

УДК 621.73.69.001.24:536.224

Кухарь В.В., д.т.н., проф., Сердюк А.И., к.т.н., доц.

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина

## КРИВАЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОМ НАГРЕВЕ ЗАГОТОВОК ПЕРЕД БЕЗРУЧЬЕВОЙ ГИБКОЙ-ПРОФИЛИРОВАНИЕМ

Kukhar V., Serdjuk A.

SHEI "Priazovskyi State Technical University", Mariupol, Ukraine ([kvv.mariupol@gmail.com](mailto:kvv.mariupol@gmail.com))

## THE CURVE OF TEMPERATURE DISTRIBUTION AT DIFFERENTIAL HEATING OF BILLETS BEFORE IMPRESSION-FREE BENDING-PROFILING

Выполнен анализ основных способов дифференцированного нагрева в процессах обработки металлов давлением. Обосновано, что безручьевые способы предварительного профилирования заготовок перед горячей объемной штамповкой для прогнозируемого формоизменения рационально комбинировать с их градиентным нагревом, который изменяет пластические свойства заготовки дифференцированно по длине. Высказана гипотеза, что наиболее эффективное управление формоизменением при градиентном нагреве реализуется в случае, когда распределение температур по длине профилируемой заготовки соответствует распределению деформаций. Предложено 18 основных вариантов нагрева для получения различных конфигураций полуфабрикатов. Экспериментально подтверждено, что безручьеовое профилирование заготовок продольным изгибом с неравномерным нагревом по длине позволяет увеличить локальные линейные размеры сечения на 38...45 %. Кроме того, становится возможным профилирование части заготовки и повышается эффективность гибки-профилирования заготовок с отношением длины нагретой части к диаметру более чем 5,5. Согласно высказанной гипотезе, экспериментально получена форма градиентной кривой распределения температур для интенсификации процесса профилирования продольным изгибом заготовки, путем замеров распределения утолщений по длине изогнутой оси заготовки. Экспериментальные данные обработаны методом наименьших квадратов и выявлена функциональная зависимость распределения температур в виде квадратичной функции (верзиеры Аньези). Установлено, что форма градиентной кривой распределения температур не зависит от величины условной степени деформации, а зависит только от отношения высоты (длины) к диаметру предназначенной для профилирования части заготовки.

Ключевые слова: профилирование; дифференцированный нагрев; продольный изгиб; градиентная кривая распределения температур

### Введение

Безручьевые способы профилирования заготовок перед последующей объемной штамповкой позволяют приблизить форму заготовки к конфигурации готового изделия без использования дорогостоящего профилирующего оборудования и сложной штамповой оснастки. Такое профилирование, выполняемое на основном штамповочном (преимущественно прессовом) оборудовании, позволяет в 2...8 раз снизить энергетические затраты на деформирование заготовок [1]. При этом управление формоизменением при безручьевом продольном изгибе заготовок рационально осуществлять путем его комбинирования с предварительным дифференцированным (градиентным) нагревом. Очевидно, что наиболее эффективное управление формоизменением реализуется в случае, когда распределение температур по длине профилируемой заготовки соответствует распределению деформаций [2].

### Анализ сведений о неравномерном и дифференцированном нагреве заготовок

Экспериментальные и теоретические исследования [3] показывают, что поперечное сечение исходной заготовки при безручьеовой гибке-профилировании (рис. 1) может быть увеличено в 1,5 раза и несколько более. Увеличение значения относительной высоты  $m_0$  (отношения высоты  $H_0$  к диаметру  $D_0$ ,  $m_0 = L_0 / D_0$ ) заготовки до  $m_0 > 5,5$  приводит к резкому уменьшению эффективности набора металла, что ограничивает номенклатуру изделий, к которым применим продольный изгиб в качестве профилирующей операции.

Для повышения эффективности и расширения области применения процессов обработки металлов давлением широко применяют способы неравномерного или дифференцированного нагрева, когда заготовке сообщают неоднородное по длине температурное поле или проводят разогрев только места, предназначенного для деформирования [2, 4, 5]. Наиболее часто нагрев выполняют в индукционных нагревателях различной конструкции [5–7] или используют приёмы подстуживания участков (торцов) заготовки [8]. Основной целью

такого вида нагріву являється локалізація пластическої деформації на определёних участках заготовки за счет меншого прогріву поперечних сечень, на яких следует затормозит формозмінення.

