

**Кухарь В.В.,
Тузенко О.А.,
Балалаева Е.Ю.,
Нагнибеда Н.Н.**

ГВУЗ «Приазовский государственный
технический университет»,
г. Мариуполь, Украина
E-mail: kvv.mariupol@gmail.com

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПРИ КОНТАКТЕ
ГРАДИЕНТНО - НАГРЕТОЙ ЗАГОТОВКИ
С ПЛОСКИМ БОЙКОМ**

УДК 621.73.69.001.24:536.224

В работе рассмотрены схемы теплопередачи от неравномерно нагретой по длине заготовки к плоскому штампу. Разработана рекуррентная конечно-разностная математическая модель изменения температурных полей заготовки и штампа, позволяющая определять начальное распределение температур в заготовке для проектирования электротермических нагревателей необходимой конструкции.

Ключевые слова: конечно - разностная математическая модель, метод элементарных тепловых балансов, заготовка, штамп, температурное поле, градиентный нагрев, остывание.

Введение

Термодинамические процессы, протекающие при горячей обработке материалов давлением, оказывают влияние на выбор термомеханических режимов, а их учет необходим для исключения дефектов термического происхождения и деформационного разрушения заготовки, обеспечения требуемых температур и высокой стойкости штампового инструмента. Как известно, температура заготовки на протяжении термического цикла от нагрева до завершения деформирования не должна выходить за верхнюю и нижнюю границы температурного интервала, которые оговорены в справочной литературе [1]. Гораздо сложнее произвести выбор термомеханических режимов в процессах градиентного (неравномерного) нагрева заготовок под последующую обработку давлением: ковку или штамповку. Задача существенно усложняется на этапах начального остывания заготовки тем, что необходимо учитывать исходное распределение температур в заготовке, тепловые процессы на контакте неравномерно нагретых частей заготовки с воздухом и инструментом. Кроме того, следует учитывать изменение теплофизических свойств металла заготовки и контактирующего инструмента, происходящее вследствие изменения температуры при контактном теплообмене. Для решения таких задач наиболее целесообразно использование приемов численного счета в качестве метода разработки математической модели процесса.

Анализ известных исследований и публикаций

Способы местного, неравномерного или дифференцированного (градиентного) нагрева, иногда сочетающиеся с принудительным охлаждением инструмента, широко применяют при вытяжке и отбортовке, гибке, раздаче и обжиме [2 - 4]. Неравномерный нагрев слитков под ковку используют для достижения положительного эффекта влияния интенсивных сдвиговых деформаций на проработку металла [5]. В диссертации В.И. Стеблюка [6] получили развитие способы вытяжки из предварительно спрופилированной заготовки с применением неравномерного нагрева, обеспечивающие необходимую разницу сопротивления деформированию по очагу деформации, увеличивая вытяжку и снижая разнотолщинность изделий. Данные технологические приемы применимы при штамповке листового материала, и расширение их области применения на процессы объемного деформирования требует научного обоснования и разработки практических рекомендаций.

В объемной штамповке перед высадкой утолщений применяют местный нагрев в очковых печах или индукторах [7] или подстуживание торцов заготовок. Известно применение зонального и дифференцированного нагрева заготовок в процессах горячей объемной штамповки [8], для чего конструируют специальные индукционные установки. Перспективно направление развития нагрева и деформирования энергией лазера [9]. В работе [10] выполнены расчеты температурного поля, специального индукционного нагревателя и электротермических процессов при градиентном нагреве продукции кабельной промышленности. Данный способ является перспективным для операций с формоизменением в открытом объеме, причем распределение температур при нагреве рационально принимать соответствующим распределению деформаций или утолщений, которые необходимо получить в заготовке [11].

Интенсификацию формоизменения градиентным нагревом по длине заготовки рассматривают как температурный способ безручьевого профилирования [12], который позволяет управлять конечной формой изделия. Распределение температур по высоте (длине) заготовки следует корректировать как на время, проходящее от конца нагрева заготовки до начала её деформирования, так и на время контакта за-

готовки с нижним штампом (бойком) до деформирования. Разработка и программная реализация математической модели изменения температурного поля с учетом времени переноса заготовки от нагревательного устройства к штампу были выполнены ранее в работах [13, 14]. Термодинамические процессы охлаждения на штампе заготовки, которая неравномерно прогрета по высоте, ранее не изучали.

