

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

---

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИБКИ  
ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ  
ПРИ ШТАМПОВКЕ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ**

---

---

САМАРА 1995

Государственный комитет Российской Федерации  
по высшему образованию

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИБКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ  
ПРИ ШТАМПОВКЕ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

Методические указания

Самара 1995

Составитель Г.М.Лебедев

УДК 621.96/98(075.8)

Исследование процесса гибки листовых деталей при штамповке эластичной средой: Метод. указания /Самар.гос.аэрокосм. ун-т; Сост. Г.М.Лебедев. Самара, 1995. 24 с.

Изложены сведения о штамповке эластичной средой, напряженно-деформированном состоянии материала заготовки при изгибе, даны определение деформации и упругого пружинения при изгибе, вопросы проектирования технологических процессов гибки-формовки, методика исследования процессов.

Рекомендуются студентам специальностей 1301, 1306, 1307 технологической специализации. Выполнены на кафедре ПЛА.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензент Г.В.Смирнов

**Ц е л ь   р а б о т ы:** изучение процесса гибки деталей эластичной средой; закрепление знаний, полученных на лекциях; определение расчетным путем технологических параметров процесса гибки деталей типа профиля П-образного сечения с двумя прямолинейными бортами; определение зависимости величины давления эластичной среды от высоты загибаемого борта и от толщины штампуемого материала, а также зависимости угла пружинения от величины углагиба и радиусагиба построение графиков зависимостей технологических параметров; изучение устройства оборудования и инструмента для штамповки; экспериментальное определение технологических параметров процесса гибки, построение графиков зависимостей технологических параметров, сравнение их с расчетными зависимостями.

## **1. ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Ознакомиться с методикой определения технологических параметров процесса штамповки – гибки и формовки деталей эластичной средой и методикой проведения эксперимента; изучить правила техники безопасности и охраны труда при работе на гидравлическом прессе.

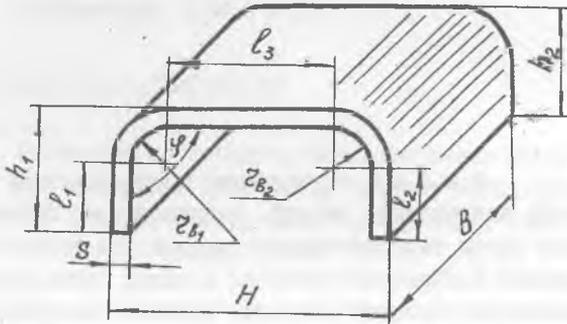
2. Рассчитать параметры техпроцесса гибки эластичной средой двух прямолинейных бортов плоской детали типа профиля П-образного сечения.

Размеры детали взять из табл. 1.1 (варианты задания выдаются преподавателем). При выполнении этой части лабораторной работы необходимо: выполнить образмеренный эскиз детали; начертить схемы процесса штамповки-гибки (рис. 1,б, рис. 2,а); определить размеры заготовки; рассчитать требуемое давление эластичной среды и минимальную высоту отгибаемого борта при максимальном давлении в эластичной подушке на лабораторном прессе.

Ориентировочные механические характеристики листовых материалов:

Таблица I.I

Размеры деталей с двумя отогнутыми прямолинейными бортами  
и механические характеристики листовых материалов



Вариант	Размер, мм			Размер, град.		Марка материала
	$h_1 = h_2$	$r_{B1}$	$r_{B2}$	S	$\varphi$	
1	I4	I	5	1,0 1,5 2,0	90	Д16АМ
2	I6	3	8			
3	I6	3	8			
4	I4	I	5	1,0 1,5 2,0	90	АМцМ
5	I6	3	8			
6	I6	3	8			
7	I4	I	5	1,0 1,5 2,0	90	АМг1М
8	I6	3	8			
9	I6	3	8			
10	I4	I	5	1,0 1,5 2,0	90	АМг6М
11	I6	3	8			
12	I6	3	8			
13	I4	I	5	1,0 1,5 2,0	90	В95АМ
14	I6	3	8			
15	I6	3	8			
16	I4	I	5	1,0 1,5 2,0	90	Сталь 08кп
17	I6	3	8			
18	I6	3	8			

Вариант	Размер, мм			Размер, град		Марка материала
	$h_1 = h_2$	$r_{B1}$	$r_{B2}$	S	$\varphi$	
19	I4	I	5	I,0 I,5 2,0	90	Сталь 20
20	I6	3	8			
21	I6	3	8			
22	I4	I	5	I,0 I,5 2,0	90	Л68
23	I6	3	8			
24	I6	3	8			
25	I4	I	5	I,0 I,5 2,0	90	МІ
26	I6	3	8			
27	I6	3	8			

