

УДК 621.73.69.001.24:536.224

Кухарь В. В.
Тузенко О. А.
Балалаева Е. Ю.

РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЙ МОДЕЛИ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОСТЫВАНИИ ЗАГОТОВКИ НА ПЛОСКОМ БОЙКЕ ПОСЛЕ ГРАДИЕНТНОГО НАГРЕВА

Учет термодинамических процессов при выборе термомеханических режимов в технологиях горячей обработки металлов давлением необходим для исключения дефектов термического происхождения, деформационного разрушения заготовки, обеспечения требуемых температур и высокой стойкости штампового инструмента. Обычно ограничиваются тем, что 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 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 численных методов в качестве инструмента для разработки математической модели процесса, реализация которой становится возможной в составленном автономном программном обеспечении.

Приёмы местного, неравномерного или дифференцированного (градиентного) нагрева, иногда сочетающиеся с принудительным охлаждением инструмента, широко применяют при вытяжке и отбортовке, гибке, раздаче и обжиге [2–4]. Известны способы неравномерного нагрева слитков под ковку для достижения положительного эффекта влияния интенсивных сдвиговых деформаций на проработку металла [5]. В диссертации В.И. Стеблюка [6] получили развитие способы вытяжки из предварительно спрофилированной 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 очаговых 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 дифференцированно менять сопротивление деформированию, управляя конечной формой изделия. Расчет необходимого температурного поля и размеров зоны нагрева должен

быть сориентирован на конечное формоизменение, учитывать не только время переноса заготовки к штампу, но и процессы охлаждения заготовки на штампе.

В работе [13] на основе разработки и реализации конечно-разностной модели была решена задача нахождения распределения температур при дифференцированном нагреве заготовки в зависимости от требуемого температурного градиента при установке её на плиту и времени охлаждения при переносе на штамп с учетом марки стали. Однако процессы охлаждения на штампе заготовки, которая неравномерно прогрета по высоте, были не изучены.

Целью настоящей работы является исследование процессов контактного теплообмена на основе компьютерной реализации математической модели остывании неравномерно нагретой по высоте заготовки на плоском штампе перед деформированием.

Основы нагрева заготовок в индукторах изложены в труде [7], процессы остывания неравномерно нагретой заготовки при её переносе от индуктора к штампу были рассмотрены ранее [13], а описание термодинамических процессов, происходящих вследствие подсыхания и деформационного разогрева в штампах, может быть найдено, например, на основании данных источника [14]. Отдельно следует указать, что рекуррентная конечно-разностная математическая модель остывания неравномерно-нагретой заготовки на плоском штампе была разработана в работе [15]. Данная модель требует программной реализации и проработки при влиянии различных температурных и геометрических факторов. Искомое распределение температур по длине заготовки зависит от начального распределения.

Применительно к заготовке рассматривали одномерную модель, то есть плотность теплового потока является функцией координаты по оси заготовки и времени. Применительно к штампу рассматривали двухмерную модель с его прогревом вглубь и в стороны. Нагретую заготовку 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_{0n} , принимали $\Delta x = \Delta x'$. При условии симметричного относительно оси заготовки распределения температур, длина заготовки составляет $L_0 = 2L_{0n}$, где L_{0n} – расстояние между поперечными сечениями с максимальной и минимальной (на торце) температурами.

Количество элементарных объемов при рассмотрении половины заготовки: $N = L_{0n} / \Delta x$, тогда порядковый номер каждого элемента Δx обозначали как $i = 1, 2, \dots, N$. Время от установки заготовки на штамп до начала её деформирования обозначали через τ и разбивали на M элементарных промежутков $\Delta \tau$, т.е. $M = \tau / \Delta \tau$, при этом каждому элементарному промежутку времени $\Delta \tau$ присваивали свой порядковый номер $j = 1, 2, \dots, M$. Величина $\tau_j = \sum_{j=1}^M j \cdot \Delta \tau$ 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.

