

Глава 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Материал исследования

Ранее считалось [98–100], что в процессе холодной объемной штамповки крепежных изделий локальные пластические деформации могут достигать (50...90) %. Но, как было установлено недавно [1, 95], накопленные пластические деформации достигают 2...2,5 единиц. Это определяет соответствующие требования к химическому составу стали, ее структуре, качеству поверхности и механическим свойствам. Этим требованиям удовлетворяют углеродистые и легированные стали, содержание до 0,5% углерода и пониженное содержание примесей.

Для холодной высадки и выдавливания изделий сложных форм с большими степенями деформации (более 70%) и относительно невысокими требованиями к прочности, используют низкоуглеродистые стали 08кп, 10кп, 15кп, 20кп, 08, 10, 15, 20 и так далее. Эти стали обладают хорошей пластичностью и низким сопротивлением деформированию.

Для высадки и выдавливания изделий с повышенными механическими свойствами (прочности) применяют среднеуглеродистые нелегированные и легированные стали марок 15Х, 20Х, 12ХН, 15ХГНМ, 20ХГР, 20Г2Р, 30Г1Р и другие. В ряде случаев, с целью повышения служебных характеристик, полученные методами ХОШ изделия из сталей этой группы могут подвергаться объемной или поверхностной упрочняющей термической обработке.

Для получения высокопрочных изделий используют высокоуглеродистые и легированные стали 30Х, 38ХА, 40ХН, 38ХГНМ, 40ХН2МА и другие. Изделия из этой группы сталей после ХОШ подвергают упрочняющей термической обработке.

В этой связи в качестве материала исследования были взяты представители из всех трех групп сталей. Это стали 10кп, 20кп, 20, 12ХН, 15ХГНМ, 20Г2Р, 30Г1Р, 38ХА, 38ХГНМ, 40ХН2МА. Они поставляются в виде бунтов, полученных горячей прокаткой и прошедших, с целью улучшения структуры, сфероидизирующий отжиг в колпаковых печах. Это состояние сталей и было взято в качестве исходного.

Химический состав и механические свойства сталей в состоянии поставки (исходном) согласно сертификату приведены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 - Химический состав сталей

Марка стали	Химический состав, % по массе									
		С	Si	Mn	Cr	Ni	В	S	P	Ti(Mo)
								не более		
10кп	ГОСТ 10702-78	0,07-0,14	0,003-0,07	0,25-0,50	<0,150	<0,250	-	0,040	0,035	-
	Факт.	0,07	0,010	0,380	0,040	0,089	-	-	-	-
20кп	ГОСТ 10702-78	0,17-0,24	0,003-0,07	0,25-0,50	<0,250	<0,250	-	0,040	0,035	-
	Факт.	0,193	0,065	0,400	0,025	0,040	-	-	-	-
20	ГОСТ 1050-88	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	<0,250	-	-	0,040	0,035	-
	Факт.	0,170	0,345	0,570	0,120	0,230	-	-	-	(0,210)
12ХН	ГОСТ 10702-78	0,09-0,15	0,17-0,37	0,30-0,60	0,40-0,70	0,50-0,80	-	0,035	0,035	-
	Факт.	0,110	0,183	0,432	0,667	0,556	-	-	-	-
15ХГНМ	ГОСТ 10702-78	0,13-0,18	0,17-0,37	0,70-1,10	0,40-0,70	0,40-0,70	-	0,035	0,035	(0,15-0,25)
	Факт.	0,140	0,224	1,010	0,508	0,503	-	-	-	(0,240)
20Г2Р*)	ГОСТ 10702-78	0,17-0,24	0,17-0,35	0,90-1,30	<0,25	-	0,001-0,005	0,040	0,035	-
	Факт.	0,210	0,320	1,170	0,150	0,150	0,0014	-	-	-
30Г1Р*)	ГОСТ 10702-78	0,27-0,33	0,17-0,35	0,90-1,30	<0,25	-	0,001-0,005	0,040	0,035	-
	Факт.	0,299	0,236	1,200	0,070	0,028	0,0013	-	-	0,050
38ХА	ГОСТ 4543-71	0,35-0,42	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	-	-	0,040	0,035	-
	Факт.	0,376	0,320	0,630	0,820	0,070	-	-	-	-
38ХГНМ	ГОСТ 10702-78	0,37-0,43	0,17-0,37	0,50-0,80	0,40-0,60	0,40-0,70	-	0,035	0,035	-
	Факт.	0,378	0,176	0,640	0,433	0,561	-	-	-	(0,160)
40ХН2МА	ГОСТ 4543-71	0,37-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	0,6-0,9	1,25-1,65	-	0,040	0,035	(0,15-0,25)
	Факт.	0,426	0,230	0,770	0,600	1,600	-	-	-	(0,210)

*) Химический состав сталей регламентируется по ТУ 14-1-4486-88.

