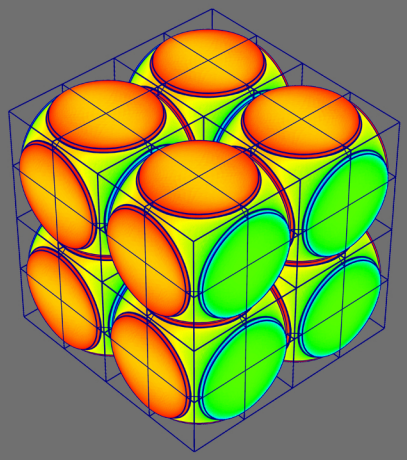
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Дмитриев Э.А., Потянихин Д.А., Одиноков В.И., Евстигнеев А.И., Квашин А.Е. Моделирование поля температур при получении металлоизделий на литейно-ковочном модуле с односторонним воздействием бокового бойка и неподвижной плитой. Математическое моделирование и численные методы, 2022, № 2, с. 65–79

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/280/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.216.140
13.11.2026 09:29:42

УДК 004.9:621.7 DOI: 10.18698/2309-3684-2022-2-6377

Моделирование поля температур при получении металлоизделий на литейно-ковочном модуле с односторонним воздействием бокового бойка и неподвижной плитой

© Э.А. Дмитриев, Д.А. Потянихин, В.И. Одиноков, А.И. Евстигнеев, А.Е. Квашин

ФГБОУ ВО «КнАГУ», Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия

В работе представлена математическая постановка и приведены результаты расчетов в задаче об определении поля температуры при деформировании полосы, изготовленной из алюминиевого сплава АД0, на литейно-ковочном модуле вертикального типа новой модификации. Конструкция литейно-ковочного модуля предполагает, что из четырех стенок кристаллизатора одна неподвижна, вторая совершает вращательное движение на эксцентриковых валах, две другие совершают движение в вертикальной плоскости, обеспечивая подачу деформированной заготовки вниз. При решении задачи используется апробированный численный метод. Для движущейся среды уравнение теплопроводности записывается в конечно-разностном виде в криволинейной ортогональной системе координат. Решение задачи проводится итерационным методом. При расчете начального температурного поля и при его дальнейшем изменении учитывается теплоотвод на поверхностях контакта металла с инструментами деформирования. Результатом решения является поле температуры в пространственной области для дискретных моментов времени, соответствующих шагам численного счета. На каждом шаге определяется граница жидкого и затвердевшего металла.

Ключевые слова: *моделирование, кристаллизующийся металл, температура, литейно-ковочный модуль, математическая модель, программный комплекс*

Введение. Получение непрерывного деформируемого металлического изделия, реализующего идею полного совмещения процессов кристаллизации жидкого металла и его последующего деформирования в заданный профиль, может производиться на устройстве в виде кристаллизатора с подвижными стенками. Стенки выполняют ряд функций:

– отвод тепла из зоны кристаллизации;

– подача металла в зону деформации;

– обжатие металла в заданный профиль;

– калибровка и выдача профиля.

В настоящее время существует несколько модификаций такой конструкции [1, 2]. Профессором Одиноковым В.И. и в его научной школе ведутся теоретические и экспериментальные исследования конструкторско-технологических параметров и режимов работы устройств получения непрерывно-литых деформированных заготовок. Их краткий обзор представлен в работе [3]. За рубежом в последние

годы также ведутся исследования совмещенных процессов литья и деформирования [4–10].

В данной работе рассматривается тепловая задача: строится математическая модель и проводятся исследования численных расчетов полей температур при получении листовой заготовки алюминиевого сплава на новой установке литейно-ковочного модуля (ЛКМ) вертикального типа [11].

Инженерная постановка задачи. На рис. 1 приведен внешний вид устройства. Из разливочного ковша 1 с погружным стаканом 2 жидкий металл поступает в вертикальный кристаллизатор, включающий боковой боек 4 с наклонным и вертикальным участками, вертикальной бойковой плиты 5, и пары рабочих стенок 6. Боковой боек 4 и рабочие стенки 6 приводятся в движение от приводных валов 3 с соответствующими эксцентриками e_1, e_2 при этом стенки 6 приводятся в движение только от нижнего вала 3 с эксцентриком e_2.

Эксцентрик привода боковых стенок 6 повернут относительно привода эксцентрика бойка 4 на 90º. Тогда при сближении бойка 4 с плитой 5 рабочие стенки 6 будут подниматься вверх, а при раздвижении бойка 4 с плитой 5 — опускаться вниз, осуществляя тем самым подачу затвердевшего металла к выходу из установки. Попадая в кристаллизатор, жидкий металл охлаждается, при этом в объеме кристаллизатора наблюдаются три зоны: зона жидкого металла; зона жидкого металла с закристаллизовавшейся корочкой; зона твёрдого метала.

