

УДК 621.9.011

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ ЛИСТА ИЗ АЛЮМИНИЕВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Д.А. Китаева, Р.Н. Куприев, Е.А. Субботина

Приводится решение задачи оптимального управления изотермическим процессом продольной прокатки листа из алюминиевой заготовки путем сравнения режимов сверхпластичности и условий стандартной горячей деформации.

Ключевые слова: высокотемпературная деформация; продольная прокатка; динамическая сверхпластичность; алюминиевые сплавы.

ON THE PROBLEM OPTIMIZATION OF THE LONGITUDINAL ROLLING PROCEDURE OF ALUMINUM SHEET UNDER HIGH-TEMPERATURE DEFORMATION

D.A. Kitaeva, R.N. Kupriev, E.A. Subbotina

The article provides the solution of a task optimum control of isothermal process longitudinal rolling of a leaf aluminum procurement by comparison of the regimes superplasticity and conditions standard hot deformation.

Keywords: high-temperature deformation; longitudinal rolling procedure; dynamic superplasticity; aluminum alloys.

Введение. Использование эффекта сверхпластичности является одним из наиболее перспективных технологических процессов обработки металлических материалов [1, 2]. Целью таких процессов, как и вообще операций горячей формоизменения, можно считать получение полуфабрикатов с требуемыми формой, размерами и свойствами. Проектированию подобных технологий предшествует глубокая научная проработка, которая, в свою очередь, способствует развитию математических теорий горячей формообразования сплавов [3].

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования позволяют определить сверхпластичность как особое состояние поликристаллических материалов, пластически деформируемых при пониженном напряжении с сохранением в продеформированном металле мелкой исходной структуры (структурная сверхпластичность) или с ее формированием в процессе нагрева и деформации (динамическая сверхпластичность) [4].

Динамическая сверхпластичность алюминиевых сплавов развивается в температурно-скоростных условиях структурного превращения — динамической рекристаллизации [5].

В этих режимах происходит формирование мелкозернистой структуры, и создаются условия для осуществления механизма зернограничного проскальзывания, характерного для сверхпластичности.

В рамках синергетических представлений [6] очаг деформации при прокатке рассматривается как сложный объект [7], в процессе формоизменения которого в зависимости от температурно-скоростных условий возникают области сверхпластичности и пограничные ей зоны высокотемпературной ползучести и термопластичности. Иными словами, в очаге деформации создается сложная структурная ситуация, при которой в некоторой части указанного очага формируется мелкозернистый структурный анклав, связанный с пограничными эффектами метастабильными состояниями. Так возникает задача разработки технологической стратегии процесса путем критерильности оптимизации с целью получения полуфабриката с мелкозернистой структурой и экономии энергоресурсов [8].

Постановка задачи. Считаем, что операция прокатки осуществляется в валках одинакового радиуса, вращающихся с одинаковыми угловыми скоростями (рисунок 1), а очаг деформации нахо-

дится в изотермических условиях в диапазоне температур сверхпластичности [9, 10].

В качестве управляющей переменной принимаем технологический параметр μ , учитывающий, кроме средней скорости v_1 перемещения металла при толщине h_1 на входе в очаг деформации, геометрические и контактные условия (рисунок 1) [11]:

$$\mu = v_1 \left[\frac{\bar{\Psi}}{h_1(1-\Lambda)} \right]^2. \quad (1)$$

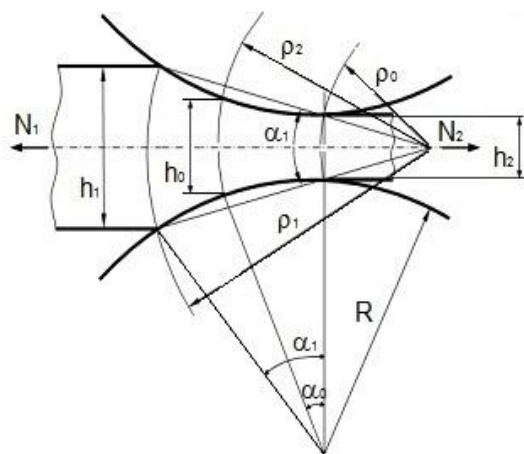


Рисунок 1 – Геометрия процесса прокатки

Здесь $\Lambda = (h_1 - h_2) / h_1$ – обжатие полосы;

