

Д. А. Потянихин, Б. Н. Марьин

## О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ РАЗДАЧЕ ПО ПУАНСОНУ СЕДЛОВИДНОЙ ФОРМЫ

*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия  
Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре,  
Россия*

**Аннотация.** В статье представлены результаты моделирования в программном комплексе ANSYS процесса раздачи торца тонкостенной трубчатой заготовки по жесткому пуансону седловидной формы. Задача решается в квазистатической постановке без учета температурных эффектов. Пуансон моделируется как абсолютно жесткое тело, заготовка считается выполненной из алюминиевого сплава АМг6М. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния трубчатой заготовки, исследовано утонение стенок в зависимости от геометрических параметров пуансона.

**Ключевые слова:** обработка материалов давлением, формообразование, ANSYS, конечно-элементное моделирование, деформации, напряжения, контактная задача.

УДК: 539.3,621.7

**Введение.** Трубопроводы являются очень распространенными и важными элементами конструкций в машиностроении. Одной существенной проблемой при их производстве являются дефекты сварочных швов в местах соединения магистральной и отводной труб [1]. Может оказаться, что электродный металл проникает внутрь трубопровода и уменьшает площадь сечения отводного канала (рис. 1, а). Одним из способов преодоления указанной проблемы оказывается создание соединительных патрубков, у которых один торец предварительно подвергнут технологической операции раздачи [2-7]. В этом случае сварочный шов переносится в область магистральной трубы и даже в случае появления дефекта площадь ее поперечного сечения изменяется незначительно (рис. 1, б).

---

© Потянихин Д. А., Марьин Б. Н., 2018

*Потянихин Дмитрий Андреевич*

e-mail: potyanikhin@mail.ru, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

*Марьин Борис Николаевич*, доктор технических наук, профессор; профессор кафедры «Машиностроение и металлургия», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМиМ ДВО РАН №007-00285-18-00

Поступила 20.08.2018



Рис. 1. Возможные дефекты сварочного шва при создании трубопровода: а) шов в области отводной трубы; б) шов в области магистральной трубы.

Однако необходимо учитывать, что ширина сварочного шва составляет порядка 1 мм. Поэтому крайне желательно, чтобы после раздачи форма патрубка максимально повторяла форму двух соединенных труб с выбранным радиусом сопряжения (рис. 2).

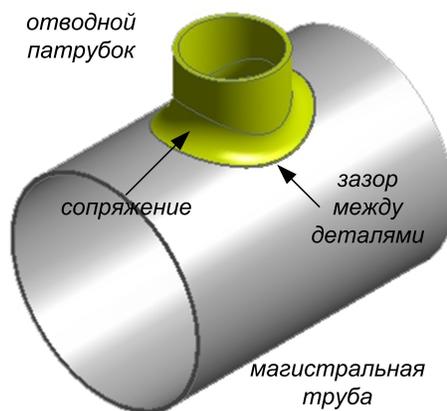


Рис. 2. Желаемая форма деформированного патрубка.

С этой целью в настоящей работе методами компьютерного моделирования изучается процесс формообразования соединительного патрубка в процессе раздачи цилиндрической трубчатой заготовки. Используется пуансон седловидной формы, форма которого обеспечивает производство патрубка как на рис. 2. Определяются остаточные напряжения и деформации, утонение стенок детали.

**1. Геометрическая модель и граничные условия.** На рис. 3 изображена геометрическая модель пуансона и трубчатой заготовки в разрезе, выполненная в САД-редакторе ANSYS DesignModeler. Длина заготовки  $l = 40$  мм, внешний диаметр  $d = 20$  мм, толщина стенки  $h = 1$  мм. Сам пуансон получен как объединение прямого кругового цилиндра, соответствующего внутреннему объему отводной трубы, и половины кругового цилиндра, соответствующего половине внутреннего объема магистральной

трубы. Оси цилиндров пересекаются под прямым углом, поверхности сопряжены. Размеры пуансона представлены на чертежах сечений пуансона координатными плоскостями  $OXY$  и  $OYZ$  (рис. 4, а, б). Радиус сопряжения  $R$  варьировался от 3 до 6 мм с шагом 1 мм.