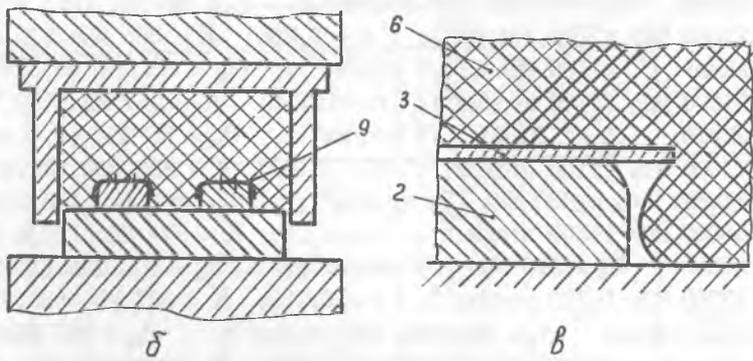
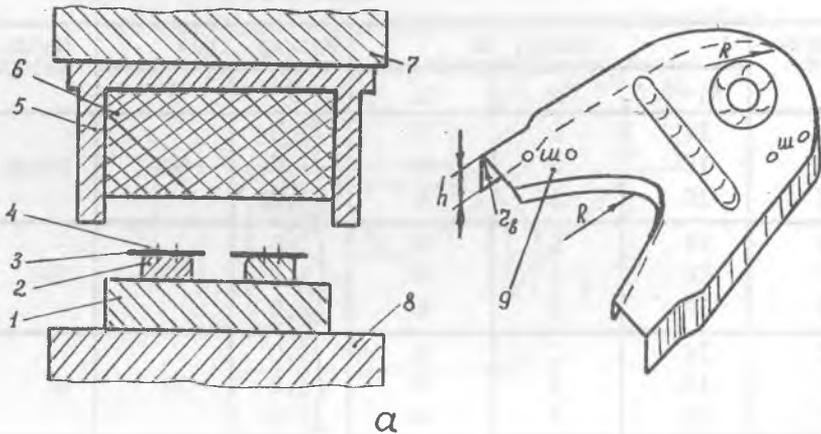
ДІ6АМ:  $\sigma_b = 200$  МПа (20 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{02} = 95$  МПа (9,5 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 $E = 71000$  МПа (7100 кгс/мм<sup>2</sup>);  $n = 0,236$ ;  $K = 365$  МПа (35 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 АМШМ:  $\sigma_b = 135$  МПа (13,5 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{02} = 55$  МПа (5,5 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 $E = 71000$  МПа (7100 кгс/мм<sup>2</sup>);  $n = 0,255$ ;  $K = 247$  МПа (24,7 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 АМГІМ:  $\sigma_b = 130$  МПа (13 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{02} = 55$  МПа (5,5 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 $E = 71000$  МПа (7100 кгс/мм<sup>2</sup>);  $n = 0,242$ ;  $K = 229$  МПа (22,9 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 АМГЕМ:  $\sigma_b = 330$  МПа (33 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{02} = 165$  МПа (16,5 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 $E = 68000$  МПа (6800 кгс/мм<sup>2</sup>);  $n = 0,23$ ;  $K = 574$  МПа (57,4 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 В95АМ:  $\sigma_b = 210$  МПа (21 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{02} = 100$  МПа (10 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 $E = 67000$  МПа (6700 кгс/мм<sup>2</sup>);  $n = 0,239$ ;  $K = 387$  МПа (38,7 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 сталь 08кп:  $\sigma_b = 380$  МПа (38 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{02} = 240$  МПа (24 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 $E = 200000$  МПа (20000 кгс/мм<sup>2</sup>);  $n = 0,156$ ;  $K = 590$  МПа (59 кгс/мм<sup>2</sup>);

сталь 20:  $\sigma_b = 480$  МПа (48 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{02} = 300$  МПа (30 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 $E = 200000$  МПа (20000 кгс/мм<sup>2</sup>);  $n = 0,161$ ;  $K = 748$  МПа (74,8 кгс/мм<sup>2</sup>);

Л68:  $\sigma_b = 330$  МПа (33 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{02} = 100$  МПа (10 кгс/мм<sup>2</sup>);  
 $E = 100000$  МПа (10000 кгс/мм<sup>2</sup>);  $n = 0,321$ ;  $K = 648$  МПа (64,8 кгс/мм<sup>2</sup>);

МІ:  $\sigma_b = 240$  МПа (24 кгс/мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{02} = 70$  МПа (7 кгс/мм<sup>2</sup>);  $E = 110000$  МПа (11000 кгс/мм<sup>2</sup>);  $n = 0,327$ ;  $K = 488$  МПа (48,8 кгс/мм<sup>2</sup>).

3. Подсчитать величины потребного давления эластичной среды для изгиба бортов различной высоты и различной толщины материала. Постро-



Р и с. 1. Схема процесса гибки-формовки эластичной средой на гидропрессе: а - исходное положение; б - положение в конце формовки; в - отштампованная деталь из листовой заготовки; 9 - затекание эластичной среды под борт большой жесткости

ить зависимости давления от высоты борта  $q = f(h)$  (при  $S = const$ ) и давления от толщины материала  $q = f(S)$  (при  $h = const$ ). На каждом графике обозначить зависимость, марку материала и постоянную величину.

4. Подсчитать величины углов пружинения для изгиба бортов на различные углы (75, 85, 95, 105°) и различные радиусы изгиба (1, 3,

5, 8 мм); построить зависимости угла пружинения от угла изгиба (угла изогнутого участка детали)  $\gamma = f(\alpha)$  (при  $S = \text{const}$ ,  $r_g = \text{const}$ ) и угла пружинения от радиуса изгиба  $\gamma = f(r_g)$  (при  $S = \text{const}$ ,  $\alpha = \text{const}$ ). На каждом графике обозначить зависимость, марку материала и постоянную величину.

5. Провести эксперименты по проверке теоретических зависимостей  $q = f(h)$ ;  $q = f(S)$ ;  $\gamma = f(\alpha)$ ;  $\gamma = f(r_g)$ . Полученные экспериментальным путем значения нанести на графики, сравнить с теоретическими зависимостями, проанализировать и сделать выводы.

6. Оформить отчет по лабораторной работе.

7. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ ШТАМПОВКИ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ И ЕГО ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

