

ФОРМООБРАЗУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЖУХОВ ШУМОГЛУШЕНИЯ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2018

М. В. Молод доктор технических наук, доцент кафедры самолётостроения;
Воронежский государственный технический университет;
molodmv@yandex.ru

В. И. Максименков доктор технических наук, профессор кафедры самолётостроения;
Воронежский государственный технический университет;
maksimenkov.v.i@mail.ru

В. И. Федосеев инженер-конструктор;
ПАО «Корпорация «Иркут», г. Воронеж;
vladislav.f@inbox.ru

Рассматриваются вопросы формообразования сотовых панелей для кожухов шумоглушения турбореактивного двигателя (ТРД). Приведены различные типы конструкций и материалы, применяемые для изготовления сотовых панелей. Проведены испытания образцов для определения механических характеристик. По величине относительного удлинения определена технология изготовления сотовых панелей. Рассмотрены основные браковочные признаки при формообразовании панелей на гибочно-растяжных прессах. Исследован процесс формообразования сотовых панелей на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ). Получены силовые параметры процесса формообразования, необходимые для оценки напряжённо-деформированного состояния и получения управляющей программы. Для однослойных и двухслойных панелей выполнены расчёты величины пружинения с использованием теоремы о разгрузке А.А. Ильюшина. Выявлено, что пружинение однослойной и двухслойной панелей отличаются из-за величины обобщённой жёсткости. По известной высоте сотовой панели определяется величина пружинения. Приведены схемы сотовых панелей с различным расположением среднего слоя по высоте панели. Представлены графики зависимости радиуса пуансона, скорректированного на величину пружинения, от радиуса детали для различных типов конструкций из титановых сплавов и нержавеющей стали.

Сотовая панель; двухслойная конструкция; формообразование; сотовый наполнитель; напряжённо-деформированное состояние (НДС); браковочные признаки; пружинение; оборудование с ЧПУ.

Цитирование: Молод М.В., Максименков В.И., Федосеев В.И. Формообразующие технологии для изготовления кожухов шумоглушения турбореактивного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 3. С. 167-174. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-167-174

Введение

Применение сотовых панелей для изготовления кожухов шумоглушения, устанавливаемых в горячей части двигателей, определяет повышенные требования к точности их геометрических параметров. Точность геометрии панелей определяется правильным выбором режимов формообразования. При этом необходимо обеспечить стабильность качества получаемых панелей.

В работах [1 – 3] рассмотрены теоретические основы управления процессом формообразования обшивок на оборудовании с ЧПУ. Свои особенности имеют процессы формообразования многослойных сотовых конструкций.

Поэтому целью данной работы является анализ процесса формообразования слоистых панелей с оценкой величины пружинения однослойных и двухслойных панелей для получения деталей заданной точности.

Механические испытания обшивок сотовых панелей

Приведём типы используемых сотовых панелей (рис. 1).

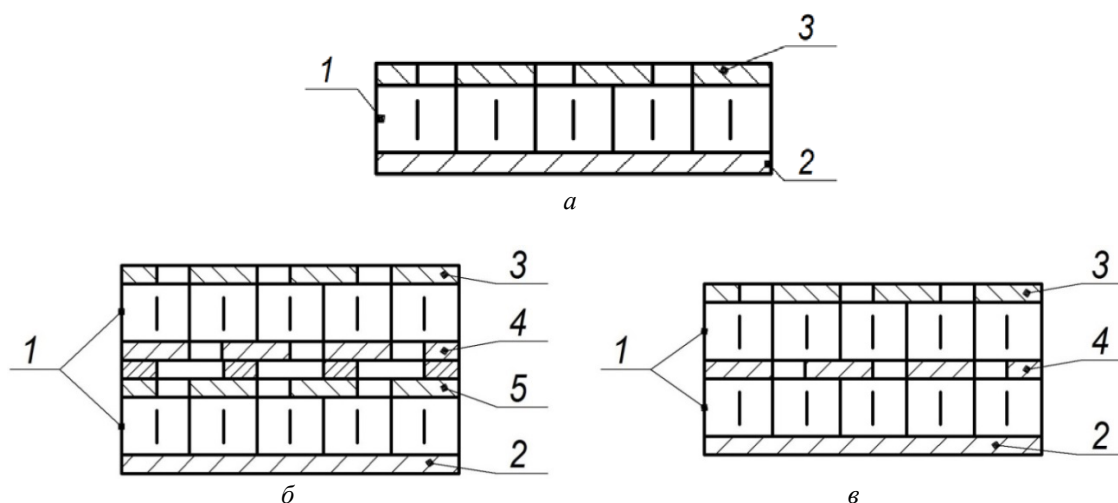


Рис. 1. Типы сотовых панелей:

