

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.7.043

ПНЕВМОТЕРМИЧЕСКАЯ ФОРМОВКА ТРЁХСЛОЙНЫХ КЛИНОВИДНЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20

Колесников А.В. *, Колесник А.В. **, Заболотский А.П. ***

*Иркутский государственный технический университет,
ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия*

** e-mail: Avk@istu.edu*

*** e-mail: kemazik@mail.ru*

**** e-mail: donzab@ya.ru*

Рассмотрен процесс изготовления трёхслойных конструкций из титанового сплава VT20 пневмотермической формовкой и диффузионной сваркой. Описаны причины возникновения дефектов в процессе формовки. Предложены расчёты оптимальных конструктивно-геометрических параметров трёхслойных конструкций для недопущения образования дефектов.

Ключевые слова: пневмотермическая формовка, сверхпластичность, клиновидные многослойные конструкции, титановый сплав VT20.

В современных конструкциях летательных аппаратов всё большее применение находят многослойные конструкции из труднодеформируемых титановых сплавов. Однако большая трудоёмкость, связанная с изготовлением деталей из титановых сплавов, сдерживает их широкое применение. Значительно снизить трудоёмкость при изготовлении многослойных титановых панелей можно с помощью применения совмещенного процесса пневмотермической формовки и диффузионной сварки (ПТФ/ДС) в режиме сверхпластичности. На сегодняшний день в условиях ПТФ и ПТФ/ДС уже изготавливают такие элементы конструкций летательных аппаратов, как корпуса, законцовки [1, 2], лопадки турбин, крышки люков, силовых панелей и др.

В настоящей статье описываются проблемы и пути их решения при пневмотермической формовке многослойных клиновидных панелей из титановых сплавов с поперечным (рис. 1) и продольным (рис. 2) гофровым наборами. Вопросы осуществления диффузионного соединения и его качества рассматриваться не будут.

Технология ПТФ/ДС многослойных титановых панелей состоит из ряда этапов:

- 1) раскрой листов обшивок и заполнителя;
- 2) нанесение по трафарету на лист заполнителя или обшивок в заданных местах антисварочного покрытия;
- 3) сборка пакета из листов обшивок и заполнителя;

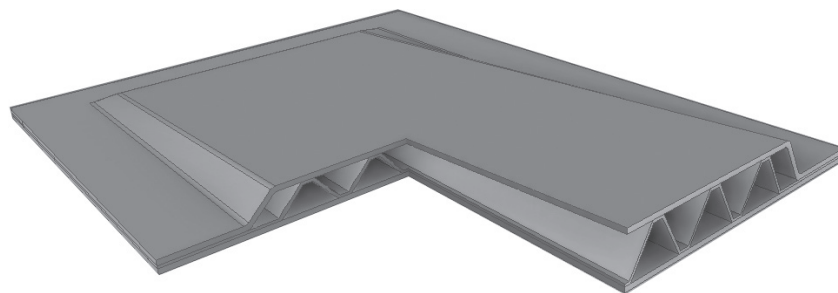


Рис. 1. Клиновидная панель с поперечным гофривым набором

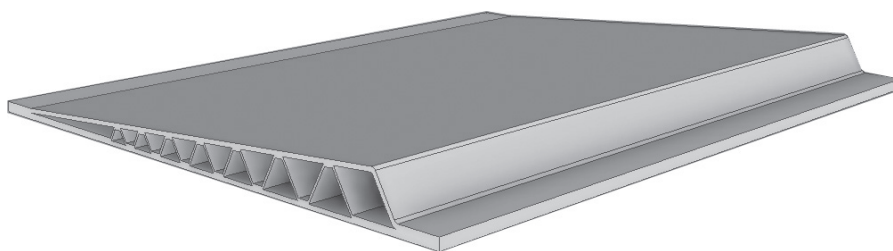


Рис. 2. Клиновидная панель с продольным гофривым набором

4) закладка пакета в оснастку и загрузка в установку ПТФ/ДС;

5) нагрев оснастки с пакетом заготовок до температуры диффузионной сварки и поддержание её в течение этапа сварки;

6) выполнение диффузионной сварки листов на участках, не покрытых антисварочным покрытием, путём создания вакуума между листами обшивок и заполнителя, а также давления аргона снаружи листов и выдержки при этом давлении;

7) нагрев оснастки до температуры, обеспечивающей режим сверхпластичности материала заготовок, и поддержание её в течение этапа формовки;

8) подача аргона между обшивками и заполнителем с регулированием давления по ходу процесса в соответствии с расчётными значениями $p = f(t)$ для формовки заполнителя панели в режиме сверхпластичности;

9) охлаждение отформованной панели вместе с оснасткой и извлечение готовой трёхслойной панели.