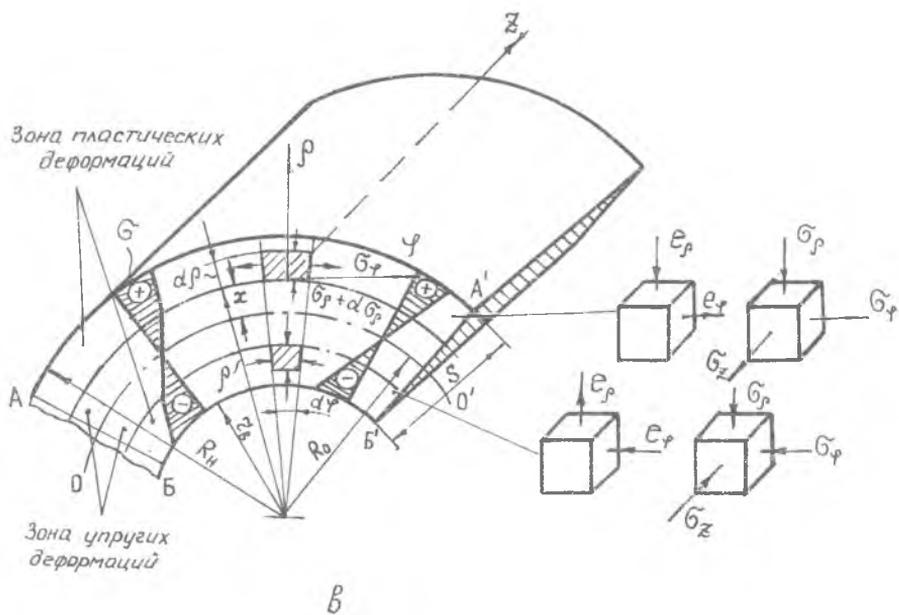
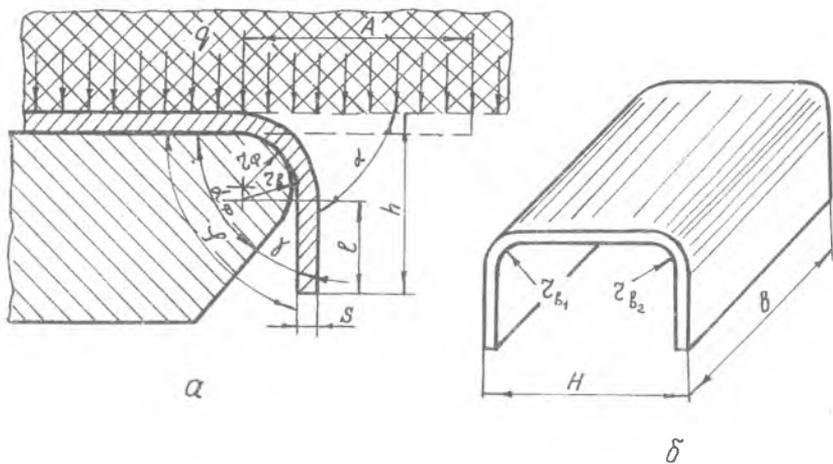
### 2.1. Общие сведения о штамповке эластичной средой

Процессы штамповки – гибки и формовки наиболее широко применяются для изготовления деталей каркаса планера летательного аппарата из листов, профилей и тонкостенных труб.

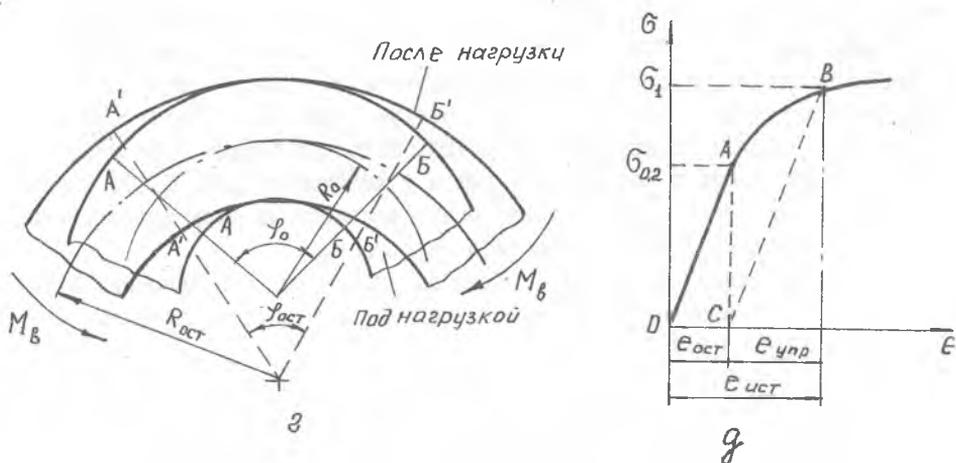
Большую номенклатуру составляют плоские детали, главным образом из алюминиевых сплавов: нервюры, шпангоуты и их детали, диафрагмы, стенки, перегородки, полупатрубки и др. Конструктивно эти детали представляют собой плоские стенки с прямолинейными и криволинейными бортами по краям, с отбортованными отверстиями, с элементами жесткости, выполненными в виде рифтов и глухих полостей. Отличительными чертами таких деталей являются: большие размеры (длина до 2...3 м), малая жесткость, сравнительно небольшая деформация заготовки при изготовлении детали [1].

Значительные габариты этих деталей при изготовлении их в инструментальных штампах вызывают большие затраты материала и связанную с этим высокую стоимость штампов. Наиболее экономически целесообразным методом изготовления деталей этой группы в условиях мелкосерийного и серийного производства является штамповка эластичной средой на гидравлических прессах.

В штамповку эластичной средой в зависимости от необходимого формоизменения заготовки и ее напряженно-деформированного состояния входят разные операции: для образования плоского прямолинейного борта –



Р и с. 2.



Р и с. 2 (окончание). Штамповка-гибка эластичной средой плоских прямолинейных бортов: а - схема штамповки; б - отштампованная деталь типа профиля П-образного сечения; в - напряжения и деформации при гибке; г - остаточный радиус  $R_{ост}$  при гибке; д - определение остаточной деформации при растяжении

гибка, борта по вогнутому контуру (или контуру отверстия) - отбортовка, по выпуклому контуру - вытяжка. Образование рифтов жесткости, глубоких выштамповок (круглых, овальных и других видов) относится к операции формовки. В целом этот комплекс процессов в производственных условиях называется формовкой. Для формовки листовых деталей в качестве эластичных сред чаще применяются натуральные резины и синтетические полиуретановые каучуки различной твердости.

Технологические возможности и методы расчета основных формообразующих процессов листовой штамповки деталей эластичной средой разработаны Е.И.Исаченковым [2].

### 2.2. Сущность процесса гибки-формовки деталей из листовых заготовок эластичной средой

Схема процесса гибки-формовки эластичной средой (резиной, полиуретаном) на гидропрессе представлена на рис. 1, а, б. Формовочные пуансоны или блоки (формблоки) 2 устанавливаются на подштамповую плиту I пресса (рис. 1, а). На формблоки кладутся и фиксируются по шпилькам 4 плоские заготовки (развертки) 3. При перемещении ползуна 7 и контей -

нера 5 вниз эластичная подушка. 6 замыкается в пространстве между стенками контейнера 5 и подштамповой плиты I. Давление эластичной среды возрастает, и заготовки деформируются по профилю формблоков. При этом эластичная среда, обтекая контуры формблоков 2, загибает борта, производит отбортовку отверстий, подсечку бортов, формирует углубления в стенках деталей 9 – рифты и жесткости (рис. I,б). Таким образом, формобразование деталей осуществляется за счет изгиба, растяжения и посадки (сжатия) листовой заготовки.

