

*Рудаев Я.И., Сулайманова С.М.*

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРЕССОПРОКАТКИ АЛЮМИНИЕВОГО ЛИСТА В РЕЖИМАХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ**

*Ya.I. Rudaev, S.M. Sulaimanova*

**THE OPTIMIZATION OF PROCESS PRESSURE WITH ROLLING OF ALUMINUM SHEET IN REGIMES SUPERPLASITY**

УДК: 621.777–422.2:621.7.011

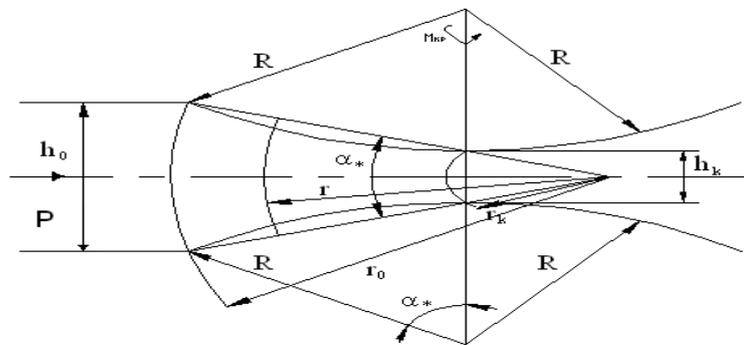
*Рассматривается пример оптимизации технологического процесса прессопрокатки алюминиевого листа в режимах сверхпластичности. Установлены энергосиловые и кинематические характеристики, отвечающие изготовлению полуфабриката с качественными структурными показателями.*

*The example of optimization technological process pressure with rolling of aluminum sheet in regimes superplasticity is considered. It was established the energy power and kinematic characteristics corresponding to manufacturing of a semifinished item with qualitative structural parameters.*

Трудности, встречаемые при математической формулировке задач объемного формоизменения с применением сверхпластичности подробно обсуждены в [1, 2]. Поэтому, следуя [2], считаем, что на изменение силовых, термических и кинематических условий очаг деформации откликается изменением

объема и расположения области сверхпластичности, которая, естественно, составляет часть указанного очага. При этом оптимизационная задача разбивается на две части – максимизацию объема зоны сверхпластичности и оптимизацию расположения её в очаге в соответствие конечной цели операции.

В [5] построена двумерная математическая модель прессопрокатки алюминиевого листа в термических режимах сверхпластичности. Установлены поля напряжений, скоростей перемещений и деформаций, а также зависимость между усилием прессопрокатки от степени обжатия полосы и скоростью перемещения на входе в валки. Схематично процесс прессопрокатки представлен на рис.1.



**Рис. 1.** Схема процесса прессопрокатки листа.

Поскольку исследуется изотермический процесс, то ответственность за реализацию эффекта сверхпластичности возлагается на поле скоростей деформаций. Условие ограниченности на скоростной диапазон сверхпластичности представляется [1,3] в виде неравенства

$$\eta_u^{(1)} \leq \eta_u \leq \eta_u^{(2)}. \tag{1}$$

Здесь с учетом

$$q_u = m_0 \eta_u^3 + \beta(\xi) \eta_u, \quad \dot{\epsilon}_u = \frac{1}{\rho^2} L^{1/2}(\alpha),$$

а также [3], имеем

$$\eta_u = \frac{L^{1/2}(\alpha)}{\rho^2} - 1; \quad \eta_u^{(1)} = -(-\beta/3m_0)^{1/2}; \quad \eta_u^{(2)} = (-\beta/3m_0)^{1/2}. \tag{2}$$

причем

$$L(\alpha) = \frac{1}{3} [4k^2(\alpha) + k'^2(\alpha)]. \quad (3)$$

где  $k=k(\alpha)$  – функция, подлежащая определению,  $m_0 \sim \text{const}$ ;  $\beta(\xi)$  – управляющий параметр,  $q_u$ ,  $\eta_u$  – приведенные интенсивности напряжений и скорости деформаций.

Неравенство (1) с привлечением (2) и (3) можно переписать так

$$\rho_2 \leq \rho \leq \rho_1, \quad (4)$$

причем

$$\rho_1 = \left\{ \left[ 1 - (-\beta/3m_0)^{1/2} \right]^{-1} \cdot \left( \frac{4k^2 + k'^2}{3} \right)^{1/2} \right\}^{1/2}; \quad (5)$$

$$\rho_2 = \left\{ \left[ 1 + (-\beta/3m_0)^{1/2} \right]^{-1} \cdot \left( \frac{4k^2 + k'^2}{3} \right)^{1/2} \right\}^{1/2},$$

где через  $\rho_1, \rho_2$  обозначены соответственно верхнее и нижнее значение нормированного радиуса, ограничивающие зону сверхпластичности.