Согласно предварительно полученному решению [15], температуру в промежуточном слое заготовки в последующий момент времени определяют как

$$t_{i,j+1} = t_{i,j} + \frac{a_{i-1,j} \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i-1,j} - t_{i,j}) - \frac{a_{i+1} \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i,j} - t_{i+1,j}) - \frac{4\sigma_{np} \Delta \tau}{D_0} \cdot [(t_{i,j} + 273)^4 - (t_{o.c.} + 273)^4] \quad (1)$$

где $\sigma_{np} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$; $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ – коэффициент температуропроводности, м²/с, при этом λ – коэффициент теплопроводности для материала заготовки при заданных условиях, Вт/м·К; ρ – плотность материала заготовки при заданной температуре, кг/м³; c – теплоемкость материала заготовки при заданной температуре, Дж/(кг·К).

Температура в крайнем слое, обращенном в окружающую среду:

$$t_{2N,j+1} = t_{2N,j} + \frac{\lambda_{2N-1,j} \cdot \Delta \tau}{\rho_{2N,j} \cdot c_{2N,j} \cdot \Delta x^2} (t_{2N-1,j} - t_{2N,j}) - \frac{\left(1 + \frac{4 \cdot \Delta x}{D_0}\right) \cdot \Delta \tau}{\rho_{2N,j} \cdot c_{2N,j} \cdot \Delta x} \sigma_{np} - \left[(t_{2N,j} + 273)^4 - (t_{o.c.} + 273)^4 \right] \quad (2)$$

Температура в крайнем слое, контактирующем со штампом:

$$t_{0,j+1} = t_{0,j} + \frac{\lambda_{1,j} \cdot \Delta \tau}{\rho_{0,j} \cdot c_{0,j} \cdot \Delta x^2} (t_{1,j} - t_{0,j}) - \frac{\lambda_0 \cdot \Delta \tau \cdot 2}{\rho_{0,j} \cdot c_{0,j} \cdot \Delta x^2} (t_{0,j} - t'_{0,j}). \quad (3)$$

Значение $t'_{0,j}$, входящее в формулу (3), предварительно определяют как:

$$t'_{0,j} = \frac{\frac{\lambda_0}{\Delta x} t_{0,j} + \frac{\lambda'_0}{\Delta x'} t_{-1,j}}{\frac{\lambda_0}{\Delta x} + \frac{\lambda'_0}{\Delta x'}}. \quad (4)$$

Температура в слое штампа, контактирующем с заготовкой:

$$t_{-1,j+1} = t_{-1,j} + \frac{\lambda_0 \cdot \Delta \tau \cdot 2 \cdot D_0^2}{\rho'_{-1,j} \cdot c'_{-1,j} \cdot \frac{\pi}{4} [D_0 + (i+j)\Delta x'] \cdot \Delta x \cdot \Delta x'} (t_{0,j} - t'_{0,j}) - \frac{\lambda_{-1,j} \cdot \Delta \tau \cdot D_0^2}{\rho'_{-1,j} \cdot c'_{-1,j} \cdot (\Delta x)^2 [D_0 + (i+j)\Delta x'] \cdot \Delta x'} (t_{-1,j} - t_{-2,j}). \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) теплофизические характеристики с верхним индексом «'» относятся к материалу штампа. Значения коэффициентов теплопроводности берут при средней температуре соседнего слоя в момент времени j , плотность и теплоемкость берут при температуре слоя в момент времени j .

Для универсализации результатов моделирования и возможности учета планируемого несимметричного (относительно слоя с максимальным теплосодержанием) распределения температур по длине заготовки, функции, описывающие температурные распределения, задаются в пределах от слоя с максимальным теплосодержанием $t_{i \max}$ до слоя с минимальным теплосодержанием $t_{i \min}$.

В качестве функции, описывающей распределение температур по длине заготовки в соответствии с закономерностью распределения деформаций, принята зависимость [11, 13]:

$$t_{i,j} = t_{2N,j} + (t_{i \max,j} - t_{2N,j}) \frac{\alpha^2 \left[1 - 4 \left(\frac{i \cdot \Delta x}{H_0} \right)^2 \right]}{4 \left(\frac{i \cdot \Delta x}{H_0} \right)^2 + \alpha^2}, \quad \alpha = 2163 \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^{-4,83}, \quad (6)$$

где $t_{2N} = t_{i\min}$.

