

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА В
КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ПОДВИЖНЫМИ СТЕНКАМИ**

Квашнин А.Е., Потянихин Д.А.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, пр. Ленина, 27,

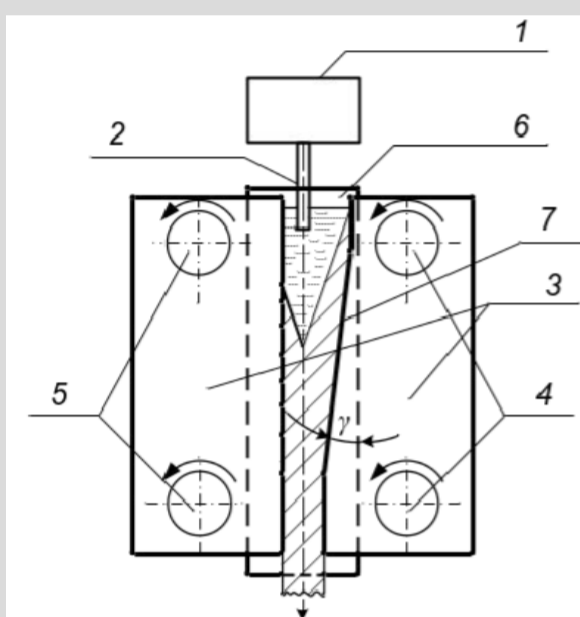
Комсомольск-на-Амуре, 681013, Российская Федерация

kvashnin_ae@mail.ru, potyanikhin@mail.ru

Аннотация

Рассматривается задача об определении полей температуры и параметров напряженно-деформированного состояния в металле при обработке в литейно-ковочном модуле (ЛКМ). Принцип работы данного устройства совмещает в себе кристаллизацию расплава металла и последующее деформирование в заданный профиль за счет обеспечения подвижности стенок кристаллизатора. Построена математическая модель деформирования материала с учетом трения и теплоотвода на поверхностях контакта с оснасткой. Материал полагается термовязкопластичным, со свойствами, зависящими от температуры. Описан разностный численный метод решения задачи

Схема конструкции литейно-ковочного модуля



Расплав металла попадает из ковша 1 через погружной стакан 2 в охлаждаемый кристаллизатор, состоящий из подвижных боковых бойков 3, приводимых в движение эксцентриковыми валами 4 и 5, и подвижных вертикальных плит 6, совершающих вертикальные перемещения. Боковые бойки имеют разную форму: один из них прямой, другой имеет наклонный участок. Особенностью представленной схемы работы устройства [1] является то, что эксцентрики 4 и 5 повернуты друг относительно друга на 180°, что приводит к увеличению сдвиговых деформаций, возникающих от скольжения затвердевшего металла по шероховатой поверхности прямого бойка.

Математическая модель

Используется модель термовязкопластического течения изотропно упрочняющегося тела, физико-механические свойства которого зависят от температуры. Поведение расплава описывается в рамках модели вязкой ньютоновской жидкости. Фазовое состояние определяется температурой. На поверхностях контакта металла с оснасткой происходит теплообмен, учитывается контактное трение.

$$\sigma_{ij,j} = 0, \xi_{ij} = 0, 5(v_{i,j} + v_{j,i}), \xi_{ii} = 0, H = (2\xi_{ij}\xi_{ij})^{1/2},$$

$$\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ii}, \lambda^* = \frac{T}{H}, c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad } \theta), \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j; \end{cases}$$

$$\sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij} = 2\lambda^* \xi_{ij} - \text{в области твердого металла},$$

$$\sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij} - \text{в области жидкого металла}.$$