Произвольная величина  $\rho \in ]\rho_2, \rho_1[$  может быть определена следующим образом

$$\rho = \frac{1}{\Pi} \left( \frac{4k^2 + k'^2}{3} \right)^{1/4}, \quad (6)$$

где  $\Pi \in ]1 - (-\beta/3m_0)^{1/2}; 1 + (-\beta/3m_0)^{1/2}[$ .

Требование максимизации объема области сверхпластичности ( $W^{cn}$ ) сводится к условию

$$W^{(cn)} = \iiint_W dW \rightarrow \max. \quad (7)$$

В цилиндрических координатах вместо (7) будем иметь

$$2 \int_0^{\alpha^*/2} \rho^2 d\alpha \rightarrow \max. \quad (8)$$

Теперь можно утверждать, что с учетом (6) и (8) получается задача вариационного исчисления, для решения которой необходимо исследовать функционал

$$\bar{\Phi} = \int_0^{\alpha^*/2} (4k^2 + k'^2)^{1/2} d\alpha. \quad (9)$$

Поскольку подинтегральная функция  $I = (4k^2 + k'^2)^{1/2} = I(k, k')$ ,

то первый интеграл уравнения Эйлера-Пуассона вычисляется сразу и имеет вид

$$I - k'I_{k'} = C, \quad (10)$$

где  $C$  – произвольная постоянная интегрирования.

Уравнение (10) легко приводится к дифференциальному уравнению с разделенными переменными

$$k' = \frac{2k}{C} (4k^2 - C^2)^{1/2}. \quad (11)$$

Решение уравнения (11) при условии  $\tau_{\rho\alpha} \Big|_{\alpha=0} = 0, k(\alpha) \Big|_{\alpha=0} = 0$  будет равен

$$k(\alpha) = \frac{C}{2} \cos^{-1} 2\alpha. \quad (12)$$

Из (12) следует ограничение на угол захвата  $\alpha^*$ , образующего в радиальном направлении границу области сверхпластичности

$$\alpha^* \leq \pi/4. \quad (13)$$

Перейдем теперь ко второй части оптимизационной задачи, сводимой к выбору рационального расположения сверхпластической области в очаге деформации. При этом предполагаем конечную цель процесса в виде изготовления прессопрокаткой полосы с качественной ультрамелкозернистой структурой. Поэтому сверхпластическую область расположим так, чтобы исключить на выходе из валков скоростные условия, находящиеся вне диапазона сверхпластичности. Поверхность разрыва скоростей  $\rho_k = \rho_k(\alpha)$  здесь определяется следующей формулой [5]

$$\rho_k(\alpha) = \frac{2\alpha\psi - \sin 2\alpha}{2\lambda\bar{\psi}\sin\alpha}; \quad (14)$$

а уравнение, ограничивающее область сверхпластичности по верхнему скоростному пределу, с учетом  $v_p = \frac{v_0}{\rho\bar{\psi}}(\psi - \cos 2\alpha)$  [5], будет иметь вид

$$\rho_2^2 = \frac{2v_0(1 + \psi^2 - 2\psi\cos 2\alpha)^{1/2}}{\sqrt{3}[1 + (-\beta/3m_0)^{1/2}]}, \quad (15)$$

где для  $\psi, \bar{\psi}$  . имеем соответственно

$$\psi(\alpha^*, \chi) = \cos\alpha^* + \frac{\sqrt{1-\chi^2}}{\chi}\sin\alpha^*, \quad \bar{\psi} = \frac{\alpha^*}{\alpha^*\psi - \sin\alpha^*}. \quad (16)$$

$\chi$  - коэффициент пропорциональности, устанавливаемый экспериментально [4].

Условие пересечения поверхностей (14), (15) представляется равенством

$$\frac{8\lambda^2 v_0}{\sqrt{3}[1 + (-\beta/3m_0)^{1/2}]\bar{\psi}^2} = \frac{(2\alpha\psi - \sin 2\alpha)^2}{(1 + \psi^2 - 2\psi\cos 2\alpha)^{1/2} \sin^2\alpha}, \quad (17)$$

где,  $v_0$  - средняя скорость перемещения на входе в валки,  $\lambda$  - степень обжатия, а для  $\psi, \bar{\psi}$  имеем (16).

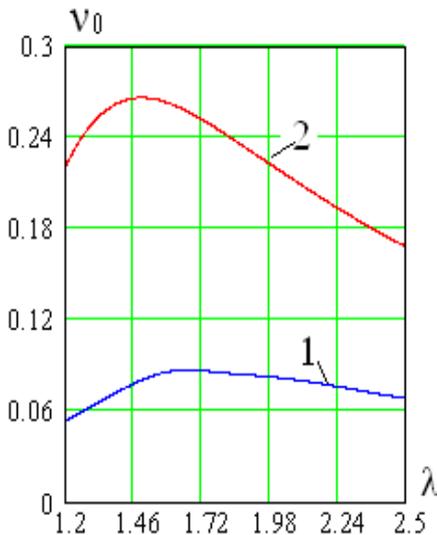
Несложно показать, что функция (17) положительно определена, по крайней мере, при условии (13). Последнее означает, что в пределах (13) отсутствует пересечение поверхностей, ограничивающих очаг деформации  $\rho_k = \rho_k(\alpha)$  и область сверхпластичности по верхнему пределу скоростей деформаций  $\rho_2 = \rho_2(\alpha)$ . Теперь очевидно, что оптимальным будет взаимное расположение поверхностей  $\rho_k(\alpha)$  и  $\rho_2(\alpha)$  при условии

