

142 К

Б. Я. Мазуровский
А. Н. Сизёв

ЭЛЕКТРО- ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

В ЛИСТОВОЙ
ШТАМПОВКЕ

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
Проектно-конструкторское бюро
электрогидравлики

*Б. Я. Мазуровский,
А. Н. Сизёв*

Электрогидравлический
эффект
в листовой
штамповке

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 1983

Электрогидравлический эффект в листовой штамповке / Мазуровский Б. Я., Сизёв А. Н. — Киев : Наук. думка, 1983. — 192 с.

В монографии систематизирован и обобщен материал по технологическим процессам электрогидроимпульсной листовой штамповки. Приведены основы физики импульсного воздействия на заготовку и ее деформирования при высоковольтном разряде в жидкости.

Описаны конструкции электрогидроимпульсных прессов, установок и оснастки для листовой штамповки. Обобщен передовой опыт штамповки характерных деталей.

Приведены данные, необходимые для технологических расчетов процессов электрогидроимпульсной штамповки. Рассмотрены тенденции в развитии технологии и оборудования и их экономическая эффективность.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами проектирования технологического оборудования и процессов листовой штамповки, а также для аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.

Ил. 109. Табл. 24. Библиогр.: с. 184—190 (141 назв.).

Ответственный редактор *В. Г. Сысоев*

Рецензенты *Е. П. Микитюк, Н. В. Старков*

Редакция технической литературы

М $\frac{2704030000-427}{M221(04)-83}$ 418-83

© Издательство «Наукова думка», 1983

ПРЕДИСЛОВИЕ

Уровень развития листовой штамповки является одним из основных показателей развития машиностроения. Создание в нашей стране крупных машиностроительных предприятий обусловило широкое внедрение в производство этого способа обработки металлов. Построены крупные цехи листовой штамповки, главным образом на новых заводах-гигантах автомобильной, тракторной, авиационной промышленности и других отраслей. До 75 % номенклатуры деталей автомобилей, до 40 % тракторных деталей изготавливаются из листовых заготовок, а детали приборостроения, предметов широкого потребления — 80—95 %. На листовую штамповку переведено изготовление крупных деталей автомобилей, таких, как рамы, кузовов, крыльев, крышек, картеров и т. п.

Появились прессы-автоматы, прессы-гиганты с числом ходов до 1000 в минуту и усилием до 75 000 т и т. п. Освоение процессов листовой штамповки связано с изготовлением дорогостоящей штамповой оснастки. Поэтому параллельно, и прежде всего для нужд мелкосерийного производства, развивались специальные методы штамповки. Особое место среди них занимают импульсные методы штамповки, в основе которых заложено применение универсального инструмента — жидкой передающей среды — воды. Первые исследования, проведенные в СССР Р. В. Пихтовниковым и в США Д. С. Вудом, показали возможность получения качественных и точных деталей из листовых заготовок со снижением их себестоимости в условиях мелкосерийного производства. Применение электрогидравлического эффекта давало дополнительные преимущества и создавало благоприятные условия для применения электрогидроимпульсного (ЭГ) оборудования в промышленных условиях.

Без должного теоретического анализа и критической оценки первых экспериментальных результатов выводы о преиму-

щества импульсной обработки распространялись на многие материалы и формы деталей. На практике это не всегда оправдывалось, приводило иногда к сокращению работ.

Последнее десятилетие активно исследовали импульсную обработку металлов давлением. Волновой характер распространения напряжений и деформаций изучался в работах Ю. Я. Волошенко-Климовицкого, Б. М. Малышева, Х. А. Рахматулина, Г. С. Шапиро, В. С. Ленского и др. Теорией динамических явлений в различных средах занимались Ю. Н. Роботов, А. А. Ильюшин, В. В. Соколовский, Н. В. Зволинский, Н. Кристеску и др. Исследованиям динамических процессов деформирования металлов посвящены труды Р. В. Пихтовникова, М. А. Анучина, О. Д. Антоненкова, Е. А. Попова, Ю. Н. Алексеева, В. Г. Кононенко, С. М. Поляка, Б. А. Щеглова, Д. Рейнхарда, Д. Пирсона, У. Джонсона и др. Все эти работы строились на основе феноменологической теории твердого тела с допущениями о сплошности тела заготовки, изотропности ее свойств. Такой подход давал возможность изучать механику импульсного деформирования с учетом инерционных сил, рассматривать изменение сопротивления деформированию в зависимости от скорости обработки, искать закономерности изменения деформации во времени при различных схемах нагружения, учитывать разные массы, схемы соударения.

Принимаемые варианты идеализации процесса не учитывали изменения свойств, и полученные описания содержали параметры, подлежащие определению с помощью испытаний. А испытания часто проводятся в условиях, не соответствующих реальному процессу. Например, часто после импульсного деформирования материалы упрочняются, и накопленный статистический материал дает возможность предсказывать и учитывать это упрочнение. Но встречаются случаи, когда высокопрочные сплавы разупрочняются, как это было, например, со сплавом АМгбН при ЭГ штамповке днищ [80].

Попытки учесть изменения свойств материалов при импульсном деформировании делались в работах В. В. Соколовского и Б. А. Щеглова, но им удалось лишь прийти к выводу о необходимости создания устройств для испытания материалов в условиях реальных импульсных процессов, чтобы потом их можно было учесть. Очевидно, требуется более глубокое и тщательное исследование происходящих при импульсном деформировании процессов, с использованием физики твердого тела и теорий дислокаций и линий скольжения.

Возникающие в жидкости над поверхностью заготовки или внутри трубы импульсы высокого давления при электрогид-

равлическом эффекте вызывают в металле резко локализованные возмущения — волны сжатия зубовидной формы, волновые процессы, пластическую деформацию с высокой скоростью. В материале происходят два противоположных процесса: упрочнение и разупрочнение. Измельчаются зерна, изменяется ориентация кристаллов и межкристаллитных слоев, возникают внутренние напряжения. Энергия деформации превращается в теплоту, начинаются процессы возврата и рекристаллизации, снимаются искажения кристаллической решетки, уменьшаются внутренние напряжения. Чаще процессы разупрочнения отстают и происходит динамическое упрочнение.

В настоящее время делаются попытки на основании теории дислокаций обосновать явление торможения развития очагов разрушения периодическими волнами механических напряжений, изучаются процессы импульсного деформирования с использованием теорий линий скольжения и теплового эффекта. Величина температурного эффекта в случае импульсного деформирования может превышать температуру возврата и рекристаллизации. Теплота работы деформации, сосредоточиваясь в процессе деформирования в районе поверхностей скольжения, может существенно влиять на процесс формирования.

К сложностям, обусловленным процессами поведения металлов при импульсном деформировании, следует добавить сложности процессов преобразования энергии, накапливаемой в конденсаторных батареях, в гидродинамические явления и их воздействие на объект обработки.

Электрогидроимпульсная штамповка, как и многие другие виды обработки и оборудования, развивалась на основе изобретений, а не по классической схеме: от фундаментальных исследований к прикладным и далее к опытно-конструкторским разработкам, серийному производству и внедрению. И несмотря на значительные пробелы в изученности процессов деформирования с помощью электрогидравлического эффекта, в производстве с успехом используется оборудование для электрогидроимпульсной листовой штамповки. Разработан параметрический ряд гаммы электрогидроимпульсных прессов и установок, часть из которых выпускается серийно.

Практиков интересуют предельные возможности деформирования, наиболее оптимальные схемы реализации процесса, схемы и методики расчета технологических процессов, рекомендации по проектированию оснастки, отработке технологии и эксплуатации существующего оборудования.

За период с начала исследований возможности использования электрогидравлического эффекта для листовой штампов-

ки, создания первых опытных образцов оборудования и попыток его использования для производственных нужд до настоящего времени накоплен большой материал. Создание и опыт эксплуатации серийного оборудования — толчок к разработке методик расчета технологических процессов ЭГ штамповки, изучению критериев оценки осуществимости процессов, расширению схем штамповки и изучению их предельных возможностей, поиску оптимальных вариантов технологии и оснастки. За последние годы изучались, например, предельные возможности вытяжки деталей со сферическим дном с точки зрения устойчивости заготовки [78], эффективность использования концентраторов силового поля [23, 56], в том числе подвижных концентраторов [56], испытывались и внедрялись различные схемы штамповки: метанием жидкости, метанием заготовки, вытяжка из разнотолщинных заготовок, вытяжка с присоединенной массой, двухпереходная вытяжка с предварительным набором материала, пробивка с одновременной отбортовкой, штамповка через эластичные диафрагмы подогретых заготовок и т. д. Большое внимание уделялось исследованию процесса электрогидроимпульсной калибровки сварных оболочек и созданию специализированного оборудования [41, 88, 89, 119, 123, 128].

Экспериментальные данные, учет опыта по расширению номенклатуры штампуемых деталей на многих предприятиях и опыта эксплуатации оборудования позволяют в настоящее время сделать обобщение накопленного материала в области листовой штамповки электрогидравлическим эффектом. Накопленный значительный опыт исследований и разработок технологических процессов и оборудования с использованием электрогидравлического эффекта обобщен в работе [88], где охвачен широкий круг вопросов. Электрогидроимпульсная запрессовка более подробно рассмотрена в монографии [74]. Листовая штамповка с использованием электрогидравлического эффекта освещена в отдельных статьях различных сборников и журналов [7, 36, 70, 72, 73, 79, 106, 120, 122, 123].

Большой материал по результатам исследований механизмов нагружения заготовок при ЭГ разряде в воде, оптимизации энергетических параметров, влияния форм камер на эффективность нагружения изложен в книге В. Н. Чачина [114]. Однако основное внимание в ней уделено исследованиям процессов взаимодействия жидкости и заготовки. Книга содержит много полезного материала, но вопросы технологии, разработки оснастки, эксплуатации оборудования, на наш взгляд, рассмотрены недостаточно.

Авторы взяли на себя задачу обобщить и систематизировать многолетний опыт ПКБЭ АН УССР и других организа-

ций и заводов по листовой штамповке электрогидравлическим эффектом. Эта книга может быть полезной специалистам, занимающимся разработкой технологических процессов и оснастки, а также эксплуатирующим ЭГ прессы и установки; может быть использована конструкторами и технологами, аспирантами и студентами, занимающимися разработками, совершенствованием и изучением процессов и оборудования листовой штамповки электрогидравлическим эффектом.

Авторы выражают искреннюю благодарность за помощь в проведении исследований сотрудникам ПКБЭ АН УССР В. А. Саенко, Н. В. Старкову, А. В. Цветкову, В. А. Школьникову, результаты которых приведены соответственно в параграфах 3 и 6 главы V, параграфе 5 главы IV, параграфе 2 главы IV и параграфе 3 главы II, а также Т. А. Пашиновой и Т. А. Банниковой за оформление рукописи.

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

1. СУЩНОСТЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Электрогидроимпульсные процессы основаны на использовании электрогидравлического эффекта — комплекса явлений, связанных с высоковольтным разрядом в жидкости. Суть его заключается в следующем. Через повышающий трансформатор 1 (рис. 1, а) и высоковольтный выпрямитель 2 в конденсаторной батарее 3 накапливается электрическая энергия до заданной величины напряжения. Специальным коммутирующим устройством — разрядником 4 — замыкается разрядный контур и напряжение подается на электроды 5. Под действием высокого напряжения (5—70 кВ), в результате ионизации неоднородной жидкости 6 возникает канал проводимости, по которому протекает импульсный ток (10—250 кА), расширяя ионизированный канал. Таким образом, энергия в канале между электродами выделяется за короткий промежуток времени (от десятков до сотен микросекунд). Температура в канале разряда достигает нескольких десятков тысяч градусов $(1,4—4,0) \cdot 10^4$ К.

Стремительное расширение плазменного канала вызывает в жидкости ударные волны с давлением на фронте, достигающим у поверхности канала величины нескольких десятков тысяч атмосфер $(10—20)$ кб¹, разряд сопровождается световым излучением, возникновением магнитного поля, пульсацией и перемещением масс жидкости. По существу и характеру проявления — это электрический взрыв, способный деформировать различные материалы заготовок 11, придавая им форму матрицы 12.

Механическое действие высоковольтного разряда в жидкости впервые было обнаружено в 1767—1769 гг. Г. Лейном и

¹ Превращение графита в алмаз было осуществлено при давлении, приблизительно равном 50 кб.

и Дж. Пристли. Неоднократно предпринимались попытки практического использования этого физического явления, однако к успеху они не привели.

Предложения И. В. Федорова в 1932 г. [11] и Л. А. Юткина в 50-е годы [129] положили начало интенсивным исследованиям высоковольтного разряда в жидкости и гидродинамических явлений, его сопровождающих. Немалый вклад в изучение взрывных процессов внесли Г. И. Покровский, М. А. Лаврентьев, К. П. Станюкович, Е. И. Исаченков, В. Н. Чачин, К. Н. Богоявленский, А. А. Дерibas, В. М. Ку-

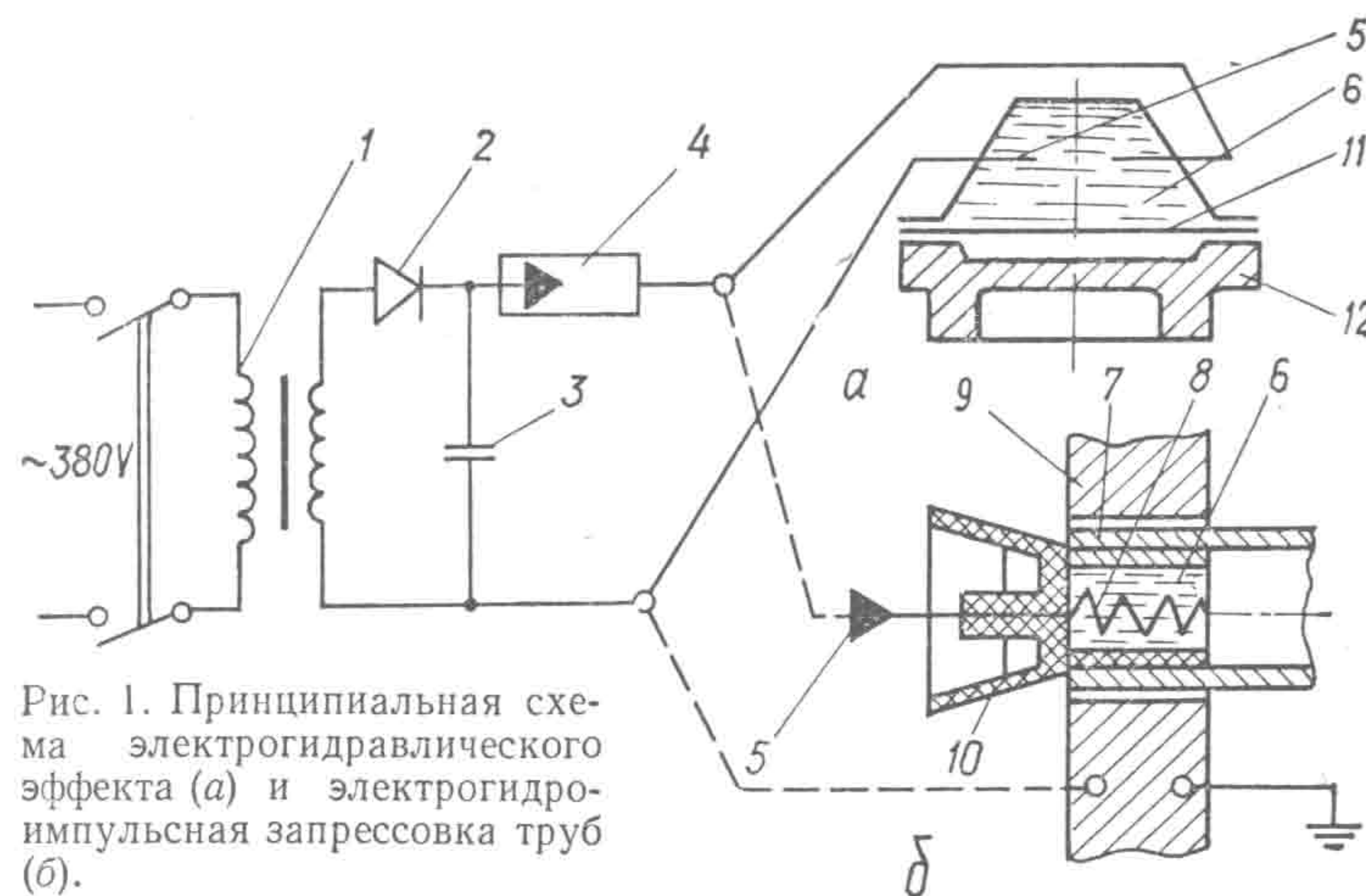


Рис. 1. Принципиальная схема электрогидравлического эффекта (а) и электрогидроимпульсная запрессовка труб (б).

динов, Г. А. Гулый, И. С. Стекольников, В. С. Комельков, Ф. Боудан, Р. Коул, Д. Райнхард, Д. Пирсон. Была установлена взаимосвязь энергетических параметров накопителя энергии (конденсаторной батареи) и характеристик разрядной цепи с параметрами гидродинамических явлений [4, 42, 62, 66, 87, 88, 114]. Исследовались вопросы оптимизации энергетических параметров и характеристик разрядной цепи применительно к разным технологическим процессам и технологическим операциям [41, 42, 54, 57, 65, 66, 88, 90, 92, 97, 114, 121, 123].

Конструктивные элементы оборудования, между которыми происходит высоковольтный разряд в жидкости, получили название электродов. Различия в расположении электродов и методах инициирования пробоя межэлектродного промежутка породили ряд различных способов и устройств для ЭГ обработки металлов давлением [9, 10, 13—20]. Наиболее простой вариант конструкции электродной системы предназначен для работы в условиях пробоя разрядного промежутка [14, 15].

Но такой вариант не обеспечивает оптимальных условий и стабильности энерговыделения, потери же при этом могут быть весьма значительными и достигать 20 и даже 60 %. Для искусственного образования канала и повышения эффективности разряда в последнее время широко применяются инициаторы — тонкие проводники различной формы, помещенные между электродами [12, 16]. Инициирование разряда взрывающейся проволокой (ВП) позволяет свести к минимуму потери энергии в период формирования пробоя и повысить его эффективность в 1,5—2,0 раза.

В изучение и применение взрывающихся проволок немалый вклад внесли И. Ф. Кварцхава [58], С. В. Лебедев, В. В. Арсентьев [8], Е. В. Кривицкий, В. К. Шолом [65], В. Н. Очеретин [92], В. Чейс [118], Г. Андерсон и др.

Электрический взрыв проводника — это совокупность явлений, возникающих при подаче от разряда конденсатора \mathcal{E} на проводник δ импульса тока достаточно большой мощности (рис. 1, б). При разряде конденсатора на ВП δ происходит весьма быстрый ее нагрев, плавление, взрывообразное испарение, газокINETическое расширение продуктов взрыва и образовавшейся плотной плазмы. Все это порождает в окружающей жидкости δ электровзрывного патрона 10 гидродинамические возмущения — источник импульсных давлений, действующий на трубу 7 и трубную решетку 9 .

Движение расходящегося потока жидкости при взрыве проволоки в свободном объеме происходит до тех пор, пока его кинетическая энергия не перейдет в потенциальную, а давление в образовавшемся пузыре не станет значительно меньше гидростатического. Под действием этого гидростатического давления происходит обратное движение жидкости, и потенциальная энергия вновь переходит в кинетическую энергию сходящегося потока. При схлопывании полости давление в ней резко возрастает, и далее, в зависимости от условий электровзрыва, механизм процесса может повторяться в виде нескольких последовательно затухающих пульсаций. Практическое значение наряду с ударной волной главным образом имеет лишь первая пульсация, основная энергия которой излучается в виде вторичного импульса сжатия. С энергетической точки зрения ударная волна несет до 20—25 %, а гидросток до 30—40 % энергии, выделившейся в канале разряда при ВП [87].

Оптимальные условия энерговыделения в каждом конкретном случае обеспечиваются выбором соответствующих материала, диаметра, длины ВП и энергетических параметров разрядного контура. Эффективность энерговыделения при этом обусловлена множеством факторов: параметрами разрядного

контура (напряжение зарядки U_0 и емкость конденсаторной батареи C , индуктивность разрядного контура L); параметрами взрывающейся проволоки (диаметр d_0 , длина l_0 , материал, форма); параметрами передающей среды (плотность, скорость распространения звука, химический состав).