Таблица 2.2 - Механические свойства сталей (ГОСТ 10702-78)

Марка стали	Характеристики механических свойств		
	Твердость, НВ	$\sigma_{в}$, МПа	ψ , %
10кп	114-143	300-320	60
20кп	132-163	360-380	50
20	132-163	340-440	50
12ХН	-	410-510	70
15ХГНМ	217	<490	60
20Г2Р	187-197	480-510	60-65
30Г1Р	-	500-520	55
38ХА	187-207	<560	60
38ХГНМ	169-235	560-620	50
40ХН2МА	269	<640	50

2.2. Методика экспериментального изучения диаграмм деформирования и эффекта Баушингера в сталях при больших пластических деформациях.

Как уже отмечалось, достоверность прогнозирования разрушения, в первую очередь, зависит от точности расчета характеристик НДС. Холодная пластическая деформация металлов характеризуется развитием деформационной анизотропии. Наиболее простым ее проявлением является эффект Баушингера. Он проявляется в снижении напряжения начала пластической деформации при изменении знака нагружения, например, при сжатии (осадке) после растяжения или наоборот.

Широкоприменяемые при изучении эффекта Баушингера способы деформирования (одноосное растяжение - осадка, знакопеременные изгиб и кручение) не совсем подходят в случае использования больших пластических деформаций ($> 0,1$). При растяжении с большими степенями деформации происходит потеря устойчивости деформации. Если же первоначально образец осаживать, а потом растягивать, то возникают проблемы изготовления образца для растяжения из низкого осаженого. Испытание изгибом также не позволяет задавать большие деформации и, кроме этого, деформация при изгибе носит ярко выраженный немонотонный характер. При кручении на большие углы, как и при одноосном растяжении, наблюдается локализация деформации.

Поэтому в данной работе для исследования эффекта Баушингера при больших предварительных пластических деформациях была взята схема деформирования образцов, включающая последовательное применение двух видов деформации - растяжение и сжатие. При этом деформацию простого растяжения реализовывали волочением^{*)}, то есть при объемном осесимметричном напряженном состоянии. Последующую деформацию простого сжатия проводили одноосной осадкой образцов. Схемы процессов волочения, одноосной осадки соответствующие им механические схемы деформации показаны на рис. 2 и 3. Как видно при осадке после волочения происходит смена знака деформаций. Волочение характеризуется существованием продолжительной стационарной стадии, однако из-за наличия сил контактного трения деформация по сечению прутка неоднородна.

*) Некоторой известной немонотонностью деформации при волочении пренебрегали

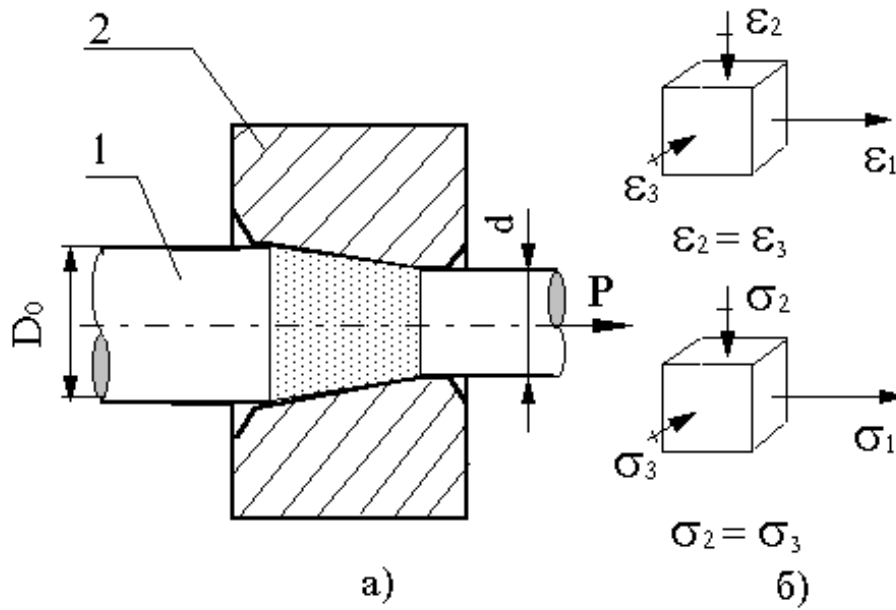


Рис. 2. Схема процесса волочения прутка (а) и механическая схема деформации (б): 1 - заготовка; 2 - фильера (волока).