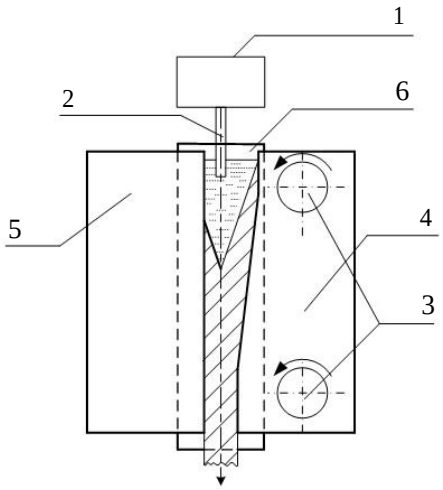


Рис. 1. Схема конструкции литейно-ковочного модуля

Математическая постановка задачи. Расчетная схема деформации с учетом плоскости симметрии $x_3 = 0$ представлена на рис. 2. Цифрами обозначены области: 1 — жидкий металл, 2 — твердый металл.

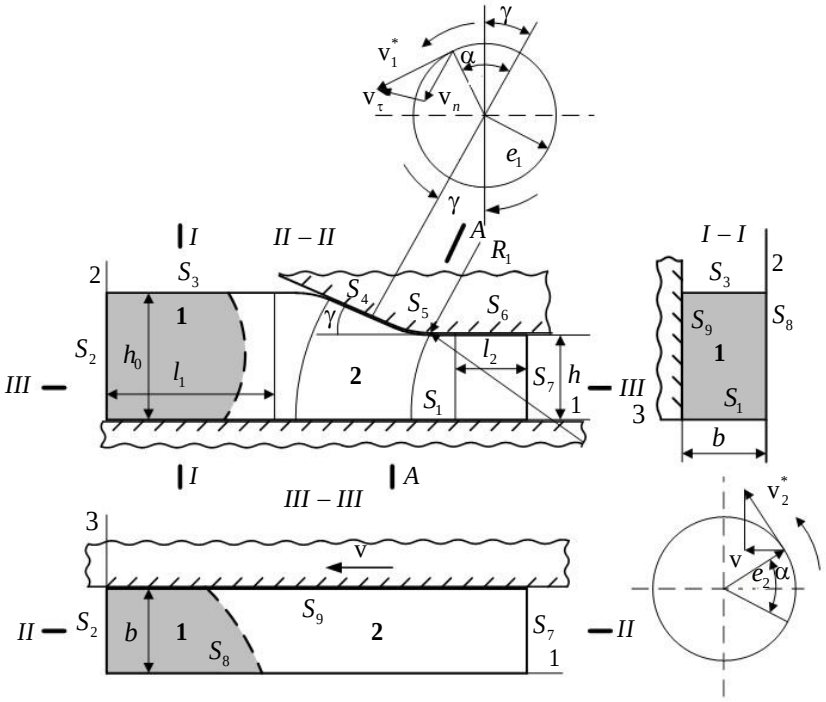


Рис. 2. Расчетная схема процесса деформирования
с учетом симметрии в плоскости $x_3 = 0$

Весь цикл поворота эксцентрикового вала разбивается на m шагов. Исследовался процесс деформации для угла поворота 180°. Величина одного шага $p_m = 180^\circ / m$.

Уравнение теплопроводности на временном шаге $\Delta\tau_m$ в эйлеровой системе координат имеет вид:

$$c\gamma \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} \theta). \qquad (1)$$

Здесь $\lambda = \lambda(\theta)$ — коэффициент теплопроводности, θ — температура, c — удельная теплоемкость, γ — плотность.

Начальные условия записывали следующим образом:

$$\text{при } \tau = 0\text{: } \alpha_0 = 0^\circ,\ \theta = \theta_0, \qquad (2)$$

где α_0 — начальный угол поворота эксцентрикового вала, θ_0 — начальная температура в исследуемой области при полном раскрытии бойков ($\alpha_0 = 0^\circ$). Температуру θ_0, в отличие от α_0, необходимо найти.

Граничные условия записывали из предположения, что граница исследуемой области описывается системой ортогональных поверхностей (рис 2):

$$\theta\big|_{S_i} = \bar{\theta}_i,\ i = 1-7,\ q\big|_{S_8} = 0, \tag{3}$$

$q\big|_{S_8}$ — тепловые потоки через поверхность S_8, являющуюся поверхностью симметрии, $\bar{\theta}_i$ — заданное поле температур на поверхностях.

Зоны твердого и жидкого металла определяются по температуре:

$$\begin{array}{l} \theta > \theta_{кр} \text{ — жидкий металл,} \\ \theta \le \theta_{кр} \text{ — твердый металл,} \end{array} \tag{4}$$

где $\theta_{кр}$ — температура кристаллизации металла.

Определение начального поля температур. При установившемся режиме изменение температуры в системе в процессе деформации происходит в течение одного цикла, то есть при повороте эксцентрика от $\alpha_0 = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$. Далее наклонный боек расходится от плиты, и следует продвижение металла вертикальными плитами 6 (рис. 1). Угол α при этом изменяется от 180° до 360°. Это период разгрузки. Считается, что за этот период происходит полная рекристаллизация деформируемого металла, то есть следующий цикл начинается с начальных условий (2). Начальное поле температур перед циклом будем определять из следующих предположений:

1. боек считаем раскрытым ($\alpha_0 = 0^\circ$). Это предопределяет геометрию системы;

2. полагаем, что масса металла как бы течет в зеве между наклонным бойком и вертикальной плитой. Скорость течения металла определяется скоростью движения плит 6 (рис. 1), в сторону выхода.

