

## ОБ ИЗМЕНЕНИИ ТОЛЩИНЫ СТенок ВЫДАВЛИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

*В. Г. Кононенко*

При изготовлении тонколистовых изделий, имеющих форму тел вращения, методами наружного выдавливания можно наблюдать изменения толщины исходной заготовки и стенок готовой детали.

Различие в толщине может быть настолько значительным, что иногда не представляется возможным использовать такие детали из-за опасения их преждевременного разрушения.

Поскольку объектами обработки методами выдавливания является немалое число деталей машин или аппаратов различных отраслей техники (корпуса радиотехнических приборов, посуда, обтекатели самолета, фары и пр.), из которых многие подвергаются значительным эксплуатационным нагрузкам, необходимо установить факторы, влияющие на характер деформации металла при выдавке.

Это в равной мере важно и для случаев намеренного выдавливания деталей с утонением стенок, как, например, при производстве посуды, что обеспечивает значительную экономию металла.

В соответствии с этим произведено исследование основных факторов, определяющих изменение толщины стенок выдавливаемых деталей.

Как известно, процесс наружного выдавливания заключается в том, что вращающаяся первоначально плоская круглая заготовка, установленная на станке подобном токарному, благодаря воздействию инструмента, вызывающего местную пластическую деформацию, превращается в оболочку. Практически это достигается тем, что в процессе вращения заготовки, начиная от прижима, осуществляется нажим по ее наружной поверхности перемещающимся вдоль радиуса инструментом — давильником, который в месте контакта вызывает локализованную пластическую деформацию, непрерывное относительное перемещение очага, который вследствие вращения заготовки и перемещения давильника приводит к необратимому осесимметричному изменению ее формы.

В большинстве случаев процесс выдавки деталей требует многократных перемещений (проходов) инструмента вдоль образующей оболочки до ее полного деформирования по формуле и размерам оправки. При этом металл заготовки вне прижима первоначально деформируется в воздухе (не опираясь на оправку), после чего обжимается по ее наружной поверхности.

В процессе обработки образующая выдавливаемой детали (промежуточная форма после прохода инструмента) может быть прямолинейной или криволинейной, выпуклостью внутрь или реже наружу детали; применяемый инструмент может отличаться по размерам и форме, особенно для деталей различных размеров; усилие выдавливания не постоянно.

Соответственно изменяются толщины стенок деталей, получаемых выдавкой.

Разрешение вопросов, связанных с обработкой металла выдавливанием, естественно, должно исходить из результатов изучения явлений, протекающих в очаге деформации.

Поскольку теоретическое изучение явлений, которые имеют место в области контакта инструмента и обрабатываемой детали, весьма сложно (что вытекает из трудностей рассмотрения задачи о необратимом деформировании пластины или оболочки контактно приложенной силой в условиях значительных центробежных полей), исследование факторов, влияющих на характер и величину изменения толщины выдавливаемых деталей, было начато экспериментальными методами.

В качестве экспериментальной установки использовался токарный станок с Т-образным суппортом, шпиндель которого имел число оборотов  $n = 720$  об/мин. и  $1440$  об/мин. Инструментом для выдавки служил давилник, рабочий конец которого был съемным, изготовлялся из подшипниковых шариков различных диаметров, а также в виде цилиндрического наконечника. Вблизи точки контакта давилника и Т-образного суппорта на поверхность рычага давилника наклеивались проволочные датчики электрического сопротивления, включаемые в мостиковую схему измерительного устройства, состоящего из: а) лампового генератора звуковой частоты, б) измерительного моста, в) усилителя у выпрямителя, г) шлейфового осциллографа. Это позволяло производить запись составляющих усилия давилника в процессе выдавливания.

Оправка имеет формулу цилиндра и характеризовалась следующими размерами: диаметр оправки  $2r_{\text{опр}} = 50$  мм, радиус сопряжения доньшка с образующей оправки  $r_c = 6$  мм, длина цилиндрической части — 150 мм, поверхность — полированная, крепление с помощью хвостовика в трехкулачковом патроне станка, материал оправки — сплав Д-1.