Параметры сверхпластичности материала определяются путем проведения испытаний на двухосное растяжение, по специализированным методикам [3–5].

Изготовление многослойных панелей (рис. 3) с относительной высотой панели более единицы

$\left(\bar{H}_j = \frac{H_j}{a_j} > 1 \right)$ и небольшим отношением толщин

внешних обшивок S_0 и заполнителя S_3 $\left(\frac{S_3}{S_0} \right)$ сопро-

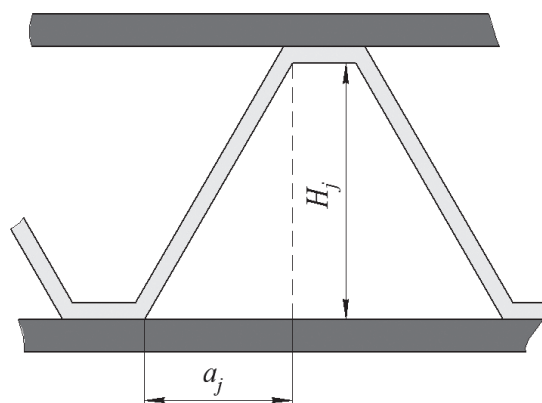


Рис. 3. Гофривый набор многослойной панели: H_j — высота j -го ребра гофра; a_j — первоначальная длина j -го ребра гофра заполнителя

вождается образованием неустраняемых дефектов, так называемых утяжин [6].

На рис. 4 показаны утяжины, возникшие в процессе формовки многослойной панели. Для предотвращения их появления необходимо соблюдение ряда специальных мер.

Опыт моделирования процесса формовки и изготовления образцов показывает, что утяжины возникают вследствие того, что в процессе формовки трёхслойных панелей имеет место разное перемещение нижней обшивки в разных зонах пакета листов. В зоне диффузионной сварки перемещение нижней обшивки сдерживается ребрами заполнителя, тогда как в зонах, не сваренных с заполнителем h_p , верхняя обшивка формируется свободно под действием давления газа, при этом между местами сварки с заполнителем образуются её прогибы h_p (рис. 5).

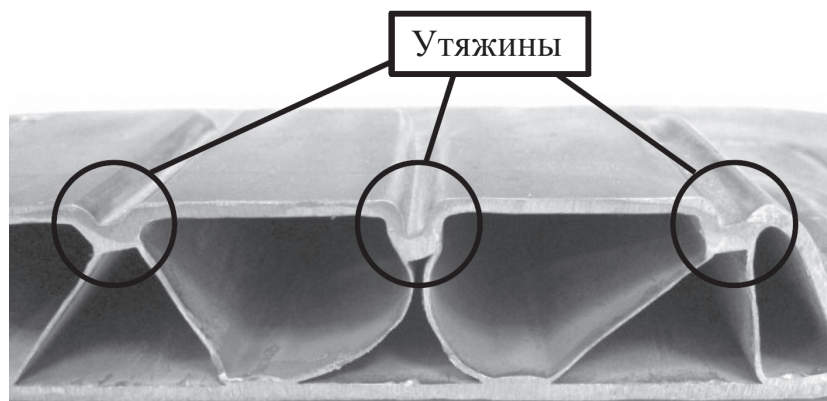


Рис. 4. Утяжины после ПТФ многослойной панели

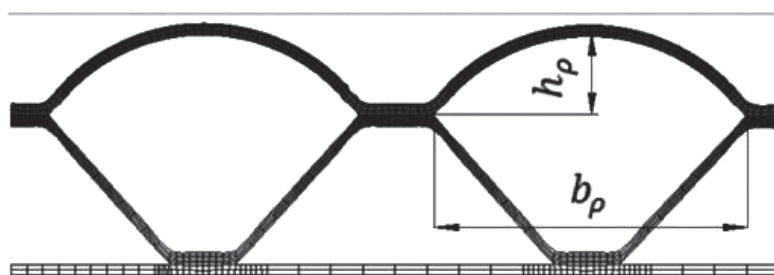


Рис. 5. Прогибы обшивки в процессе формовки: h_p — высота прогиба обшивки в ρ -м гофре; b_p — ширина ρ -го гофра панели

Формовка трёхслойной панели без образования дефектов возможна, когда давление, необходимое для формовки ребер заполнителя и обшивки, будет меньше давления, при котором прогиб обшивки в неподкреплённых ребрами местах достигнет критического значения [7]:

$$p_{\max} \leq p_o, \tag{1}$$

где p_{\max} — максимальное давление, необходимое для формовки многослойной панели с соблюдением режима сверхпластичности; p_o — давление формовки обшивки в неподкреплённых ребрами местах, приводящее к критическому значению прогиба.