При $\theta > \theta_{кр}$ – жидкий металл,

при $\theta \leq \theta_{кр}$ – твердый металл,

σ_{ij} – компоненты тензора напряжений,

ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей пластических деформаций,

v_i – проекции скоростей перемещений на координатные оси x_i ,

$\lambda = \lambda(\theta)$ – коэффициент теплопроводности,

θ – температура,

c – удельная теплоемкость,

ρ – плотность,

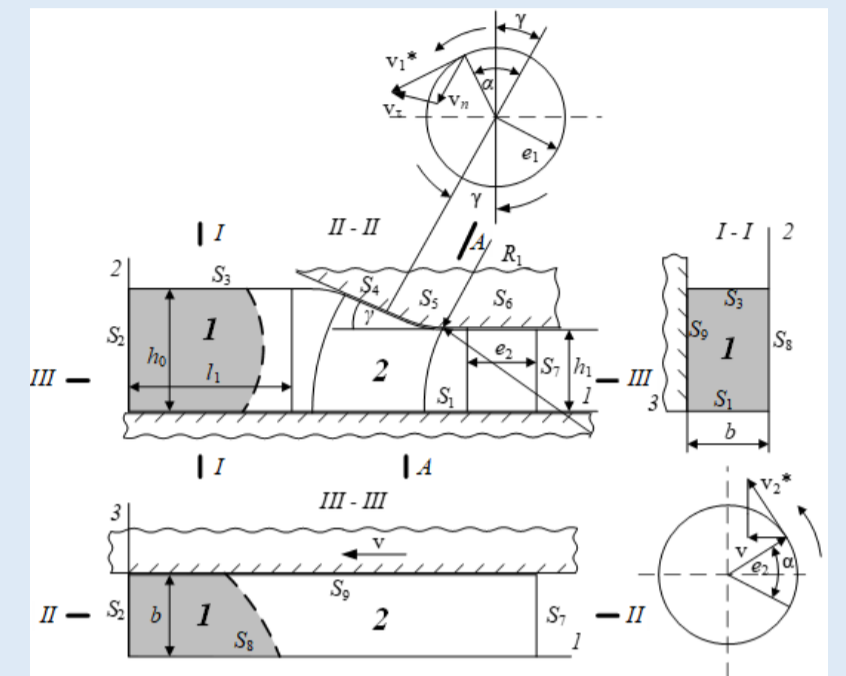
$T = T(H, \bar{\epsilon}, \theta)$ – интенсивность касательных напряжений,

μ – коэффициент вязкости расплавленного металла,

τ – время,

$\bar{\epsilon}$ – степень деформации металла.

Расчетная схема процесса деформации



Расчетная схема процесса работы литейно-ковочного модуля изображена с учетом симметрии в плоскости $x_3 = 0$.

I – зона жидкого металла,

2 – зона закристаллизовавшегося металла;

α – угол поворота эксцентрикового вала.

Начальные условия

При $\tau=0$:

$\alpha_0 = 0^\circ$ – начальный угол поворота эксцентрикового вала,

$\bar{\epsilon}_0 = 0$ – начальная степень деформации металла;

$\theta = \theta_0$ – начальная температура металла.

Граничные условия

$$\sigma_{11}|_{S_1} = \sigma_{12}|_{S_1} = \sigma_{13}|_{S_1} = 0, t = 2, 7; \sigma_{22}|_{S_2} = \sigma_{12}|_{S_2} = \sigma_{23}|_{S_2} = 0; \sigma_{23}|_{S_2} = 0, t = 1, 4, 5, 6; \sigma_{2i}|_{S_2} = -\psi_i \tau_s \frac{(v_{ск})_t}{v} \cos(n'_i, x_i), t = 1, 4, 5, 6, i = 1, 3;$$

$$\sigma_{31}|_{S_3} = \sigma_{32}|_{S_3} = 0; \sigma_{32}|_{S_3} = 0; \sigma_{31}|_{S_3} = -\psi_3 \tau_s \frac{(v_{ск})_9}{v}; v_{2|S_1} = (v_n^*)_1; v_{2|S_1} = -(v_n)_t, t = 4, 5, 6; v_{3|S_1} = 0, t = 8, 9; \theta|_{S_i} = \theta_i, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; q|_{S_8} = 0.$$

τ_s – предел текучести материала при сдвиге,

$(v_{ск})_t$ – скорость скольжения металла относительно скорости инструмента деформации на поверхности контакта S_t ,