Эксперименты производились с оболочками из сплава АМцМЛ1, 2, диаметр заготовки которых составляет 120 мм. Более полное описание установки, инструмента, измерительного устройства и методики экспериментирования приведено в работах автора [3, 4].

1. Задачей настоящего эксперимента было выяснение влияния абсолютной величины усилия давилника на изменение толщины стенок вдоль образующей детали.

Началу эксперимента предшествовала разметка кружков, заключающаяся в том, что проведенных диаметральных линий на одинаковом расстоянии от центра делались отметки. Расстояния между отметками различных кружков были одинаковыми. После разметки заготовки устанавливались в станке и обдавливались в коническую деталь с углом конусности  $\angle \varphi = 45^\circ$  (угол выбран произвольно). Полученные оболочки характеризовались одинаковой глубиной оболочки и диаметром открытого края. Расстояние между отметками оболочек было одинаковым.

Затем ряд оболочек деформировался с сохранением прямолинейности образующих в оболочки, характеризующейся углом  $\angle \varphi = 60^\circ$ . При этом усилие деформирования оболочек было неодинаковым. Практически это достигалось следующим образом: одни оболочки деформировались усилием значительной величины в один проход инструмента, другие — усилием меньшей величины в несколько проходов.

Размер и форма рабочего конца давилника оставались без изменений: шаровой давилник  $R_g = 20,5$  мм, число оборотов шпинделя

$n = 720$  об/мин., смазка — желтое хозяйственное мыло. Последующий замер показал, что расстояния между отметками в первом случае стали большими. Сравнительно большей стала глубина деталей, что свидетельствует о различии толщин стенок деталей (табл. 1). Время деформирования деталей второй подгруппы больше времени деформирования первой.

Таблица 1

Расстояние от центра кружка до отметки	Расстояние между отметками до деформации (в мм)	Расстояние между отметками после обжатия в конус $\angle\varphi = 45^\circ$ (в мм)	Расстояние между точками после обжатия в конус $\angle\varphi = 60^\circ$ (в мм)	
			I подгруппа	II подгруппа
$R_1 = 45$ и $R_2 = 55$	$\Delta R = 10$	13,40	16,30	15,4
$R_1 = 45$ и $R_2 = 55$	$\Delta R = 10$	13,42	16,34	15,5
$R_1 = 45$ и $R_2 = 35$	$\Delta R = 10$	12,32	15,5	14,7
$R_1 = 45$ и $R_2 = 35$	$\Delta R = 10$	12,4	15,7	14,85

Сравнение изменений расстояний между отметками оболочек показывает, что выдавка деталей приложением усилия давилника большей величины (при прочих неизменных условиях) способствует удлинению металла вдоль образующей (утонению стенок оболочек).

2. Настоящий эксперимент выполнен с целью выяснения влияния на изменение толщины стенок изделия различного характера изменения составляющих усилия давилника в процессе выдавки (различного соотношения величин составляющих).

Как и в предыдущем случае опытными были размеченные конические оболочки с углом конусности  $\angle\varphi = 45^\circ$ .

Оболочки в процессе опыта деформировались в течение одного прохода инструмента до значения  $\angle\varphi = 55^\circ$  (рис. 1), но так, чтобы при одинаковом значении работы давилника (векторная сумма составляющих усилия давилника была постоянной) форма образующих переходных форм оболочек была различной: первые сохраняли прямолинейный вид образующей, вторые имели образующие петлеобразной формы вогнуто-стью внутрь детали.

Направление движения давилника — от ребра оправки к открытому краю детали.

Осциллограммы составляющих усилия давилника представлены на рисунках 2 и 3.

