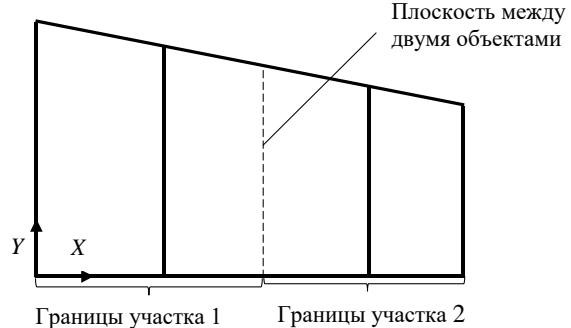


Рис. 6. Назначение границ элементарных участков в продольном направлении (вдоль оси X)
Fig. 6. Assignment of boundaries of elementary sections in the longitudinal direction (along the X -axis)

3. Разбиение детали на участки вдоль оси Y (рис. 7) путем перемещения плоскости XOZ вдоль направляющей, образованной перемещением срединной поверхности первого ребра и лицевой поверхности детали с шагом ΔY (применяе-мое обозначение i – номер участка по оси X , j – номер участка по оси Y).

4. Определение эквивалентного прямоуголь-ного сечения и его параметров (рис. 8, 9). Для элементарного участка определяются:
 - среднее значение приведенной толщины H_{ij}^x, H_{ij}^y ;
 - моменты инерции сечений J_{ij}^x, J_{ij}^y ;
 - расстояние от лицевой поверхности до центра тяжести сечения z_{ij}^x, z_{ij}^y ;
 - радиусы кривизны $R_{ij \text{ теор}}^x, R_{ij \text{ теор}}^y$.

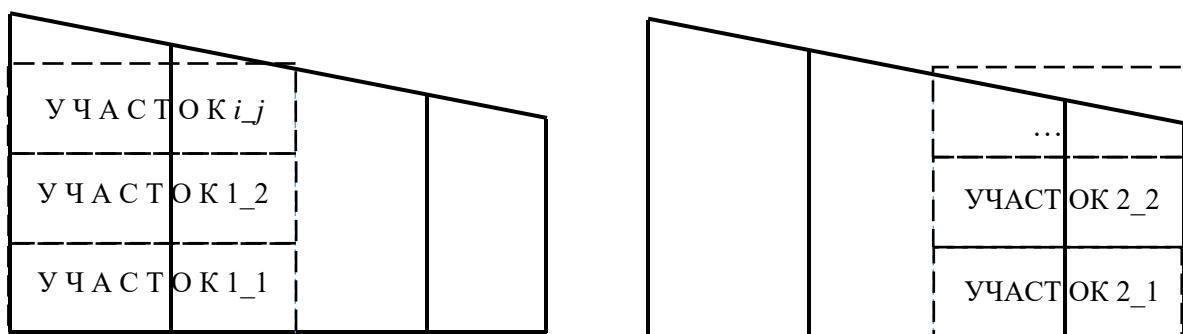


Рис. 7. Назначение границ элементарных участков в поперечном направлении (вдоль оси Y)
Fig. 7. Assignment of boundaries of elementary sections in the longitudinal direction (along the X -axis)

