

**ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ  
В УСЛОВИЯХ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТИ****В.И. Платонов**

pvi\_1@rambler.ru

**А.В. Черняев**

sovet01tsu@rambler.ru

ТулГУ, г. Тула, Российская Федерация

**Аннотация**

Приведен расчет кинематики течения материала и силовых параметров операции вытяжки с утонением толстостенных изделий. При формоизменении заготовок из высокопрочных материалов применяют нагрев зоны деформации. Деформируемый материал склонен к упрочнению и разупрочнению (релаксации), т. е. находится в условиях вязкопластичности. При заданной деформации релаксация напряжений зависит от скорости деформации и, следовательно, от скорости вытяжки. Расчет силовых параметров вытяжки проведен с использованием экстремальной верхнеграничной теоремы пластичности, выраженной в мощностях внешних и внутренних сил. Определяющие соотношения получены в соответствии с кинематикой деформирования. Кинематическая схема построена с применением разрывного поля скоростей перемещений в осесимметричной постановке. Поле скоростей состоит из жестких блоков, блока деформаций и поверхностей разрыва скоростей. Определены соотношения для расчета мощностей в блоке деформаций и на поверхностях разрыва. Выполнен расчет силовых параметров операции вытяжки с утонением заготовок из высокопрочных сплавов АМгб и ВТбс с нагревом зоны деформации. Построены графики изменения удельных сил вытяжки с утонением в зависимости от скорости проведения операции. Показано, что удельные силы уменьшаются при снижении скорости перемещения инструмента. Отмечено, что уменьшение скорости деформаций способствует снижению уровня потери сплошности материала заготовки

**Ключевые слова**

*Вязкопластичность, поле скоростей, мощность, скорость, удельная сила*

Поступила 21.11.2024

Принята 24.04.2025

© Автор(ы), 2025

**Введение.** Операция вытяжки толстостенных заготовок с одновременным утонением стенки применяется в листоштамповочном производстве для изготовления деталей с необходимыми механическими и геометрическими характеристиками<sup>1</sup>. Вопросы, затрагивающие аспекты разработки теории и технологии вытяжки, приведены в [1–14]. При вытяжке заготовок из малопластичных сплавов применяют нагрев зоны деформации. При этом материал заготовки проявляет вязкие свойства, что приводит к релаксации напряжений, уменьшению силы операции и увеличению степени вытяжки. Аналитический учет фактора вязкости позволяет проектировать оптимальные режимы процесса.

**Методы решения задачи.** Расчетная схема вытяжки приведена на рис. 1, а. На схеме введены обозначения:  $r_0, r_1, r_n$  — радиусы исходной заготовки, готового изделия и пуансона соответственно;  $\delta_0, \delta_1$  — толщина стенок заготовки и изделия;  $\varphi$  — угол конуса матрицы. Нагретый в области утонения материал заготовки принят вязкопластическим [7, 11], что определяется уравнением состояния

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \xi_e^n, \quad (1)$$

где  $\sigma_e, \varepsilon_e^m, \xi_e^n$  — эквивалентное напряжение, деформация и скорость деформаций;  $A, m, n$  — константы материала при температуре проведения вытяжки.

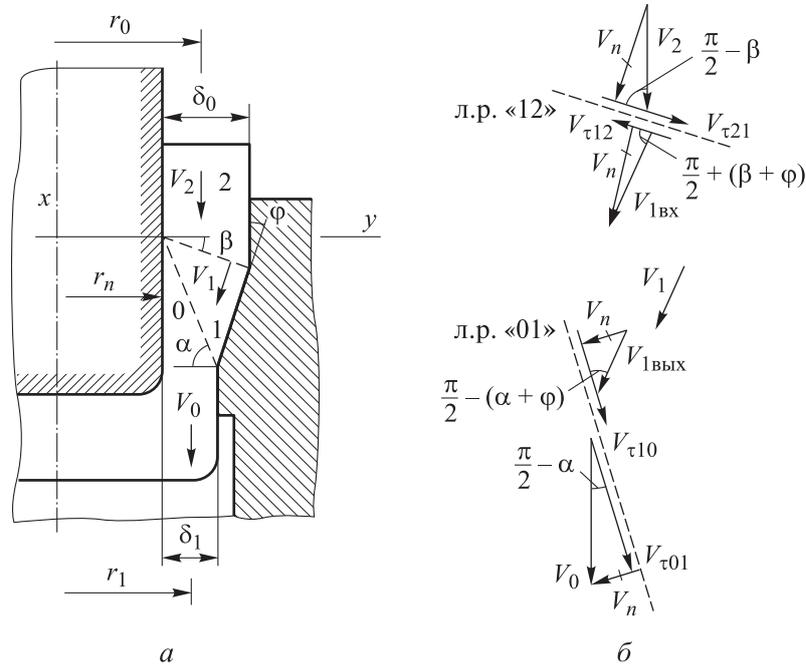
Уравнение (1) позволяет учесть деформационное упрочнение и разупрочнение (релаксацию напряжений) в связи с вязкими свойствами материала в зоне деформации. Расчет силового режима вытяжки с утонением толстостенных изделий проведем в условиях схемы осевой симметрии деформаций. Используем разрывное поле скоростей перемещений, приведенное на рис. 1. Поле включает в себя блоки вращения относительно оси  $x$ : 0, 2 — жесткие блоки; 1 — блок деформации. Блоки разделены поверхностями разрыва скоростей с образующими 01 и 12. Уравнения образующих и их длины определяются следующими соотношениями:

$$y_{01} = x \operatorname{ctg} \alpha + r_n; \quad y_{12} = -x \operatorname{ctg} \beta + r_n; \quad (2)$$

$$l_{01} = \frac{\delta_1}{\cos \alpha}; \quad l_{12} = \frac{\delta_0}{\cos \beta}, \quad (3)$$

где  $\beta = \arctg \left[ \delta_1 / \delta_0 (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi) - \operatorname{tg} \varphi \right]$ .

<sup>1</sup> Ковка и штамповка. Справочник. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка. М., Машиностроение, 2010.



**Рис. 1.** Схема вытяжки с утонением стенки:  
 а — блоки 0, 1, 2; б — план скоростей

Деформации сосредоточены в блоке 1 и на поверхностях изменения скоростей. Удельная сила вытяжки с утонением определяется в соответствии с энергетическим уравнением равновесия суммированием мощностей:

$$N = 2\pi r_1 \delta_1 V_0 p \leq N_1 + N_p + N_{тр}, \tag{4}$$

где  $N$  — мощность, образуемая внешними силами;  $V_0$  — скорость перемещения деформирующего инструмента;  $p$  — удельное значение силы;  $N_1$  — мощность в деформационном блоке;  $N_p = N_{01} + N_{12}$  — мощность, реализуемая на поверхностях разрыва скоростей перемещений;  $N_{тр}$  — мощность сил трения. Выражение (4) соответствует экстремальной верхнеграничной теореме пластичности [12, 13]. Выполним расчет мощностей, входящих в (4). Обозначим скорости перемещения жестких блоков как  $V_0$  для блока 0 и  $V_2 = r_1 \delta_1 V_0 / (r_0 \delta_0)$  для блока 2.

Скорость в блоке деформаций определим функцией

$$V_1 = V_0 \left[ 1 + \frac{k(y - y_{01})}{y_{01} - y_{12}} \right], \tag{5}$$

$$\text{где } k = 1 - \frac{r_1 \delta_1 \cos \beta \cos (\alpha + \varphi)}{r_0 \delta_0 \cos \alpha \cos (\beta - \varphi)}.$$

Функция (5) соответствует условиям для скоростей на входе и выходе из блока деформаций (рис. 1, б). При осевой симметрии эквивалентная скорость деформаций выражается через компоненты [12]:

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \left( \xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_\theta^2 \right) + \xi_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Компоненты скоростей деформаций определяются зависимостями:

$$\xi_x = \frac{\partial V_{1x}}{\partial x}; \quad \xi_y = \frac{\partial V_{1y}}{\partial y}; \quad \xi_\theta = \frac{V_{1y}}{y}; \quad \xi_{xy} = \frac{\partial V_{1y}}{\partial x} + \frac{\partial V_{1x}}{\partial y},$$

где  $V_{1x} = V_1 \cos \varphi$ ,  $V_{1y} = V_1 \sin \varphi$  — проекции скорости (5) на оси координат. Эквивалентные деформацию и напряжение с учетом (6) и (1) преобразуем к виду:

$$\varepsilon_e = \xi_e t = \frac{\delta_0 - \delta_1}{V_1 \sin \varphi} \xi_e; \quad (7)$$

$$\sigma_e = A \left( \frac{\delta_0 - \delta_1}{V_1 \sin \varphi} \right)^m \xi_e^{m+n}, \quad (8)$$

где  $t$  — время прохождения точками заготовки области деформации;  $V_1$  — скорость (5).