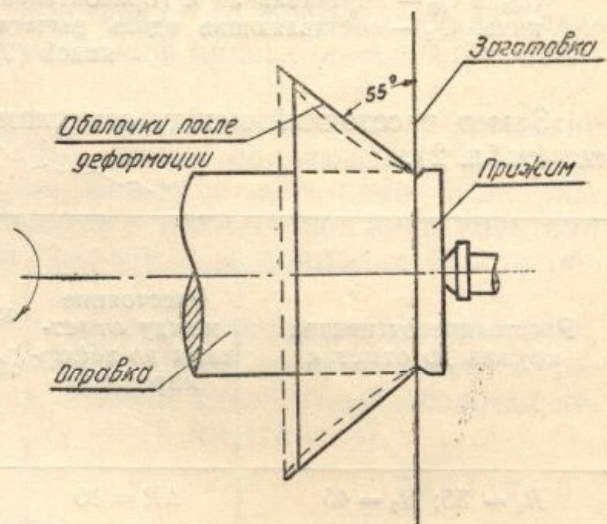


Рис. 1.

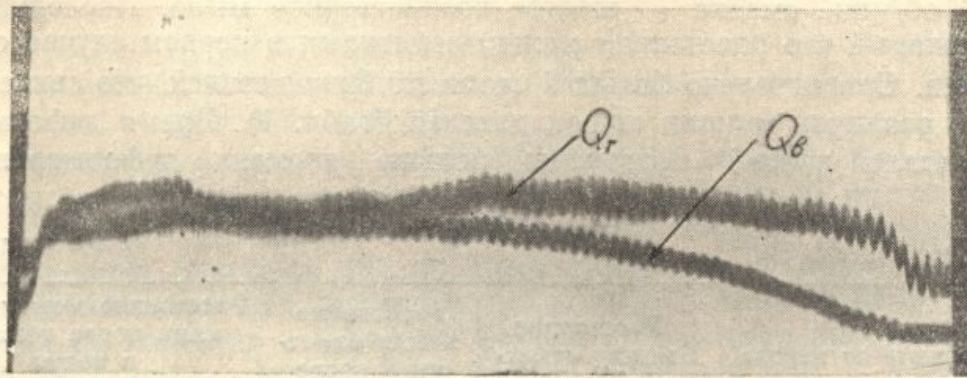


Рис. 2.

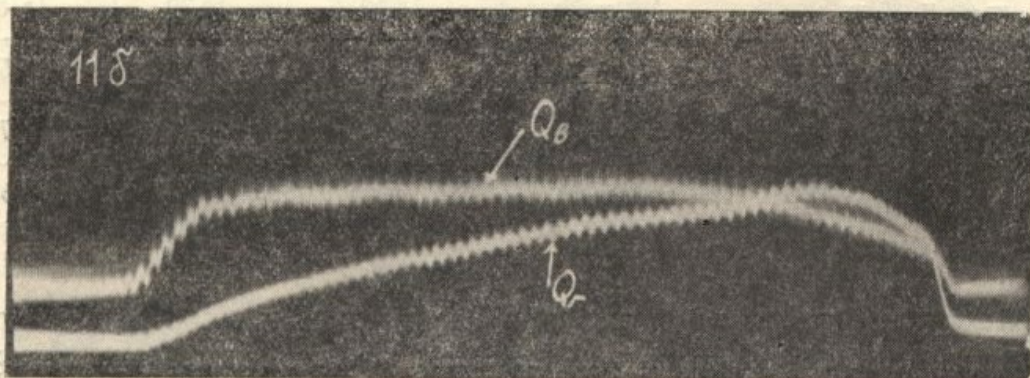


Рис. 3.

( $Q_v$  и  $Q_r$  — вертикальная и горизонтальная составляющие усилия давилника,  $Q_n$  — составляющая вдоль рычага давилника, оставалась постоянной (2).

Замер расстояний между отметками показал их различное изменение (табл. 2).

Таблица 2

Расстояние от центра кружка до отметки	Расстояние между отметками до деформирования	Расстояние между отметками после обжатия в конус $\angle\varphi = 45^\circ$	Расстояние между отметками после обжатия до $\angle\varphi = 55^\circ$	
			Оболочка с прямой образующей	Оболочка с петлеобразующей
$R_1 = 35; R_2 = 45$	$\Delta R = 10$	14,40	15,8	16,42
$R_1 = 35; R_2 = 45$	$\Delta R = 10$	14,26	15,7	16,38
$R_1 = 45; R_2 = 55$	$\Delta R = 10$	14,84	16,7	18,0
$R_1 = 45; R_2 = 55$	$\Delta R = 10$	14,90	16,8	18,1

Поскольку условия деформирования оставались прежними, а переменными были составляющие давилника, как это видно из приведенных осциллограмм, естественно заключить, что различный характер изменения составляющих усилия давилника (различное их соотношение) определяет деформацию металла в месте контакта инструмента и оболочки или, что то же самое, распределение толщи стенок деталей при выдавке.