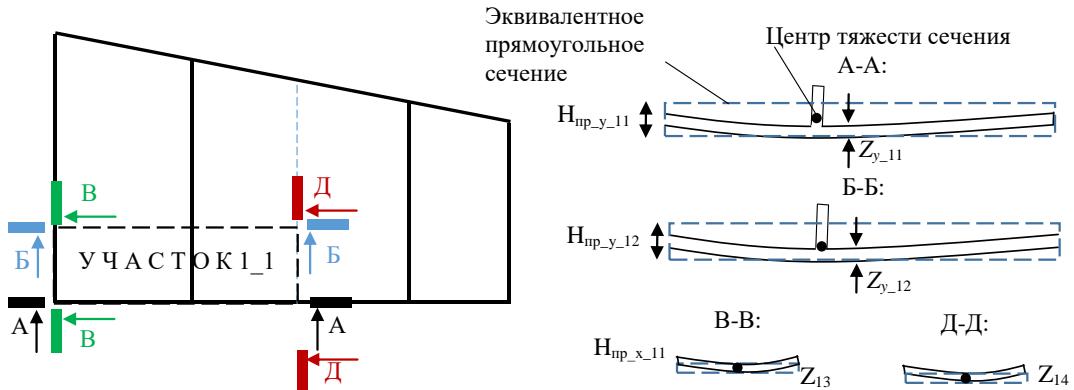


Рис. 8. Определение параметров сечений
Fig. 8. Determination of section parameters

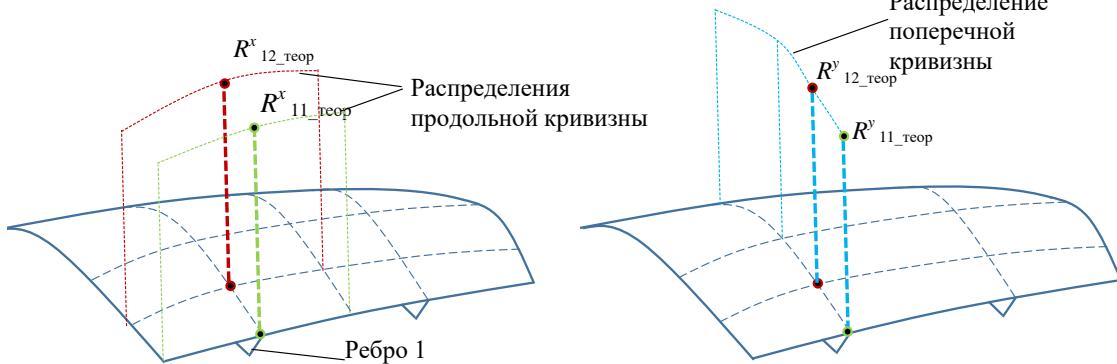


Рис. 9. Определение геометрических параметров участка
Fig. 9. Determination of geometric parameters of a section

В результате выполнения алгоритма будет получена готовая модель, разбитая на элементарные участки обработки со всей необходимой геометрией, которые необходимы для расчета процессов ДУФ. Имеющиеся детали являются крупногабаритными, а операции, выполняющиеся над моделями изделий, являются типовыми и повторяющимися. Данный процесс было решено автоматизировать, используя библиотеку расширений NxOpen. Необходимо сформировать выходной массив данных, который будет включать в себя геометрию детали, согласно вышеизложенной методике.

Разработка программного обеспечения для автоматизации процессов моделирования

Поскольку большинство авиационных предприятий для моделирования рассматриваемых деталей использует CAD-систему Siemens NX, для реализации предложенного алгоритма необходимо использовать NX Open API – набор инструментов и технологий, посредством которых внешнее приложение может получить доступ к возможностям CAD-системы.

Программное обеспечение должно решать такие задачи, как:

1. Автоматизация анализа геометрических параметров крупногабаритной детали сложной формы [10, 11].
2. Формирование выходного файла с полученными данными для дальнейшего расчета режимных параметров процесса обработки дробью.

Разработанная программа реализует следующие функции:

1. Отделение внутреннего набора детали от полотна. Операция разделения позволяет в автоматическом режиме определить количество ребер, а также срединную поверхность каждого ребра при помощи операции «Рассечение детали» (рис. 10).
2. Построение массива плоскостей перпендикулярно линии построения ребер вдоль кривой пересечения с поверхностью при помощи операции «Создание массива плоскостей в сопряженном с ребрами направлением» (рис. 11). Образующая кривая необходима для компенсации погрешности при построении массива вдоль полотна. Параметром, регулирующим ширину участка, будет значение шага массива [12].

3. Построение массива плоскостей параллельно линии построения ребер при помощи операции «Создание массива плоскостей в поперечном направлении ребер» выполняется в автоматическом режиме. Во время построения первого массива создается образующая кривая перпендикулярно выбранной плоскости. Необходимые ключевые параметры массива определяются в зависимости от положения и параметров ребер детали.