Взрывающаяся проволока не только иницирует канал разряда, но и является регулятором выделяемой энергии. Электрический взрыв проволоки начинается с быстрого ее нагрева достаточно мощным импульсом тока до температур плавления, кипения и, наконец, перегрева. Истинный взрыв начинается с момента перехода жидкой фазы в парообразную. При этом напряжение существенно возрастает, а ток уменьшается. Резко возрастает и сопротивление проволоки; затем следует резкое уменьшение тока, напоминающее обрыв, после чего наступает пауза тока, которая в зависимости от остаточного напряжения и параметров расширяющихся продуктов взрыва может быть бесконечной или закончиться повторным пробоем [27, 118]. Это объясняется возникновением микропустот и областей разрыва металлических связей в жидком металле, превращением жидкого металла в пар и потерей проводимости. Резкое увеличение объема проводника порождает импульс давления.

Вопрос о природе сил, приводящих к разрушению проводников при электрическом взрыве, носит дискуссионный характер. Это связано с необходимостью учета влияния на процесс взрыва многих факторов (сильные магнитные и электрические поля, воздействие окружающей среды, неоднородности строения проводников, различия в условиях подвода энергии и т. п.). В разные моменты времени в зависимости от количества и скорости введенной в проволоку энергии возможны многофазовое состояние материала проволоки, существенные неоднородности по длине, наличие частичных дуг, периферийный разряд. В общем случае учесть все это не удастся; определяющим может быть то или иное явление, что сказывается на форме и величине импульса давления.

Предпринят ряд попыток классификации взрыва проволок. Ф. Д. Беннет [134] предложил разделять взрывы на сверхбыстрые, быстрые и медленные. Е. В. Кривицкий [63], классифицируя проводники, выделяет сверхтонкие, тонкие и толстые. Исследования энергетических и гидродинамических характеристик взрыва проводников показали, что можно считать общепризнанным существование оптимального диаметра проводника d_0 для любого сочетания параметров разрядного контура (U_0, L, C), обеспечивающего в данном контуре максимально эффективное преобразование запасенной энергии в полезную работу. При оптимальном диаметре проволоки

давление на фронте ударной волны и скорость деформирования заготовки максимальны.

Значение оптимального диаметра взрывающейся проволоочки может быть рассчитано, например, по зависимости [112]

$$d_0 = 2 \left[\frac{W_0}{z \rho_0 \sigma (\lambda + \lambda_1)} \right]^{\frac{1}{4}},$$

где z — волновое сопротивление, $z = \sqrt{L/C}$; ρ_0 — плотность материала проводника; σ — удельная электропроводность; λ , λ_1 — удельная теплота плавления и парообразования.

Исследования, проведенные В. А. Коротковым и В. К. Шоломом, показали, что при оптимальном диаметре проводника исчезает временный интервал между ударными волнами, генерируемыми собственно взрывом проводника и дуговой стадией разряда. Гидродинамический КПД (отношение энергии, переданной ударной волне W_y , к энергии W_0) при этом максимальный: проводник взрывается однородно по длине и сечению. Увеличение диаметра сверх оптимального приводит к тому, что взрыв происходит неоднородно по длине проводника, при этом резко снижается эффективность генерации давления. Процесс взрыва проволоочки неоптимального диаметра может быть в значительной мере нестабилен от разряда к разряду. Изменяя диаметр проволоочки можно изменять форму импульса давления в широких пределах [62]. Взрыв проволоочки оптимального диаметра происходит почти при максимуме тока.

Менее изучен вопрос о взаимодействии длины проволоочки l_n и режима взрыва, так как влияние длины менее критично, чем влияние диаметра.

Для расчета оптимальной длины проволоочки предложено выражение [112]

$$l_0 = BU_0^4 \sqrt{LC},$$

где B — константа, равная $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м/В} \cdot \text{с}$.

При генерации ударных волн электрическим взрывом проводников основными характеристиками, при возрастании которых увеличивается давление ударной волны, являются мощность на проволочке N , скорость нарастания мощности dN/dt и величина энергии, выделившейся в первом полупериоде W_1 , или КПД первого полупериода $\eta_1 = \frac{W_1}{W_0}$. Поэтому режим взрыва, при котором эти величины максимальны, можно считать оптимальным или эффективным.

В некоторых случаях, например, при малых объемах используются проволоочки спиральной формы, в частности в патронах для ЭГ запрессовки. Применение спиральной формы

проволочки в отличие от прямой повышает эффективность энерговыделения в патроне до 25—30 % [57], что связано с изменением магнитного поля проволочки и уменьшением его сдерживающего влияния. Форма и продолжительность импульса давления зависят и от материала проволочки.

В. Н. Очеретиным [92] в качестве материала проволочек исследовались сталь, медь, латунь и алюминий. С применением стальной проволочки были получены более однородная структура канала, более высокие плотность энергии в канале и скорость ее выделения, скорость распространения фронта ударной волны и давление на фронте. Предлагается в установках, использующих электрический взрыв проволочек в воде, отдавать предпочтение стальным проволочкам. Правда, другими исследователями [116] это оспаривается.

При оптимальном режиме влияние материала проволочки на гидродинамические характеристики импульса сжатия незначительно. Это объясняется тем, что за время нагрева в проволочке выделяется незначительное количество энергии. Основная же доля энергии выделяется за время пика напряжения и индуктивного возврата энергии в разрядный промежуток. Поэтому при выборе материала проволочки следует руководствоваться соображениями технического порядка: длиной, прочностью проволочки и обрабатываемостью, степенью токсичности паров при взрыве, а также дефицитностью материала проволочки. Из чистых металлов наилучшим сочетанием технологических свойств проволочки обладают алюминий, сталь, нихром.

2. МЕХАНИЗМ НАГРУЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ

При пробое межэлектродного промежутка в воде или взрыве проволочки силовое воздействие на заготовку определяют параметры ударной волны и давление в канале разряда после отделения ударной волны от его поверхности, а после окончания разряда давление в парогазовой полости (ПГП), образованной каналом разряда. Вопросы воздействия ударной волны и давления в канале разряда и парогазовой полости на преграду рассматриваются не только применительно к электрогидроимпульсной штамповке, в частности аналогичные задачи рассматриваются при гидровзрывной штамповке. Исследования [29, 30, 45, 64, 114, 125, 133] показали, что механизм воздействия жидкости на преграду при импульсном выделении энергии сложен и зависит от характеристик как источника возмущений, так и самой преграды.

Основываясь на проведенных в этом направлении исследованиях, можно дать следующее описание механизма нагружения заготовки при высоковольтном пробое разрядного промежутка в жидкости. Начинается деформирование в результате действия на заготовку ударной волны. В зависимости от характеристик заготовки, ее жесткости и инерционности различают два механизма деформирования — с образованием кавитационного разрыва жидкости у заготовки и без его образования, что определяет отличие в нагружении заготовки не только ударной волной, но и парогазовой полостью.

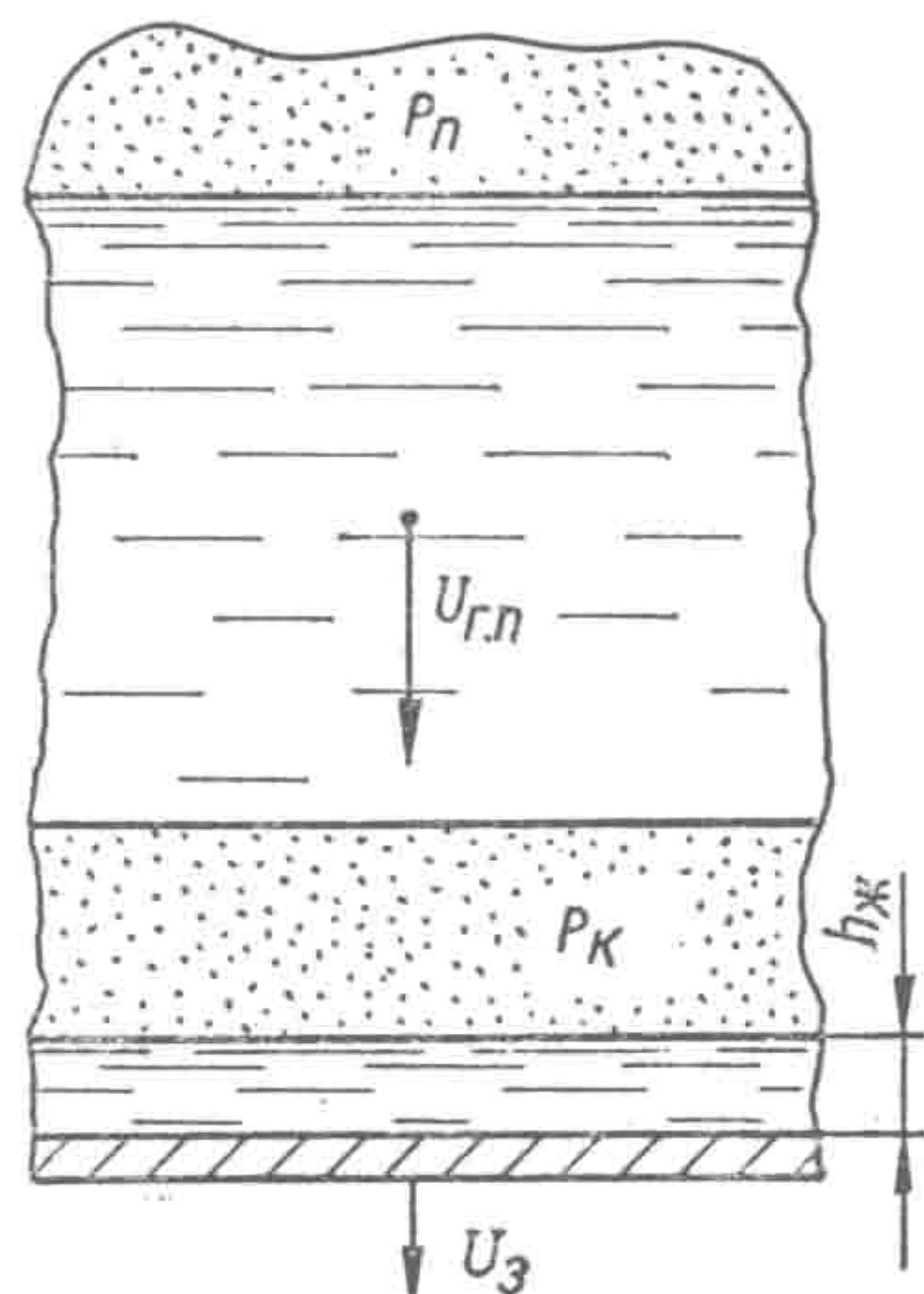


Рис. 2. Деформирование заготовки ударной волной с образованием кавитационной полости и гидропотока.

аналогично процессу выхода ударной волны на свободную поверхность. Вследствие того что скорость заготовки уменьшается под действием сил сопротивления, кавитационный поток догоняет заготовку и, ударяясь о нее, образует на ее поверхности слой жидкости $h_{ж}$ (рис. 2), передавая при этом заготовке часть своей кинетической энергии. Перенос жидкости кавитирующим потоком с поверхности кавитационного разрыва на поверхность заготовки отодвигает кавитационную полость с давлением P_k от заготовки в глубь жидкости. Вместе с тем жидкость, находящаяся между кавитационной полостью и парогазовой, образованной каналом разряда или самим каналом разряда, если разряд еще не закончился, разгоняется под действием давления в парогазовой полости P_n или канале разряда и образуется так называемый гидропоток. Он схлопывает кавитационную полость, в результате удара возникает давление P , зависящее от разности скорости гидропотока $V_{г.п}$ и скорости заготовки $V_з$ с присоединенным слоем жидкости $h_{ж}$ [114], $P = \rho_0 c_0 (V_{г.п} - V_з)$.

Чем больше разность скоростей, тем выше давление на заготовку от действия гидропотока.

После схлопывания кавитационной полости гидропотоком начинается второй этап нагружения заготовки, сопровождающийся повторным ее разгоном. Следует отметить, что к моменту схлопывания кавитационной полости скорость заготовки несколько уменьшается относительно начально приобретенной в результате действия сил сопротивления деформированию. Энергия гидропотока тем больше, чем больше объем кавитационной полости, образованной начальным прогибом заготовки, что в свою очередь связано с исходной жесткостью и инерционностью заготовки. Чем выше удельная масса и исходная жесткость заготовки, тем меньше величина деформации от действия ударной волны и, следовательно, меньшую энергию имеет гидропоток.

Процесс деформирования заготовки после схлопывания кавитационной полости целесообразно представить в двух вариантах.

Первый вариант характеризуется тем, что в процессе схлопывания кавитационной полости у заготовки объем парогазовой полости, образованной каналом разряда, увеличивается настолько, что давление в нем падает до атмосферного или даже ниже. В этом случае давление на заготовку определяется лишь инерционным сжатием жидкости при ее торможении заготовкой, т. е. процесс деформирования определяется только кинетической энергией жидкости, накопленной к моменту схлопывания кавитационной полости, и парогазовая полость не оказывает положительного влияния на дальнейший процесс деформирования. Более того, к концу деформирования, когда скорость заготовки падает до нуля, на нее действует результирующее давление обратного направления вследствие вакуума в камере, и если жесткость заготовки недостаточна, чтобы выдержать это давление, то в процессе схлопывания парогазовой полости она деформируется в обратную сторону. Схлопывание парогазовой полости приводит к образованию вторичных ударных волн и возрастанию давления. Таким образом, пульсация полости приводит к изменению направления действия нагрузки на заготовку. На практике при штамповке заготовок с малой относительной толщиной наблюдается обратное их выпучивание, особенно если заготовки из алюминиевых сплавов.

Во втором варианте к моменту схлопывания кавитационной полости гидропотоком парогазовая полость (или канал разряда, если разряд еще не закончился) имеет существенное избыточное давление. В результате давление на заготовку определяется не только инерционным сжатием жидкости при

ее торможении после удара о заготовку, но и избыточным давлением со стороны парогазовой полости или канала разряда.

Описанный выше механизм нагружения с участием гидротока, как было отмечено, имеет место при малой жесткости и инерционности заготовки. Причем чем больше жесткость и инерционность заготовки, тем энергия гидротока, а следовательно, и давление, создаваемое при его торможении, меньше. Если начальное сопротивление деформированию больше критического, то ударная волна не в состоянии образовать кавитационный разрыв жидкости у заготовки. В этом случае

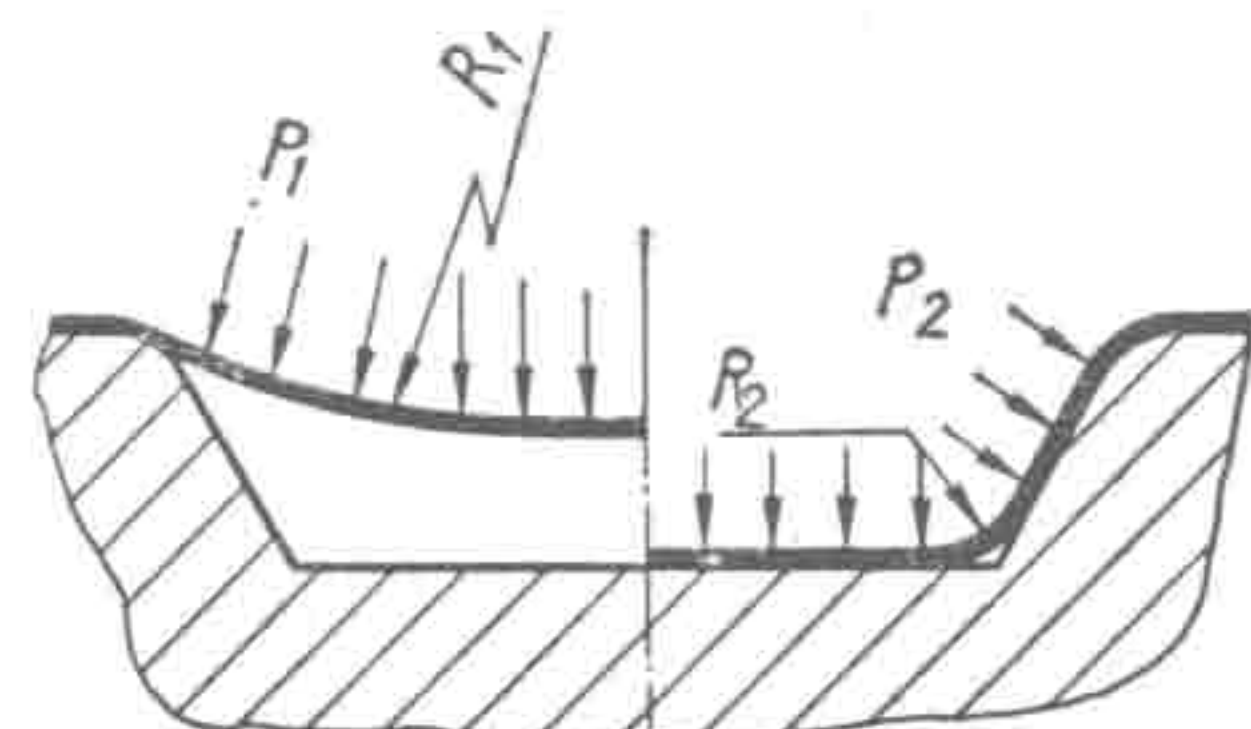


Рис. 3. Изменение жесткости заготовки при ЭГ деформировании.

механизм нагружения заготовки после ее деформирования ударной волной характеризуется давлением сжатия жидкости расширяющейся парогазовой полостью. Такой механизм получил название «механизм квазистатического давления» [83].

Квазистатическое давление считается главным фактором, определяющим нагрузку на заготовку или стенку камеры при разряде в небольшом, жестко закрытом объеме жидкости. Под жестко закрытым объемом подразумевается такой, изменение которого под действием давления не превышает упругих деформаций материала стенок камеры.

Следует отметить в качестве примечания, что приведенное выше описание механизмов нагружения заготовки представлено упрощенно. Так, например, упущено из рассмотрения образование отраженных волн сжатия при взаимодействии первичной ударной волны и заготовки и при ударе гидротока о заготовку, выход этих волн на поверхность жидкости — парогазовая полость и распространение в связи с этим волны разряда в сторону заготовки, а также влияние на процесс схлопывания кавитационной полости ударных волн, отраженных от стенок камеры, и так далее, что усложняет описание механизма деформирования, оставляя без принципиальных изменений его основные положения.

Заканчивая описание нагружения заготовки при ЭГ штамповке, необходимо еще раз подчеркнуть, что механизм нагружения зависит от характеристик заготовки, определяющих в первую очередь ее начальное сопротивление деформированию. Большинство формообразующих операций выполняются, как правило, в многоимпульсном режиме, т. е. за несколько разрядов, и в процессе деформирования характеристики заготовки меняются в широких пределах, так как изменяются ее кривизна и относительная толщина неподкрепленных матрицей

участков. Например, при вытяжке перед первым импульсом начальное сопротивление заготовки деформированию минимально и для ее перевода за предел упругости может быть достаточным давление P_1 в несколько атмосфер, в то же время для перевода этой заготовки на последних калибрующих импульсах (рис. 3) может потребоваться давление P_2 в несколько сот атмосфер, причем соотношение этих давлений находится в обратной зависимости от радиусов кривизны P_1 и P_2 . Условием окончания деформирования является отсутствие пластической деформации на последнем калибрующем импульсе, при этом можно считать, что энергия выделяется в жидкости, находящейся в жестко ограниченном объеме. Таким образом, при штамповке одной детали могут иметь место различные механизмы нагружения заготовки, меняющиеся от разряда к разряду. Например, деформирование заготовки ударной волной с образованием при первых импульсах кавитационной полости, гидротоком и вторичными ударными волнами, образованными при схлопывании парогазовой полости; пластическое деформирование ударной волной без образования кавитационной полости у заготовки и давлением со стороны ПГП; деформирование ударной волной в упругой зоне и перевод за предел упругости давлением жидкости, сжатой парогазовой полостью.

