

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

УДК 621.777: 621.777.22

Беляев С.В., Сидельников С.Б., Довженко И.Н., Пешанский А.С., Разумкин В.В.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ПРОЦЕССА ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ

Профили из низколегированных легкодеформируемых алюминиевых сплавов типа АД31 представляют собой высокоэффективный вид металлопродукции, который имеет развитый мировой рынок с постоянным приростом потребления и составляет 85–90% от всего объема прессованной продукции [1]. Основным способом производства данных профилей является прямое полунепрерывное прессование на автоматизированном комплексе с мощным гидравлическим прессом, оснащенным тянущим устройством профиля на выходе из канала матрицы, с закалкой на столе пресса и использованием форкамерных матриц [2].

Температуры нагрева прессового инструмента и заготовки для прессования, выходная температура профиля и ее изменение в процессе выдавливания оказывают решающее влияние на достижение максимально возможной скорости прессования и требуемого качества профилей. Поэтому расчет температурных условий для полунепрерывного прессования является актуальной задачей, обеспечивающей рациональное построение технологии производства профилей из легкодеформируемых алюминиевых сплавов.

Определение температурных полей при прессовании связано с решением сопряженной краевой задачи нестационарной теплопроводности в системе деформируемый металл и прессовый инструмент, которая не имеет замкнутого решения [3]. При решении данной задачи возникают значительные трудности, что обусловило привлечение различных методов при проведении исследований и осуществлении расчетов температурных условий.

Расчет температурных условий процесса прессования можно выполнить численными методами, так как увеличение мерности и факторности задачи приводят лишь к увеличению объема вычислений и необходимости применения ЭВМ с соответствующим объемом памяти и быстродействием [4, 5]. В то же время по-прежнему актуально применение инженерных методов расчета, особенно тогда, когда получена аналитическая зависимость с достаточной степенью точности. Инженерные ме-

тоды расчета температурных условий, как правило, основаны на уравнении теплового баланса [4]. Весь объем заготовки делится на элементарные блоки, число которых зависит от характера рассматриваемой задачи. Для каждого блока составляют уравнение теплового баланса

$$\Delta Q_i = c_i \gamma_i V_i (T_{i1} - T_{i0}), \quad (1)$$

где ΔQ_i – приобретенное или утраченное тепло i -м блоком за интервал времени Δt ; c_i, γ_i – теплоемкость и плотность прессуемого металла; V_i – объем блока; T_{i1}, T_{i0} – температура блока в начале и конце интервала времени Δt .

Во время полунепрерывного прессования элементарные блоки прессуемого металла проходят следующие характерные зоны по интенсивности выделения и расположению источников тепла (рис. 1):

- зона прессуемого металла в контейнере на подходе к очагу деформации, где действуют поверхностные источники тепла от трения на поверхности контейнера и заготовки $q_{ТРК}$;
- очаг деформации в контейнере, где действуют поверхностные источники тепла от трения на поверхности очага деформации в контейнере $q_{ТРКД}$ и объемные источники тепла в очаге деформации в контейнере $q_{VKД}$;
- зона прессуемого металла в форкамере на подходе к очагу деформации в ней, где действуют поверхностные источники тепла от трения на поверхности заготовки и форкамеры $q_{ТРКФ}$;
- очаг деформации в форкамере, где действуют поверхностные источники тепла от трения на поверхности очага деформации в форкамере $q_{ТРКФД}$, объемные источники тепла в очаге деформации в форкамере $q_{VKФ}$;
- зона прессуемого металла, находящегося в рабочем канале матрицы, где действуют поверхностные источники тепла от трения на поверхности профиля и матрицы $q_{ТМ}$.

Выходную температуру пресс-изделия можно определить по формуле

$$T_{\text{ПР}}(t) = T_{10} + \Delta T_{1K}(t_{1K}) + \Delta T_{1KD}(t_{1KD}) + \Delta T_{1\Phi}(t_{1\Phi}) + \Delta T_{1\Phi D}(t_{1\Phi D}) + \Delta T_{1M}(t_{1M}), \quad (2)$$

где $t_1 = t_{1K} + t_{1KD} + t_{1\Phi} + t_{1\Phi D} + t_{1M}$ – время прессования элементарного блока металла;

$\Delta T_{1K}, \Delta T_{1KD}, \Delta T_{1\Phi}, \Delta T_{1\Phi D}, \Delta T_{1M}$ – изменение температуры элементарного блока металла во время прохождения вышеперечисленных характерных зон.