4. Разделение модели детали на элементарные участки в соответствии с построенными ранее плоскостями при помощи операции «Определение элементарных участков модели» (рис. 12) и определения параметров эквивалентного прямоугольного сечения (моменты инерции, центр тя-

жести, толщина сечения) в продольном и поперечном направлении для каждого элементарного участка.

5. Определение радиусов кривизны относительно осей X и Y с использованием операции «Определение радиуса кривизны детали в продольном и поперечном направлении» (рис. 13).

6. Формирование двух файлов – .xlsx и .csv. Файл excel в автоматическом режиме открывается после завершения работы API, что позволяет сразу же оценить полученные результаты геометрии детали любого из участков. Файл .csv необходим для загрузки геометрических параметров в программный модуль расчета режимных параметров процесса обработки дробью [13].

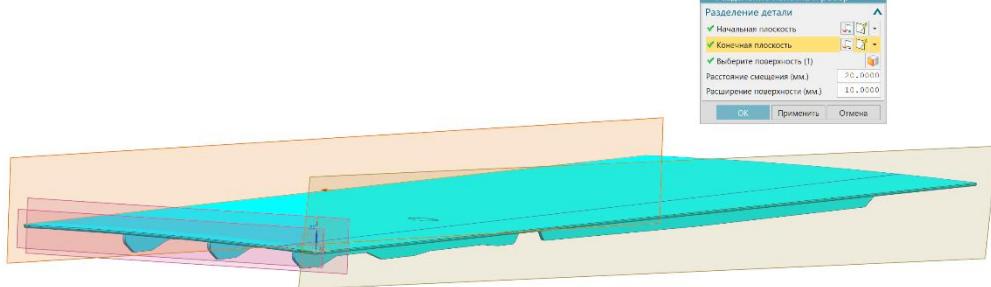


Рис. 10. Определение геометрических параметров участка
Fig. 10. Determination of geometric parameters of a section

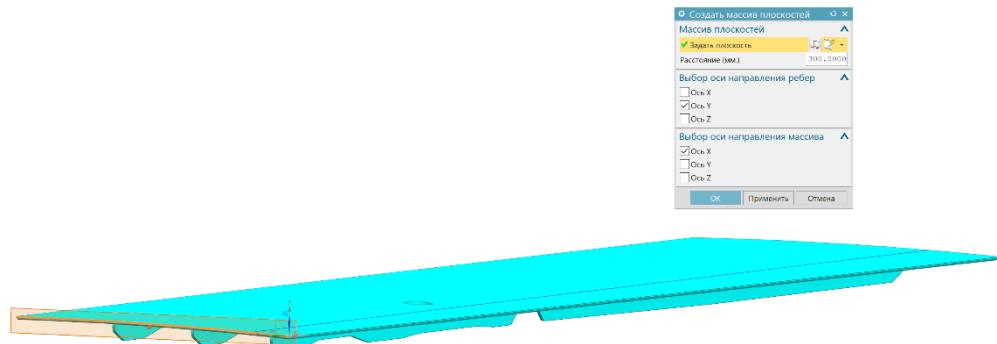


Рис. 11. Построение массива плоскостей перпендикулярно линии построения ребер
Fig. 11. Building an array of planes perpendicular to the edge construction line

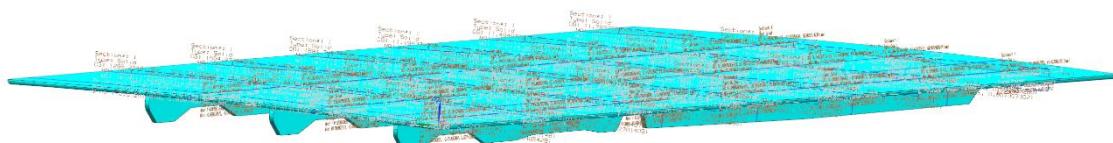


Рис. 12. Разделение модели детали на элементарные участки
Fig. 12. Dividing a model of the part into elementary sections

