

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №9 (171). С. 3-9.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №9 (171). P. 3-9.

Научная статья
УДК 621.983.3.539.376
doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-3-9

Горячее деформирование торцевых элементов корпусных конических заготовок

Сергей Николаевич Ларин¹, Д.Т.Н.

Андрей Александрович Пасынков², К.Т.Н.

^{1, 2} Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ mpf-tula@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9063-1548>

² sulee@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Переходники трубопроводных систем являются весьма востребованными деталями в узлах двигателей. В трубопроводных системах, работающих в агрессивных средах данные детали требуют применения специальных цветных сплавов, отличающихся высокой прочностью. Их изготовление весьма затруднительно. Одним из вариантов их получения является горячая штамповка элементов труб в условиях медленного формоизменения. В статье исследована операция формообразования внутреннего утолщения на тонкостенной конической корпусной заготовке. Целью формирования утолщения является подготовка торца переходника для трубопроводных систем, представляющего из себя усеченный тонкостенный под дальнейшую сварку с другими элементами трубопроводных систем. Формирование толщеного края предполагается производить частичной осадкой торца заготовки. Выполнено моделирование данной операции в программном комплексе DEFORM, в ходе которого произведена оценка влияния режимов обработки и геометрии рабочего инструмента на энергосиловые параметры процесса. Предполагается, что материалом заготовки является титановый сплав ВТ6. Применяемый материал предполагает реализацию процесса высадки в горячих условиях в скоростных условиях формообразования, обеспечивающих минимальные силы и оптимальное напряжённое состояние заготовки. При высадке важно учитывать параметры процесса, такие как давление, температура и скорость, чтобы минимизировать или избежать повреждения заготовки. Выполнен ряд опытов, в ходе которых установлено влияние угла конусности, рабочего хода инструмента, скорости деформирования контактного трения. Выявлено, что при рассматриваемой схеме деформирования наибольшее влияние оказывает изменение угла конусности заготовки на силу, что очевидно связано с изменением кинематики течения материала при больших углах конусности.

Ключевые слова: высадка, исследование, конические заготовки, моделирование

Для цитирования: Ларин С.Н., Пасынков А.А. Горячее деформирование торцевых элементов корпусных конических заготовок // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 3–9
doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-3-29

Hot forming of the end walls of cone body parts

Sergey N. Larin¹, D. Eng.

Andrey A. Pasyunkov², PhD. Eng.

^{1, 2} Tula State University, Tula, Russia

¹ mpf-tula@rambler.ru,

² sulee@mail.ru

Abstract. Pipeline system adapters are highly demanded parts in engine units. In pipeline systems operating in aggressive environments, these parts require the use of special non-ferrous alloys characterized by high strength. Their manufacture is very difficult. One of the options for their production is hot stamping of pipe elements under slow forming conditions. The article investigates the operation of forming an internal thickening on a thin-walled conical body blank. The purpose of forming the thickening is to prepare the end face of the adapter for pipeline systems, which is a truncated thin-walled one for further welding with other elements of pipeline systems. It is assumed that the formation of a thick edge is produced by partial upsetting of the end face of the blank. This operation was simulated in the DEFORM software package, during which an assessment was made of the effect of processing modes and the geometry of the working tool on the energy-power parameters of the process. It is assumed that the material of the blank is titanium alloy VT6. The material used assumes the implementation of the upsetting process in hot conditions under high-speed forming conditions, providing minimum forces and an optimal stress state of the workpiece. During upsetting, it is important to take into account the process parameters, such as pressure, temperature and speed, in order to minimize or avoid damage to the workpiece. A number of experiments were carried out, during which the influence of the cone angle, the working stroke of the tool, and the rate of deformation of contact friction were established. It was found that with the deformation scheme under consideration, the greatest influence is exerted by a change in the cone angle of the workpiece on the force, which is obviously associated with a change in the kinematics of the material flow at large cone angles.

Keywords: upset, research, cone blanks, modeling

For citation: Larin S.N., Pasyukov A.A. Hot forming of the end walls of cone body parts / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 3–9. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-3-9

Формирование внутреннего утолщения на тонкостенной конической корпусной заготовке посредством операций формообразования применяется для создания участков увеличенной контактной площадью на трубных заготовках. Формирование утолщений на корпусных заготовках методом изотермической штамповки представляет собой эффективную технологию, которая позволяет создавать детали с необходимыми механическими свойствами и формой, повышая надежность и долговечность изделий. Этот метод часто применяется в специальном машиностроении и атомной, где требуется высокая прочность при малых весогабаритных характеристиках.