а – однослойная; б – двухслойная со вставками; в – двухслойная диффузионно-сварная;
 1 – сотовый наполнитель; 2 – сплошная обшивка; 3,4,5 – перфорированная обшивка

Основными материалами, применяемыми для изготовления сотовых панелей, являются: для обшивок – лист ОТ4-1, 12Х18Н10Т толщиной 0,5 мм; для наполнителя – лист ВТ1-0, 12Х18Н10Т толщиной 0,08 мм.

Проведены механические испытания материалов обшивок сотовых панелей, необходимые для расчёта режимов формообразования. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты механических испытаний

Марка материала	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Деформация текучести $\varepsilon_{0,2}$	Предел прочности σ_B , МПа	Модуль упругости E , МПа	Относительное удлинение δ
ОТ4-1 – сплошной	469	0,0063	655	120000	0,11
ОТ4-1 – перфорированный	294	0,0052	373	93000	0,03
12Х18Н10Т – сплошной	322	0,0036	865	202000	0,3
12Х18Н10Т – перфорированный	243	0,0035	413	157000	0,1

Полученные значения механических характеристик позволяют определить технологический процесс формообразования сотовых панелей [4].

Для сотовой панели, имеющей наружную перфорированную обшивку и относительное удлинение $\delta = 0,03$, формообразование на заданный радиус кривизны возможно только с нагревом в штампах.

Для сотовых панелей, имеющих относительное удлинение наружной обшивки $\delta = 0,11; 0,3; 0,1$, при формообразовании можно использовать процесс «изгиб с растяжением», который осуществляется на гибочно-растяжных прессах типа ГРП-160/1200 или прессах с ЧПУ типа FEKD.

Процесс формообразования сотовых панелей

Рассмотрим процесс формообразования панелей на оборудовании с ЧПУ.

Примем, во-первых, что несущие слои воспринимают продольные нагрузки, их материал упругопластический со степенным законом упрочнения и, во-вторых, что наполнитель маложёсткий, не воспринимающий продольных усилий, но сопротивляющийся поперечному сдвигу и обеспечивающий совместную работу несущих слоёв.

В процессе формообразования многослойную панель устанавливают в зажимы прессы и осуществляют предварительное растяжение и изгиб (рис. 2).

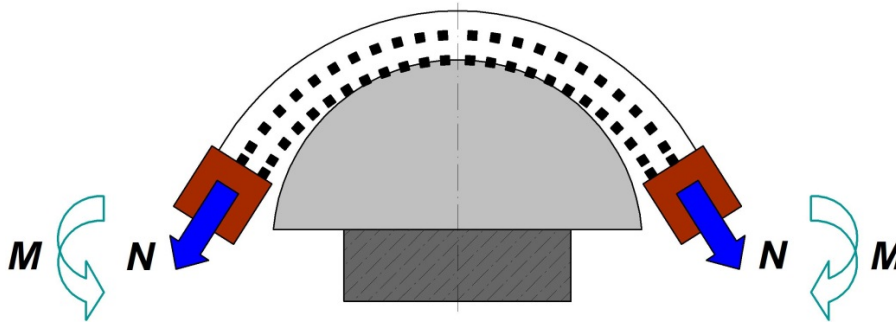


Рис. 2. Схема процесса гибки панели с растяжением

При формообразовании панелей на гибочно-растяжных прессах возможно появление следующих основных браковочных признаков (рис. 3):

- разрыв наружного слоя;
- потеря устойчивости/складкообразование/внутреннего слоя;
- смятие сотового наполнителя;
- пружинение панели;
- седловидность панели.