С практической точки зрения количественная оценка результатов деформирования при выделении энергии промежуточными разрядами может показать лишь коэффициент полезного действия процесса, величина которого используется при определении требуемого числа импульсов для штамповки детали при известных параметрах оборудования. Задача относится к разряду второстепенных. Наибольший практический интерес представляет максимальное давление на заготовку, которое может обеспечить ЭГ пресс, так как этим определяется возможность получения детали.

В зависимости от условий выделения энергии максимальное давление может определяться различными факторами. Например, при разряде в камерах малого, жестко ограниченного объема давление жидкости, сжатой парогазовой полостью, превышает давление от действия ударной волны [83, 114]. С увеличением объема давление от сжатия жидкости парогазовой полостью падает, в итоге становится меньше, чем давление, создаваемое ударной волной, особенно если с увеличением объема, что, как правило, связано с размерами детали, расстояние от канала разряда до заготовки изменяется мало или остается постоянным, как, например, в прессах с подвижным электродом. В этом случае давление определяется параметрами ударной волны. При использовании схем

штамповки метанием жидкости или метанием заготовки давление определяется скоростью метаемой жидкости или самой заготовки. Поэтому при оценке давлений необходимо выделять главный действующий фактор: ударную волну, гидроток или давление парогазовой полости.

3. ДЕФОРМИРОВАНИЕ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Ударная волна, образуемая каналом разряда, характеризуется максимальным давлением и параметрами, определяющими профиль ударной волны. Чаще всего давления в ударной волне представляют в виде зависимости

$$P = P_m e^{-\frac{t}{\theta}}. \quad (1.1)$$

Здесь P_m — максимальное давление; t — время, отсчитываемое от момента прихода фронта волны в рассматриваемую точку; θ — характерное время спада давления, равное времени, в течение которого давление ударной волны уменьшается от P_m до P_m/e , где e — основание натурального логарифма.

В зависимости от соотношения расстояния r от канала разряда до заготовки и длины разрядного промежутка l амплитудное давление P_m может быть определено по приближенным формулам [64]:

$$P_m = \frac{b(\eta)}{\sqrt{r}} \frac{\rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{L^{3/8} l^{3/8}}, \quad r \leq 2,5l; \quad (1.2)$$

$$P_m = \frac{b(\eta)(1 - 0,1r/l)}{\sqrt{r}} \frac{\rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{l^{3/8} L^{3/8}}, \quad 2,5l \leq r \leq 5,5l; \quad (1.3)$$

$$P_m = \frac{1,6b(\eta)}{r^{1,1}} \frac{\rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{L^{3/8}}, \quad 5,5l \leq r \leq 200l, \quad (1.4)$$

где $b(\eta) = 0,05 [1 - 0,8(\eta - 0,7)^2]$; η — критерий подобия определяющий долю энергии, выделившуюся в первом полупериоде ($0,4 \leq \eta \leq 1,0$ — в зависимости от характеристик разряда); в первом приближении можно осреднять $b(\eta)$ для указанного диапазона η .

Характерное время θ можно определять в зависимости от длительности первой полуволны разрядного тока τ_1 и параметров разрядной цепи [64]:

$$\theta = 0,32\tau_1 \sqrt[4]{\left(\frac{\rho_0 l}{U_0^2 C^2 L}\right)^{1/4}} \quad (1.5)$$

при $\tau_1 = (1 + 0,5\eta^4)\sqrt{LC}$.

Как показали исследования, величина деформации заготовки под действием ударной волны отличается в зависимости от ее удельной массы и силы сопротивления деформированию. Если, например, рассматривается деформирование ударной волной плоской заготовки, то основную роль играет удельная масса и начальное сопротивление деформированию не учитывается, при этом движение заготовки рассматривается исходя из уравнения движения пластины [114]:

$$m\ddot{x} + \rho_0 c_0 \dot{x} = 2P_m e^{-\frac{t}{\theta}},$$

где m — удельная масса заготовки; x — перемещение пластины; $\rho_0 c_0$ — акустическое сопротивление воды.

При наличии начальной кривизны, например при повторном нагружении в процессе многоимпульсного деформирования, при раздаче или при калибровке радиусов закруглений, сила сопротивления может быть учтена введением в уравнение члена kx , где k — коэффициент жесткости [114]. В этом случае уравнение движения заготовки примет вид

$$m\ddot{x} + \rho_0 c_0 \dot{x} + kx = 2P_m e^{-\frac{t}{\theta}}. \quad (1.6)$$

Необходимо отметить, что эти уравнения справедливы для всего процесса деформирования, если в результате действия ударной волны не образуется кавитационный разрыв. В общем случае их можно считать приемлемыми до момента отрыва заготовки от поверхности жидкости, после чего необходимо рассматривать уравнения движения, учитывающие действие не прямой ударной волны, а кавитирующего потока жидкости и далее гидротока.

В принципе уравнение (1.6) может быть использовано для определения возможности получения детали требуемой формы с точки зрения достаточности деформирующего усилия. В этом случае можно считать, что вследствие малости рассматриваемых деформаций на последних калибрующих импульсах кавитационный разрыв не образуется и данное уравнение справедливо. При этом условием достаточности деформирующего усилия, в данном случае параметров ударной волны, будет $x > \epsilon_y$, где ϵ_y — величина упругих деформаций наиболее жестких участков детали.

Предварительную оценку достаточности параметров ударной волны можно провести упрощенно, сравнивая удельную энергию ударной волны с удельной работой упругой деформации на рассматриваемом участке

$$\frac{P_m^2 \theta}{2\rho_0 c_0} > \frac{1}{2} P_{\sigma_T} \epsilon_y, \quad (1.7)$$

где $\frac{P_m^2 \theta}{2\rho_0 c_0}$ — удельная энергия ударной волны; $\frac{1}{2} P_{\sigma_T} \cdot \epsilon_y$ — удельная работа упругой деформации рассматриваемого участка заготовки (P_{σ_T} — давление, необходимое для перевода материала за предел упругости; ϵ_y — максимальная величина упругих деформаций).

Неравенство (1.7) является необходимым условием, хоть и не достаточным для полной оценки, и позволяет оценить целесообразность более точных расчетов. Если левая часть неравенства оказывается меньше правой, то решать уравнение не имеет смысла. В дополнение к неравенству (1.7) можно сравнить амплитудное давление ударной волны P_m с давлением, необходимым для перевода материала за предел упругости P_{σ_T} , если $P_m > P_{\sigma_T}$, то вероятность перевода материала за предел упругости можно считать вполне достаточной, чтобы проводить более точную оценку.

4. НАГРУЖЕНИЕ ЗАГОТОВКИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Механизм квазистатического давления при ЭГ штамповке подробно рассмотрен В. Н. Чачиным [83, 114]. Давление определяется из уравнения баланса энергии, выделившейся в канале разряда, исходя из предположения, что в результате расширения парогазовой полости, образованной каналом разряда, происходит сжатие жидкости, находящейся в закрытой жесткой камере. При этом рассматриваются два варианта: газовая полость достигает максимальных размеров до окончания разряда; газовая полость достигает максимальных размеров после окончания разряда. Наибольшее значение имеет рассмотрение второго варианта. Относительно первого варианта необходимо отметить, что прекращение роста газовой полости до окончания разряда должно соответствовать условию прекращения поступления энергии в систему газовой полости — жидкость, и поэтому разряд можно считать окончившимся.

Баланс энергии после окончания разряда представим в следующем виде:

$$W = W_{п.п} + W_{к.п} + W_{п.ж} + W_{к.ж} + W_p,$$

где W — энергия, выделившаяся в канале разряда; $W_{п.п}$ — потенциальная энергия полости, определяемая внутренним давлением; $W_{к.п}$ — кинетическая энергия частиц газа расширяющейся полости; $W_{п.ж}$ — потенциальная энергия сжатой

жидкости; $W_{к.ж}$ — кинетическая энергия присоединенной к полости массы жидкости; W_p — энергия различного рода потерь.

Опуская из рассмотрения потери и пренебрегая кинетической энергией частиц газа по сравнению с кинетической энергией присоединенной массы жидкости вследствие большой разницы в плотности, можно рассмотреть баланс энергии $W_0 = W_{п.п} + W_{к.ж} + W_{п.ж}$, где W_0 — энергия, расходуемая на создание давления в камере.

Рост давления на заготовку или стенку камеры прекращается после того, как парогазовая полость достигает максимальных размеров, т. е. скорость ее расширения обратится в нуль и, следовательно, вся кинетическая энергия присоединенной массы жидкости перейдет в потенциальную энергию сжатой жидкости. Если скорость расширения газовой полости на момент равенства давления в полости и жидкости незначительна, то нарастание давления можно рассматривать как статическое и пренебречь кинетической энергией жидкости. Для такого случая максимальное давление можно считать равномерно распределенным по всему объему камеры, т. е. одинаковым в парогазовой полости и в жидкости. Это предположение может быть справедливым при небольшом расстоянии от разрядного промежутка до стенок камеры, т. е. при малом объеме, когда волна возмущений, отразившись от стенок камеры, выходит на поверхность парогазовой полости раньше, чем произойдет значительное перемещение присоединенных слоев жидкости. При выходе волны возмущений на поверхность полости резко возрастает сопротивление со стороны жидкости, так как расширению начинают противодействовать упругие силы сжатия жидкости, что приводит к резкому падению скорости перемещения присоединенной ее массы и выравниванию давления в парогазовой полости и жидкости. Это подтверждается тем, что при разряде в ограниченном объеме наблюдается «период стояния» стенок полости, равный $1/3$ периода ее пульсации [42].

До выхода отраженной волны на поверхность полости давлению полости противодействует только сила инерции присоединенной массы жидкости, т. е. полость расширяется как бы в свободном объеме, и если расстояние от канала разряда до стенок камеры или скорость расширения полости достаточно велики, то к моменту выхода волны возмущений на поверхность полости значительная часть ее внутренней энергии переходит в кинетическую энергию присоединенной массы. В этом случае к моменту падения скорости расширения полости до нуля давление в ней оказывается значительно меньше, чем в жидкости, вследствие ее инерционного сжатия. В пределе

можно предполагать, что вся энергия может перейти в потенциальную энергию сжатой инерционными силами жидкости.

Скорость расширения канала разряда и парогазовой полости при выделении одинакового количества энергии в канале разряда может отличаться в зависимости от параметров разрядного контура: напряжения и емкости, индуктивности, величины разрядного промежутка, сопротивления воды, а также наличия инициаторов и их характеристик. В общем случае для расчета давления на заготовку необходимо решить последовательно несколько задач. Во-первых, определить характеристики парогазовой полости, образованной каналом разряда — объем, давление, температуру, скорость расширения. Во-вторых, установить закон расширения полости после окончания разряда и определить, какая доля энергии переходит в энергию сжатой жидкости, а какая остается в парогазовой полости на момент достижения ею максимального объема. Далее, зная изменение объема воды, из уравнения ее состояния определить давление. Это достаточно сложные теоретические задачи, для решения которых необходимо применять численное интегрирование дифференциальных уравнений с использованием ЭВМ [83, 114]. Однако для предельных случаев, т. е. для равномерного распределения давления по объему, и для случая, когда вся рассматриваемая энергия перейдет в потенциальную энергию сжатой жидкости, такой расчет может быть проведен более просто, переходя от уравнения баланса энергии к равенству, которое для равномерного распределения давления принимает вид

$$W_0 = W_{п.п} + W_{п.ж} \quad (1.8)$$

и для второго случая

$$W_0 = W_{п.ж}. \quad (1.9)$$

Для определения энергии парогазовой полости в настоящее время используют интеграл, получаемый из уравнения адиабаты

$$W_{п.п} = \frac{P_{п} V_{п}}{\nu - 1}, \quad (1.10)$$

где $P_{п}$ — давление в полости; $V_{п}$ — объем полости; ν — эффективный показатель адиабаты, принимаемый для послеразрядной стадии обычно равным $4/3$ [87, 90].

Энергию сжатой жидкости можно определить, используя уравнение состояния воды в форме Тэта, из которого связь давления и изменения объема жидкости выражается формулой

$$P_{к.с} = B \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^n - 1 \right],$$

где $B = 3,214 \cdot 10^8$ Па; $n = 7$; V_0 — исходный объем жидкости; V — объем сжатой жидкости, который для абсолютно жесткой камеры принимается равным разности исходного объема V_0 и объема парогазовой полости $V_{п}$, т. е. $V = V_0 - V_{п}$.

Энергия сжатой жидкости $W_{п.ж} = \int_{V_0}^V P_{к.с} dV$ может быть рассчитана по формуле, получаемой после интегрирования в указанных пределах,

$$W_{п.ж} = \frac{BV_0}{n-1} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{n-1} - 1 \right] - BV_0 \left(1 - \frac{V}{V_0} \right).$$

С целью упрощения расчетов можно принять линейную зависимость между объемом сжимаемой жидкости и давлением, используя объемный модуль упругости воды $E_v \approx 21000 \cdot 10^5$ Н/м² [91].

В этом случае $P_{к.с} = E_v \frac{(V_0 - V)}{V_0}$, а $W_{п.ж} = \frac{1}{2} E_v \frac{(V_0 - V)^2}{V_0}$.

Например, при энергии 10 кДж, которая используется на создание давления в камере объемом 1 л, расчетное, равномерно распределенное по всему объему камеры давление будет равно порядка $775 \cdot 10^5$ Н/м², при этом потенциальная энергия сжатой жидкости приблизительно равна 1,4 кДж, а парогазовой полости — 8,6 кДж, объем которой будет порядка 37 см³. Если считать, что вся эта энергия переходит в потенциальную энергию жидкости, то тогда давление будет равно порядка $2050 \cdot 10^5$ Н/м². При этом изменение объема жидкости, соответствующее объему парогазовой полости с внутренним давлением, равным атмосферному, будет 97,6 см³.

Сопоставление этих данных показало, что в первом случае энергия разряда расходуется неэффективно, так как 86 % рассматриваемой энергии не используется для сжатия жидкости и, следовательно, создания давления на стенку камеры и заготовку.

Исходя из изложенного можно сделать вывод, что для повышения эффективности использования энергии разряда в случае действия механизма квазистатического нагружения целесообразно выбирать параметры разрядной цепи, которые обеспечивают повышенную скорость расширения канала разряда и парогазовой полости, что может быть достигнуто сокращением времени выделения энергии за счет уменьшения емкости и снижения индуктивности. Однако этому требованию противоречит требование снижать скорость и ускорение деформирования заготовки при выполнении такой широко распространенной операции, как вытяжка. Исследования показали, что предельные возможности вытяжки с точки зрения дости-

жимой степени деформации при штамповке на высоких напряжениях уменьшаются [54]. Поэтому использование высоких напряжений не всегда может быть оправдано.

Уменьшение остаточной энергии парогазовой полости может быть достигнуто и за счет использования схем штамповки метанием жидкости или метанием заготовки, которые обеспечивают повышение действующего на заготовку давления без изменения параметров разрядной цепи.

5. НАГРУЖЕНИЕ МЕТАНИЕМ ЖИДКОСТИ И МЕТАНИЕМ ЗАГОТОВКИ

Схема штамповки метанием жидкости осуществляется на практике созданием в исходном положении между заготовкой и жидкостью воздушной прослойки, а схема метанием заготовки — созданием воздушной прослойки между заготовкой и матрицей. Эти схемы представляют определенный

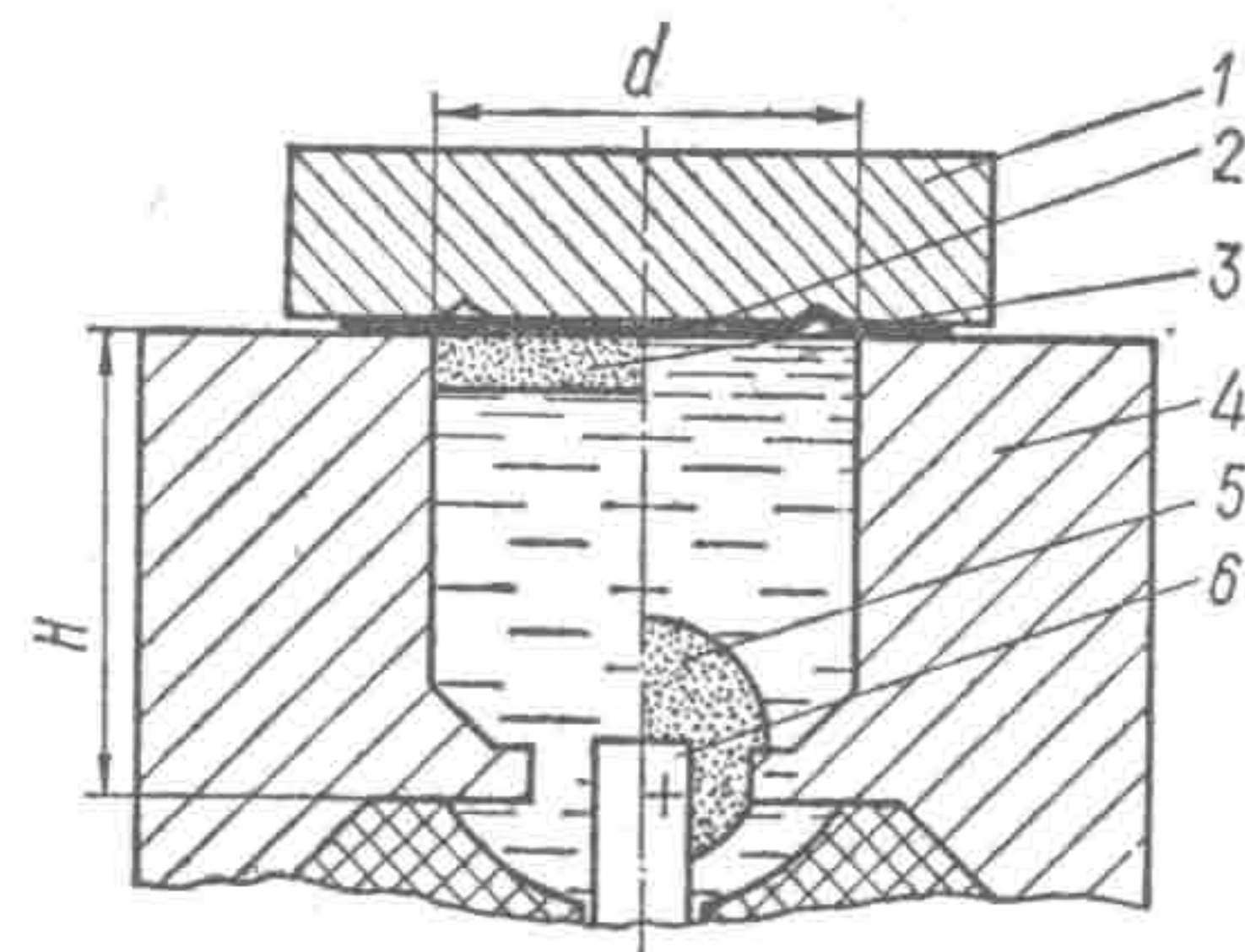


Рис. 4. Схема штамповки метанием жидкости.

практический интерес, так как позволяют значительно увеличивать деформирующие усилия при ЭГ штамповке [101]. Исследования схемы воздействия на заготовку метанием жидкости при гидровзрывной штамповке показали, что использование этой схемы позволяет повышать КПД процесса по сравнению со штамповкой без воздушной прослойки [46, 82, 99].

Рассматривая схему штамповки листовой заготовки 2 на матрице 1 (рис. 4) метанием жидкости в сравнении с нагружением квазистатическим давлением, можно отметить, что наличие воздушной прослойки 3 создает условия расширения канала разряда между электродом 6 и камерой 4 и парогазовой полости 5, соответствующие условиям при разряде в открытом объеме, при которых в идеальном случае вся энергия парогазовой полости может быть преобразована в кинетическую энергию жидкости.