Цель работы

Целью работы является разработка математической модели термодинамических процессов, происходящих при контакте и остывании неравномерно нагретой по высоте заготовки на плоском штампе перед деформированием.

Изложение основного материала

Для разработки математической модели был выбран метод элементарных тепловых балансов. Применительно к заготовке рассматривали одномерную модель, то есть плотность теплового потока является функцией координаты по оси заготовки и времени. Применительно к штампу рассматривали двумерную модель с его прогревом вглубь и в стороны.

Нагретую заготовку (рис. 1) условно разбивали на элементарные объемы (слои) цилиндрической формы толщиной Δx и площадью $F = \pi D_0^2 / 4$, где D_0 – диаметр заготовки. Аналогично проводили условное разбиение тела штампа на слои толщиной $\Delta x'$. Размеры Δx выбирали небольшими по сравнению с длиной заготовки L_0 , принимали $\Delta x = \Delta x'$.

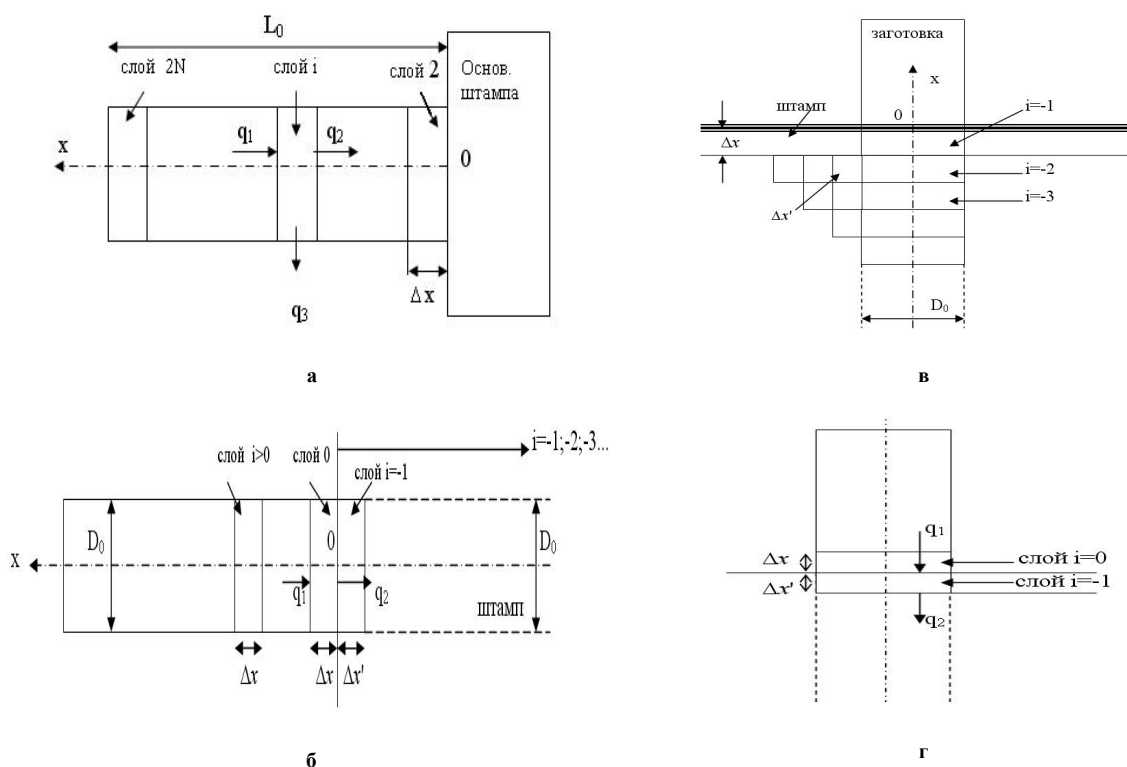


Рис. 1 – Схемы теплопередачи в заготовке и штампе:

- а – в промежуточном слое (i);
- б – в приконтактном слое ($i = 0$);
- в – прогрев слоев штампа ($i = -1; -2; -3$);
- г – теплопередача в штамп

Принимали следующие допущения:

- 1) изотермические поверхности в пределах одного цилиндрического элемента представляют собой параллельные плоскости, равноотстоящие друг от друга;
- 2) средний тепловой поток q , проходящий за элементарный промежуток времени Δt через любую поверхность, пропорционален начальному значению градиента температур за это же время;

3) теплосодержание элемента возрастает (убывает) пропорционально приращению (снижению) температуры в средней точке его объема, а тепловой поток распространяется от более нагретых элементов к менее нагретым ($q_1 \rightarrow q_2$), а так же в окружающую среду (q_3);

4) теплопередача конвекцией не учитывается.