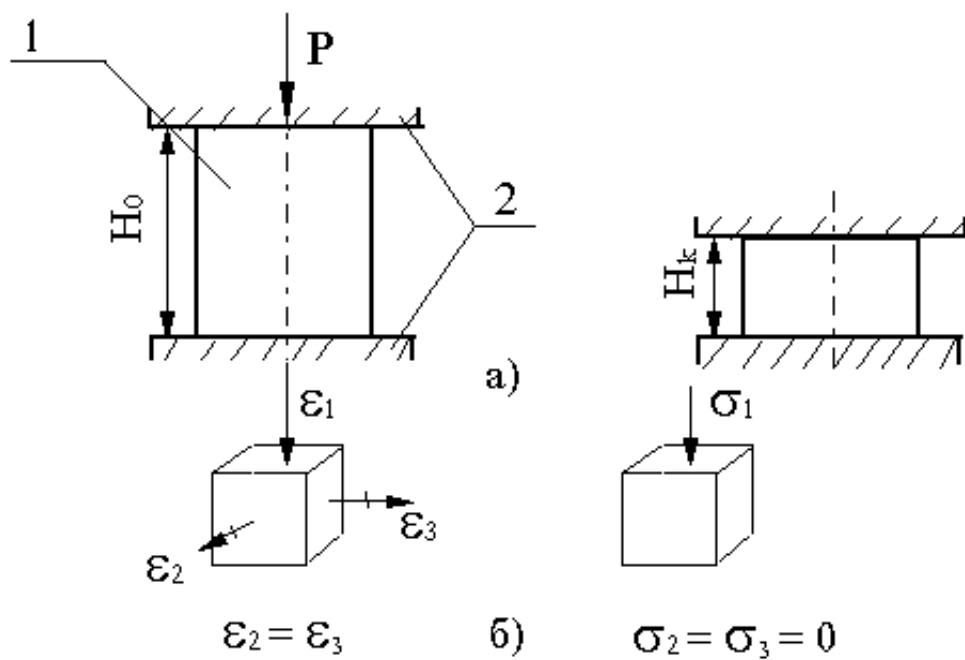


Рис. 3. Схема одноосной осадки цилиндра (а) и механическая схема деформаций (б):
1 - заготовка; 2 - бойки (плиты).

С другой стороны, волочение происходит в условиях конкретного напряженного состояния, элементарные же объемы заготовок, подвергаемые ХОШ, имеют большое многообразие путей деформирования.

В работе [1] показано, что различие в распределении механических свойств по сечению калиброванного волочением прутка является значимым, и предлагается применять полнотолщинные образцы. В этом случае, определяемое напряжение течения есть средняя по сечению образца величина. Там же приведены результаты, свидетельствующие о том, что схема напряженного состояния не оказывает заметного влияния на эффект Баушингера при больших предварительных деформациях ($>0,1\%$), что подтверждают и данные в работах [18, 101, 102] для малых упругопластических предварительных деформаций.

Поэтому экспериментальные исследования проводили согласно схеме на рис. 4.

Прутки стали в исходном (сфероотожженном состоянии) перед волочением подвергали фосфатированию, то есть наносили на поверхность химическим методом слой стойкого при высоких давлениях кристаллических фосфатов толщиной не менее 15 мкм, который надежно разделяет поверхность заготовки и инструмента и является хорошим носителем смазки. Затем поверхность прутков омыливали и волочили на волочильном стане ВСМ 1/750.

Из полученных волочением прутков без изменения их диаметра нареза-ли образцы для последующей одноосной осадки. Так как диаметры прутков различны (из-за неодинаковых диаметров исходных прутков различных сталей), то, для сохранения геометрического подобия образцов для осадки, высота их выбиралась из условия постоянства отношения высоты к диаметру, которое в данной работе было принято $H/D = 1,1$. Исследуемые марки сталей и размеры образцов приведены в таблице 2.3.

