

ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ ПРИ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА**В.Н. Чудин¹**

vladimir-chudin@yandex.ru

В.И. Платонов²

pvi_1@rambler.ru

¹ РУТ (МИИТ), Москва, Российская Федерация² ТулГУ, г. Тула, Российская Федерация**Аннотация**

Рассмотрен процесс вытяжки с утонением стенки анизотропных заготовок из высокопрочных материалов в условиях вязкопластического деформирования. Предложены соотношения для определения напряжений и сплошности материала заготовки при вытяжке с нагревом цилиндрических изделий с утоненной стенкой. Состояние горячего материала при схеме плоской деформации принято вязкопластичным. Используются уравнение равновесия, условие текучести для анизотропного материала, уравнения кинетики несплошности, позволяющие спрогнозировать прочностные характеристики и точность получаемых изделий. Выполнены расчеты режимов процесса вытяжки для заготовок из алюминиевого сплава АМгб и сплава титана ВТ6с. Приведены графические зависимости изменения удельной силы операции и сплошности материала от скорости перемещения деформирующего пуансона. При заданных температурах формообразования алюминиевому сплаву соответствует энергетическое уравнение сплошности, а титановому — деформационное. Исследовано влияние анизотропии механических свойств заготовки на технологические режимы вытяжки. Показано, что силовые режимы и изменение сплошности деформируемого материала зависят от коэффициента анизотропии при заданной температуре. Этот фактор определяется деформационным упрочнением материала заготовки и разупрочнением во времени

Ключевые слова

Вязкопластичность, напряжения, деформации, скорость, несплошность материала

Поступила 21.01.2022

Принята 20.12.2022

© Автор(ы), 2023

Введение. Вытяжка с утонением стенки используется в обработке давлением для получения изделий с необходимыми прочностными характеристиками и точностью [1]. Ряд теоретических и технологических вопросов

данного процесса приведен в [2–9]. Высокопрочные материалы подвергаются вытяжке при нагреве области деформаций, при этом наблюдается существенное влияние этого процесса на силовой и деформационный режимы скорости деформирования, так как материал заготовки проявляет вязкие свойства (ползучесть) [5]. Аналитические выражения позволяют проектировать оптимальные процессы вытяжки с нагревом.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Рассмотрим вариант расчета режима вытяжки изделия с утонением стенки. Исходный материал заготовки примем анизотропным [6]. Расчетная схема

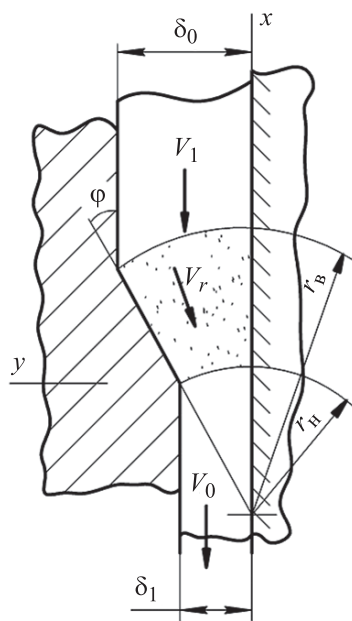


Рис. 1. Расчетная схема вытяжки с утонением стенки

вытяжки приведена на рис. 1, где r_n , r_b — нижняя и верхняя границы нагретой области деформаций; δ_0 , δ_1 — толщины стенки заготовки до и после вытяжки; φ — угол конуса матрицы.

Состояние материала в области деформации является вязкопластическим и определяется уравнением [5, 10]

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \dot{\xi}_e^n, \quad (1)$$

где σ_e , ε_e , $\dot{\xi}_e$ — эквивалентные напряжение, деформация и скорость деформации; A , m , n — константы материала.

В соответствии с уравнением (1) происходит деформационное упрочнение материала заготовки, которое уменьшается релаксацией напряжения в связи с ползучестью. При плоской схеме деформации перемещение материала в области деформаций радиальное. Скорость материала в области деформаций представим функцией радиальной координаты в виде

$$V_r = [1 - a(r - r_n)] V_0. \quad (2)$$

Здесь $a = 1 - c / (r_b - r_n)$, $c = r_n / r_b$; $r_n \leq r \leq r_b$ — радиальная ордината точки материала в области деформаций; V_0 — скорость вытяжки.

Функция (2) соответствует граничным условиям $V_r = V_0$ при $r = r_n$ и $V_r = V_1 = cV_0$ при $r = r_b$.