Искомое рассредоточение температур по длине заготовки зависит от начального распределения. Рассматривали два типа распределения:

а) линейное, с меньшими значениями температуры на торцах заготовки и максимумом в поперечном сечении на середине её высоты;

б) соответствующее рассредоточению деформаций при осадке высоких заготовок (в соответствии с рекомендациями источника [11]).

Количество элементарных объемов при рассмотрении заготовки: $N = L_0 / \Delta x$, порядковый номер каждого элемента Δx обозначали как $i = 1; 2; \dots; N$. Время от окончания нагрева заготовки до начала её деформирования обозначали через τ и разбивали на M элементарных промежутков $\Delta \tau$, т.е. $M = \tau / \Delta \tau$. Каждому элементарному $\Delta \tau$ присваивали порядковый номер $j = 1; 2; \dots; M$. Величина

$\tau_{(j)} = \sum_{j=1}^{j=1;2;\dots;M} j \cdot \Delta \tau$ подлежит определению. Вводили обозначения для температур (в °C): $t_{i;j}$ – температура произвольного слоя в любой промежуток времени, где i – номер произвольного слоя, j – номер промежутка времени.

Теплопередача от слоя к слою в заготовке и штампе происходит в соответствии с основным законом Фурье [15], теплообмен с окружающей средой – согласно закону Стефана-Больцмана [15].

Рассмотрим тепловой баланс для слоя i внутри образца (рис. 1, а). Обозначим температуру i -го слоя в момент времени j как $t_{i;j}$. Температура i -го слоя в предыдущий момент времени $t_{i;j-1}$. Температура i -го слоя в последующий момент времени $t_{i;j+1}$. Удельная плотность и плотность теплового потока от слоя $i-1$ к i слою обозначали и соответственно:

$$q_1 = \lambda_{i-1} \frac{t_{i-1;j} - t_{i;j}}{\Delta x} \quad \text{и} \quad Q_1 = q_1 \cdot \frac{\pi D_0^2}{4}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности для материала при заданных условиях, Вт/м·град.

Удельная плотность и плотность теплового потока от слоя i к слою $i+1$:

$$q_2 = \lambda_{i+1} \frac{t_{i;j} - t_{i+1;j}}{\Delta x} \quad \text{и} \quad Q_2 = q_2 \cdot \frac{\pi D_0^2}{4}. \quad (2)$$

Плотность теплового потока от боковой поверхности слоя i к окружающей среде:

$$Q_3 = \sigma_{pr} \left[(t_{i;j} + 273)^4 - (t_{i;\bar{n}} + 273)^4 \right] \cdot \pi D_0 \cdot \Delta x, \quad (3)$$

где $\sigma_{pr} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_{cm} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right)$ Вт, здесь $\varepsilon_{cm} = 0,8$ – степень черноты заготовки и

штампа.

Изменение энтальпии i -го слоя за промежуток времени $\Delta \tau$:

$$\Delta H = -\rho_i \cdot c_i \cdot (t_{i;j+1} - t_{i;j}) \cdot \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot \Delta x, \quad (4)$$

где ρ – плотность материала заготовки при заданной температуре, кг/м³;

c – теплоемкость материала заготовки при заданной температуре, Дж/(кг·град).

После решения уравнения теплового баланса в виде:

$$(Q_1 - Q_2 - Q_3) \cdot \Delta \tau + \Delta H = 0, \quad (5)$$

с учетом (1)–(4), получим:

$$t_{i;j+1} = t_{i;j} + \frac{a_{i-1;j} \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i-1;j} - t_{i;j}) - \frac{a_{i+1} \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i;j} - t_{i+1;j}) - \frac{4\sigma_{pr}\Delta\tau}{D_0} \cdot \left[(t_{i;j} + 273)^4 - (t_{i;\bar{n}} + 273)^4 \right], \quad (6)$$

где $a = \lambda / \rho \cdot \tilde{n}$ – коэффициент температуропроводности материала.