При этом, если образующая переходной формы детали после прохода инструмента остается прямолинейной или приближается к таковой (см. соответствующие этому случаю осциллограммы), то утонение стенок деталей или минимально или вовсе отсутствует, и, наоборот, если образующая криволинейна выпуклостью внутрь детали — имеет место значительное утонение металла изделия.

Посадка металла увеличивается (утонение стенок уменьшается) при движении давилника от открытого края к ребру оправки, что хорошо известно из практики давилных работ и не требует специальной проверки.

Учитывая все это, опытный давилщик в процессе выдавки перемежает движения давилника от открытого края изделия к основанию детали, и наоборот. Это способствует сохранению исходной толщины металла и исключает холостые ходы, что повышает производительность выдавки.

Интенсивной посадкой металла перемещением давилника от открытого края детали к ребру оправки можно добиться даже некоторого утолщения стенки детали.

3. Экспериментальная проверка подтвердила наличие влияния размеров и формы инструмента на распределение деформаций в области контакта давилника и детали.

В качестве экспериментальных были приняты, как и прежде, размеченные конические оболочки из сплава АМцМЛ1, 2 из заготовок  $ДО = 120$  мм, число оборотов цилиндра станка  $n = 720$  об/мин., экспериментальная установка и методика экспериментирования — согласно экспериментам I и II. Переменными были размер и форма рабочей части давилника.

А. Рабочая часть давилника выполнена по форме цилиндра диаметром  $2R_d = 12$  мм и  $2R_d = 29$  мм, длиной цилиндрической (рабочей) части  $= 50$  мм [3].

Размеченные и обдавленные до начала эксперимента конические оболочки характеризовались  $\angle \varphi = 35^\circ$ , имели одинаковые глубину и диаметр открытого края. Расстояния между отметчиками были равными. Затем оболочки деформировались в один проход инструментами с различными рабочими частями и сохранением прямолинейности образующих в оболочки с  $\angle \varphi = 40^\circ$ .

Последующий замер изменений расстояний показал, что оболочки, сформированные давилником, рабочий конец которого имел  $2R_d = 29$  мм, имели меньшие изменения, нежели аналогичные оболочки после прохода инструмента размером  $2R_d = 12$  мм (табл. 3).

Таблица 3

№ заг.	Расстояние от центра кружка до отметок	Расстояние между отметками до деформации	Расстояние между отметками после обжатия в конус $\angle \varphi = 35^\circ$	Расстояние между отметками после обжатия в конус с $\angle \varphi = 40^\circ$	
				I подгруппа $2R_d = 29$ мм	II подгруппа $2R_d = 12$ мм
1	$R_1 = 45; R_2 = 55$	$\Delta R = 10$	11,50	12,3	13,0
2	$R_1 = 45; R_2 = 55$	$\Delta R = 10$	11,54	12,42	13,2
3	$R_1 = 35; R_2 = 45$	$\Delta R = 10$	11,42	11,87	12,4
4	$R_1 = 35; R_2 = 45$	$\Delta R = 10$	11,38	11,8	12,4

Б. Давильник с рабочей частью по форме шара диаметром  $2R_d = 20,5$  мм и  $2R_d = 29$  мм. Подготовка оболочек к эксперименту, экспериментальная установка и методика экспериментирования оставались прежними, лишь оболочки характеризовались  $\angle \varphi = 45^\circ$ . Деформированием осуществлялось в один проход инструмента до  $\angle \psi = 52^\circ$ . Изменение расстояний между отметками сведены в таблицу 4.