Эквивалентные деформацию, скорость деформации и напряжение представим, учитывая уравнение (1), в виде

$$\begin{aligned}\varepsilon_e &= \lambda \ln \frac{r_B}{r}; \quad \xi_e = \frac{d\varepsilon_e}{dt} = \frac{\lambda V_r}{r}; \\ \sigma_e &= A\lambda^{m+n} \left(\frac{V_r}{r}\right)^n \left(\ln \frac{r_B}{r}\right)^m,\end{aligned}\quad (3)$$

где $\lambda = \left[\frac{2(1+3R+2R^2)}{3(2+R)}\right]^{0,5}$ — при схеме плоской деформации, R — коэффициент анизотропии материала заготовки. Для изотропного материала $\lambda = 2/\sqrt{3}$.

Для расчета компонент напряжений воспользуемся уравнением равновесия и условием текучести [11, 12] анизотропного материала:

$$\begin{aligned}r \frac{d\sigma_1}{dr} + \sigma_1 - k\sigma_3 &= 0; \\ \sigma_1 - \sigma_3 &= \gamma\sigma_e.\end{aligned}\quad (4)$$

Здесь σ_1, σ_3 — радиальные и нормальные напряжения в продольном сечении области деформаций ($\sigma_1 > 0, \sigma_3 < 0$); $k = 1 + \mu_{\text{п}} - \mu_{\text{м}}$, где $\mu_{\text{п}}, \mu_{\text{м}}$ — коэффициенты трения заготовки на пуансоне и конусе матрицы; $\gamma = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}}$, для изотропного материала $\gamma = 2/\sqrt{3}$.

Система (4) приводится к неоднородному уравнению

$$\frac{1}{\sigma_1} \frac{d\sigma_1}{dr} + (1-k) \frac{1}{r} = -\frac{\gamma k \sigma_e}{r \sigma_1}.\quad (5)$$

Радиальное напряжение будем определять в виде

$$\sigma_1 = c(r) r^{k-1},\quad (6)$$

что следует из решения однородного уравнения

$$\frac{1}{\sigma_1} \frac{d\sigma_1}{dr} + (1-k) \frac{1}{r} = 0,$$

соответствующего уравнению (5).

Дифференцируя выражение (6), получаем

$$\frac{d\sigma_1}{dr} = c'(r) r^{k-1} + c(r)(k-1)r^{k-2}.\quad (7)$$

Выражения (6) и (7) внесем в исходное уравнение (5) и получим

$$c(r) = - \int_r^{r_B} k \gamma r^{-k} \sigma_e dr, \quad (8)$$

где σ_e — эквивалентное напряжение (3).

В соответствии с выражениями (6), (8) и (3) напряжение определяется как функция радиальной координаты:

$$\sigma_1 = c(r)r^{k-1} = \left[-Ak\gamma\lambda^{m+n} \int_r^{r_B} r^{-k-n} V_r^n \left(\ln \frac{r_B}{r} \right)^m dr \right] r^{k-1}; \quad (9)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 - \gamma\sigma_e; \quad \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3).$$

Наибольшее значение растягивающего радиального напряжения соответствует координате $r = r_H$.

Осевое напряжение и, следовательно, удельная сила вытяжки определяются выражением

$$\sigma_x = p = \frac{r_H \Phi}{\delta_1} (\sigma_1)_{\max} \cos \frac{\Phi}{2}. \quad (10)$$

Выполним оценку потери сплошности материала заготовки, используя уравнения кинетики несплошности [6, 13]. Учитывая выражения (2) и (3), при замене переменной $dt = dr / V_r$ получаем

$$\psi = 1 - \frac{1}{A_{\text{пр}}} \int \sigma_e \xi_e dt = 1 - \frac{A}{A_{\text{пр}}} \lambda^{1+m+n} \int_{r_B}^{r_H} \left(\frac{1}{r} \right)^{1+n} V_r^n \left(\ln \frac{r_B}{r} \right)^m dr \quad (11)$$

— по энергетическому уравнению;

$$\psi = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{e \text{ пр}}} = 1 - \frac{\lambda}{\varepsilon_{e \text{ пр}}} \ln \frac{r_B}{r_H} \quad (12)$$

— по деформационному уравнению.

В (11), (12) $1 \geq \psi \geq 0$ — сплошность материала; $A_{\text{пр}}$, $\varepsilon_{e \text{ пр}}$ — предельные константы разрушения материала.

Конечную сплошность можно рассчитать исходя из изменения толщины заготовки. Поскольку при плоской деформации

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_y = \ln \frac{\delta_0}{\delta_1}; \quad \varepsilon_z = 0,$$

то справедливы осредненные соотношения

$$\begin{aligned}\varepsilon_e &= \lambda \ln \frac{\delta_0}{\delta_1}; & \xi_e &= \frac{\varepsilon_e}{t_k}; \\ \sigma_e &= A \varepsilon_e^{m+n} t_k^{-n},\end{aligned}\quad (13)$$

где $t_k = (r_B - r_H) / V_r$ — конечное время прохождения материала по области деформаций.

