

PACS: 81.20.Nu

Л.А. Рябичева, Д.А. Усатюк

## ПОВЫШЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОКОВОК НА ОСНОВЕ МЕТОДА ФУНКЦИЙ ЛЯПУНОВА

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля  
кв. Молодежный, 20а, г. Луганск, 91034, Украина  
E-mail: material@snu.edu.ua

*Разработана новая методика повышения геометрической точности поковок для горячей штамповки, в основе которой лежит минимизация целевой функции в виде позынома, связывающего геометрическую точность с величинами интенсивностей напряжений на поверхностях и в «жестких» зонах поковки. Метод функций Ляпунова применен для исследования устойчивости пластического равновесия в зонах концентрации напряжений после повышения геометрической точности поковки. Выполнен анализ теплового и силового режимов работы штампа. Выявлен преобладающий вид износа для каждой из поверхностей ручья.*

### Введение

Одним из важных направлений совершенствования технологий машиностроения является получение заготовок, форма и размеры которых приближаются к готовым изделиям. Такой подход приносит экономический эффект благодаря снижению затрат на обработку резанием и уменьшению потерь металла [1]. При горячей объемной штамповке (ГОШ) повышение точности поковок на один класс нередко приводит к снижению стойкости штампов в несколько раз вследствие того, что уменьшение радиусов закруглений в сочетании с уменьшением штамповочных уклонов значительно увеличивает коэффициент концентрации напряжений. В зонах концентрации напряжений скорости деформации в 2–3 раза выше, чем в остальном объеме поковки. Это обуславливает возникновение упругих напряжений при данных условиях деформирования и образование «жестких» зон в поковке. Увеличение размеров этих зон затрудняет доступ металла в полости ручья, что повышает неравномерность напряженно-деформированного состояния (НДС). Определяющее влияние на размеры «жестких» зон оказывают температурно-скоростные условия деформирования, зависящие от соотношений размеров поверхностей, примыкающих к области концентрации напряжений, а также

величин штамповочных уклонов и радиусов закруглений [2,3]. Вследствие этого при штамповке на молоте масса поковки зачастую на 40–60% превышает массу детали. В работе приведена методика повышения геометрической точности поковок для ГОШ с высокими скоростями деформирования, которая обеспечит сохранение стойкости штампов за счет оптимального распределения напряжений, деформаций и температур в теле поковки.

### Методика исследований

Для построения целевой функции, характеризующей геометрическую точность поковки, используем методы геометрического программирования, в которых критерии оптимальности и ограничения задаются функциями специального вида – позиномами [4]. Функции, описывающие состояние металла в «жестких» зонах, являются зависимостями интенсивности напряжений от соотношения размеров примыкающих поверхностей поковки (функции размеров поковки  $\Phi^q$ ), а также величин штамповочных уклонов и радиусов закруглений (функции формы  $\Phi^h$  и  $\Phi^{\text{rad}}$ ):

$$\Phi^q = \sigma_i^q \begin{pmatrix} \xi_1^q \\ \xi_2^q \end{pmatrix}, \quad \Phi^h = \sigma_i^h (\alpha^h), \quad \Phi^{\text{rad}} = \sigma_i^{\text{rad}}(r), \quad (1)$$

где  $\sigma_i^q$  – интенсивность напряжений в зоне под номером  $q$ ;  $\xi_1^q, \xi_2^q$  – размеры первой и второй поверхностей, примыкающих к зоне  $q$ ;  $h$  – порядковый номер поверхности поковки;  $\sigma_i^h$  – зависимость наибольшей интенсивности напряжений на образующей поверхности с номером  $h$  от величины штамповочного уклона;  $\alpha^h$  – величина штамповочного уклона на поверхности номер  $h$ ;  $\text{rad}$  – порядковый номер закругления;  $r$  – величина радиуса закругления;  $\sigma_i^{\text{rad}}$  – зависимость интенсивности напряжений на поверхности закругления.

Функции (1) образуют позином геометрической точности поковки:

$$\Phi = \sum_{q=1}^R \Phi^q + \sum_{h=1}^A \Phi^h + \sum_{\text{rad}=1}^C \Phi^{\text{rad}}, \quad (2)$$

где  $R$  – число «жестких» зон в поковке;  $A$  – число поверхностей поковки с штамповочными уклонами;  $C$  – число радиусов закругления.