$$\rho_k(\alpha^*/2) = \rho_2(\alpha^*/2). \quad (18)$$

Поэтому, положив в (17) угол  $\alpha = \alpha^*/2$ , получим выражение для оптимальной средней скорости перемещения

$$\text{на входе в валки в форме } v_0 = v_{\text{опт}} = \frac{\sqrt{3}}{8\lambda^2\bar{\psi}^2} \cdot \frac{(\alpha^*\psi - \sin\alpha^*)^2 [1 + (-\beta/3m_0)^{1/2}]}{(1 + \psi^2 - 2\psi\cos\alpha^*)^{1/2} \sin^2(\alpha^*/2)}. \quad (19)$$

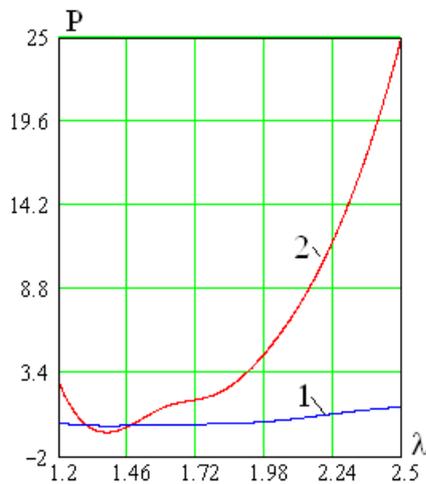
На рис. 2 представлены графически зависимости  $v_0 = v_{\text{опт}}(\lambda)$  от степени обжатия полосы, на основании решения оптимизационной задачи и данных по алюминиевому сплаву АМг5 [3] (кривая 1) и заимствованные из [5] для случая, когда только температура принадлежит диапазону сверхпластичности (кривая 2). В конкретных расчетах было принято  $m_0 = 0,33$ ,  $\chi = 0,3$ .



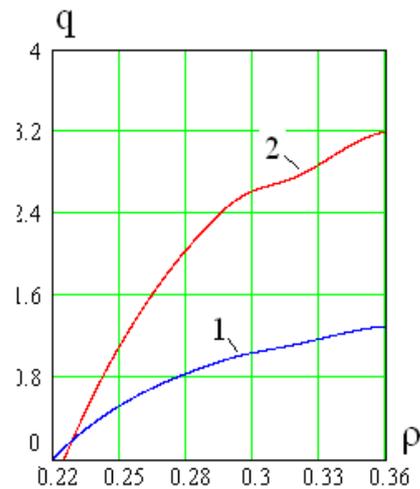
**Рис.2.** Зависимость оптимальной скорости прессопрокатки от степени обжатия полосы.

На рис. 3 (кривая 1) приведены результаты расчетов усилия подачи материала в валки при  $v_0 = v_{\text{опт}}$ ,  $\beta = -0,1674$ ; кривая 2 соответствует усилиям без оптимизации.

На рис. 4 показана (кривая 1) - давления на валки. Указанная эпюра соответствует принятым выше параметрам материала и процесса и построена при  $\lambda = 1,7$ . Этому значению отвечают  $\alpha^* = 0,194$ ;  $v_0 = 0,086$ ;



**Рис.3.** Зависимость усилия прессо- прокатки от степени обжатия полосы.



**Рис.4.** Зависимость прессовой состав- ляющей процесса от степени обжатия полосы.

$\rho_0 = 0,3290$ ;  $\rho_k = 0,2056$ ,  $\beta = -0,1674$ . Кривая 2 соответствует давлению на валки без оптимизации [5].

Проведенные расчеты показывают, что для обеспечения на выходе из валков высококачественного алюминиевого листа скорость требуется снизить примерно в 2...2,5 раза. При этом усилие подачи на валки снижается при средних степенях обжатия в 5...6 раз, а давление на валки – в 2,5...3 раза.

**Литература:**

1. Рудской А.И., Казакевич Г.С. Механика сплошных сред. – СПб: Изд-во СПб государственного политехнического университета. – 2003. – 264 с.
2. Платонов В.В., Рудаев Я.И., Чашников Д.И. Прессование прутка с использованием сверхпластичности // Вопросы материаловедения. – 1996. – Вып. 3(6). – С. 29-39.
3. Рудаев Я.И. Введение в механику динамической сверхпластичности. – Бишкек: Изд-во КРСУ. – 2003. – 134 с.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение. – 1975. – 400 с.
5. Сулайманова С.М. Математическое моделирование прессо- прокатки алюминиевого листа // Известия Вузов. – 2008. – Вып.5-6. – С. 220-224.