$$\bar{\Psi} = \frac{\alpha_1}{\psi \alpha_1 - \sin \alpha_1}, \quad (2)$$

причем $\psi(\alpha_1, \chi) = \frac{\sqrt{1-\chi^2}}{\chi} \sin \alpha_1 - \cos \alpha_1$ [12]; α_1 – угол захвата; χ – экспериментальный коэффициент [13], устанавливающий условия контакта валков и деформируемой полосы.

Решение задачи. Целевую функцию выбираем в виде объема области сверхпластичности в очаге деформации W^{sp} , который при оптимальном сочетании силовых, кинематических и температурных показателей достигает максимума:

$$W^{sp} = \iiint_W dW \rightarrow \max. \quad (3)$$

В цилиндрических координатах (рисунок 1) равенство (3), с учетом того, что вычисляется величина объема, приходящегося на единицу ширины полосы, переписывается в следующем виде:

$$2 \int_0^{\alpha_1/2} \rho^2 d\alpha \rightarrow \max. \quad (4)$$

Поскольку процесс предполагается изотермическим, обратим внимание на поле скоростей деформаций. По скоростям деформаций для области сверхпластичности имеются ограничения [14]:

$$1 - \left(-\frac{\beta}{3m_0} \right)^{1/2} \leq \frac{\dot{\epsilon}_u}{\dot{\epsilon}^*} \leq 1 + \left(-\frac{\beta}{3m_0} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где $\dot{\epsilon}_u$ – интенсивность скоростей деформаций; m_0 – материальная константа; $\beta, \dot{\epsilon}^*$ – соответственно управляющий параметр и внутренний параметр состояния, для изотермического процесса принимающие постоянное значение, причем $\beta < 0$ [4, 15].

Входящая в неравенство (5) интенсивность скоростей деформаций определяется формулой [16]

$$\dot{\epsilon}_u = \frac{1}{\rho^2} L^{1/2}(\alpha). \quad (6)$$

Здесь

$$L(\alpha) = \frac{1}{3} (4k^2 + k'^2), \quad (7)$$

где $k = k(\alpha)$ – разрешающая функция [17].

Неравенство (5) с привлечением (6), (7) приводится к виду

$$\bar{\rho}_2(\alpha) \leq \rho(\alpha) \leq \bar{\rho}_1(\alpha), \quad (8)$$

причем,

$$\bar{\rho}_1 = \left\{ \left[1 - \left(-\frac{\beta}{3m_0} \right)^{1/2} \right]^{-1} \left(\frac{4k^2 + k'^2}{3} \right)^{1/2} \right\}^{1/2};$$

$$\bar{\rho}_2 = \left\{ \left[1 + \left(-\frac{\beta}{3m_0} \right)^{1/2} \right]^{-1} \left(\frac{4k^2 + k'^2}{3} \right)^{1/2} \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

Через $\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2$ обозначены [16] соответственно верхнее и нижнее значения нормированного радиуса, ограничивающие область сверхпластичности в очаге деформации.

Полагая в условии (4) $\rho \in (\rho_2, \rho_1)$, считаем, что сформулирована задача вариационного исчисления, в рамках которой исследуется функционал вида

$$\int_0^{\alpha_1/2} (4k^2 + k'^2)^{1/2} d\alpha \rightarrow \max. \quad (10)$$

Интегрированием соответствующего уравнения Эйлера получаем ограничение на угол захвата в радиальном направлении области сверхпластичности:

$$\alpha_1 < \pi / 4. \quad (11)$$

Вторая часть оптимизационной задачи состоит в выборе оптимального расположения области сверхпластичности в очаге деформации. Учитывая, что в процессе прокатки ставится задача изготовления полосы с мелкозернистой структурой, область сверхпластичности располагаем так, чтобы обеспечить на выходе из валков скоростные условия из сверхпластического диапазона [18, 19].