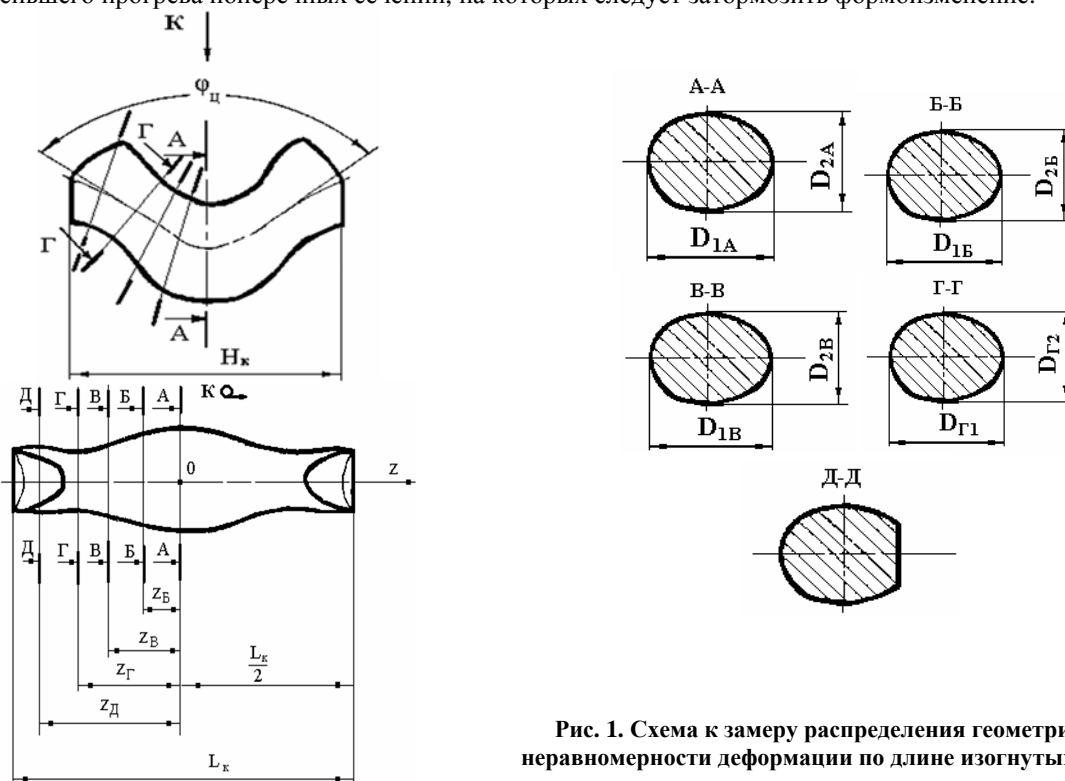


Рис. 1. Схема к замеру распределения геометрической неравномерности деформации по длине изогнутых образцов

Равномерный нагрев перед безручьевого гибкой-профилированием продольным изгибом преимущественно локальном деформировании заготовки требует излишних энергетических затрат, учитывая, что в производственных условиях нагрев проводят традиционно до температуры, близкой к верхней границе интервала ковочных температур [9]. Поэтому немаловажен энергосберегающий эффект способа и удобство обеспечения необходимой неравномерности прогрива по длине заготовки путём использования конструкций индукторов с переменной плотностью (а, иногда, и многорядностью) расположения их колец [2, 4, 5].

**Цель и задачи исследования.** Целью данной работы является получение исходной информации для проектирования специальных индукционных нагревателей для технологий неравномерного дифференцированного нагрева заготовок под контролируемое безручьевого гибкой-профилирование.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Предложить конструктивные варианты исполнения специальных индукционных нагревателей и определить условия осуществления рационального дифференцированного нагрева заготовок по длине для управляемого безручьевого формозмінення.

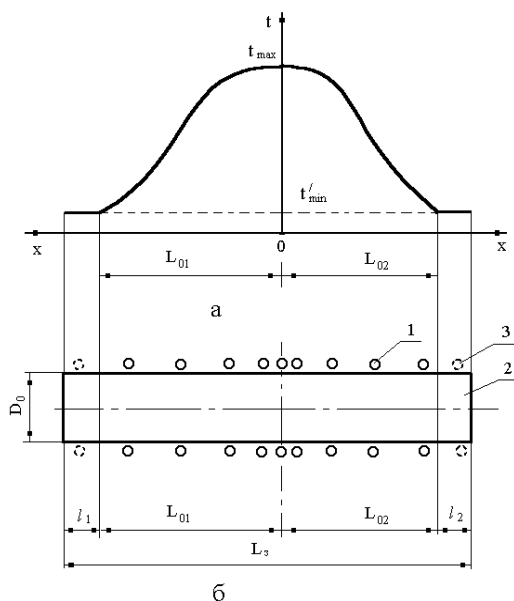
2. Экспериментально подтвердить возможность получения изогнутых профилированных заготовок различной конфигурации продольным изгибом при различном распределении температур по длине.

3. Путем обработки экспериментальных данных определить рациональную форму градиентной кривой и аналитическое описание закономерности требуемого распределения температур по длине заготовки для интенсификации безручьевого профилирующей операции.

#### Исследование

**Определение вариантов градиентного нагрева.** Введём понятие нагрева предназначенной для профилирования части заготовки, которое универсально отображает возможные варианты нахождения в индукторе как определенной части длины заготовки, так и всей заготовки целиком. При этом расстояние предназначенной для профилирования части заготовки (рис. 2) по левую ( $L_{01}$ ) и по правую ( $L_{02}$ ) сторону от поперечного сечения по будущей стреле прогиба (находится на оси  $Ox$ , см. рис. 2) может быть различной. Длина приторцовых зон по левую сторону ( $L_1$ ) и по правую сторону ( $L_2$ ) также может быть неодинаковой, что зависит от размеров отступков поковки, которые необходимо сформировать. Это позволяет получать профилированные заготовки несимметричной относительно стрелы прогиба конфигурации, что дополнительно расширяет технологические возможности способа. Закономерности распределения температур  $t$  по левую и по правую сторону от планируемой стрелы прогиба заготовки 2 могут различаться и достигаются расположением колец 1 индуктора (рис. 2 б). Температурное поле (рис. 2 а) по длине нагреваемой части заготовки обеспечивает необходимое для выполнения формоизменяющей операции распределение механических свойств [4]. Получение разнообразных форм профилированной заготовки становится возможным благодаря восемнадцати

основным вариантам нагрева (см. рис. 2). Варьирование градиентом температур, а так же способы равномерного и неравномерного нагрева с подстуживанием участков заготовки, дополнительно увеличивают количество вариантов конфигураций профилированных заготовок.