При выполнении формовки деталей на спецблоках одновременно можно производить вырезку заготовок по контуру и формовку, пробивку и отбортовку отверстий.

На конечной стадии процесса, когда заготовка полностью обжимается по формблоку, давление эластичной среды достигает максимального значения и составляет 10...100 МПа (100...1000 кгс/см<sup>2</sup>). Как видно из схемы, эластичная подушка вместе с контейнером является универсальной матрицей, единственной специальной деталью штампа является формблок. Сменная оснастка (формблоки) изготавливается из балени-та, цинка, стали и других материалов.

Преимущества формовки эластичной средой – дешевизна и простота изготовления оснастки, короткие сроки подготовки новых производств, высокая производительность (за один ход пресса формируются одновременно несколько различных деталей), простота обслуживания пресса – обусловили широкое применение этого метода при изготовлении деталей из листовых заготовок.

К недостаткам следует отнести невозможность получения мелких рельефов и малый допустимый предел отношения высоты борта  $h$  к радиусу кривизны детали в плане  $R$  при формовке вогнутых и выпуклых бортов. При формовке бортов с малыми радиусами кривизны контура могут появиться разрывы (на вогнутых участках) или складки (на выпуклых участках).

При штамповке деталей с малой высотой бортов резина может, не отгибая полностью бортов, частично обтекать их, в результате чего получается неполный загиб (рис. I,в). Наименьшая высота бортов, которую можно получить гибкой формовкой, для деталей из различных материалов определяется экспериментально. Она зависит от внутреннего радиуса изгиба  $r_a$ , толщины  $S$ , материала заготовки, давления эластичной среды и ее физико-механических свойств.

Формовка деталей эластичной средой в ряде случаев осуществляется с последующей ручной доводкой (посадкой рифтов, правкой, обрезкой и пр.).

### 2.3. Напряженно-деформированное состояние заготовки при изгибе

Рассмотрим сущность процесса гибки. К гибке относятся все процессы формообразования деталей одинарной кривизны, основанные на упругопластическом изгибе внешними нагрузками листовой заготовки [3, 4].

При нагружении лежащей на формблоке заготовки распределенной нагрузкой эластичной среды с давлением  $q$  края плоской заготовки начинают изгибаться (рис. 2, а). В зонах изгиба возникают вначале упругие, а затем пластические деформации, каждый край заготовки получает большой изгиб, который в основном сохраняется и после снятия внешней нагрузки. Бортики детали несколько отпружинивают от стенок формблока с изменением угла и радиуса изгиба. На рис. 2, б показана штампованная деталь типа профиля П-образного сечения, линии перегиба бортов — прямолинейные.

На рис. 2, в показано напряженно-деформированное состояние заготовки и распространение напряжений и деформаций по высоте сечения заготовки.

В процессе изгиба слои  $AA'$  металла (рис. 2, в), расположенные на наружной стороне изгибаемого угла, растягиваются, удлиняясь в продольном направлении и укорачиваясь в поперечном. Слои  $BB'$ , расположенные внутри угла изгиба, сжимаются и укорачиваются в продольном направлении, одновременно растягиваясь в поперечном. Растянутая и сжатая зоны разделяются нейтральным слоем  $OO'$ , представляющим собой совокупность материальных точек, где напряжения равны нулю.

В основу теоретического анализа гибки при малых и больших пластических деформациях положена гипотеза плоских сечений, согласно которой исходные плоские сечения заготовки  $AB$  и  $A'B'$ , перпендикулярные нейтральной оси напряжений  $OO'$  (рис. 2, в), остаются плоскими в течение всего процесса гибки и после изгиба. Эти сечения лишь поворачиваются относительно друг друга, перестают быть параллельными и остаются плоскими.

## 2.4. Определение деформаций и минимально допустимого радиуса изгиба

Гипотеза плоских сечений позволяет легко выразить тангенциальную деформацию растяжения (сжатия)  $e_{\varphi}$  в любой точке (рис. 2, в) через радиус кривизны изгибаемого элемента и расстояние рассматриваемой точки до нейтрального слоя:

$$e_{\varphi} = \ln \frac{(R_0 + x)d\varphi}{R_0 d\varphi} = \ln \left( 1 + \frac{x}{R_0} \right), \quad (1)$$

где  $x$  — расстояние от рассматриваемой точки до нейтрального слоя;

$\varphi$  — угол изогнутой заготовки;

$R_0$  — радиус нейтрального слоя напряжений.

Положение нейтрального слоя определяется радиусом

$$R_0 = \sqrt{R_n \cdot r_b}. \quad (2)$$

Приняв приближенно, что нейтральный слой расположен посередине толщины заготовки, из выражения (1) получим (без существенной погрешности в определении деформации при  $\frac{R_0}{S} > (3 \dots 5)$ )

$$e_{\varphi_n} = e_{\varphi_b} = \ln \left( 1 + \frac{1}{R_{\text{отн}}} \right), \quad (3)$$

где  $e_{\varphi_n}, e_{\varphi_b}$  — истинные или логарифмические деформации наружной и внутренней поверхностей заготовки;

$R_{\text{отн}} = \frac{R_0}{S}$  — текущий радиус кривизны любого слоя;

$\frac{R_0}{S}$  — относительный радиус изгиба;

$S$  — толщина листовой заготовки.

Из выражения (3) следует, что величина деформации периферийных поверхностей детали определяется относительным радиусом изгиба  $R_{\text{отн}}$ . По мере уменьшения радиуса изгиба нейтральный слой смещается к внутренней стороне изгибаемого угла. При очень малых радиусах изгиба может произойти разрыв наружных волокон, поэтому определение минимально допустимых радиусов изгиба имеет большое практическое значение. Для вычисления минимально допустимого радиуса  $R_{\text{min}}$  изгиба обычно пользуются формулой

$$R_{\text{min}} = k \cdot S,$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от механических свойств материала заготовки и расположения волокон, получаемый опытным путем [5].