Выполнено моделирование данной операции в программном комплексе DEFORM, в ходе которого произведена оценка влияния режимов обработки и геометрии рабочего инструмента на энергосиловые параметры процесса. Исследование проводилось для сплава ВТ6 с постоянной температурой при деформировании 900 °С. Схема исследуемого процесса представлена на рис. 1. В процессе моделирования предполагалось использование трубных заготовок с наружными диаметрами $D = 150$ мм. Высота недеформируемого участка заготовки принималась равной $H = 12$ мм. Условием остановки расчёта

принималось достижение расстояния от рабочего торца пуансона до поверхности матрицы $h = 5$ мм. В процессе моделирования менялся коэффициент трения между инструментом и заготовкой $\mu = 0,3 \dots 0,7$, скорость перемещения деформирующего пуансона $v = 25 \dots 100$ мм/мин. Угол заготовок варьировался в интервале $\alpha = 2 \dots 7^\circ$.

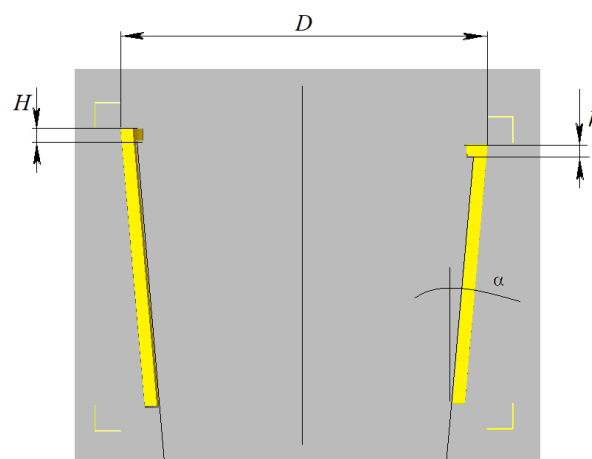


Рис. 1. Схема высадки утолщений на внутренней поверхности конических оболочек

Fig. 1. The scheme of thickening on the inner surface of cone shells

При высадке важно учитывать параметры процесса, такие как давление,

температура и скорость, чтобы минимизировать или избежать повреждения заготовки. Выполнен ряд экспериментов, в ходе которых установлено влияния угла конусности, рабочего хода инструмента, скорости деформирования контактного трения.

Была выполнена оценка изменения интенсивности напряжений для характерных точек в сечении детали в течении времени деформирования. Схемы с иллюстрированием точек для контроля изменения интенсивностей напряжений представлены на рис. 2.

Графики изменения интенсивности напряжений в этих точках в течении процесса высадки для углов конусности заготовки

$\alpha = 2^\circ$ и $\alpha = 5^\circ$ при разных скоростях деформирования представлены на рис. 3 и 4.

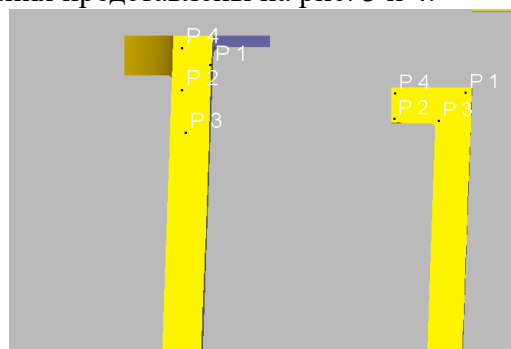
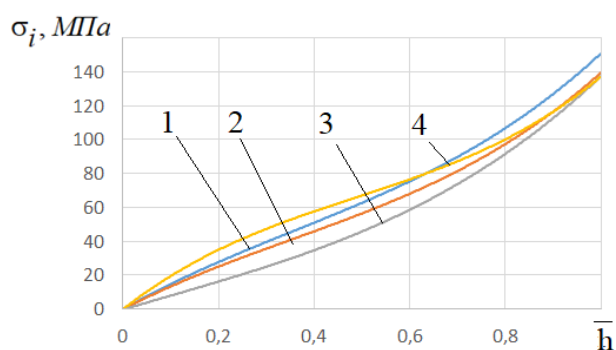
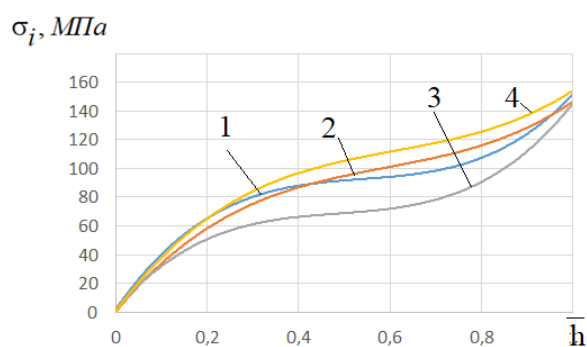