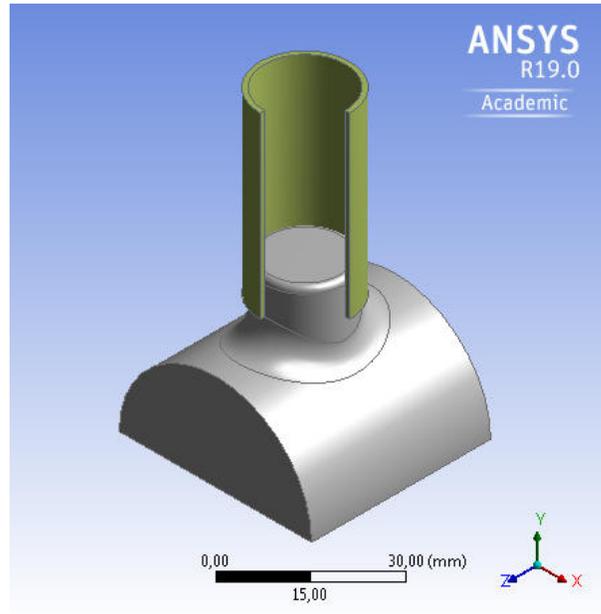


Рис. 3. Геометрическая модель трубчатой заготовки (в разрезе) и пуансона

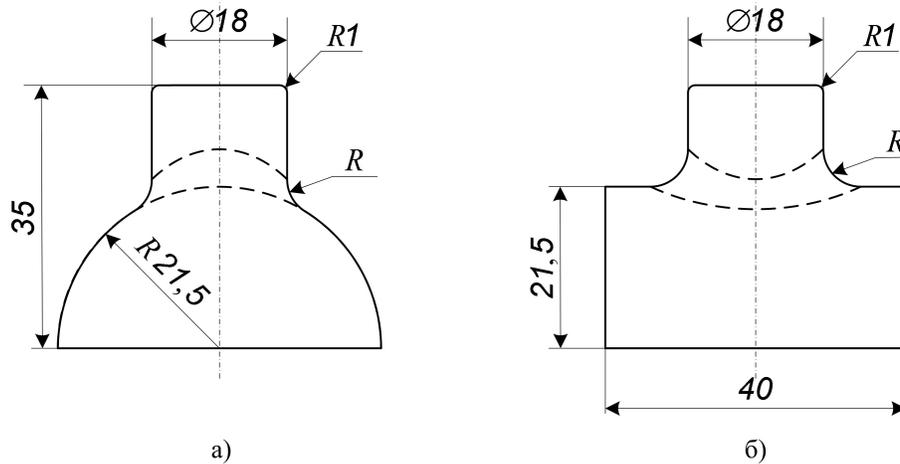


Рис. 4. Сечение пуансона плоскостями  $OXY$  (а) и  $OYZ$  (б).

Конечно-элементная модель представлена на рис. 5. Координатные плоскости  $OXY$  и  $OYZ$  являются плоскостями симметрии, поэтому в целях уменьшения размерности

задачи расчет производился на четверти геометрической модели. Пуансон считается абсолютно жестким телом, поэтому представляет интерес лишь его поверхность, контактирующая с заготовкой. При выполнении расчетов модель пуансона содержит один конечный элемент по толщине. Граничное условие соответствует его неподвижному закреплению. Следует отметить, что такие допущения не влияют на точность полученных результатов. Для сравнения решалась задача, где пуансон считался упругопластическим телом с геометрическими параметрами, представленными на рис. 3 и 4. Деформации пуансона оказались пренебрежимо малы, поэтому в дальнейшем было решено вовсе отказаться от их учета в пользу ускорения вычислений.

После дискретизации пуансон состоит из 1200 20-узловых элементов SOLID186 с промежуточными узлами [8]. Стенка трубы составлена из 4000 20-узловых элементов SOLID186. По толщине бралось 4 элемента. На поверхностях контакта коэффициент сухого трения считается равным 0,1. Контактная и целевая поверхности моделируются с использованием конечных элементов CONTA174 и TARGE170.

Верхний торец трубы подвергался перемещению в вертикальном направлении вниз. Величина перемещений  $s$  зависела от радиуса сопряжения:  $s = R\pi/2$ .

