

УДК 621.777:621.79

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ  
ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
НА ХАРАКТЕР ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ  
МЕТАЛЛА ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ПРОШИВКОЙ**

**Ю. Л. БОБАРИКИН, В. Ф. БУРЕНКОВ, Н. В. ИНОЗЕМЦЕВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Введение**

Плакирование внутренних поверхностей изделий металлическими покрытиями может осуществляться прошивкой. Прошивка с плакированием отличается сложной схемой деформации [1], что значительно затрудняет проектирование инструмента и выбор деформационных режимов процесса [2].

Одним из важнейших, еще не изученных вопросов данного процесса оставалась зависимость высоты очага деформации под пуансоном от режимов прошивки с плакированием.

Определение величины очага деформации позволяет оценить объем плакирующего металла и, соответственно, объем плакирующего покрытия, что в свою очередь обеспечивает получение сплошного покрытия по всей поверхности плакирования.

Данные различных авторов относительно глубины или высоты проникновения очага деформации разноречивы.

Так, по Ш. Гелеи [4], величина распространения очага деформации при прошивке пуансоном с плоским торцом больше половины диаметра пуансона, т. е.  $h > 0,5d$ , Э. Томсен и другие [5] считают, что  $h = 0,5d$ , Л. В. Прозоров [6] на основании опытных данных по холодному выдавливанию тонкостенных стаканов принимает  $h = 0,1d$ , В. Е. Фаворский [7] –  $h = (0,2-0,3)d$ , М. В. Сторожев [8] считает, что при  $0 < \frac{d}{D} < 1$   $h = \frac{1}{6}d$  (где  $h$  – высота пластической зоны;  $d$  – диаметр прошиваемой полости;  $D$  – диаметр заготовки).

Высота очага деформации, рассчитанная по формулам И. Л. Перлина [9], А. Г. Овчинникова [10] и И. Л. Тарновского, не совпадает. Кроме того, данные по размерам очага деформации при прошивке с различной степенью деформации и различной формой рабочей поверхности деформирующего инструмента отсутствуют.

Знание формы и размеров характерных зон при прошивке, определяющих силовые параметры процесса, важно также для процесса плакирования при прошивке, так как они влияют на выбор формы и размеров вставки из плакирующего материала, размещаемой в основном под торцом деформирующего инструмента.

Размеры очага деформации при прошивке с плакированием получены на основе принципа минимальной потенциальной энергии формоизменения [3], при этом относительные размеры очага деформации  $\frac{h}{d}$  выражаются следующей аналитической зависимостью:

$$\frac{h}{d} = \sqrt{\frac{2 - \frac{d}{D} \left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right)}{6 \frac{d}{D} \left(1 + \frac{d}{D}\right)}}. \quad (1)$$

### Экспериментальные исследования и их результаты

Существуют различные экспериментальные методы, позволяющие судить о характере напряженно-деформированного состояния. Наиболее распространенный метод – измерение деформаций делительной сетки, предварительно нанесенной на плоскости раздела составных образцов; часто используются слоистые металлические образцы, а также образцы, изготовленные из смеси пластилина с парафином и другого модельного материала, у которого отдельные слои окрашены в различный цвет. Экспериментальные данные на модельных материалах дают скорее качественную, чем количественную оценку в связи с различным поведением металлов, упрочняющихся при холодной пластической деформации, и модельного материала.

Характер течения материала, а также силовые параметры процесса определяются прежде всего формой и размером пластических зон в деформируемом теле. Целесообразно рассматривать следующие характерные зоны:

1. Упругие (жесткие) зоны, в которых экспериментальными методами не обнаруживаются остаточные деформации.

2. Зоны больших деформаций (пластические зоны или очаг интенсивной деформации).

3. Промежуточные зоны, в которых первоначально малые деформации постепенно суммируются, достигая величин, соизмеримых с деформациями в пластических зонах (эти зоны в теоретическом анализе жестко-пластического тела не учитываются).

Четкая граница, разделяющая недеформируемую часть заготовки от пластически деформируемой, отсутствует. Скорости течения (скорости деформации) обращаются в нуль постепенно в полосе конечных размеров, где упругие и пластические деформации соизмеримы между собой. Однако принимаемая в теоретическом анализе модель жестко-пластического тела приводит к понятию условной границы, разделяющей жесткую и пластическую области.