Используя (6) и (8), мощность в блоке 1 представим соотношением

$$N_1 = \int \sigma_e \xi_e dW = 2\pi A y_{ц.т} \left( \frac{\delta_0 - \delta_1}{\sin \varphi} \right)^m \int_0^h \int_{y_{12}}^{y_{01}} \left( \frac{1}{V_1} \right)^m \xi_e^{1+m+n} dy dx, \quad (9)$$

где  $y_{ц.т}$  — ордината центра тяжести продольного сечения блока 1;  $h = \delta_1 \operatorname{tg} \alpha$  — размер блока 1 по оси  $x$ .

Обратимся к поверхностям разрыва скоростей. На поверхности с образующей 12 в соответствии с планом скоростей (см. рис. 1, б) имеем

$$V_n = V_2 \cos \beta = \frac{r_1 \delta_1}{r_0 \delta_0} V_0 \cos \beta \quad (10)$$

— нормальная скорость;

$$V_\tau = V_{\tau 12} + V_{\tau 21} = \frac{r_1 \delta_1 V_0}{r_0 \delta_0} \left[ \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} (\beta - \varphi) \right] \cos \beta \quad (11)$$

— касательная скорость.

Эквивалентные деформацию, ее скорость и напряжение на этой поверхности запишем, учитывая (10), (11) и (1):

$$\varepsilon_e = \frac{V_\tau}{\sqrt{3}V_n} = \frac{1}{\sqrt{3}} [\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} (\beta - \varphi)]; \quad (12)$$

$$\xi_e = \frac{\varepsilon_e}{t} = \frac{V_0}{\sqrt{3}H} [\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} (\beta - \varphi)];$$

$$\sigma_e = A \left( \frac{V_0}{H} \right)^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} [\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} (\beta - \varphi)] \right\}^{m+n}, \quad (13)$$

где  $H$  — высота изделия.

Мощность на поверхности с образующей 12 представим соотношением, учитывая (11) и (13):

$$\begin{aligned} N_{12} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_e V_\tau S_{12} = \\ &= 2\pi A r_1 \delta_1 \left( \frac{1}{H} \right)^n V_0^{1+n} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} [\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} (\beta - \varphi)] \right\}^{1+m+n}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $S_{12}$  — площадь данной поверхности.

На поверхности разрыва скорости с образующей 01 имеем

$$V_n = V_0 \cos \alpha; \quad (15)$$

$$V_\tau = V_{\tau 01} - V_{\tau 10} = V_0 [\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} (\alpha + \varphi)] \cos \alpha; \quad (16)$$

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\sqrt{3}} [\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} (\alpha + \varphi)]; \quad (17)$$

$$\xi_e = \frac{V_0}{\sqrt{3}H} [\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} (\alpha + \varphi)];$$

$$\sigma_e = A \left( \frac{V_0}{H} \right)^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} [\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} (\alpha + \varphi)] \right\}^{m+n}. \quad (18)$$

Мощность на данной поверхности разрыва скорости, учитывая (16) и (18), запишем соотношением

$$N_{01} = 2\pi A r_1 \delta_1 \left( \frac{1}{H} \right)^n V_0^{1+n} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} [\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} (\alpha + \varphi)] \right\}^{1+m+n}. \quad (19)$$

Учтем фактор трения заготовки на конусе матрицы. Касательное напряжение трения примем в виде

$$\tau = \mu \sigma_n = \mu p \cos \varphi, \quad (20)$$

где  $\sigma_n$  — нормальное напряжение к поверхности трения;  $\mu$  — коэффициент трения.

Скорость перемещения материала на поверхности трения определяется из (5):

$$V_k = V_1 \text{ при } y = -x \operatorname{tg} \varphi + b, \quad (21)$$

где  $b = r_n + \delta_0 + [\delta_1 (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \varphi) - \delta_0] \operatorname{tg} \varphi$ .

Учитывая (20) и (21), получаем выражение для мощности трения:

$$N_{\text{тр}} = 2\pi\mu p u_{\text{ц.т}} \cos \varphi \int_c^a V_k dx. \quad (22)$$

Здесь  $u_{\text{ц.т}} = (2r_n + \delta_0 + \delta_1) / 2$ ;  $a = \delta_1 \operatorname{tg} \alpha$ ;  $c = \delta_0 \operatorname{tg} \beta$ .

