

## ЗАДАЧА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ ЛИСТА ИЗ АЛЮМИНИЕВОЙ ЗАГОТОВКИ В РЕЖИМАХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Г.Е. Коджаспиров<sup>1</sup>, Д.А. Китаева<sup>1\*</sup>, Я.И. Рудаев<sup>2</sup>, Е.А. Субботина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Политехническая 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

<sup>2</sup>Кыргызско-Российский Славянский университет, Киевская 44, Бишкек, 720000, Кыргызстан

\*e-mail: dkitaeva@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается двумерная задача изотермической прокатки алюминиевого листа в режимах сверхпластичности, осуществляемой с малым углом захвата валков. Решение основано на известных закономерностях течения металла в клиновидном сходящемся канале. Для математической формулировки задачи привлекаются соотношения теории упругопластических процессов малой кривизны, а уравнение состояния пригодно для описания закономерностей высокотемпературной деформации в широком скоростном диапазоне, включая условия реализации эффекта сверхпластичности. Конкретные расчеты соответствуют сплаву АМг5. Опытная реализация процесса осуществлена на близком по химическому составу сплаве 1561 (АМг61) с получением в прокатанном металле мелкозернистой структуры.

### 1. Введение

Технологические процессы обработки металлов давлением объемного типа основаны, как правило, на мощном силовом воздействии на деформируемый материал с использованием больших пластических деформаций [1, 2]. При формообразовании в термомеханических условиях сверхпластичности могут быть использованы уникальные свойства металлов и сплавов, заключающиеся в резком снижении сопротивления деформированию. Сверхпластичность при этом рассматривается [3] как особое состояние поликристаллического материала, пластически деформируемого при низком уровне напряжений с сохранением полученной на предварительном этапе мелкозернистой структуры (структурная сверхпластичность) или сформированной в процессе нагрева и деформации (динамическая сверхпластичность). Для обоих типов сверхпластичности общим предполагается превалирование механизма зернограницного проскальзывания над другими формами массопереноса [4]. Очевидно, что для реализации эффекта динамической сверхпластичности должна произойти замена исходного (деформированного или литого) структурного состояния другим, готовым к сверхпластичности. Для промышленных алюминиевых сплавов подобная замена происходит в температурно-скоростных условиях динамической рекристаллизации [5, 6].

### 2. Постановка задачи

Рассмотрим двумерную задачу горячей прокатки полосы в валках одинакового радиуса  $R$  (Рис. 1), вращающихся с одинаковыми угловыми скоростями. Предполагается, что процесс прокатки осуществляется с малым углом захвата валков. Это означает, что для

установления энергосиловых и кинематических параметров операции может быть использовано исследование [7-9] течения материала в клиновидном сходящемся канале с углом при вершине  $\alpha_1$  (Рис. 1). Предполагается, что процесс прокатки реализуется в изотермических условиях.

Введем цилиндрическую систему координат  $\rho\alpha z$ , причем начало координат разместим в вершине клина. Полагаем все геометрические размеры отнесенными к ширине полосы.

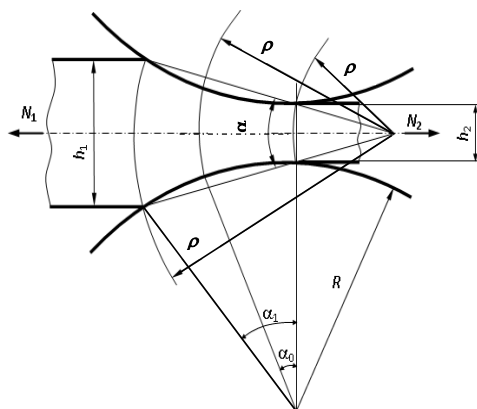


Рис. 1. Схематизация процесса прокатки.

Математическая постановка задачи в рамках теории упругопластических процессов малой кривизны приведена в [3].