Функция, описывающая линейное распределение температур по длине заготовки:

$$t_{i,j} = t_{2N,j} + \frac{(t_{i\max,j} - t_{2N,j})}{H_0} \cdot i \cdot \Delta x, \quad t_{2N} = t_{i\min}. \quad (7)$$

Математическая модель учитывает изменение теплофизических свойств стали (заготовки и штампа) в зависимости от температуры, что достигнуто путём ступенчатой аппроксимации в MS Office пакете Excel линиями тренда данных Г.Г. Немзера [16] для сталей 20, 5ХНМ и 38ХС, 38ХНЗФА.

На основе зависимостей (1)–(7), являющихся основой для автоматизированного расчета изменений неравномерности распределения температур во времени в заготовке и штампе по слоям методами математического моделирования, составлено программное обеспечение (названное «TempPole») в среде C++ Builder. Входными данными для моделирования изменений температурных полей являются: а) габаритные размеры и материал заготовки; б) начальная температура штампа; в) полученная в индукторе или каким-либо другим способом неравномерность температур по длине заготовки, заданная в виде распределения (функционально); г) максимальная и минимальная (на контакте) температура заготовки.

Форма ввода исходных данных (рис. 1) содержит набор полей для редактирования параметров моделирования. Первоначально поля заполнены значениями по умолчанию. Для начала расчетов по введенным данным необходимо нажать кнопку «Начать моделирование» либо выбрать пункт меню «Моделирование» → «Начать». После окончания расчетов температурного поля заготовки и штампа открывается окно результатов моделирования в виде сводного графика (рис. 2). Имеется функция скрытия отдельных не интересующих пользователя графиков (например, оставить только графики первоначального температурного поля заготовки и на момент окончания процесса моделирования).

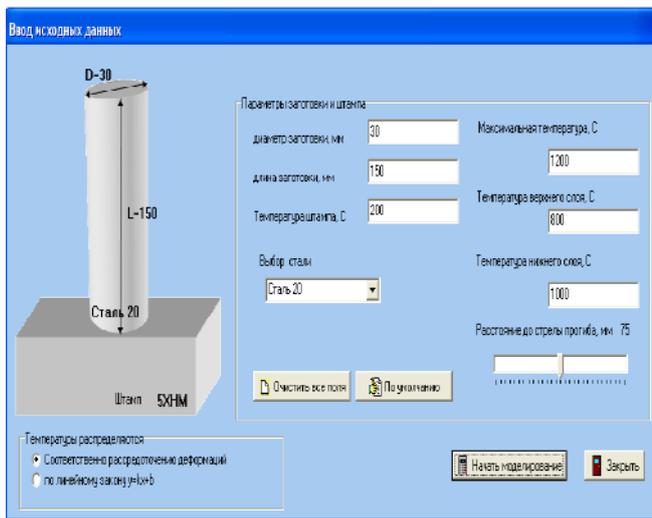


Рис. 1. Окно программы «TempPole» для ввода данных

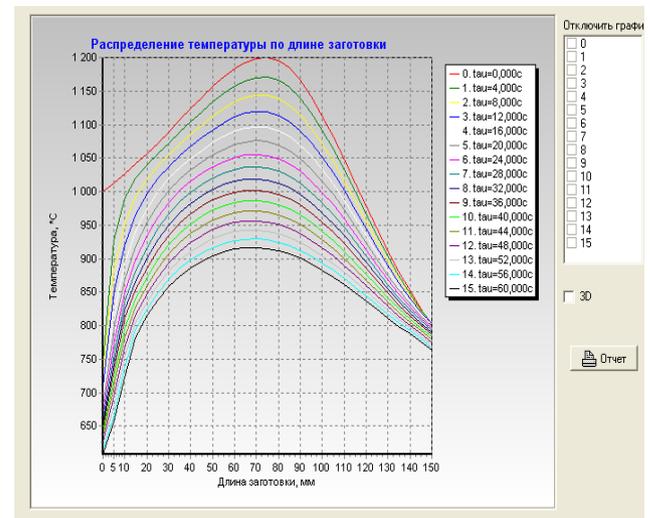


Рис. 2. Результаты моделирования распределения температур по высоте заготовки через различные промежутки времени ($\tau = \text{tau}$) от начала контакта заготовки и осадочной плиты

Результаты расчетов выводятся в виде окон, отображающих распределение температур в глубину штампа (рис. 3) и слоях заготовки (рис. 4), а также разрез заготовки и штампа по слоям (рис. 5), что позволяет проследить за изменением температуры заготовки и штампа во времени. Предусматривается составление отчета по результатам на выбранный момент

времени. Различные температуры представлены дифференцированно на графиках и на разрезе различными цветами для улучшения восприятия и анализа результатов. По окончании расчетов заполняется таблица значений температур в виде элементов массива, и параллельно строятся графики распределения температуры по длине заготовки, а также графики динамического изменения температуры в отдельных слоях.