- |                                      |                                       |  |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 1) $L_{01} = L_{02}, l_1 = l_2 = 0;$ | 7) $L_{01} > L_{02}, l_1 > l_2;$      | 13) $L_{01} = L_{02}, l_1 = 0, l_2 > 0;$ |
| 2) $L_{01} = L_{02}, l_1 = l_2 > 0;$ | 8) $L_{01} > L_{02}, l_1 < l_2;$      | 14) $L_{01} = L_{02}, l_2 = 0, l_1 > 0;$ |
| 3) $L_{01} = L_{02}, l_1 > l_2;$     | 9) $L_{01} < L_{02}, l_1 = l_2 = 0;$  | 15) $L_{01} > L_{02}, l_1 = 0, l_2 > 0;$ |
| 4) $L_{01} = L_{02}, l_1 < l_2;$     | 10) $L_{01} < L_{02}, l_1 = l_2 > 0;$ | 16) $L_{01} > L_{02}, l_2 = 0, l_1 > 0;$ |
| 5) $L_{01} > L_{02}, l_1 = l_2 = 0;$ | 11) $L_{01} < L_{02}, l_1 > l_2;$     | 17) $L_{01} < L_{02}, l_1 = 0, l_2 > 0;$ |
| 6) $L_{01} > L_{02}, l_1 = l_2 > 0;$ | 12) $L_{01} < L_{02}, l_1 < l_2;$     | 18) $L_{01} < L_{02}, l_2 = 0, l_1 > 0.$ |

Рис. 2. Общий вид поля температур (а) и расположение заготовки в индукторе (б): 1 – кольца индуктора; 2 – заготовка; 3 – кольца индуктора при наличии зон нагрева  $l_1$  и  $l_2$

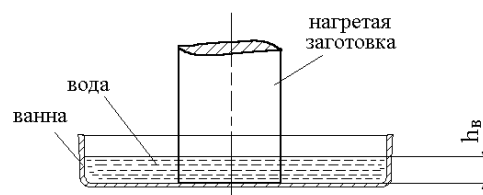


Рис. 3. Подстуживание торца заготовки

До максимального значения температуры  $t_{max}$ , приближенного к верхней границе интервала ковочных температур  $t_{max(к.м)}$ , нагревают поперечное сечение по стреле прогиба для достижения здесь наибольшего утолщения. Температура  $t'_{min}$  приторцовых зон определяется видом следующей после профилирования операции. При профилировании и штамповке с одного нагрева за  $t'_{min}$  следует брать температуру, большую, чем нижняя граница интервала ковочных температур ( $t_{min(к.м)}$ ) для обеспечения дальнейшего беспрепятственного деформирования. То есть необходимо брать ту минимальную технологически допустимую температуру, которую, с учетом рекомендаций [9], корректируют в соответствии с конкретными условиями производства, временем протекания процесса, количеством переходов, требованиями к металлу заготовки и т. д., что требует разработки методики её расчета, а так же не исключает определение  $t'_{min}$  опытным путем.

При технологии с повторным нагревом полуфабриката под штамповку (в случае, когда экономический эффект от снижения расхода металла превышает затраты на повторный нагрев), температура приторцовых зон может колебаться от значения, которое отвечает температуре окружающей среды  $t_{o.c}$  ( $l_1$  и  $l_2$  не греют), до минимальной технологически допустимой температуры. Это позволяет варьировать процессами набора утолщения (подкатки) и формообразования профилированной конфигурации заготовки. При отсутствии зон  $l_1$  и  $l_2$ , или если приторцовые зоны не нагревают, кольца 3 индуктора (рис. 2 б) отсутствуют.

Для оценки получения профилированных заготовок различной конфигурации были проведены эксперименты по осадке нагретых стальных (Ст. 3сп) заготовок  $\varnothing 18 \times 72$  мм ( $m_0 = 4,0$ ) и  $\varnothing 18 \times 90$  мм ( $m_0 = 5,0$ ) до условных степеней деформации  $\varepsilon_y = 30\%$  и  $\varepsilon_y = 44\%$  соответственно. Здесь  $\varepsilon_y = \left[ \frac{H_0 - H_k}{H_0} \right] \cdot 100\%$ , где  $H_k$  – конечная высота изогнутой профилированной заготовки, т.е. конечное расстояние между плоскостями осадочных плит (см. рис. 1). Осадку производили на кривошипном прессе К116Г (номинальная сила 0,63 МН), температура печного пространства при нагреве составляла 1160 °С. Температуру верхней и нижней плоских осадочных плит, оснащенных электронагревателем, доводили до 250 °С. Условия неравномерного прогрева по длине заготовок перед осадкой обеспечивали подстуживанием торца в водяной ванне путем его окунания на глубину  $h_g$  (см. рис. 3) с выдержкой в таком положении некоторого времени  $\tau_{охл.т}$ .

Фотографии экспериментальных заготовок, осажённых с продольным изгибом в условиях созданного из-за подстуживания неоднородного по длине температурного поля, приведены на рис. 4 и рис. 5. Как видно из рис. 4, незначительное подстуживание торца мало влияет на смещение стрелы прогиба от середины высоты заготовки при малых значениях  $m_0$  и  $\varepsilon_y$ . Более резкая неравномерность прогрева по высоте с увеличением  $m_0$  приводит к росту смещения стрелы прогиба от величины  $H_k / 2$  в сторону неподстуженного торца (см. рис. 5). В связи с локализацией деформации на более коротком участке, в сравнении с продольным изгибом при тех же отношениях  $m_0$  без подстуживания, наблюдается увеличение набора металла: прирост размеров поперечного сечения составил 38...45 %. Однако, для повышения эффективности способа и разработки рекомендаций по применению приёмов градиентного нагрева, закономерность распределения температур по длине предназначенной для профилирования части заготовки необходимо обосновать математически.

