

## ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ ПОКОВОК

Рябичева Л.А., Усатюк Д.А. (ВНУ им. В. Даля, г. Луганск)

*В работе предложена аналитическая зависимость, связывающая геометрическую точность поковки с неравномерностью напряженно-деформированного состояния. Оценкой пластического равновесия методом функций Ляпунова доказано отсутствие условий заклинивания поковки в ручье и образования дефектов. Разработаны рекомендации по конструированию и внедрению поковок повышенной точности на производстве.*

Перспективным направлением совершенствования технологических процессов горячей штамповки является повышение геометрической точности поковок. Авторами работ [1-3] исследовано влияние неравномерности напряженно-деформированного состояния (НДС) на точность и качество поковок при штамповке на КГШП. В то же время существует большой парк штамповочных молотов, для которых аналогичные исследования практически отсутствуют.

Целью работы является поиск аналитической зависимости, связывающей геометрическую точность поковок с неравномерностью НДС.

Штамповка на молоте происходит при высоких температурах и скоростях деформирования с ударным характером нагружения, поэтому при теоретическом исследовании операции горячей штамповки представлены в виде нестационарного нелинейного неизотермического процесса деформирования, для которого методом конечных элементов (МКЭ) решается нестационарная нелинейная связанная задача термопластичности [4, 5].

В процессе конечно-элементного анализа выполняется минимизация функционала формоизменения [1, 4]:

$$J = \iiint_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV - \iint_{S_k} F_k v_i^k dS_k, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  - интенсивность напряжений;  
 $\dot{\epsilon}_i$  - интенсивность скоростей деформаций;  
 $S_k$  - площадь поверхностей контакта «заготовка-инструмент»;  
 $F_k$  - сила трения на поверхности контакта «заготовка-инструмент»;  
 $V$  - объем заготовки;

$v_i^k$  - скорость скольжения металла по поверхности ручья штампа.  
И функционала, характеризующего процессы теплопереноса [1, 4]:

$$Q = \iiint_V k(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dV + \iint_V 0,9\sigma_i \dot{\epsilon}_i dV + \iint_F 0,9\sigma_i^k v_i^k dF + \iint_F \gamma C_0 F_i (T_{II}^4 - T_{III}^4) dF, \quad (2)$$

где  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  (Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) - постоянная Стефана-Больцмана;

$\gamma$  - приведенная степень черноты;

$k_T$  - коэффициент теплопроводности;

$T_{II}$ ,  $T_{III}$  - температура поковки и штампа, соответственно, К.

При построении функции геометрической точности введено допущение, что зависимости, описывающие состояние металла поковки в «жестких» зонах, являются функциями интенсивности напряжений от соотношений размеров поковки  $\Phi^q$  и величин штамповочных уклонов  $\Phi^h$  и радиусов закруглений  $\Phi^{rad}$  [5]:

$$\Phi^q = \sigma_i^q \left( \begin{matrix} \xi_1^q \\ \xi_2^q \end{matrix} \right), \quad \Phi^h = \sigma_i^h (\alpha^h), \quad \Phi^{rad} = \sigma_i^{rad} (r), \quad (3)$$

где  $q$ ,  $h$  - порядковые номера «жестких» зон и поверхностей поковки;

$\sigma_i^q$  - интенсивность напряжений в «жесткой» зоне  $q$ ;

$\xi_1^q$ ,  $\xi_2^q$  - размеры первой и второй поверхностей, примыкающих к зоне  $q$ ;

$\sigma_i^h$  - зависимость наибольшей интенсивности напряжений на образующей поверхности  $h$  от величины штамповочного уклона  $\alpha^h$ ;

$r$ ,  $rad$  - величина и порядковый номер радиуса закругления;

$\sigma_i^{rad}$  - интенсивности напряжений в местах радиусов закругления.