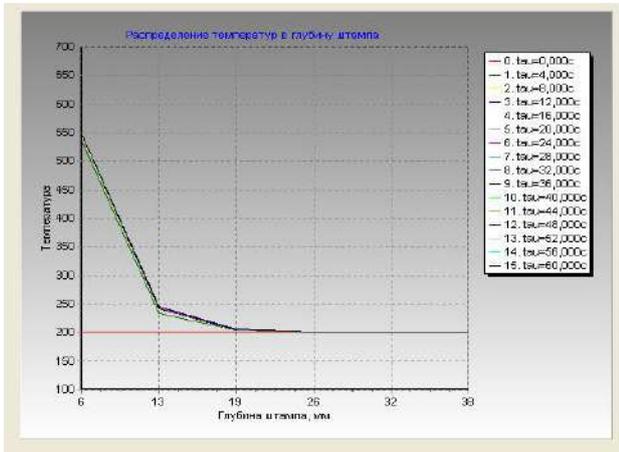


Рис. 3. Распределение температур в глубину плоского штампа (осадочной плиты) при разных $\tau = \tau$

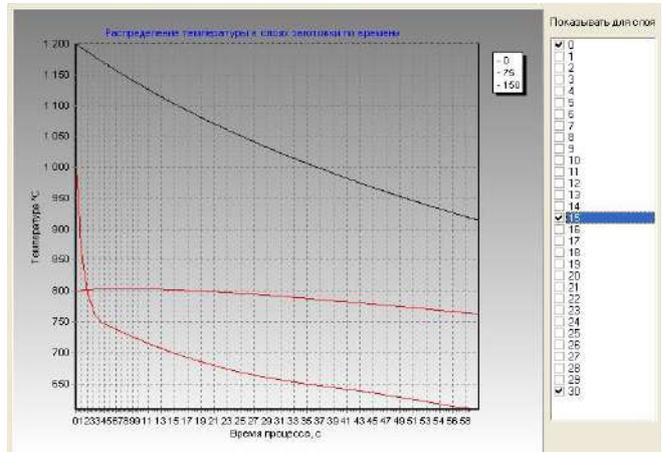


Рис. 4. График распределения температур в слоях заготовки

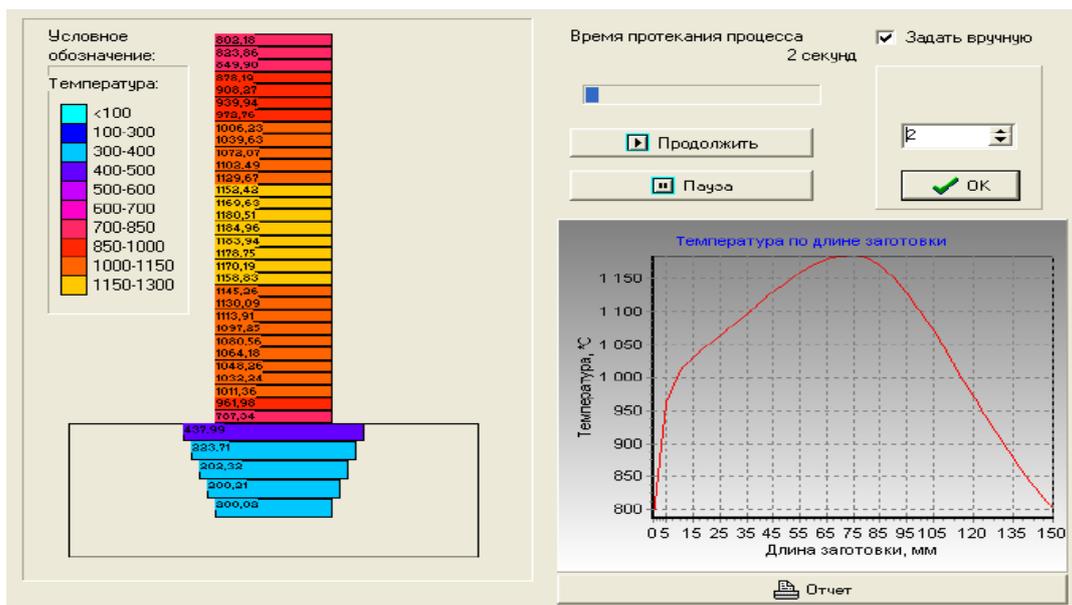


Рис. 5. Результаты моделирования распределения температур в разрезе по слоям заготовки и плоского штампа (осадочной плиты)