Методика повышения геометрической точности поковок включает определение

- интенсивностей напряжений на поверхностях и внутри поковки по методу конечных элементов (МКЭ);
- конфигурации очага деформации с учетом «жестких» зон в поковке по результатам конечно-элементного анализа;
- поверхностей, примыкающих к «жестким» зонам;
- функций (1) (которые для удобства табулируются);
- штамповочных уклонов и радиусов закруглений, при которых позином (2) принимает минимальное значение.

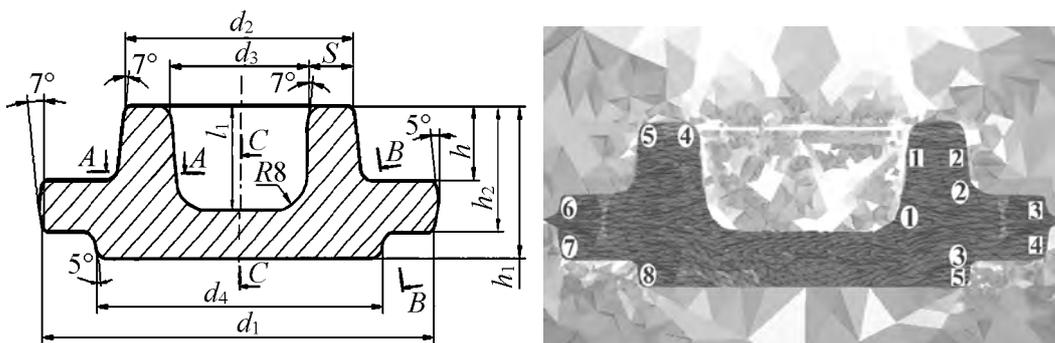


Рис. 1. Эскиз поковки

Рис. 2. Конечно-элементная модель: номера в овальных окошечках соответствуют радиусам закруглений, а в прямоугольных – штамповочным уклонам

Таблица 1

Размеры (в мм) и масса базовой поковки

$h_1$	$h_2$	$h_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$t$	$l_1$	Масса поковки, kg
100	80	50	180	120	77	20	140	9.6

Повышение геометрической точности поковки и стойкости штампа показано на примере поковки детали «крышка» (рис. 1). Материал поковки – сталь 40Х, температура начала штамповки 1150°C, масса выпускаемой поковки 9.6 kg. Материал штампа – сталь 5ХНМ, температура предварительного подогрева штампа 400°C. Конечно-элементная модель системы поковка–штамп с нумерацией зон концентрации напряжений, штамповочных уклонов и радиусов закруглений показана на рис. 2. Размеры и масса поковки по базовому варианту представлены в табл. 1. Наружные штамповочные уклоны равны 7°, а внутренние – 10°.

### Результаты эксперимента

Проанализируем геометрическую точность поковки с использованием позинома (2) и метода функций Ляпунова [5]. Для этого определим значения функций (1) для различных штамповочных уклонов и радиусов закруглений. Сделаем это на примере штамповочных уклонов 1 и 3, радиусов закруглений 1 и 2 (рис. 2).

Функции размеров изменяются только за счет изменения прилегающих уклонов и радиусов, поэтому основное влияние на величину позинома (2) оказывают функции геометрической точности. Зависимости для радиусов 1 и 2 и уклонов 1 и 3 приведены на рис. 3. Видно, что  $\Phi^{\text{rad}}$  достигает минимума при радиусе 8 mm (рис. 3,а), а  $\Phi^h$  – при угле 7° (рис. 3,б). Величины остальных уклонов и радиусов, при которых позином (2) принимает минимальное значение, определяются аналогично и приведены в табл. 2. Благодаря оптимизации геометрической точности по новой методике масса поковки уменьшилась на 1.1 kg.