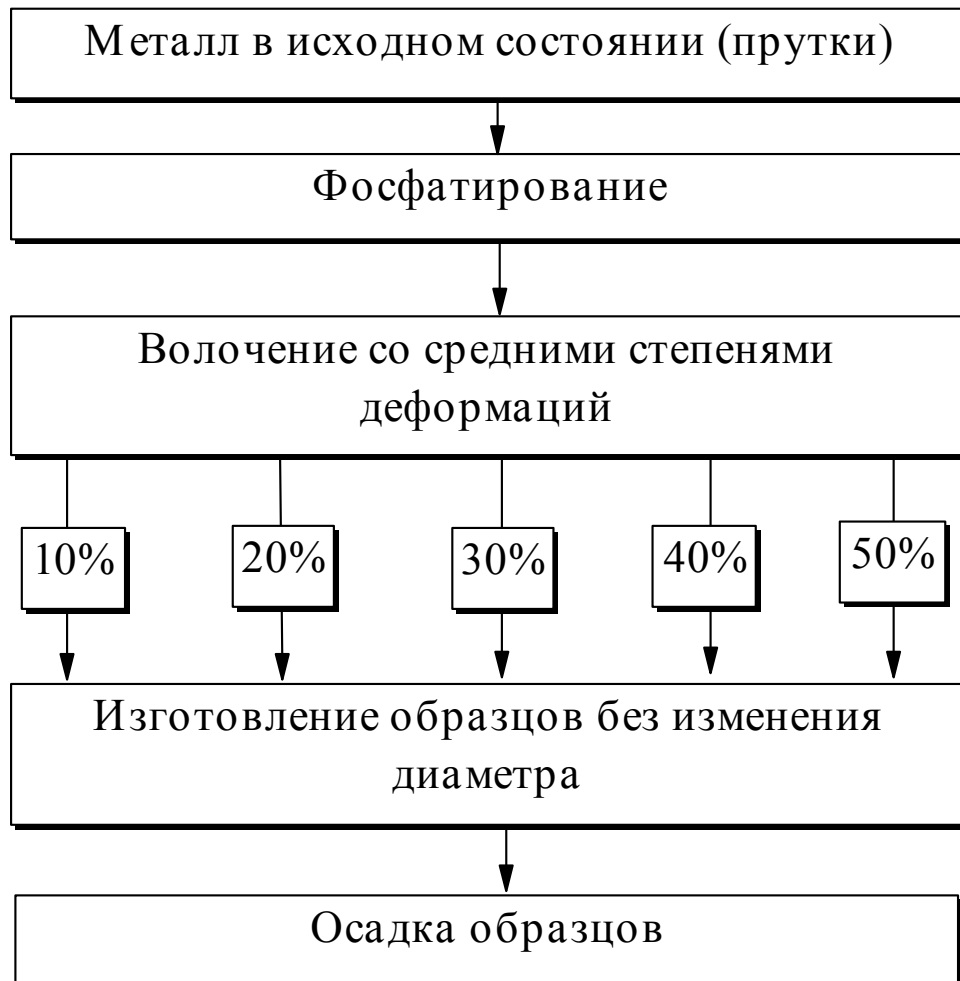


Рис. 4. Схема проведения эксперимента при исследовании эффекта Баушингера.

Таблица 2.3 - Размеры образцов

Марка стали	Диаметр исходного прутка, мм	Диаметр прутка после волочения, мм	Степень деформации		Диаметр и высота образца для осадки, мм	
			ϵ , %	e	D	H
10кп	8,45	8,0	9,92	0,104	8,0	9,0
		7,5	21,8	0,247	7,5	8,5
		7,1	29,8	0,354	7,1	8,0
		6,6	39,1	0,509	6,6	7,6
		6,0	49,9	0,691	6,0	7,0
20кп	9	7,5	28,7	0,340	7,5	8,7
		6,9	40,7	0,512	6,9	8,1
		6,4	50,0	0,693	6,4	7,6
20	9,0	7,6	28,7	0,340	7,6	8,7
		6,9	40,0	0,512	6,9	8,1
		6,4	50,0	0,693	6,4	7,6
12ХН	10,5	9,8	12,9	0,138	9,8	11,6
		9,3	21,6	0,243	9,3	10,6
		8,8	29,8	0,353	8,8	9,7
		8,1	40,5	0,519	8,1	9,3
		7,4	51,0	0,713	7,4	8,3
15ХГНМ	10,5	9,8	12,0	0,128	9,8	10,9
		9,4	19,9	0,221	9,4	10,4
		8,8	29,8	0,353	8,8	10,0
20Г2Р	9,0	8,6	8,7	0,090	8,6	9,6
		8,0	21,0	0,235	8,0	9
		7,5	30,6	0,365	7,5	8,5
		6,9	41,2	0,531	6,9	7,9
		6,4	49,4	0,682	6,4	7,4
30Г1Р	7,8	7,4	10,0	0,105	7,4	8,6
		6,9	21,7	0,245	6,9	8,0
		6,5	30,5	0,364	6,5	7,6
		6,0	40,8	0,525	6,0	7,0
		5,5	50,3	0,699	5,5	6,4
38ХА	10,0	9,4	11,6	0,124	9,4	10,4
		9,0	19,0	0,211	9,0	10,1
		8,2	31,9	0,385	8,2	9,4
		7,7	40,7	0,523	7,7	8,7
		7,0	50,3	0,699	7,0	8,0
38ХГНМ	8,0	7,6	9,8	0,103	7,6	8,8
		7,3	16,7	0,183	7,3	8,5
		6,6	31,9	0,385	6,6	7,7
		6,2	39,9	0,510	6,2	7,2
		5,6	51,0	0,713	5,6	6,5
40ХН2МА	10,2	9,8	8,6	0,090	9,8	10,8
		9,3	17,8	0,196	9,3	10,4
		8,5	30,6	0,365	8,5	9,7
		7,9	40,8	0,524	7,9	8,9
		7,2	50,9	0,711	7,2	8,3

Истинные диаграммы деформирования строили по результатам испытания на осадку при комнатной температуре на универсальной испытательной машине 1231У-10, со скоростью деформирования 2,3 мм/мин и записью индикаторной диаграммы $P - \Delta l$. Инструментальная погрешность определения силы деформирования и деформации не превышала $\pm 2\%$ и $\pm 3\%$ соответственно.

Для исключения влияния на σ сил контактного трения на торцах образцов выполнялись конические проточки, которые перед деформированием заполнялись смазкой, состоящей из смеси порошкообразного графита в машинном масле И-20. Это обеспечивало, совместно с применением бойков со шлифованными рабочими поверхностями, осадку образцов до $\varepsilon = 50 \dots 60\%$ без возникновения бочкообразности боковой свободной поверхности. Надежность полученных результатов оценивали соответствующей математической обработкой, изложенной ниже в разделе 2.5.

2.3. Методика определения геометрии шейки растягиваемых цилиндрических образцов.

Потеря пластической устойчивости в макроскопических объемах или сечениях считается основной причиной разрушения пластичных металлов [45]. В случае цилиндрического образца при растяжении, макроскопическая пластическая неустойчивость означает рост деформации в объеме, примыкающим к некоторому сечению. Такой рост приводит к более быстрому уменьшению площади данного сечения по сравнению с остальным объемом. Образец необратимо теряет первоначальную форму. Этот объем носит название шейки [103].