Приведенные на рис. 2–рис. 5 данные представляют собой пример реализации результатов моделирования при помощи программы «TempPole» для остывания заготовки со следующими параметрами: материал заготовки сталь 20, $H_0 = 150$ мм и $D_0 = 30$ мм, материал штампа 5ХНМ, центр заготовки нагрет до $t_{max} = 1200$ °С, края заготовки нагреты неодинаково – обращенный в атмосферу $t_{min01} = 800$ °С и находящийся на штампе – $t_{min02} = 1000$ °С. Закономерность распределения температур соответствует закономерности распределения деформаций, в соответствии с выражением (6). Штамп нагрет до $t_s = 200$ °С.

Величина набора металла по длине заготовки пропорционально зависит от температуры слоя поперечного сечения. Таким образом, по форме температурного поля заготовки сле-

дует судить о результате формоизменения. Например, через 60 с после установки заготовки на штамп её температурное поле будет отличаться от первоначального за счет более быстрого остывания слоя, контактирующего со штампом. Из вычислительного эксперимента видна необходимость нагрева нулевого слоя до более высокой температуры, чем слоя, обращенного в атмосферу.

При составлении отчета по результатам моделирования в него входят (рис. 6): параметры заготовки и начального температурного поля, информация о моменте времени протекания процесса, на который создается отчет, числовые значения и график температурного поля заготовки. Путем проведения ряда моделирующих расчетов с различными исходными данными, выявляют влияние различных факторов на тепловые процессы, протекающие в неравномерно нагретой заготовке и осадочной плите.

Пример 1. Заготовка (Сталь 20) высотой $H_0 = 150$ мм и диаметром $D_0 = 30$ мм нагрета с формированием максимальной температуры в центре заготовки. Максимальная температура – $t_{\max} = 1200$ °С, края заготовки нагреты одинаково до $t_{\min} = t_{\min 0} = 800$ °С. Штамп прогрет до $t_s = 200$ °С. Используя программу «TempPole», получаем результаты (см. рис. 7).

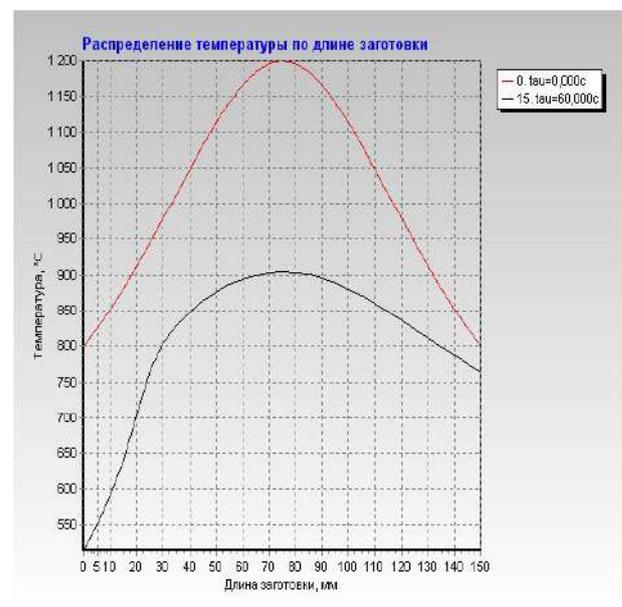
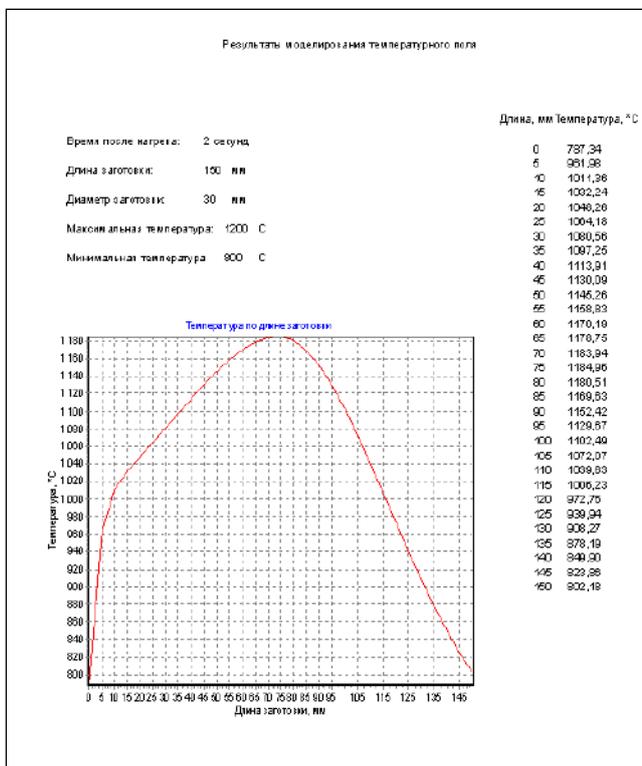