**Определение рациональной формы градиентной кривой распределения температур.** Согласно высказанной гипотезе, логично поддержать естественную неравномерность распределения деформаций утолщения при продольном изгибе путем ослабления прочностных свойств материала пропорционально необходимой величине набора металла по длине предназначенной для профилирования части заготовки. Таким образом, закономерность распределения температур должна соответствовать закономерности рассредоточения деформаций утолщения по длине профилированной части заготовки.

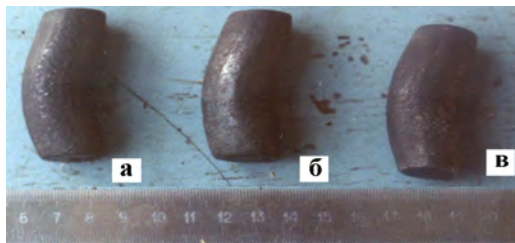


Рис. 4. Стальные заготовки  $D_0 = 18$  мм с  $m_0 = 4,0$ , осаженные до  $\varepsilon_y = 30$  % при  $h_e = 0$  мм,  $\tau_{охл.т} = 0$  с (а);  $h_e = 8$  мм,  $\tau_{охл.т} = 3$  с (в);  $h_e = 8$  мм,  $\tau_{охл.т} = 5$  с (в)

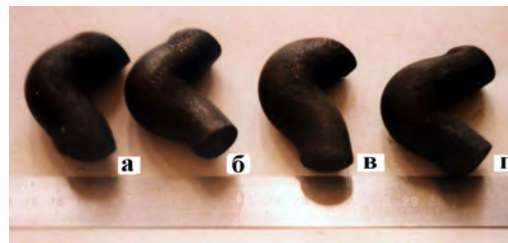


Рис. 5. Стальные заготовки  $D_0 = 18$  мм с  $m_0 = 5,0$ , осаженные до  $\varepsilon_y = 44$  % при  $h_e = 8$  мм,  $\tau_{охл.т} = 10$  с (а);  $h_e = 10$  мм,  $\tau_{охл.т} = 25$  с (б);  $h_e = 12$  мм,  $\tau_{охл.т} = 18$  с (в);  $h_e = 0$  мм,  $\tau_{охл.т} = 0$  с (г)

Для нахождения искомой закономерности использовали выборочные результаты замеров распределения утолщений по длине, полученные для конфигураций заготовок, удовлетворяющим требованиям формоизменения полуфабриката ( $m_0 = 4,0; 5,0; 6,0$  и  $\varepsilon_y = 27$  %; 40 %; 53 %). Общий вид графика распределения утолщений (площади поперечного сечения  $f$ ) по длине оси  $Ox$  развертки профилированной заготовки приведен на рис. 6. Площадь поперечного сечения  $f$  (рис. 6) имеет максимальное значение  $f_{max}$  по биссектрисе угла изгиба  $\varphi_4$  (сечение А-А, см. рис. 1), проходящей через стрелу прогиба заготовки. С удалением от сечения А-А величина  $f$  уменьшается до некоторого минимального значения  $f_{min}$ , которое фиксировали в сечении Г-Г (см. рис. 1). Далее, с приближением к торцам профилированной заготовки, наблюдается увеличение площади поперечного сечения (рис. 6), из-за наличия утолщения в приторцовых зонах.

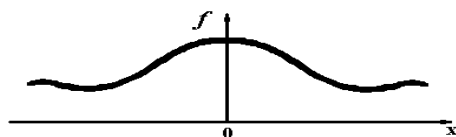


Рис. 6. Общий вид графика распределения деформаций утолщения по длине профилированной заготовки

Как указано выше, для определения формы поля температур за основу взята неравномерность распределения деформаций утолщения по длине профилированной заготовки, фиксируемая после гибки-профилирования, выполненной при равномерном прогреве. Однако нагрев до повышенных температур в областях приторцовых зон не рационален, из-за отсутствия потребности

получать здесь существенные утолщения, а с точки зрения возрастания в операции составляющей доли осадки желательно затормозить момент начала потери устойчивости (увеличить сжимающие деформации) и сконцентрировать набор утолщения по стреле прогиба заготовки. Для этого нагрев следует осуществлять таким образом, чтобы наименее нагретыми частями заготовки были её приторцовые зоны.

Координатные оси цилиндрической заготовки до деформации (см. рис. 6) объединяли с осями развертки заготовки после профилирования (см. рис. 1). Расстояние  $x$  – текущая координата, откладываемая от начала координат (0) вдоль изогнутой оси заготовки в направлении торцов до произвольного поперечного сечения. Функцию распределения деформаций утолщения отыскивали, руководствуясь граничными условиями для закономерности, заданной в общем виде кривой рис. 6, и результатами измерений, при условии, что утолщениями приторцовых зон пренебрегаем, ввиду рациональности их уменьшения (благодаря меньшей температуре приторцовых участков) для формообразования большего утолщения по стреле прогиба заготовки.