Сравнивая уравнение на поверхности разрыва скоростей на выходе из очага деформации $\rho_2(\alpha) = (1 - \Lambda)h_1 \frac{2\psi\alpha - \sin 2\alpha}{2\bar{\Psi} \sin \alpha}$ [16] и явное выражение

$$\bar{\rho}_2^2(\alpha) = \frac{2\nu_1 h_1 H^{1/2}(\alpha)}{\sqrt{3}\bar{\Psi} \left[1 + \left(-\frac{\beta}{3m_0} \right) \right]}, \quad (12)$$

получаем равенство, характеризующее оптимальное взаимное расположение $\rho_2(\alpha)$ и $\bar{\rho}_2(\alpha)$, при котором

$$\rho_2(\alpha_1 / 2) = \bar{\rho}_2(\alpha_1 / 2). \quad (13)$$

Как следствие, для параметра μ_{opt} будем иметь:

$$\mu_{opt} = \frac{\sqrt{3} (\alpha_1 \psi - \sin \alpha_1)^2 \left[\frac{2R}{h_1} (1 - \cos \alpha_1) \right]^2}{8 (1 + \psi^2 - 2\psi \cos \alpha_1)^{1/2} \sin^2(\alpha_1 / 2)} \times \frac{h_1}{\bar{\Psi}} \left[1 + \left(-\frac{\beta}{3m_0} \right)^{1/2} \right]. \quad (14)$$

Численные результаты. На рисунке 2 представлены эпюры распределения давления q по длине ρ очага деформации при значениях $\chi = 0,3$; $h_1 = 0,03$ и двух углах захвата валков $\alpha_1 = \pi/9$ (а, в) и $\alpha_1 = \pi/12$ (б, г). Рисунки (а, б) соответствуют сплаву АМг5, а (в, г) – сплаву Д18Т.

На рисунке 2 (а, б) кривые 1 построены для сплава АМг5 вне температурного интервала сверхпластичности при $\beta = 0,231$ ($\theta = 693$ K); кривые 2 – в сверхпластическом диапазоне при $\beta = -0,134$ ($\theta = 763$ K); кривые 3 получены при $\beta = -0,134$, но при оптимальном значении параметра $\mu = \mu_{opt}$ (14). Аналогичная ситуация показана на рисунке 2 (в, г) для сплава Д18Т: кривые 1 – при $\beta = 0,124$ ($\theta = 713$ K), кривые 2 – при $\beta = -0,127$ ($\theta = 783$ K), кривые 3 – при $\beta = -0,127$, $\mu = \mu_{opt}$ (14).