Рис. 6. Представление результатов моделирования

Рис. 7. Результаты моделирования по примеру 1

Величина набора металла по длине заготовки пропорционально зависит от температуры слоя поперечного сечения. Таким образом, по форме температурного поля заготовки можно судить об ожидаемом результате формоизменения. Через 60 с после помещения заготовки на штамп форма температурного поля заготовки будет отличаться от первоначальной за счет более быстрого остывания слоя, контактирующего со штампом. Из расчетов видно, что целесообразно нагревать нулевой слой до более высокой температуры чем слой $i = N$.

Пример 2. Начальные данные: $H_0 = 150$ мм, $D_0 = 30$ мм, материал заготовки – сталь 20. Температура центра заготовки до $t_{\max} = 1200$ °С, температура слоя, контактирующего с окружающей средой – $t_{\min} = 800$ °С, температура слоя, контактирующего со штампом, – $t_{\min 0} = 1100$ °С. Результаты моделирования по данному примеру представлены на рис. 8.

Через 60 с график распределения температур по длине заготовки имеет форму более приближенную к симметричной. За счет более сильного нагрева нулевого слоя в прилегающих слоях устанавливается максимальная температура, способствующая набору металла в центре заготовки, и реализуются приблизительно одинаковые условия для формоизменения по краям. Следует учитывать обратный процесс прогрева торца заготовки после отрыва от плиты в результате подхода тепла от более прогретых участков.

Пример 3. Различные варианты нагрева заготовки позволяют управлять координатой максимального набора металла по высоте заготовки. Для данных, приведенных в примере 2, установим максимальную температуру не в центре заготовки, а на расстоянии 50 мм от края. Результаты моделирования по примеру 3 представлены на рис. 9.