Для деформируемых материалов (алюминиевых сплавов и сталей)  $k = 0,2 \dots 4$ .

При гибке по малым радиусам кривизны растяжению подвергается большая площадь сечения заготовки, чем сжатию, что обуславливает некоторое уменьшение конечной толщины заготовки и увеличение высоты отгибаемого борта  $h$  (рис. 2, а).

## 2.5. Определение пружинения при изгибе и корректировка технологической оснастки

Любая по значению и знаку пластическая деформация сопровождается упругой деформацией. При гибке после снятия внешней нагрузки форма пластически изогнутой заготовки вследствие упругого восстановления изменяется. Волокна растянутой зоны сокращаются, а сжатой – удлиняются в соответствии с величиной упругих деформаций  $e_{упр}$  (рис. 2, г). В результате каждое сечение АА и ВВ изогнутой заготовки повернется на соответствующий угол. Такое явление называется пружинением или упругой отдачей материала.

Технологов интересует величина остаточной (пластической) деформации, которая сохраняется после снятия внешних нагрузок и обуславливает точность размеров отштампованных деталей. Эта деформация определяется на основе так называемой теоремы о разгрузке [6]. Согласно этой теореме упругая деформация при разгрузке пластически деформированного тела определяется законом Гука.

В теореме о разгрузке доказывается, что остаточная деформация равна разности между деформациями металла при истинном пластическом и фиктивном упругом состояниях:

$$e_{ост} = e_{ист} - e_{упр} \quad (4)$$

где  $e_{ист}$  и  $e_{упр}$  – деформации при истинном пластическом и фиктивном упругом состояниях образца.

На диаграмме испытания образца при одноосном растяжении (рис. 2, д) показаны составляющие  $e_{ост}$  и  $e_{упр}$  истинной деформации  $e_{ист}$ , они легко определяются графически, так как линия разгрузки параллельна начальной линии нагрузки ОА. Упругая деформация при разгрузке всегда имеет знак, обратный знаку активной пластической деформации.

При гибке деформированное состояние заготовки характеризуется радиусом нейтрального слоя  $R_0$  (при истинном пластическом состоянии) или радиусом его кривизны, радиусом, соответствующим фиктивному упругому состоянию,  $R_{упр}$  и остаточным радиусом  $R_{ост}$ . Количественное значение этих параметров определяется величиной внешнего изгибающего момента:

$$M_b = \frac{q \cdot l^2 \cdot B}{2}, \quad (5)$$

где  $q$  — давление эластичной среды на заготовку;

$l$  — длина плоского участка борта;

$B$  — ширина заготовки.

Остаточный радиус  $R_{ост}$  всегда будет больше радиуса кривизны  $R_0$  под нагрузкой (рис. 2, г). По теореме о разгрузке связь между ними записывается:

$$\frac{1}{R_{ост}} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{упр}} \quad \text{или} \quad \frac{1}{R_{ост}} = \frac{1}{R_0} - \frac{M_b}{EJ}, \quad (6)$$

где  $M_b$  — изгибающий момент;

$E$  — модуль упругости;

$J = \frac{BS^2}{12}$  — момент инерции заготовки прямоугольного сечения;

$B$  и  $S$  — ширина и толщина заготовки.

Из условия равновесия между внешними и внутренними силами изгибающий момент  $M_b$  равен моменту внутренних напряжений, действующих в сечении (рис. 2, в). Определив изгибающий момент, можно найти остаточный радиус кривизны  $R_{ост}$ :

$$R_{ост} = \frac{R_0}{1 - \frac{M_b R_0}{EJ}}. \quad (7)$$

Зная остаточный радиус кривизны, можно определить остаточный угол  $\varphi_{ост}$  изгиба, исходя из условия, что длина волокна в нейтральном слое постоянна:

$$R_0 \varphi_0 = R_{ост} \cdot \varphi_{ост}. \quad (8)$$

Разность между остаточным углом  $\varphi_{\text{ост}}$  и углом  $\varphi_0$  изгиба называется углом пружинения:

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_{\text{ост}} \quad \text{или} \\ \Delta\varphi = \varphi_0 \left( 1 - \frac{R_0}{R_{\text{ост}}} \right) = \varphi_0 \frac{M_b R_0}{EJ} \quad (9)$$

Из уравнений (7) и (9) видно, что величина остаточного радиуса и угла пружинения определяется значением внешнего изгибающего момента, а также зависит от механических свойств штампуемого материала, радиуса изгиба и толщины заготовки.

Расчеты и эксперименты показывают, что средние значения угла пружинения  $\Delta\varphi$  при гибке деталей из алюминиевых сплавов в мягком состоянии  $2...6^\circ$ , а из высокопрочных материалов  $15...18^\circ$  [4].

Величину упругой деформации материала необходимо учитывать при проектировании технологических процессов штамповки деталей, при изготовлении гибочной оснастки и настройке оборудования, используемого для гибки.

Технологические возможности процесса гибки эластичной средой определяются механическими свойствами штампуемого материала и эластичной среды, толщиной заготовки, высотой борта, величиной угла и радиуса изгиба.

Для получения точных деталей размеры пуансона или формблока  $d_{\text{ф}}$  необходимо корректировать на величину упругих деформаций и изготавливать с углами поднутрения, равными углам пружинения (рис.2,а):

$$d_{\text{ф}} = \varphi - \gamma,$$

где  $\varphi$  — угол борта детали по чертежу;

$\gamma$  — угол пружинения.

При гибке с большими внутренними радиусами закругления необходимо учитывать и упругое изменение радиуса гибки. Для получения детали с заданным радиусом необходимо, чтобы  $r_{\text{ф}} < r_0$ , где  $r_{\text{ф}}$  — радиус закругления формблока.