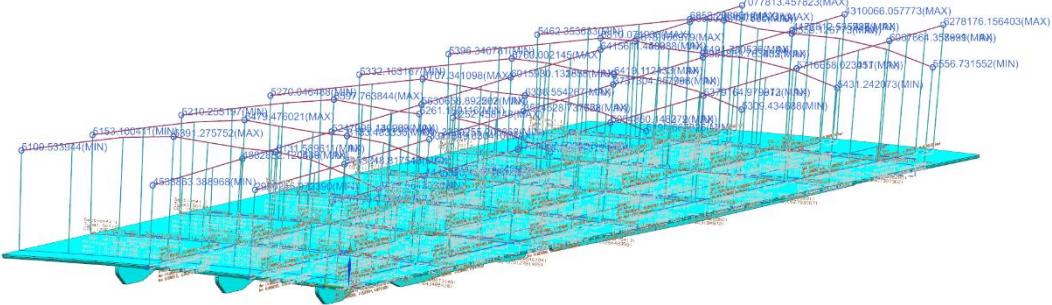


Рис. 13. Определение радиусов кривизны
Fig. 13. Determination of radii of curvature

Расчет режимных параметров процесса обработки дробью

Основные теоретические подходы к определению режимных параметров дробеударного формообразования изложены в трудах [14-16], в которых отмечается, что во время операции ДУФ возникает изгибающий момент $M_{\text{ДУФ}}$ в результате действия удельной силы $P_{\text{ДУФ}}$, определяемый по формуле

$$M_{\text{ДУФ}} = P_{\text{ДУФ}} \cdot H, \quad (1)$$

где $P_{\text{ДУФ}}$ – действие удельной силы, Н; H – расстояние плеча приложения силы, м.

Исходя из известных закономерностей теории упругости, изгибающий момент можно определить по формуле

$$M = \frac{\kappa}{E \cdot J_{ij}}, \quad (2)$$

где κ – кривизна сечения детали, м; E – модуль упругости, МПа; J_{ij} – момент инерции м⁴.

Таким образом, приравняв выражения (1) и (2), можно вывести зависимость для определения удельной растягивающей силы $P_{\text{ДУФ}}$, действующей на образец, для получения необходимой кривизны с учетом специфики процесса:

$$P_{c(k)}^a = \frac{E \cdot J_{ij} \left(\frac{1}{R_j} - \frac{k_{c-j}}{R_{\text{изм}-j}} \right)}{(H_j^{\text{пр}} - z_c)} k_t \cdot k_{\text{упр}} \cdot k_{\text{НДС}}, \quad (3)$$

где $P_{c(k)}^a$ – удельная растягивающая сила, Н; k_t – коэффициент соответствия теоретического

контура; $k_{\text{упр}}$ – коэффициент для учета поводок при упрочнении; $k_{\text{НДС}}$ – коэффициент вида напряженно-деформированного состояния; k_c – коэффициент искажения формы; J_{ij} – момент в инерции, м⁴; z_c – глубина залегания силы, м; $H_{ij}^{\text{пр}}$ – высота элементарного сечения детали, м; E – модуль упругости, МПа; R – кривизна детали, м; i – информация о сечении в продольном направлении; j – информация о сечении в поперечном направлении.

Коэффициент соответствия теоретического контура $k_t = 0,85 - 0,95$ используется для обеспечения определённой степени недогиба детали при программной реализации процесса формообразования и обеспечения возможности реализации доводочных операций при необходимости. Коэффициент $k_{\text{упр}}$, определяемый по результатам конечно-элементного моделирования процесса упрочнения детали, служит для учета возможного коробления детали при реализации финальной стадии обработки – поверхностном упрочнении. Коэффициент вида напряженно-деформированного состояния $k_{\text{НДС}} = 0,5 - 0,65$ служит для учета влияния жесткости сечений при двухосном изгибе. Коэффициент искажения формы k_c^x учитывает влияние собственного веса детали при измерении в вертикальном положении.