Для обеспечения этого условия необходимо, чтобы объем воздушной прослойки равнялся объему, занимаемому парогазовой полостью после ее расширения до внутреннего давления, равного атмосферному. При этом можно считать, что до удара о заготовку жидкость приобретает кинетическую энергию, равную внутренней энергии парогазовой полости, если пренебречь потерями на трение, на вытеснение воздуха из

зазора между жидкостью и заготовкой за пределы камеры, а также на нагрев жидкости и т. д. Ударная волна также участвует в разгоне жидкости, так как выход отраженных от стенок камеры ударных волн на поверхность парогазовой полости увеличивает ее внутреннюю энергию, преобразующуюся в итоге в кинетическую энергию жидкости, а ударная волна, распространяющаяся в направлении воздушной прослойки, при выходе на поверхность жидкости создает кавитационный поток, также способствующий разгону жидкости. В грубом приближении можно полагать, что вся энергия ударной волны преобразуется в кинетическую энергию жидкости. Считая, что удар жидкости о заготовку происходит в момент схлопывания основной массой жидкости кавитационных слоев, образованных ударной волной, можно записать, пренебрегая указанными выше потерями, баланс энергий на начало соударения в виде равенства

$$W_0 = W_{к.ж} + W_{п_1} = \frac{Mx^2}{2} + \frac{P_{п_1}V_{п_1}}{\nu - 1},$$

где M — масса разогнанной жидкости, x — скорость жидкости в момент соударения; $P_{п_1}$ — давление в парогазовой полости на момент начала соударения; $V_{п_1}$ — объем полости.

После соударения, когда вся кинетическая энергия перейдет в потенциальную энергию сжатой инерционными силами жидкости, баланс энергий будет иметь вид

$$W_0 = W_{п.ж} + W_{п_2} = \int_V^{V_0} P(V) dV + \frac{P_{п_2}V_{п_2}}{\nu - 1},$$

где $V_{п_2}$ — объем парогазовой полости после сжатия жидкости, равный объему парогазовой полости на начало соударения и приращению объема парогазовой полости вследствие сжатия жидкости, $V_{п_2} = V_{п_1} + (V_0 - V)$.

Условие обеспечения максимального использования энергии для создания давления на заготовку будет при $W_{п_2} = 0$, т. е. при $P_{п_2}$, равном атмосферному P_a и соответственно $V_{п_2} = V_{п_2=P_a}$. Тогда

$$W_0 = W_{п.ж}, \quad (1.11)$$

т. е. будет иметь место случай, рассматривавшийся в качестве предельного при механизме квазистатического нагружения. Необходимо отметить, что равенства (1.9) и (1.11) в общем случае рассматриваются для разных объемов жидкости, так как в механизме квазистатического нагружения $W_{п.ж}$ относится ко всему объему жидкости, а для механизма нагружения метанием жидкости — только к метаемому объему жидкости.

Таким образом, схема метанием жидкости позволяет максимально использовать энергию, выделившуюся в канале разряда для повышения давления на заготовку путем максимального использования энергии парогазовой полости, которая при квазистатическом нагружении используется не полностью. Величина остаточной, неиспользуемой энергии парогазовой полости по расчетам при квазистатическом нагружении может составлять порядка 80 % выделившейся в канале разряда энергии для случая, когда давление по объему камеры распределяется равномерно.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что при рассмотрении механизмов нагружения квазистатическим давлением и метанием жидкости авторами принят ряд допущений, значительно упрощающих уравнение баланса энергии, в частности исключены из рассмотрения потери, а также принято условие о полной трансформации энергии ударной волны в энергию парогазовой полости и в кинетическую и потенциальную энергию жидкости. При практических расчетах необходимо вносить поправки на эти допущения, которые изменяют данные по количественной оценке получаемых давлений. Как показывает практика, указанные поправки весьма значительны, однако качественная сторона рассмотренных механизмов сохраняется.

В практике ЭГ штамповки вопрос повышения давления на заготовку очень часто встает при пробивке и рельефной формовке. Так, при штамповке на прессах Т1120 и Т1223, имеющих энергию в импульсе соответственно 10 и 20 кДж, с использованием основной схемы, без воздушной прослойки не удается в стальных заготовках пробить отверстие диаметром меньше 10—8 толщин материала и получить четкий, полный рельеф детали, если ширина рифтов или диаметр пуклевок меньше 2—3 толщин материала при рельефной формовке медных деталей. Поэтому экспериментальная оценка эффективности введения между заготовкой и водой воздушной прослойки применительно к пробивке отверстий и рельефной формовке представляет большой практический интерес.

Ряд экспериментов, проведенных для сравнения схемы штамповки метанием жидкости с основной схемой, показали значительную эффективность схемы штамповки метанием жидкости для повышения деформирующего усилия. Например, одна из серий экспериментов проводилась на прессе Т1220 с подключением дополнительных конденсаторов, позволяющих повышать энергию в импульсе до 40 кДж. При проведении экспериментов по пробивке и рельефной формовке использовалась камера цилиндрической формы с диаметром полости 90 мм при высоте 60 мм.

Проверка эффективности введения воздушной прослойки для пробивки осуществлялась на матрице, имеющей шесть отверстий диаметром 2, 3, 4, 6, 10 и 15 мм. Базовые эксперименты по пробивке без воздушной прослойки (рис. 5, а) проводились с использованием в качестве заготовок листовой меди, толщиной 0,5 мм, при энергии в импульсе 10, 20 и 40 кДж. Рабочее напряжение для всех уровней энергии было равно 10 кВ. Оснастка для пробивки с воздушной прослойкой

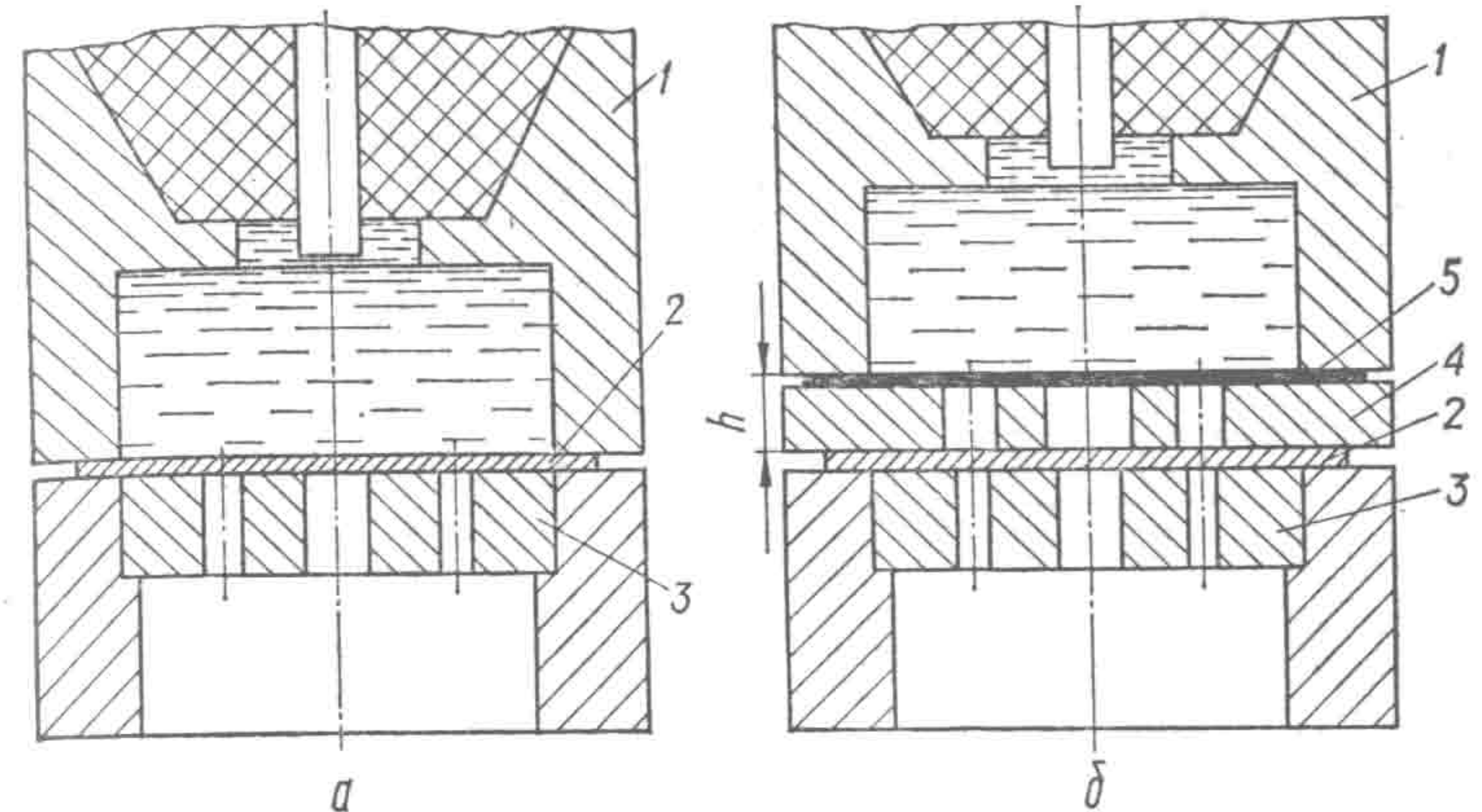


Рис. 5. Схема оснастки для базовых экспериментов по пробивке (а) и пробивке метанием жидкости (б).

лойкой отличалась наличием сменной проставки 4 с отверстиями, соосными отверстиям в матрице 3, и разрушаемой диафрагмы 5 из алюминиевой фольги толщиной 0,05 мм, благодаря которым в исходном состоянии при верхнем расположении камеры 1 обеспечивалась воздушная прослойка h между заготовкой 2 и водой (рис. 5, б). Высота воздушной прослойки менялась от 7,5 до 55 мм.

Оценка эффективности процесса проводилась по величине, создаваемой на заготовку нагрузки, в качестве эквивалента которой была принята величина эквивалентного гидростатического давления ($P_э$), требуемого для пробивки отверстий [60, 61],

$$P_э = \frac{4S\sigma_{ср}}{d}, \quad (1.12)$$

где S — толщина заготовки; $\sigma_{ср}$ — сопротивление материала срезу; d — диаметр наименьшего пробитого отверстия.

Базовые эксперименты показали, что при энергиях в импульсе 10, 20 и 40 кДж минимальные отверстия, пробиваемые в медных заготовках толщиной 0,5 мм, в условиях эксперимента

равны 10,6 и 4 мм соответственно. Величина соответствующего эквивалентного гидростатического давления приведена на рис. 6.

Эксперименты по пробивке с воздушной прослойкой проводились на энергии в импульсе 10 кДж с варьированием высоты воздушной прослойки h . При этом в качестве заготовок использовали медь, сталь Ст.3 и нержавеющую сталь 0X18H9T толщиной 0,5 мм. Использование сталей при штамповке с воздушной прослойкой как более прочных металлов дополнительно к меди было вызвано недостаточной ее прочностью.

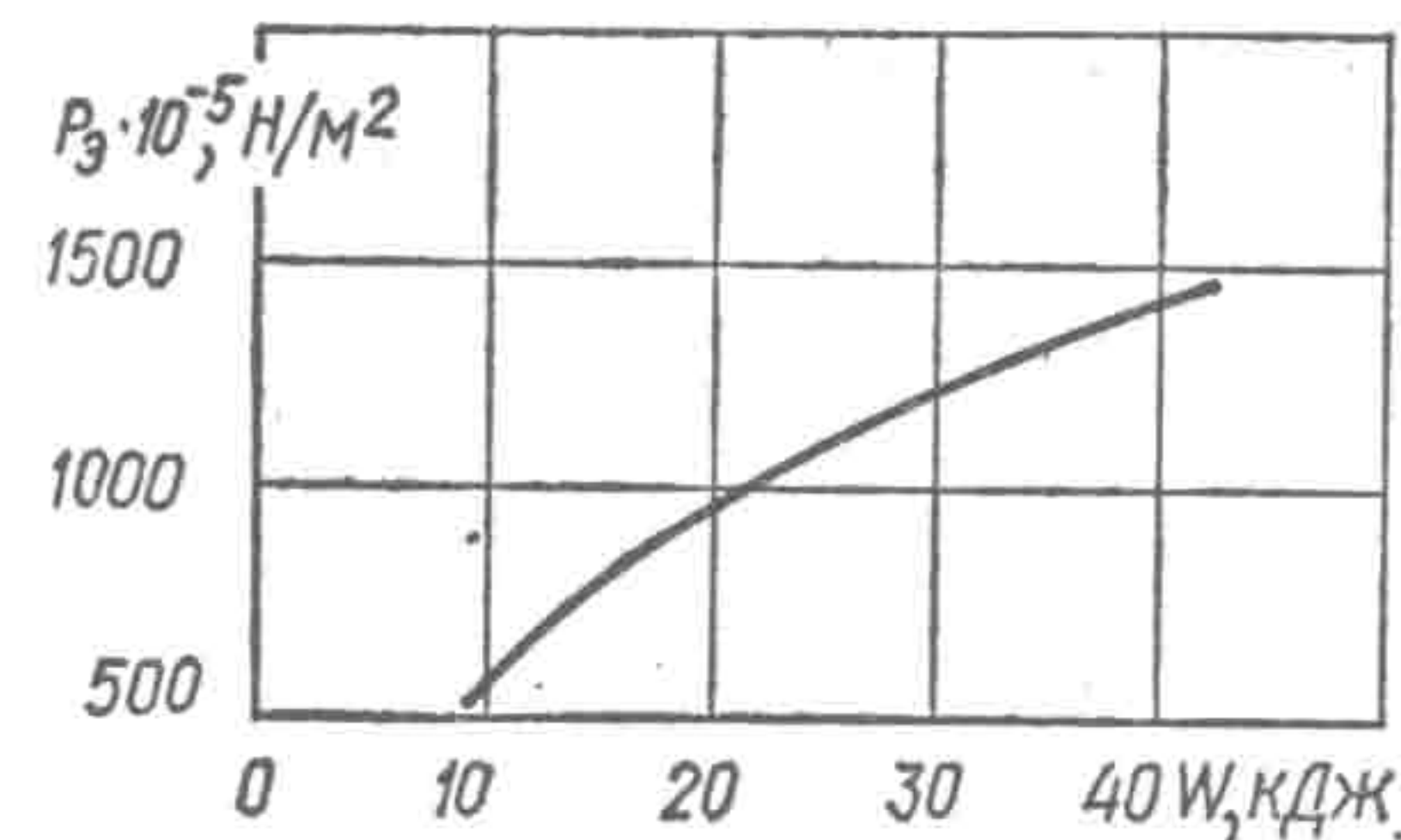
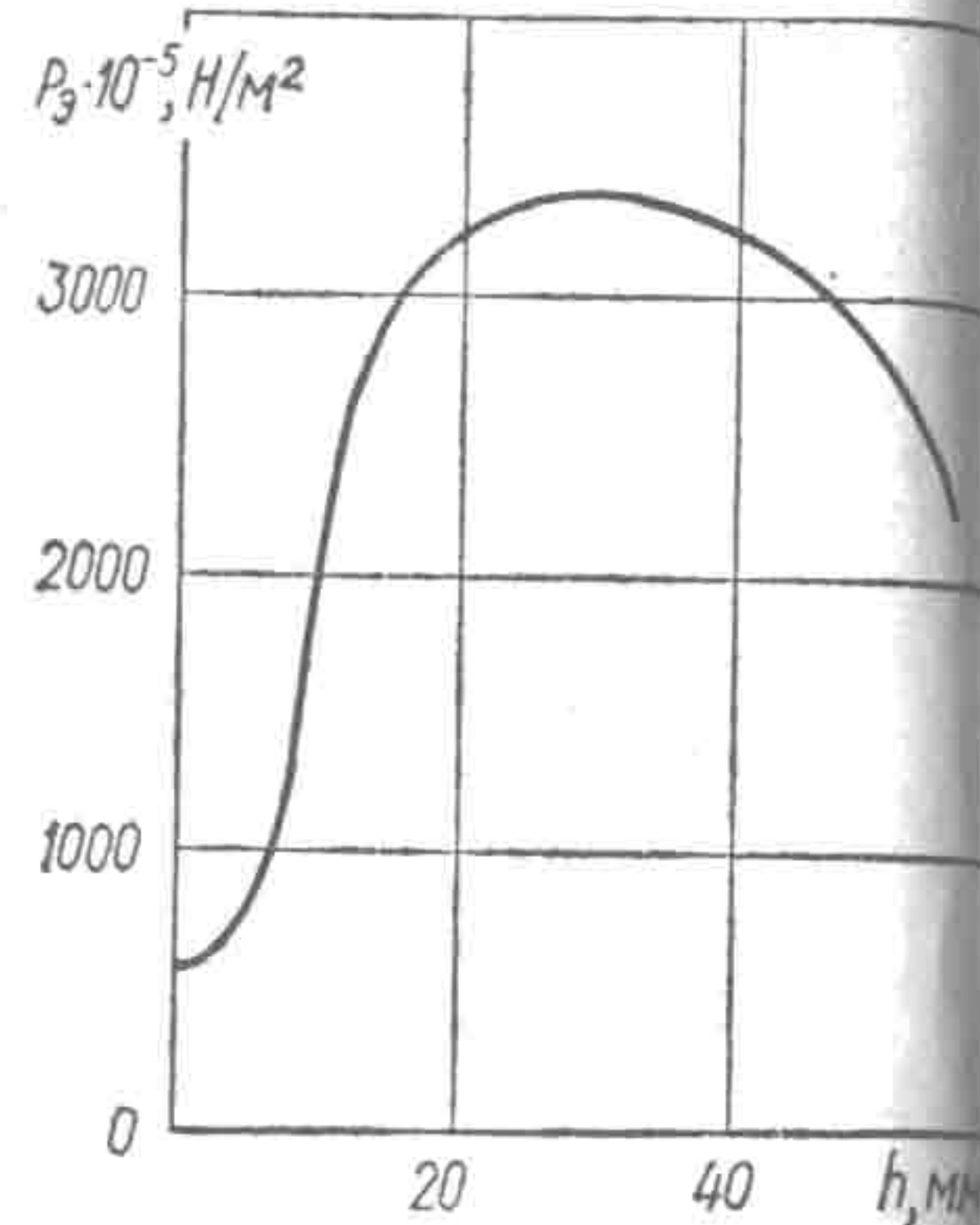


Рис. 6. Зависимость давления в камере от энергии в импульсе.

Рис. 7. Зависимость давления на заготовку от высоты воздушной прослойки при энергии в импульсе, равной 10 кДж.



ностью для установления максимального эквивалентного гидростатического давления, так как медные заготовки не фиксировали нагрузку выше требуемой для пробивки в ней минимальных отверстий диаметром 2 мм.

Результаты показали, что в условиях проведенных экспериментов воздушная прослойка повысила нагрузку на заготовку больше чем в пять раз (рис. 7). Следует обратить внимание на то, что увеличение энергии в импульсе в четыре раза (с 10 до 40 кДж) для пробивки без воздушной прослойки (см. рис. 6) не компенсировало преимущества схемы штамповки метанием передающей среды. Так, в базовых экспериментах при энергии в импульсе 40 кДж в меди пробивались отверстия диаметром 4 мм, что соответствовало $P_3 = 1400 \times 10^5 \text{ H/M}^2$, а при наличии воздушной прослойки между заготовкой и водой энергии в импульсе 10 кДж было достаточно для пробивки отверстий диаметром 2 мм не только в медных заготовках, но и в заготовках из Ст.3 и в отдельных случаях из стали 0X18H9T, что соответствовало $P_3 = 3200 \cdot 10^5 \text{ H/M}^2$.

Наличие воздушной прослойки между заготовкой и водой для исследованных диапазонов ее величины от 0 до 55 мм однозначно влияло на эффективность процесса, причем с наличием

экстремума, равного примерно 25 мм, при суммарной площади отверстий в проставке порядка 450 мм^2 (сменные проставки имели отверстия диаметром на 2 мм больше, чем основные отверстия в матрице).