Рассмотрим элементарный цилиндрический блок размером dx , находящийся в контейнере на расстоянии x перед очагом деформации в контейнере (см. рис. 1). Время перемещения данного блока до очага деформации составит

$$t_{1K} = \frac{x}{v_{\text{ПР}}}, \quad (3)$$

где $v_{\text{ПР}}$ – скорость прессования.

Принимая во внимание, что во время подхода данного блока металла до очага деформации на его теплосодержание оказывают влияние теплообмен с контейнером в вертикальном направлении и в горизонтальном направлении – вдоль оси прессования от очага деформации, изменение температуры данного блока перед очагом деформации будет равно

$$\Delta T_{1K}^{\text{вер}} + \Delta T_{1K}^{\text{гор}}, \quad (4)$$

где $\Delta T_{1K}^{\text{вер}}, \Delta T_{1K}^{\text{гор}}$ – изменение температуры прессуемого металла на подходе к очагу деформации от теплообмена в вертикальном и горизонтальных направлениях соответственно.

Составляющие $\Delta T_{1K}^{\text{вер}}, \Delta T_{1K}^{\text{гор}}$ определяем на основе теплового баланса элементарного блока, а затем находим изменение средней температуры прессуемого металла от теплообмена в верти-

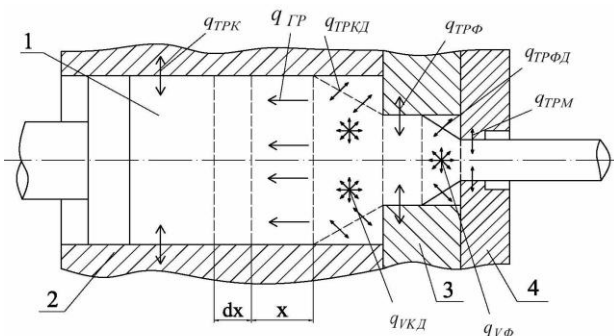


Рис. 1. Тепловое воздействие при прессовании с форкамерной матрицей:
1 – заготовка; 2 – контейнер;
3 – форкамера; 4 – матрица

кальном направлении во время его движения к очагу деформации в контейнере

$$\Delta T_{1K}^{\text{вер}} = \frac{4t_{1K}}{c_1\gamma_1(k_1+1)D_K} \left(\varphi_{\text{ТРК}}k_1 - \frac{2\Delta T \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{1K}}} \right), \quad (5)$$

где $q_{\text{ТРК}} = \mu_K \sigma_{SK} v_{\text{ПР}}$; μ_K – коэффициент трения на поверхности заготовки в контейнере; σ_{SK} – среднее сопротивление деформации на границе контакта заготовки и контейнера.

Изменение средней температуры прессуемого металла в горизонтальном направлении определяем по формуле

$$\Delta T_{1K}^{\text{гор}} = \frac{2q_{VKД} \sqrt{a_1 t_{1K}}}{3c_1\gamma_1 \sqrt{\pi} (v_{\text{ПР}} + 3,2 \sqrt{a_1/t_{1K}})}. \quad (6)$$

Очаг деформации в контейнере можно рассмотреть как один из блоков [4]. Тогда уравнение теплового баланса для данного блока запишется в виде

$$c_1\gamma_1 \Delta T_{1KD} \cdot V_{KD} - F_{KD} \int_0^{t_d} q_{\text{ТРКД}}(t) dt + V_{KD} \int_0^{t_d} q_{VKД}(t) dt - K_{TV} F_K \int_0^{t_d} q_{ГР}(t) dt, \quad (7)$$

где V_{KD} и F_{KD} – объем и боковая поверхность очага деформации в контейнере; $F_K = \frac{\pi D_K^2}{4}$ – площадь поперечного сечения контейнера, $K_{TV} = 1 - v_{\text{ПР}}/v_T$ – коэффициент потерь тепла; $q_{\text{ТРКД}}$ и $q_{VKД}$ – плотности источников тепла на поверхности и в объеме очага деформации.

Последние можно рассчитать по формулам:

$$q_{\text{ТРКД}} = \mu_{KD} \sigma_{SKД} v_{\text{СРКД}}, \quad (8)$$

где μ_{KD} – коэффициент трения на поверхности очага деформации в контейнере; $\sigma_{SKД}$ – среднее сопротивление деформации в очаге деформации в контейнере; $v_{\text{СРКД}}$ – средняя скорость движения прессуемого металла по поверхности очага деформации в контейнере;

$$q_{VKД} = \frac{p_K}{t_{KD}}, \quad (9)$$

где $p_K = \frac{\beta \sigma_{SKД} \cdot \ln \lambda_K}{\cos^2(\alpha_K/2)}$ – давление прессования в

очаге деформации; $\beta = 1,1$; $\lambda_k = F_k / F_\phi$ – вытяжка из контейнера в форкамеру; α_k – угол наклона образующей очага деформации в контейнере; F_k и F_ϕ – площади поперечного сечения контейнера и форкамеры; время деформации: $t_{кд} = \frac{V_{кд}}{F_k \cdot v_{пр}}$.