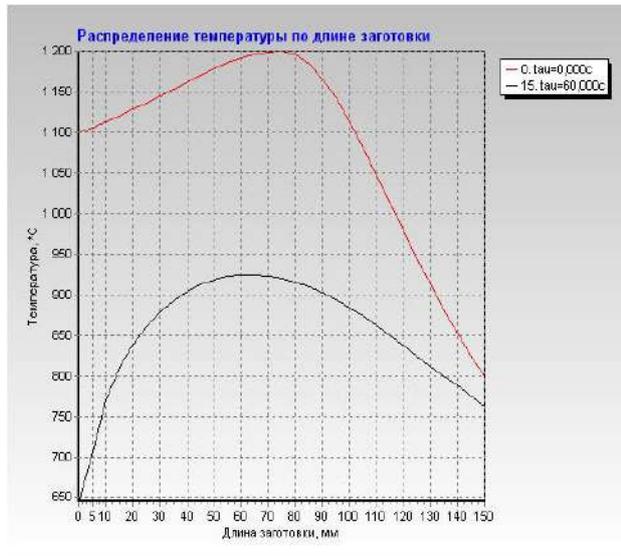


Рис. 8. Результаты моделирования по примеру 2

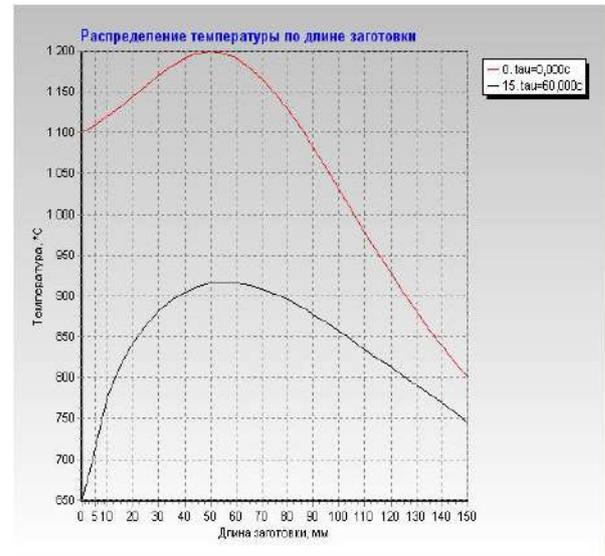


Рис. 9. Результаты моделирования по примеру 3

Не смотря на большой предварительный прогрев торца, установленного на осадочную плиту, через 60 с имеем малое смещение максимума нагрева с 50 мм до ~60 мм в сторону центра заготовки за счет охлаждения от плиты. Следует отметить, что за принятые контрольные 60 с времени происходит существенное охлаждение металла на торцах заготовки ниже температур ковочного интервала.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ сведений об использовании местного, неравномерного или градиентного нагрева заготовок в технологиях обработки металлов давлением. Обоснована перспективность применения дифференцированного нагрева для подготовительных операций перед горячей объемной штамповкой, как способа температурного профилирования в процессах безручьевой подготовки заготовок.

2. Показано, что распределение температур в заготовке после дифференцированного нагрева зависит от условий контактного теплообмена со штампом, исходных температурных полей, времени переноса и контакта заготовки со штампом. Для разработанной конечно-разностной рекуррентной математической модели контактного теплообмена между градиентно-нагретой заготовкой и плоским штампом предложена программная реализация, учитывающая теплофизические и геометрические свойства контактирующих тел. Модель учитывает условия теплопередачи от торца заготовки в плиту, увеличение теплосодержания штампа с его прогревом и изменение теплофизических свойств материала заготовки и штампа от температуры. Выполнено одномерное моделирование распределения температур после

градиентного нагрева с различными (симметричными и несимметричными) формами кривой начального теплового состояния по высоте заготовки, установленной на подогретом штампе, и в теле данного штампа.

3. Проведено моделирование различных вариантов остывания неравномерно нагретой по высоте заготовки на плоском штампе. Выявлены закономерности падения температуры заготовки в наиболее нагретой зоне и на участках контакта со штампом и атмосферой, позволяющие более точно рассчитывать темп штамповки и получать более достоверную информацию для проектирования нагревательных устройств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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. *Ершѳв В. И. Интенсификация формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершѳв. – 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. – No. 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. – No. 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. – No. 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. – Киев, 1998. – 312 с.*
7. *Безручко И. И. Индукционный нагрев для объемной 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. – No. 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. – No. 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. – No. 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. – No. 5. – С. 19–23.*
13. *Математичне моделювання зміни температурного поля заготовки при охолодженні після нерівномірного нагрівання / К. К. Діамантопуло, Л. І. Хіш, В. В. Кухар, І. В. Дмитренко // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ, 2002. – Т. 5 : Пластична деформація металів. – С. 175–179.*
14. *Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением / Н. И. Яловой, М. А. Тылкин, П. И. Полухин, Д. И. Васильев. – М.: Высш. школа, 1973. – 631 с.*
15. *Моделирование температурного поля неравномерно нагретой по длине заготовки при ее остывании на штампе / В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, В. А. Бурко, М. В. Крестников // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2007. – Вип. 17. – С. 125–129.*
16. *Немзер Г. Г. Тепловые процессы производства крупных поковок / Г. Г. Немзер. – Л.: Машиностроение, 1979. – 270 с.*