При разработке технологических процессов гибки эластичной средой расчетными параметрами являются: размеры заготовки (длина развертки) детали, давление эластичной среды, необходимое для штамповки, минимально допустимый радиус гибки, минимально допустимая высота борта, угол пружинения, угол и радиус формблока.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГИБКИ И ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

#### 3.1. Определение размеров заготовки

Размеры заготовки при гибке деталей, приведенных в табл. I.I, можно определить, исходя из условия равенства длины заготовки длине нейтрального слоя изогнутой детали. Расчеты сводятся к определению положения и длины нейтрального слоя в зависимости от толщины заготовки и радиуса изгиба при двухугловой гибке деталей с двумя бортами, отогнутыми на угол  $90^\circ$ . Длина заготовки рассчитывается по формуле

$$L = l_1 + \frac{\pi}{2}(r_{B1} + Sx_1) + l_3 + \frac{\pi}{2}(r_{B2} + Sx_2) + l_2, \quad (10)$$

где  $l_1, l_2, l_3$  - длина прямолинейных участков бортов;

$r_{B1}, r_{B2}$  - внутренние радиусы гибки бортов;

$S$  - толщина заготовки;

$x_1, x_2$  - коэффициенты, определяющие расстояние нейтрального слоя от внутренней поверхности детали и зависящие от величины относительного радиусагиба  $r/S$ .

Величины значений коэффициента  $x$  приведены в табл. 3.I [7].

Т а б л и ц а 3.I

Величины значений коэффициента  $x = f(r/S)$

$r/S$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$x$	0,3	0,335	0,360	0,383	0,400	0,415
$r/S$	6,0	8,0	10,0	12,0	15,0	20,0
$x$	0,430	0,455	0,467	0,483	0,485	0,500

Для детали с равной высотой бортов и одинаковыми радиусами закругления длина заготовки определяется по формуле

$$L = 2l_1 + l_2 + \pi(r_B + Sx). \quad (11)$$

Найденная по формуле длина заготовки округляется с точностью до 0,5 мм в сторону увеличения.

### 3.2. Расчет давления эластичной среды и минимально допустимой высоты отгибаемого борта

Давление эластичной среды, необходимое для гибки деталей, определяется из условия равенства изгибающих моментов внутренних и внешних сил. При ориентировочных инженерных расчетах давление эластичной среды можно определить по формуле [7] при  $\varphi = 90^\circ$ :

$$q = \frac{\sigma_b \cdot S^2}{2l^2} = \sigma_b \frac{S^2}{2(h - r_b - S)^2}, \quad (12)$$

где  $\sigma_b$  - предел прочности штампуемого материала, МПа ( $\text{кН/м}^2$ );  
 $S$  - толщина материала, м;  
 $h$  - высота отгибаемого борта детали, м;  
 $r_b$  - внутренний радиус изгиба, м.

При гибке одновременно двух бортов разной высоты расчет величины  $q$  следует проводить по меньшему значению высоты борта. Формула (12) не учитывает упрочнения материала заготовки при изгибе и дает значения  $q$  несколько ниже, чем в действительности. Упрочнение учитывается по формуле при  $\varphi \approx 90^\circ$ :

$$q = \frac{K \cdot S^{(2+n)}}{(2+n)2^n r_b^n l^2}, \quad (13)$$

где  $K$  и  $n$  - постоянные для данного материала величины, характеризующие интенсивность упрочнения (значения при расчете взять из табл. I.I).

Минимально допустимая высота отгибаемого борта рассчитывается для толщины и марки материала заданной детали и имеющегося лабораторного пресса. Заменяя в формуле (12)  $q$  его максимальным значением  $q_{max}$  для данного пресса и решив уравнение относительно  $l$ , получим расчетную формулу для определения минимально допустимой высоты отгибаемого борта  $l_{min}$  и  $h_{min}$ :

$$l_{min} = S \sqrt{\frac{\sigma_b}{2q_{max}}}, \quad h_{min} = l_{min} + r_{b_{min}} + S. \quad (14)$$

Для построения зависимостей  $q=f(h)$  определение минимальной высоты изгибаемого борта данной толщины и марки материала следует вести, исходя из максимального давления эластичной среды лабораторной установки  $q_{max} = 40 \text{ МПа}$  ( $400 \text{ кг./см}^2$ ) ( $P_{max} = 2000 \text{ кН}$ ).

Величина  $q$  рассчитывается по формуле (12) для пяти, шести высот бортов через два миллиметра до высоты 14...16 мм (4, 6, 8, 10, 12, 14, 16). По результатам расчета строится график зависимости  $q=f(h)$  с указанием марки материала и толщины.

При определении значений  $q$  для построения графика  $q=f(S)$  необходимо проверить минимальную высоту борта при заданной толщине материала и сопоставить ее с заданной высотой. Затем подсчитываются величины  $q$  для толщин 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 с заданной высотой  $h$ . По результатам расчета строится график  $q=f(S)$  с указанием марки материала и высоты  $h$ .

По формуле (13) следует определить значения  $q$  по параметрам заданного варианта, нанести полученные значения соответственно на графики  $q=f(h)$ ,  $q=f(S)$  в виде точек и сделать оценку влияния упрочнения материала на потребное давление. В отчете написать выводы.

### 3.3. Расчет углов пружинения

В практических расчетах для определения углов пружинения при относительных радиусах, близких к трем, можно пользоваться упрощенной формулой, не учитывающей упрочнение материала:

$$\gamma = \frac{3\sigma_B}{E} \left( \frac{r_B}{S} + \frac{1}{2} \right) d, \quad (15)$$

где  $\sigma_B$  — предел прочности на разрыв, МПа ( $\text{Н/м}^2$ );

$E$  — модуль упругости, МПа ( $\text{Н/м}^2$ );

$r_B$  — внутренний радиус изгиба детали, м;

$d$  — угол изгиба (угол изогнутого участка детали), град.

Угол изгиба определяется по формуле  $d = 180 - \varphi$ , где  $\varphi$  — угол борта детали (рис. 2, а).

Для построения зависимости  $\gamma=f(d)$  по приведенной формуле подсчитываются углы пружинения. Углы изгиба задаются 75, 85, 95, 105°. Марка материала и размеры детали берутся из табл. I.I по заданному ва-

рианту. По результатам расчета строится график  $\gamma = f(\alpha)$ , на котором указывается марка материала, толщина, радиус изгиба  $r_B$ .

