

УДК 621.73.043

К. Н. Соломонов, В. П. Абашкин

АНАЛИЗ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПОКОВОК

Рассмотрен аналитический подход к определению формы деформируемой плоской заготовки в процессах ковки и объемной штамповки. На основе анализа различных функций, задающих профиль поковки в плане, выбрана радиальная схема течения металла как наиболее приемлемая для описания распределения потоков металла на контактной плоскости. Приведено сопоставление с известным решением И.Я. Тарновского, подтверждающее правильность выбора схемы.

В процессах формообразования плоских заготовок форма контура деформируемой поковки существенно зависит от распределения потоков металла по контактной поверхности, которые, в свою очередь, определяются положением линии раздела течения металла, а также направлением линий тока. Как показано в исследованиях [1], наиболее приемлемой в этом случае представляется радиальная схема течения металла. Однако остается открытым вопрос, какая функция наиболее точно описывает форму контура осаживаемой заготовки. По-видимому, она зависит от количества перемещаемого по полотну заготовки металла в процессе деформирования.

Рассмотрим осадку квадратной пластины. Для подсчета длины линии тока воспользуемся соотношением [2]

$$L(x) = \frac{x}{x + y_c - x_c} \sqrt{y_c^2 + (x_c - x)^2}, \quad (1)$$

где x — координата произвольно выбранной точки на контуре поковки; x_c, y_c — координаты центра окружности (условного контура), перпендикулярно к которой расположены линии тока (рис. 1). Причем $y_c \geq x_c$, так как на начальных стадиях деформирования окружность условного контура имеет незначительную кривизну.

Исследуем, что собой представляет функция $L(x)$. Будем считать в формуле (1) все величины безразмерными. Полагаем $x_c = 1$. Тогда x изменяется в интервале от 0 до 1. Ясно, что в том же интервале изменяется и длина линии тока, т.е. функция $L(x)$. Действительно, в крайних точках

$$L(x) = 0 \quad \text{при} \quad x = 0,$$

$$L(x) = x_c \quad \text{при} \quad x = x_c.$$

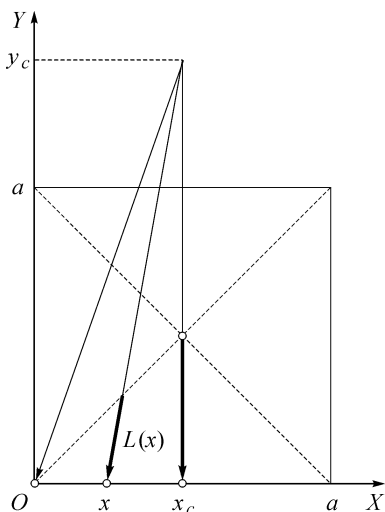


Рис. 1. Схема течения металла

Построим искомую кривую по точкам, задавая значения x с интервалом 0,1. Полученные результаты занесем в табл. 1, на их основе изобразим графики функций (рис. 2). Анализ табличных данных показывает, что кривая (L) при $y_c = 10$ близка к прямой, так как на начальной стадии осадки растекание металла по полотну заготовки происходит по линейному закону.

Исследуем, насколько график этой функции отклоняется от известных кривых второго порядка (окружности, гиперболы, параболы).

Таблица 1

Изменение функции $L(x)$ вдоль контура поковки

x		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
Длина линии тока L	Кривая, заданная уравнением (1)	1	0,11	0,21	0,32	0,42	0,52	0,62	0,72	0,81	0,90
		2	0,20	0,36	0,49	0,60	0,68	0,76	0,83	0,90	0,94
	Окружность	3	0,40	0,60	0,70	0,80	0,86	0,91	0,95	0,98	0,99
		4	0,19	0,35	0,47	0,58	0,68	0,76	0,83	0,89	0,95
	Гипербола	5	0,14	0,28	0,41	0,54	0,65	0,75	0,84	0,91	0,96
		6	0,14	0,27	0,39	0,51	0,62	0,71	0,80	0,87	0,94
	Парабола	7	0,16	0,31	0,45	0,57	0,68	0,77	0,85	0,91	0,96

Окружность. Рассмотрим дугу окружности, проходящую через крайние точки кривой, для двух случаев.