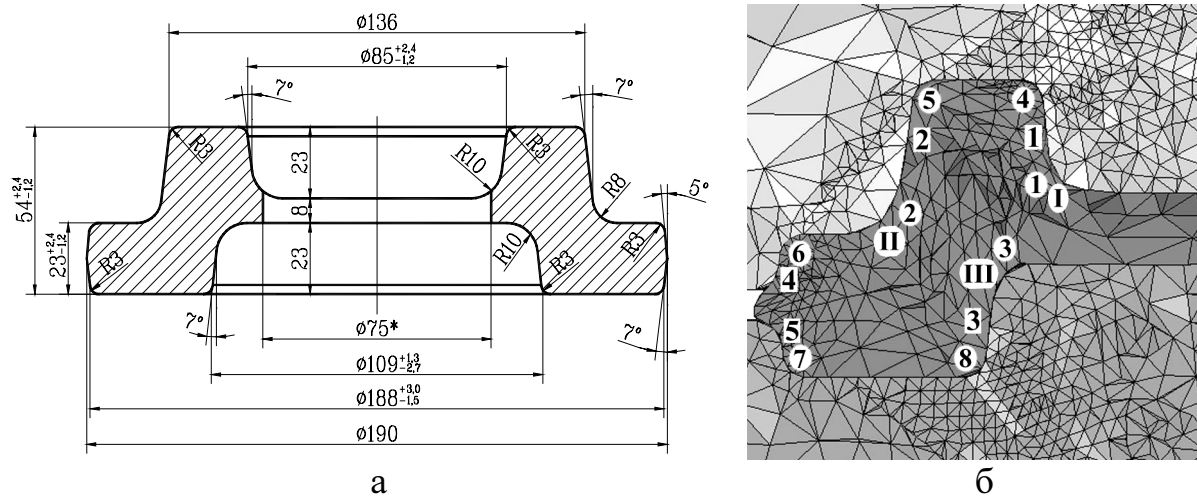
Суммируя функции (3), получим функцию геометрической точности поковки [5]:

$$\Phi = \sum_{q=1}^R \Phi^q + \sum_{h=1}^A \Phi^h + \sum_{rad=1}^C \Phi^{rad}, \quad (4)$$

где  $R$ ,  $A$ ,  $C$  - число «жестких» зон, штамповочных уклонов и радиусов.

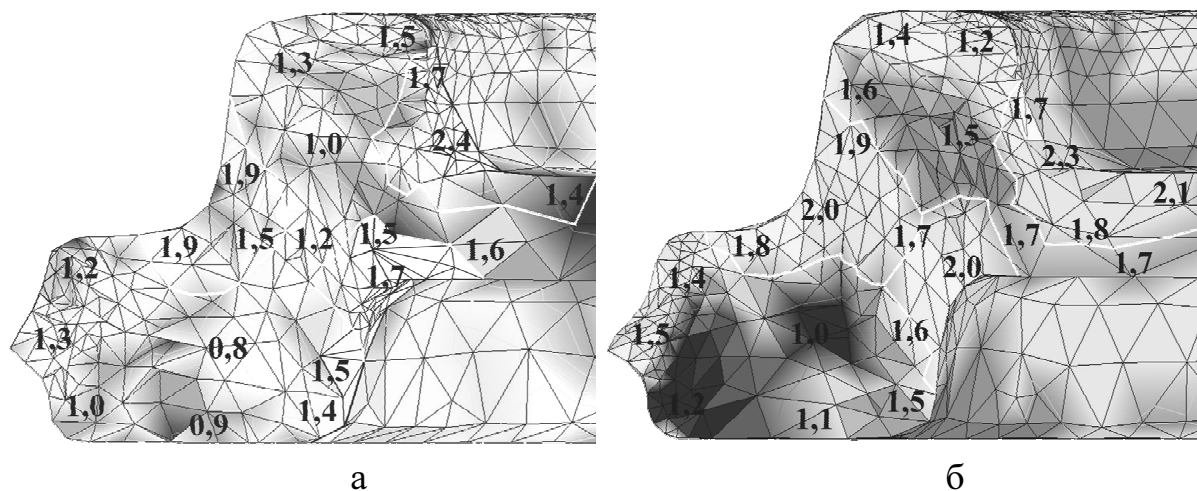
Функция (4) связывает геометрическую точность поковки с неравномерностью напряженно-деформированного состояния, позволяя выбрать сочетание штамповочных уклонов и радиусов закруглений, обеспечивающее наиболее оптимальное распределение напряжений и деформаций на поверхностях и внутри поковки.

Повышение точности рассмотрено на примере штамповки на молоте поковки «обойма» второй степени сложности (рис. 1 а). Конструктивным элементам поковки присвоены номера (рис. 1 б) для анализа геометрической точности на ЭВМ с использованием МКЭ и функции (4).



**Рисунок 1** – Поковка обойма: а – чертеж поковки; б – расчетная схема: I, II, III – «жесткие» зоны; **1** - **5** - номера штамповочных уклонов; **1** - **8** - номера радиусов закруглений

Конфигурация очага деформации поковки при минимальном значении функции (4) показана на рис. 2.



**Рисунок 2** – Конфигурация очага деформации при штамповке поковки обойма: а – базовая поковка; б – поковка повышенной точности

При штамповке поковки повышенной точности деформированное состояние металла, по сравнению с базовой поковкой, заметно изменилось.