По энергетическому и деформационному уравнениям конечная сплошность в точках области деформаций будет определяться при использовании выражений (13) следующими соотношениями:

$$\psi = 1 - \frac{A}{A_{\text{пр}}} \left(\lambda \ln \frac{\delta_0}{\delta_1} \right)^{1+m+n} \left(\frac{1}{r_B - r_H} \right)^n \int_{r_B}^{r_H} V_r^{n-1} dr; \quad (14)$$

$$\psi = 1 - \frac{\lambda}{\varepsilon_{e \text{ пр}}} \ln \frac{\delta_0}{\delta_1}. \quad (15)$$

Критическое состояние материала определяется при полной потере сплошности, т. е. при $\psi = 0$.

Выражения (11) и (14) применимы для материалов, сплошность которых зависит от скорости вытяжки. Если такой зависимости нет, то используются выражения (12) и (15). Константы разрушения в уравнениях определяются при известной жесткости схемы напряжений. Поскольку напряжения следуют из выражений (9), имеем

$$\eta = \frac{1}{3\sigma_e} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (16)$$

— жесткость схемы напряжений. Наибольшая потеря сплошности соответствует условию $r = r_H$, при этом условии определяются напряжения и жесткость.

Предельные константы рассчитывают по формулам из [5]:

$$A_{\text{пр}} = A_1 \exp \eta c_1; \quad \varepsilon_{e \text{ пр}} = A_2 \exp \eta c_2, \quad (17)$$

где A_1, A_2, c_1, c_2 — коэффициенты, определяемые опытным путем.

Результаты. Расчеты выполнены для вытяжки изделий из алюминиевого сплава АМгб при 450 °С и титанового сплава ВТ6с при 930 °С. В уравнении (1) константы материалов следующие: $A = 55 \text{ МПа} \cdot \text{с}^n$, $n = 0,025$, $m = 0,1$ — для сплава АМгб и $A = 65 \text{ МПа} \cdot \text{с}^n$, $n = 0,06$, $m = 0,03$ — для сплава ВТ6с. Принято: $\delta_0 = 3 \text{ мм}$, $\delta_1 = 2,2 \text{ мм}$, $\varphi = 30^\circ$,

$r_H = 3,5$ мм, $r_B = 5,5$ мм. Предельные константы: $A_{пр} = 76$ МПа для сплава АМгб и $\varepsilon_{e_{пр}} = 1,3$ для сплава ВТбс.

Расчетные графики удельной силы $p(V_0)$ и сплошности $\psi(V_0)$ для изотропного и анизотропного материалов при $r = r_H$ приведены на рис. 2.

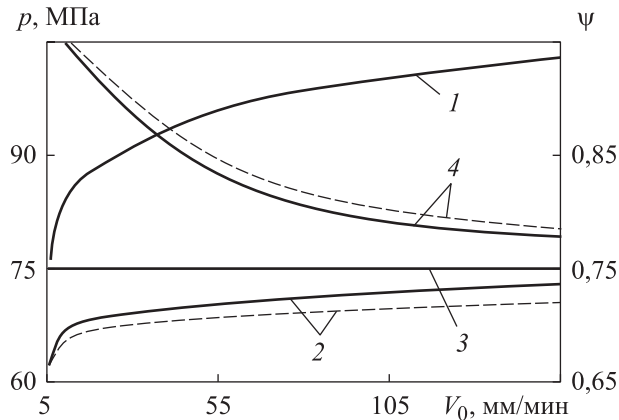


Рис. 2. Расчетные графики удельной силы $p(V_0)$ (1, 2) и сплошности $\psi(V_0)$ (3, 4) для сплавов ВТбс (1, 3) и АМгб (2, 4) при коэффициенте анизотропии материала заготовки $R = 1$ (сплошная) и 1, 5 (штриховая)

Обсуждение полученных результатов. Из графиков следует, что удельная сила уменьшается при снижении скорости (увеличении длительности) вытяжки. Особенно снижение значительно при малых скоростях ($V_0 < 10$ мм/мин). В данном расчете сила уменьшается на 20...25 %. При заданных температурах сплаву АМгб соответствует энергетическое уравнение сплошности, а сплаву ВТбс — деформационное. При уменьшении скорости в большей степени сохраняется исходная сплошность материала заготовки из алюминиевого сплава при рассмотренной температуре. При низких скоростях операции сплошность сплава АМгб близка к исходной и уменьшается при увеличении скорости. На сплошность титанового сплава изменение скоростного режима не влияет, сплошность зависит только от степени вытяжки.