Рассмотрим тепловой баланс для слоя $i = 2N$, не прилегающего к бойку (рис. 1, а). Удельная плотность и плотность теплоты от слоя $2N - 1$ к слою $i = 2N$ соответственно:

$$q_1 = \lambda_{2N;j} \frac{t_{2N-1;j} - t_{2N;j}}{\Delta x} \quad \text{и} \quad Q_1 = q_1 \cdot \frac{\pi D_0^2}{4}. \quad (7)$$

Плотность теплового потока от слоя $i = 2N$ в окружающую среду с температурой $t_{o.c.}$:

$$Q_3 = \sigma_{pr} \left[(t_{2N;j} + 273)^4 - (t_{o.c.} + 273)^4 \right] \cdot \left(\frac{\pi D_0^2}{4} + \pi D_0 \cdot \Delta x \right). \quad (8)$$

Изменение энтальпии слоя за время $\Delta \tau$:

$$\Delta H_{2N} = \rho_{2N} \cdot c_{2N} (t_{2N;j} - t_{2N;j+1}) \cdot \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot \Delta x. \quad (9)$$

После решения уравнения теплового баланса для слоя $i = 2N$ в виде:

$$(Q_1 - Q_2) \cdot \Delta \tau = -\Delta H_{2N}, \quad (10)$$

с учетом (7) - (10), получим:

$$t_{2N;j+1} = t_{2N;j} + \frac{\lambda_{2N-1;j} \Delta \tau}{\rho_{2N;j} \cdot c_{2N;j} \cdot \Delta x^2} (t_{2N-1;j} - t_{2N;j}) - \frac{\left(1 + \frac{4 \cdot \Delta x}{D_0}\right) \Delta \tau}{\rho_{2N;j} \cdot c_{2N;j} \cdot \Delta x} \cdot \sigma_{pr} \left[(t_{2N;j} + 273)^4 - (t_{i.\tilde{n}} + 273)^4 \right] \quad (11)$$

Значения коэффициентов теплопроводности берут при средней температуре соседнего слоя в момент времени j , плотность и теплоемкость берут при температуре слоя в момент времени j . Значение Δx выбираем произвольно (желательно чтобы N было не менее 10). Значение $\Delta \tau$ выбирают из условия устойчивости счета:

$$\frac{\lambda_{\min} \cdot \Delta \tau}{\rho_{\min} \cdot c_{\min} \cdot \Delta x^2} < \frac{1}{2}. \quad (12)$$

Рассмотрим тепловой баланс для слоя $i = 0$ (рис. 1, б). Теплофизические свойства штампа обозначали λ' , c' , ρ' , a' . Значение $\Delta x'$ определяли из условия:

$$\Delta x' = \Delta x \cdot \sqrt{\frac{a'}{a}}. \quad (13)$$

В общем виде для слоя i в момент времени j масса слоя будет равна:

$$\Delta m_{i;j}' = \rho_{i;j-1}' \cdot c_{i;j-1}' \cdot \frac{\pi}{4} (D_0 + (i + j) \Delta x')^2 \cdot \Delta x'. \quad (14)$$

При счете необходимо проводить проверку по условию $i + j \geq 0$. Если условие выполняется, то расчет ведут по приведенной формуле. Если $i + j < 0$, то необходимо принимать значение $i + j = 0$.

Удельный тепловой поток и тепловой поток от слоя $i = 1$ к слою $i = 0$:

$$q_1 = \lambda_1 \frac{t_{i-1;j} - t_{0;j}}{\Delta x} \quad \text{и} \quad Q_1 = \lambda_1 \frac{t_{i-1;j} - t_{0;j}}{\Delta x} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_0^2. \quad (15)$$

Тепловой поток от слоя $i = 0$ к слою $i = -1$ (рис 1, б):

$$Q_2 = \lambda_0 \frac{t_{0;j} - t'_{0;j}}{\Delta x / 2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_0^2, \quad (16)$$

здесь $t'_{0;j}$ – температура на границе слоев $i = 0$ и $i = -1$ (условия приравниваются).