Таким образом, рассматривается стационарный процесс движения металла в замкнутом объеме. Тогда для движущейся среды уравнение теплопроводности запишем в следующем виде:

$$c\gamma \frac{d\theta}{d\tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}\theta),$$

где

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \dot{\theta} + \mathrm{v}_i \frac{\partial\theta}{\partial x_i}.$$

Так как процесс стационарный, то $\dot{\theta} = 0$. Тогда

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \mathrm{v}_i \frac{\partial\theta}{\partial x_i}.$$

Если траектория движения зависит от одной координаты, например x_1, то

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \mathrm{v}_1 \frac{\partial \theta}{\partial x_1}.$$

Окончательно получим

$$c\gamma\, \mathrm{v}_1 \frac{\partial \theta}{\partial x_1} = \mathrm{div}(\lambda \,\mathrm{grad}\,\theta). \qquad (5)$$

При решении уравнения (5) задавались граничные условия (3).

Численная схема и алгоритм решения температурной задачи. Решение задачи можно разбить на два этапа:

1 этап — решение уравнения теплопроводности (5) на временном шаге с учетом начальных условий (2) и граничных условий (3);

2 этап — решение уравнения теплопроводности на m – ом временном шаге с учетом найденного температурного поля, начальных и граничных условий.

Реализацию решения указанной системы дифференциальных уравнений будем осуществлять численным методом.

Для решения уравнения теплопроводности использовался численный метод [12], согласно которому область разбивается на конечное число ортогональных элементов. На рис. 3 приведена схема разбиения исследуемой области на ортогональные элементы (сечение в плоскости $x_3 = \mathrm{const}$).

Область разбита на пять зон, в которых для описания геометрии приняты системы координат: прямоугольные (зоны I и V), бицилиндрические (зоны II и IV), цилиндрическая (зона III).

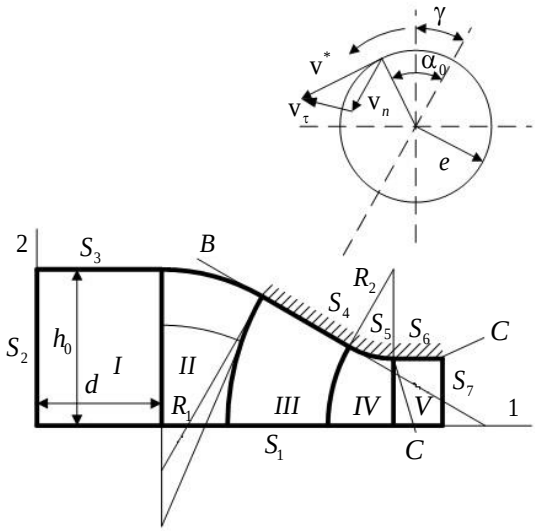


Рис. 3. Схема разбивки области

Для каждого элемента в произвольной системе ортогональных координат α_i, $i=1,2,3$ (рис. 4) составляется тепловой баланс, из которого выводится уравнение теплопроводности в следующем виде [12]:

$$t_{12}(\theta_1^+ - \theta_k) - t_{11}(\theta_k - \theta_1^-) + t_{22}(\theta_2^+ - \theta_k) - t_{21}(\theta_k - \theta_2^-) + \\ + t_{32}(\theta_3^+ - \theta_k) - t_{31}(\theta_k - \theta_3^-) = \theta_k - \theta_k^*. \tag{6}$$

Здесь

$$t_{11} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^-)}{S_{21} + S_{21}^-} \cdot F_1^1 \cdot A; \qquad t_{12} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^+)}{S_{21} + S_{21}^+} \cdot F_1^2 \cdot A;$$

$$t_{21} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^-)}{S_{12} + S_{12}^-} \cdot F_2^1 \cdot A; \qquad t_{22} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_2^+)}{S_{12} + S_{12}^+} \cdot F_2^2 \cdot A;$$

$$t_{31} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_3^+) \cdot F_3^1 \cdot A}{S_{23} + S_{23}^-}; \qquad t_{32} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^+) \cdot F_3^2 \cdot A}{S_{23} + S_{23}^+};$$

$$A = \frac{\Delta\tau}{c_k \gamma_k V_k};$$

$$V_k = \frac{S_{12} \cdot S_{13} \cdot S_{21}}{8}; \tag{7}$$

$$F_i^j = S_{ik}^j \cdot S_{ip}^j, \; i \neq k \neq p;$$

$$S_{ij} = S_{ij}^1 + S_{ij}^2,$$

$$S_{ij}^+ = S_{ij}^{1+} + S_{ij}^{2+}, \; S_{ij}^- = S_{ij}^{1-} + S_{ij}^{2-},$$