По формуле, учитывающей упрочнение материала

$$\gamma = \frac{3K}{(2+n)E} \left( \frac{2r_B}{S} + 1 \right)^{1-n} \alpha,$$

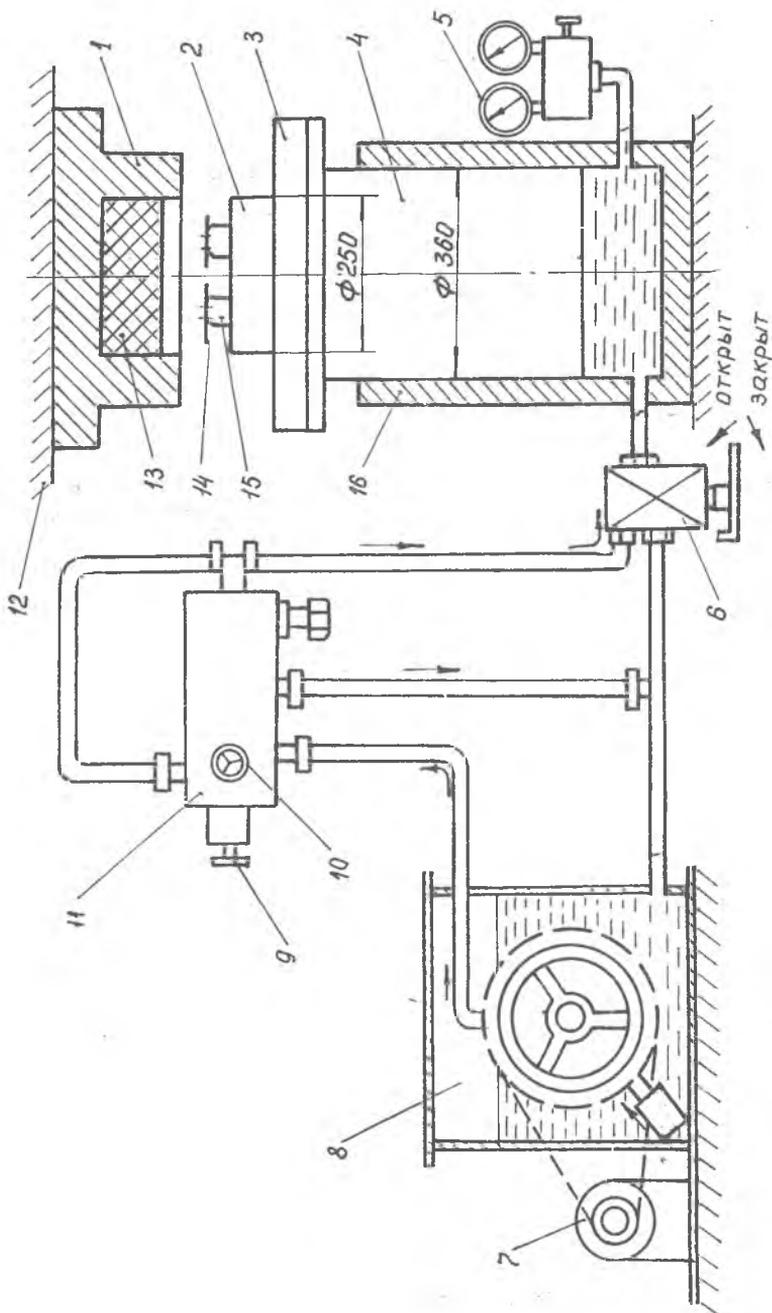
определяется пружинение для  $\alpha = 90^\circ$  [7]. Полученное значение в виде точки следует нанести на график  $\gamma = f(\alpha)$  и сделать оценку влияния упрочнения материала на величину угла пружинения. В отчете написать вывод.

Зависимость угла пружинения от радиуса изгиба для детали по заданному варианту определяется по формуле (15). Величины радиуса изгиба берутся равными 1, 3, 5, 8 мм, а угол изгиба —  $90^\circ$ . По результатам расчета строится график  $\gamma = f(r_B)$ , на котором указываются марка материала, толщина, угол изгиба.

#### 4. ОБОРУДОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА И ПРИБОРЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Лабораторная установка, на которой производятся исследования влияния высоты борта, толщины материала на величину давления эластичной среды, угла и радиуса изгиба на величину угла пружинения, состоит из лабораторного гидравлического пресса БКК-200-М1 (максимальное усилие 2000 кН) и установленного на нем контейнера с резиновой подушкой, а также подштамповой плитой. Схема лабораторной установки показана на рис. 3. На неподвижной траверсе пресса 12 смонтирован контейнер 1 с эластичной подушкой 13. На столе 3 пресса, смонтированном на открытой части поршня 4 гидравлического цилиндра 16, установлена подштамповая плита 2, на которой устанавливаются жесткие формблоки 15 и уложенные на них заготовки деталей 14.

Перемещение поршня 4 со столом 3 в сторону контейнера 1 и создание рабочего усилия  $P_{np}$  осуществляется давлением масла, поступающего в нижнюю часть цилиндра 16 из насосного агрегата 8, который приводится в действие электродвигателем 7. Управление прессом осуществляется при помощи регулировочного вентиля 9, вентиля сброса избытка масла 10 и спускового клапана 6. Вентили 9 и 10 смонтированы на гидрорпанели 11. Давление масла в гидросистеме пресса измеряется манометром 5.



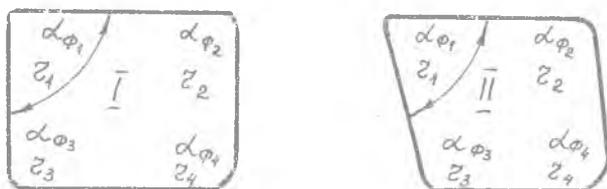
Р и с. 3. Схема лабораторной установки для штамповки эластичной средой

Паспортные данные прессы: максимальное усилие  $P_{\max} = 2000$  кН (200 тс), ход поршня 4–250 мм, диаметр поршня 4–360 мм, диаметр подштамповой плиты 2–250 мм, масса прессы 1500 кгс, габариты прессы 1967х1300х860 мм.

В качестве инструмента для гибки образцов используется набор стальных формблоков длиной 70 мм, шириной 40 мм, высотой 30 мм, с углами  $\alpha_{\varphi} = 75, 85, 90, 95, 105^{\circ}$  и с радиусами закругления ребер  $r_{\varphi} = 1, 3, 5, 8$  мм (табл. 4.1).