Явление локализации деформации (образование шейки) при растяжении известно уже давно, однако еще не стало предметом систематического изучения. Между тем оно сопровождает все без исключения технологические процессы формоизменения металлов, проявляясь в виде возникновения “конусов

скольжения”, неравномерности течения заготовки, образования складок и является, как уже говорилось, основной причиной разрушения пластичных металлов. Поскольку явление локализации деформации оказывает значительное влияние на качество изделий и их свойства, получаемых методами ОМД, изучение его имеет важное практическое значение.

Методика исследования явления локализации деформации при растяжении заключалась в следующем. Стандартные пятикратные цилиндрические образцы диаметром 5 мм по ГОСТ 1497-84, деформировали растяжением до полного разрыва (стали 20, 30Г1Р, 15ХГНМ, 38ХГНМ, по три образца) и до различных степеней сужения после возникновения шейки с поэтапным фотографированием предварительно разгруженного образца (сталь 20, три образца).

Образцы, испытанные до полного разрыва, проецировали с помощью фотоувеличителя прямым светом на бумагу, и снимали контур шейки, увеличенный в 15...20 раз. Фотографии с динамикой развития шейки и проекции образцов после разрыва обрабатывали пересчетом контура шейки в реальный масштаб. Исследования ряда авторов [103–105] показали, что процесс растяжения происходит в две стадии: равномерная деформация и локализация деформации в некотором объеме образца. Поэтому полученный контур шейки после разрыва, в зависимости от разброса экспериментальных точек, аппроксимировали квадратным уравнением (сталь 20) и уравнениями прямой линии, описывающие средние значения экспериментального контура (стали 30Г1Р, 15ХГНМ, 38ХГНМ) (рис. 5). Объем и начальная длина шейки для образцов из стали 20 рассчитывались по формулам

$$V_{ш} = V_0 - V_{равн.}, \quad l_{ш0} = V_{ш} / d_{равн.}, \quad (41)$$

где V_0 - объем исходного образца, $V_{равн.}$ - объем образца, с равномерной деформацией, определенный по полному удлинению с вычетом удлинения в шейке (удлинение в шейке определяли, как расстояние между точками пересечения линии, которая описывает контур шейки, и образующей образца в момент за-

вершения этапа равномерного удлинения). Для образцов из сталей 30Г1Р, 15ХГНМ, 38ХГНМ объем и начальная длина шейки рассчитывались по формулам

$$V_{\text{ш}} = V_{1\text{у.к.}} + \dots + V_{\text{пу.к.}}, \quad l_{\text{ш0}} = V_{\text{ш}} / d_{\text{равн.}}, \quad (42)$$

где $V_{1\text{у.к.}}$, $V_{\text{пу.к.}}$ - объем усеченного конуса. По задаваемой с определенным шагом высоте h , радиусам нижнего R и верхнего основания r , объем усеченного конуса рассчитывался по формуле

$$V_{\text{у.к.}} = \frac{\Pi h}{3} (R^2 + Rr + r^2), \quad (43)$$

В таблице 2.4 представлены результаты расчета геометрических параметров образцов при растяжении.

Таблица 2.4 - Результаты расчета геометрических параметров образцов при растяжении.

Начальный диаметр образцов $d_0=5$ мм, начальная длина $l_0=25$ мм				
Марка стали	Диаметр образца в момент завершения стадии равномерного удлинения $d_{\text{равн.}}$, мм	Длина шейки образца в момент разрушения $l_{\text{шк.}}$, мм	Объем шейки образца $V_{\text{ш.}}$, мм ³	Длина шейки образца в момент завершения стадии равномерного удлинения $l_{\text{ш0.}}$, мм
20	4,598	7,480	78,108	4,684
15ХГНМ	4,783	12,011	157,086	8,741
30Г1Р	4,900	11,936	172,623	9,154
38ХГНМ	4,850	12,125	161,143	8,722