С целью повышения качества получаемых деталей при формообразовании целесообразно использование оборудования с ЧПУ и поэтому требуется разработать управляющую программу процесса формообразования. Для этого необходимо знать механические характеристики материалов панели, геометрию получаемой детали, параметры оборудования, что позволит определить напряженно-деформированное состояние процесса формообразования панели.

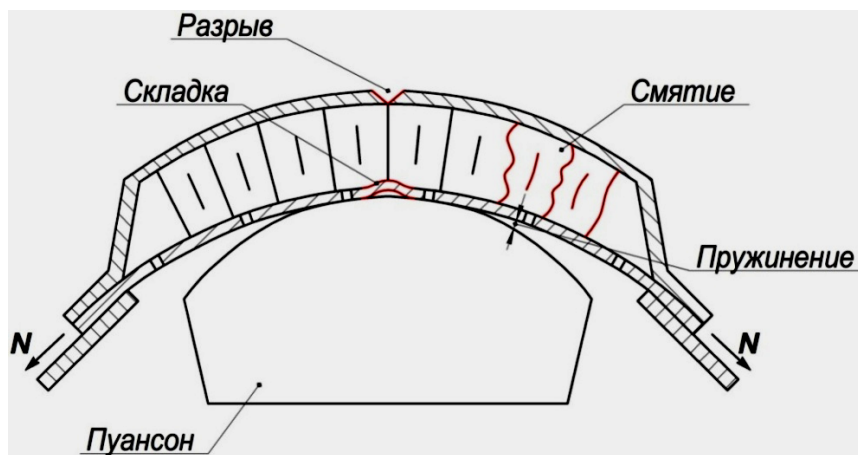


Рис. 3. Браковочные признаки

Наиболее сложными являются вопросы определения механических характеристик материала и оценка напряжённно-деформированного состояния сотовой панели.

Механика формообразования сотовой панели представляется как управляемый процесс изгиба с растяжением заготовки, находящейся под действием сил N и изгибающего момента M . Схема сил, действующих на элемент двухслойной панели при её контакте с пуансоном, представлена на рис. 4.

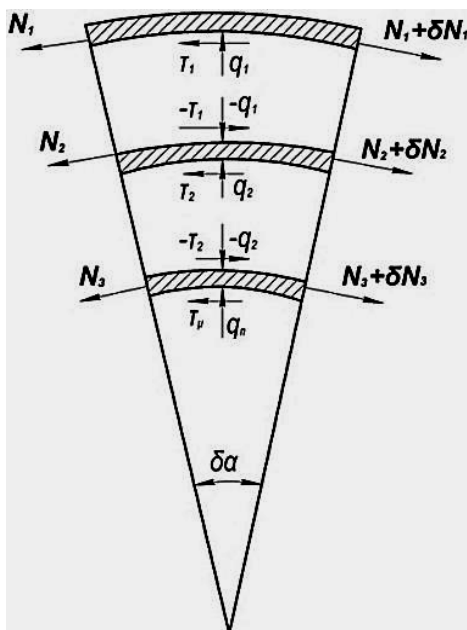


Рис. 4. Схема сил, действующих на элемент двухслойной панели

При изгибе с растяжением контактное трение между внутренним несущим слоем панели с пуансоном описывается законом Кулона [5]:

$$\tau_{\mu} = \mu q_{\Pi}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения; q_{Π} – давление панели на пуансон.

Касательные напряжения τ_i выражаются через углы сдвига γ по закону Гука:

$$\tau_i = G_i \gamma, \quad (2)$$

где G_i – модуль сдвига i -го слоя заполнителя, $i = 1, 2$.

Для определения напряжённно-деформированного состояния получаем системы уравнений силовых параметров в проекции на касательную и нормаль и значения усилий несущих слоёв.

При пластическом нагружении:

$$N_i = h_i A_i \varepsilon_i^{n_i} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (3)$$

где A_i, n_i – коэффициенты упрочнения несущих слоёв; h_i – толщина несущего слоя; ε_i – значение деформации несущего слоя.