$$i,k,p = 1,2,3; \; j = 1;$$

где θ_k^* — средняя температура в $k-$ом элементе в начале временного шага $\Delta\tau_m$, в нашем случае $\Delta\tau_m$ — время поворота эксцентрикового вала на угол $\Delta\alpha$ на шаге m, c_k, γ_k, V_k — соответственно удельная теплоемкость, плотность и объем $k-$го элемента, λ_k, θ_k — соответственно значения коэффициента теплопроводности и температуры в $k-$м элементе в конце временного шага $\Delta\tau_m$, λ_i^-, θ_i^- — соответственно коэффициент теплопроводности и температура в элементе, следующем за элементом k по координате α_i, в отрицательную сторону, λ_i^+ и θ_i^+ — аналогичные параметры в положительном направлении, S_{ij}^p — средние значения от дуг ребер элементов. Так, например,

$$S_{21}^1 = 0,5 \cdot \left(|a_0 b_0| + |a_1 b_1| \right).$$

Тогда $S_{21} = S_{31}$ и $S_{pi} = S_{ji}$, $p \neq j \neq i$.

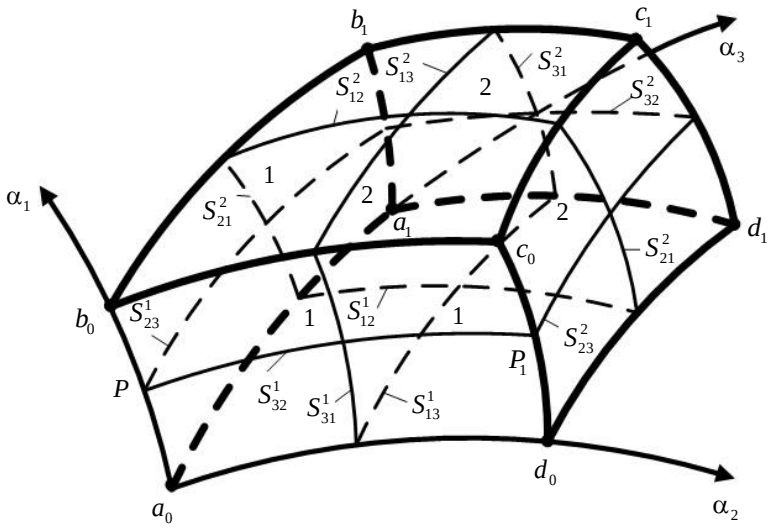


Рис. 4. Криволинейный ортогональный элемент

Выражение (6) может рассматриваться как система уравнений, $k = 1, ..., n$, где n — число элементов, на которые разбита область.

Перепишем систему (6) в виде

$$\theta_k = \frac{\theta_k^* + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{21}\theta_2^- + t_{32}\theta_3^+ + t_{31}\theta_3^-}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{21} + t_{32} + t_{31}}. \qquad (8)$$

Положим $\lambda_k = \text{const}$, $c_k = \text{const}$, $\gamma_k = \text{const}$. Тогда система (6) будет линейная и может быть решена итерационным методом. В работе [12] доказывается сходимость итерационной процедуры (8).

В уравнении (5) выражение $v_1 \dfrac{\partial \theta}{\partial x_1}$ представим в разностном виде

$$v_1 \frac{\partial \theta}{\partial x_1} \approx v_1 \frac{\Delta \theta}{\Delta x_1} = v_1 \frac{\theta_k - \theta_1^-}{\Delta x_1}.$$

Время прохождения материальной точки через элемент k выражается как

$$\Delta \tau_k = \frac{\Delta x_1}{v_1}.$$

Так как компонента скорости v_1 сонаправлена с координатной x_1, то окончательно получаем

$$v_1 \frac{\partial \theta}{\partial x_1} = \frac{\theta_k - \theta_1^-}{\Delta \tau_k}.$$

Таким образом, при расчете начального температурного поля

расчет температуры θ_k в области производим по итерационной формуле

$$\theta_k = \frac{\theta_1^- + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{21}\theta_2^- + t_{32}\theta_3^+ + t_{31}\theta_3^-}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{21} + t_{32} + t_{31}}. \qquad (9)$$

На оси симметрии в плоскости $x_3 = 0$ имеем $\theta_3^- = \theta_k$. Формула (9) имеет вид:

$$\theta_k\big|_{x_3=0} = \frac{\theta_k^* + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{21}\theta_2^- + t_{32}\theta_3^+}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{21} + t_{32}}. \qquad (10)$$

По формуле (10) при определении начального поля температуры $\theta_k^* = \theta_1^-$.

Алгоритм решения температурной задачи. 1. Задается геометрия области при $\alpha_0 = \gamma$, величина эксцентриков e_1, e_2, и производится ее разбивка на элементы ортогональной формы.

2. Задается число шагов по углу поворота m, задаются начальные условия, а также λ_k, c_k, γ_k, $k = 1,...,t$, θ_i на поверхности контура области, n — число оборотов вращения эксцентриковых валов в минуту.

3. Производится расчет начального температурного поля θ_0 по итерационным формулам (9), (10) с учетом заданного температурного поля на поверхностях контакта металла с инструментами деформации при $\theta_k^* = \theta_1^-$. По соответствующим формулам вычисляются $\lambda_k = \lambda_k(\theta)$ для каждого элемента. Количество итераций 60, обеспечивается точность вычислений до пятого знака после запятой.