Изменение энтальпии слоя $i = 0$:

$$\Delta H_{0;j} = \rho_{0;j} \cdot c_{0;j} \cdot \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot \Delta x \cdot (t_{0;j+1} - t_{0;j}). \quad (17)$$

После решения уравнения теплового баланса слоя $i = 0$ в виде:

$$\Delta\tau(Q_1 - Q_2) = \Delta H_{0;j}, \quad (18)$$

с учетом (13) - (15), получаем:

$$t_{0;j+1} = t_{0;j} + \frac{\lambda_{1;j}\Delta\tau}{\rho_{0;j}c_{0;j} \cdot \Delta x^2} (t_{1;j} - t_{0;j}) - \frac{\lambda_0\Delta\tau \cdot 2}{\rho_{0;j}c_{0;j} \cdot \Delta x^2} \left(t_{0;j} - \frac{\frac{\lambda_0}{\Delta x} t_{0;j} + \frac{\lambda'_0}{\Delta x'} t_{-1;j}}{\frac{\lambda_0}{\Delta x} + \frac{\lambda'_0}{\Delta x'}} \right). \quad (19)$$

Рассмотрим тепловой баланс для слоя $i = -1$ (рис. 1, б - г). Удельный тепловой поток и тепловой от слоя $i = 0$ к слою $i = -1$ соответственно:

$$q_1 = \lambda_0 \frac{t_{0;j} - t'_{0;j}}{\Delta x/2} \quad \text{и} \quad Q_1 = \lambda_0 \frac{t_{0;j} - t'_{0;j}}{\Delta x/2} \cdot \frac{\pi D_0^2}{4}. \quad (20)$$

Тепловой поток от слоя $i = -1$ к слою $i = -2$ (рис. 1, г):

$$Q_1 = \lambda'_{-1;j} \frac{t_{-1;j} - t_{-2;j}}{\Delta x'} \cdot \frac{\pi D_0^2}{4}. \quad (21)$$

Изменение энтальпии слоя $i = -1$:

$$\Delta H_{-1;j} = \rho'_{0;j} \cdot c'_{0;j} \cdot \frac{\pi}{4} [D_0 + (i+j)\Delta x'] \cdot \Delta x' (t_{-1;j+1} - t_{-1;j}). \quad (22)$$

После решения уравнения теплового баланса получим искомую температуру $t_{-1;j+1}$:

$$t_{-1;j+1} = t_{-1;j} + \frac{\lambda_0 \cdot \Delta\tau \cdot 2 \cdot D_0^2}{\rho'_{-1;j} \cdot c'_{-1;j} \cdot \frac{\pi}{4} [D_0 + (i+j)\Delta x'] \cdot \Delta x \cdot \Delta x'} \left(t_{0;j} - \frac{\frac{\lambda_0}{\Delta x} t_{0;j} + \frac{\lambda'_0}{\Delta x'} t_{-1;j}}{\frac{\lambda_0}{\Delta x} + \frac{\lambda'_0}{\Delta x'}} \right) - \frac{\lambda_{-1;j} \cdot \Delta\tau \cdot D_0^2}{\rho'_{-1;j} \cdot c'_{-1;j} \cdot (\Delta x)^2 [D_0 + (i+j)\Delta x']} (t_{-1;j} - t_{-2;j}). \quad (23)$$

Зависимости (6), (11), (19), (23) составляют основу автоматизированного расчета распределения температуры в заготовке и штампе. На базе данных зависимостей была составлена программа TempPole в среде C++ Builder, позволяющая исследовать термодинамические процессы в неравномерно нагретой заготовке и штампе.