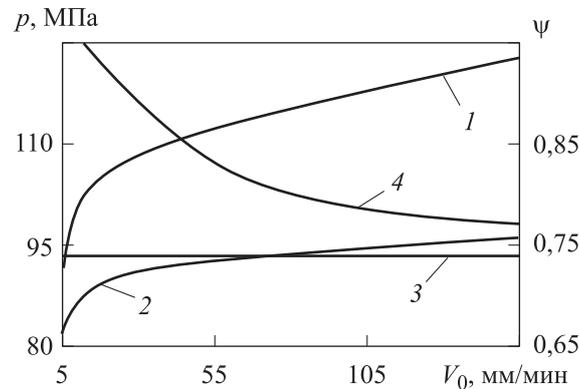
Учитывая (9), (14), (19) и (22), из выражения (4) удельную силу вытяжки можно записать так:

$$p \leq \frac{N_1 + N_{23} + N_{10}}{2\pi \left( r_1 \delta_1 V_0 - \mu u_{\text{ц.т}} \cos \varphi \int_c^a V_k dx \right)}. \quad (23)$$

Удельная сила, как следует из (23), зависит от скорости вытяжки. Данное соотношение необходимо минимизировать по углу  $\alpha$ .

**Результаты.** Расчеты выполнены для вытяжки с утонением изделий из алюминиевого сплава АМг6 при 450 °С, из 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 АМг6 и  $A = 65 \text{ МПа} \cdot \text{с}^n$  ( $n = 0,06$ );  $m = 0,03$  — для сплава ВТ6с [15–20]. Принято, что  $r_n = 40 \text{ мм}$ ;  $r_0 = 43 \text{ мм}$ ;  $r_1 = 42 \text{ мм}$ ;  $\delta_0 = 55 \text{ мм}$ ;  $\delta_1 = 3,5 \text{ мм}$ ;  $H = 150 \text{ мм}$ ; угол конуса матрицы  $\varphi = 20^\circ$ . Углы поля скоростей:  $\alpha = 70^\circ$ ;  $\beta = 27^\circ$ . Зависимости удельных сил  $p$  вытяжки с утонением и сплошности  $\psi$  от скорости  $V_0$  операции приведены на рис. 2.

**Обсуждение полученных результатов.** Расчетные графические зависимости показывают, что снижение скорости (увеличение длительности) вытяжки способствует уменьшению удельной силы операции. Особенно явно это проявляется при малых скоростях ( $V_0 < 10 \text{ мм/мин}$ ). В этом расчете сила уменьшается на 25...30 %. Этот фактор связан с процессами деформационного упрочнения материала заготовки и разупрочнения во времени (релаксация напряжений).



**Рис. 2.** Зависимости удельных сил вытяжки с утонением (1, 2) и сплошности (3, 4) от скорости операции

Отметим, что в [9] приведены соотношения для расчета потери сплошности материала заготовки при вытяжке с утонением. Сплошность оценивается величиной  $1 \geq \psi \geq 0$  и принимается  $\psi = 1$  для исходного материала. Для различных материалов при заданной температуре сплошность зависит от деформации и скорости вытяжки или только деформации. Потеря сплошности уменьшается при уменьшении скорости вытяжки для сплава АМг6 (4) и не зависит от скорости для сплава ВТ6с (3) при данной температуре операции (см. рис. 2). Расчетные данные имеют экспериментально-технологическое подтверждение [7].

**Вывод.** Операция вытяжки с утонением толстостенных изделий из труднодеформируемых заготовок с применением нагрева области деформаций сопровождается одновременным деформационным упрочнением материала и разупрочнением, что связано с проявлением вязких свойств материала заготовки. Релаксация увеличивается при снижении скорости проведения операции, что позволяет уменьшить удельную силу и увеличить степень формоизменения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воронцов А.Л., Ступников В.П., Стратьев В.К. и др. Исследование вытяжки по внутренней поверхности для повышения эффективности изготовления или реновации деталей типа ступенчатых втулок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 2 (83), с. 87–101. EDN: NUHZQX
- [2] Унксов Е.П., Джонсон У., Колмогоров В.Л. и др. Теория пластических деформаций металлов. М., Машиностроение, 1983.