Экспериментально определяемые границы пластических зон наиболее правильно характеризуются линиями, соединяющими точки, в которых обнаруживаются отклонения прямых линий делительной сетки от их первоначального направления.

На рис. 1 представлено изменение делительной сетки на заготовках из алюминия марки АД0, характеризующее течение материала при прошивке с плакированием. На модельном материале делительная сетка наносилась в виде продольных и поперечных полос из материала, отличающегося по цвету от основного. Продольные полосы, нанесенные на одну половину образца, искажаются при прошивке и дают представление о характере деформации в радиальном направлении, а поперечные – о деформации в осевом направлении.

Экспериментальное изучение кинематики при закрытой прошивке пуансоном с плоским торцом показывает, что в начальной стадии процесса пластические деформации наблюдаются вблизи острых кромок пуансона. Непосредственно под торцом инструмента образуется зона затрудненной деформации (жесткая или мертвая зона), размеры и форма которой не постоянны. В начальной стадии вдавливания пуансона с плоским торцом эта область в сечении имеет вид треугольника с углом при вершине  $\approx \frac{\pi}{2}$ , а при дальнейшем перемещении она принимает куполообразную форму.

Основным фактором, определяющим размеры этой зоны, являются условия контакт-

ного трения на торце пуансона. Исходя из минимизации мощностей деформации было доказано, что при отсутствии между инструментом и жестко-пластической средой трения область затрудненной деформации должна иметь вид конуса с углом между основанием и сторонами  $\frac{\pi}{4}$ .

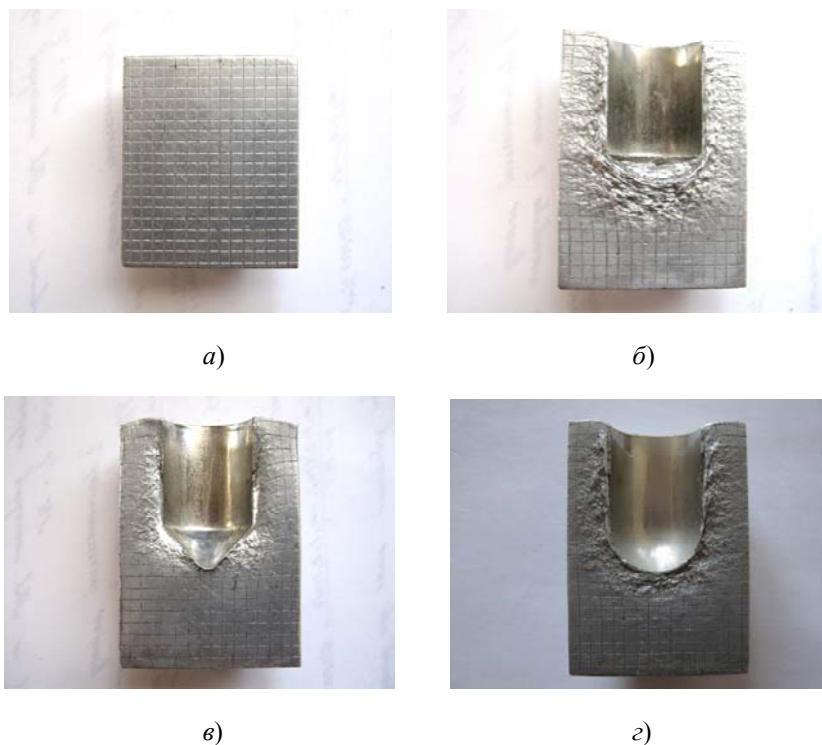


Рис. 1. Изменение делительной сетки на заготовках из алюминия марки АД0:  
*a* – исходный образец с делительной сеткой; *б* – образец после деформации плоским пуансоном; *в* – образец после деформации коническим пуансоном; *г* – образец после деформации сферическим пуансоном

Проведенные исследования показали, что размеры зоны затрудненной деформации существенно зависят от диаметров пуансона и заготовки, т. е. от степени деформации. При вдавливании пуансона в заготовку происходит сдвиг (скольжение) материала пластической зоны по контуру зоны затрудненной деформации. Границей между ними является линия скольжения. Размеры пластической области остаются практически постоянными, пока ее высота не станет соизмеримой с толщиной дна деформируемой заготовки. Некоторое увеличение высоты очага пластической деформации по мере углубления пуансона объясняется упрочнением заготовки. Размеры пластической зоны, полученные в результате сравнения искажения координатной сетки, показывают, что ее размеры меняются с изменением степени деформации. При  $\varepsilon = 25\%$  форма пластической зоны близка к сфере, а при увеличении  $\varepsilon$  нижняя граница этой зоны выпрямляется с одновременным уменьшением ее высоты.