1. Центр окружности радиусом, равным единице, расположен в точке с координатами (1, 0). Тогда

$$L(x) = \sqrt{x(2-x)}.$$

2. Окружность проходит через крайние точки с координатами $(0, 0)$, $(1, 1)$ и точку с координатами $(0,5, 0,68)$, лежащую на рассматриваемой кривой ($y_c = 2$). Понятно, что в этом случае дуга окружности задана однозначно, а ее центр лежит в некоторой произвольной точке. При этом функция (1) выглядит так:

$$L(x) = \sqrt{3,88 - (1,8 - x)^2} - 0,8.$$

Как видно из графика этой функции, она почти полностью совпадает с исследуемой.

Гипербола. Крайние точки с координатами $(0, 0)$ и $(1, 1)$ соединим гиперболой. В каноническом виде уравнение гиперболы

$$\frac{(L - y_0)^2}{a^2} - \frac{(x - x_0)^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

содержит четыре неизвестных: a, b, x_0, y_0 . Выразим x_0, y_0 через a и b . Подставляя граничные условия $L = 0$ при $x = 0$, $L = 1$ при $x = 1$ в уравнение (2), получаем

$$\begin{cases} \frac{y_0^2}{a^2} - \frac{x_0^2}{b^2} = 1; \\ \frac{(1 - y_0)^2}{a^2} - \frac{(1 - x_0)^2}{b^2} = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Используя вполне очевидные физические и геометрические ограничения и считая a и b положительными числами, приходим к следующему неравенству:

$$a > b > \frac{a}{\sqrt{2a + 1}}.$$

Чтобы построить график гиперболы, зададим конкретные значения параметров a и b , соблюдая полученное неравенство.

1. Пусть $a = 2, b = 1$. Тогда в соответствии с уравнениями (3) имеем $x_0 = 1,129, y_0 = 3,016$.

Подставляя эти значения в уравнение (2), получаем

$$L(x) = 3,016 - 2\sqrt{1 + (x - 1,129)^2}.$$

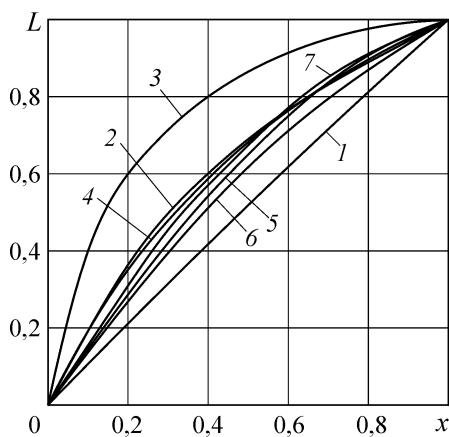


Рис. 2. Форма контура поковки:

1, 2 — кривые при $y_c = 10$ и 2 (уравнение (1)); 3, 4 — окружности, проходящие через крайние точки и пересекающие кривую, заданную уравнением (1); 5, 6 — гиперболы с коэффициентами $a = 2; 10$ и $b = 1; 3$ соответственно; 7 — парабола

2. Пусть $a = 10$, $b = 3$. Тогда

$$L(x) = 11,114 - 10\sqrt{1 + \left(\frac{x - 1,455}{3}\right)^2}.$$

Как видно (см. рис. 2), полученные кривые значительно отклоняются от графика функции, заданной уравнением (1). Тем более, что графики полученной гиперболы пересекают рассматриваемую кривую.

Парабола. Поскольку уравнение параболы можно записать в виде

$$L = ax^2 + bx + c,$$

то для ее однозначного построения необходимо задать три точки. Две из них — это крайние точки рассматриваемой кривой, а третья — промежуточная, в качестве которой выбираем уже используемую ранее точку с координатами $(0,5, 0,68)$. Тогда уравнение параболы выглядит так:

$$L(x) = (1,72 - 0,72x)x.$$

Результаты расчетов занесены в табл. 1. Как показывает анализ графиков, парабола так же, как гипербола, плохо соответствует функции (1), так как пересекает ее.