4. Следует шаг по углу α (поворот эксцентрикового вала), высчитывается новая геометрия области и, в соответствии с формулой (8), где θ_k^* — вычисленное в п. 3 начальное температурное поле, находится θ на первом временном шаге. В соответствии с (4), определяются границы жидкой фазы.

5. Следует опять шаг $\Delta\alpha$, и осуществляется насчет температурного поля с учетом предыдущего θ_k^* по новой геометрии области.

6. Процедура, описанная в п. 5, повторяется m раз.

7. Конец счета.

Результаты решения задачи. Геометрические параметры, использованные при расчетах (рис. 2): $h_0 = 32$ мм, $h_1 = 8$ мм, $l_1 = 45$ мм, $l_2 = 60$ мм, $2b = 64$ мм, $\gamma = 8^\circ$, $R_1 = 50$ мм, $e_1 = 3$ мм, $e_2 = 10$ мм, а $n = 100$ об/мин — частота оборотов приводных валов.

Физические характеристики разливаемого металла (АД0): $\theta_{пл} = 750\,^{\circ}\mathrm{C}$, $\theta_{кр} = 680\,^{\circ}\mathrm{C}$, $\lambda = 0,49 - 0,00046 \cdot \theta + 0,00026 \cdot \theta^2$ Вт/м·К, $c = 10^3$ Дж/(кг·К), $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м^3.

*Определение начального поля температуры***.** Для определения начального поля температур необходимо задать граничные условия (3). Система охлаждения составных бойков кристаллизатора включает: число каналов в каждом бойке, по которым подается охлаждающая жидкость; водяной напор — количество жидкости, протекающей по каналу в единицу времени; температура охлаждающей жидкости. Все эти факторы, влияющие на температуру поверхностей бойков, можно изменять в широких пределах, тем самым, влить на температуру поверхности исследуемой области. Поэтому, зададим температуру на входе $\theta\big|_{S_2} = 750^{\circ}\mathrm{C}$, температуры на выходе поверхностей $\theta\big|_{S_1} = \theta\big|_{S_6} = \theta\big|_{S_9} = 390^{\circ}\mathrm{C}$ и аппроксимируем температуры по поверхностям исследуемой области полилинейными функциями.

По итерационным формулам (9), (10) получили начальное поле температур (рис. 5). Пунктиром условно обозначена граница жидкого и твердого металла.

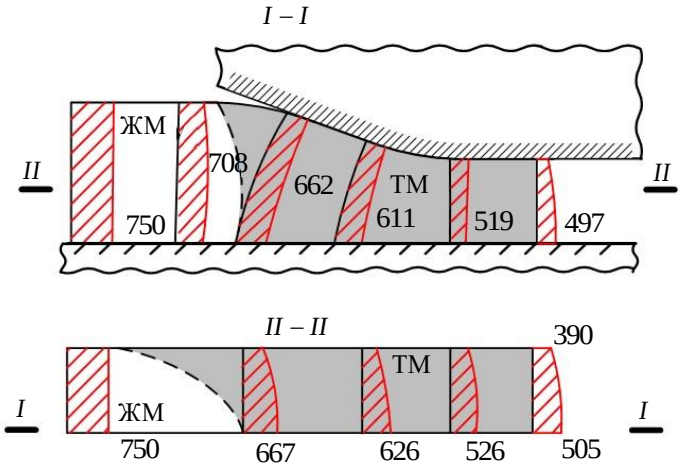


Рис. 5. Начальное поле температур

Определение полей температур в области деформации. Весь процесс деформации разбивается на m шагов по углу поворота эксцентричного вала $0^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$, то есть $\alpha_m = 180^{\circ} / m$. Принято $m = 6$, следовательно, $\alpha_m = 30^{\circ}$, что по времени при $n = 100$ об/мин составляет $\Delta\tau_m = 0,15$ сек . На рис. 6 представлены поля температур по шагам α_m.