Рис. 2. Эскиз заготовки с указанием точек для контроля

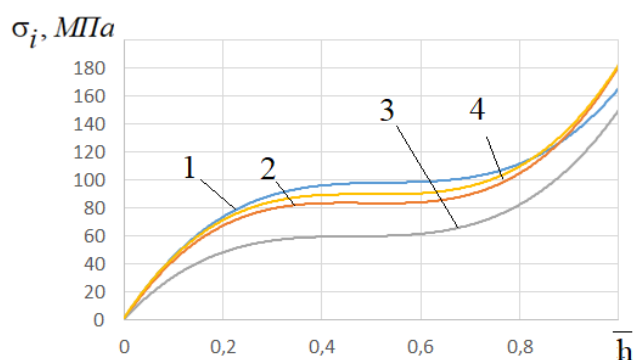
Fig. 2. Sketch of the blank with the indication of the control points



а)



б)



в)

Рис. 3. График зависимости интенсивности напряжений для контрольных точек ($\alpha = 2^\circ$):
а – $v_0 = 25$ мм/мин; б – $v_0 = 50$ мм/мин; в – $v_0 = 100$ мм/мин

Fig. 3. Graph of stress intensity dependence for control points ($\alpha=2^\circ$):
а – $v_0 = 25$ mm/min; б – $v_0 = 50$ mm/min; в – $v_0 = 100$ mm/min