Остаточные микрповреждения материала устраняются при термической обработке изделия, поэтому степень деформации (утонение стенки) за одну операцию должна обеспечивать сплошность не менее регламентированной, а число операций определяется по необходимой толщине стенки изделия.

Для приведенных материалов при $\varepsilon_e = 0,35$ в рассмотренном диапазоне скоростей конечная сплошность соответствует $0,7 < \psi > 0,95$, что рекомендуется для изделий специальной техники [14]. Анизотропия влияет на технологические режимы вытяжки. Удельная сила при вытяжке анизотропного сплава АМг6 ($R = 1,5$) уменьшается на 10...15 % в диапазоне заданных скоростей. Конечная сплошность материала заготовки при этом увеличивается на 8...10 %.

Как показали расчеты, силы и сплошности деформируемого материала зависят от коэффициента анизотропии при заданной температуре. Это обусловлено деформационным упрочнением материала заготовки и разупрочнением во времени (релаксацией напряжений).

Расчетные данные имеют экспериментально-технологическое подтверждение в [5, 12, 15].

Выводы. Вытяжка с утонением стенки при нагреве зоны деформаций сопровождается наряду с деформационным упрочнением материала разупрочнением (релаксацией напряжений), что связано с проявлением вязких свойств материала заготовки (ползучести).

Релаксация увеличивается при снижении скорости вытяжки, что уменьшает удельную силу операции, а для ряда материалов снижает потерю исходной сплошности материала заготовки.

Учет влияния скорости операции, анизотропии механических свойств деформируемого материала на режим вытяжки позволяет назначить оптимальные степени утонения стенки заготовки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Матвеев А.Д., ред. Ковка и штамповка. Т. 4. Листовая штамповка. М., Машиностроение, 2010.
- [2] Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М., Машиностроение, 1977.
- [3] Ренне И.П. Предпосылки теоретического и экспериментального изучения процесса вытяжки с утонением стенки. В кн.: Прогрессивная технология глубокой вытяжки листовых материалов. Тула, Приокское книжн. изд-во, 1968, с. 160–169.
- [4] Ренне И.П., Рогожин В.Н., Кузнецов В.П. и др. Вытяжка с утонением стенки. Тула, ТПИ, 1970.
- [5] Яковлев С.С., ред. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов. М., Машиностроение, 2009.
- [6] Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев, Квант, 1997.
- [7] Нечепуренко Ю.Г., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного материала. Тула, ТулГУ, 2000.

- [8] Нечепуренко Ю.Г. Перспективные технологии изготовления цилиндрических изделий. Тула, ТулГУ, 2001.
- [9] Овчинников А.Г., ред. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки. М., Машиностроение, 1985.
- [10] Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М., Юрайт, 2020.
- [11] Голенков В.А., Яковлев С.П., ред. Теория обработки металлов давлением. М., Машиностроение, 2009.
- [12] Чудин В.Н., Черняев А.В., Тесаков А.М. К расчету напряжений при вытяжке анизотропного вязкопластичного материала. *Цветные металлы*, 2021, № 5, с. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.05.11>
- [13] Романов К.И. Механика горячего формоизменения металлов. М., Машиностроение, 1993.
- [14] Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М., Металлургия, 1986.
- [15] Черняев А.В., Чудин В.Н., Тесаков А.М. Последовательно-совмещенная вытяжка заготовки при вязкопластическом деформировании. *Научные технологии в машиностроении*, 2019, № 1, с. 3–7. DOI: https://doi.org/10.30987/article_5c129147c32b90.29812449

Чудин Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Сопротивление материалов и строительная механика» РУТ (МИИТ) (Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9).

Платонов Валерий Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Механика пластического формоизменения» ТулГУ (Российская Федерация, 300012, г. Тула, пр-т Ленина, д. 92).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чудин В.Н., Платонов В.И. Вытяжка с утонением при вязкопластическом деформировании анизотропного материала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 2 (145), с. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-73-82>