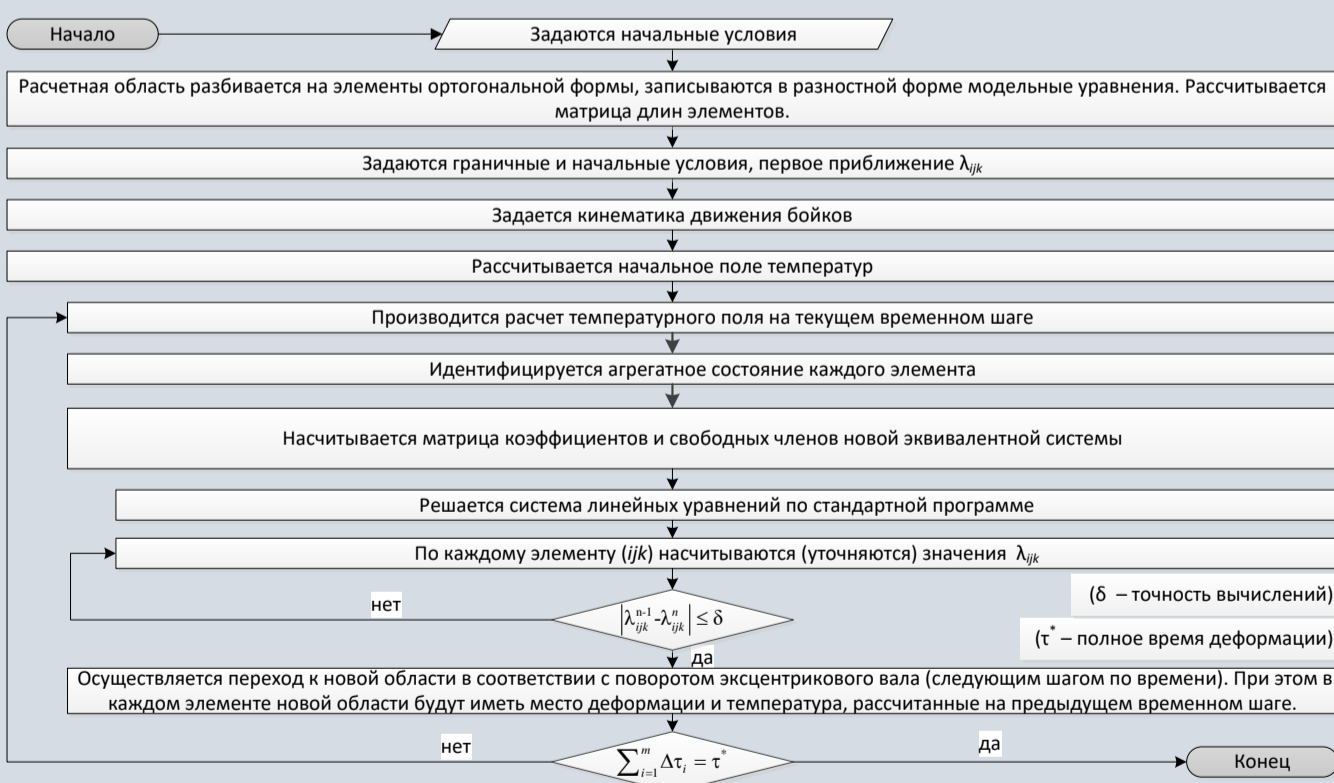
v – нормирующая скорость,

$(v_n)_t$ – скорость перемещения инструмента по нормали на поверхности контакта S_t ,

n'_i – компоненты нормали к поверхности контакта инструмента S_t ,

ψ_i – коэффициенты трения на поверхностях S_t .