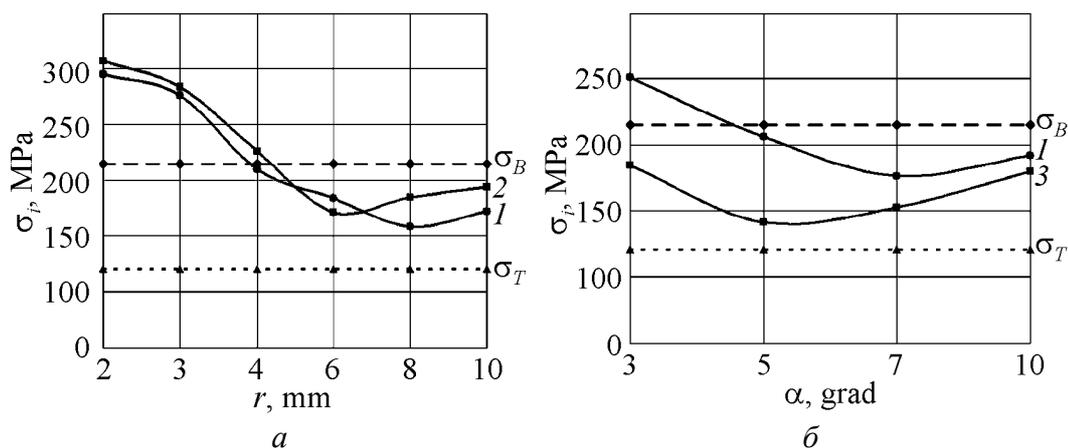


Рис. 3. Функции формы для радиусов 1 и 2 (а); для уклонов 1 и 3 (б)

Таблица 2

**Величины штамповочных уклонов и радиусов закруглений, определенные из условия минимума позинома геометрической точности**

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Уклон, deg	7	7	3	5	5	–	–	–
Радиус, mm	8	6	3	3	3	3	3	3

Примечание. Масса поковки 8.5 kg.

Сравнение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  с величинами  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$  согласно методике [6] позволяет определить предельно допустимую интенсивность напряжений с учетом температурно-скоростных условий в любой точке поковки. Для этого исследуем пластическое равновесие точек поковки в зонах кузнечных напусков с использованием метода функций Ляпунова [5].

Результаты анализа устойчивости пластического равновесия по Ляпунову для всех радиусов закруглений и штамповочных уклонов приведены в табл. 3. Нетрудно заметить, что в углу ручья с радиусом  $b$ , в случае, если уклон  $\beta$  равен  $3^\circ$ , происходит нарушение пластического равновесия из-за ухудшения условий заполнения этого угла, хотя его радиус и составляет 3 mm по ГОСТ 7505–89. На практике это означает повышение вероятности заклинивания поковки в ручье. Для решения этой проблемы необходимо, не меняя радиус закругления  $b$ , увеличить уклон  $\beta$  до  $5^\circ$ . В табл. 4 указаны штамповочные уклоны и радиусы закруглений поковки, определенные с учетом анализа пластического равновесия по Ляпунову. В таком случае масса поковки увеличится с 8.5 до 8.6 kg (всего на 0.1 kg).

Проанализируем тепловой и силовой режимы работы штампа с учетом повышения геометрической точности поковки. Для этого построим температурные поля и поля напряжений в поковке и штампе на примере сечений  $A-A$  и  $B-B$ , проходящих через критические области 1, 2 и 3 (см. рис. 1, 2), а также для осевого сечения  $C-C$  (рис. 4). Видно, что внутри поковки температура остается практически неизменной, а в центре – выше на  $5-10^\circ\text{C}$ . Однако в зонах

концентрации напряжений температура поверхностных слоев снижается до 800°C на внутренних и до 650°C на наружных поверхностях. Расчеты по МКЭ показали, что температура металла выходит за пределы температурного интервала штамповки только в зонах концентрации напряжений. Это способствует ускоренному формированию «жестких» зон поковки.

Таблица 3

**Исследование устойчивости пластического равновесия по Ляпунову после оптимизации размерной точности**

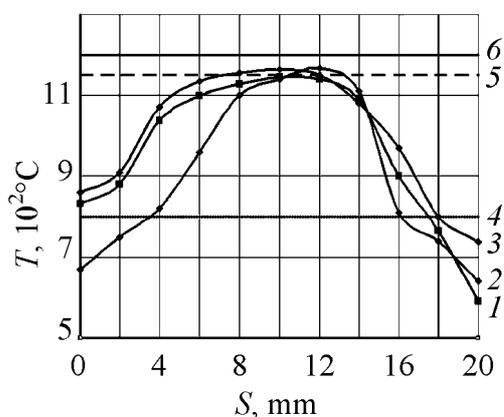
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Уклон	+	+	+	+	+			
Радиус	+	+	+	+	+	-	+	+

Примечание. «+» – равновесие устойчиво, «-» – неустойчиво.