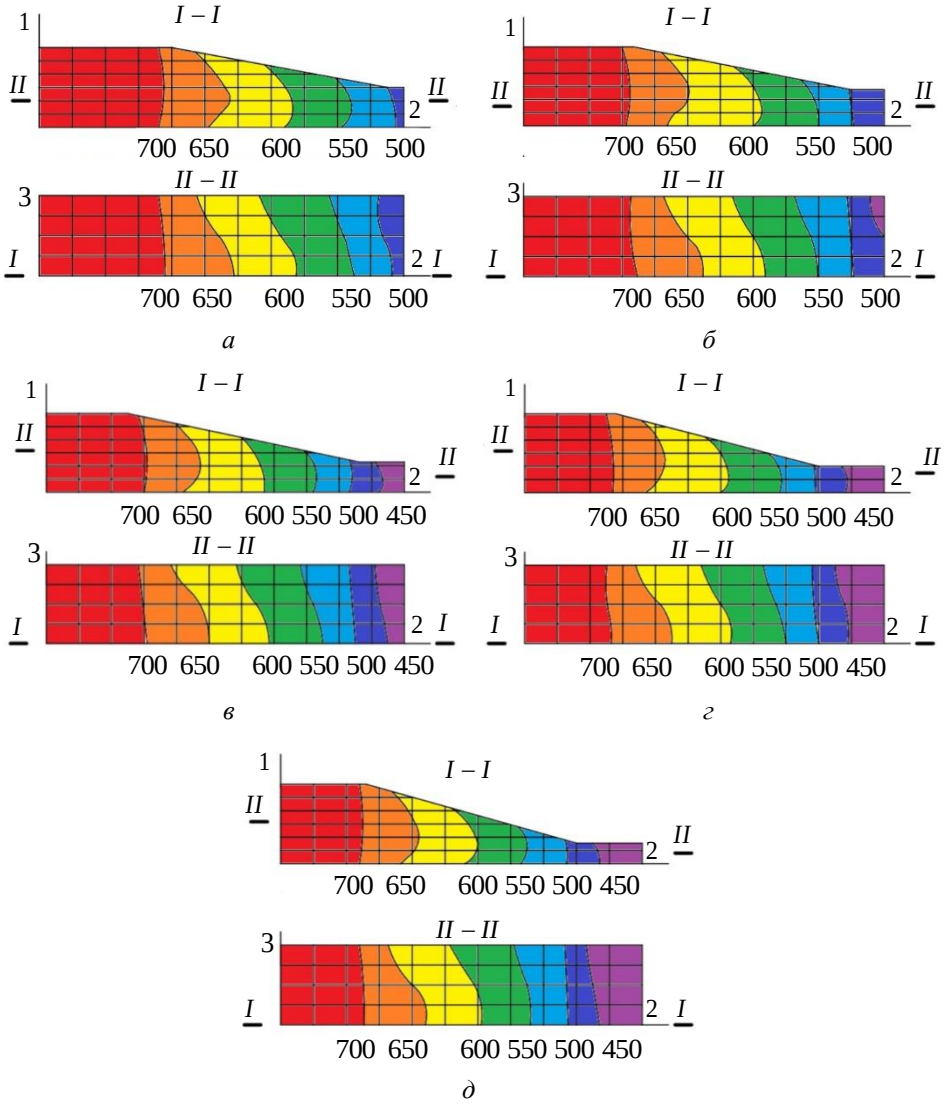


Рис. 6. Распределение температур:
а — шаг 1. $\alpha = 30^{\circ}$; *б* — шаг 2. $\alpha = 60^{\circ}$; *в* — шаг 3. $\alpha = 90^{\circ}$;
г — шаг 4. $\alpha = 120^{\circ}$; *д* — шаг 2. $\alpha = 150^{\circ}$

Из рис. 6 видно, что по мере сближения подвижного бойка с неподвижной плитой жидкая зона металла выжимается, а зона твердого металла увеличивается в объеме по сравнению с жидкой.

При $\alpha > 180^{\circ}$ подвижный боковой боек отходит от неподвижной плиты и затвердевший металл подается вниз вертикальными плитами 6 (рис. 1).

При этом заготовка (исследуемая область) будет находиться под действием неравномерного температурного поля, которое имелось на шаге $\alpha = 180^{\circ}$ и температур плит с поверхностей S_9 (рис. 2). Степень

имеющейся неравномерности оценим по величине градиентов $\frac{\partial\theta}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta\theta}{\Delta x_i}, i = 1,2,3$. На рис. 7 приведены градиенты $\frac{\Delta\theta}{\Delta x_i}$, $i = 1,2$, по соответствующим сечениям *I-I*, *II-II*, *III-III*.