Таблица 4

№ заг.	Расстояние от центра кружка до отметок	Расстояние между отметками до деформации	Расстояние между отметками после обжатия в конус $\angle \varphi = 45^\circ$	Расстояние между отметками после обжатия в конус $\angle \varphi = 52^\circ$	
				I подгруппа $2R_d = 20,5$	II подгруппа $2R_d = 29$ мм
1	$R_1 = 45; R_2 = 55$	$\Delta R = 10$	12,52	14,1	13,8
2	$R_1 = 45; R_2 = 55$	$\Delta R = 10$	12,5	14,0	13,8
3	$R_1 = 35; R_2 = 45$	$\Delta R = 10$	11,6	13,2	12,82
4	$R_1 = 35; R_2 = 45$	$\Delta R = 10$	11,65	13,8	12,78

Как видно из таблиц 3 и 4, увеличение радиуса кривизны давилника способствует уменьшению изменений расстояний между отметками в радиальном направлении, то есть вызывает меньшее утонение металла вдоль образующей детали.

В. В' практике давилных работ наиболее часто применяются да-

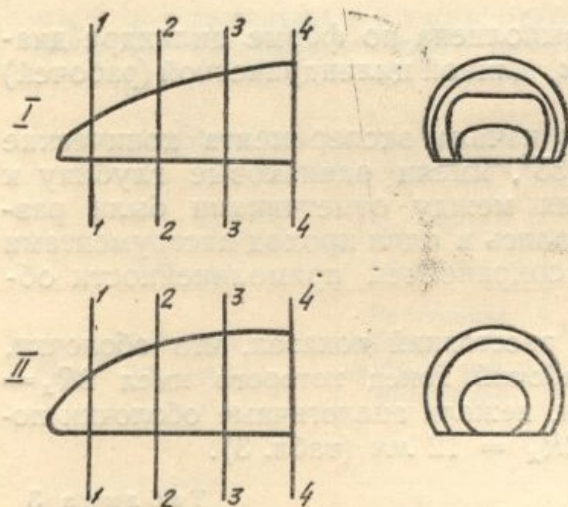


Рис. 4.

вилники по форме челнока. Их рабочая часть имеет переменные размер и форму поперечных и продольных сечений инструмента. Такие давилники считаются универсальными, так как применяются при выдавке деталей различной формы и размеров (рис. 4).

Эксперимент проводился аналогично предыдущим. Однако деформирование осуществлялось давилниками по форме челнока с различными по форме и размерам поперечными и продольными сечениями. Изменение расстояний между отметками сведены в таблице 5.

Таким образом, совершенно ясно, что увеличение радиуса кривизны давилника (табл. 3, 4, 5) вызывает меньшее утонение металла выдавливаемых деталей, способствует посадке металла в поперечном сечении изделия.

Универсальность приведенных давилников заключается в том, что при необходимости ими возможно деформировать металл различными участками их рабочей части, отличающихся, как указано, размерами и формой (поворотом или перемещением давилника вдоль оси)<sup>1</sup>. Так, если металл оболочки тонкий, то пользуются более пологой частью

<sup>1</sup> Это позволяет производить выдавку деталей различных размеров и формы.

Таблица 5

№ заг.	Расстояние от центра кружка до отметок	Расстояние между отметками	Расстояние между отметками после обжатия в конус $\leq \varphi = 35^\circ$	Расстояние между отметками после обжатия в конус $\leq \varphi = 42^\circ$	
				Оболочки, сформированные давилником № 1	Оболочки, сформированные давилником № 2
1	$R_1 = 45; R_2 = 55$	$\Delta R = 10$	11,4	12,7	13,8
2	$R_1 = 35; R_2 = 45$	$\Delta R = 10$	11,5	12,8	14,0

давилника, способствующей большей посадке, хотя это и требует большого усилия давилника, наоборот, если деталь более толстая, то нажим давилником осуществляется частью, радиусы кривизны которой меньше. Но чтобы предотвратить нежелательное утонение, пользуются давилником больших абсолютных размеров, но с относительно (по отношению к радиусам кривизны детали) меньшими радиусами кривизны инструмента в его продольных и поперечных сечениях.