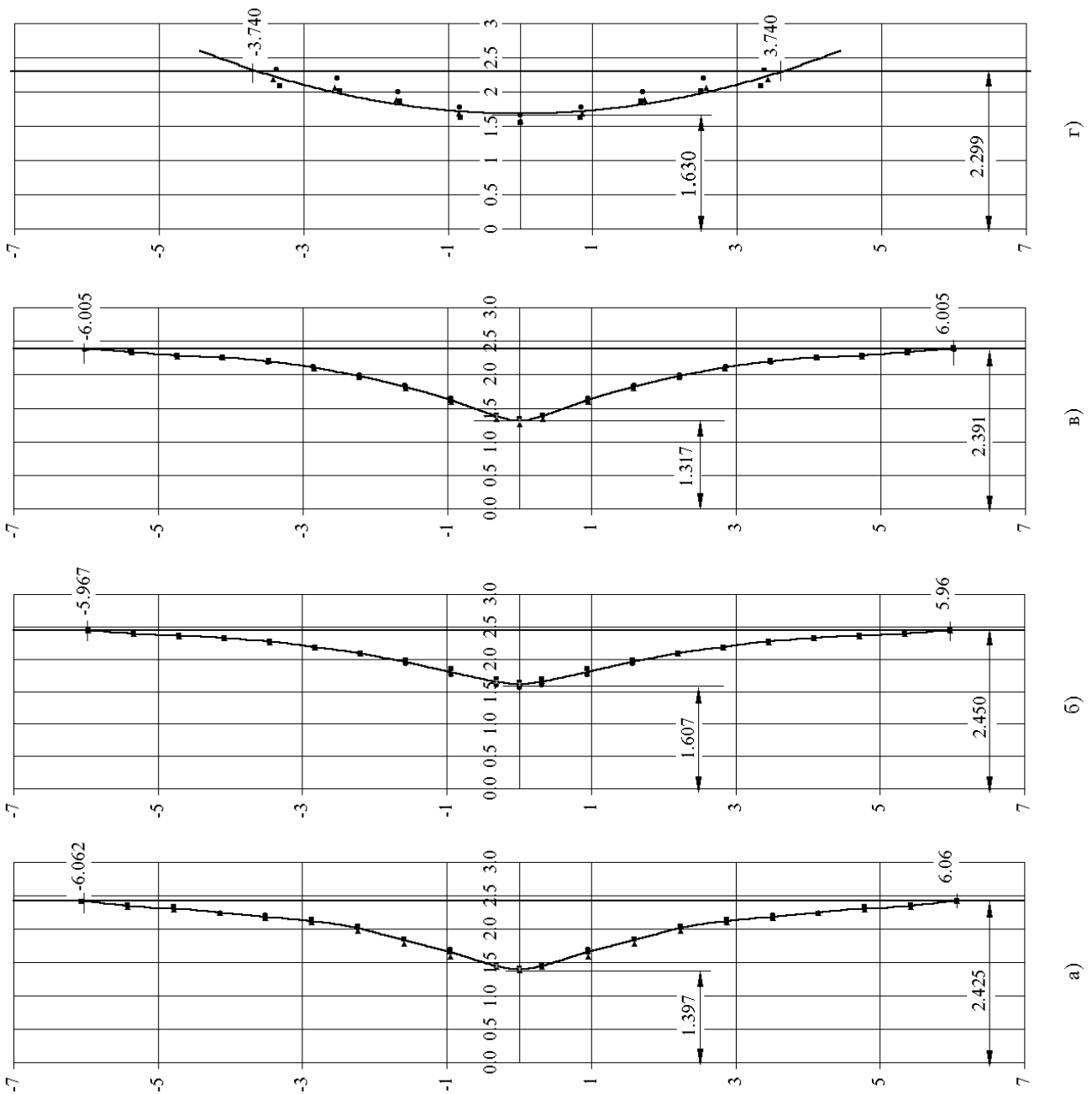


Рис. 5. Контур шейки в момент разрушения образца из:
а) стали 38ХГНМ, б) 30Г1Р, в) 15ХГНМ, г) 20.

2.4. Методика деформирования образцов в условиях сложного нагружения.

Деформирование образцов в условиях сложного нагружения осуществляли при комнатной температуре в следующей последовательности: волочение на волочильном стане ВСМ 1/750, кручение на токарном станке модели ИЖ1И611П, поперечная осадка на гидравлическом прессе ПА2634 и растяжение на универсальной испытательной машине 1231У-10 по заданным двум схемам (рис. 6.).

Согласно первой схеме, прутки в исходном состоянии деформировали волочением на 40% за два прохода. При этом средняя степень деформации в каждом проходе составляла 20%. Из осевой части деформированного прутка изготавливались три цилиндрических образцы для растяжения (рис.7 а). В патроне токарного станка осуществляли поворот одной из головок образца на 360° относительно оси, с фиксацией другой в гаечном ключе. Далее, образцы деформировались растяжением со скоростью деформирования равной 2,3 мм/мин.

По второй схеме, из прутков в исходном состоянии изготавливались образцы, форма и размеры которых приведены на рис. 7 в).

Полученные образцы деформировали поперечной осадкой между плитами со шлифованными рабочими плоскостями. Из осевой части полученных образцов, точением изготавливали стандартные пятикратные образцы, которые в дальнейшем деформировали растяжением со скоростью деформирования равной 2,3 мм/мин. Контуры шеек в момент разрушения образцов из сталей 20, 20Г2Р, 38ХГНМ, деформированных в условиях сложного нагружения, представлены на рис. 8.