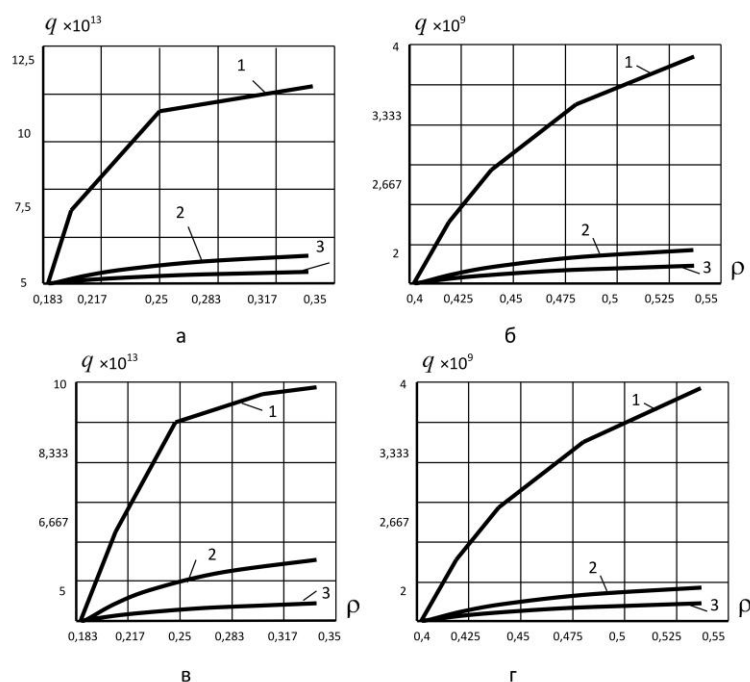


Рисунок 2 – Зависимость давления q на валки от радиуса ρ для сплавов АМг5 (а, б) и Д18Т (в, г) вне (кривые 2), и в режимах (кривые 1, 3) сверхпластичности

Общая тенденция заключается в том, что температурные условия вне сверхпластического диапазона приводят к значительному возрастанию давления на валки (примерно в 5–7 раз), по сравнению с режимами сверхпластичности. При оптимальных значениях параметра $\mu = \mu_{opt}$ и рациональном расположении зоны сверхпластичности давление на валки снижается еще примерно в два раза. Расчеты показали, что увеличение угла захвата α_1 приводит к резкому возрастанию давления на валки. Подобное объясняется снижением параметра μ при росте α_1 и, как следствие, повышением давления.

Опытная прокатка алюминиевого листа в условиях сверхпластичности. Полупромышленный технологический эксперимент по продольной прокатке алюминиевого листа в режимах сверхпластичности был проведен на кафедре «Пластическая деформация металлов» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в сотрудничестве с ЦНИИ КМ «Прометей» в 1990 г. [18]. Тогда была поставлена экспериментальная задача оценки склонности литого алюминиевого сплава 1561 к сверхпластичности при низкоскоростной продольной прокатке в изотермических условиях.

Механические и структурные исследования [18, 19] показали, что оптимальное сочетание энергосиловых и кинематических параметров приводит в условиях сверхпластичности к формированию в продеформированном металле наиболее благоприятной структуры, приближающейся к мелкому зерну, и в результате – к наиболее рациональному сочетанию прочностных и деформационных характеристик, а также к минимальной анизотропии механических свойств [20]. В частности, такая технология может быть внедрена для подготовки мелкозернистой структуры в тонколистовом материале и дальнейшего использования при изготовлении листов под пневмо- и газозоформовку.

Заключение. В рамках модели [4, 6], устанавливающей связь между напряжениями, температурой и скоростями деформаций, разработанной с привлечением теории бифуркаций и соотношений упругопластических процессов малой кривизны [3, 17], сформулирована задача оптимального управления изотермическим (в условиях сверхпластичности) процессом прокатки. Решение основано на вариационной задаче максимизации объема и выборе рационального расположения зоны сверхпластичности в очаге деформации с целью изготовления полосы с мелкозернистой структурой.

Исследование проведено в рамках гранта Санкт-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности в 2016 году.

Литература

1. Кунеев В.И. Технологии динамической сверхпластичности / В.И. Кунеев, Ш.Т. Пазылов, Я.И. Рудаев, Д.И. Чашников // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. № 6. С. 62–70.
2. Langdon T.G. Forty-five Years of Superplastic Research: Recent Developments and Future Prospects / T.G. Langdon // Materials Science Forum. Vol. 838–839. P. 3–12.
3. Рудаев Я.И. Сверхпластичность в процессах объемного формообразования / Я.И. Рудаев, Д.А. Китаева, Г.Е. Коджаспиров // XI Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теорет. и прикл. механики (20–24 августа 2015, Казань). Казань: Изд-во Казанск. ун-а, 2015. С. 3252–3254.
4. Рудской А.И. Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов / А.И. Рудской, Я.И. Рудаев. СПб.: Наука, 2009. 217 с.
5. Вайнблат Ю.М. Динамическая рекристаллизация алюминиевых сплавов / Ю.М. Вайнблат, Н.А. Шаршагин // Цветные металлы. 1984. № 2. С. 67–70.
6. Китаева Д.А. Синергетические представления в механике динамической сверхпластичности / Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 4–1 (183). С. 274–283.
7. Рудаев Я.И. Моделирование прессопрокатки листа с использованием сверхпластичности / Я.И. Рудаев // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2005. № 2. С. 57–64.
8. Генкин А.Л. Моделирование и оптимизация горячей прокатки полос / А.Л. Генкин. М.: URSS: Ленанд, 2016. 168 с.
9. Жданов Н.В. Температурно-скоростная деформация литого алюминиевого сплава 1561 / Н.В. Жданов, В.А. Паняев, Я.И. Рудаев, Д.И. Чашников // Судостроительная промышленность. Серия Материаловедение. Металловедение. Металлургия. 1990. Вып. 15. С. 45–49.
10. Золоторевский Ю.С. Сверхпластичность некоторых алюминиевых сплавов / Ю.С. Золоторевский, В.А. Паняев, Я.И. Рудаев, А.И. Царегородцева, Д.И. Чашников // Судостроительная промышленность. Серия Мате-