- [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] Чемезов Д.А. Процесс вытяжки с утонением стенки полуфабриката. *Инновационная наука*, 2016, № 8-2, с. 96–99. EDN: WHTMFT
- [5] Нечепуренко Ю.Г. Перспективные технологии изготовления цилиндрических изделий. Тула, ТулГУ, 2001.
- [6] Нечепуренко Ю.Г., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного материала. Тула, ТулГУ, 2000.
- [7] Яковлев С.С., Яковлев С.П., Чудин В.Н. и др. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести. М., Машиностроение, 2009.
- [8] Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев, Квант, 1997.
- [9] 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: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-73-82>
- [10] Платонов В.И., Пасынков А.А., Чудин В.Н. Технологические режимы вытяжки анизотропного релаксирующего материала. *Научные технологии в машиностроении*, 2022, № 2, с. 22–25. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-2-22-25>
- [11] Чуйко В.М., Ярушина В.М. Ползучесть и релаксация напряжений в пластине, нагружаемой по контуру круглого отверстия. *Прикладная механика и техническая физика*, 2005, т. 46, № 4, с. 146–153. EDN: MUCMJT
- [12] Зильберг Ю.В. О физическом содержании аналитических моделей процессов. *КШП. ОМД*, 2008, № 5, с. 10–15. EDN: JSBMRR
- [13] Горев Б.В., Панамарев В.А., Перетятыко В.Н. Энергетический вариант теории ползучести в обработке металлов давлением. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2011, № 6, с. 16–18. EDN: QCFHVN
- [14] Овчинников А.Г., ред. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки. М., Машиностроение, 1985.
- [15] 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>
- [16] Романов К.И. Механика горячего формоизменения металлов. М., Машиностроение, 1993.
- [17] Дель Г.Д. Технологическая механика. М., Машиностроение, 1978.
- [18] 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](https://doi.org/10.30987/article_5c129147c32b90.29812449)

[19] Демин В.А., Черняев А.В., Платонов В.И. и др. Методика экспериментального определения механических свойств металла при растяжении с повышенной температурой. *Цветные металлы*, 2019, № 5, с. 66–73.

DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.05.08>

[20] Черняев А.В., Усенко Н.А., Коротков В.А. и др. Определение влияния скорости деформации на сопротивление деформированию при статическом растяжении с повышенной температурой. *Цветные металлы*, 2019, № 5, с. 60–65.

DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.05.07>

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

**Черняев Алексей Владимирович** — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Механика и процессы пластического формоизменения» ТулГУ (Российская Федерация, 300012, г. Тула, пр-т Ленина, д. 92).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Платонов В.И., Черняев А.В. Вытяжка с утонением толстостенных изделий в условиях вязкопластичности. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 4 (155), с. 90–101. EDN: IPYQZG

**DRAWING WITH A THICK-WALLED PRODUCT  
THINNING EXPOSED TO VISCOPLASTICITY**

V.I. Platonov

pvi\_1@rambler.ru

A.V. Chernyaev

sovet01tsu@rambler.ru

TulSU, Tula, Russian Federation

**Abstract**

The paper considers an option in computing kinematics of the material flow and force parameters in a drawing operation with thinning the thick-walled products. Heating the deformation zone is applied in shaping the workpieces made of the high-strength materials. The deformed material is prone to hardening and softening (relaxation), i.e., it is a subject to viscoplasticity. For the given deformation, the stress relaxation depends on the strain rate and, consequently, on the drawing velocity. The drawing force parameters are computed using the extremal upper-bound plasticity theorem; it is expressed in terms of the external and internal forces power. The constitutive relations are derived in accordance with the

**Keywords**

*Viscoplasticity, velocity field, power, velocity, specific force*

deformation kinematics. The kinematic scheme is constructed using the discontinuous velocity displacement field in the axisymmetric formulation. The velocity field consists of rigid blocks, deformation block, and velocity discontinuity surfaces. The paper determines relationships to compute power in the deformation block and on the discontinuity surface. Force parameters of the thinning drawing operation for the workpieces made of the AMg6 and VT6s high-strength alloys are computed using the deformation zone heating. Graphs are constructed to illustrate alteration in the specific thinning drawing force depending on the operation velocity. The paper shows that the specific forces are decreasing with the reducing tool displacement velocity. It notes also that reducing the deformation rate contributes to a decrease in the continuity loss level of the workpiece material