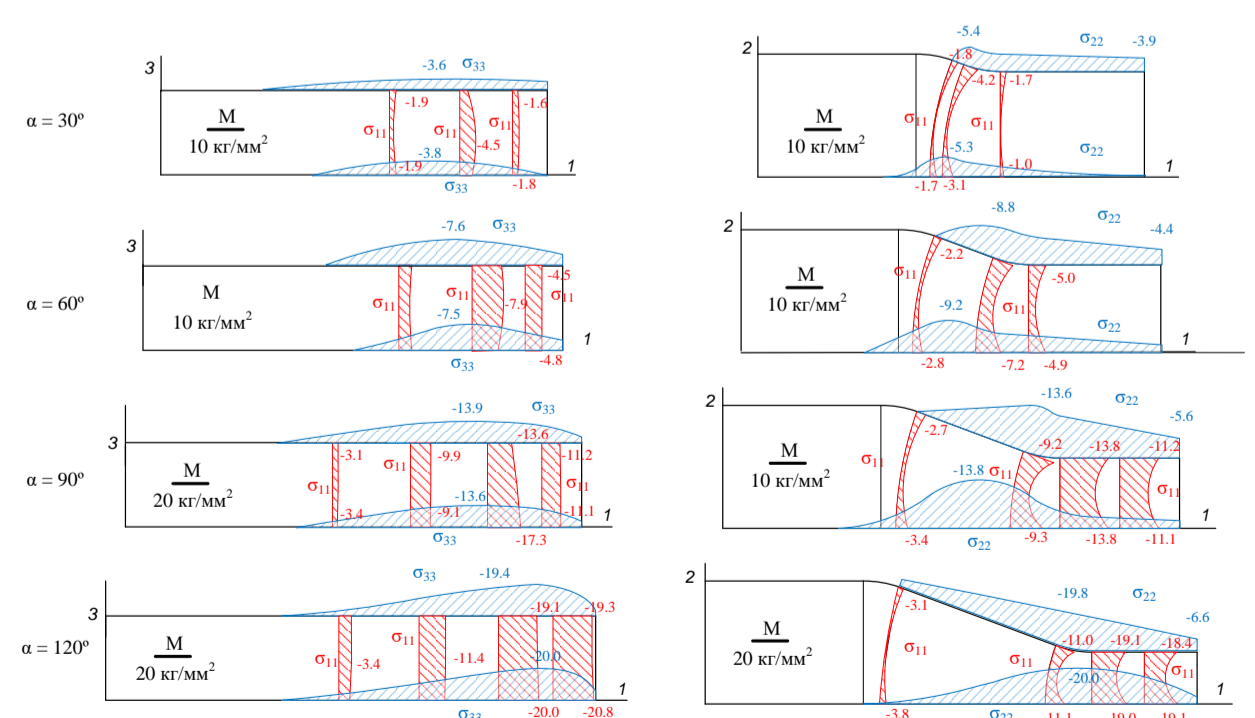
Общий алгоритм решения задачи [2]



Параметры вычислительного эксперимента

Геометрические параметры, использованные при расчетах: $h_0 = 32$ 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): $\theta_{пл} = 750^\circ\text{C}$, $\theta_{кр} = 680^\circ\text{C}$, $\lambda = 0.49 - 0.00046 \cdot \theta + 0.00026 \cdot \theta^2$ Вт/(м·К), $c = 10^3$ Дж/(кг·К), $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³.

Поля напряжений



Список литературы

- В.И. Одинок, А.И. Евстигнеев, Э.А. Дмитриев, Д.А. Потянихин, А.Е. Квашнин. Патент № 2781932 С1 Российская Федерация, МПК В22D 11/041. Устройство для получения непрерывно-литых деформированных заготовок : № 2022107665 : заявл. 22.03.2022 : опубл. 21.10.2022; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ».
- Э.А. Дмитриев, В.И. Одинок, Д.А. Потянихин, А.Е. Квашнин, А.И. Евстигнеев. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618318 Российская Федерация. «Моделирование напряженно-деформированного состояния заготовок при совмещенном процессе литья и деформации металла» : № 2024616053 : заявл. 25.03.2024 : опубл. 10.04.2024; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ».

Выводы

Построена математическая модель работы ЛКМ по патенту [1] и разработана программа для расчета полей температуры, скоростей перемещений, напряжений и деформаций при деформировании металла в кристаллизаторе с подвижными границами, реализующем совместный технологический процесс литья и деформации металла. Результатом решения являются поля температуры и параметров напряженно-деформированного состояния в пространственной области для дискретных моментов времени, соответствующих шагам численного счета. Показана эффективность процесса деформации по усовершенствованному способу на новой конструкции ЛКМ.