При внедрении пуансонов со сферической рабочей поверхностью (радиус скругления  $R_c = \frac{d}{2}$ ) зона затрудненной деформации практически отсутствует, однако полного выдавливания плакирующего материала из-под торца инструмента не происходило при глубине равной  $5d$  и более. Плакирующий материал удерживается в зоне, прилегающей к оси пуансона, и расходится по мере углубления пуансона.

А. Д. Томленов [11] считает, что перед сферическим торцом имеется небольшая область затрудненной деформации в виде конуса с прямым углом при вершине. Этим, очевидно, можно объяснить, что плакирующий слой вблизи оси пуансона имеет увеличенную толщину.

Экспериментальное изучение характера течения материала при прошивке с плакированием пуансонами с конической рабочей поверхностью показывает, что зона затрудненной деформации образуется при угле пуансона  $2\alpha = 120^\circ$  и выше. При угле  $2\alpha = 90^\circ$  имеется небольшой глубины зона, располагающаяся у края конической поверхности пуансона, в ней находится плакирующий материал, расходуемый на формирование поверхности покрытия. При угле  $2\alpha = 60^\circ$  происходит интенсивное выдавливание плакирующего слоя из-под торца пуансона, и при глубине прошивки более  $1,25d$  сплошность покрытия нарушается.

В табл. 1–3 приведены данные по высоте очага деформации (пластическая зона и зона заторможенной деформации) при деформировании инструментом с различной формой рабочей поверхности. Высота пластической зоны для пуансонов с конической и сферической рабочей поверхностью измерялась от наиболее выступающей точки рабочей поверхности инструмента до плоскости, перпендикулярной оси заготовки и проходящей через точку, в которой искажение делительной сетки отсутствует.

Таблица 1

**Влияние радиуса скругления пуансона с плоским торцом на высоту очага деформации при прошивке алюминиевых заготовок с плакированием порошковым оловом ПО2**

Радиус скругления $R_C$ , мм	0	1,5	2,5	4	6	10
Высота очага деформации $h$ , мм	19	16,5	14,5	12	8	6

Таблица 2

**Влияние угла наклона образующих пуансона с конической рабочей частью на высоту очага деформации при прошивке алюминиевых заготовок с плакированием порошковым оловом ПО2**

Угол конуса $2\alpha$ , град	180	150	120	90	60
Высота очага деформации $h$ , мм	16	14,5	12	5,5	2

Таблица 3

**Зависимость степени деформации на высоту очага деформации при прошивке алюминиевых заготовок с плакированием порошковым оловом ПО2**

Диаметр пуансона $d$ , мм	15	20	25	30	35	
Отношение $\frac{d}{D}$	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	
Степень деформации $\varepsilon$ , %	14	25	39	56	77	
Высота очага деформации $h$ , мм	Пуансон с плоским торцом $R_C = 0,1d$	15,5	16	18	17,5	15,5
	С конической рабочей частью $2\alpha = 90^\circ, R_C = 0,1d$	5	5,5	6	5,5	5

На рис. 2 представлена зависимость высоты очага от отношения  $\frac{d}{D}$  при прошивке пуансоном с плоским торцом. Экспериментальная кривая 1 построена для заготовок из алюминия АД0 диаметром  $D = 40$  мм с применением в качестве плакирующего материала олова ПО2. Некоторое расхождение расчетной зависимости (кривая 2), получаемой по формуле (1), объясняется тем, что формула учитывает влияние степени деформации, в то время как прочностные и реологические свойства основного и плакирующего металлов, а также контактное трение в формуле не учитывались. На рис. 2 (кривая 3) расчетная зависимость построена по формуле (7.68) М. В. Сторожева [8, с. 313], относительные размеры очага деформации по которой определяются выражением

$$\frac{h}{d} = \sqrt{\frac{1 - \frac{d}{D}}{3 \frac{d}{D} \left(1 + \frac{d}{D}\right)}}. \quad (2)$$