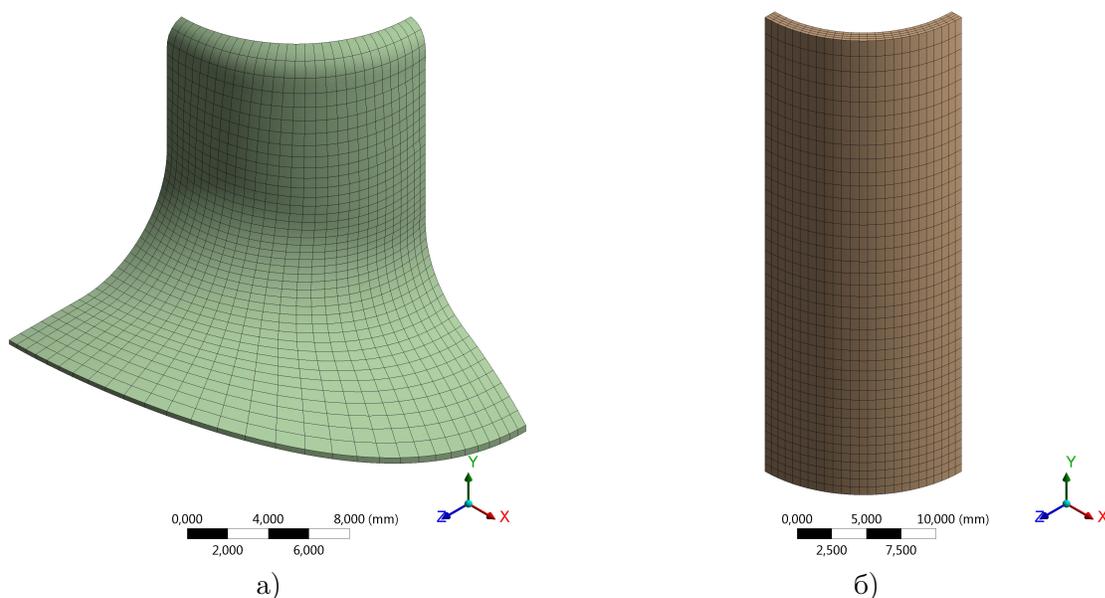


Рис. 5. Конечно-элементная модель пуансона (а) и заготовки (б).

Задача решается в модуле ANSYS Static Structural. Описание напряженно-деформированного состояния трубчатой заготовки производится с использованием упругопластической модели с линейным упрочнением [9,10]. Для разделения полных деформаций на обратимую и необратимую составляющие используется алгебраическое соотношение

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p. \quad (1)$$

Упругие деформации связаны с напряжениями обобщенным законом Гука

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij}^e + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{ij}$  и  $\varepsilon_{ij}^e$  – компоненты тензоров напряжений и обратимых деформаций,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера. Критерием появления пластических деформаций выбрано условие текучести Мизеса, которое в главных осях имеет вид

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала при одноосном напряженном состоянии.

Труба считается выполненной из алюминиевого сплава АМг6М [11]. Параметры материала [11-13]  $E = 7,1 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu = 0,33$ ,  $\sigma_T = 170$  МПа, модуль упрочнения  $E_T = 71$  МПа, предел прочности  $\sigma_B = 340$  МПа.

## 2. Результаты расчетов.

На рис. 6 показано распределение поля эквивалентных напряжений (по Мизесу)

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \left( \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

в детали в момент ее максимального вертикального перемещения для пуансонов с радиусами сопряжения от 3 до 6 мм. На рис. 7 остаточные поля напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  для тех же геометрических параметров получены после извлечения остапки. Напряжения нигде не превышают предел прочности материала  $\sigma_B$ .