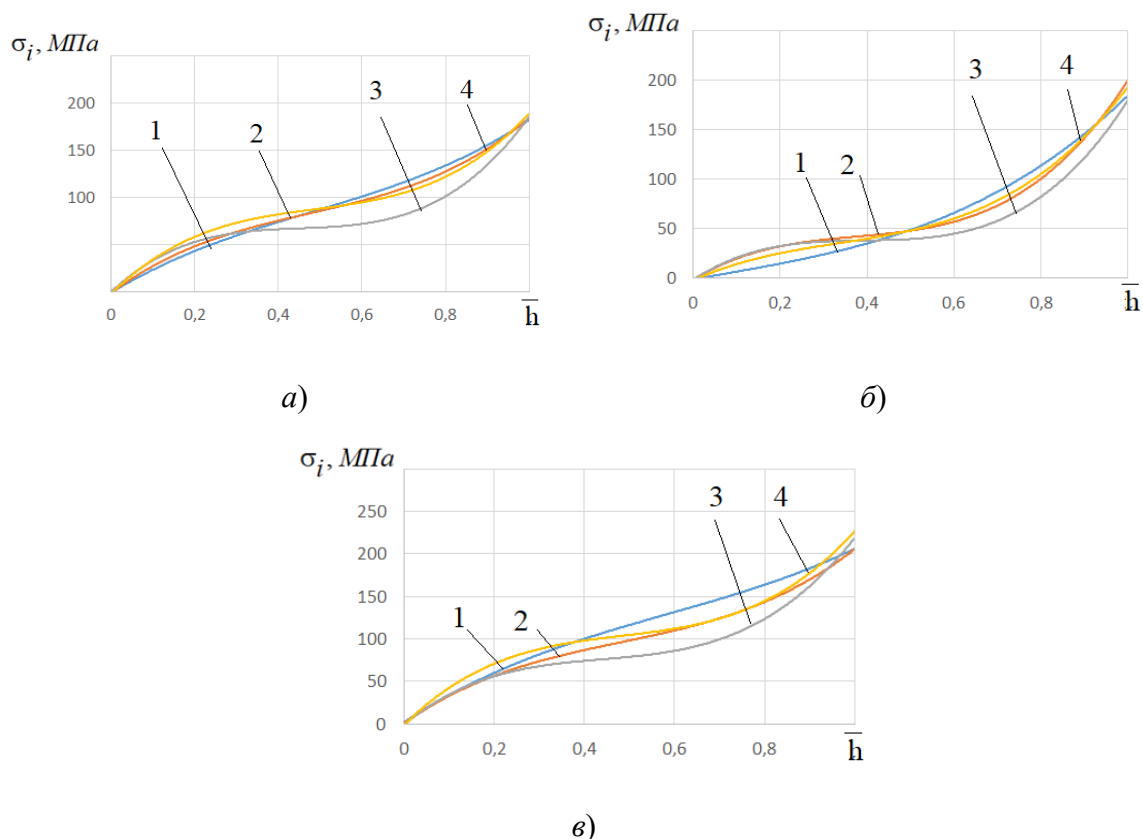


Рис. 4. График зависимости интенсивности напряжений для контрольных точек ($\alpha = 5^\circ$):
а – $v_0 = 25$ мм/мин; б – $v_0 = 50$ мм/мин; в – $v_0 = 100$ мм/мин

Fig. 4. Graph of stress intensity dependence for control points ($\alpha = 5^\circ$):
 $v_0 = 25$ mm/min; б – $v_0 = 50$ mm/min; в – $v_0 = 100$ mm/min

Как видно из графиков величины интенсивностей напряжений достигают максимума в конечный этап деформирования, и для всех 4 контрольных точек в этот момент времени деформирования их значения выравниваются. В течении всего времени деформирования значения интенсивностей напряжений в контрольных точках отличаются в зависимости от условий формоизменения на 10...40 %. В целом можно сказать, что уменьшение скорости деформирования позволяет добиться снижения неравномерности напряженного состояния в заготовке. Большим углом конусности заготовки соответствуют большие значения интенсивностей напряжений.

График зависимости максимальных величин интенсивности напряжений от угла конусности для разных скоростей деформирования на нестационарной стадии процесса представлен на рис. 5.

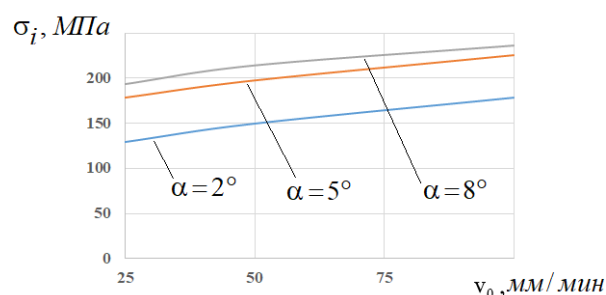


Рис. 5. График зависимости интенсивности напряжений от скорости деформирования

Fig. 5. Graph of stress intensity dependence on deformation rate

Установлено, что на нестационарной стадии процесса рост угла конусности ведет к росту интенсивности напряжений на 40 %. Увеличение скорости деформирования приводит к росту интенсивности напряжений при высадке на 28 %.

Выполнена оценка влияния скоростей деформирования, углов конусности и контактного трения на силу высадки и удельное давление.

График зависимости давления от угла конусности для разных скоростей деформирования представлен на рис. 6.

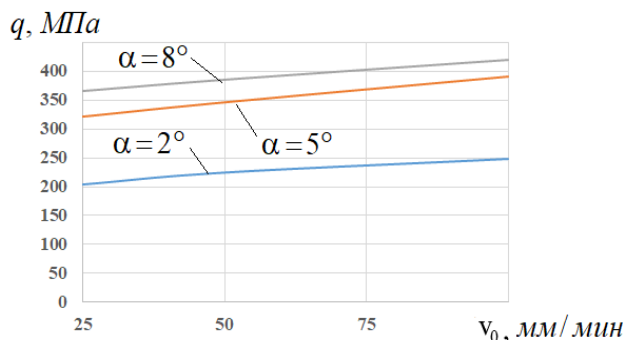


Рис. 6. График зависимости давления от скорости деформирования

Fig. 6. Graph of pressure dependence on deformation rate

Выявлено, что максимальное влияние на давление оказывает изменение скоростных режимов деформирования. Рост угла конусности ведет к росту давления на контактных границах на 20 %. Увеличение скорости деформирования приводит к росту силы при высадке на 55 %.