Таблица 4

**Величины штамповочных уклонов и радиусов закруглений поковки повышенной точности**

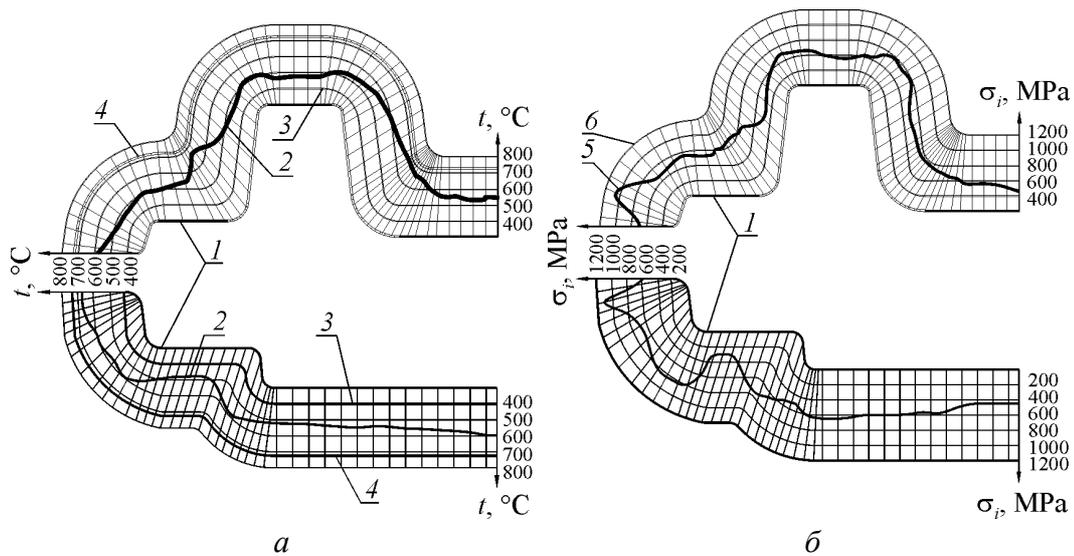
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Уклон, deg	7	7	5	5	5	-	-	-
Радиус, mm	8	6	3	3	3	3	3	3



**Рис. 4.** Температурные поля в сечениях поковки: 1 – сечение А-А; 2 – сечение В-В; 3 – сечение С-С; 4, 6 – нижняя и верхняя границы температурного интервала штамповки; 5 – температура начала штамповки

Для отображения параметров НДС и температур на рабочих поверхностях штампов использованы лепестковые диаграммы в криволинейной системе координат (рис. 5,а). В поверхностном слое ручки толщиной 0.5–1 mm в процессе деформирования температура поковки повышается на сотни градусов. Возникающие при этом термические напряжения в одних точках увеличивают, а в других – уменьшают интенсивность напряжений. Наиболее высокие температуры достигаются на выступающих частях ручки, в данном случае на стержне, формирующем центральное отверстие. Следующий максимум температуры находится у входа в облойный мостик. Жирной линией нанесена температура начала фазовых превращений стали 5ХНМ (точка  $A_{c1}$ ), равная 730°C. В окрестностях радиусов закруглений, прилегающих к зонам 1 и 2 поковки, температура приближается к критической и достигает 700 и 670°C. У входа в облойный мостик температура равна 580°C.

температуры находится у входа в облойный мостик. Жирной линией нанесена температура начала фазовых превращений стали 5ХНМ (точка  $A_{c1}$ ), равная 730°C. В окрестностях радиусов закруглений, прилегающих к зонам 1 и 2 поковки, температура приближается к критической и достигает 700 и 670°C. У входа в облойный мостик температура равна 580°C.



**Рис. 5.** Температурные поля (а) и интенсивность напряжений (б) на поверхностях ручья: 1 – образующая ручья штампа; 2 – температура на поверхностях ручья; 3 – температура предварительного подогрева штампа; 4 – точка  $A_{c1}$ ; 5 – интенсивность напряжений; 6 – динамический предел текучести

На рис. 5,б представлены интенсивности напряжений и динамический предел текучести штамповой стали в зависимости от условий деформирования. Наибольшей величины 1120 МПа напряжения достигают у входа в облойный мостик, в то время как в окрестностях зон 1 и 2 они не превышают 800 МПа.