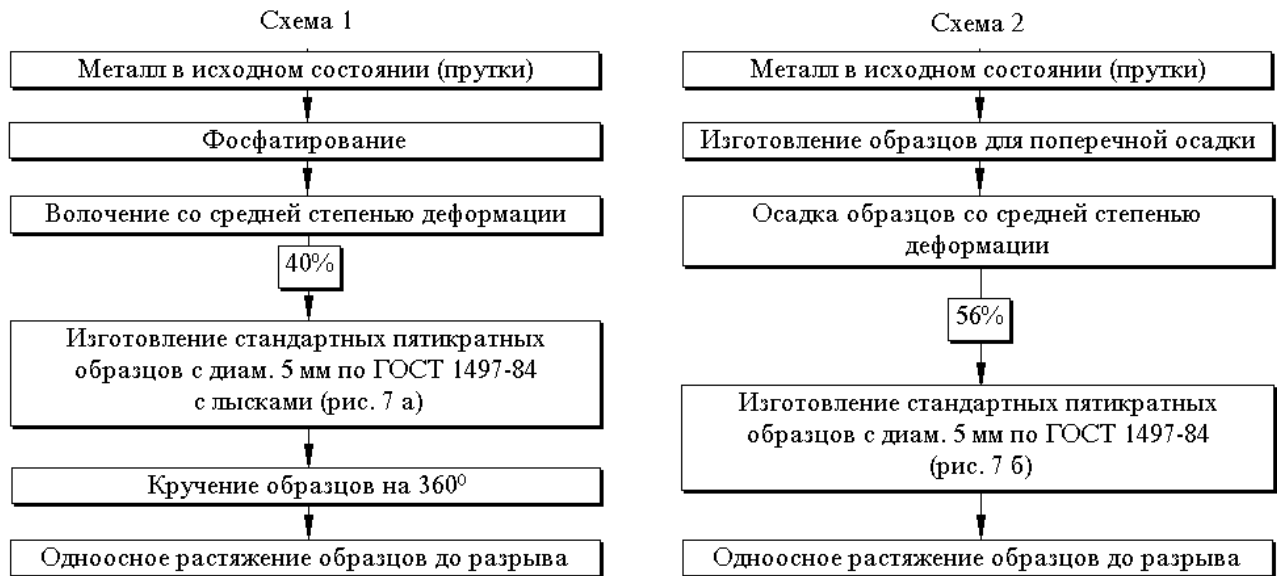


Рис. 6. Схемы деформирования образцов в условиях сложного нагружения

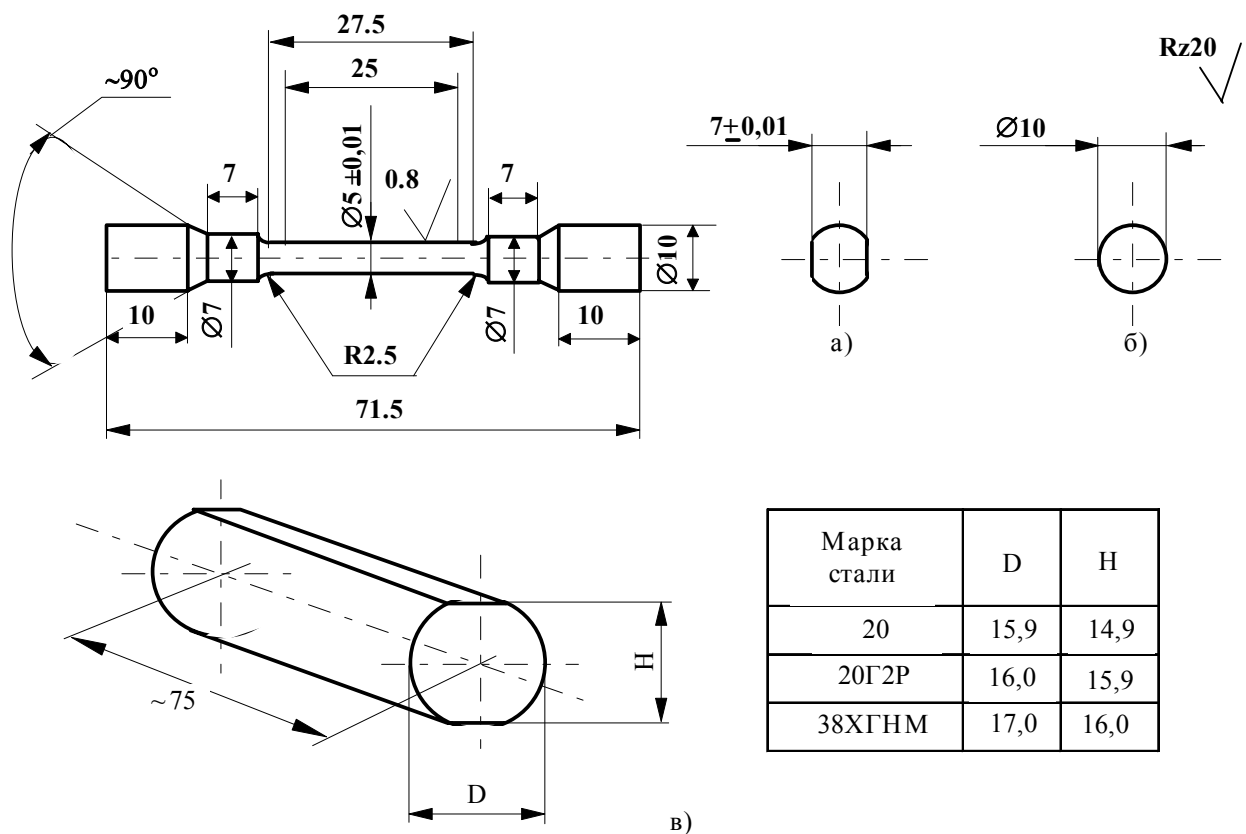


Рис. 7. Форма и размеры образцов для испытаний по схемам 1 и 2.