### 3. Разрешающая функция

Интегрируя условие несжимаемости в скоростях, получаем:

$$v_\rho = \frac{k(\alpha)}{\rho}, \quad (1)$$

где  $v_\rho$  – радиальная проекция вектора скорости перемещений;  $k = k(\alpha)$  – неизвестная функция, подлежащая определению.

Воспользовавшись решением (1), для составляющих скоростей деформаций можем записать:

$$\dot{\varepsilon}_\rho = -\frac{k(\alpha)}{\rho^2}; \quad \dot{\varepsilon}_\alpha = \frac{k(\alpha)}{\rho^2}; \quad \dot{\gamma}_{\rho\alpha} = \frac{k'(\alpha)}{\rho^2}. \quad (2)$$

Интенсивность скоростей деформаций в условиях радиального течения может быть определена в виде:

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{1}{\rho^2} L^{1/2}(\alpha), \quad L(\alpha) = \frac{1}{3} [4k^2(\alpha) + k'^2(\alpha)]. \quad (3)$$

Определяющие соотношения [3, 11] с учетом уравнений (2), (3) запишутся следующим образом:

$$\sigma_\rho - \sigma_0 = -\frac{2}{3} T(\alpha, \rho) k(\alpha); \quad \sigma_\alpha - \sigma_0 = \frac{2}{3} T(\alpha, \rho) k(\alpha); \quad \tau_{\rho\alpha} = \frac{1}{3} T(\alpha, \rho) k'(\alpha), \quad (4)$$

где  $T(\rho, \alpha) = (1 - m_0 - \beta) L^{1/2}(\alpha) + \frac{3m_0 + \beta}{\rho^2} - \frac{3m_0}{\rho^4} L^{1/2}(\alpha) + \frac{m_0}{\rho^6} L(\alpha)$ .

Анализ зависимостей (1) – (4) показывает, что составляющие напряжений, скоростей перемещений и деформаций будут найдены, если установлен явный вид функции  $k = k(\alpha)$ , которую, как и в [11], назовем разрешающей. Для отыскания функции  $k(\alpha)$  подставим зависимости (4) в уравнения равновесия [3]. Полученные производные  $\partial\sigma_0/\partial\rho$  и  $\partial\sigma_0/\partial\alpha$  продифференцируем соответственно по  $\alpha$  и  $\rho$ . Правые части полученных смешанных производных приравняем друг другу. В результате получим дифференциальное уравнение:

$$k''' + 4k' = 0. \quad (5)$$

С учетом двух очевидных граничных условий  $\tau_{\rho\alpha}|_{\alpha=0} = 0$  и  $\tau_{\rho\alpha}|_{\alpha=\frac{\alpha_1}{2}} = -\chi\tau_{\max}|_{\alpha=\frac{\alpha_1}{2}}$  решение уравнения (5) может быть представлено в форме:

$$k(\alpha) = \frac{c}{2}(\psi - \cos 2\alpha), \quad (6)$$

где  $\chi$  – экспериментальный коэффициент [9], устанавливающий условия контакта валков и деформируемой полосы,  $c$  – постоянная, а для функции  $\psi(\alpha_1, \chi)$  получено:

$$\psi(\alpha_1, \chi) = \frac{\sqrt{1-\chi^2}}{\chi} \sin \alpha_1 - \cos \alpha_1. \quad (7)$$