Из (7) находим изменение средней температуры прессуемого металла во время его движения в очаге деформации $t_{кд}$ в контейнере:

$$\Delta T_{1кд} = \frac{F_{кд} \cdot t_{кд}}{c_1 \gamma_1 (k_1 + 1) \cdot V_{кд}} \times \left(q_{ТРкд} \cdot k_1 - \frac{4q_{Vкд}}{3} \sqrt{\frac{a_1 \cdot t_{кд}}{\pi}} - \frac{2\Delta T_{кд} \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{кд}}} \right) + \frac{q_{Vкд} \cdot t_{кд}}{c_1 \gamma_1} \left(1 - \frac{2K_{IV} F_k}{3V_{кд}} \sqrt{\frac{a_1 t_{кд}}{\pi}} \right). \quad (10)$$

Методика расчета объема $V_{кд}$ и боковой поверхности очага деформации $F_{кд}$ при прессовании подробно изложена в работах И.Л. Перлина и М.З. Ерманка [3, 5].

При определении $\Delta T_{кд} = T_{ГР}(t_1) - T_{кд}$ – разности температур деформируемого металла на входе в очаг деформации и контейнера находим изменение температуры контейнера в очаге деформации [4]:

$$T_{кд} = \frac{t_1 - t_{кд}}{c_2 \gamma_2 (k_1 + 1) D_k (r^2 + r)} \times \left\{ \frac{4q_{Vкд}}{3} \sqrt{\frac{a_1 (t_1 - t_{кд})}{\pi}} \times \left[1 - 3\sqrt{\pi} (1 + 2r) \cdot i^3 \operatorname{erfc} \left(\frac{R}{2\sqrt{a_2 (t_1 - t_{кд})}} \right) \right] + q_{ТРкд} \left[1 - 4(1 + 2r) \cdot i^2 \operatorname{erfc} \left(\frac{R}{2\sqrt{a_2 (t_1 - t_{кд})}} \right) \right] + \frac{2(T_{10} - T_{20}) b_1}{\sqrt{\pi (t_1 - t_{кд})}} \left[1 - \sqrt{\pi} (1 + 2r) - \times \operatorname{ierfc} \left(\frac{R}{2\sqrt{a_2 (t_1 - t_{кд})}} \right) \right] \right\} + T_{20}, \quad (11)$$

где $R \approx 3,2\sqrt{a_2(t_1 - t_{кд})}$ – глубина проникновения тепла в контейнер за время контакта [6] $t_1 - t_{кд}$; $r = R/D_k$; $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi} \int_x^\infty e^{-x^2} dx$; $i^n \operatorname{erfc}(z) = \int_z^\infty i^{n-1} \operatorname{erfc}(z) dz$.

Изменения температуры во время прохождения прессуемого металла к очагу деформации в форкамере, через форкамеру и рабочий канал матрицы определяются аналогично

$$\Delta T_{1\phi} = \frac{t_{1\phi} (F_{H\phi} - F_{H\phiД})}{c_1 \gamma_1 (V_\phi - V_{\phiД}) (k_3 + 1)} \times \left(q_{ТР\phi} \cdot k_3 - \frac{2\Delta T_{\phiМ} \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{1\phi}}} \right), \quad (12)$$

где $F_{H\phi}$ и $F_{H\phiД}$ – площади наружных поверхностей; V_ϕ и $V_{\phiД}$ – объемы форкамеры и очага деформации в форкамере соответственно; $k_3 = b_1 / b_3$; $\Delta T_{\phiМ}$ – разность температур деформируемого металла в форкамере и самой форкамеры;

$$q_{ТР\phi} = \mu_{\phiК} \lambda_k v_{пр} \sigma_{S\phi}, \quad (13)$$

где $\mu_{\phiК}$ – коэффициент трения; $\sigma_{S\phi}$ – среднее сопротивление деформации деформируемого металла в форкамере.

$$\Delta T_{1\phiД} = \frac{F_{H\phiД} \cdot t_{\phiД}}{c_1 \gamma_1 (k_3 + 1) \cdot V_{\phiД}} \times \left(q_{ТР\phiД} \cdot k_3 - \frac{4q_{V\phi}}{3} \sqrt{\frac{a_1 \cdot t_{\phiД}}{\pi}} - \frac{2\Delta T_{\phiМ} \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{\phiД}}} \right) + \frac{q_{V\phi} \cdot t_{\phiД}}{c_1 \gamma_1}, \quad (14)$$