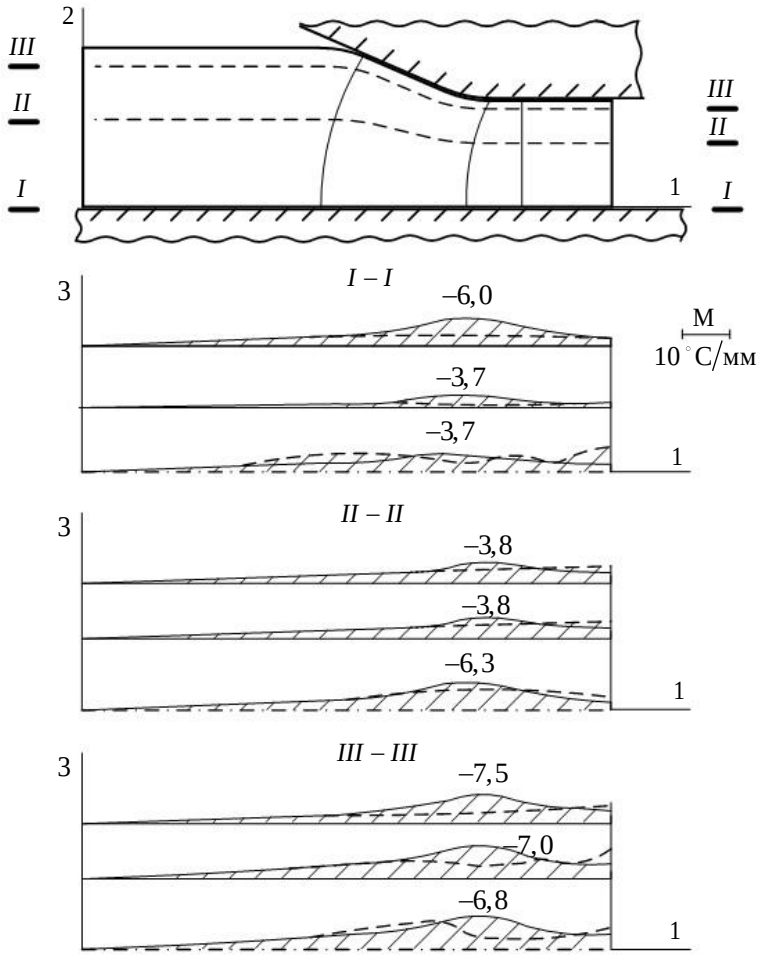


Рис. 7. Градиенты $\frac{\Delta\theta}{\Delta x_i}$ по сечениям *I-I*, *II-II*, *III-III*:
сплошная линия — $\frac{\Delta\theta}{\Delta x_1}$; пунктирная линя — $\frac{\Delta\theta}{\Delta x_2}$

Наибольшие значения (по абсолютной величине) имеет градиент $\frac{\Delta\theta}{\Delta x_1}$, который, в свою очередь, достигает наибольших значений у поверхностей контакта с бойками. Градиент $\frac{\Delta\theta}{\Delta x_3}$ меньше, чем $\frac{\Delta\theta}{\Delta x_2}$ и

на графике (рис. 7) не показан. Видим, что градиент $\frac{\Delta\theta}{\Delta x_1}$ имеет максимальные значения при выходе полосы на калибрующий участок.

Выводы. 1. Построена математическая модель теплового режима работы литейно-ковочного модуля новой модификации.

2. Программы расчета температурного поля могут применяться при моделировании напряженно-деформированного состояния заготовки на литейно-ковочном модуле.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Сергеев В. М., Горохов Ю. В., Соболев В. В., Нестеров Н. А. *Непрерывное литье-прессование цветных металлов.* Москва, Металлургия, 1990, 85 с.

[2] Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Ворошилов С. Ф. Применение совмещенных методов прокатки-прессования для получения пресс-изделий из алюминиевых сплавов. *Технология легких сплавов*, 1999, № 1–2, с. 131–136.

[3] Одиноков В. И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Потянихин Д.А., Квашнин А.Е. Математическое моделирование процесса деформации металла на литейно-ковочном модуле с измененным приводом боковых бойков. *Математическое моделирование и численные методы*, 2021, № 3, с. 3–23.

[4] Zhang Q., Cao M., Zhang D., Zhang S., Sun J. Research on integrated casting and forging process of aluminum automobile wheel. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, vol. 6, 870182. DOI:10.1155/2014/870182

[5] Zhenglong L., Qi Z. Simulation and experiment research on squeeze casting combined with forging of automobile control arm. *Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2018, vol. 2, 144113. DOI:10.1115/IMECE2018-86006

[6] Chang F.-C., Hwang W.-S., Lee C.-H., Wu C.-F., Yang, J.-B. Forging condition for removing porosities in the hybrid casting and forging process of 7075 aluminum alloy casting. *Materials Transactions*, 2004, vol. 45(6), pp. 1886-1890. DOI: 10.2320/matertrans.45.1886

[7] Dedov S., Lehmann G., Kawalla R. Application of combined casting-forging process for production of durable lightweight aluminum parts. *Key Engineering Materials*, 2013, vol. 554–557, pp. 264–273. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.264

[8] Krüger L., Jentsch E., Brunke L., Keßler A., Wolf G., Lehnert T., Schubert N., Wagner A., Landgrebe D. Development of an innovative lightweight piston through process combination “casting – forging”. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 27, pp. 172–176. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.12.061

[9] Perrier, F., Bouvier, V., & Duperray, L. A new wheel design for reducing weight. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 794–796, pp. 578–583. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.794-796.578

[10] Böhmichen, U., Schubert, N., Lehnert, T., Sterzing, A., & Mauermann, R. From casting to forging – The combined simulation for a steel component. *Engineering Reports*, 2021, art no. e12400. DOI: 10.1002/eng2.12400

[11] Пат. 2769679 Российская Федерация, МПК B22D 11/051. *Устройство для получения непрерывнолитых деформированных заготовок*/ В.И. Одиноков, А.И. Евстигнеев, Э.А. Дмитриев, Д.А. Потянихин, А.Ю. Лошманов, А.Е. Квашнин. – № 2021123605; заявл. 08.05.2021; опубл. 04.05.2022, 7 с.

[12] Одиноков В.И. Каплунов Б.Г., Песков А.В., Баков А.А. *Математическое моделирование сложных технологических процессов*. Москва, Наука, 2008, 177 с.

Статья поступила в редакцию 11.03.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:
Дмитриев Э.А., Потянихин Д.А., Одиноков В.И., Евстигнеев А.И., Квашин А.Е. Моделирование поля температур при получении металлоизделий на литейно-ковочном модуле с односторонним воздействием бокового бойка и неподвижной плитой. *Математическое моделирование и численные методы*, 2022, № 2, с. 65–79.