График зависимости силы от угла конусности для разных скоростей деформирования представлен на рис. 7.

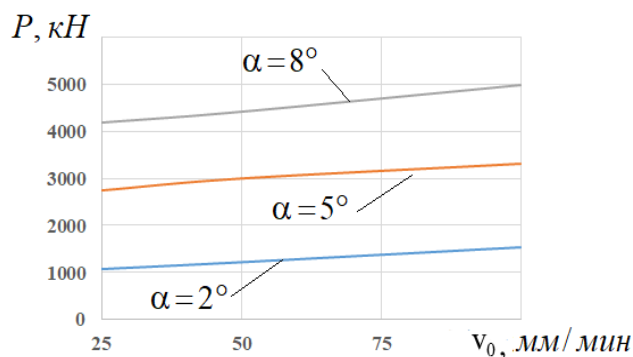


Рис. 7. График зависимости силы от скорости деформирования

Fig. 7. Graph of force dependence on deformation rate

Выявлено, что при рассматриваемой схеме деформирования наблюдается заметное влияние угла конусности заготовки на силу, что очевидно связано с интенсификацией процесса бокового выдавливания стенки, связанного с изменением характера течения материала при больших углах конусности. Установлено, что увеличение угла конусности ведет к росту силы в 4 раза, что связано с изменением схемы деформаций при росте α . Увеличение скорости деформирования приводит к росту силы при высадке на 40 %.

График зависимости силы от контактного трения для разных скоростей деформирования представлен на рис. 8. В среднем выявлено, что увеличение коэффициента трения приводит к росту силовой нагрузки на инструмент на 12...15 %.

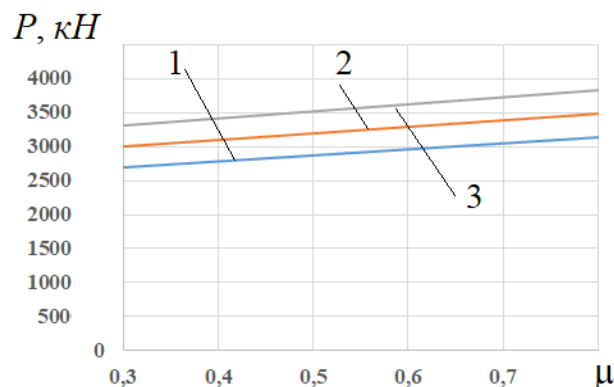


Рис. 8. График зависимости силы от коэффициента контактного трения

Fig. 8. Graph of the force dependence on the coefficient of contact friction

Полученные результаты позволяют выполнить регрессионное моделирование силовых режимов высадки конической заготовки. В качестве основных варьируемых параметров принимались скорость деформирования v_0 , мм/мин; угол конусности заготовки α и коэффициент трения μ .

Сформирована таблица факторного пространства для оценки сил (табл. 1) [12]. В таблице 2 дана матрица планирования [12].

1. Факторное пространство оценки силы

1. The factor space of force assessment

Факторы			Уровни варьирования факторов		
Наименование фактора	Натуральное значение фактора	Кодированное обозначение фактора	$X_{i \min}$	$X_{i 0}$	$X_{i \max}$
Угол конусности заготовки	α	X_1	2	4	6
Скорость деформирования	v_0	X_2	25	62,5	100
Коэффициент трения	μ	X_3	0,3	0,5	0,7

2. Матрица планирования эксперимента

2. The design experiment matrix

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	
1	+	–	–	–	1050
2	+	+	–	–	2400
3	+	–	+	–	1400
4	+	+	+	–	2900
5	+	–	–	+	1312,5
6	+	+	–	+	3000
7	+	–	+	+	1750
8	+	+	+	+	3625

Однородность оценивается с помощью критерия Кохрана (0,29). Проверка адекватности полученных моделей выполнялось с помощью критерия Фишера (0,55). По результатам

статистического моделирования было получено уравнение регрессии в кодированных и натуральных значениях факторов соответственно:

$$Y = 2179 + 801X_1 + 239X_2 + 242X_3 + 89X_1 \cdot X_3; \quad (1)$$

$$P = 180\alpha \cdot \mu + 302,6\alpha + 256\mu - 23,41 + 7,35v. \quad (2)$$

Выполнено моделирование высадки конической заготовки, в ходе которых установлено влияние угла конусности, рабочего хода инструмента, скорости деформирования контактного трения. Выявлено, что при рассматриваемой схеме деформирования наибольшее влияние оказывает изменение угла конусности заготовки на силу, что очевидно связано с изменением кинематики течения материала при