где $q_{ТР\phiД}$ и $q_{V\phi}$ – плотность источников тепла на поверхности и в объеме очага деформации:

$$q_{ТР\phiД} = \mu_{\phiД} \sigma_{S\phi} v_{СР\phiД} \lambda_k, \quad (15)$$

где $\mu_{\phiД}$ – коэффициент трения на поверхности очага деформации в контейнере; $v_{СР\phiД}$ – средняя скорость движения прессуемого металла по поверхности очага деформации в форкамере;

$$q_{V\phi} = \frac{p_\phi}{t_{\phiД}}, \quad (16)$$

где $p_\phi = \frac{\beta \sigma_{S\phi} \cdot \ln \lambda_\phi}{\cos^2(\alpha_\phi / 2)}$ – давление прессования в

очаге деформации; $\beta = 1,1$; $\lambda_\phi = F_\phi / F_{PP}$ – вытяжка из контейнера в профиль; α_ϕ – угол наклона образующей очага деформации в форкамере; F_{PP} – площадь поперечного сечения профиля; $t_{\phiД} = \frac{V_{\phiД}}{F_\phi \cdot v_{PP} \cdot \lambda_K}$.

$$\Delta T_{1M} \frac{t_{1M} \Pi_{PP}}{c_1 \gamma_1 F_{PP} (k_4 + 1)} \times \left(q_{TRM} \cdot k_4 - \frac{2\Delta T_{MPP} \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{1M}}} \right), \quad (17)$$

где Π_{PP} – периметр профиля; $k_4 = b_1 / b_4$; ΔT_{MPP} – разность температур профиля и матрицы;

$$q_{TRM} = \mu_M \lambda_\Sigma v_{PP} \sigma_{S\phi}, \quad (18)$$

где μ_M – коэффициент трения на поверхности калибрующего пояска матрицы.

Подставляя найденные значения изменения температуры элементарного блока во время прохождения характерных зон при прессовании в (2), можно определить выходную температуру пресс-изделия:

$$T_{PP}(t) = T_{10} + \frac{1}{c_1 \gamma_1} \left[\frac{4t_{1K}}{(k_1 + 1)D_K} \times \left(q_{TRK} k_1 - \frac{2\Delta T \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{1K}}} \right) + \frac{2q_{VKД} \sqrt{a_1 t_{1K}}}{3\sqrt{\pi} (v_{PP} + 3, 2\sqrt{a_1 / t_{1K}})} + \frac{F_{КД} \cdot t_{КД}}{(k_1 + 1) \cdot V_{КД}} \times \left(q_{TRКД} \cdot k_1 - \frac{4q_{VKД}}{3} \sqrt{\frac{a_1 \cdot t_{КД}}{\pi}} - \frac{2\Delta T_{Д} \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{КД}}} \right) + \right.$$

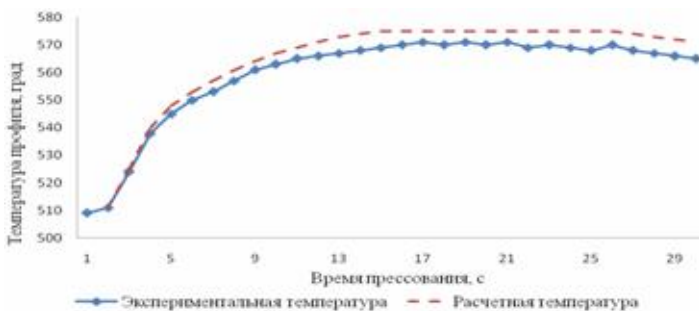


Рис. 2. Изменение выходной температуры профиля из сплава АД31

$$+ q_{VKД} \cdot t_{КД} \left(1 - \frac{2K_{TV} F_K}{3V_{КД}} \sqrt{\frac{a_1 t_{КД}}{\pi}} \right) + \frac{t_{1\phi} (F_{H\phi} - F_{H\phiД})}{(V_\phi - V_{\phiД}) (k_3 + 1)} \left(q_{TR\phi} \cdot k_3 - \frac{2\Delta T_{\phi M} \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{1\phi}}} \right) + \frac{F_{H\phiД} \cdot t_{\phiД}}{(k_3 + 1) \cdot V_{\phiД}} \left(q_{TR\phiД} \cdot k_3 - \frac{4q_{V\phi}}{3} \sqrt{\frac{a_1 \cdot t_{\phiД}}{\pi}} - \frac{2\Delta T_{\phi M} \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{\phiД}}} \right) + q_{VK} \cdot t_{\phiД} + \frac{t_{1M} \Pi_{PP}}{F_{PP} (k_4 + 1)} \times \left(q_{TRM} \cdot k_4 - \frac{2\Delta T_{MPP} \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{1M}}} \right). \quad (19)$$