Определение постоянной  $c$  совместим с выбором очага пластической деформации, который, следуя [9, 11], принимает клиновидную форму, ограниченную двумя поверхностями разрыва скоростей  $\rho_1 = \rho_1(\alpha_1)$ ;  $\rho_2 = \rho_2(\alpha_1)$  соответственно на входе в валки и на выходе из них (Рис. 1). Процедура анализа очага деформации подробно освещена в [11] и позволяет установить разрешающую функцию  $k = k(\alpha)$  и функции  $\rho_1(\alpha)$ ,  $\rho_2(\alpha)$ , ограничивающих в радиальном направлении очаг пластической деформации:

$$k(\alpha) = \frac{v_1 h_1}{\bar{\psi}} (\psi - \cos 2\alpha), \quad \rho_1(\alpha) = \frac{h_1}{2\bar{\psi}} \cdot \frac{2\psi\alpha - \sin 2\alpha}{\sin \alpha};$$

$$\rho_2(\alpha) = (1-\Lambda) \frac{h_1}{2\bar{\psi}} \cdot \frac{2\psi\alpha - \sin 2\alpha}{\sin \alpha}. \quad (8)$$

Здесь  $\Lambda = h_2/h_1$  – обжатие полосы (Рис. 1),  $v_1$  – средняя скорость перемещения материала на входе в валки,

$$\bar{\psi}(\alpha_1, \chi) = \frac{\alpha_1}{\psi\alpha_1 - \sin \alpha_1}. \quad (9)$$

#### 4. Силовые параметры процесса прокатки

Компоненты тензора напряжений определяются на основании решения дифференциальных уравнений равновесия [3, 11] совместно с (2), (4), (6):

$$3\sigma_\rho = (1-m_0-\beta)L^{-1/2} \left( \frac{k'L'}{2L} - k'' + 4k \right) \ln \frac{\rho}{\rho_2} - 4(1-m_0-\beta)L^{-1/2}k - \frac{3m_0+\beta}{2}(k''-4k) \times$$

$$\times \left( \frac{1}{\rho_2^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) - 4(3m_0+\beta) \frac{k}{\rho_2^2} + \frac{3}{4}m_0L^{1/2} \left( \frac{k'L'}{2L} + k'' - 4k \right) \left( \frac{1}{\rho_2^4} - \frac{1}{\rho^4} \right) + 12m_0L^{1/2} \frac{k}{\rho_2^4} -$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{m_0}{6} L \left( \frac{k'L'}{L} + k'' - 4k \right) \left( \frac{1}{\rho_2^6} - \frac{1}{\rho^6} \right) - 4m_0 L \frac{k}{\rho_2^6}; \\
3\sigma_\alpha &= (1 - m_0 - \beta) L^{-1/2} \left( \frac{k'L'}{L} - k'' + 4k \right) \ln \frac{\rho}{\rho_2} - \frac{3m_0 + \beta}{2} (k'' + 4k) \left( \frac{1}{\rho_2^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) + \frac{3}{4} m_0 L^{1/2} \times \\
& \times \left( \frac{k'L'}{2L} + k'' + 12k \right) \left( \frac{1}{\rho_2^4} - \frac{1}{\rho^4} \right) - \frac{m_0}{6} L \left( \frac{k'L'}{L} + k'' + 8k \right) \left( \frac{1}{\rho_2^6} - \frac{1}{\rho^6} \right); \\
3\tau_{\rho\alpha} &= \left[ (1 - m_0 - \beta) L^{-1/2} + \frac{3m_0 + \beta}{\rho^2} - \frac{3m_0}{\rho^4} L^{1/2} + \frac{m_0}{\rho^6} L \right] k. \tag{10}
\end{aligned}$$

Естественно считать, что продольные усилия, возникающие на входе в очаг деформации ( $N_1$ ) и выходе из него ( $N_2$ ), обращаются в ноль. Следовательно, можем записать

$$N_1 = 2 \int_0^{\alpha_{1/2}} \sigma_\rho \Big|_{\rho=\rho_1} dA = 0; \quad N_2 = 2 \int_0^{\alpha_{1/2}} \sigma_\rho \Big|_{\rho=\rho_2} dA = 0. \tag{11}$$