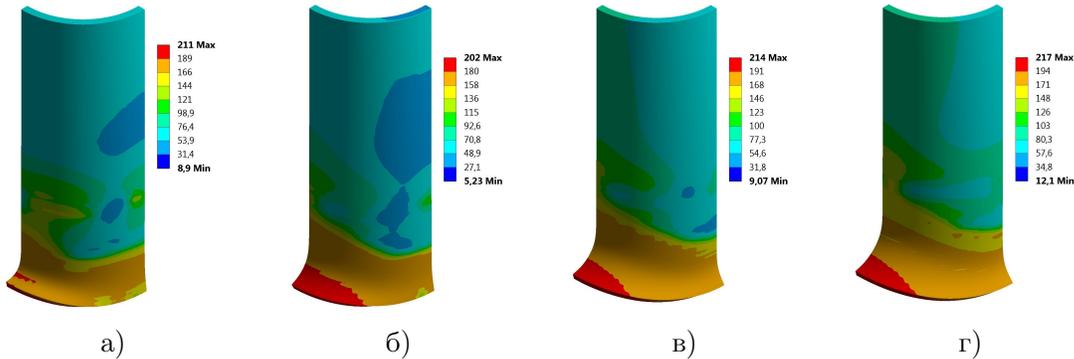


Рис. 6. Эквивалентные напряжения (по Мизесу) в момент максимального вертикального смещения: а)  $R = 3$  мм; б)  $R = 4$  мм; в)  $R = 5$  мм; г)  $R = 6$  мм.

Рис. 8 иллюстрирует поле остаточных упругих эквивалентных деформаций

$$\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^e = \frac{1}{1 + \nu} \left( \frac{(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e)^2 + (\varepsilon_2^e - \varepsilon_3^e)^2 + (\varepsilon_3^e - \varepsilon_1^e)^2}{2} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Наибольшее утонение стенок деформируемой детали достигается при наибольшем из рассматриваемых радиусов сопряжения  $R = 6$  мм. На рис. 9 показана толщина стенок в плоскостях  $OYZ$  (а),  $OXY$  (б) и под  $45^\circ$  к ним (в). Максимальное утонение не превосходит 29 процентов.

**Заключение.** Результаты проведенных расчетов демонстрируют возможность создания соединительных патрубков из трубчатых заготовок, выполненных из алюминиевого сплава АМг6М, способом раздачи по жесткому пуансону седловидной формы.

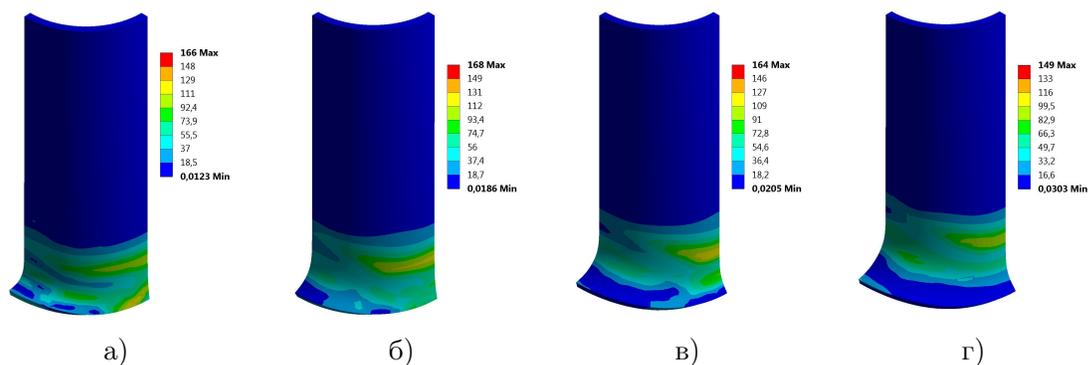


Рис. 7. Остаточные эквивалентные напряжения (по Мизесу) после извлечения инструмента: а)  $R = 3$  мм; б)  $R = 4$  мм; в)  $R = 5$  мм; г)  $R = 6$  мм.

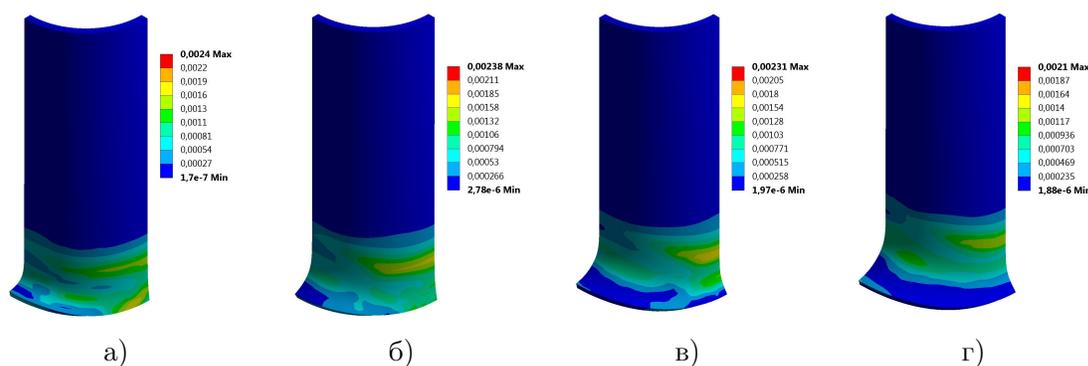


Рис. 8. Остаточные эквивалентные упругие деформации (по Мизесу) после извлечения инструмента: а)  $R = 3$  мм; б)  $R = 4$  мм; в)  $R = 5$  мм; г)  $R = 6$  мм.