Верификация результатов расчета

Верификация результатов расчета проводилась с применением системы конечно-элементного анализа Ansys LS-Dyna следующим об-

разом: для типового участка детали по формуле (3) с учетом геометрических параметров детали была рассчитана удельная растягивающая сила, которую необходимо приложить к элементарному участку детали, представленному на **рис. 14.**, для получения необходимого радиуса кривизны.

Для задания изгибающих нагрузок использовались распределенные растягивающие силы на расстоянии от поверхности детали, что эквивалентно изгибу распределенными моментами (**рис. 15.**). Для корректного моделирования процесса обработки

было реализовано следящее перемещение распределенной силы, когда при изгибе детали вектор силы поворачивается и продолжает действовать по нормали к плоскости приложения.

Параметры прилагаемой нагрузки были определены по формуле (3). По результатам расчета для получения радиуса кривизны 5000 мм растягивающая сила составляет сила $P = 111,7$ Н. Результаты моделирования приведены на **рис. 16.**

Полученная кривизна детали составила 5089 мм, что говорит о достаточной точности расчетных закономерностей.

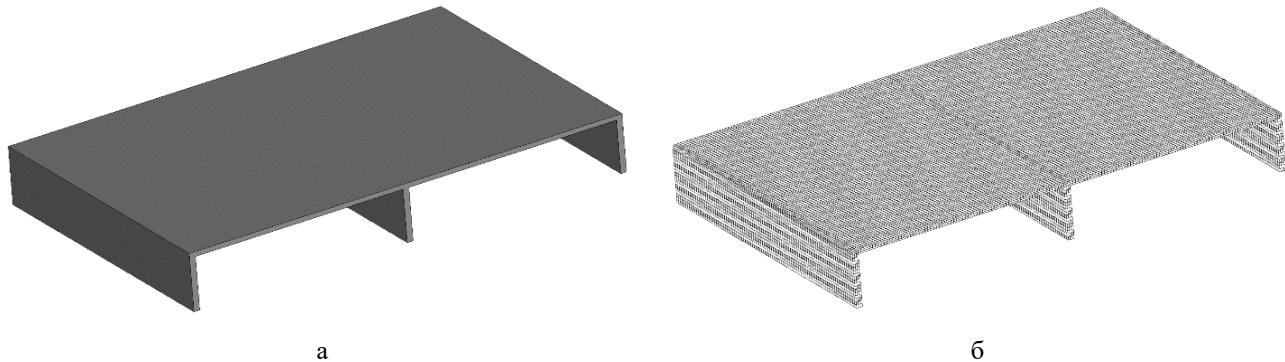


Рис. 14. Модель элементарного участка детали (а) и конечно-элементная сетка (б)
Fig. 14. The model of an elementary section of the part (a) and the finite element mesh (b)

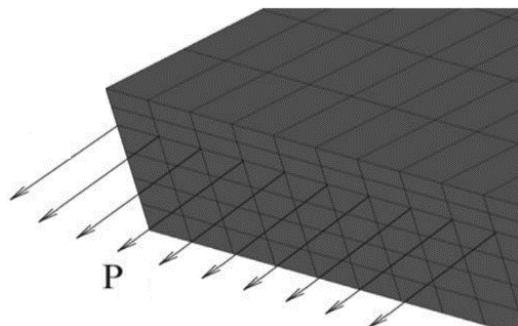


Рис. 15. Схема приложения распределенной силы для моделирования процесса обработки дробью
Fig. 15. The diagram of applying distributed force for simulating the shot peening process