На основе уравнения (1) определён рекомендуемый диапазон соотношения толщин обшивки и заполнителя в зависимости от прогиба обшивки в местах, неподкреплённых ребрами [8]:

$$\frac{S_o}{S_{3o}} > \frac{n}{\frac{4q_{кр}}{\left(\frac{\bar{H}_j}{1+\bar{H}_j^2}\right)^e \frac{\ln(1+\bar{H}_j^2)}{2} \cdot \frac{B}{b_p}} - 2}, \tag{2}$$

где S_o — исходная толщина листа обшивки; S_3 — исходная толщина листа наполнителя; n — количество ребер заполнителя клиновидной панели;

B — ширина панели; \bar{H}_j — текущая относительная высота j -го ребра клиновидной панели, $\bar{H}_j = \frac{H_j}{a_j}$; $q_{кр}$ — коэффициент критического прогиба

ба. Коэффициент критического прогиба определяется зависимостью

$$q_{кр} = \frac{\frac{h_{pкр}}{b_p/2}}{1 + \left(\frac{h_{pкр}}{b_p/2}\right)^2}, \tag{3}$$

где $h_{pкр}$ — величина критического прогиба; b_p — ширина гофра панели.

Значения коэффициента критического прогиба для различных толщин обшивки S_o определены методом виртуального моделирования, описанного в работе [8], и представлены на рис. 6.

Формующее давление p_j для изготовления панели определяется выражением

$$p_j = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{nS_3 + S_o}{B} \right) \frac{\bar{H}_j}{1 + \bar{H}_j^2}, \tag{4}$$

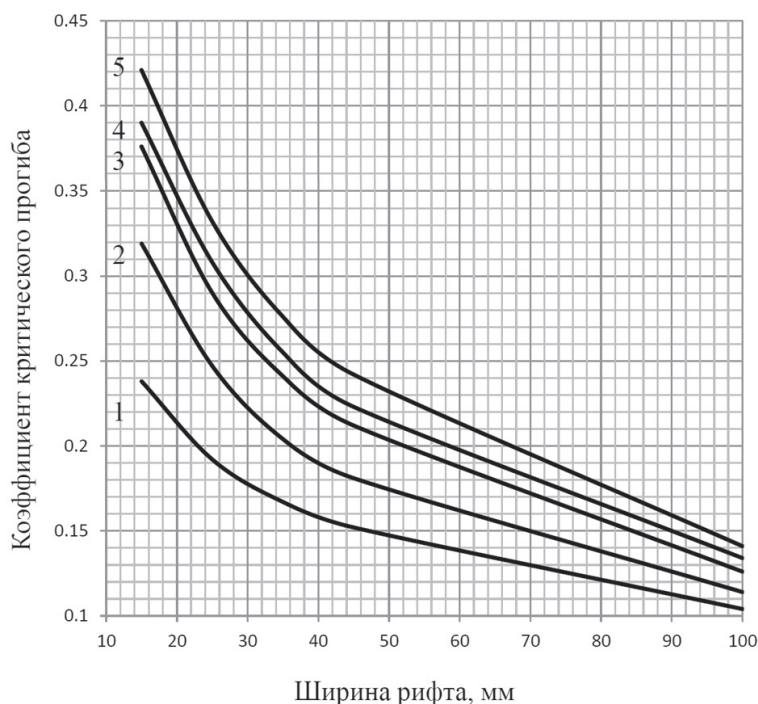


Рис. 6. Зависимость коэффициента критического прогиба от ширины гофра: 1 — $S_0 = 1$ мм; 2 — $S_0 = 1,5$ мм; 3 — $S_0 = 2$ мм; 4 — $S_0 = 2,5$ мм; 5 — $S_0 = 3$ мм

где σ_S — напряжение течения материала в режиме сверхпластичности; n — количество ребер заполнителя клиновидной панели; B — ширина панели;

$\bar{H}_j = \frac{H_j}{a_j}$ — текущая относительная высота j -го ребра гофра клиновидной панели.