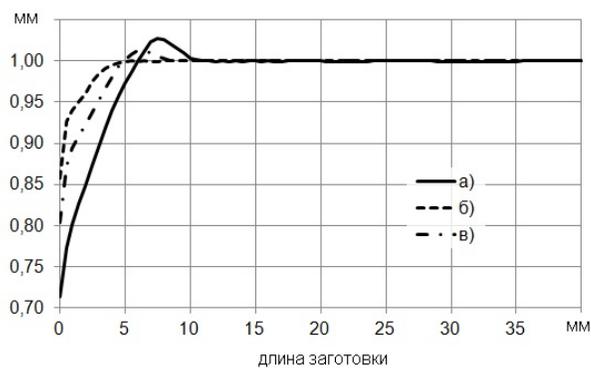


Рис. 9. Толщина стенки трубы после деформирования в плоскостях  $OYZ$  (а),  $OXY$  (б) и под  $45^\circ$  к ним (в).

Напряжения в детали не превосходят предела прочности материала. Зазор между патрубком и стенкой отверстия в магистральной трубе не превосходит 0,5 мм, следовательно, полностью перекрывается сварочным швом. Сварочный шов при этом, в случае дефекта, не уменьшит поперечное сечение отводной трубы. Таким образом, показана возможность создания соединительных патрубков для отводных труб в трубопроводах, не требующих дополнительной механической обработки, за одну технологическую операцию.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Марьин Б. Н., Ким В. А., Сысоев О. Е., Пхон Х. К., Мин К. Х. Анализ дефектов эксплуатируемых гидрогазовых систем трубопроводов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2017. Т. 1. №1(29). С. 79–89.
- [2] Марьин Б. Н., Феоктистов С. И., Кольхалов Д. Г., Куриный В. В., Иванов И. Н. Исследование совмещенных процессов при изготовлении деталей летательных аппаратов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т. 1. №2(26). С. 34-41.
- [3] Афанасьев А. Е., Каргин В. Р., Каргин Б. В. Компьютерный анализ процесса раздачи труб прессованием // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. Т. 8. №2. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/22TVN216.pdf> (дата обращения: 25.10.2018).
- [4] Веселов А. А. Определение размеров концов труб после раздачи методом пластического деформирования // Морской вестник. 2012. №1. С. 15–16.
- [5] Непершин Р. И. Раздача тонкостенной трубы пуансоном с криволинейным профилем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №1. С. 80–88.
- [6] Сосенушкин Е. Н., Яновская Е. А., Хачатрян Д. В., Смолевич И. Е., Киндеров В. Ю. Моделирование операции раздачи трубных заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. №3. С. 618–631.
- [7] Яковлев С. С., Крылов Д. В. Математическая модель операции раздачи трубных заготовок из анизотропных материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. №1. С. 79–88.
- [8] Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 272 с.
- [9] Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1975. 400 с.
- [10] Ивлев Д. Д. Механика пластических сред: В 2 т. Том 2. Общие вопросы. Жесткопластическое и упругопластическое состояние тела. Упрочнение. Деформационные теории. Сложные среды. М. : Физматлит, 2002. 448 с.
- [11] Промышленные алюминиевые сплавы : Справочник / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др.; Отв. редакторы Ф. И. Квасов, И. Н. Фридляндер. 2-е изд., перераб. и доп. М. :Металлургия, 1984. 527 с.
- [12] Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. С. В. Серенсена. М. : Машиностроение, 1975. 488 с.
- [13] Таблицы физических величин: справочник / под ред. И. К. Кикоина. М. : АТОМИЗДАТ, 1976. 1100 с.