При упругой разгрузке:

$$N_i = h_i E_i (\varepsilon_i - \varepsilon_i^p), \quad (4)$$

где E_i – модуль упругости i -го несущего слоя; ε_i^p – пластическая составляющая деформации i -го несущего слоя.

Полученная замкнутая система уравнений для определения напряжённо-деформированного состояния решалась с использованием программного комплекса «ABAQUS».

Управляющая программа с учётом параметров, приведённых выше, обеспечивает процесс формообразования сотовых панелей.

Определение величины пружинения сотовых панелей

Для определения величины пружинения изгибающие моменты двухслойной панели на стадии разгрузки рассчитывались относительно её нейтрального слоя, положение которого определялось решением уравнения равновесия численным методом:

$$M = \sum M_i (i = 1, 2, 3), \quad (5)$$

где M_i – изгибающие моменты несущих слоёв относительно нейтральной оси:

$$M_i = \sigma_i z_i dz, \quad (6)$$

где z_i – координаты по нормали к поверхности несущих слоёв, отсчитываемые от срединной поверхности слоёв.

Используя теорему А.А. Ильющина о разгрузке, получили величину остаточного радиуса кривизны $R_{ост}$:

$$\frac{1}{R_{ост}} = \frac{1}{R} - \frac{M}{EJ}, \quad (7)$$

где R – радиус пуансона; EJ – обобщённая жёсткость сотовой панели.

Графики зависимости остаточного радиуса кривизны $R_{ост}$ для однослойной панели высотой 20 мм и двухслойной панели высотой 20 + 20 мм представлены на рис. 5.

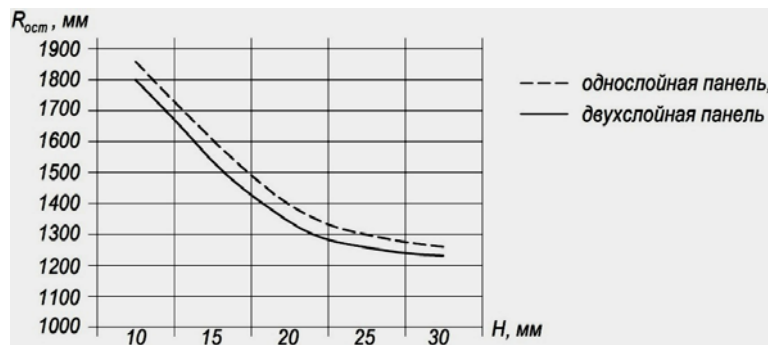


Рис. 5. Зависимость $R_{ост}$ от высоты панели H

Проведённые исследования позволяют определять величину пружинения однослойной и двухслойной панелей для различных пуансонов с учётом высоты сотового заполнителя. Из графиков (рис. 5) следует, что при одинаковой высоте пружинение однослойной панели больше пружинения двухслойной панели из-за разницы значений показателя обобщённой жёсткости.

В результате исследований были получены зависимости значений величины пружинения от высоты слоёв двухслойной панели (рис. 6). Влияние положения среднего слоя на величину пружинения следует учитывать при конструировании панелей для кожухов ТРД.