Граничные условия в абсолютных значениях:

$$\left. \begin{aligned} x = 0, & \quad y = t_{max}; \\ x = (L_0 / 2), & \quad y = t'_{min}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Взаимное соответствие функций в относительных координатах запишем выражением:

$$y = y\left(\frac{x}{L_0/2}; m_0; \varepsilon_y\right) = \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} = \frac{t - t'_{min}}{t_{max} - t'_{min}}, \quad (2)$$

где  $t$  – значение температуры в произвольном поперечном сечении заготовки, расположенном на расстоянии  $x$  от планируемой стрелы прогиба.

Тогда преобразованные граничные условия в относительных координатах:

$$\left. \begin{aligned} (x/L_0) = 0, & \quad y = 1; \\ (x/L_0) = 0,5, & \quad y = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

За основу искомого закона принята функция верзиеры (локона) Аньези [10, 11], вид которой качественно совпадает с контуром участка набора утолщения по длине развертки профилированной заготовки и аналитически записывается как

$$y = a^3 / (a^2 + x^2), \quad (4)$$

где  $a > 0$  – коэффициент, характеризующий кривизну графика функции.

Используя условия (3), представим (4) в виде вырожденного выражения:

$$y = \frac{1}{1 + 4(x/L_0)^2} \quad \text{или} \quad y = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + 4(x/L_0)^2}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – искомый параметр формы кривой.

Учитывая, что для функции (5) ось абсцисс  $x/L_0$  является асимптотой, то её следует привести в соответствие с граничными условиями (3). После преобразований, используя принятые допущения о минимизации утолщений на торцах заготовки, нетрудно получить:

$$y = y\left(\frac{x}{L_0/2}; m_0; \varepsilon_y\right) = \frac{f - f_0}{f_{\max} - f_0} = \frac{\alpha^2 [1 - 4(x/L_0)^2]}{\alpha^2 + 4(x/L_0)^2}, \quad (6)$$

где  $f_0$  – начальная площадь поперечного сечения цилиндрической заготовки,  $x/(L_0/2) = z/(L_k/2)$  – объединение продольных осей цилиндрической заготовки и развертки профилированной заготовки по одну сторону от стрелы прогиба.

Для определения  $\alpha$  строили график функции (2) по экспериментальным данным с учетом допущений и граничных условий в относительных координатах (рис. 7), при этом, во внимание принимали пять базовых точек:  $x/(L_0/2) = 0$ ;  $x/(L_0/2) = 0,125$ ;  $x/(L_0/2) = 0,25$ ;  $x/(L_0/2) = 0,375$ ;  $x/(L_0/2) = 0,5$ .

Согласно стратегии метода наименьших квадратов [12] запишем:

$$\Phi(\alpha) = \sum \left( \hat{y} - y \right)^2 = \sum \left\{ \frac{\alpha^2 \left[ 1 - 4 \left( \frac{x}{L_0} \right)^2 \right]}{4 \left( \frac{x}{L_0} \right)^2 + \alpha^2} - y \right\}^2. \quad (7)$$

После подведения правой части выражения (7) под общий знаменатель и проведения простых преобразований, имеем:

$$\Phi(\alpha) = \sum \frac{[\alpha^2(1-y) - 4x_L^2(\alpha^2+y)]^2}{(4x_L^2 + \alpha^2)^2}, \quad (8)$$

где  $x_L = x/L_0$  – относительная координата.

Возьмём частную производную по параметру  $\alpha$  от функции (8) и приравняем её к нулю. После элементарных преобразований получим:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} = \sum \frac{4\alpha \cdot [(4x_L^2 + \alpha^2)(1-y - 4x_L^2) - \alpha^2(1-y) + 4x_L^2(\alpha^2+y)] \cdot [\alpha^2(1-y) - 4x_L^2(\alpha^2+y)]}{(4x_L^2 + \alpha^2)^3} = 0. \quad (9)$$

Анализируя выражение (9), можно заключить следующее:

- знаменатель:  $(4x_L^2 + \alpha^2)^3 \neq 0$ , иначе  $\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} \rightarrow \infty$ , т.е. решения нет,

- числитель:

1)  $\sum 4\alpha \neq 0$ , т.е. решения нет;

2)  $\sum [(4x_L^2 + \alpha^2)(1-y - 4x_L^2) - \alpha^2(1-y) + 4x_L^2(\alpha^2+y)] = 0$ .

После раскрытия скобок, преобразований и сокращений имеем:

$4x_L^2(1 - 4x_L^2) = 0$ , откуда:  $x_{L,0} = 0$ ;  $x_{L,1} = 0,5$ ,  $x_{L,2} = -0,5$ .

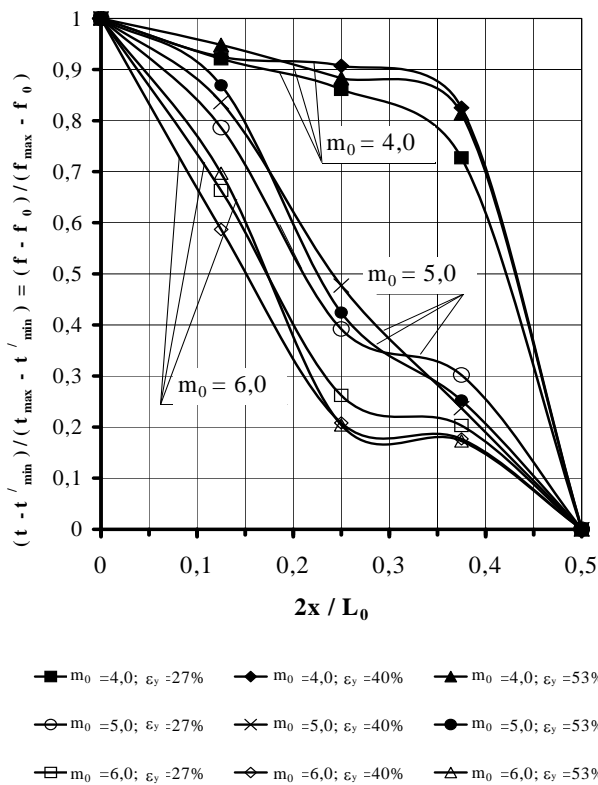


Рис. 7. График распределения температур в соответствии с распределением деформаций