Лепестковые диаграммы облегчают выявление преобладающего вида износа для каждого участка ручья. Например, в зонах 1 и 2 преобладает разгар. Температура поверхностного слоя в этих зонах толщиной 0.5 мм повышается до температур, близких к точке  $A_{c1}$ . Это является причиной возникновения значительных градиентов температур, ведущих к ускоренному образованию разгарных трещин. В то же время в облойном мостике будет преобладать истирание, поскольку температура не превышает 580°C, а интенсивность напряжений близка к предельной (1200 МПа).

На нижней части ручья штампа картина складывается другая. Распределение температур по поверхности более равномерное с диапазоном изменения 450–570°C. При этом пиковые значения температуры 570°C наблюдаются в окрестностях зоны 3 и облойного мостика (см. рис. 5,а). Причиной этого является гораздо более длительный контакт нижней части штампа с поковкой, при котором поверхности ручья, с одной стороны, прогреваются на большую (до 2 мм) глубину, а с другой – прогрев более равномерный, а условия теплоотвода благоприятнее. Интенсивности напряжений в нижней части штампа изменяются в пределах от 400 до 800 МПа, с пиком в 1100 МПа в зоне облойного мостика (рис. 5,б). Это означает, что в нижней части штампа преобладающим видом износа является разгар, хотя скорость образования разгарных трещин будет ниже, чем на верхней части, благодаря меньшим градиентам температур.

Очевидно, более тяжелые условия работы складываются для верхней части штампа. В то же время интенсивности напряжений и температуры не превышают допустимых значений, поэтому увеличение геометрической точности поковки не приведет к уменьшению стойкости штампа.

### Заключение

Разработана методика повышения геометрической точности поковок за счет снижения величины штамповочных уклонов и радиусов закруглений. Повышение геометрической точности обеспечивает снижение массы поковки на 10% при сохранении стойкости штампа. Выполнен анализ теплового и силового режимов работы штампа. Выявлен преобладающий вид износа для каждой из поверхностей ручья.

1. *И.М. Володин, А.А. Ромашов, А.В. Перевертов, В.С. Мартюгин*, КШП № 10, 3 (2004).
2. *Е.И. Бельский*, Стойкость кузнечных штампов, Наука и техника, Минск (1975).
3. *В.А. Евстратов*, Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, Краматорськ (2006), с. 256.
4. *А.Г. Трифонов*, Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения, МГУ, Москва (2003).
5. *Л.А. Рябичева, Д.А. Усатюк*, Тезисы докладов III Евразийской научно-технической конференции «Прочность неоднородных структур», МИСиС, Москва (2006).
6. *Л.А. Рябичева, Д.А. Усатюк*, Вісник СНУ ім. В. Даля № 6 (100), ч. 1, 45 (2006).
7. *L.A. Ryabicheva, D.A. Usatyuk*, Machines, technologies, materials'06 proceedings, Bulgaria, Sofia, PS 23 (2006).

*L.A. Ryabicheva, D.A. Usatyuk*

### INCREASING THE GEOMETRICAL PRECISION OF AXIALLY SYMMETRIC FORGED PIECES BY USING THE LYAPUNOV FUNCTIONS METHOD

A new technique was developed for increasing the geometrical precision of axially symmetric forged pieces for hot forging. The technique is based on minimization of a polynomial efficiency function that connects the geometrical precision with stress intensity values at the surfaces and rigid zones of a forged piece. The Lyapunov functions method is implemented for investigation of plastic equilibrium in the stress concentration zones after increasing the geometrical precision of the forged piece. Thermal and stress conditions of die operation were investigated. The dominating deterioration was detected for each surface of the die impression.

**Fig. 1.** Sketch of forged piece

**Fig. 2.** The finite element model: numerals in ovals correspond to edge radii, those in rectangles – stamp inclinations

**Fig. 3.** Functions of shape for radii 1 and 2 (*a*); for inclinations 1 and 3 (*b*)

**Fig. 4.** Temperature fields in sections of forged piece: 1 – section *A–A*; 2 – section *B–B*; 3 – section *C–C*; 4, 6 – lower and upper margins of forging temperature interval; 5 – starting temperature of forging

**Fig. 5.** Temperature fields (*a*) and stress intensity (*b*) at the die impression surface: 1 – generatrix of die impression; 2 – temperature at the die impression surfaces; 3 – preheating temperature; 4 – point *Ac*<sub>1</sub>; 5 – stress intensity; 6 – dynamic yield stress