В зонах II и III интенсивность деформаций  $\epsilon$  увеличилась до 2,0. Размеры «жестких» зон также увеличились примерно в 1,5 раза, в результате чего зоны II и III соединились, а зона I почти соприкоснулась с ними. При этом в зоне I величина  $\epsilon$  почти не изменилась, а в окрестностях закругления 1 даже уменьшилась на 0,1. В очаге деформации между жесткими зонами  $\epsilon$  увеличилась по сравнению с базовой поковкой с 0,9-1,2 до 1,5-1,7. В углах поковки  $\epsilon$  изменилась незначительно, а на поверхности закругления 4 даже уменьшилась с 1,5 до 1,2. В перемычке деформированное состояние также изменилось, так как  $\epsilon$  возросла с 1,4-1,6 до 1,7-2,1. В то же время неравномерность деформаций уменьшилась, а разница между  $\epsilon$  в очаге деформации и  $\epsilon$  в «жестких» зонах не превышает 0,4, тогда как в базовой поковке эти величины отличались на 0,6-0,8. Следует отметить, что на поверхностях поковки неравномерность деформированного состояния заметно уменьшилась. Так в местах закруглений 1, 2 и 3  $\epsilon$  составила 2,3, 2,0 и 2,0, разности между  $\epsilon$  на границах зон деформации не превысили 0,3, тогда как в базовой поковке  $\epsilon$  составляла 2,4, 1,9 и 1,7, а разности  $\epsilon$  достигали 0,7.

Исследовав конфигурацию очага деформации для нескольких наборов штамповочных уклонов и радиусов закруглений, находим минимум функции геометрической точности (4) и выбираем соответствующие штамповочные уклоны и радиусы (табл. 1).

Таблица 1 – Штамповочные уклоны и радиусы при минимальном значении функции (4)

№ п/п		1	2	3	4	5	6	7	8
Уклон, °	Б	10	7	7	7	7	-	-	-
	П	7	7	7	7	7	-	-	-
Радиус, мм	Б	12	10	12	3	3	3	3	3
	П	10	8	10	3	3	3	3	3

Б – базовая поковка; П – поковка повышенной точности.

Оценка устойчивости пластического равновесия точек поковки по методу функций Ляпунова позволяет, используя параметры НДС, определить вероятность возникновения дефектов поковки [5]. Исследование показало, что после повышения геометрической точности поковки пластическое равновесие сохраняется во всем объеме поковки. Это означает, что дефекты в теле поковки не возникнут, а заклинивания поковки в ручье не произойдет. Контроль размеров поковок показал соответствие результатов штамповки требованиям конструкторской документации. При визуальном

и ультразвуковом контроле поковок поверхностные и внутренние дефекты не обнаружены, что подтвердило адекватность представленной математической модели реальному процессу деформирования.

Обоснованное уменьшение штамповочных уклонов и радиусов обеспечило снижение массы поковки на 0,4 кг, с 6,5 кг до 6,1 кг. При годовой программе выпуска 7000 штук экономия металла составила 2,8 тонны.

В результате исследования установлено, что при разработке технологий горячей штамповки необходимо исследовать ряд конструкций поковок со всеми допустимыми наборами штамповочных уклонов и радиусов закруглений для каждой поковки, построить для каждого набора функцию геометрической точности (4) и выбрать сочетание штамповочных уклонов и радиусов закруглений, соответствующее минимуму функции (4).

Таким образом, предложена аналитическая зависимость, связывающая геометрическую точность поковки с неравномерностью НДС. Повышение точности штамповки на молоте путем минимизации функции геометрической точности с использованием МКЭ позволило уменьшить неравномерность НДС поковки. Оценкой пластического равновесия на поверхностях и в «жестких» зонах поковки методом функций Ляпунова доказано отсутствие условий для заклинивания поковки в ручье и образования дефектов.

#### Литература

1. *Biba N., Stebounov S., Lishny A., Vlasov A. New approach to 3D finite-element simulation of material flow and its application to bulk metal forming. - Quantor-Soft Limited. Moscow, Russia, 2002, - p. 1- 6.*
2. *Петров П.А., Синчак Я., Лукашек-Солек А. Совершенствование технологии объемной штамповки детали «Шарнир» с помощью трехмерного конечно-элементного анализа// Кузнечно-штамповочное производство.- 2004. - №2. - С.30-35.*
3. *Володин И.М., Ромашов А.А., Перевертов А.В., Мартюгин В.С. Новые технологии изготовления поковок, внедренные на кузнечном заводе ОАО «КамАЗ-Металлургия» // Кузнечно-штамповочное производство. - 2004. - №10. - С. 3-7.*
4. *Колмогоров В.Л. Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов // Кузнечно-штамповочное производство.- 2003.- №2. - С. 4-16.*
5. *Рябичева Л.А., Усатюк Д.А. Повышение геометрической точности осесимметричных поковок с использованием метода функций Ляпунова // Физика и техника высоких давлений, Т.17, № 1, 2007. - С. 147-154.*

© Рябичева Л.А., Усатюк Д.А. 2008