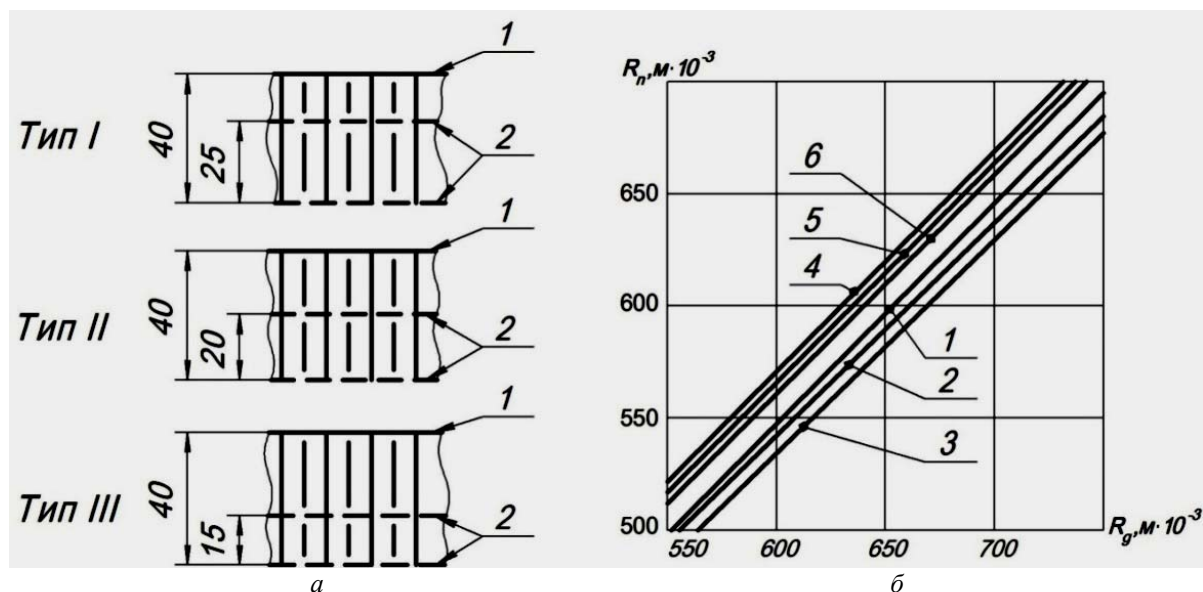


Рис. 6. Типы панелей и зависимость радиуса пуансона от радиуса детали:
 а – типы двухслойных панелей (1 – сплошная обшивка; 2 – перфорированная обшивка);
 б – зависимость радиуса пуансона, скорректированного на величину пружинения от радиуса детали для различных типов конструкций (1 – ОТ4-1 тип III; 2 – ОТ4-1 тип II; 3 – ОТ4-1 тип I; 4 – 12Х18Н10Т тип III; 5 – 12Х18Н10Т тип II; 6 – 12Х18Н10Т тип I)

Проведённые исследования позволили разработать методику корректировки оснастки на величину пружинения, которая даёт возможность прогнозировать качество панелей на стадии их проектирования.

Возможность корректировки оснастки обеспечивается применением универсальных пуансонов, которые перенастраиваются на заданную кривизну [6].

Пример оценки эффективности проведённых исследований

С учётом результатов проведённых исследований были изготовлены сотовые панели методом гибки с растяжением на оборудовании с ЧПУ.

Получено, что:

- деформации наружного слоя не превышают предельно допустимой величины ($\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{np}$), что исключает его разрыв;
- осевое напряжение внутреннего несущего слоя больше предела текучести ($\sigma_3 > \sigma_T$), что исключает образование гофров;

– давление наружного несущего слоя не превышает предельно допустимого давления ($q_1 \leq q_{np}$), что исключает смятие заполнителя.

При сравнении результатов эксперимента была выявлена нестабильность точности сотовых панелей в пределах 10-12%.

Проведённый анализ баланса точности показал, что важным фактором при гибке с растяжением является правильный выбор смазки для уменьшения трения в зоне контакта пуансона и панели, что обеспечивает повышение равномерности деформаций по длине панели [5].

Заключение

1. Проведены механические испытания несущих слоёв панелей, позволяющих использовать их результаты при выборе технологии изготовления заготовок, а также при расчёте параметров формообразования панелей на оборудовании с ЧПУ.

2. Разработана методика расчёта пружинения для однослойных и двухслойных панелей, позволяющая осуществлять проектирование пуансонов для получения деталей требуемой точности для последующего изготовления кожуха шумоглушения для ТРД.

3. Получены зависимости радиуса пуансона от радиуса детали с различным расположением несущих слоёв по высоте панели, позволяющие прогнозировать точностные параметры технологического процесса при гибке с растяжением панели.

Библиографический список

1. Одинг С.С., Молод М.В. Повышение технологических возможностей процесса обтяжки на прессах с ЧПУ // Межвузовский сборник научных трудов «Прогрессивные технологии авиационного и машиностроительного производства. Аэродинамика, механика и технология авиастроения». Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2000. С. 18-22.