Таким образом, из рассмотренных кривых второго порядка наилучшее приближение к заданной функции (1) дает дуга окружности. Следовательно, радиальная схема течения металла приводит к формированию контура поковки в виде дуги окружности.

Если центры условного контура и квадрата совпадают (предельный случай), т.е. $y_c = x_c$, тогда из уравнения (1) следует $L = \sqrt{x_c^2 + (x_c - x)^2}$. В угловой точке $x = 0$, следовательно, $L = x_c\sqrt{2}$, т.е. схема перестраивается и теперь в угловую точку затекает больше всего металла. Это фактически случай единой окружности, когда металл растекается по радиусам окружности с центром в середине квадрата. Такой случай, описанный в работе [3], возможен, когда трение на поверхности контакта заготовки и инструмента отсутствует.

Для подтверждения наших предположений сравним результаты анализа формы деформированной прямоугольной пластины, приведенные в работе [4], с предложенной радиальной схемой течения металла.

Прирост длины контура (перемещение точек контура заготовки в направлении осей OX и OY соответственно) в каждой точке контура вычисляется по формулам

$$\begin{aligned} u_x &= (\varepsilon - a_1)x - a_2x \left(1 - \frac{x^2}{3\ell^2}\right) - a_3x \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right); \\ u_y &= a_1y + a_2y \left(1 - \frac{x^2}{\ell^2}\right) + a_3y \left(1 - \frac{y^2}{3b^2}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\varepsilon = \Delta h/h$ — степень деформации, ℓ — половина длины, b — половина ширины прямоугольной заготовки.

В эти формулы входят коэффициенты a_1, a_2, a_3 , которые зависят от значений fb/h и b/ℓ . Поскольку рассматриваем тонкие заготовки, можно считать отношение линейного размера пластины b к толщине h равным 10. Коэффициент трения полагаем равным 0,4.

После несложных расчетов получаем: $a_3 = 0, a_2 = 0,55, a_1 = 0,48$. Следовательно, перемещение центральной точки контура, расположенной на длинной стороне прямоугольника, сопоставимо с половиной ширины исследуемого прямоугольника.

Подставим полученные значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 в первую из рассматриваемых формул (4). После преобразований можно записать

$$\begin{aligned} u_x \Big|_{x=\ell}^{y=0} &= (\varepsilon - a_1)\ell - a_2\ell \left(1 - \frac{1}{3}\right) - a_3\ell = \\ &= \left(-\frac{\Delta h}{h} - 0,48\right)\ell - 0,55\ell \frac{2}{3} = \ell \left(-\frac{\Delta h}{h} - 0,48 - 0,37\right) = \\ &= -\ell \left(\frac{\Delta h}{h} + 0,85\right). \end{aligned}$$

Поскольку шаг осадки Δh можно выбрать сколь угодно малым, то в рассматриваемой формуле первым слагаемым можно пренебречь. Следовательно, при деформировании прямоугольная пластина подвержена большим формоизменениям.

Введем в рассмотрение суммарный коэффициент $K = a_1 + (2/3)a_2 + a_3$. Исследуем зависимость этого коэффициента от толщины полотна заготовки, имеющей форму квадрата ($\frac{b}{\ell} = 1$). Для поковки с тонким полотном имеем

$$K = 0,426 \text{ для } b/h = 10;$$

$$K = 0,4 \text{ для } b/h = 20;$$

$$K = 0,364 \text{ для } b/h = 30.$$

Видно, что для тонких деталей коэффициент K незначительно зависит от толщины заготовки: если толщина меняется в два-три раза, коэффициент K изменяется всего на 10%.