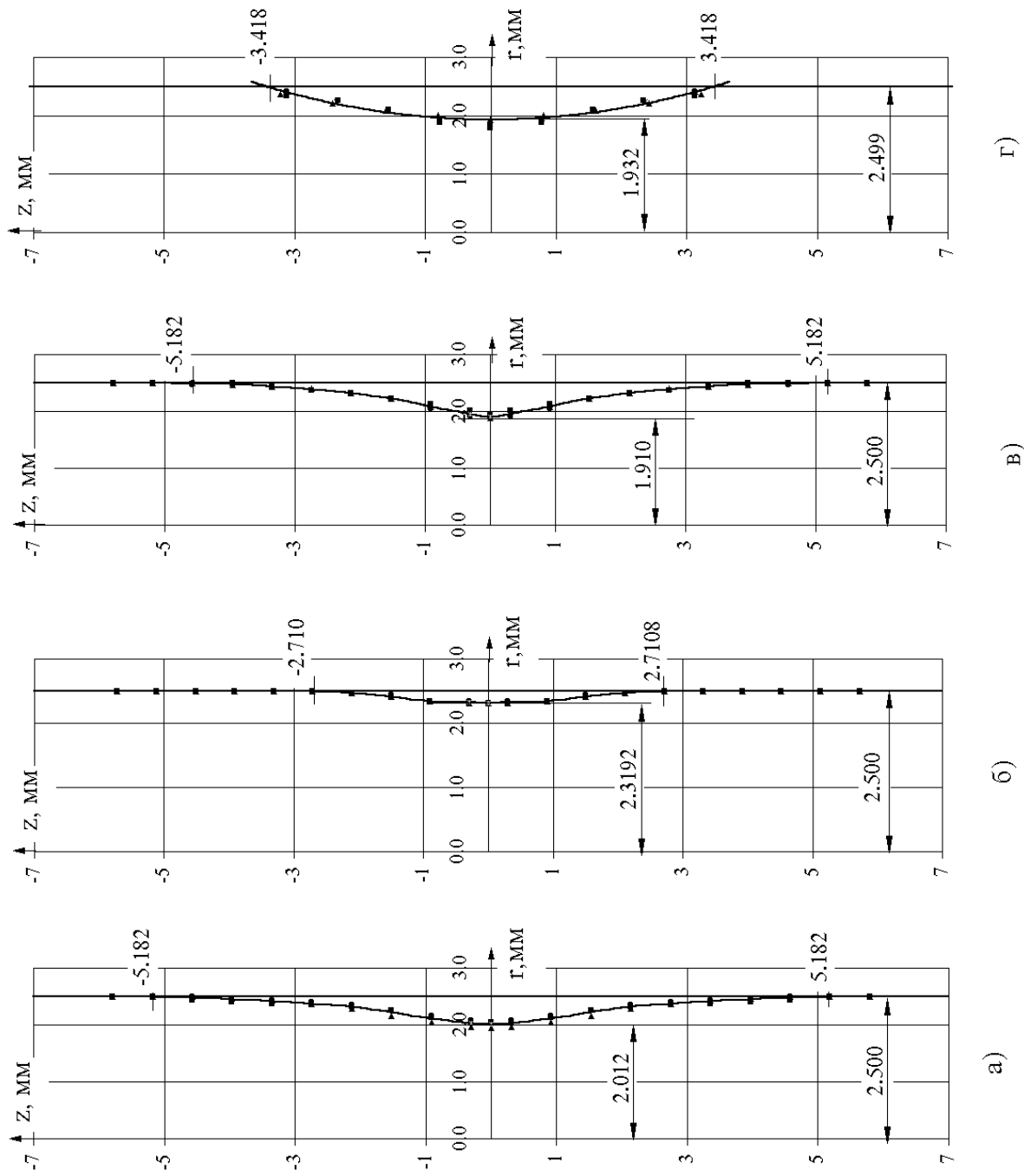


Рис. 8. Контур шейки в момент разрушения образца из: а) стали 38ХГНМ, б) 20Г2Р, в) 20 - деформированные по схеме 2, г) 20 - по схеме 1.

2.5. Математическая обработка экспериментальных данных.

Точность экспериментального определения значений напряжения течения при выбранном уровне надежности, характеризуемом доверительной вероятностью $P = 95\%$, оценивали путем расчета погрешности и доверительного интервала в следующей последовательности [106].

1. Математическое ожидание характеристики свойства X (среднее значение по результатам n измерений) находили по формуле

$$\bar{X}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (44)$$

В нашем случае число измерений равно количеству использованных образцов, $n=3...5$.

2. Среднеквадратичное отклонение определяли как

$$\sigma_1 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_1)^2}{n-1} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (45)$$

3. Погрешность определения характеристики рассчитывали по формуле

$$\Delta = t \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}}, \quad (46)$$

где t - квантиль распределения Стьюдента. Значение t для соответствующего числа степеней свободы $n-1$ и выбранного уровня значимости

$$\varepsilon = 1 - \frac{P}{100} = 1 - \frac{95}{100} = 0,05,$$

находили по таблицам в [106].

4. Доверительный интервал определяли как:

$$\bar{X}_1 \pm \Delta, \quad (47)$$

Смысл доверительного интервала состоит в том, что истинное значение (генеральное среднее значение характеристики X) находится в пределах доверительного интервала с взятой для расчета доверительной вероятностью.

В данной работе, там где это необходимо, доверительный интервал обозначен на графиках отрезком, симметричным относительно точки, обозначающей среднее значение величины.