Второе условие (11) после подстановки в него выражения для  $\sigma_\rho$  из (10) преобразуется к кубическому уравнению вида

$$a_1 + a_1 \mu_{0n} + a_2 \mu_{0n}^2 + a_3 \mu_{0n}^3 = 0, \tag{12}$$

где коэффициенты  $a_i$  являются функциями угла захвата;  $\mu = \mu_{0n}$  следует рассматривать как параметр, обобщающий скоростной, геометрический и контактный факторы на выходе из зоны опережения и определяемый выражением

$$\mu_{0n} = \frac{\nu_1 \bar{\psi}}{h_1 (1 - \Lambda)^2}. \tag{13}$$

Первое условие (11) на входе в очаг деформации (в зону отставания, где  $\mu = \mu_{0T}$ ) приводится к уравнению

$$b_0 + b_1 \mu_{0T} + b_2 \mu_{0T}^2 + b_3 \mu_{0T}^3 = 0. \tag{14}$$

Для коэффициентов  $b_i$  получены аналитические выражения, расшифровка которых не приводится.

Величина обжатия деформируемой полосы задается из технологических соображений и связана с углом захвата  $\alpha_1$  и диаметром валков  $2R$  [9, 12]. Следствием закона изменения толщины полосы в очаге деформации является выражение

$$\cos \alpha_1 = 1 - \frac{h_1}{2R} \Lambda. \tag{15}$$

Численное решение уравнений (12) и (14) с привлечением (15) получено при  $R = 0,11$ ;  $\chi = 0,3$  и трёх значениях толщины  $h_1$ , равных 0,015; 0,03 и 0,07, а также при  $m_0 = 0,339$ ,  $\beta = -0,134$ , отвечающих сплаву АМг5. Результаты расчетов приведены на Рис. 2, на котором кривые 1, 2, 3 являются функциями  $\mu_{0T}(\alpha_1)$  соответственно для  $h_1 = 0,015$ ; 0,03 и 0,07, а кривая 4 –  $\mu_{0n}(\alpha_1)$ .

Из представленных графиков видно, что с ростом толщины исходной заготовки происходит «выполаживание» зависимостей  $\mu_{от}(\alpha_1)$  с приближением к кривой 4.

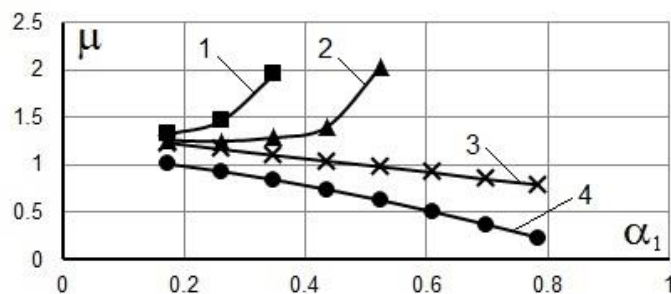


Рис. 2. Зависимость параметра  $\mu$  от угла захвата  $\alpha_1$ .

Давление на валки  $q = q(\rho)$  отождествляем с окружным нормальным напряжением на поверхности контакта

$$\sigma_\alpha|_{\alpha=\alpha_1/2} = -q. \tag{16}$$

Подстановкой в (16) выражения компоненты  $\sigma_\alpha$  из (10) для величины давления на валки получаем

$$q = -\frac{1}{3} \left\{ n_0 \ln \frac{\rho}{\rho_2} + n_1 \left( \frac{1}{\rho_2^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) + n_2 \left( \frac{1}{\rho_2^4} - \frac{1}{\rho^4} \right) + n_3 \left( \frac{1}{\rho_2^6} - \frac{1}{\rho^6} \right) \right\}, \tag{17}$$

где коэффициенты  $n_i$  являются функциями угла захвата и скорости подачи материала в валки.