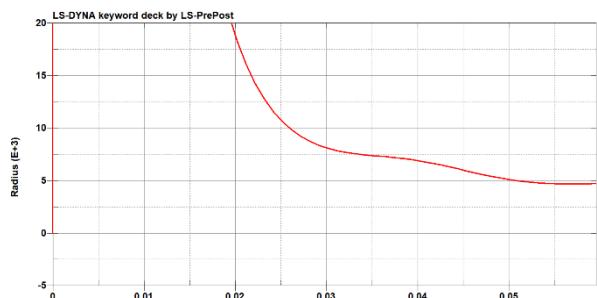
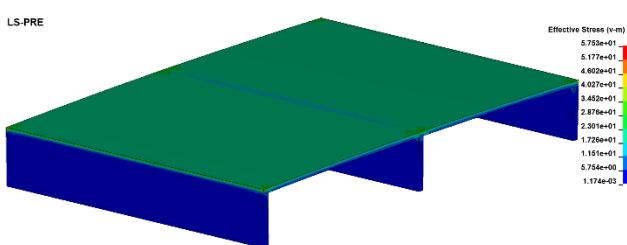


Рис. 16. Схема приложения распределенной силы для моделирования процесса обработки дробью
Fig. 16. The diagram of applying distributed force for simulating the shot peening process

Заключение

Разработанный алгоритм является унифицированным для деталей с продольным и поперечным оребрением. Полученный способ разбиения детали позволяет получить элементарные участки детали для подбора режимных параметров процесса обработки дробью, что в дальнейшем позволит произвести их объединение для получения полос обработки по схожим геометрическим параметрам. Данная операция позволит оптимизировать рабочие ходы дробеобрабатывающего оборудования, что положительно повлияет на производительность операции.

Разработанный автоматизированный метод расчета геометрических параметров детали, необходимый для операции дробеударного формообразования, дает возможность гибкой настройки участков анализа и уменьшения времени, требуемого для обработки целой детали. Входные данные, полученные в результате работы программного модуля, будут использоваться для выполнения анализа результатов геометрии детали и проведения расчетов режимных параметров.

Список источников

1. К определению внутренних силовых факторов процесса дробеударного формообразования / Пашков А.Е., Чапышев А.П., Пашков А.А. и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. №12. С. 43-54. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-43-55
2. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Duk A.A. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Irkutsk, 2021.
3. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019, vol. 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>.
4. Белянин П.Н. Производство широкофюзеляжных самолётов. М.: Машиностроение, 1979. 360 с.
5. Формообразование монолитных панелей с местным перегибом / Шелков В.С., Самохвалова Л.А., Утешев С.А. и др. // Приложение к журналу «Авиационная промышленность». 1982. №1. С. 24-27.
6. Пашков А.Е. Автоматизированная технология комбинированного формообразования панелей самолетов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. №6(2). С. 453-457.
7. Пашков А.Е., Малащенко А.Ю., Пашков А.А. К вопросу создания цифровых технологий производства крупногабаритных деталей каркаса и обшивки самолета // Технология металлов. 2021. №1. С. 36-46. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-1-36-46. EDN SJKDWE.
8. Ivanova A.V., Belomestnyh A.S., Semenov E.N., Ponomarev B.B. Manufacturing capability of the robotic-complex machining edge details. Int J Eng Technol. (IJET). 2015, no. 75, pp. 1774-1780.
9. Пашков А.Е. Об особенностях применения отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №5(100). С. 17-22.
10. Белецкий А.В. Математическое моделирование и выбор оптимальных проектных решений в САПР преобразователей момента инерционных передач: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Липецк, 2005. 16 с.
11. Диак А.Ю. Определение степени покрытия автоматизированным методом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №12. С. 19-25.
12. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening // Advances in Engineering Software. 2009, vol. 40, no. 10, pp. 1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
13. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Bogdanov K.V., Kryuchkin A.V. Development of digital manufacturing technologies for frame and casing parts // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019, vol. 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012104.
14. Методика расчета технологических параметров предварительного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка» / Макарук А.А., Самойленко О.В., Иванов Ю.Н. и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. №1 (156). С. 8-16.
15. Xudong Xiao, Xin Tong, Yanwei Liu, Renfeng Zhao, Guoqiang Gao, Yan Li Prediction of shot peen forming effects with single and repeated impacts // International Journal of Mechanical Sciences. 2018, vol. 137, pp. 182-194.
16. Maleki E., Bagherifard S., Unal O., Bandini M., Farrahi GH., Guagliano M. Introducing gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment // Scientific Reports. 2021. vol. 11, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-021-01152-2

References

1. Pashkov A.E., Chapyshev A.P., Pashkov A.A. et al. Determining internal force factors of the shot peening forming process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2017;21(12):43-55. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-43-55
2. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Duk A.A. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Irkutsk, 2021.

3. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019;632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>.
4. Belyanin P.N. *Proizvodstvo shirokofuyazhnykh samoletov* [Production of wide-body aircraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 360 p. (In Russ.)
5. Shelkov V.S., Samokhvalova L.A., Uteshev S.A. et al. Forming monolithic panels with a local bend. *Prilozhenie k zhurnalu «Aviatsionnaya promyshlennost»* [Appendix to the Aviation Industry journal]. 1982;(1):24-27. (In Russ.)
6. Pashkov A.E. Automated technology of combined forming of aircraft panels. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013;15(6(2)):453-457. (In Russ.)
7. Pashkov A.E., Malashchenko A.Yu., Pashkov A.A. On the issue of creating digital technologies for the production of large-sized parts of the aircraft frame and skin. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals]. 2021;(1):36-46. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-1-36-46. EDN SJKDWE.
8. Ivanova A.V., Belomestnyh A.S., Semenov E.N., Ponomarev B.B. Manufacturing capability of the robotic-complex machining edge details. *Int. J. Eng. Technol. (IJET)*. 2015;7(5):1774-1780.
9. Pashkov A.E. On the peculiarities of the application of Russian and foreign technology for forming aircraft skins and panels. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2015;(5(100)):17-22. (In Russ.)
10. Beletsky A.V. *Matematicheskoe modelirovaniye i výbor optimalnykh proektnykh resheniy v SAPR preobrazovatelyey momenta inertzionnykh peredach: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Mathematical modeling and selection of optimal design solutions in CAD for inertia torque converters: abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Lipetsk, 2005. 16 p.
11. Diyak A.Yu. Determination of the degree of coverage by an automated method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2015;(12):19-25. (In Russ.)
12. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(10):1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
13. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Bogdanov K.V., Kryuchkin A.V. Development of digital manufacturing technologies for frame and casting parts. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012104.
14. Makaruk A.A., Samoylenko O.V., Ivanov Yu.N. et al. Methodology for calculating the technological parameters of preventive deformation of hardened parts of the “wall” type. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2021;25(1(156)):8-16. (In Russ.)
15. Xudong Xiao, Xin Tong, Yanwei Liu, Renfeng Zhao, Guoqiang Gao, Yan Li. Prediction of shot peen forming effects with single and repeated impacts. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;137:182-194. ISSN 0020-7403
16. Maleki E., Bagherifard S., Unal O., Bandini M., Farrahi G.H., Guagliano M. Introducing gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment. *Scientific Reports*. 2021;11(1). DOI: 10.1038/s41598-021-01152-2

Поступила 15.05.2023; принята к публикации 05.06.2023; опубликована 27.06.2023

Submitted 15/05/2023; revised 05/06/2023; published 27/06/23

Пашков Андрей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: pashkov@istu.edu. Scopus 57212172643

Пашков Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: pashk0ff@mail.ru. Scopus 57212172642

Фалеев Сергей Юрьевич – инженер-исследователь кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: s.faleeff@gmail.com. ORCID 0000-0003-1167-8485

Самойленко Олег Викторович – научный сотрудник кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: olegsamoyenko1@gmail.com.

Andrey E. Pashkov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pashkov@istu.edu. Scopus 57212172643

Aleksandr A. Pashkov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pashkoff@mail.ru. Scopus 57212172642

Sergey Yu. Faleev – Research Engineer of the Department of Mechanical Engineering Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: s.faleeff@gmail.com. ORCID 0000-0003-1167-8485

Oleg V. Samoylenko – Researcher of the Department of Mechanical Engineering Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: olegsamoylenko1@gmail.com