Аналогичные эксперименты были проведены и для рельефной формовки. Сравнение результатов проводилось по глубине пуклевок одинакового диаметра, получаемых на медной заготовке толщиной 0,5 мм при формовке в матрицу, имеющую

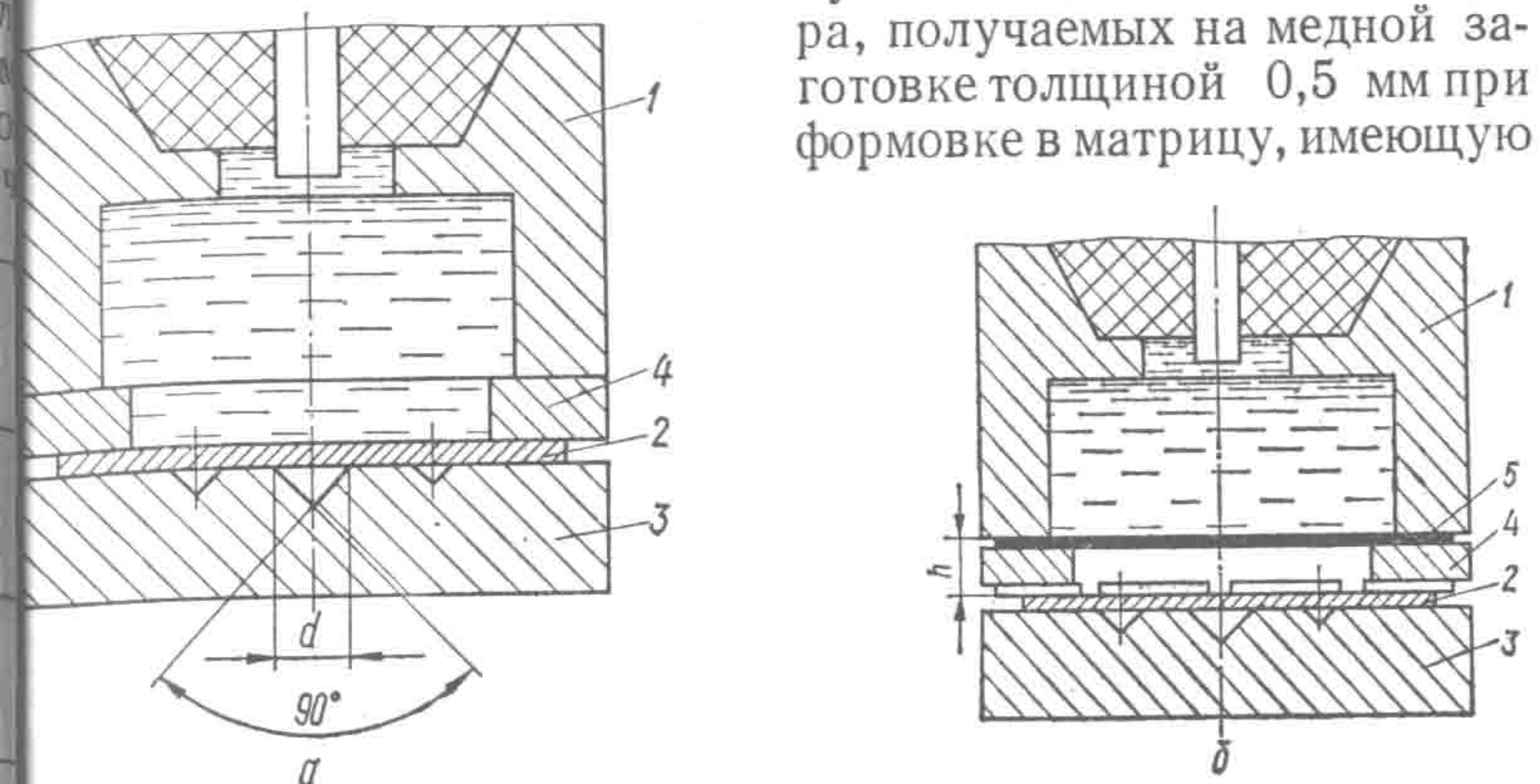


Рис. 8. Схема оснастки для базовых экспериментов по рельефной формовке (а) и метанием жидкости (б). Обозначения те же, что и на рис. 7.

конусные углубления с углом конуса 90° и различными диаметрами d оснований, равными 1, 2, 3, 5, 7 и 9 мм (рис. 8, а). Кроме того, сравнивалась величина энергии в импульсе, необходимая для получения одинаковых результатов при базовой схеме штамповки и схеме штамповки с воздушной прослойкой (рис. 8, б). Как и в экспериментах по пробивке для схемы метанием передающей среды, варьирование высотой воздушной прослойки осуществлялось сменными проставками с разрушаемой диафрагмой из фольги. Диаметр отверстия в сменной проставке был равен 60 мм. Высота воздушной прослойки менялась от 20 до 5 мм. Емкость конденсаторной батареи была равна 400 мкФ, напряжение 7 и 10 кВ, что соответствовало энергии в импульсе 9,8 и 20 кДж.

Эксперименты показали, что при штамповке по базовой схеме без воздушной прослойки с энергией в импульсе 20 кДж минимальный диаметр штампуемых пуклевок равен 2 мм. Пуклевки имеют неполный профиль, средняя высота равна 0,4 мм (табл. 1). При штамповке с воздушной прослойкой с энергией 20 кДж пуклевки диаметром 2 мм имеют полный профиль, высоту 1 мм, кроме того, имеются неполные отпечат-

ки пуклевок диаметром 1 мм. Высота пуклевок максимальна при величине воздушной прослойки $h = 10$ мм.

Энергии в импульсе, равной 9,8 кДж, оказалось достаточно чтобы получить для схемы метанием передающей среды результат лучше, чем при штамповке без воздушной прослойки энергией 20 кДж, следовательно, КПД в данном случае для штамповки с воздушной прослойкой выше более чем в два раза.

Таблица 1. Средняя глубина формуемых пуклевок

Энергия в импульсе, кДж	Напряжение, кВ	Высота прослойки, h мм	Средняя глубина пуклевок (мм) при диаметре (мм)			
			5	3	2	1
20,0	10	0	<u>2,5</u>	1,1	0,4	0,0
20,0	10	20	<u>2,5</u>	<u>1,5</u>	0,8	0,2
20,0	10	10	<u>2,5</u>	<u>1,5</u>	<u>1,0</u>	0,3
9,8	7	20	<u>2,3</u>	0,9	0,3	0,0
9,8	7	10	<u>2,5</u>	1,2	0,4	0,1
9,8	7	5	<u>2,5</u>	1,3	0,5	0,1

Примечания. 1. Подчеркнутые величины соответствуют полному оформлению пуклевок. 2. Средняя глубина пуклевок при диаметрах, равных 9 и 7 мм, составляет 4,5 и 3,5 мм соответственно.

Таким образом, проведенные эксперименты по пробивке рельефной формовке показали значительную эффективность схемы штамповки метанием передающей среды, при этом величина оптимальной воздушной прослойки для разных условий различна. Например, при площади воздушной прослойки порядка $4,5 \text{ см}^2$ ее оптимальная величина равна порядка 25 мм для энергии в импульсе 10 кДж (см. рис.7), а при площади порядка 28 см^2 оптимальная величина прослойки равна порядка 5 мм (табл. 1) для такой же примерно энергии в импульсе.

Необходимо отметить, что в данном случае сравнение выделяемой энергии при различных напряжениях не полностью равномерно, так как величина разрядного промежутка, выбранного произвольно, оставалась без изменений, следовательно, предпробивные потери были различны. Возможно при подборе оптимальных значений разрядных промежутков для 10 и 7 кВ были бы получены несколько другие соотношения размеров воздушной прослойки и деформирующих усилий. Однако обратная взаимосвязь оптимальной высоты воздушной прослойки с ее площадью будет сохраняться, из ранее рассмотренного условия максимального использования энергии парогазовой

полости видно, что определяющую роль играет не высота, а объем воздушной прослойки. Можно предположить о наличии оптимального объема воздушной прослойки для каждого уровня энергии, в частности для описанных выше экспериментов сравнение объемов воздушной прослойки, равных 11,3 и $14,0 \text{ см}^3$, подтверждает это предположение, поскольку отличие в объемах составляет всего порядка 14 %. Механизм нагружения при штамповке метанием заготовки аналогичен рассмотренному механизму метанием жидкости. Он также обеспечивает более полное использование энергии парогазовой полости, которая в процессе разгона заготовки преобразуется в ее кинетическую энергию и кинетическую энергию присоединенной к заготовке массы жидкости.

Практика показала, что использование схемы штамповки метанием жидкости на прессах с энергией до 20 кДж позволяет значительно увеличивать деформирующие усилия при штамповке деталей размерами до 100 мм и несколько больших размеров, порядка до 160 мм, при штамповке метанием заготовок с относительной толщиной порядка 0,05 [101]. Таким образом, отмечая повышение деформирующего усилия при штамповке на прессах типа Т1220, Т1223 с введением воздушной прослойки можно сделать вывод о механизме квазистатического нагружения в том плане, что при нагружении квазистатическим давлением имеют место значительные потери энергии на остаточную внутреннюю энергию парогазовой полости, которую необходимо учитывать при рассмотрении баланса энергий.

В технологических расчетах для механизма квазистатического нагружения при определении давления на заготовку можно исходить из равномерного его распределения по объему камеры. Оценку деформирующих усилий при штамповке метанием жидкости и метанием заготовки можно проводить исходя из условия перехода энергии парогазовой полости в кинетическую энергию заготовки или жидкости. Естественно, что для проведения практических расчетов необходимо учитывать многие факторы, в частности КПД перехода запасенной энергии в энергию парогазовой полости и сжатой жидкости, потери на нагрев, демпфирующее влияние воздушной прослойки, жесткость камеры, станины пресса и т. д. В настоящее время эти факторы учитываются с помощью коэффициентов, устанавливаемых опытным путем для каждого пресса.

6. СОПРОТИВЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ

Работа деформации определяется сопротивлением деформированию, которое может изменяться во время деформации. На ее значение оказывают совокупное влияние температура, степень и скорость деформации.

Известно много попыток найти сопротивление деформированию в зависимости от скорости и степени деформации, температуры, химического состава в виде линейных, степенных, логарифмических и других функций. А. Надаи выразил зависимость в общем виде уравнением

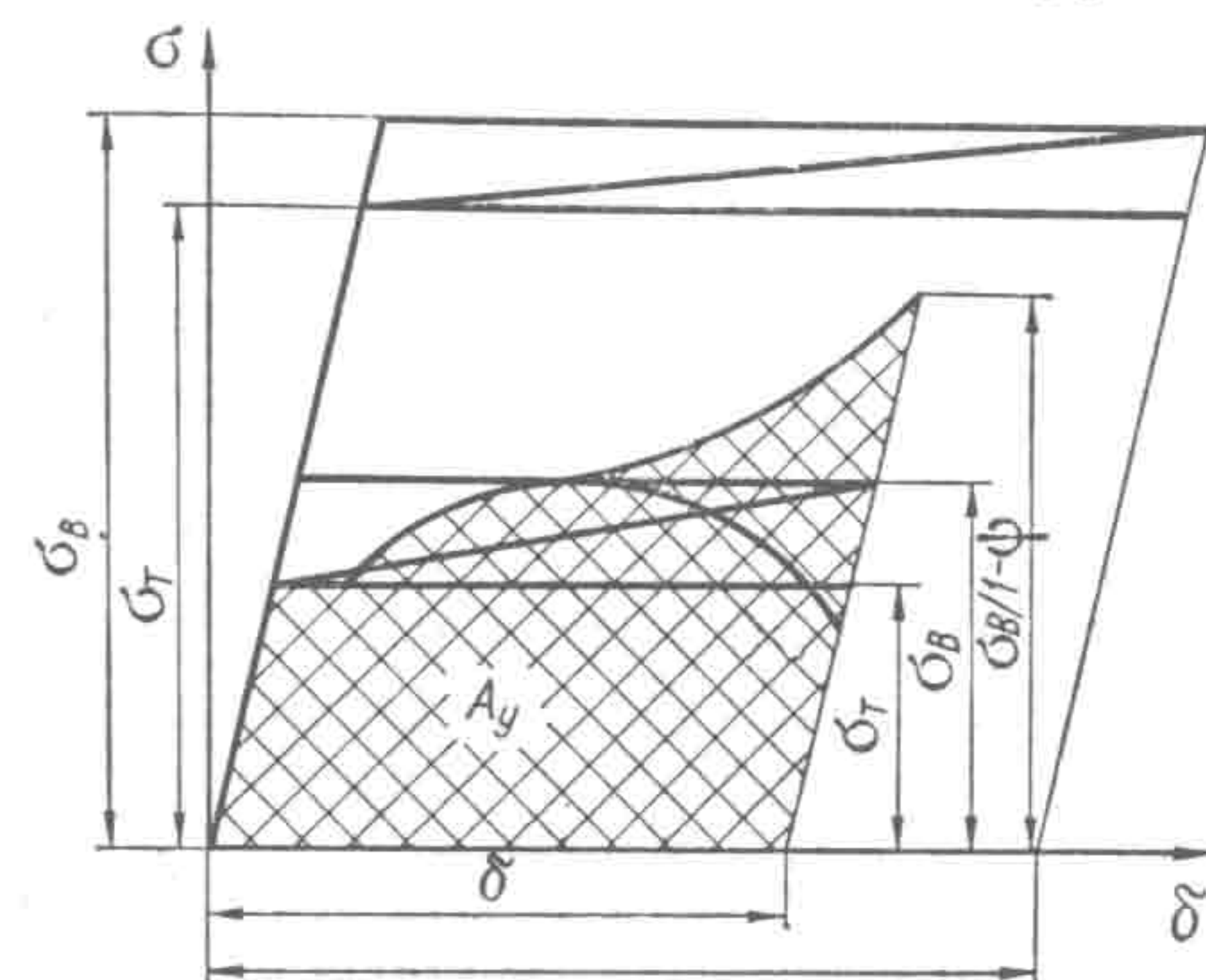


Рис. 9. Условная схема оценки и сравнения удельной работы деформации.

рабoты и степени деформации с учетом упрочнения и разупрочнения $A_y = \sigma_T + 3\eta_1 \varepsilon + \Pi \frac{\varepsilon}{n_1} (1 - e^{-\frac{n_1 \varepsilon}{\sigma_T}})$.

Все эти зависимости могут быть практически использованы лишь после того, как предварительно будут экспериментально определены различные для каждого материала соответствующие коэффициенты $n_1; n_2; m_1; m_2; \eta_1; \eta_2$. Зависимость сопротивления материала деформированию от скорости весьма сложная, а при скоростях $10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$, имеющих место при ЭП обработке, становится наиболее существенной.

Если принять материал линейно-упрочняющимся и построить упрощенные диаграммы условных и истинных напряжений для условий статического и динамического натяжений, можно оценить и сравнить сопротивление деформированию по удельной работе деформации, определяемой по площади этих диаграмм (рис. 9).

$$+ \frac{dA_y}{dT} dT + \frac{dA_y}{d\varepsilon} d\varepsilon + \frac{dA_y}{d\dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon}.$$

С. И. Губкин, М. В. Врацкий, И. Н. Францевич, М. А. Зайков и другие установили, что влияние температуры может быть выражено экспоненциальной функцией вида $A_y = \sigma_T e^{m_1(T_2 - T_1)}$. Влияние скорости пытаются учесть так: $A_y = \sigma_T + m_2 \varepsilon^h$; $A_y = \sigma_T + \eta_2 \ln \varepsilon$.

А. И. Целиков вывел зависимость сопротивления деформированию от скорости

По диаграмме условных напряжений удельную работу деформации можно с учетом коэффициента полноты диаграммы k_σ (рис. 10, а, кривая 1) оценить по выражению $A_y = k_\sigma \sigma_B \delta$ или приближенно $A_y = \frac{\sigma_B + \sigma_T}{2} \delta$.

Точнее можно оценить удельную работу по диаграмме истинных напряжений $A_y = \frac{\sigma_B}{1 - \psi} + \sigma_T \delta$.

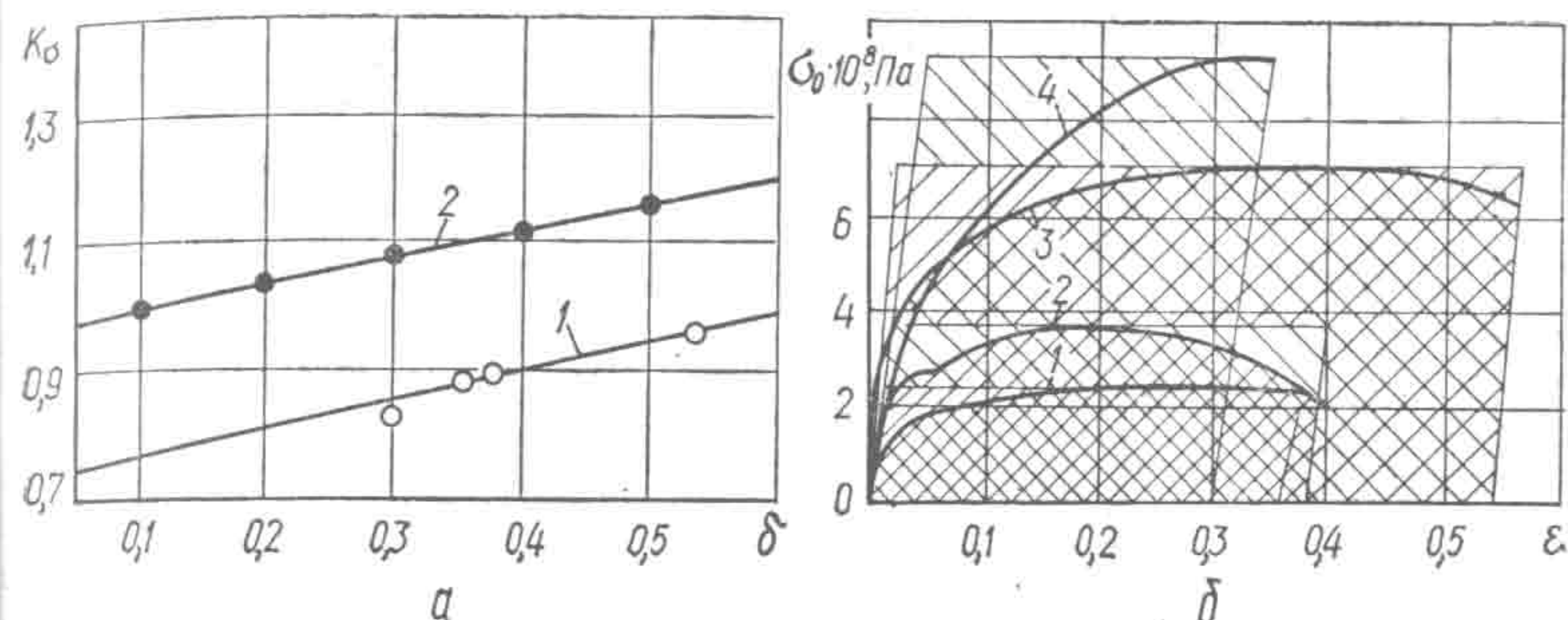


Рис. 10. Зависимость коэффициента полноты диаграммы от относительного удлинения (а) и диаграммы условных напряжений при растяжении образцов (б):

а: 1 — по диаграмме условных напряжений; 2 — по диаграмме истинных напряжений;
б: 1 — бронза ($\sigma_B = 2,47 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $\delta = 36\%$); 2 — углеродистая сталь ($\sigma_B = 3,58 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $\delta = 38\%$); 3 — никелевая сталь ($\sigma_B = 7,15 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $\delta = 54\%$); 4 — марганцовистая сталь ($\sigma_B = 9,16 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $\delta = 30\%$).

Более точные результаты можно получить, если принять степенной закон упрочнения

$$A_y = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon = \int_0^\varepsilon \sigma \varepsilon^\alpha d\varepsilon = \frac{B}{\alpha + 1} \varepsilon_{\text{ср}}^{\alpha+1}.$$

Обычно коэффициенты аппроксимации принимают

$$\alpha = \ln(1 + \delta); \quad B = \sigma_B \left(\frac{e}{\alpha}\right)^\alpha,$$

тогда

$$A_y = \frac{B}{\alpha + 1} \varepsilon^{\alpha+1} = \sigma_B \frac{\left[\frac{e}{\ln(1 + \delta)}\right]^{\ln(1 + \delta)}}{1 + \ln(1 + \delta)} \varepsilon^{[1 + \ln(1 + \delta)]}.$$

Если принять $\varepsilon = \delta$ и сохранить зависимость $A_y = k_\sigma \sigma_B \delta$, то можно найти коэффициент

$$k_\sigma = \frac{\left[\frac{e}{\ln(1 + \delta)}\right]^{\ln(1 + \delta)}}{1 + \ln(1 + \delta)} \delta^{\ln(1 + \delta)}.$$

Результаты расчетов, полученные на ЭВМ ЕС-1033, представлены на рис. 10, а (кривая 2).