На Рис. 3 а,б в качестве примера приведены полученные в результате расчетов по формуле (17) зависимости давления на валки  $q$  от радиуса  $\rho \in (\rho_2; \rho_1)$ , причем радиусу  $\rho_2(\alpha_1)$  соответствуют нули на оси абсцисс, а величины, указанные на поле рисунка, являются обжатиями полосы  $\Lambda$ . Расчеты осуществлены при исходной толщине заготовки 0,015. Качественно эпюры давления не противоречат известным данным [11] и построены в температурных условиях сверхпластичности ( $\beta = -0,134$ ) и вне их ( $\beta = 0,236$ ).

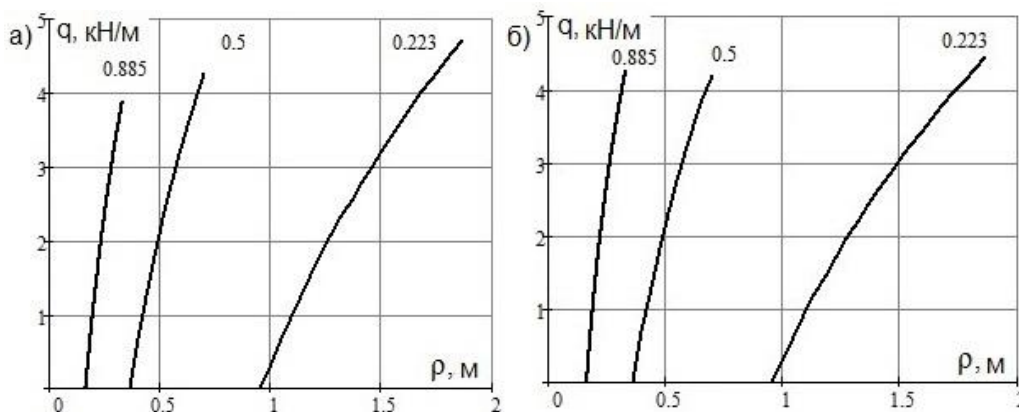


Рис. 3. Зависимость давления на валки от радиуса  $\rho$  для разных обжатий полосы толщиной 0,015 при: а)  $\beta = -0,134$ ; б)  $\beta = 0,236$ .

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена возможность прокатки полосы алюминиевого сплава АМг5 в термических условиях сверхпластичности с получением мелкозернистых полуфабрикатов [2,13].

## 5. Заключение

Аналитическим путем решена двухмерная задача определения силовых параметров прокатки полосы алюминиевого сплава АМг5 в термических условиях сверхпластичности.

Обоснована необходимость выделения в очаге деформации области сверхпластичности с оптимизацией её объема и расположения с целью получения мелкозернистой структуры полуфабриката.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-08-06531 а.*

## Литература

- [1] Г.Е. Коджаспиров, А.И. Рудской, В.В. Рыбин, *Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий пластическим деформированием* (Наука, СПб., 2006).
- [2] А.И. Рудской, Г.Е. Коджаспиров, *Технологические основы получения ультрамелкозернистых металлических материалов* (СПбГПУ, СПб., 2012).
- [3] А.И. Рудской, Я.И. Рудаев, *Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов* (Наука, СПб., 2009).
- [4] О.А. Кайбышев, *Сверхпластичность промышленных сплавов* (Металлургия, М., 1984).
- [5] Ю.М. Вайнблат, Н.А. Шаршагин // *Цветные металлы* **2** (1984) 67.
- [6] Ю.С. Золотаревский, В.А. Паняев, Я.И. Рудаев и др. // *Судостроительная промышленность. Серия материаловедение* **16** (1990) 21.
- [7] D. Kitaeva, Y. Rudaev, E. Subbotina, In: *Proceeding of the 23rd International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2014* (Brno, Czech Republic, EU, May 21-23, 2014), p. 347.
- [8] В.В. Соколовский, *Теория пластичности* (Высшая школа, М., 1969).
- [9] Н.Н. Малинин, *Технологические задачи пластичности и ползучести* (Высшая школа, М., 1979).
- [10] И.А. Кийко, *Пластическое течение металлов. Научные основы прогрессивной техники и технологии* (Машиностроение, М., 1985).
- [11] Я.И. Рудаев // *Научно-технические ведомости СПбГПУ* **2** (2005) 57.
- [12] В.С. Смирнов, *Теория обработки металлов давлением* (Металлургия, М., 1973).
- [13] А.И. Рудской, Г.Е. Коджаспиров, *Ультрамелкозернистые металлические материалы* (СПбГПУ, СПб., 2015).