То есть второй множитель числителя так же не имеет решения относительно  $\alpha$ .

$$3) \sum [\alpha^2(1-y) - 4x_{L,i}^2(\alpha^2 + y)] = 0,$$

После раскрытия скобок и преобразований получим окончательное решение для  $N$  опытных замеров:

$$\alpha^2 = \frac{\sum 4x_{L,i}^2 y_i}{\sum (1 - y_i - 4x_{L,i}^2)}, \quad \text{или} \quad \alpha = 2\sqrt{\frac{\sum x_{L,i}^2 y_i}{\sum (1 - y_i - 4x_{L,i}^2)}}, \quad (10)$$

где  $i = 1 \dots N$  – номер замера;  $x_{L,i}$  и  $y_i$  – значения аргумента и функции для условий  $i$ -го замера.

Данные замеров, приведенные на рис. 7, после усреднения для каждого значения  $m_0$ , подставляли в формулу (10). Полученные значения коэффициентов формы  $\alpha$  приведены на рис. 8. Аналитическую зависимость  $\alpha = \alpha(m_0)$  находили интерполированием линиями тренда в MS Office пакете Excel в виде степенной функции (см. рис. 8) с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9559$ .

С достаточной для практических расчетов точностью можно записать:

$$\alpha = 2163 \cdot m_0^{-4,83}. \quad (11)$$

Тогда, из уравнений (2), (6) и (11), значение температуры  $t$  в любом произвольном поперечном сечении предназначенной для профилирования части заготовки определяется как:

$$t = t'_{\min} + (t'_{\max} - t'_{\min}) \frac{\alpha^2 [1 - 4(x/L_0)^2]}{4(x/L_0)^2 + \alpha^2}, \quad \alpha = 2163(L_0/D_0)^{-4,83}, \quad (12)$$

где  $L_0$  – удвоенное расстояние от сечения по намеченной стреле прогиба до торца заготовки ( $L_0 = 2 \cdot L_{01}$  – для левой,  $L_0 = 2 \cdot L_{02}$  – для правой части заготовки по рис. 2 и рис. 9 а).

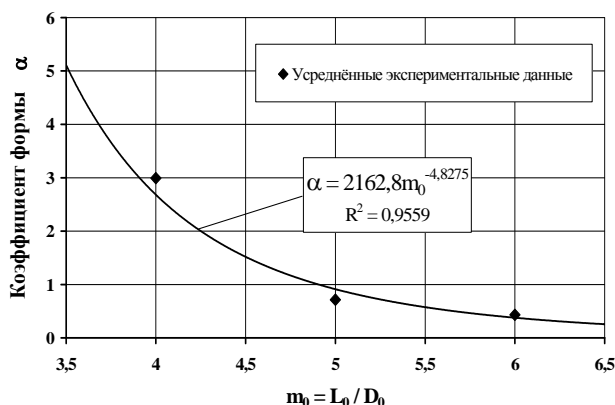


Рис. 8. Зависимость коэффициента формы  $\alpha$  от относительной высоты заготовки

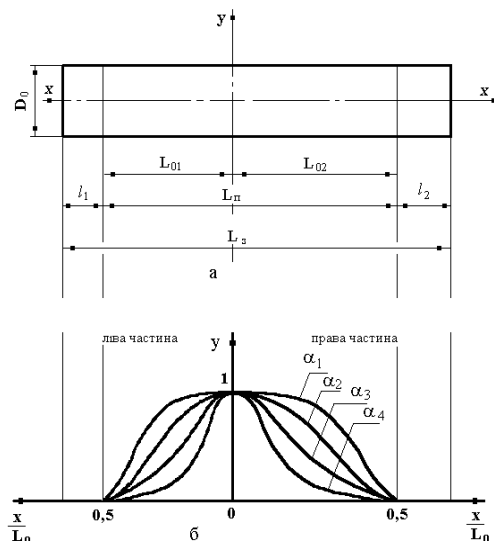


Рис. 9. Нагретая заготовка до профилирования (а) и возможные поля температур в относительных координатах (б):  $L_n = L_{01} + L_{02}$  – общая длина предназначенной для профилирования части заготовки;  $L_3$  – длина цилиндрической заготовки;  $y = (t - t'_{\min}) / (t'_{\max} - t'_{\min})$  – функция распределения температур

Данная закономерность представлена на рис. 9 б, где  $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4$ . Температурные поля такого вида придают заготовке методами высокоскоростного градиентного нагрева в специальных индукционных нагревателях [4–7]. Однако следует учитывать, что при переносе нагретой заготовки от индуктора к штампу требуется некоторое время, из-за чего температурный градиент уменьшится.

## Выводы

1. Выполнен анализ основных способов управления формоизменением в процессах обработки металлов давлением, в результате которого установлено, что управление формоизменяющими операциями и их интенсификация могут обеспечиваться свойствами инструмента, свойствами заготовки и условиями на контакте. Обосновано, что при безручьевых способах профилирования заготовок, когда реализуется свободное

течение металла без его ограничения стенками инструмента, наиболее перспективным способом интенсификации формоизменения перед горячей объемной штамповкой является регулирование пластических свойств металла дифференцированным или неравномерным нагревом заготовки по длине.