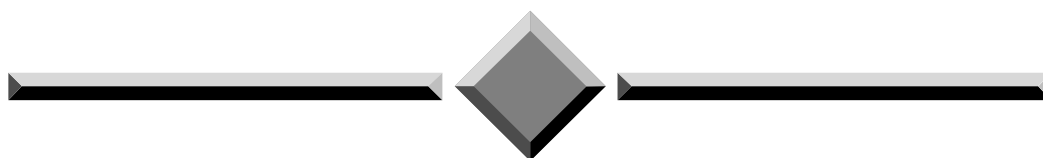
Выводы

Разработанная математическая модель изменения температурных полей в неравномерно нагретой по длине заготовке и штампе, на который она установлена, позволяет рассчитывать рациональное начальное распределение температур по длине заготовки, необходимое для проектирования нагревателей, например, индукционного или щелевого типов. Перспективными направлениями развития исследований в данном направлении являются расчеты термических напряжений в инструменте и заготовке для предупреждения её разрушения при последующем деформировании.

Литература

1. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / под ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1985. – 569 с.
2. Ершёв В. И. Интенсификация формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершёв. – М.: Высшая школа, 1989. – 87 с.
3. Method for bending workpieces: pat. 7373797 США, МПК В 21 D 43/10 (2006.01) / Rosenberger Ag, Rosenberger Gerhard. – № 10/567067 ; заявл. 13.07.2004 ; опубл. 20.05.2008 ; НПК 72/307.
4. Кирицев А. Д. Обжим толстостенных труб с неравномерным нагревом очага деформации / А. Д. Кирицев, В. К. Икорский // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 3. – С. 11-15.
5. Протяжка заготовок с неоднородным температурным полем / В. К. Заблоцкий, Я. Г. Жбанков, А. А. Швец, В. В. Панов // Научный вестник ДГМА. – 2013. – № 2 (12Е). – С. 52-62.
6. Стеблюк В. И. Разработка теории и методов интенсификации формоизменяющих операций листовой штамповки: дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05 / Стеблюк Владимир Иванович. – К., 1998. – 312 с.

7. Безручко И. И. Индукционный нагрев для объёмной штамповки / И. И. Безручко. – Л.: Машиностроение, 1987. – 126 с.
8. Zone heating methods and apparatuses for metal workpieces for forging : pat. 6178800 USA, МПК⁷ В 21 J 1/06. MSP Ind. Corp. / Edmonds Kevin, Stenger Jeffery. – № 09/114970 ; заявл. 14.07.1998 ; опубл. 30.01.2001 ; НПК 72/342.94.
9. Zhang X. R. Numerical simulation of pulsed laser bending / X. R. Zhang, G. Chen, X. Xu // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 2002. – № 3. – P. 254-260.
10. Кувалдин А. Б. Автоматизированный расчет процесса индукционного градиентного нагрева для кабельной промышленности / А. Б. Кувалдин, Н. С. Некрасова // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – № 3/2013. – С. 34-38. – Режим доступа : // http://www.e-heating.ru/content/files/kuvalding_nekrasova.pdf
11. Кухар В. В. Розробка рекомендацій до використання диференційованого нагрівання при одержанні профільованої заготовки осаджуванням із втратою стійкості / В. В. Кухар, К. К. Діамантопуло // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ, 2001. – С. 321-326.
12. Гринкевич В. А. Бесштамповое профилирование на прессах с повышением точности формоизменения на окончательных операциях / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, К. К. Діамантопуло // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 5. – С. 19-23.
13. Математичне моделювання зміни температурного поля заготовки при охолодженні після нерівномірного нагрівання / К. К. Діамантопуло, Л. І. Хііш, В. В. Кухар, І. В. Дмитренко // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ, 2002. – Т. 5 : Пластична деформація металів. – С. 175-179.
14. Хііш Л. І. Розрахунок температурного поля заготовки при нерівномірному нагріванні / Л. І. Хііш, В. В. Кухар, І. В. Дмитренко // Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький, 2001. – № 5 (36). – С. 155-159.
15. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Машгиз, 1967. – 596 с.



Проблеми трибології
“Problems of Tribology”
E-mail: tribosenator@gmail.com

Поступила в редакцію 10.03.2016

Kukhar V.V., Tuzenko O.A., Balalayeva E.Yu., Nahnibeda N.N. **Mathematical model of thermo-dynamical processes during contacting of gradient-heated billet with flat die.**

The models of a heat transfer from billet that unregulated heated on length to the flat die are considered in this paper. The recurrent certainly-difference mathematical model of a temperature fields changes in the billet and the die are developed. This model allows defining the initial distribution of temperatures in billet for choice an electro-thermal heater of a necessary design.