## TASK OF LONGITUDINAL ROLLING PROCEDURE OF ALUMINUM SHEET UNDER SUPERPLASTICITY CONDITIONS

G.E. Kodzhaspirov<sup>1</sup>, D.A. Kitaeva<sup>1\*</sup>, Ya.I. Rudaev<sup>2</sup>, E.A. Subbotina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya 29, St. Petersburg, 195251, Russia

<sup>2</sup>Kyrgyz-Russian Slavic University, Kievskaya 44, Bishkek, 720000, Kyrgyzstan

\*e-mail: dkitaeva@mail.ru

**Abstract.** The two-dimensional task of isothermal rolling of aluminum sheet in the superplasticity conditions realized with a low angle of nip is considered. For the mathematical formulation of the task, the theory of elasto-plastic processes ratios of the small curvature was attracted, and the state equation is suitable for the description of regularities of high-temperature deformation in the wide strain rate-rate interval including the conditions of superplasticity effect realization. The specific calculations of the roll force distribution corresponds to thermal superplasticity conditions and outside of its applied to industrial alloy AMg5 was carried out and the results were compared. The experimental realization of the process has been realized in the approximate chemical composition alloy 1561 with the producing fine-grained structure in the rolled product.

### Acknowledgement

The study was financially supported by RFBR in the framework of the research project №15-08-06531 a.

### References

- [1] G.E. Kodzhaspirov, A.I. Rudskoy, V.V. Rybin, *Physical Fundamentals and resource-saving technologies of metal products manufacturing* (Nauka, St. Petersburg, 2006). (In Russian).
- [2] A.I. Rudskoj, G.E. Kodzhaspirov, *Technological fundamentals of ultrafine-grained metallic materials manufacturing* (SPbGPU, St. Petersburg, 2012). (In Russian).
- [3] A.I. Rudskoy, Ya.I. Rudaev, *Mechanics of dynamic superplasticity of aluminum alloys* (Nauka, St. Petersburg, 2009). (In Russian).
- [4] O.A. Kajbyshev, *Superplasticity of commercial alloys* (Metallurgiya, Moscow, 1984). (In Russian).
- [5] Yu.M. Vajnblat, N.A. Sharshagin // *Non-ferrous metals* **2** (1984) 67.
- [6] Yu.S. Zolotarevskij, V.A. Panyaev, Ya.I. Rudaev et al. // *Ship-building industry. Series materials science* **16** (1990) 21. (In Russian).
- [7] D. Kitaeva, Y. Rudaev, E. Subbotina, In: *Proceeding of the 23rd International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2014* (Brno, Czech Republic, EU, May 21-23, 2014), p. 347.
- [8] V.V. Sokolovskij, *Theory of plasticity* (Vysshaya shkola, M., 1969). (In Russian).
- [9] N.N. Malinin, *Technological problems of plasticity and creep* (Vysshaya shkola, M., 1979).
- [10] I.A. Kijko, In: *Scientific fundamentals of progressive equipment and technology* (Mashinostroenie, Moscow, 1985), p.102. (In Russian).
- [11] Ya.I. Rudaev // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal* **2** (2005) 57. (In Russian).
- [12] V.S. Smirnov, *Theory of metal forming* (Metallurgiya, Moscow, 1973). (in Russian).
- [13] A.I. Rudskoy, G.E. Kodzhaspirov, *Ultrafine-grained metal materials* (SPbSPU, St. Petersburg, 2015). (In Russian).