Время формовки многослойной клиновидной панели определяется выражением

$$\tau_j = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\ln(1 + \bar{H}_j^2)}{\dot{\epsilon}}, \tag{5}$$

где $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации материала заполнителя в режиме сверхпластичности.

Для многослойных панелей из титанового сплава ВТ20 с толщиной обшивок $S_0 = 2$ мм и шириной гофра b_p , равной 25 мм, значение критического прогиба которого составляет $q_{кр} = 0,29$, соотношение толщин (2) должно соответствовать графику, представленному на рис. 7.

График показывает, что выше кривой находится предпочтительный диапазон выбора соотношения толщин $\frac{S_0}{S_3}$, при котором произойдет формовка

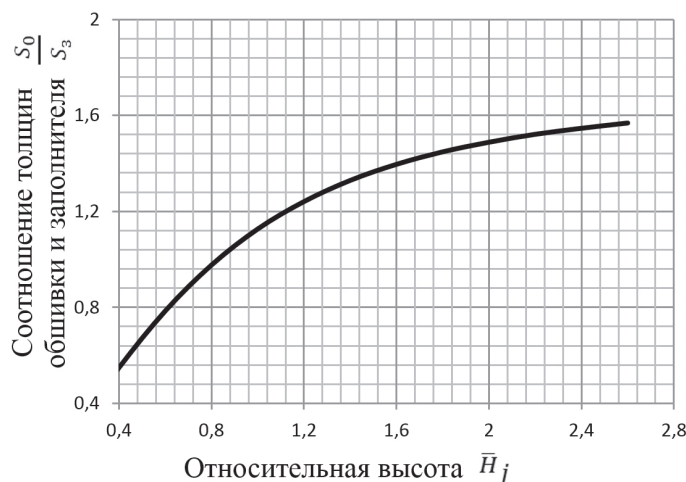


Рис. 7. Диапазон выбора соотношения толщин в зависимости от относительной высоты для титанового сплава ВТ20

многослойной панели из титанового сплава ВТ20 без образования дефектов.

Для многослойной панели с относительной высотой $\bar{H} = 1,8$ рекомендуемое соотношение толщин обшивки и заполнителя составляет $\frac{S_o}{S_3} > 1,45$.

Примем значение соотношения толщин $\frac{S_o}{S_3} = 2$,

тогда рекомендуемая толщина заполнителя должна быть равной $S_3 = 1$ мм.

Проверка возможности бездефектной формовки многослойной панели с относительной высотой $\bar{H} = 1,8$ осуществлена в НИЛ ИРННТУ на прессе сверхпластической формовки и диффузионной сварки «FSP 60T» (рис. 8) при температуре 950 °С в оснастке для формовки, представленной на рис. 9.

По полученным геометрическим соотношениям выполнены формовки клиновидных панелей с поперечным и продольным гофривым набором. Результаты формовок представлены на рис. 10 и 11.

После формовки все клиновидные панели соответствовали расчётным параметрам по размерам сечения профиля. Формовка осуществлена без образования дефектов, что подтверждает правильность определения геометрических параметров клиновидных панелей и режимов формовки.

Для изготовления многослойных панелей с равной толщиной ребер заполнителя необходимо обеспечить условие постоянства относительной высоты ребер по длине панели [9].