Received 24.11.2024

Accepted 24.04.2025

© Author(s), 2025

## REFERENCES

- [1] Vorontsov A.L., Stupnikov V.P., Stratyev V.K., et al. Study of stretching by inner surface for increase of efficiency of manufacturing or renovation of parts of stepwise sleeve type. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2011, no. 2 (83), pp. 87–101 (in Russ.). EDN: NUHZQX
- [2] Unksov E.P., Dzhonson U., Kolmogorov V.L., et al. *Teoriya plasticheskikh deformatsiy metallov* [Theory of plastic deformation of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983.
- [3] Renne I.P. Predposylki teoreticheskogo i eksperimentalnogo izucheniya protsessa vytyazhki s utoneniem stenki [Prerequisites for theoretical and experimental study of the process of drawing with thinning of the wall]. 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] Chemezov D.A. The process of drawing with wall thinning of the semi-finished product. *Innovatsionnaya nauka* [Innovation Science], 2016, no. 8-2, pp. 96–99 (in Russ.). EDN: WHTMFT
- [5] Nechepurenko Yu.G. Perspektivnye tekhnologii izgotovleniya tsilindricheskikh izdeliy [Promising technologies for manufacturing cylindrical products]. Tula, TulGU Publ., 2001.
- [6] Nechepurenko Yu.G., Yakovlev S.P., Yakovlev S.S. Glubokaya vytyazhka tsilindricheskikh izdeliy iz anizotropnogo materiala [Deep drawing of cylindrical products made of anisotropic material]. Tula, TulGU Publ., 2000.
- [7] Yakovlev S.S., Yakovlev S.P., Chudin V.N., et al. Izotermicheskoe formoizmenenie anizotropnykh materialov zhestkim instrumentom v rezhime kratkovremennoy polzuchesti

[Isothermal shaping of anisotropic materials by a rigid tool in the mode of short-term creep]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009.

[8] Yakovlev S.P., Yakovlev S.S., Andreychenko V.A. Obrabotka davleniem anizotropnykh materialov [Pressure treatment of anisotropic materials]. Kishinev, Kvant Publ., 1997.

[9] 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: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-73-82>

[10] Platonov V.I., Pasyukov A.A., Chudin V.N. Technological modes of anisotropic relaxing material drawing. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2022, no. 2, pp. 22–25 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-2-22-25>

[11] Chuyko V.M., Yarushina V.M. Creep and stress relaxation in a plate loaded along the contour of a circular hole. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2005, vol. 46, no. 4, pp. 581–587.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s10808-005-0111-8>

[12] Zilberg Yu.V. On physical meaning of analytical models of metal forming processes. *KShP. OMD* [Forging and Stamping Production. Processing of Materials by Pressure], 2008, no. 5, pp. 10–15 (in Russ.). EDN: JSBMRR

[13] Gorev B.V., Panamarev V.A., Peretyatko V.N. Energy-based theory of creep in the pressure treatment of metals. *Steel Transl.*, 2011, vol. 41, no. 6, pp. 461–463.

DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091211060064>

[14] Ovchinnikov A.G., ed. *Progressivnye tekhnologicheskie protsessy kholodnoy shtampovki* [Progressive technological processes of cold stamping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985.

[15] Chudin V.N., Chernyaev A.V., Tesakov A.M. To calculation of stresses in drawing of anisotropic viscoplastic material. *Tsvetnye metally*, 2021, no. 5, pp. 84–88 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.05.11>

[16] Romanov K.I. *Mekhanika goryachego formoizmeneniya metallov* [Mechanics of hot metal forming]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993.

[17] Del G.D. *Tekhnologicheskaya mekhanika* [Technological mechanics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978.

[18] Chernyaev A.V., Chudin V.N., Tesakov A.M. Serial-aligned blank drawing at viscoplastic deformation. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2019, no. 1, pp. 3–7 (in Russ.).

DOI: [https://doi.org/10.30987/article\\_5c129147c32b90.29812449](https://doi.org/10.30987/article_5c129147c32b90.29812449)

[19] Demin V.A., Chernyaev A.V., Platonov V.I., et al. Experimental technique for determining the mechanical properties of metal under stretching at high temperature. *Tsvetnye metally*, 2019, no. 5, pp. 66–73 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.05.08>

[20] Chernyaev A.V., Usenko N.A., Korotkov V.A., et al. Understanding how deformation rate influences the resistance to deformation under static tension at high temperature. *Tsvetnye metally*, 2019, no. 5, pp. 60–65 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.05.07>

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

**Chernyaev A.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Mechanics and Processes of Plastic Shaping, TulSU (Lenina prospekt 92, Tula, 300012 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Platonov V.I., Chernyaev A.V. Drawing with a thick-walled product thinning exposed to viscoplasticity. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 4 (155), pp. 90–101 (in Russ.). EDN: IPYQZG