Полученное выражение можно упростить, при этом оно примет следующий вид:

$$T_{PP}(t) = T_{10} + \frac{1}{c_1 \gamma_1} \left[\frac{4t_{1K}}{(k_1 + 1)D_K} \times \left(q_{TRK} k_1 - \frac{2\Delta T \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{1K}}} \right) + \frac{9(D_K^2 - D_\phi^2) t_{КД}}{(k_1 + 1)(D_K^3 - D_\phi^3)} \times \left(q_{TRКД} \cdot k_1 - \frac{4q_{VKД}}{3} \sqrt{\frac{a_1 \cdot t_{КД}}{\pi}} - \frac{2\Delta T_{Д} \cdot b_1}{\sqrt{\pi \cdot t_{КД}}} \right) + q_{VKД} \cdot t_{КД} \left(1 - \frac{2, 6D_K^2 K_{TV}}{D_K^3 - D_\phi^3} \sqrt{\frac{a_1 t_{КД}}{\pi}} \right) + \frac{P_\phi t_{1\phi}}{(k_3 + 1)F_\phi} \left(q_{TR\phi} k_3 - \frac{4q_{V\phi}}{3} \sqrt{\frac{a_1 \cdot t_{1\phi}}{\pi}} \right) + q_{V\phi} \cdot t_{1\phi} + \frac{t_{1M} \Pi_{PP} k_3 \cdot q_{TRM}}{F_{PP} (k_3 + 1)} \right], \quad (20)$$

где $D_\phi = \sqrt{\frac{4F_\phi}{\pi}}$ и $D_{PP} = \sqrt{\frac{4F_{PP}}{\pi}}$ – приведенные диаметры форкамеры и профиля; P_ϕ, P_{PP} – периметры форкамеры и профиля соответственно.

Данная методика является вполне обоснованной, так как рассматриваемая задача не имеет замкнутого решения, и температурные условия определяются только путем последовательных приближений. Следует также отметить, что точность расчетов будет в значительной мере зависеть от правильности задания уравнения реологии прессуемого металла.

Результаты расчетов по вышеприведенной методике были сопоставлены с экспериментальными данными (рис. 2) для случая прессования профиля из сплава АД31 в виде полосы размерами 2×100 мм из заготовки диаметром 145 мм и длиной 500 мм (диаметр контейнера 150 мм) на прессе усилием 12,5 МН.

Замер выходной температуры профиля на выходе из канала матрицы проводили с помощью пирометрического сканирующего устройст-

ва. Достаточная сходимость расчетных и экспериментальных данных показывает возможность применения представленной методики для инженерных расчетов температурных условий, проведения анализа влияния основных параметров процесса на изменение температурных условий при прессовании и разработки оптимальной технологии производства профилей.

Библиографический список

1. Бережной, В.Л. Новые технологии и оборудование будущего в производстве пресс-изделий [Текст] / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. 2006. № 1–2. С. 52–61.
2. Довженко, Н.Н. Система автоматизированного проектирования технологии прессования металлов. Научное методическое обеспечение: монография [Текст] / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, Г.И. Васина / ГАЦМиЗ. Красноярск, 2000. 196 с.
3. Перлин, И.Л. Теория прессования металлов [Текст] / И.Л. Перлин, Л.Х. Райтбарг. М.: Металлургия, 1975. 447 с.
4. Райтбарг, Л.Х. Прессование труднодеформируемых алюминиевых сплавов с градиентным нагревом [Текст] / Л.Х. Райтбарг, А.К. Киркин, Ю.Д. Кот // Технология прогрессивных процессов производства профилей и труб. М.: Цветметинформация, 1969. С. 36–46.
5. Ерманок, М.З. Прессование профилей из алюминиевых сплавов [Текст] / М.З. Ерманок, В.И. Фейгин, Н.А. Сухоруков. М.: Металлургия, 1977. 264 с.
6. Беляев, С.В. Температурные условия деформации заготовки в принудительно охлаждаемом контейнере [Текст] / С.В. Беляев, В.А. Кузьменко. Красноярск, 1991. 20 с. Деп. В ЦНИИцветмет экономики и информации 17.06.91, № 1987-УМ 91.