2. Одинг С.С. Управление процессом формообразования обшивок двойной кривизны на обтяжном оборудовании с программным управлением. Часть 1 // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1987. № 3. С. 13-17.

3. Михеев В.А., Гречников Ф.В., Дементьев С.Г., Самохвалов В.П., Савин Д.В., Сурудин С.В. Исследование кинематической схемы последовательной обтяжки оболочек двояковыпуклой формы на обтяжном прессе FEKD // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 6. С. 172-179.

4. Голенков В.А., Дмитриев А.М., Кухарь В.Д., Радченко С.Ю. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.

5. Максименков В.И., Молод М.В., Ляхова Н.Е., Решетникова Е.В. Способ обтяжки листовых материалов: патент РФ № 2459680; опубл. 27.08.2012; бюл. № 24.

6. Молод М.В. Разработка универсального пуансона // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12, № 1. С. 55-57.

SHAPING TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING NOISE INSULATION CASINGS OF TURBOJET ENGINES

© 2018

M. V. Molod Doctor of Science (Engineering), Associate Professor;
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;
molodmv@yandex.ru

V. I. Maksimenkov Doctor of Science (Engineering), Professor;
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;
maksimenkov.v.i@mail.ru

V. I. Fedoseev Design Engineer;
Public Company "Irkut" Corporation", Voronezh, Russian Federation;
vladislav.f@inbox.ru

The article discusses questions of shaping honeycomb panels for turbojet engine noise insulation casings. Various types of structures and materials used for manufacturing honeycomb panels are presented. Samples were tested to determine mechanical characteristics. The technology of manufacturing honeycomb panels was determined by the value of relative elongation. The main rejection criteria in forming panels on bending and stretching presses were reviewed. The process of shaping honeycomb panels using computer numerical control (CNC) equipment was analyzed. Force parameters of the shaping process required for the assessment of the stress-strain state and obtaining the control program were determined. The values of the spring action were calculated for single-layer and double-layer panels using the A.A. Ilyushin unloading theorem. It was found that the springing of single-layer and two-layer panels differs due to the magnitude of the generalized rigidity. The value of springing is determined by the known height of the honeycomb panel. Designs of honeycomb panels with different positions of the middle layer along the height of the panel are given. Graphs showing the dependence of the punch radius adjusted for the value of springing on the radius of the part for various types of structures from titanium alloys and stainless steels are presented.

Honeycomb panel; double-layer structure; shaping; honeycomb filler; stress-strain state; rejection criteria; springing; CNC equipment.

Citation: Molod M.V., Maksimenkov V.I., Fedoseev V.I. Shaping technologies for manufacturing noise insulation casings of turbojet engines. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 3. P. 167-174. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-167-174

References

1. Oding S.S., Molod M.V. Povyshenie tekhnologicheskikh vozmozhnostey protsessa obtyazhki na pressakh s ChPU. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Progressivnyye tekhnologii aviatsionnogo i mashinostroitel'nogo proizvodstva. Aerodinamika, mekhanika i tekhnologiya aviastroeniya»*. Voronezh: Voronezh State Technical University Publ., 2000. P. 18-22. (In Russ.)
2. Oding S.S. Controlling the formation of double curvature skin elements on a program-controlled stretch former. I. *Soviet Aeronautics*. 1987. V. 30, Iss. 3. P. 57-61.
3. Miheev V.A., Grechnkov F.V., Dementyev S.G., Samohvalov V.P., Savin D.V., Surudin S.V. Simulation of kinematics scheme serial of shells stretchforming double-convex form on stretchforming press FEKD. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2014. V. 16, no. 6. P. 172-179. (In Russ.)
4. Golenkov V.A., Dmitriev A.M., Kukhar' V.D., Radchenko S.Yu. *Spetsial'nye tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie obrabotki davleniem* [Special technological processes and equipment of plastic working]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004. 464 p.
5. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Ljakhova N.E., Reshetnikova E.V. *Sposob obtyazhki listovykh materialov* [Method of sheet-stretching]. Patent RF, no. 2459680, 2012. (Publ. 27.08.2012, bull. no. 24).
6. Molod M.V. Development of a universal punch. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2016. V. 12, no. 1. P. 55-57. (In Russ.)