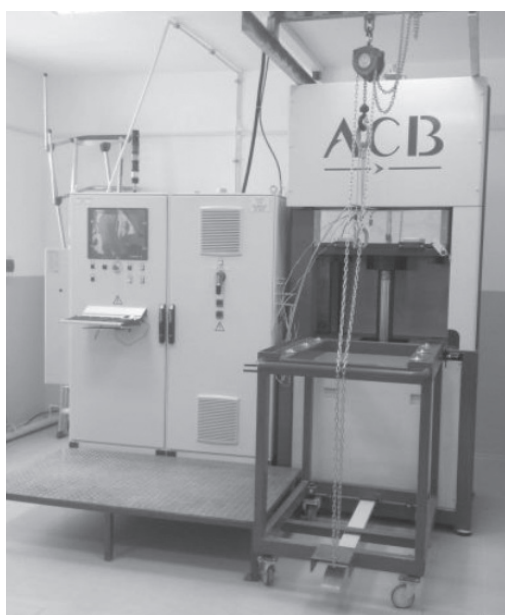


Рис. 8. Пресс сверхпластической формовки и диффузионной сварки FSP60T



Рис. 9. Оснастка для формовки многослойных панелей

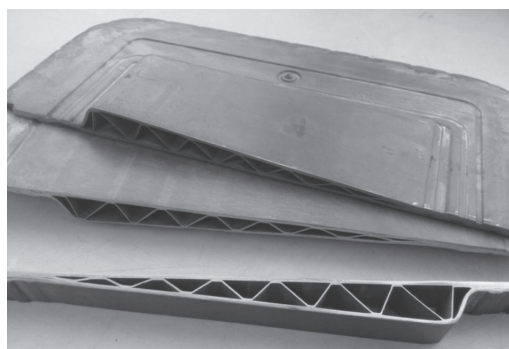


Рис. 10. Клиновидная панель с поперечным гофривым набором

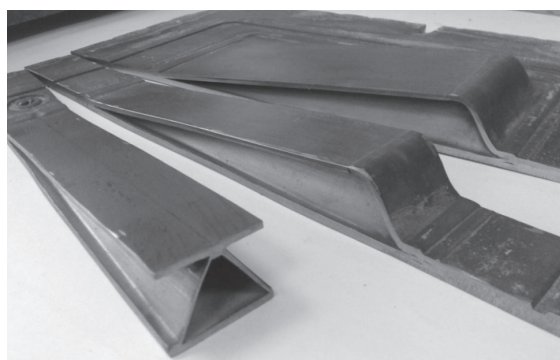


Рис. 11. Клиновидная панель с продольным гофривым набором

Вывод

Для качественного изготовления трёхслойной панели из титановых сплавов по технологии ПТФ/ДС необходимо определять конструктивно-геометрические параметры панелей (соотношение толщины обшивки и заполнителя, высоты панели, первоначальной длины ребер и т.д.) в соответствии с зависимостью (2).

Однако диапазон соотношения толщин, рассчитанный из условия (2), снижает применимость метода ПТФ/ДС для изготовления многослойных конструкций. Поэтому при формовке без соблюдения условия (2) необходимы дополнительные меры для предотвращения образования дефектов, к которым относятся [10, 11]:

- использование технологических листов;
- укрупнение зерна микроструктуры обшивки предварительной термообработкой;
- применение подвижного поддерживающего элемента оснастки.

Приведённые методы уменьшают прогиб свободной части обшивки в процессе формовки либо полностью не допускают их образования.

Библиографический список

1. Лазарев В.А., Ковалевич М.В., Гончаров А.В. Опыт внедрения технологии пневмотермической формовки в серийном производстве // *Авиационная промышленность*. 2014. № 4. С. 36-40.
2. Ковалевич М.В., Климова А.А. Совмещение традиционных операций листовой штамповки и пневмотермической формовки в режиме сверхпластичности для изготовления изделий авиационной техники // *Труды МАИ*. 2010. № 38. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14150>
3. Еникеев Ф.У., Тулунова О.П., Ганиева В.Р., Шмаков А.К., Колесников А.В. Методика идентификации реологических параметров сверхпластичности результатам тестовых формовок круглых мембран // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2016. Т. 82. № 9. С. 69-73.
4. Aksenov S.A., Zakhariev I.Y., Kolesnikov A.V., Osipov S.A. Characterization of superplastic materials by results of free bulging test // *Materials Science Forum* «Superplasticity in Advanced Material — ICSAM 2015». 2016. Vol. 838-839, pp. 552-556.
5. Aksenov S.A., Kolesnikov A.V., Mikhaylovskaya A.V. Design of a gas forming technology using the material constants obtained by tensile and free bulging testing // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 237, pp. 88-95.
6. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Ценин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии / Предисл. Г.Г. Малинецкого. — М.: КомКнига, 2005. — 320 с.
7. Пашкевич А.Г., Орехов А.В., Смирнов В.А. Формовка-сварка трёхслойных титановых конструкций в состоянии сверхпластичности // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 1985. № 4. С. 90-93.
8. Колесников А.В. Предотвращение возникновения дефектов в процессе пневмотермической формовки трёхслойных панелей из титановых сплавов // *Вестник Московского авиационного института*. 2014. Т. 21. № 2. С. 66-74.
9. Колесников А.В., Шмаков А.К., Чеславская А.А. К расчету оптимальных параметров заполнителя многослойных конструкций переменной высоты для изготовления их методом пневмотермической формовки и диффузионной сварки // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2015. № 1. С. 98-102.
10. Смирнов В.А., Бирюков Н.М., Садков В.В., Ростковский И.Г. Формовка-сварка многослойных титановых конструкций в состоянии сверхпластичности без матрицы // *Авиационная промышленность*. 1986. № 9. С. 46-48.
11. Колесников А.В., Шмаков А.К. Пневмотермическая формовка трёхслойных клиновидных панелей с подпором обшивок // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 11(82). С. 52-57.