2. Обосновано, что для повышения эффективности формоизменения при безручьевой гибке-формовке продольным изгибом целесообразно достижение эвидистантности градиентной кривой распределения температур и кривой, характеризующей распределение утолщений (набора металла) по длине заготовки.

3. Выполнен анализ возможностей неравномерного и дифференцированного нагрева, обосновано его использование для существенного расширения области применения процессов обработки металлов давлением, возможностей формообразования и достижения энергоресурсосберегающего эффекта. Предложено 18 основных вариантов нагрева для получения различных конфигураций полуфабрикатов, при этом введено понятие предназначенной для профилирования части (участка) заготовки. Экспериментально подтверждено, что безручьевое профилирование заготовок продольным изгибом при обеспечении требуемых условий неравномерного распределения температур по длине позволяет увеличить полезный набор металла в месте изгиба не менее чем на 18 %. Кроме того, становится возможным профилирование части заготовки и повышается эффективность гибки-профилирования заготовок с отношением  $m_0 > 5,5$ .

4. Установлен вид функции распределения температур по длине заготовки перед профилированием продольным изгибом, при этом учтена рациональность меньшего прогрева концевых участков. Показано, что для данной операции безручьевого профилирования форма градиентной кривой распределения температур соответствует квадратичной функции в виде вырожденной верзиеры (локона) Аньези. Установлено, что форма температурного поля не зависит от величины условной степени деформации  $\varepsilon_y$ , а зависит только от относительной высоты (длины)  $m_0$  предназначенной для профилирования части заготовки. Обоснована необходимость применения высокоскоростного индукционного нагрева для обеспечения требуемого распределения температур по длине перед профилированием заготовок.

#### Анотація

Виконаний аналіз основних способів диференційованого нагрівання у процесах обробки металів тиском. Обґрунтовано, що безруччєві способи попереднього профілювання заготовок попереду гарячого об'ємного штампування для прогнозування формозміни раціонально комбінувати з їх градієнтним нагріванням, яке змінює пластичні властивості заготовки диференційовано по довжині. Вказана гіпотеза, що найбільш ефективно управління формозміною при градієнтному нагріванні реалізується у випадку, коли розподіл температур по довжині заготовки, що профілюють, відповідає розподілу деформацій. Запропоновано 18 основних варіантів нагрівання для отримання різних конфігурацій напівфабрикатів. Експериментально підтверджено, що безруччєве профілювання заготовок позовдовжнім згинанням з нерівномірним нагріванням по довжині дозволяє збільшити локальні лінійні розміри перерізу на 38...45 %. Крім того, стає можливим профілювання частини заготовки і підвищується ефективність гнуття-профілювання заготовок з відношенням довжини нагрітої частини до діаметру більш ніж 5,5. Відповідно до вказаної гіпотези, експериментально отримана форма градієнтної кривої розподілу температур для інтенсифікації процесу профілювання позовдовжнім згинанням заготовки, шляхом замірів розподілу стовпців по довжині зігнутої вісі заготовки. Експериментальні дані оброблені методом найменших квадратів і виявлено функціональну залежність розподілу температур у вигляді квадратичної функції (верзиєри Ан'єзі). Встановлено, що форма градієнтної кривої розподілу температур не залежить від величини умовного ступеню деформації, а залежить лише від відношення висоти (довжини) до діаметру призначеної для профілювання частини заготовки.

**Ключові слова:** профілювання, диференційоване нагрівання, позовдовжнє згинання, градієнтна крива розподілу температур

#### Abstract

**Purpose.** The purpose of this paper is to provide background information for the design of special induction heaters for technology of uneven differential heating of billets for controlled impression-free bending-profiling.

**Design/methodology/approach.** The analysis of the main methods of differential heating of metal-forming processes was made. It is proved that impression-free methods of pre-profiling of billets before hot die-forging for projected forming is rationally to combine with their gradient heating that changes the plastic properties of the billet differentially by length. It is hypothesized that the most efficient control of forming at the gradient heating realized when the temperature distribution along the length of the profiled workpiece is corresponds to the distribution of deformation. The 18 main heating options for the obtaining the various semi-finished parts configurations are proposed. Furthermore, it becomes a possible the profiling of the workpiece's sector and increase of the efficiency of the bending-profiling of billets with a ratio of length to diameter more than 5.5. The experimental data were processed by the method of least squares and the functional dependence of the temperature distribution in the form of a quadratic function (like verziere Agnesi) is found.

**Findings.** Experimentally confirmed, that the impression-free profiling of billets by buckling with uneven heating along the length can increase the local linear dimensions of cross-section on 38...45%. According to expressed hypothesis, the shape of the gradient curve of temperature distribution for the intensification of the process of billet profiling by buckling is experimentally obtained by measuring the distribution of bulges along the length of the curved axis of the workpiece. It is determined that the shape of the gradient curve of temperature distribution is independent of the conventional degree of deformation and depends only on the ratio of the height (length) to the diameter intended for the profiling of billet sector.

*Originality/value.* The results are the basis for the design of induction heaters uneven heat for profiling billets by buckling. New methods of profiling are designed to expand the range of forged products.