Рассмотрим, как изменяется приращение (перемещение) точек контура детали в направлении оси OX . В соответствии с формулой, предложенной в работе [4], имеем

$$\begin{aligned} u_x \Big|_{x=\ell} &= \ell \left[(\varepsilon - a_1) - a_2 \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{\ell^2}{\ell^2}\right) - a_3 \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right) \right] = \\ &= \ell \left[\varepsilon - a_1 - \frac{2}{3}a_2 - a_3 \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right) \right] = ky^2 + c. \end{aligned}$$

Здесь k — коэффициент, полученный как произведение параметров, c — сумма коэффициентов $a_1 + (2/3)a_2 + a_3$ с соответствующими множителями. Поскольку ранее показано, что рассматриваемые коэффициенты не зависят от толщины заготовки для тонких деталей, для описания формы деформируемой прямоугольной пластины можно использовать обычное уравнение параболы с постоянными коэффициентами k и c :

$$x = ky^2 + c.$$

Это верно только на начальном этапе осадки, когда перемещение u_x точек контура в направлении оси OX пропорционально x . Но в дальнейшем имеем $u_x = \sqrt{x^2 + y^2 + k_1}$, где k_1 — некоторая константа.

Тогда очевидно: $\sqrt{x^2 + y^2 + k_1} = ky^2 + c$. Возводя в квадрат обе части уравнения, получаем: $x^2 + y^2 + k_1 = (ky^2 + c)^2$, т.е. на всех промежуточных стадиях осадки контур поковки — это кривая четвертого порядка.

Сравним форму кривых, представляющих собой параболу и полученную функцию: $x_1 = y^2$, $x_2 = \pm y\sqrt{1 + y^2}$.

Результаты вычисления координат точек на каждой из исследуемых кривых сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сопоставление формы параболы и кривой четвертого порядка

y	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8	...	± 100
x_1	1	4	9	16	25	36	49	64	...	10000
x_2	1,4	4,4	9,48	16,5	25,5	36,5	49,5	64,5	...	10000

Кривая четвертого порядка, представленная ранее, имеет приблизительно такой же график, как и парабола. Это подтверждается тем, что $\sqrt{1 + y^2} \rightarrow y$ при больших значениях y , а следовательно, $x_2 \rightarrow y^2$.

Таким образом, можно считать, что контур поковки представляет собой дугу окружности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костарев И. В., Соломонов К. Н. Обоснование введения радиальной схемы течения металла в процессах штамповки тонкостенных ребристых деталей из алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Машиностроение. — 2000. — № 3. — С. 62–65.
2. Соломонов К. Н., Костарев И. В. Зависимость формообразования ребра жесткости от характера изменения граничных контактных давлений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. — 2001. — № 1. — С. 88–92.
3. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. — М.: Машиностроение, 1971. — 424 с.

Константин Николаевич Соломонов родился в 1957 г. окончил Воронежский государственный университет в 1980 г. Д-р техн. наук, профессор ГТУ “Московский институт стали и сплавов” и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области обработки металлов давлением, механики, инженерной графики, информатики, в том числе трех монографий и четырех патентов на изобретение.

K.N. Solomonov (b. 1957) graduated from the Voronezh State University in 1980. D. Sc. (Eng.), professor of the Moscow Institute for Steels and Alloys and the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications including 3 monographs and 4 patents in the field of plastic metal working, mechanics, engineering graphics and information technology.

Виктор Павлович Абашкин родился в 1982 г. окончил Курский государственный технический университет в 2004 г. Аспирант ГТУ “Московский институт стали и сплавов”. Автор 11 научных работ в области исследования процессовковки.

V.P. Abashkin (b. 1982) graduated from the Kursk State Technical University in 2004. Post-graduate of the Moscow Institute for Steels and Alloys. Author of 11 publications in the field of study of forging processes.

УДК 621.43-231

А. Н. Т ю р и н

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА БРУСКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ПРОЦЕССА

Рассмотрено применение энергетических критериев к оценке качества брусковой обработки, что позволяет определить оптимальные геометрические, конструктивные и режимные параметры процесса.

В настоящее время существует множество различных теоретических подходов при моделировании процесса суперфиниширования. Однако все они имеют преимущественно частный характер, отражающий конкретные условия процесса суперфиниширования, что ограничивает их практическое использование при совершенствовании технологии суперфинишной обработки. По мнению автора, использование энергетического подхода в моделировании процесса суперфиниширования позволит обобщить ранее выполненные исследования в этой области и создать более универсальную модель, позволяющую осуществлять поиск новых направлений совершенствования технологии окончательной прецизионной обработки широкого круга деталей.