Т а б л и ц а 4.1

Обозначение углов и радиусов закругления ребер формблоков



Номер формблока	$\alpha_{\varphi 1}$	$\alpha_{\varphi 2}$	$\alpha_{\varphi 3}$	$\alpha_{\varphi 4}$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$
I	90	90	90	90	I	5	3	8
II	75	95	105	85	I	5	3	8
III	75	95	105	85	3	8	I	5
IV	75	95	105	85	5	I	8	3
V	75	95	105	85	8	3	5	I

Замеры толщин, габаритов заготовок и отформованных деталей производятся с помощью штангенциркуля и линейки. На полученных деталях углы изгиба измеряются угломером.

Перед проведением экспериментальной части работы студентов знакомят с правилами техники безопасности при работе с гидравлическими прессами. Эксперименты по штамповке студенты должны выполнять с лаборантом. При этом все работы, связанные с подготовкой образцов и их метрологических исследованиями, выполняют студенты. Управляет прессом лаборант, включая и выключая его по сигналу студента, наблюдающего за давлением по манометру.

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

### 5.1. Экспериментальная проверка теоретической зависимости $q = f(h)$

Эксперимент заключается в проверке необходимой величины подсчитанного давления для изгиба борта детали по заданному варианту. Для проведения эксперимента преподаватель задает студенту две высоты борта.

Размеры радиусов закругления ребер формблока, углы и толщина материала должны соответствовать размерам детали расчетного варианта. После получения заготовок из заданного материала у лаборанта производится проверка и уточнение размеров заготовок и толщины материала.

По заданным значениям  $h$  по графику определяются необходимые величины  $q$ . Затем студент проводит штамповку заготовок, следя по манометру за давлением, останавливает пресс при достижении необходимого давления.

У отштампованных деталей замеряются углы изгиба с помощью угломера и определяются углы пружинения при рассчитанном давлении. После этого детали снова устанавливаются на формблоки и штампуются при давлении  $q_{max} = 40 \text{ МПа}$  ( $400 \text{ кг/см}^2$ ). Потом определяются углы изгиба, углы пружинения и сравниваются с ранее полученными данными из эксперимента и расчетом по формуле (15). В соответствии с графиком дается оценка зависимости потребного давления от высоты борта.

### 5.2. Экспериментальная проверка теоретической зависимости $q = f(S)$

Эксперимент заключается в проверке достаточности подсчитанного давления эластичной среды для изгиба борта детали по заданному варианту. Для проведения эксперимента студенту задаются две толщины детали. Высота борта, внутренний радиус и угол изгиба детали берутся как для расчетного варианта, замеряются толщины заготовок. Эксперимент проводится точно в таком же порядке, как и для проверки зависимости

$q = f(h)$ . В соответствии с графиком дается оценка зависимости потребного давления от толщины материала детали.

### 5.3. Экспериментальная проверка теоретических зависимостей $\gamma = f(d)$ и $\gamma = f(r_b)$

Эксперимент заключается в проверке углов пружинения, полученных расчетом для изгиба борта детали по заданному варианту с углами изгиба 75, 85, 95, 105°, а также с углом изгиба 90° и с  $r_b = 1, 3, 5, 8$  мм (см. табл. 4.1).

После замера толщин и размеров заготовок проводится штамповка деталей при максимальном давлении  $q_{max} = 40$  МПа (400 кг/см<sup>2</sup>), изменение углов изгиба и определение углов пружинения  $\gamma$ . Углы пружинения подсчитываются по формуле  $\gamma = \varphi - \alpha_p$  (рис. 2, а). Полученные значения  $\gamma$  наносятся на имеющиеся графики и сравниваются с расчетными. В соответствии с графиками дается оценка зависимости угла пружинения от угла и радиуса изгиба.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема процесса штамповки эластичной средой плоских бортов (см. рис. 2, а), эскиз заданной детали со всеми размерами (см. рис. 2, б).
2. Формулы расчета параметров техпроцесса штамповки деталей эластичной средой.
3. Результаты расчетов по первой части лабораторной работы и результаты исследований по второй ее части с графиками.
4. Выводы (выполнять в отчетном бланке).
5. Ответы на контрольные вопросы (устный ответ).

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие детали летательных аппаратов изготавливаются из листовых заготовок с помощью операции гибки?
2. Какая оснастка и какое оборудование применяется для операции гибки при получении деталей из листовых заготовок?
3. В чем заключается сущность процесса формовки эластичной средой? Каковы его технико-экономические достоинства при изготовлении плоских деталей с прямолинейными и криволинейными бортами?
4. Какие явления сопровождают процесс гибки?
5. Какие параметры рассчитываются при проектировании технологического процесса гибки эластичной средой?

6. Какое влияние на величину требуемого давления оказывает высота отгибаемого борта и толщина штампуемого материала?

7. В каких случаях и для чего определяется минимально допустимая высота отгибаемого борта? Какие факторы влияют на ее величину?

8. Какое влияние оказывает на величину угла пружинения угол изгиба, радиус изгиба, толщина материала, давление, высота борта?

9. Каким образом учитывается угол пружинения при изготовлении гибочных формблоков?

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грошиков А.И. и др. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении. - М.: Машиностроение, 1976. 432 с.

2. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение, 1967. 367 с.

3. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.

4. Абибов А.Д. и др. Технология самолетостроения. М.: Машиностроение, 1982. 551 с.

5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. М.: Машиностроение, 1971. 520 с.

6. Ильющин А.А. Пластичность. М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.

7. РДМУ 95-77. Изд-во стандартов, 1978.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИБКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ  
ПРИ ШТАМПОВКЕ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

Составитель Лебедев Геннадий Михайлович

Редактор Т.К.Кретикина  
Техн.редактор Г.А.Усачева  
Корректор Н.С.Купринова

Подписано в печать 6.06.95. Формат 60x84<sup>I</sup>/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 1,4. Усл.кр.-отт. 1,4. Уч.-изд.л. 1,3.  
Тираж 300 экз. Заказ 324. Арт. С-29/95.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Издательство Самарского государственного аэрокос-  
мического университета имени академика С.П.Королева.  
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.