Специальных опытов для доказательства не приводим, так как это хорошо подтверждается и заводской практикой давилных работ. Полученные результаты экспериментов повторимы, качественно охватывают влияние важнейших факторов на характер деформации металлов и вполне удовлетворительно объясняются на основании гипотезы лунок обработки металлов выдавливанием [3, 4].

Согласно гипотезе лунок, выдавливание деталей представляется как последовательное вмятие — лункообразование металла заготовки под давилником, что при условии вращения детали и перемещения давилника приводит к общему осесимметричному формоизменению плоской заготовки в полое изделие.

В самом деле, рассмотрим схему нагружения оболочки и характер деформации металла в момент образования первой лунки и ее развитие в течение оборота шпинделя станка.

В первый момент нажатия давилником картина формоизменения будет такой, как показано на рисунке 5, что хорошо подтверждается на свинцовых оболочках и других пластичных материалах [3]. В этом случае дуга  $abc$  укорачивается до величины хорды  $ac$ , что возможно при утолщении металла (посадке) в тангенциальном направлении. С другой стороны, отрезок  $a_1c_1$  превращается в дугу  $a_1b_1c_1$ .

Поскольку элемент металла под давилником претерпевает деформацию растяжения и сжатия одновременно, суммарная деформация будет несколько отличной от моделированной на схеме, а именно: в направлении растяжения (радиальном) будет несколько меньше, так как металл больше деформируется в направлении сжатия, способствующем пластическому течению (в тангенциальном направлении). Вне точки контакта с инструментом оболочка деформируется упруго, что легко проследить, если нагружать давилником после нанесения на ее поверхность слоя хрупкого лака (смеси парафина и канифоли) [3].

Из рисунков 5 и 6 видно, что увеличение радиуса кривизны давилника при том же значении величины прогиба  $f$  вызывает меньшее относительное изменение длины отрезка  $a_1b_1$ , что и подтверждается экспериментально.

Аналогично можно рассмотреть схему образования лунки и канавки при нажатии давилником по форме шара, цилиндра и пр. и получить

непротиворечащие результаты. Конечно, границы зоны необратимого деформирования, принятые на основании геометрического интерпретирования касания инструмента и оболочки, установлены приближенно (точки  $a_1, a, c_1, c$ ), что требует уточнения. Однако даже такое предположение для случая нагружения давилником по форме шара позволяет произвести теоретическое обобщение явлений, происходящих в лунке, и получить зависимость, связывающую параметры инструмента и детали,

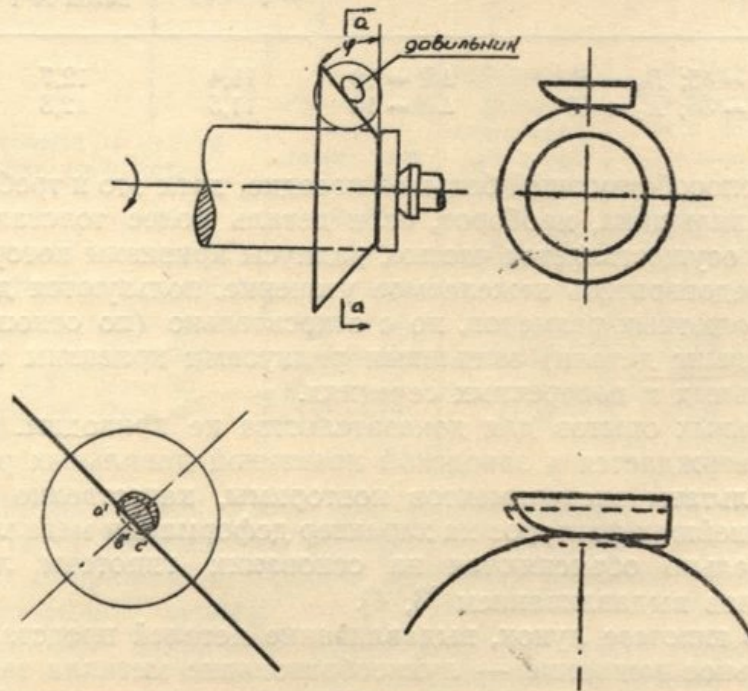


Рис. 5.