Ключевые слова: certainly-difference mathematical model, method of elementary heat balances, billet, flat die, temperature field, gradient heating, cooling.

References

1. Kovka i shtampovka, справочник, v 4 t. T.1. Materiali i nagrev, Oborudovanie, Kovka, pod red. E.I. Semenova, M., Mashinostroenie, 1985, 569 p.
2. Ershev V. I. Intensifikatsiya formoizmenyayuschih operatsiy listovoy shtampovki, M., Visshaya shkola, 1989, 87 p.
3. Method for bending workpieces: pat. 7373797 USA, MPK V 21 D 43/10 (2006.01) / Rosenberger Ag, Rosenberger Gerhard. No. 10/567067 ; zayavl. 13.07.2004 ; opubl. 20.05.2008 ; NPK 72/307.
4. Kiritsev A.D., Ikorskiy V.K. Obzhim tolstostennyih trub s neravnomernym nagrevom ochaga deformatsii, Izv. Vuzov, Chernaya metallurgiya, 1965, No. 3, P. 11-15.
5. Zablotskiy V.K., Zhbakov Ya.G., Shvets A.A., Panov V.V. Protyazhka zagotovok s neodnorodnyim temperaturnym polem, Nauchniy vestnik DGMA, 2013, No. 2 (12E), P. 52-62.
6. Stebluk V.I. Razrabotka teorii i metodov intensivatsii formoizmenyayuschih operatsiy listovoy shtampovki: dis. Dr. tehn. nauk ,05.03.05, Stebluk Vladimir Ivanovich, Kiev, 1998, 312 p.
7. Bezruchko I.I. Induksionnyy nagrev dlya objomnoy shtampovki, L., Mashinostroenie, 1987, 126 p.
8. Zone heating methods and apparatuses for metal workpieces for forging : pat. 6178800 USA, MPK7 V 21 J 1/06. MSP Ind. Corp. / Edmonds Kevin, Stenger Jeffery, No. 09/114970 ; zayavl. 14.07.1998 ; opubl. 30.01.2001 ; NPK 72/342.94.
9. Zhang X.R., Chen X.Xu. Numerical simulation of pulsed laser bending, Trans. ASME. J. Appl. Mech., 2002, No. 3, P. 254-260.
10. Kuvaldin A.B., Nekrasova N.S. Avtomatizirovannyi raschet processa induktsionnogo gradientnogo nagreva dlya kabelnoy promyshlennosti, Promyshlennyi elektroobogrev i elektrootoplenie, No. 3, 2013, P. 34-38. Url : // http://www.e-heating.ru/content/files/kuvalding_nekrasova.pdf
11. Kukhar V.V., Diamantopulo K.K. Rozrobka rekomendatsiy do vikoristannya diferentsiyovanogo nagrivan'ya pri oderzhanni profi'ljovanoj zagotovki osadzhuvan'nyam iz vtratoj stiykostj, Udoskonalennya protsesiv ta obladnannya obrobki tiskom u metalurgiji i mashinobuduvanni, zb. nauk. pr., Kramatorsk, 2001, P. 321-326.
12. Grinkevich V.A., Kukhar V.V., Diamantopulo K.K. Besshtampovoe profilirovanie na pressah s povyisheniem tochnosti formoizmeneniya na okonchatelnyh operatsiyah, Kuznechno-shtampovochnoje proizvodstvo, Obrabotka materialov davleniem, 2010, No. 5, P. 19-23.
13. Diamantopulo K.K., Kiiish L.I., Kukhar V V., Dmytrenko I.V. Matematichne modelyuvannya zminy temperaturnogo polya zagotovki pri oholodzhenni pislya nerivnomirnogo nagrivan'ya, Naukovi visti. Suchasni problemi metalurgiji, Dnipropetrovsk, 2002, T. 5, Plastichna deformatsiya metaliv, P. 175-179.
14. Kiiish L.I., Kukhar V.V., Dmitrenko I.V. Rozrahunok temperaturnogo polya zagotovki pri nerivnomirnomu nagrivan'ni, Visnik tehnologichnogo universitetu Podillya, Khmel'nitskiy, 2001, No. 5(36), P. 155-159.
15. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti, M. Mashgiz, 1967, 596 p.