В условиях динамического нагружения предел текучести растет обычно больше, чем предел прочности, а модуль упругости и относительное удлинение изменяются незначительно. Удельная работа при динамическом нагружении резко возрастает (см. рис. 9) и может быть аналогично рассчитана в зависимости от требуемой точности по одному из вариантов

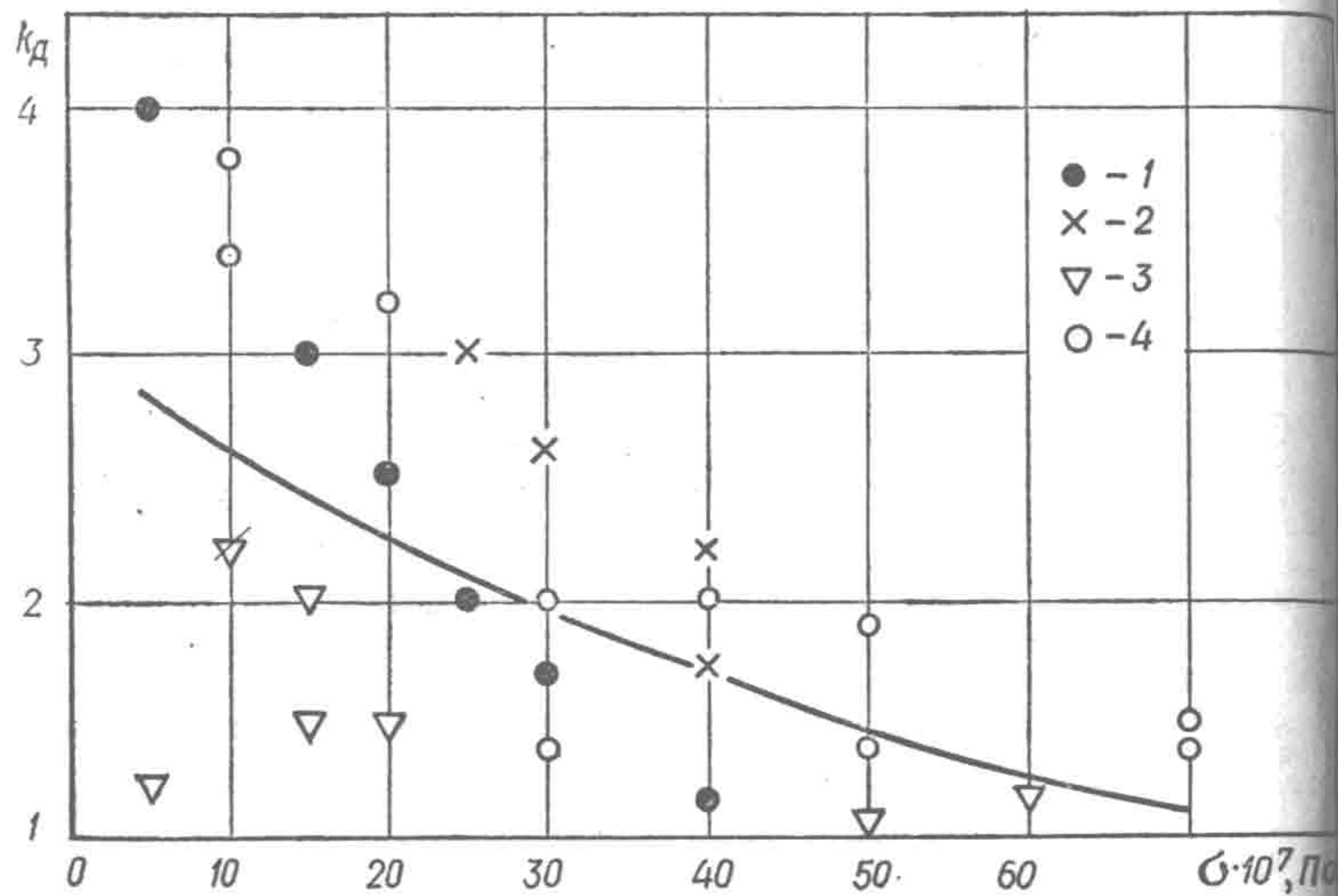


Рис. 11. Зависимость коэффициента динамичности от напряжения: 1 — данные Г. Д. Полосаткина; 2 — данные Г. В. Степанова; 3 — данные Г. Н. Эпштейна [127]; 4 — данные авторов.

учетом коэффициентов динамичности как отношение соответственно пределов прочности и текучести, полученных в условиях динамического и статического нагружений:

$$k'_d = \frac{\sigma_{вд}}{\sigma_{в}}; \quad k''_d = \frac{\sigma_{тд}}{\sigma_{т}};$$

$$A'_y = \frac{k'_d \sigma_{в} + k''_d \sigma_{т}}{2}; \quad A''_y = k''_d \sigma_{т} \delta; \quad A'''_y = k'_d \sigma_{в} \delta k_{\sigma}; \quad A^{IV}_y = k'_d \sigma_{в} \delta$$

Значения коэффициентов динамичности $k_d = f(\sigma)$ определяются экспериментально. Аппроксимируя данные Г. Д. Полосаткина, мы предложили уравнение $k_d = 5,08 e^{-0,036\sigma_{т}}$. Однако накопленный опыт и обобщение некоторых литературных данных [127], полученных с помощью ЭВМ ЕС 1033, дали возможность уточнить эти результаты (рис. 11): $k_d = 3,006 e^{-0,013\sigma_{т}}$.

Используя уточненные данные по коэффициентам динамичности и значение коэффициента полноты диаграммы растяжения

Размеры трубы	Относительное удлинение, δ , %	A'_y , Дж/м ³	A''_y , Дж/м ³	A'''_y , Дж/м ³	A^{IV}_y , Дж/м ³	$\frac{A'_y - A^{IV}_y}{A^{IV}_y} \times 100\%$	$\frac{A''_y - A^{IV}_y}{A^{IV}_y} \times 100\%$	$\frac{A'''_y - A^{IV}_y}{A^{IV}_y} \times 100\%$	Размеры трубы	
									до раздачи $2R_H \times h$, мм	после раздачи $2R_{Hд} \times h$, мм
28,1 × 3,2	24,91	5,85	4,11	7,47	7,59	22,9	45,8	-1,54	35,1	28,1 × 3,2
28,0 × 3,0	25,71	6,04	4,37	7,71	7,98	24,3	45,2	-3,35	35,2	28,0 × 3,0
28,0 × 2,8	26,07	6,13	4,43	7,82	7,98	23,2	44,5	-1,99	35,3	28,0 × 2,8
28,0 × 2,8	27,14	6,38	4,61	8,14	8,40	24,1	45,1	-3,07	35,6	28,0 × 2,8
28,0 × 2,9	27,50	6,46	4,67	8,25	8,58	24,7	45,5	-3,85	35,7	28,0 × 2,9
27,9 × 2,8	27,24	6,401	4,63	8,17	8,49	24,6	45,5	-3,75	35,5	27,9 × 2,8
27,8 × 2,8	29,14	6,85	4,95	8,74	9,0	23,9	45,0	-2,87	35,9	27,8 × 2,8
28,1 × 2,8	30,25	7,11	5,14	9,08	9,48	25,0	45,7	-4,27	36,6	28,1 × 2,8
28,0 × 2,8	29,99	6,88	4,98	8,79	9,18	25,0	45,8	-4,28	36,2	28,0 × 2,8
27,9 × 2,7	29,39	6,91	4,99	8,82	9,18	24,8	45,6	-3,95	36,1	27,9 × 2,7
28,1 × 2,9	29,54	6,94	5,02	8,86	9,18	24,4	45,3	-3,46	36,4	28,1 × 2,9
27,9 × 2,9	30,47	7,16	5,18	9,14	9,69	26,1	46,5	-5,67	36,4	27,9 × 2,9
28,0 × 3,0	31,43	7,39	5,34	9,43	9,99	26,1	46,5	-5,62	36,8	28,0 × 3,0
27,9 × 3,0	29,03	6,82	4,93	8,71	9,0	24,2	45,2	-3,23	36,0	27,9 × 3,0
27,9 × 3,0	34,05	8,00	5,79	10,22	10,95	26,9	47,1	-6,71	37,4	27,9 × 3,0
28,0 × 2,9	34,64	8,14	5,89	10,39	11,19	27,3	47,4	-7,13	37,7	28,0 × 2,9
28,0 × 3,2	37,14	8,73	6,31	11,14	12,09	27,8	47,8	-7,84	38,4	28,0 × 3,2

Таблица 3. Удельная работа деформации при электрогидроимпульсе

Размеры труб		Относительное удлинение δ , %	A'_y , Дж/м ³	A''_y , Дж/м ³	A'''_y , Дж/м ³
до раздачи $2R_H \times h$, мм	после раздачи $2R_{Hд}$, мм				
28,0×2,9	36,9	31,8	15,98	12,80	12,80
28,0×3,0	37,5	33,9	17,04	13,75	13,75
28,0×3,1	38,2	36,4	18,29	14,76	14,76
28,0×2,9	38,3	36,8	18,50	14,92	14,92
28,0×3,0	38,8	38,6	19,40	15,65	15,65
28,0×3,0	39,0	39,3	19,75	15,94	15,94
28,0×3,0	39,2	40,0	20,10	16,22	16,22
28,0×2,9	39,4	40,7	20,46	16,50	16,50

ния на основе проведенных экспериментов, выполнены расчеты и сделано сравнение значений удельной работы деформации в условиях статической и динамической раздачи труб из сплава АМг5 при $\sigma_T = 16 \div 18 \cdot 10^7$ Па; $\sigma_B = 28 \div 32 \cdot 10^7$ Па (табл. 2, 3), сталей 20 и Х18Н10Т. Анализ результатов экспериментов и расчетов показал, что в условиях динамического нагружения наряду с ростом пределов текучести

Таблица 4. Сравнение значений относительных удлинений, полученных экспериментально, и удельной работы деформации для статической и динамической раздачи труб

Материал	Относительное удлинение δ , %		Рост относительного удлинения в динамике	Удельная работа A_y , Дж/м ³		Рост удельной работы в динамике
	в статике	в динамике		в статике	в динамике	
Сталь 20	45—53	45—56	1,00—1,06	21,8—26,6	34,3—47,1	1,5—1,7
Сталь Х18Н10Т	30—34	37—40	1,18—1,23	15,7—18,2	19,3—34,2	1,23—1,4
Сплав АМг5	25—37	32—41	1,11—1,28	7,6—12,1	20,4—27,3	2,68—2,9

прочности растет и относительное удлинение в 1,0 — 1,28 раз. Удельная работа деформации растет в 1,23—2,68 раз (табл. 4), хотя наиболее точные результаты по расчету удельной работы деформации дает степенная аппроксимация диаграммы истинных напряжений.

Для обеспечения пластического течения материала при истинном напряжении, несколько меньшем напряжения разрушения (примерно на 10 %), удельную работу деформации можно считать по формуле $A_y = k_d \sigma_B \delta$ или при малых степенях деформации $\epsilon \ll \delta$ $A_y = k_d \sigma_B \epsilon$.

Таблица 3. Удельная работа деформации при электрогидроимпульсе в раздаче труб из сплава АМг5 при $k'_d = 2,0$; $k''_d = 2,39$

A'_y , Дж/м ³	A''_y , Дж/м ³	A'''_y , Дж/м ³	A^{IV}_y , Дж/м ³	$\frac{A'_y - A^{IV}_y}{A^{IV}_y} \cdot 100\%$	$\frac{A''_y - A^{IV}_y}{A^{IV}_y} \cdot 100\%$	$\frac{A'''_y - A^{IV}_y}{A^{IV}_y} \cdot 100\%$
19,07	20,39	19,07	20,39	-21,6	-36,8	-6,47
20,33	21,77	20,33	21,77	-21,7	-36,8	-6,61
21,83	23,39	21,83	23,39	-21,8	-36,9	-6,67
22,07	23,99	22,07	23,99	-22,9	-37,8	-8,00
23,15	25,55	23,15	25,55	-24,1	-38,7	-9,39
23,57	26,39	23,57	26,39	-25,2	-39,6	-10,70
23,99	26,75	23,99	26,75	-24,9	-39,4	-10,30
24,41	27,35	24,41	27,35	-25,2	-38,7	-10,70

7. ТЕПЛОМЫ ЭФФЕКТ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Деформирование заготовки связано с превращением энергии деформирования в тепло. Превращение работы деформации в тепло нагрева заготовки называется тепловым эффектом, а проявление его в виде повышения температуры заготовки принято называть температурным эффектом.

Влияние температурного эффекта на ход деформирования изучалось многими исследователями [22, 52, 68, 69, 107, 108, 113]. Некоторые из них пришли к выводу, что его влияние не существенно [127]. Л. В. Прозоров, М. В. Сторожев, М. А. Барановский и другие указывают на необходимость учитывать величину температурного эффекта. При высоких скоростях деформирования теплота работы деформации за время деформирования не успевает распространиться по всей массе деформированной зоны, а сосредотачивается в зоне поверхностей скольжения, т. е. имеет место локальное проявление теплового эффекта. Это отмечено даже при скоростях, достигаемых на обычном оборудовании [69]. Когда же скорость деформирования превышает 100 м/с, проявление теплового и температурного эффектов и их влияние как на ход процесса, так и на конечные свойства обработанных материалов еще более вероятно. Проведенные исследования влияния импульсных нагрузок на свойства алюминиево-магниевых сплавов при штамповке днищ подтверждают это [80]. Сравнение механических свойств листовых заготовок алюминиево-магниевых сплавов АМг6М и АМг6Н в исходном состоянии и после ЭГ штамповки показало, что у сплава АМг6М пределы прочности и текучести возросли, а относительное удлинение снизилось. У сплава АМг6Н, имеющем несколько более высокие механи-

ческие свойства в исходном состоянии, пределы прочности текучести снизились, а относительное удлинение возросло (табл. 5).

Снижение механических свойств нагартованной в исходном состоянии заготовки связано с разупрочнением сплава после ЭГ штамповки. Более высокая прочность исходного нагартованного материала при одинаковых энергиях деформации уменьшает объем, в котором деформация локализуется. При весьма высоких скоростях деформирования теплота энергии

Таблица 5. Сравнение механических свойств листовых заготовок алюминиево-магниевого сплава АМг6М и АМг6Н в исходном состоянии и после ЭГ штамповки

Сплав	Состояние заготовки	Механические свойства в исходном состоянии			Механические свойства после ЭГ штамповки		
		$\sigma_B \cdot 10^{-7}$	$\sigma_T \cdot 10^{-7}$	$\delta, \%$	$\sigma_B \cdot 10^{-7}$	$\sigma_T \cdot 10^{-7}$	$\delta, \%$
АМг6М	Отоженная	36,0	19,4	19,6	36—38	23—27	9—12
АМг6Н	Нагартованная	39,5	32,8	7,2	34—37	22,2—27	12—14

деформации сосредоточивается в малом объеме и вызывает резкое местное повышение температуры. Этот разогрев влечет за собой разупрочнение нагартованного материала.

Для случая осадки цилиндра работа деформации может быть рассчитана в зависимости от изменения размеров или степени деформации по формулам

$$A = \int_{H_0}^H \frac{\pi D^2}{4} A_y dH \quad \text{или} \quad A = V_0 A_y \ln \frac{1}{1-\varepsilon}.$$

Если принять, что вся энергия деформации переходит в теплоту, то

$$\Delta T = \frac{A_y}{I m_0 \rho_0 c} \ln \frac{1}{1-\varepsilon}, \quad (1.13)$$

где c — удельная теплоемкость; ΔT — температурный эффект; m_0 — отношение массы тепловосприятя m_T к массе сформированной зоны m , или относительная масса тепловосприятя $m_0 = \frac{m_T}{m}$; I — механический эквивалент теплоты; A_y — удельное сопротивление деформированию (в расчетах для практических целей с достаточной степенью точности может быть рассчитано как произведение $k_d \sigma_B \delta$).

Для случая раздачи трубы внутренним давлением работа деформации может быть рассчитана по формуле

$$A = \int_{R_1}^{R_2} A_y 2\pi R l dR.$$

Значение температурного эффекта получено аналогично случаю осадки

$$\Delta T = \frac{A_y}{I m_0 \rho_0 c} (2\varepsilon + \varepsilon^2) \frac{q_1^2}{q_1^2 - 1}, \quad (1.14)$$

где $q_1 = \frac{R_H}{R_B}$.

С увеличением скорости деформирования относительная масса тепловосприятя уменьшается до какого-то минимума, постоянного для каждой степени деформации; соответственно и величина температурного эффекта растет до какого-то предела. Величина относительной массы тепловосприятя зависит от кристаллической структуры материала, скорости и степени деформации.

Проведенные эксперименты по методике, предложенной В. Ф. Ураковым [111], и обобщение некоторых литературных данных [52, 110] позволили выразить зависимость относительной массы тепловосприятя от скорости деформирования (рис. 12). Получить данные для скоростей деформирования свыше 300 мм/с не удалось. Непосредственное измерение температурного поля в деформируемой заготовке при более высоких скоростях остается пока не решенной технической проблемой, но, как предлагает М. А. Барановский, проверка температуры может проводиться путем наблюдения цветов побежалости на поверхности заготовки. Такая проверка дает хорошее совпадение расчетных температур и наблюдаемых цветов [26].

Аппроксимируя с помощью ЭВМ «Мир-2» экспериментальные данные для диапазона скоростей в пределах до 300 мм/с (погрешность аппроксимации 6,2%), можно записать $m_0 = 1,98 V^{-\frac{1}{2}} + 0,74$.

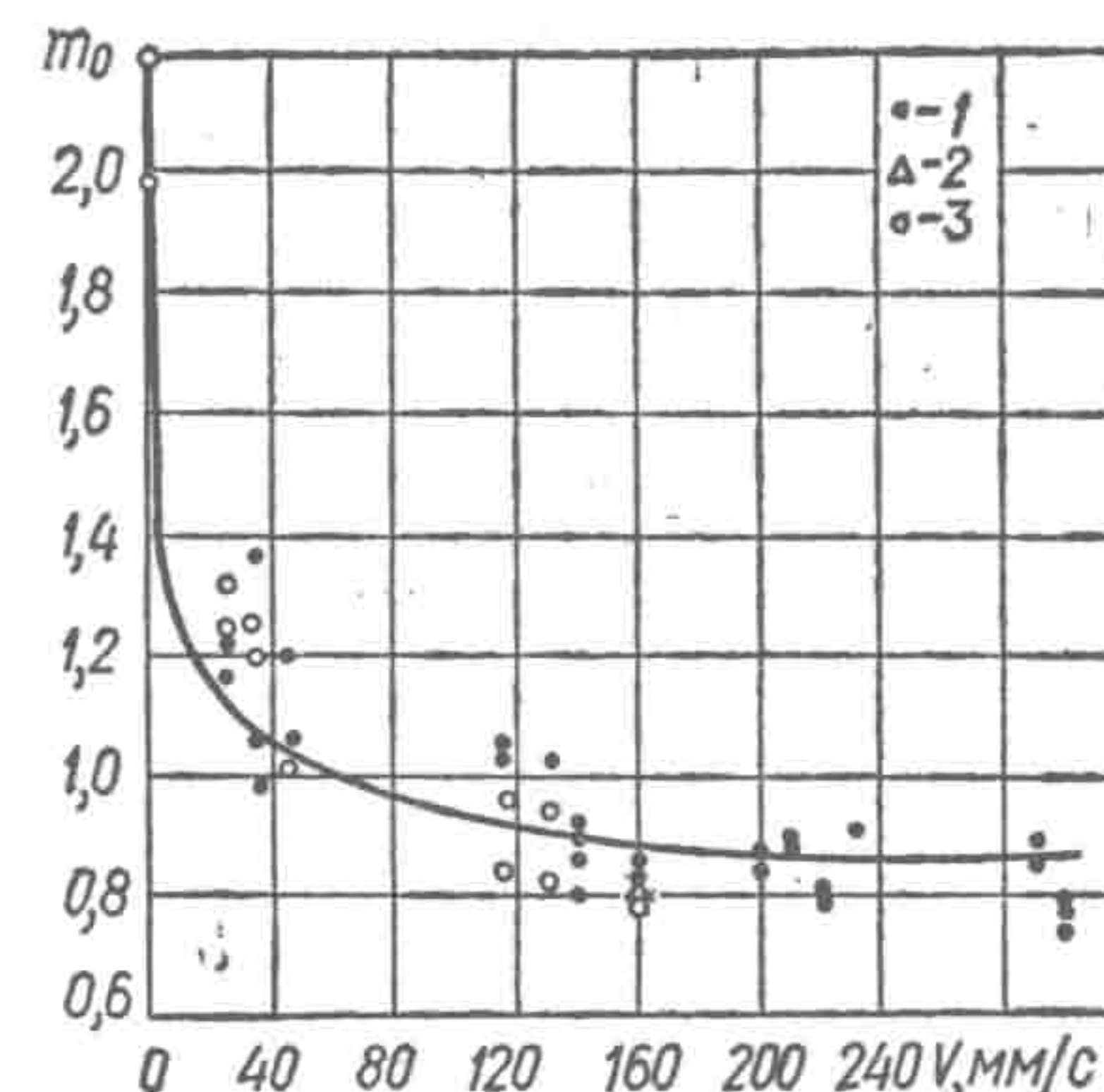


Рис. 12. Зависимость относительной массы тепловосприятя от скорости деформирования:

1 — данные для сплава ЭИ437Б и стали X18H9T; 2 — данные для стали 10; 3 — данные для сплава АМг6.