больших углах конусности. Применение заготовок с углом конусности более 3° приводит к кратному росту сил деформирования и может потребовать более мощного оборудования. Установлено, что реализация процесса деформирования при более низких скоростях позволяет снизить силовые нагрузки на инструмент и неравномерность напряжённого состояния в заготовке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка и штамповка:** справочник: Горячая объемная штамповка / под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
2. **Малинин, Н. Н.** Ползучесть в обработке металлов: учебное пособие для вузов. М.: Юрайт, 2022. 221 с.
3. **Яковлев С.П., Чудин В.Н. и др.** Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 2003. 427с.
4. **Гун Г.Я.** Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Metallurgiya. 1980. 456 с.
5. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением М.: Metallurgiya, 1986. 688 с.
6. **Теория обработки металлов давлением** / под ред. Голенкова В.А., Яковлева С.П. и др. / М. Машиностроение. 2009. 442 с.
7. **Ларин С.Н., Чудин В.Н., Пасынков А.А.** Высадка краевого утолщения на корпусах при нестационарном вязкопластическом деформировании // Цветные металлы. 2020. 7. С. 88–78.
8. **Черняев А.В., Чудин В.Н., Гладков В.А.** Изотермическое выдавливание утолщений и фланцев на осесимметричных заготовках // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. № 4. С. 164–167.
9. **Чудин В.Н.** Горячее выдавливание внутренних ступеней на корпусах // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 1. С. 10–13.
10. **Романов К.И.** Механика горячего формоизменения металлов. М.: Машиностроение, 1993, 240 с.
11. **Пасынков А.А., Ларин С.Н., Исаева А.Н.** Теоретическое обоснование схемы обратного изотермического выдавливания трубной заготовки с активным трением и вытяжкой ее краевой части // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. № 10. С. 462–465
12. **Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Лазарев А.А.** Активный статистический анализ систем с теоретическими моделями проведением машинного эксперимента // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. Вып. 5. С. 98–112.

REFERENCES

1. Forging and stamping: a reference book: In 4 volumes. Vol. 2. Hot forging / edited by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 720 p.
2. Malinin N.N. Creep in metalworking: a textbook for universities. Moscow: Yurait, 2022, 221 p.
3. Yakovlev S.P., Chudin V.N., et al. Isothermal deformation of high-strength anisotropic materials. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 427 p.
4. Gun G.Ya. Theoretical foundations of metal forming. Moscow: Metallurgiya, 1980, 456 p.
5. Kolmogorov V.L. Mechanics of metal forming. Moscow: Metallurgiya, 1986, 688 p.
6. Theory of metal forming / ed. et al. Golenkova V.A., Yakovleva S.P. and others / M. Mashinostroenie, 2009, 442 p.
7. Larin S.N., Chudin V.N., Pasinkov A.A. Upsetting of edge thickening on housings under non-stationary viscoplastic deformation. Non-ferrous metals, vol. 7, pp. 88–78.
8. Chernyaev A.V., Chudin V.N., Gladkov V.A. Isothermal extrusion of thicknesses and flanges on axisymmetrical workpieces. Procurement production in mechanical engineering. 2021, No. 4, pp. 164–167.
9. Chudin V.N. Hot extrusion of inner stages in housings. Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2018, No. 1. pp. 10–13.
10. Romanov K.I. Mechanics of hot forming of metals. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 240 p.
11. Pasyнков A.A., Larin S.N., Isaeva A.N. Theoretical substantiation of reverse isothermal extrusion scheme of pipe billet with active friction and drawing of its edge part // Procurement in mechanical engineering. 2020, No. 10, pp. 462–465
12. Panfilov G.V., Nedoshivin S.V., Lazarev A.A. Active statistical analysis of systems with theoretical models for the conduct of machine experiment // Izvestiya TulSU. Run: Technical sciences. Tula: Izdatelstvo TulSU, 2014, Issue 5, pp. 98–112.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.03.2025; одобрена после рецензирования 25.03.2025; принята к публикации 16.04.2025.

The article was submitted 04.03.2025; approved after reviewing 25.03.2025; assepted for publication 16.04.2025.