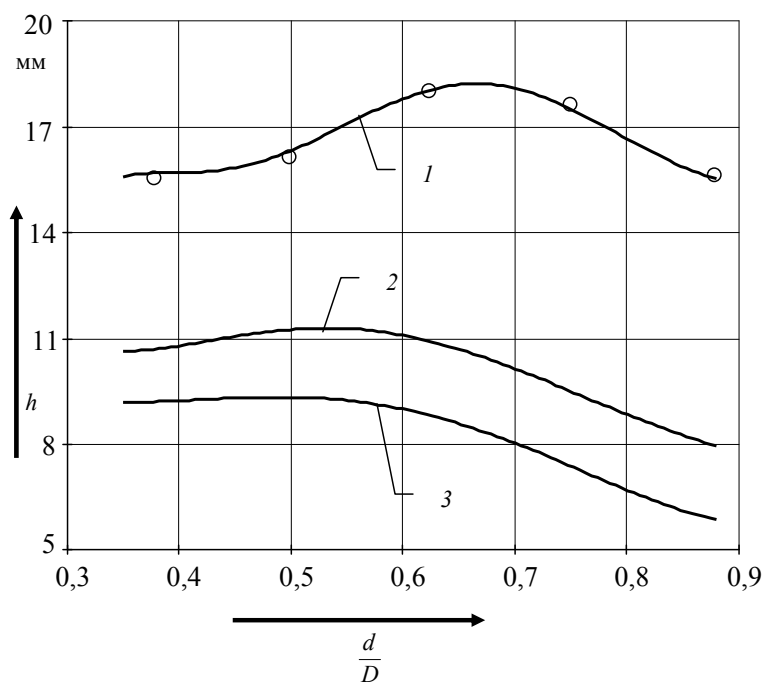


Рис. 2. Влияние отношения  $\frac{d}{D}$  на высоту  $h$  очага деформации при прошивке

с плакированием пуансоном с плоским торцом (заготовка – алюминий АД0,  $D = 40$  мм):

1 – экспериментальная зависимость; 2 – расчетная зависимость;

3 – расчетная по М. В. Сторожеву

### Заключение

В результате проведенных исследований показано, что высота очага деформации в процессе прошивки с плакированием зависит от отношения диаметра прошиваемой полости к диаметру матрицы (степени деформации), от радиуса скругления пуансона с плоским торцом, от угла наклона образующих пуансона с конической рабочей частью.

Для оценки величины высоты очага деформации наиболее точен экспериментальный метод. Из аналитических методов наиболее адекватна зависимость для высоты очага деформации, полученная на основе принципа минимальной потенциальной энергии формоизменения.

### Литература

1. Бобарикин, Ю. Л. Напряженное состояние очага деформации при плакировании прошивкой / Ю. Л. Бобарикин, В. Ф. Буренков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 2. – С. 36–44.
2. Бобарикин, Ю. Л. Экспериментальное исследование усилия плакирования закрытой прошивкой // Ю. Л. Бобарикин, В. Ф. Буренков, Н. В. Иноземцева / Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 1. – С. 19–23.
3. Буренков, В. Ф. Силовые параметры процесса плакирования при прошивке / В. Ф. Буренков, Е. Г. Сычев // Металлургия. – 1988. – Вып. 22. – С. 123–126.
4. Гелеи, Ш. Расчет усилий и энергии при пластической деформации металлов / Ш. Гелеи. – М. : Metallurgizdat, 1958. – 419 с.
5. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кабаяши. – М. : Машиностроение, 1969. – 504 с.
6. Прозоров, Л. В. Холодное выдавливание тонкостенных изделий / Л. В. Прозоров // Новые исследования в области кузнеч. технологии. Труды ЦНИИТМАШа. – М. : Машгиз, 1950, кн. 30. – С. 111–149.
7. Фаворский, В. Е. Холодная штамповка выдавливанием / В. Е. Фаворский. – Л. : Машиностроение, 1966. – 160 с.
8. Сторожев, М. В. Теория обработки материалов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
9. Перлин, И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Райтбарг. – М. : Металлургия, 1975. – 448 с.
10. Овчинников, А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах / А. Г. Овчинников. – М. : Машиностроение, 1983. – 200 с.
11. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М. : Металлургия, 1972. – 408 с.

*Получено 29.01.2015 г.*