По-видимому, дальнейшее увеличение скорости не должно приводить к заметному изменению m_0 , характерному для соответствующих степеней деформации. Очевидно, каждая кривая $m_0 = f(V)$ при $\epsilon = \text{const}$ приближается к своей асимптоте $m_{0\text{min}}$. Предложенная схема весьма условна. Она учитывает, что жесткие области в процессе деформации не успевают на-

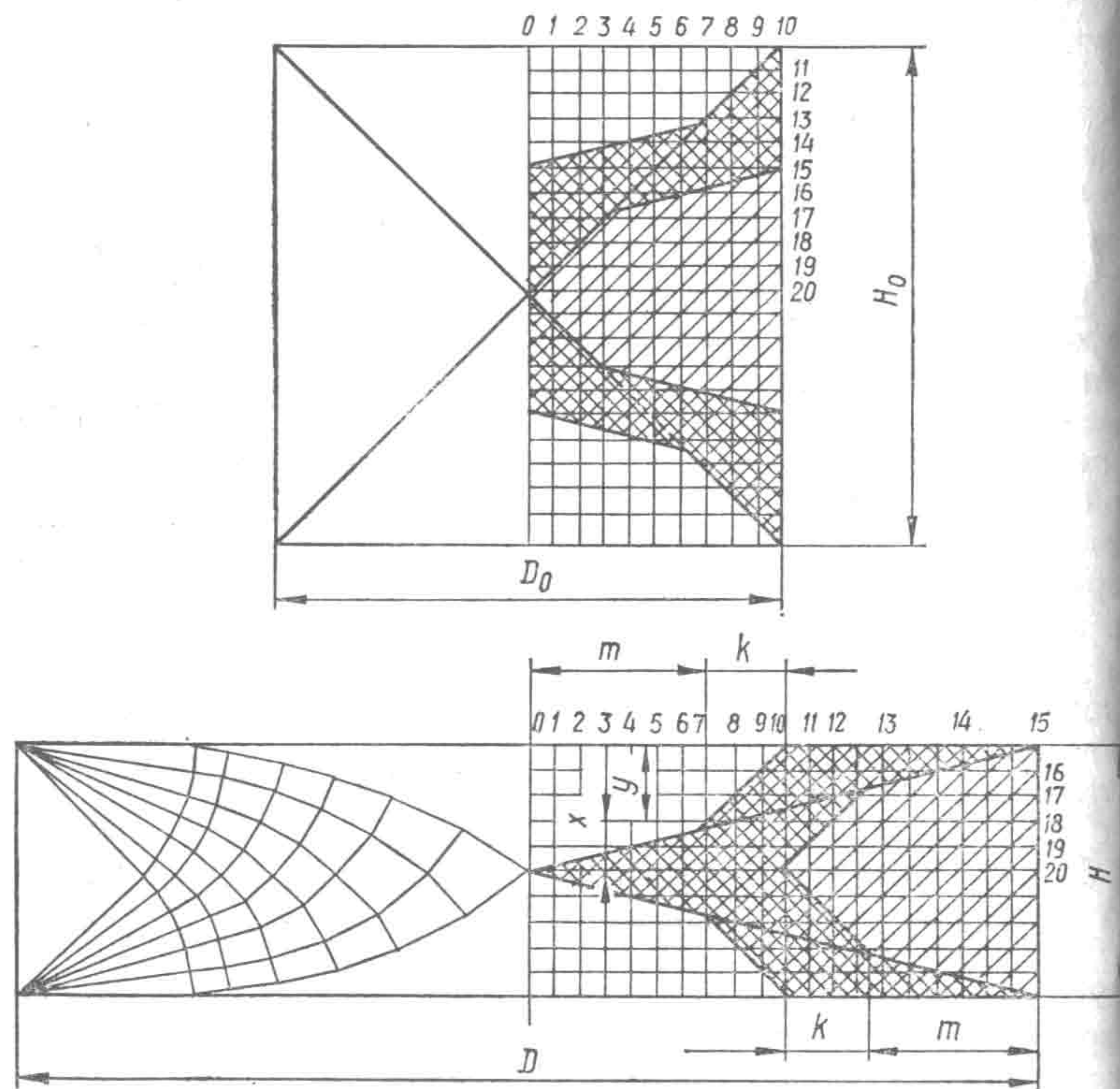


Рис. 13. Искажение первоначальной квадратной сетки сечения полосы.

греться и сохраняют начальную температуру. Что же касается температурного эффекта, то он, очевидно, будет различно проявлять себя по массе тепловосприятия: максимально в тех областях, где локальные деформации будут иметь наибольшее значение.

При скоростях деформирования выше 200 мм/с, как отмечалось ранее Л.А. Шофманом, условия приближаются к адиабатическому процессу и масса тепловосприятия становится меньше объема заготовки. При скоростях деформирования свыше 30 м/с масса тепловосприятия может быть определена как масса тех частей объема заготовки, которые в течение про-

цесса деформации находились в пластической области. Обычно это области поверхностей скольжения.

В качестве иллюстрации указанной схемы рассмотрим наиболее простой случай плоской осадки. На рис. 13 представлено искажение квадратной сетки в первой четверти сечения полосы с исходным отношением размеров, равным единице до отношения, равного четырем, рассчитанное с помощью приближенного разрывного поля скоростей по данным И. П. Ренне (справа). Заштрихованная наклонными линиями в обе стороны часть сечения относится к пластической зоне (слева точные зоны при осадке цилиндра). Такую схему можно принять для высокоскоростной осадки цилиндра.

Если труба внутренним давлением доведена до пластического состояния и деформируется, то можно построить ее линии скольжения, исходя из следующих условий: деформацию считать плоской, исключив касательные напряжения, главными принимать радиальные и тангенциальные напряжения, траекториями которых будут радиусы и концентрические окружности.

Линии скольжения пересекают обе траектории под углом 45° . Это будут логарифмические спирали с уравнением в полярных координатах $R = R_0 l^{\theta_1}$, где угол θ_1 может быть найден как угол поворота касательной к спирали при переходе от внутреннего к наружному диаметру $\theta_1 = \ln \frac{d_n}{d_b}$.

Например, для ЭГ запрессовки труб по условиям получения качественных соединений исходя из предельного отношения толщины стенки к наружному диаметру можно найти нижний предел отношения $\frac{d_n}{d_b} \geq 1,16$, а из технологических возможностей установок — верхний предел $\frac{d_n}{d_b} \leq 2,4$. Проведенные расчеты показывают, что для толстостенных труб угол θ_1 больше, он колеблется в пределах $8,5-40,9^\circ$. Относительная масса тепловосприятия в каждом конкретном случае может быть найдена из отношения объема пластической зоны к объему заготовки (сплошного или полого цилиндра).

Расчеты, выполненные с помощью ЭВМ «Мир-2», позволили получить зависимость минимального значения относительной массы тепловосприятия от степени деформации:

для осадки цилиндра при малых скоростях деформирования

$$m_0 = \frac{2}{3} + \frac{\epsilon^3}{3[1 - (1 - \epsilon)^{3/2}]^2};$$

для осадки цилиндра при больших скоростях деформирования, причем точная аппроксимация записывается следующим

образом:

$$m_0 = \frac{1}{3(2-\varepsilon + \sqrt{1-\varepsilon})^3} \{2 + [1 - (1 - \varepsilon^{3/2})^2 - (1 - \varepsilon)^{3/2}] + \frac{(1 + \sqrt{1-\varepsilon})\sqrt{1-\varepsilon}}{3(2-\varepsilon + \sqrt{1-\varepsilon})^3} [(2-\varepsilon + \sqrt{1-\varepsilon})^2 + 3 - \varepsilon + \sqrt{1-\varepsilon}]\}$$

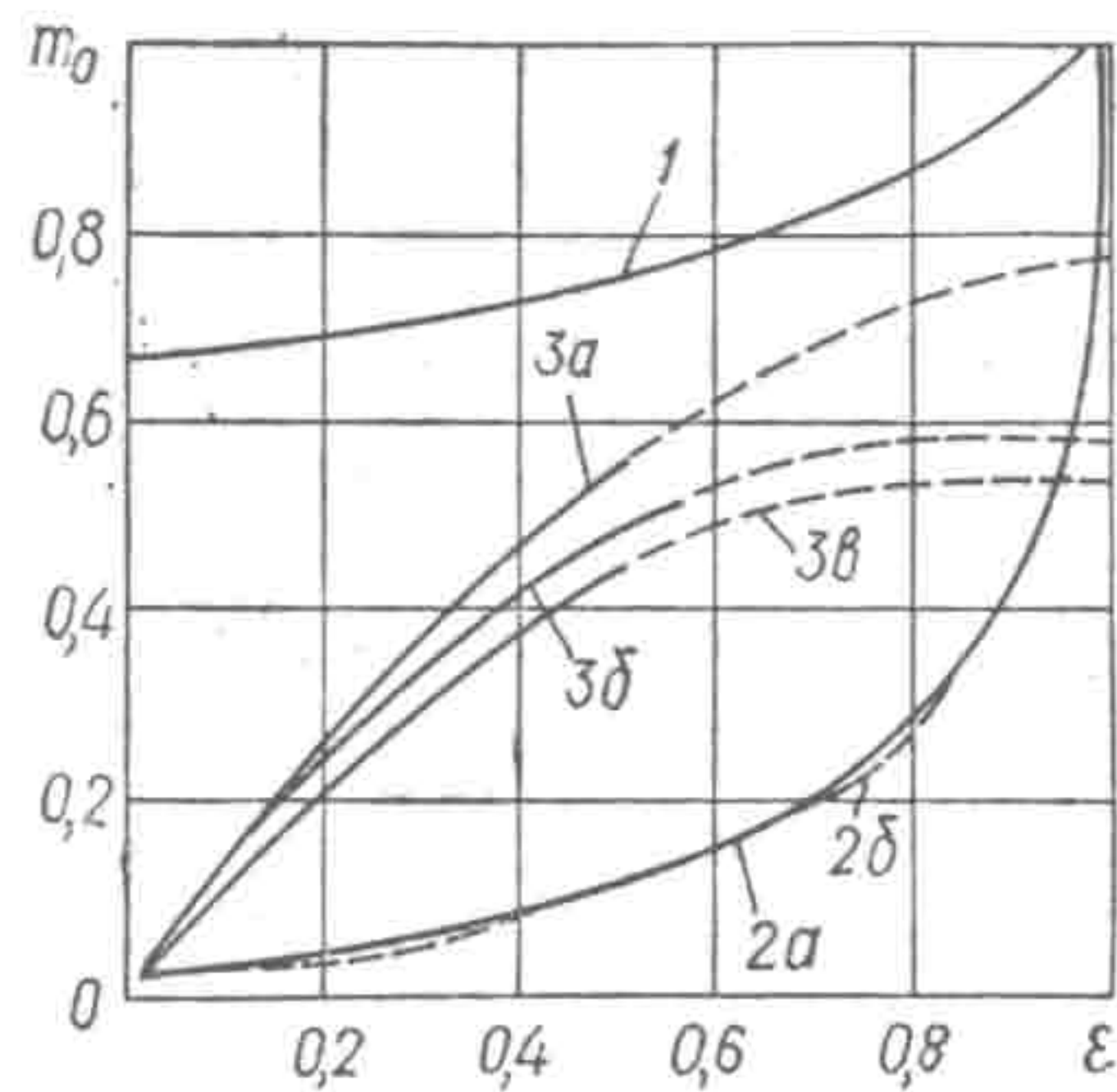


Рис. 14. Зависимость минимальной относительной массы тепловосприятия от степени деформации для осадки цилиндра при малых (1) и больших (2) скоростях деформирования и для раздачи труб при высоких скоростях деформирования (3) для труб с отношением $d_H/d_B = 2,40$ (а); $d_H/d_B = 1,67$ (б) и для тонкостенных труб с отношением $d_H/d_B = 1,20$ (в).

$$\frac{(1-\varepsilon)[(2-\varepsilon + \sqrt{1-\varepsilon})^2 + (2-\varepsilon + \sqrt{1-\varepsilon})(1 + \sqrt{1-\varepsilon}) + (1 + \sqrt{1-\varepsilon})^2]}{12(2-\varepsilon + \sqrt{1-\varepsilon})^3}$$

$$\frac{(1 + \sqrt{1-\varepsilon})^3 \sqrt{1-\varepsilon}}{3(2-\varepsilon + \sqrt{1-\varepsilon})^3}$$

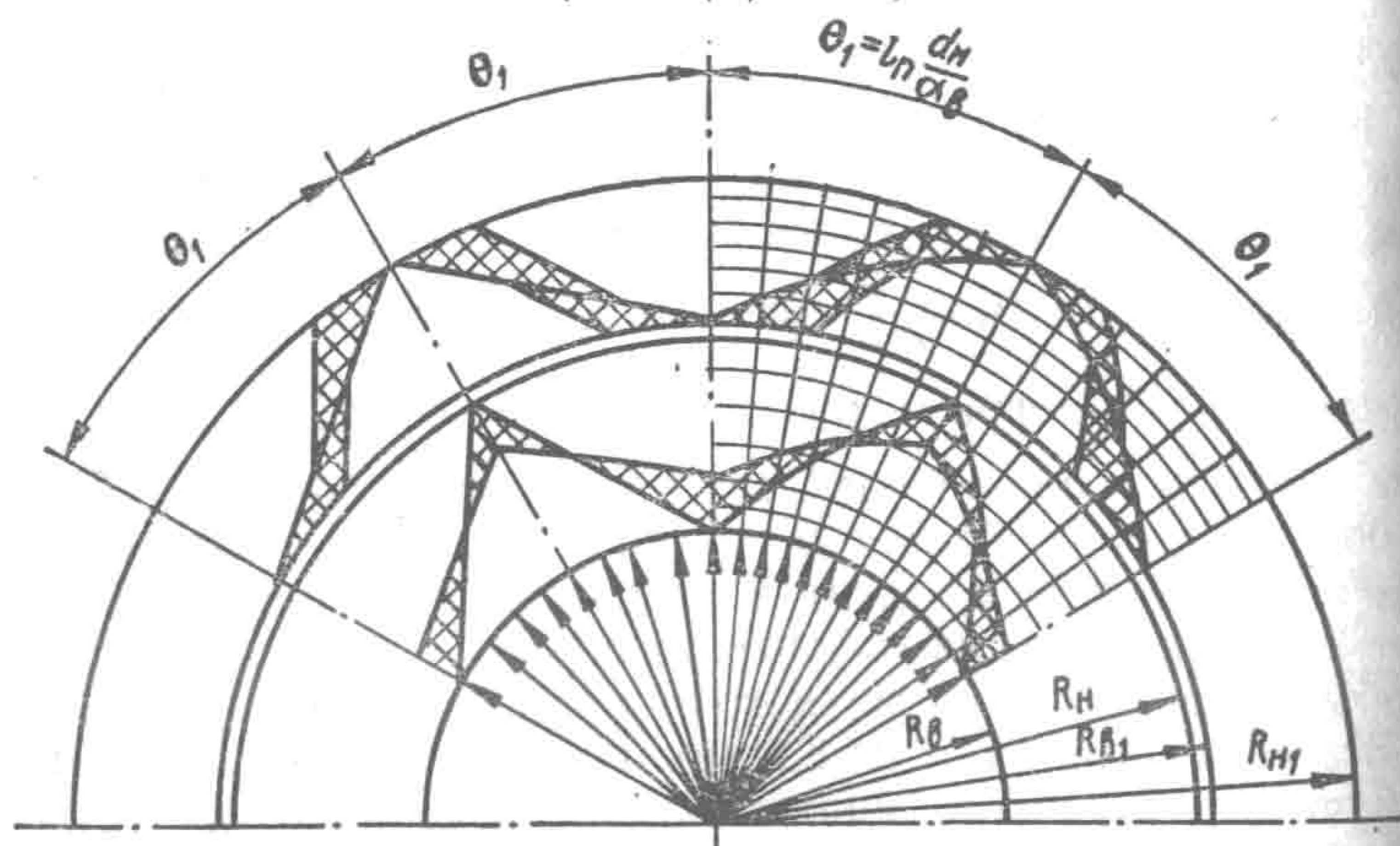


Рис. 15. Схема пластического деформирования трубы внутренним давлением, построенная логарифмическими спиралями (справа) и прямыми (слева).

В результате расчетов найдены значения относительной массы тепловосприятия:

ε	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
m_0	0,0278	0,0375	0,0497	0,0654	0,0858	0,1128	0,1497	0,2026	0,2837	0,4272	1,0

и построен график (рис. 14, кривая 2 а). Построенная по этим значениям аппроксимация (табл. 6) (рис. 14, кривая 2 б) с погрешностью до 9,1% записывается $m_0 = \frac{1}{c_1 - c_2 \varepsilon}$.

Зоны пластической деформации для раздачи трубы при высоких скоростях строятся как объем, занятый соответствующими логарифмическими спиралями при их перемещении от деформирования трубы (рис. 15). Для простоты построения логарифмические спирали заменены прямыми, ошибка в определении зон пластических деформаций не превышает 15,7%.

При графическом построении относительная масса тепловосприятия находится как отношение площади пластических зон

Т а б л и ц а 6. Значения коэффициентов аппроксимации

Постоянная аппроксимации	$0 < \varepsilon \leq 0,4$	$0,4 < \varepsilon \leq 1,0$
c_1	32,8	15,4
c_2	54,5	14,4

в пределах кольцевого сектора трубы с углом $\theta_1 = \ln \frac{d_H}{d_B}$ к площади части сечения трубы, заключенной в этом секторе. Так как при пластическом деформировании трубы реализуются два семейства поверхностей скольжения, левые и правые, то рассчитанная по построению (рис. 15) площадь пластической зоны удваивается. Построенные таким образом объемы зон пластической деформации для труб с разным отношением $q_1 = \frac{d_H}{d_B}$ различны и аппроксимируются уравнением $m_0 = B\varepsilon + D\varepsilon^2$.

С помощью ЭВМ «Мир-2» получены значения коэффициентов с погрешностью 11%:

- для $q_1 = 2,40$ $B = 1,4$; $D = -0,64$;
- для $q_2 = 1,67$ $B = 1,3$; $D = -0,74$;
- для $q_3 = 1,20$ $B = 1,3$; $D = -0,75$.

Полученные зависимости (см. рис. 14) свидетельствуют о том, что минимальная относительная масса тепловосприятия с увеличением степени деформации растет. В реальных условиях степень деформации трубы при запрессовке не превышает 10%. В этом же диапазоне относительная масса тепловосприятия при раздаче трубы оказывается больше, чем при осадке цилиндра. Причем у тонкостенных труб относительная масса тепловосприятия всегда меньше, чем у толстостенных.