PNEUMO-THERMAL MOLDING OF SANDWICH WEDGE-LIKE PANELS FROM TITANIUM ALLOY VT20

Kolesnikov A.V.* , Kolesnik A.V.** , Zabolotskii A.P.***

*Irkutsk State Technical University,
83, Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russia*

* e-mail: Avk@istu.edu

** e-mail: kemazik@mail.ru

*** e-mail: donzab@ya.ru

Abstract

The presented work deals with considering pneumothermal molding and diffusion welding (PTM/DW) technology for multilayer structures manufacturing from titanium alloys, including the ones of variable height.

The paper represents the presentation of general theory of the above said technology, and analysis of the problems emerging while its realization.

The author separated out the stages of PTM/DW technology of multilayer titanium panels.

The main problem considered in the paper consists in the problem of non-removable defects formation, accompanying manufacturing of multilayer wedge-like panels. These defects are imaged on the appended plots and figures.

The reason of these defects occurrence while multilayer panels molding lies in the different displacement of the lower shell in various areas of the pack of sheets. In the area of diffusion welding this displacement is constrained by ribs of the filler, while in the zones which are not welded with the filler, the upper shell is forming freely under gas pressure. Its deflections are forming herewith between the areas of welding with the filler.

Solution of this problem consists in defining the managing program, necessary to form the ribs of the filler and the shell, whereby the shell deviation in the areas unreinforced by the ribs would not reach critical value.

The recommended range of the shell and filler thicknesses ratio in dependence on the shell deflection in the areas unreinforced by the ribs, as well as equations for determining critical deflection factor and molding pressure were obtained by mathematical modeling.

Application of the above said equations for the filler and shell thicknesses of multilayer wedge-like panels will allow avoiding defects occurrence, which was confirmed in practice. All fabricated panels comply with the calculated parameters. No defects were detected over the profile section dimensions.

In view of the foregoing, one may state that the problem consisting in determining the regularities for selection of design and geometry parameters of multilayer structures, allowing ensure qualitative molding process without defects formation was solved successfully, and the solution has practical applicability.

Keywords: pneumo-thermal molding, superplasticity, wedge-like sandwich panels, titanium alloy VT20.

References

1. Lazarev V.A., Kovalevich M.V., Goncharov A.V. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2014, no. 4, pp. 36-40.
2. Kovalevich M.V., Klimova A.A. *Trudy MAI*, 2010, no. 38, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14150>
3. Enikeev F.U., Tulupova O.P., Ganieva V.R., Shmakov A.K., Kolesnikov A.V. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2016, vol. 82, no. 9, pp. 69-73.
4. Aksenov S.A., Zakhariev I.Y., Kolesnikov A.V., Osipov S.A. Characterization of superplastic materials by results of free bulging test. *Materials Science Forum "Superplasticity in Advanced Material – ICSAM 2015"*, 2016, vol. 838-839, pp. 552-556.
5. Aksenov S.A., Kolesnikov A.V., Mikhaylovskaya A.V. Design of a gas forming technology using the material constants obtained by tensile and free bulging testing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 237, pp. 88–95.
6. Chumachenko E.N., Smirnov O. M., Tsepin M. A. *Sverkhplastichnost': materialy, teoriya, tekhnologii* (Superplasticity: materials, theory, technology), Moscow, KomKniga, 2005, 320 p.
7. Pashkevich A.G., Orekhov A.V., Smirnov V.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 1985, no. 4, pp. 90-93.
8. Kolesnikov A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 66-74.
9. Kolesnikov A.V., Shmakov A.K., Cheslavskaya A.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2015, no. 1, pp. 98-102.
10. Smirnov V.A., Biryukov N.M., Sadkov V.V., Rostkovskii I.G. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 1986, no. 9, pp. 46-48.
11. Kolesnikov A.V., Shmakov A.K. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 11(82), pp. 52-57.