Дмитриев Эдуард Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, доцент, ректор ФГБОУ ВО «КнАГУ».

Потянихин Дмитрий Андреевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Авиастроение», ФГБОУ ВО «КнАГУ». e-mail: potyanikhin@mail.ru

Одиноков Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «КнАГУ».

Евстигнеев Алексей Иванович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «КнАГУ».

Квашнин Александр Евгеньевич — аспирант ФГБОУ ВО «КнАГУ».

Modeling of the temperature field in the production of metal products on a casting and forging module with one-sided action of the side striker and fixed plate

© E.A. Dmitriev, D.A. Potianikhin, V.I. Odinokov, A.I. Evstigneev, A.E. Kvashnin

Komsomolsk-na-Amure State University, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia

The paper presents a mathematical statement and presents the results of calculations in the problem of determining the temperature field during deformation of a strip made of aluminum alloy AD0 on a vertical-type casting and forging module of a new modification. The design of the casting and forging module assumes that one of the four walls of the mold is stationary, the second performs a rotational movement on eccentric shafts, the other two move in a vertical plane, ensuring that the deformed billet is fed down. When solving the problem, a proven numerical method is used. For a moving medium, the heat equation is written in finite difference form in a curvilinear orthogonal coordinate system. The solution of the problem is carried out by the iterative method. When calculating the initial temperature field and its further change, the heat removal on the contact surfaces of the metal with the deformation tools is taken into account. The result of the solution is the temperature field in the spatial domain for discrete times corresponding to the steps of the numerical calculation. At each step, the boundary of the liquid and solidified metal is determined.

***Keywords**: modeling, crystallizing metal, temperature, casting and forging module, mathematical model, software package*

REFERENCES

[1] Sergeev V.M., Gorokhov Yu.V., Sobolev V.V., Nesterov N.A. *Nepreryvnoe lit'e-pressovanie cvetnyh metallov* [Continuous casting and pressing of non-ferrous metals]. Moscow, Metallurgy Publ., 1990, 85 p.

[2] Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Voroshilov S.F. Primenenie sovmeshchennyh metodov prokatki-pressovaniya dlya polucheniya press-izdelij iz alyuminievyh splavov [Application of combined rolling-pressing methods for obtaining press products from aluminum alloys]. *Tekhnologiya legkih splavov* [Technology of Light alloys], 1999, no. 1–2, pp. 131–136.

[3] Odinokov V.I., Dmitriyev E.A., Evstigneev A.I., Potianikhin D.A., Kvashnin A.E. Mathematical modeling of the metal deformation process on a casting and forging module with a modified drive of the side strikers. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2021, no. 3, pp. 3–23.

[4] Zhang Q., Cao M., Zhang D., Zhang S., Sun J. Research on integrated casting and forging process of aluminum automobile wheel. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, vol. 6, 870182. DOI:10.1155/2014/870182

[5] Zhenglong L., Qi Z. Simulation and experiment research on squeeze casting combined with forging of automobile control arm. *Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2018, vol. 2, 144113. DOI:10.1115/IMECE2018-86006

[6] Chang F.-C., Hwang W.-S., Lee C.-H., Wu C.-F., Yang, J.-B. Forging condition for removing porosities in the hybrid casting and forging process of 7075 aluminum alloy casting. *Materials Transactions*, 2004, vol. 45(6), pp. 1886-1890. DOI: 10.2320/matertrans.45.1886

[7] Dedov S., Lehmann G., Kawalla R. Application of combined casting-forging process for production of durable lightweight aluminum parts. *Key Engineering Materials*, 2013, vol. 554–557, pp. 264–273. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.264

[8] Krüger L., Jentsch E., Brunke L., Keßler A., Wolf G., Lehnert T., Schubert N., Wagner A., Landgrebe D. Development of an innovative lightweight piston through process combination “casting – forging”. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 27, pp. 172–176. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.12.061

[9] Perrier, F., Bouvier, V., & Duperray, L. A new wheel design for reducing weight. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 794–796, pp. 578–583. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.794-796.578

[10] Böhmichen, U., Schubert, N., Lehnert, T., Sterzing, A., & Mauermann, R. From casting to forging – The combined simulation for a steel component. *Engineering Reports*, 2021, art no. e12400. DOI: 10.1002/eng2.12400

[11] Pat. 2769679 Russian Federation. Int. Cl. B22D11/051. *Device for producing continuously cast deformed workpieces* / V.I. Odinokov, A.I. Evstigneev, E.A. Dmitriyev, D.A. Potianikhin, A.E. Kvashnin.– № 2021123605; appl. 08.05.2021; publ. 04.05.2022, 7 p.

[12] Odinokov V.I. Kaplunov B.G., Peskov A.V., Bakov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie slozhnyh tekhnologicheskih processov* [Mathematical modeling of complex technological processes]. Moscow, Nauka Publ., 2008, 177 p.

Dmitriev E.A., Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Rector of Komsomolsk-na-Amure State University.

Potianikhin D.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aircraft Construction, Komsomolsk-na-Amure State University. e-mail: potyanikhin@mail.ru

Odinokov V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University.

Evstigneev A.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University.

Kvashnin A.E., Postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University.