REFERENCES

1. *Kovka i shtampovka : spravochnik : v 4 t. T. 1. Materialy i nagrev. Oborudovanie. Kovka / pod red. E. I. Semenova. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 569 s.*
2. *Ershyov V. I. Intensifikatsiya formoizmenyayuschih operatsiy listovoy shtampovki / V. I. Ershyov. – M.: Vysshaya shkola, 1989. – 87 s.*
3. *Method for bending workpieces: pat. 7373797 SShA, МПК 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. *Obzhim tolstostennykh trub s neravnomernym nagrevom ochaga deformatsii* / A. D. Kiritsev, V. K. Ikorskiy // *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. – 1965. – No. 3. – S. 11–15.
5. *Protyazhka zagotovok s neodnorodnyim temperaturnym polem* / V. K. Zablotskiy, Ya. G. Zhbankov, A. A. Shvets, V. V. Panov // *Nauchnyy vestnik DGMA*. – 2013. – No. 2 (12E). – S. 52–62.
6. Steblyuk V. I. *Razrabotka teorii i metodov intensifikatsii formoizmenyayuschih operatsiy listovoy shtampovki: dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.03.05 / Steblyuk Vladimir Ivanovich*. – Kiev, 1998. – 312 s.
7. Bezruchko I. I. *Induktsionnyy nagrev dlya ob'Yomnoy shtampovki* / I. I. Bezruchko. – L.: Mashinostroenie, 1987. – 126 s.
8. *Zone heating methods and apparatuses for metal workpieces for forging* : pat. 6178800 USA, MPK7 V21 J1/06. 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. *Numerical simulation of pulsed laser bending* / X. R. Zhang, G. Chen, X. Xu // *Trans. ASME. J. Appl. Mech.* – 2002. – No. 3. – P. 254–260.
10. Kuvaldin A. B. *Avtomatizirovannyiy raschet protsessa induktsionnogo gradientnogo nagreva dlya kabelnoy promyshlennosti* / A. B. Kuvaldin, N. S. Nekrasova // *Promyshlennyiy elektroobogrev i elektrootoplenie*. – No. 3/2013. – S. 34–38. – Rezhim dostupa : // http://www.e-heating.ru/content/files/kuvalding_nekrasova.pdf.
11. Kukhar V. V. *Rozrobka rekomendatsii do vykorystannia dyferentsiiovanoho nahrivannia pry oderzhanni profilovanoi zahotovky osadzhuvaniyam iz vtratoi stiiikosti* / V. V. Kukhar, K. K. Diamantopulo // *Udoskonalennia protsesiv ta obladdnannia obrobky tyskom u metalurhii i mashynobuduvanni* : zb. nauk. pr. – Kramatorsk, 2001. – S. 321–326.
12. Grinkevich V. A. *Besshtampovoe profilirovanie na pressah s povysheniem tochnosti formoizmeneniya na okonchatelnykh operatsiyah* / V. A. Grinkevich, V. V. Kukhar, K. K. Diamantopulo // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. – 2010. – No. 5. – S. 19–23.
13. *Matematychni modeliuvannia zminy temperaturnoho polia zahotovky pry okholodzhenni pislia nerivnomirnogo nahrivannia* / K. K. Diamantopulo, L. I. Khiish, V. V. Kukhar, I. V. Dmyitrenko // *Naukovi visti. Suchasni problemy metalurhii*. – Dnipropetrovsk, 2002. – T. 5 : *Plastychna deformatsiia metaliv*. – S. 175–179.
14. *Teplovyie protsessyi pri obrabotke metallov i splavov davleniem* / N. I. Yalovoy, M. A. Tyilkin, P. I. Poluhin, D. I. Vasilev. – M.: Vysh. shkola, 1973. – 631 s.
15. *Modelirovanie temperaturnogo polya neravnomerno nagretoy po dline zagotovki pri ee ostyivanii na shtampe* / V. V. Kukhar, O. A. Lavrentik, V. A. Burko, M. V. Krestnikov // *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu: zb. nauk. pr. / PDTU*. – Mariupol, 2007. – Vyp. 17. – S. 125–129.
16. Nemzer G. G. *Teplovyie protsessyi proizvodstva krupnykh pokovok* / G. G. Nemzer. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 270 s.

Кухарь В. В. – д-р техн. наук, проф. ПГТУ
Тузенко О. А. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ
Балалаева Е. Ю. – канд. техн. наук, доц. ПГТУ

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: kvv_mariupol@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.02.2016 г.