

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.

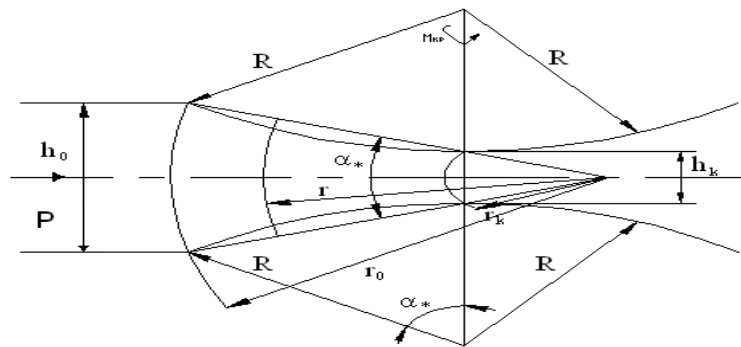


Рис. 1. Схема процесса прессопрокатки листа.

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 , η_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 ρ_1, ρ_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 α^* , 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

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

χ - 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, λ – 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 $m_0 = 0,33$, $\chi = 0,3$.

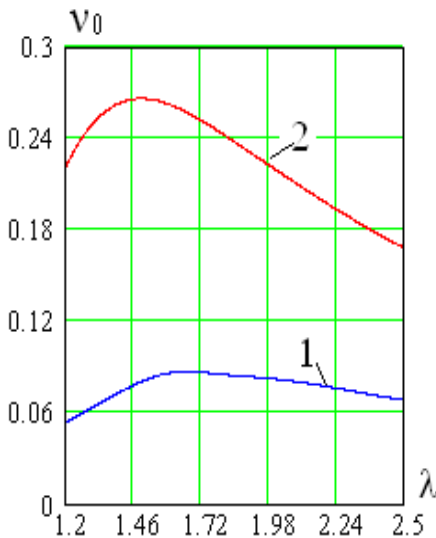


Рис.2. Зависимость оптимальной скорости прессопрокатки от степени обжатия полосы.

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 $\alpha^* = 0,194$; $v_0 = 0,086$;

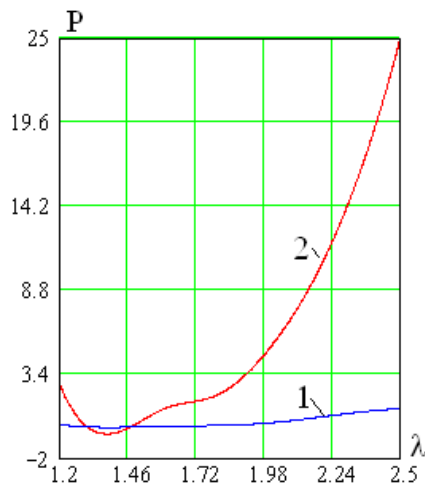


Рис.3. Зависимость усилия прессо- прокатки от степени обжатия полосы.

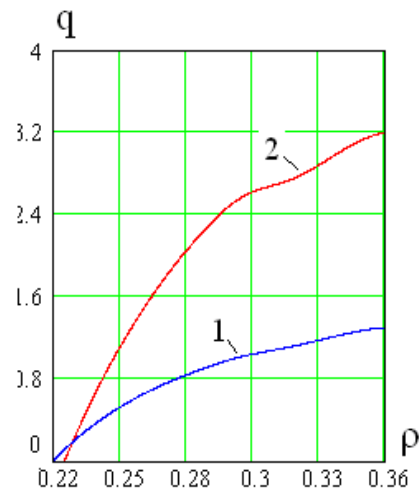


Рис.4. Зависимость прессовой состав- ляющей процесса от степени обжатия полосы.

$\rho_0 = 0,3290$; $\rho_k = 0,2056$, $\beta = -0,1674$. 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.