*Keywords:* profiling, differential heating, buckling, gradient curve of temperature distribution

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. Кухарь В. В. Сравнительный анализ энергетической эффективности способов безручьевого профилирования заготовок / В. В. Кухарь // Пластическая деформация металлов = Plastic Deformation of Metal / под общ. ред. проф. А. Н. Головки. – Днепропетровск, 2014. – С. 316–324.
2. Пат. 43614А Україна, МПК В 21 К 1/08. Спосіб одержання профільованої заготовки / Кухар В. В., Діамантопуло К. К., Мазан В. І. – № 2001042391; заявл. 10.04.01; опубл. 17.12.01, Бюл. № 11. – 14 с.
3. Кухар В. В. Нерівномірність деформації при одержанні профільованої заготовки осаджуванням із утратою стійкості / В. В. Кухар, К. К. Діамантопуло // Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький, 2002. – № 1 (37). – С. 109–114.
4. Ершов В. И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершов, В. И. Глазков, М. Ф. Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.
5. Dimitrov Borislav An approach for designing a complex inductor-workpiece system for induction heating / Borislav Dimitrov, Maik Streblau, Angel Marinov // TEM Journal. – 2014. – Vol. 3, N. 3. – P. 244–249.
6. Безручко И. И. Индукционный нагрев для объёмной штамповки / И. И. Безручко – Л.: Машиностроение, 1987. – 126 с.
7. Lepeshkin A. R. Modelling of heating modes of rotating disk using induction heating / A. R. Lepeshkin, A. B. Kuvaldin, C. A. Lepeshkin // HEFAT2014. – 10th International conference on heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. – 14–26 July 2014. – Orlando. –P. 1375–1378.
8. Shokouhmand H. Thermal analysis of moving induction heating of hollow cylinder with subsequent spray cooling: Effect of velocity, initial position of coil and geometry / H. Shokouhmand, S. Ghaffari // Applied Mathematical Modelling. – 2012. – N. 36 (9). – P. 4304–4323.
9. Ковка и штамповка: справочник: в 4-х т. Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / под ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1985. – 569с.
10. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М.: Наука, 1975. – 871 с.
11. Вирченко Н. А. Графики функций: Справочник / Н. А. Вирченко, И. И. Ляшко, К. И. Швецов. – К.: Наукова думка, 1981. – 320 с.
12. Чиченев Н. А. Методы исследования процессов обработки металлов давлением (экспериментальная механика) / Н. А. Чиченев, А. Б. Кудрин, П. И. Полухин. – М.: Металлургия, 1977. – 312 с.

#### References

1. Kukhar, V.V. (2014), *Sravnitel'nyj analiz jenergeticheskoy jeffektivnosti sposobov bezruch'evogo profilirovaniya zagotovok* [Comparative analysis of power efficiency of methods of the impression-free profiling of billets]. In A.N. Golovko (ed.), *Plasticheskaja deformacija metallov = Plastic Deformation of Metal*. pp. 316–324, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Kukhar, V.V., Diamantopulo, K.K. and Mazan, V.I. (2001), *Sposib oderzhannja profil'ovanoj zagotovki* [Method of obtaining profiled workpiece]. Patent Ukrainy no 43614 A.
3. Kukhar V.V. and Diamantopulo K.K. (2002), *Nerivnomirnist deformatsii pry oderzhanni profil'ovanoj zagotovki osadzhuvanjam iz utratoyu stijkosti* [Irregularity of deformation at obtaining of profiled workpiece by buckling]. *Visnyk technologicznego universytetu Podillia* [Announcer of technological university of Podillja], no. 1 (37), pp. 109–114.
4. Ershov V.I. Glazkov, V.I. and Kashirin M.F. (1990), *Sovershenstvovanie formoizmenjajushhih operacij listovoj shtampovki* [Improvement of sheet forming operations]. *Mashinostroenie*, Moscow, Russian.
5. Dimitrov, B., Streblau, M. and Marinov, A. (2014), *An approach for designing a complex inductor-workpiece system for induction heating*. *TEM Journal*, vol. 3. no.3. pp.244–249.
6. Bezruchko, I.I. (1987), *Indukcionnyj nagrev dlja ob'jomnoj shtampovki* [Induction heating for die-forging], *Mashinostroenie*, Leningrad, Russian.
7. Lepeshkin, A.R., Kuvaldin, A.B. and Lepeshkin, C.A. (2014), *Modelling of heating modes of rotating disk using induction heating*. *HEFAT2014. 10th International conference on heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics*. 14-26 July, pp. 1375–1378. Orlando
8. Shokouhmand, H. and Ghaffari, S. (2012), *Thermal analysis of moving induction heating of hollow cylinder with subsequent spray cooling*, Effect of velocity, initial position of coil and geometry. *Applied Mathematical Modelling*. no. 36 (9), pp. 4304–4323.
9. Semenov, E.I. (ed.), (1985), *Kovka i shtampovka, spravochnik* [Forging and stamping, reference book], Vol. 1-4, *Mashinostroenie*, Moscow, Russian.
10. Vygodskij, M.Ja (1975), *Spravochnik po vysshej matematike* [Reference book for higher mathematics], *Nauka*, Moscow, Russian.
11. Virchenko, N.A., Ljashko, I.I. and Shvecov, K.I. (1981), *Grafiki funkcij, Spravochnik* [Graphs of functions: handbook], *Naukova dumka*, Kyiv, Ukraine.
12. Chichenev, N.A., Kudrin, A.B. and Poluhin, P.I. (1977), *Metody issledovanija processov obrabotki metallov davleniem (jeksperimental'naja mehanika)* [Research methods for metal-forming processes (experimental mechanics)], *Metallurgija* Moscow, Russian.

Подана до редакції 12.04.2016