режимы выдавки (подачу, глубину вмятин — обжатия в течение прохода инструмента, потребное число оборотов шпинделя за проход давилника).

Из полученных выражений [4], а именно:

$$\sigma_a = 0,25 \frac{Q_r n}{\pi l_{ю} s} \text{ и}$$

$$f = \frac{L}{\cos \varphi} = R_d - \sqrt{R_d^2 - a^2},$$

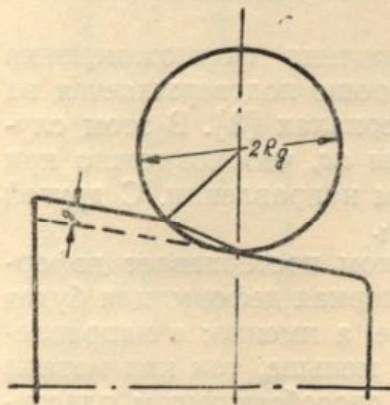


Рис. 6.

где  $\sigma_a$  — напряжение на границе лунки,  $f$  — прогиб,  $a$  — радиус лунки,  $s$  — толщина металла,  $L$  — подача за один оборот шпинделя,  $R_d$  — радиус давилника,  $l_{ю}$  — проекция пути движения давилника на ось вращения детали,  $\angle \varphi$  — угол конусности, следует, что конфигурация изделия, величина прогиба ( $a$ , стало быть, соотношение деформаций в лунке) зависят от размеров инструмента, что величина прогиба  $f$  зависит от усилия давилника и т. д., что и подтверждается группой специальных экспериментов [3], согласуется с результатами экспериментов, приведенных в настоящей работе, и нашло полное подтверждение в работе ХАИ и Харьковского завода транспортного машиностроения при разработке метода выдавливания деталей без утонения стенок.

где  $\sigma_a$  — напряжение на границе лунки,  $f$  — прогиб,  $a$  — радиус лунки,  $s$  — толщина металла,  $L$  — подача за один оборот шпинделя,  $R_d$  — радиус давилника,  $l_{ю}$  — проекция пути движения давилника на ось вращения детали,  $\angle \varphi$  — угол конусности, следует, что конфигурация изделия, величина прогиба ( $a$ , стало быть, соотношение деформаций в лунке) зависят от размеров инструмента, что величина прогиба  $f$  зависит от усилия давилника и т. д., что и подтверждается группой специальных экспериментов [3], согласуется с результатами экспериментов, приведенных в настоящей работе, и нашло полное подтверждение в работе ХАИ и Харьковского завода транспортного машиностроения при разработке метода выдавливания деталей без утонения стенок.



Следовательно, в результате работы экспериментально установлены главные факторы, определяющие характер деформации металла в лунке (то есть условия изменения толщины изделия вдоль образующей, дан анализ их влияния, исходя из гипотезы лунок обработки металлов выдавливанием, а также сделана попытка аналитического обобщения результатов экспериментов, доказывающая целесообразность и возможность нахождения более общей зависимости формоизменения металла и факторов, его определяющих, что имеет большое практическое значение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баркая В. Ф. Исследование обработки листового металла выдавливанием, 1951.
2. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением, Металлургиздат, 1947.
3. Кононенко В. Г. Исследование токарно-давильных процессов, 1948.
4. Кононенко В. Г. К вопросам выдавливания деталей из листового металла, Труды ХАИ, вып. 15, 1954.
5. Б. В. Розанов и Д. С. Львов: Давильные работы, Машгиз, 1951.
6. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов, Оборонгиз, 1952.
7. Weiss E. The technique of metal spinning, Machinery N. I., vol. 52, № 9, 1946.
8. Holinger C. I. Design Considerations in metal spinning, Machinist, vol. 90, № 33, 1946.
9. Machinery (L.), 84, (2169), 1232—1235, 1954.