**DRAWING WITH THINNING UNDER VISCOPLASTICITY
DEFORMATION OF THE ANISOTROPIC MATERIAL**

V.N. Chudin¹
V.I. Platonov²

vladimir-chudin@yandex.ru
pvi_1@rambler.ru

¹RUT, Moscow, Russian Federation

²TuSU, Tula, Russian Federation

Abstract

The paper considers the drawing process with wall thinning of the anisotropic workpieces made of high-strength materials exposed to viscoplasticity deformation. Scientific literature is paying insufficient attention to calculation of the deformation processes of workpieces exposed to viscoplasticity. Relationships are proposed to determine stresses and continuity of the workpiece material during drawing in heating the cylindrical products with a thinned wall. State of hot material viscoplasticity is accepted under the plane deformation scheme. Equilibrium equation, yield condition for anisotropic material and discontinuity kinetics equations were used making it possible to predict strength characteristics and accuracy of the products obtained. Calculations of the drawing process modes for workpieces made of the AMg6 aluminum alloy and of the VT6s titanium alloy were performed. Graphic dependences are demonstrated of alterations in the operation specific force and in the material continuity value on the motion speed of the deforming punch. At the given forming temperatures, the energy continuity equation corresponds to the aluminum alloy, and the deformation equation corresponds to the titanium alloy. Influence of the workpiece mechanical properties anisotropy on the drawing technological conditions was studied. It is shown that force modes and continuity alteration of the deformed material depend on the anisotropy coefficient at a given temperature. This factor is determined by strain strengthening of the workpiece material and softening over time

Keywords

Viscoplasticity, stresses, deformations, speed, material discontinuity

Received 21.01.2022

Accepted 20.12.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Matveev A.D., ed. Kovka i shtampovka. T. 4. Listovaya shtampovka [Forging and stamping. Vol. 4. Sheet stamping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010.
- [2] Popov E.A. Osnovy teorii listovoy shtampovki [Fundamentals of sheet stamping theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977.
- [3] Renne I.P. Predposylki teoreticheskogo i eksperimentalnogo izucheniya protsessa vytyazhki s utoneniem stenki [Prerequisites for theoretical and experimental study of the drawing process with wall thinning]. V kn.: Progressivnaya tekhnologiya glubokoy vytyazhki listovykh materialov [In: Progressive technology of deep drawing of sheet materials]. Tula, Priokskoe knizhn. izd-vo Publ., 1968, pp. 160–169 (in Russ.).
- [4] Renne I.P., Rogozhin V.N., Kuznetsov V.P., et al. Vytyazhka s utoneniem stenki [Hood with wall thinning]. Tula, TPI Publ., 1970.

- [5] Yakovlev S.S., ed. *Izotermicheskoe formoizmenenie anizotropnykh materialov* [Isothermal shaping of anisotropic materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009.
- [6] Yakovlev S.P., Yakovlev S.S., Andreychenko V.A. *Obrabotka davleniem anizotropnykh materialov* [Processing of anisotropic materials by pressure]. Kishinev, Kvant Publ., 1997.
- [7] Nechepurenko Yu.G., Yakovlev S.P., Yakovlev S.S. *Glubokaya vytyazhka tsilindricheskikh izdeliy iz anizotropnogo materiala* [Deep drawing of cylindrical products from anisotropic material]. Tula, TulSU Publ., 2000.
- [8] Nechepurenko Yu.G. *Perspektivnye tekhnologii izgotovleniya tsilindricheskikh izdeliy* [Perspective technologies for the manufacture of cylindrical products]. Tula, TulSU Publ., 2001.
- [9] Ovchinnikov A.G., ed. *Progressivnye tekhnologicheskie protsessy kholodnoy shtampovki* [Progressive technological processes of cold stamping]. Moscow, Mashinostroenie, 1985.
- [10] Malinin N.N. *Polzuchest v obrabotke metallov* [Creep in metal processing]. Moscow, Yurayt Publ., 2020.
- [11] Golenkov V.A., Yakovlev S.P., eds. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009.
- [12] Chudin V.N., Chernyaev A.V., Tesakov A.M. To calculation of stresses in drawing of anisotropic viscoplastic materials. *Tsvetnye metally*, 2021, no. 5, pp. 84–88 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.05.11>
- [13] Romanov K.I. *Mekhanika goryachego formoizmeneniya metallov* [Mechanics of hot forming of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993.
- [14] Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986.
- [15] Chernyaev A.V., Chudin V.N., Tesakov A.M. Serial-aligned blank drawing at viscoplastic deformation. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2019, no. 1, pp. 3–7 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.30987/article_5c129147c32b90.29812449

Chudin V.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Strength of Materials and Structural Mechanics, RUT (Obraztsova ul. 9, Moscow, 127994 Russian Federation).

Platonov V.I. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Mechanics of Plastic Forming, TulSU (Lenina prospekt 92, Tula, 300012 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Chudin V. N., Platonov V.I. Drawing with thinning under viscoplasticity deformation of the anisotropic material. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 2 (145), pp. 73–82 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-73-82>