- риаловедение. Металловедение. Metallurgia. 1991. Вып. 16. С.62–70.
11. *Китаева Д.А.* Решение задачи продольной прокатки алюминиевого листа в условиях сверхпластичности / Д.А. Китаева, Г.Е. Коджаспиров, Я.И. Рудаев, Е.А. Субботина // Современные проблемы теории машин. 2015. № 3. С. 191–199.
 12. *Коджаспиров Г.Е.* Задача продольной прокатки листа из алюминиевой заготовки в режимах сверхпластичности // Г.Е. Коджаспиров, Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев, Е.А. Субботина // Materials Physics and Mechanics. 2016. Т. 25. № 1. С. 49–55.
 13. *Соколовский В.В.* Теория пластичности / В.В. Соколовский. М.: Высшая школа, 1969. 608 с.
 14. *Горынин И.В.* К вопросу об аналитических условиях начала сверхпластичности / И.В. Горынин, Я.И. Рудаев, Д.И. Чашников // Судостроительная промышленность. Серия Материаловедение. Металловедение. Metallurgia. 1987. Вып. 5. С. 28–31.
 15. *Kitaeva D.* About kinetic equations of dynamic superplasticity model / D. Kitaeva, Ya.I. Rudaev // Proceedings of the XXXI Summer School «Advanced Problems in Mechanics». June 22–July 2, 2003. St. Petersburg: Polytechnical Publishing House, 2003. P.172–176.
 16. *Rudaev Ya.* Modelling of longitudinal rolling procedure of aluminum sheet under superplasticity conditions / Ya. Rudaev, G. Kodzhaspirov, D. Kitaeva, E. Subbotina // Proceeding of the 24th International Conference on Metallurgy and Materials METAL-2015. June 3–5, 2015. Brno. Czech Republic. Ostrava: TANGER, 2015. P. 389–394.
 17. *Кийко И.А.* Пластическое течение металлов / И.А. Кийко // Научные основы прогрессивной техники и технологии. М.: Машиностроение, 1985. С. 102–133.
 18. *Барахтина Н.Н.* Исследование оптимальных температурно-скоростных параметров горячей прокатки листов из алюминиевого сплава АМг61 (1561) / Н.Н. Барахтина, Ю.С. Золоторевский, В.И. Криворотов, Я.И. Рудаев, Д.И. Чашников // Вопросы материаловедения. Серия Металловедение. Metallurgia. 1992. Вып. 19–20. С.73–79.
 19. *Kitaeva D.* About the volume forming of aluminium details in superplasticity conditions / D. Kitaeva, Ya. Rudaev, E. Subbotina // Proceeding of the 23rd International Conference on Metallurgy and Materials METAL-2014. May 21–23, 2014. Brno. Czech Republic. Ostrava: TANGER, 2014. P. 347–352.
 20. *Китаева Д.А.* О температурно-скоростном деформировании алюминиевых сплавов / Д.А. Китаева, Ш.Т. Пазылов, Я.И. Рудаев // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57. № 2 (336). С. 182–189.