*D. A. Potianikhin, B. N. Maryn*

## ON THE STRESS-STRAIN STATE OF A TUBULAR BLANK DURING EXPANSION BY SADDLE-SHAPED DIE

*Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure*

*Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure*

**Abstract.** In this paper, the process of thin-walled tubular blank end expansion by saddle-shaped die is simulated in ANSYS software package. The problem is solved in a quasistatic formulation without taking into account temperature effects. The die is modeled as an absolutely rigid body, the workpiece is considered to be made of aluminum alloy AMg6M. The analysis of the stress-strain state of the tubular detail was carried out. Wall thinning was investigated depending on the geometrical parameters of the die.

**Keywords:** processing of materials by pressure, shaping, ANSYS, finite element simulation, deformations, stresses, contact problem.

### REFERENCES

- [1] Mar'in B. N., Kim V. A., Sysoev O. E., Phon H. K., Min K. H. Analiz defektov ehkspluatiruemykh gidrogazovykh sistem truboprovodov // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. T. 1. №1(29). S. 79–89. (in Russian)
- [2] Mar'in B. N., Feoktistov S. I., Kolyhalov D. G., Kurinyj V. V., Ivanov I. N. Issledovanie sovmeshchennykh processov pri izgotovlenii detalej letatel'nykh apparatov // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. T. 1. №2(26). S. 34–41. (in Russian)
- [3] Afanas'ev A. E., Kargin V. R., Kargin B. V. Komp'yuternyj analiz processa razdachi trub pressovaniem // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE». 2016. T. 8. №2. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/22TVN216.pdf> (data obrashcheniya: 25.10.2018). (in Russian)
- [4] Veselov A. A. Opredelenie razmerov koncov trub posle razdachi metodom plasticheskogo deformirovaniya // Morskoj vestnik. 2012. №1. S. 15–16. (in Russian)
- [5] Nepershin R. I. Razdacha tonkostennoj truby puansonom s krivolinejnym profilem // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2010. №1. S. 80–88. (in Russian)
- [6] Sosenushkin E. N., YAnovskaya E. A., Hachatryan D. V., Smolovich I. E., Kinderov V. YU Modelirovanie operacii razdachi trubnykh zagotovok // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013. №3. S. 618–631. (in Russian)
- [7] YAkovlev S. S., Krylov D. V. Matematicheskaya model' operacii razdachi trubnykh zagotovok iz anizotropnykh materialov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2011. №1. S. 79–88. (in Russian)

---

*Potianikhin Dmitrii Andreevich*

e-mail: [potyanikhin@mail.ru](mailto:potyanikhin@mail.ru), Cand. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure.

*Maryn Boris Nikolaevich*, Dr. Sci. Tech., Professor; Professor of Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure.

- [8] Kaplun A. B., Morozov E. M., Olfer'eva M. A. ANSYS v rukah inzhenera: prakticheskoe rukovodstvo. M. : Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2009. 272 s. (in Russian)
- [9] Malinin N. N. Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti. Uchebnik dlya studentov vuzov. Izd. 2-e, pererab. i dop. M. : Mashinostroenie, 1975. 400 s. (in Russian)
- [10] Ivlev D. D. Mekhanika plasticheskikh sred: V 2 t. Tom 2. Obshchie voprosy. Zhestkoplasticheskoe i uprugoplasticheskoe sostoyanie tela. Uprochnenie. Deformacionnye teorii. Slozhnye sredy. M. : Fizmatlit, 2002. 448 s. (in Russian)
- [11] Promyshlennyye alyuminievyye splavy : Spravochnik / S. G. Alieva, M. B. Al'tman, S. M. Ambarcumyan i dr.; Otv. redaktory F. I. Kvasov, I. N. Fridlyander. 2-e izd., pererab. i dop. M. :Metallurgiya, 1984. 527 s. (in Russian)
- [12] Serensen S. V., Kogaev V. P., SHnejderovich R. M. Nesushchaya sposobnost' i raschet detalej mashin na prochnost'. Rukovodstvo i spravochnoe posobie. Izd. 3-e, pererab. i dop. Pod red. S. V. Serensena. M. : Mashinostroenie, 1975. 488 s. (in Russian)
- [13] Tablicy fizicheskikh velichin: spravochnik / pod red. I. K. Kikoina. M. : ATOMIZDAT, 1976. 1100 s. (in Russian)