Проверка величин температурного эффекта при импульсной раздаче труб вплоть до предельной степени деформации, равной относительному удлинению материала трубы (что, примерно, требует такой же энергии, как и при ЭГ запрессовке),

Таблица 7. Температурный эффект при импульсной раздаче труб

Материал	Плотность $\rho_0 \cdot 10^3$, кг/м ³	Удельная теплоем- кость c , Дж/к · град	Предель- ная проч- ность $\sigma_B \cdot 10^7$, Н/м ²	Коэффициент динамиче- ский K_D	Относитель- ное удлине- ние δ , %	Удельная работа $A_y \cdot 10^7$, Дж/м ³	Относительная масса m_0		Температурный эффект ΔT , К		Предель- ное отно- шение $q_{1пр}$
							$q_1 = 1,67$	$q_1 = 1,2$	$q_1 = 1,67$	$q_1 = 1,2$	
Сталь 0X18H10T	7,80	0,46	50	1,52	40	30,4	0,42	0,37	575	983	1,11
Сталь 20	7,82	0,46	42	1,70	33	23,6	0,36	0,32	493	792	1,11
Сплав АМг5	2,64	0,88	27	2,08	37	20,8	0,40	0,36	579	987	1,48
Медь МЗ (твердая)	8,94	0,39	45	1,63	22	16,1	0,28	0,22	399	601	1,27
Медь МЗ (мягкая)	8,94	0,39	20	2,29	45	20,6	0,45	0,41	500	787	1,10
Сплав МНЖМц 30-1-1	8,90	0,42	38	1,79	36	24,5	0,39	0,35	496	794	1,15
Сплав ОТ-4	4,55	0,63	80	1,01	28	22,6	0,33	0,28	513	861	1,24
Сплав ВТ-5	4,50	0,63	75	1,08	30	24,3	0,34	0,29	540	931	1,28
Сплав ВТ-5	4,50	0,63	90	1,00	24	21,6	0,30	0,23	486	843	1,47

показала, что величины эти для разных материалов труб различны и колеблются в широких пределах, достигая температуры возврата, а иногда превышая температуру правления как у легких, так и у высокопрочных металлов и сплавов (табл. 7).

У большинства металлов толстостенных труб (различные стали, медь и ее сплавы) температурный эффект достигает 500—600 К, что ниже их термической и горячей обработки, но выше температуры возврата. Возврат искаженной деформацией кристаллической решетки к нормальному состоянию осуществляется в результате кратковременной выдержки в определенных интервалах температур, характерных для каждого металла и сплава [59]. Оценить этот интервал для чистых металлов можно из соотношения [107]

$$T_B = (0,25 \div 0,30) T_{пл.}$$

При импульсном воздействии можно принять верхний предел. Возврат — термически активируемый процесс. Уменьшение дефектов кристаллической решетки пропорционально повышению температуры нагрева и времени пребывания при этой температуре. Если нагрев деформированного материала протекает с различными скоростями, то, чем больше скорость нагрева до данной температуры, тем меньше дефектов аннигилирует при возврате. М. Н. Бодяко и С. А. Астапчик [25] приводят выражение, подтверждающее это:

$$\rho_2 = \exp \left\{ \ln \rho_1 - \frac{c}{V} \int_{T_1}^{T_2} \exp \left(- \frac{W}{RT_2} \right) dT \right\},$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотность дефектов до и после нагрева при температурах T_1 и T_2 соответственно; V — скорость нагрева; W — энергия активации.

При прочих равных условиях скорость нагрева, находясь во втором слагаемом со знаком минус в знаменателе, с ростом уменьшает его, т. е. тогда не «снятых» дефектов останется больше.

При импульсном деформировании время деформации очень мало (10—100 мкс), скорости нагрева очень высоки, поэтому число снимаемых дефектов при нагреве от теплового эффекта не велико.

Но термическое влияние теплового эффекта не заканчивается этапом нагрева в процессе деформации. В результате импульсного деформирования в заготовке образуется неравномерное температурное поле, пластические зоны более нагреты, чем жесткие зоны. После окончания процесса деформирования начинается медленное постепенное самопроизвольное выравнивание температурного поля в заготовке, а потом ее охлаждение (рис. 16). Это способствует продолжению процесса возврата структуры материала в более устойчивое равновесное состояние. Температурное поле в теле при наличии источника внутри на поверхности скольжения может быть рассчитано аналогично [109].

Если элемент трубы принять за неограниченную пластину толщиной h и считать, что тепло q_0 внесено мгновенно

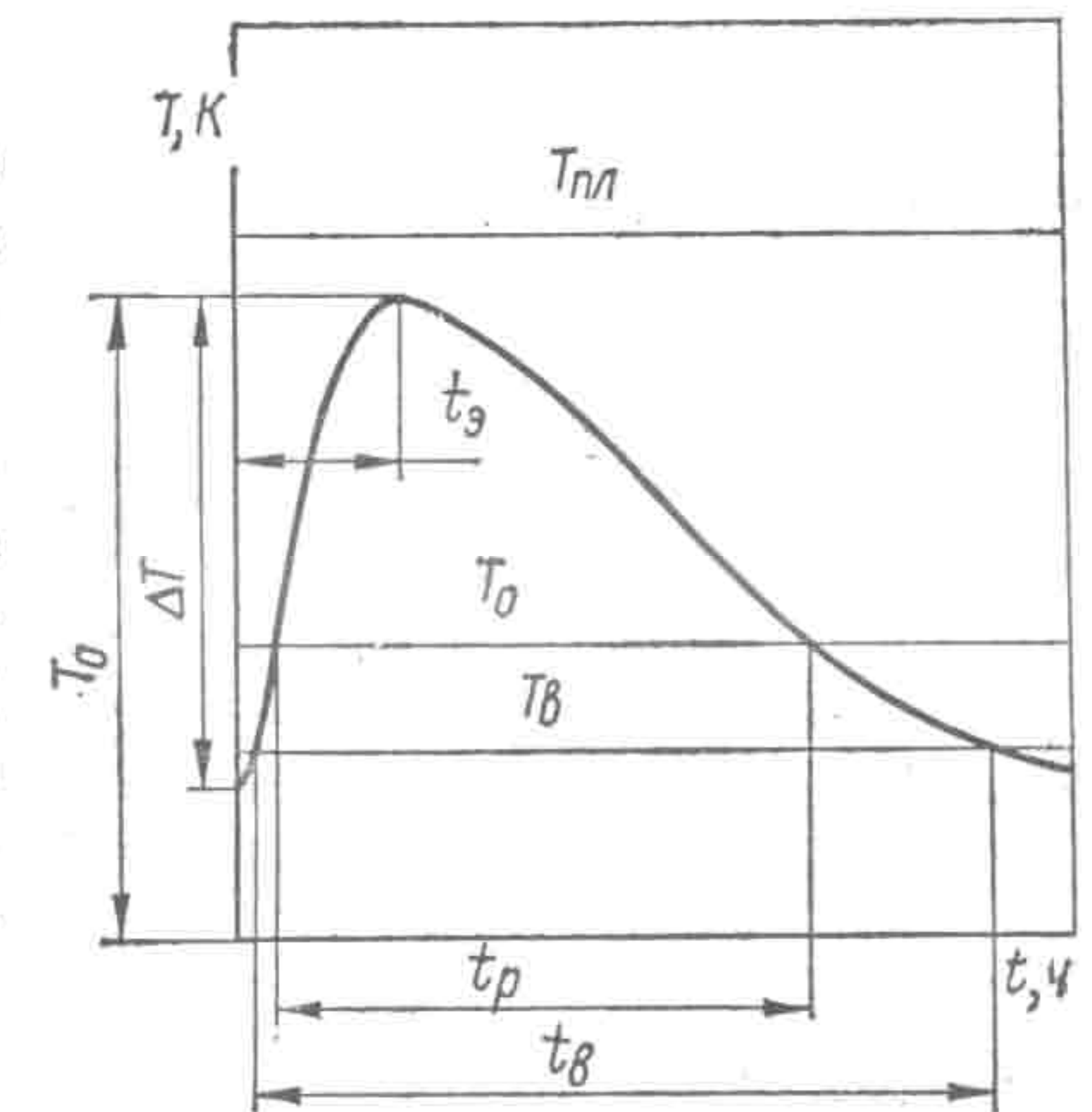


Рис. 16. Изменение температуры от действия теплового эффекта при импульсном деформировании.

но и распределено по линии скольжения равномерно, решение дифференциального уравнения теплопроводности примет вид

$$T = \frac{q_0}{4\pi\lambda ht} e^{-\frac{h^2}{4at}},$$

тогда время до температуры возврата T_B можно определить

$$t_B = \frac{q_0}{4\pi h \lambda} \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_0} \right).$$

Проведенные расчеты показали, что наибольшее время у стали X18H10T—10 с и у титана — 4—5 с, у алюминиевых и медных сплавов оно не превышает 1—3 с. Это говорит о том, что возврат происходит лишь частично, ибо $t_B < 15$ с. Время охлаждения до температуры окружающей среды у нержавеющей стали 5—7 мин, у титана — 7—10 мин, у алюминиевых и медных сплавов — 10—40 с, что близко к результатам экспериментов [127].

Температура в процессе деформирования может превышать температуру рекристаллизации ($T_p \geq 0,4 T_{пл}$), и процесс будет сопровождаться как деформацией зерен — упрочнением, так и их рекристаллизацией. Рекристаллизация характеризуется возникновением зародышей с правильным кристаллическим строением и их последующим ростом. Состав и тип решетки не меняются. Число образующихся зародышей тем больше, чем выше скорость нагрева, при этом температура начала и конца рекристаллизации смещается в сторону роста [25]. Начальная и конечная стадии рекристаллизации при быстром изменении смещаются в область высоких температур, например для сталей IX18H9T и X18H10G на 100—150 К, а для алюминиевых сплавов на 30—40 К [25]. При быстром изменении температуры рекристаллизация идет преимущественно за счет зародышеобразования, а не роста зерна. Это обеспечивает формирование более мелкозернистой структуры, чем при малых скоростях изменения температуры.

Имеющие место при импульсном деформировании явления возврата и рекристаллизации снижают напряжения, повышают сопротивление материала коррозии, резко уменьшают опасность растрескивания, особенно при больших степенях деформирования. Это подтверждается исследованиями коррозионной стойкости соединений, полученных импульсными методами.

У алюминия, титана и их сплавов температурный эффект может достигать значений в пределах температурного интервала их горячей обработки. У труб из алюминиево-магниевых сплавов температурный эффект достигает режима горячей обработки этих сплавов (570—770 К) [76]. То же может быть

у труб из титана и его сплавов, у которых режим горячей обработки колеблется в пределах 620—1020 К. У большинства титановых сплавов высокие механические свойства сохраняются до температур 720—820 К. Так, у сплава BT5 при нагреве до 770 К предел прочности снижается в 1,84—1,98 раз, а предел текучести — в 2,22—3,15 раз; у сплава 4817 предел прочности снижается в 2,06—2,09, а предел текучести — в 2,00—2,03 раза [45].

При импульсной раздаче тонкостенных труб и трубчатых заготовок тепловой эффект может проявляться наиболее значительно, оказывая существенное влияние на ход и результаты обработки. Если для труб из стали, титана и меди температурный эффект может достигать значений, приводящих к возврату и рекристаллизации (табл. 7), то для тех же труб из алюминия и его сплавов он может достигать и даже превышать температуру плавления. Это может повлечь за собой разрушение материала при степенях деформаций, меньших относительного удлинения. Может наблюдаться частичное разрушение межкристаллитного вещества, что снижает критическую степень деформаций. У алюминиевых сплавов могут наступить оплавление эвтектики по границам зерен, образование литой структуры после обработки, ослабление связей по границам зерен, появление межкристаллитных трещин.

Образование специфических полос с измененной микроструктурой при импульсном деформировании стали впервые заметил еще в 1928 г. В. П. Кравз-Тарнавский.

При импульсном деформировании армо-железа вокруг образовавшегося мартенсита замечена зона рекристаллизации [21]. Многие специалисты отмечают изменение микроструктуры, ее неравномерность при импульсном деформировании [5, 6, 21, 22, 40, 84, 136].

Для титана характерна высокая температура плавления (1923—1953 К) [39, 44]; уже при температуре 1155 К устойчивая гексагональная плотно упакованная кристаллическая решетка (α -титан) переходит в объемно-центрированную кубическую решетку (β -титан). Это способствует повышению его пластичности, так как вводятся в действие дополнительные плоскости скольжения. Теплопроводность титана низка (около $1/6$ теплопроводности алюминия и около $1/6$ теплопроводности железа и стали), что ухудшает отвод тепла и способствует локальному разогреву в районе поверхностей скольжения при импульсном деформировании, а также снижает критическую степень деформации. Если величину температурного эффекта принять равной температуре плавления данного материала, можно рассчитать то предельное отношение $q_1 = \frac{d_H}{d_B}$, которое

характеризует трубу, имеющую при импульсной раздаче критическую степень деформации, равную относительному удлинению материала (см. табл. 6, 7). У тонкостенных труб с отношением $q_1 < q_{1пр}$ при импульсной раздаче вероятно разрушение при степенях деформации, меньших относительного удлинения материала $\epsilon_{кр} < \delta$. Во избежание этого при разработке технологии импульсной штамповки, запрессовки и сварки труб и трубных решеток из алюминия, титана и их сплавов необходимо учитывать влияние теплового эффекта и рассчитывать режимы так, чтобы величина температурного эффекта не превышала верхнего предела горячей обработки этих материалов. Достичь этого можно при выборе режимов за счет снижения напряжения и соответствующего увеличения емкости в пределах диапазонов регулировки параметров данной установки, изменения размеров обрабатываемой трубчатой заготовки или необходимой степени деформации за одну операцию.

8. ВОЛНЫ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

При импульсном деформировании заготовок, имеющих высокое начальное сопротивление деформированию (например, в процессах запрессовки или сварки труб в трубных решетках теплообменных аппаратов или парогенераторов) или при листовой штамповке плоских панелей теплообменных аппаратов на внутреннюю поверхность трубы, или плоскую заготовку в короткие промежутки времени (10—30 мкс) могут действовать импульсы высокого давления $(10—14) \cdot 10^8$ Па. Это вызывает в металле резко локализованное возмущение — волну сжатия зубовидной формы и пластическую деформацию заготовки с высокой скоростью 20—400 м/с. Возникающие в материале волны напряжений перемещаются со скоростью звука, успевают пройти через толщину заготовки, отразиться несколько раз до соударения или до очередного импульса, которыми вызываются новые волны напряжений и их последствия. В процессе импульсного деформирования материал все время находится под действием периодически повторяющихся волн механических напряжений. Волны сжатия отражаются от свободной поверхности металла и проходят через границу раздела разных сред в виде волн растяжения. Это имеет особое важное значение для ЭГ запрессовки и сварки и при штамповке деталей высокой точности, ибо возникающие напряжения растяжения могут снизить плотность соединения или разрушить сварной контакт трубы и трубной решетки, а при штам-

повке точных деталей могут влиять на стабильность получаемых размеров.

Условия перехода волн сжатия через границу двух сред определяются отношением их акустических сопротивлений $(\rho_0 c_0)$, соответственно равных для стали, меди и алюминия $67 \cdot 10^6$; $4,28 \cdot 10^6$; $1,75 \cdot 10^6$ г/см² · с [93]. Если свариваются однородные материалы, т. е. акустические сопротивления в обеих сред одинаковы

$$\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2,$$

волна сжатия преодолевает границу раздела без изменения. Если свариваются, например, стальная труба с алюминиевой трубной решеткой, то акустическое сопротивление в среде, где волна возникает, оказывается больше акустического сопротивления среды, в которую волна переходит: $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$. Появляется отраженная волна обратного знака, амплитуда напряжений которой будет тем меньше, чем меньше разность акустических сопротивлений свариваемых материалов.

При сварке алюминиевой трубы со стальной трубной решеткой акустическое сопротивление в среде, где волна возникает, оказывается, наоборот, меньше акустического сопротивления среды, в которую волна переходит: $\rho_1 c_1 < \rho_2 c_2$. В этом смысле отраженная волна сохраняет знак падающей, а амплитуда напряжений в проникающей волне будет больше, чем в падающей. Отношение напряжений в отраженной $\sigma_{отр}$ и падающей $\sigma_{пад}$ волнах определяется из уравнения

$$\frac{\sigma_{отр}}{\sigma_{пад}} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}.$$

При импульсном деформировании металлов возможна встреча волн напряжений, например, отраженных от свободных поверхностей тела. Встреча волн одинакового знака, направленных навстречу друг другу, и их наложение дают явление максимального растягивающего напряжения, что способствует разрушению металла или контакта соединения. Встреча волн противоположного знака и их наложение, естественно, не дают роста амплитуды напряжений.

Волны напряжений, возникающие в заготовке в результате ара заготовки о матрицу, на которые могут накладываться волны напряжений, отраженные от свободных поверхностей заготовки, до соударения вызывают усилия, направленные в обратную сторону деформирования, что иногда является причиной неустойчивости калибруемого размера или недостаточной плотности соединения. Так, если энергия в импульсе при

запрессовке выбирается высокой, то отраженная от внутренней поверхности трубы волна, имеющая пик напряжения растяжения, может снижать плотность соединения. Возможен вариант, когда отражение первичной ударной волны от наружной поверхности трубы совпадает с моментом соударения в результате чего снижается скорость соударения, а следовательно, и контактные давления. В таком случае снижение энергии и скорости деформирования повысит качество соединений.

В процессе пластической деформации в моно- и поликристаллических материалах возникают очаги микроразрушения с образованием и консолидацией трещин, что приводит к «вязкому» разрушению [112]. При пластическом деформировании периодически повторяющимися импульсами нагружения отмечается изменение свойств и структуры кристаллических материалов [34]. Это обусловлено как действием непосредственно создаваемых в материале волн механических напряжений так и влиянием изменяющегося характера полей скоростей пластического течения, а также вследствие неравномерности деформаций, вызванной изменением трения. Со снижением трения уменьшение неравномерности деформаций приводит к уменьшению истинной накопленной деформации, что позволяет обнаружить и практически использовать рост степени деформации до разрушения материала при формоизменении.

Зарождение очагов микроразрушения выражается в образовании субмикротрещин в результате взаимодействия дислокаций в дислокационных скоплениях (ДС), которые формируются в полосах скольжения или других сгущениях дислокаций, причем могут реализоваться различные механизмы образования трещин.

Для зарождения субмикротрещин необходимо образование скопления дислокаций с числом их n более $10^2 - 10^3$ [113]. Используя для простоты критерий скалывающего напряжения, что не отражается на выводах, запишем аналогично величину напряжения у головы ДС, где оно является источником образования трещины:

$$\tau_m = \tau_s n + c \frac{BG}{2\pi k} \frac{m}{r},$$

где τ_m — максимальное напряжение у головы ДС; τ_s — сдвигающее напряжение течения; B — вектор Бюргерса; k — для краевой дислокации и $k = 1 - \mu$ — для винтовой дислокации; μ — коэффициент Пуассона; m — число дислокаций в области радиуса r , равного полуширине полосы скольжения; c — коэффициент, зависящий от распределения дислока-

по ширине полосы скольжения, $c = 2,0 - 0,5$; G — модуль сдвига.

Второе слагаемое в зависимости τ_m дает возможность учесть влияние дислокаций, сконцентрированных в полосе скольжения у головы ДС. Скорость выхода дислокаций из скопления определяет их число у головы ДС: $m = v\Delta t$, где v — частота актов поперечного скольжения; Δt — время деформирования.

Анализируя в соответствии с известными представлениями механизм приращения деформаций, находим

$$d\varepsilon = \frac{b}{aR^2} (R^2 dS + \lambda^2 L^2 v dt),$$

где a — расстояние между соседними плоскостями скольжения; R — половина размера зерна или субзерна; dS — приращение числа петель, испускаемых источником дислокаций при заданном напряжении; L — пробег дислокации, совершившей поперечное скольжение; λ — ориентационный фактор.

С учетом того, что $dS = dn + v dt$, комбинируя зависимости τ_m , m , $d\varepsilon$, dS , после интегрирования получаем уравнение для напряжения, характеризующего образование микротрещин, или теоретическую прочность кристалла,

$$\tau_m = \frac{a}{B} \varepsilon \tau_s - \left[\left(1 + \frac{\lambda^2 L^2}{R^2} \right) - c \frac{BG}{2\pi k r \tau_s} \right] \tau_s v \Delta t.$$

Так как входящая во второе слагаемое величина [53, 75, 113] $c \frac{BG}{2\pi k r} < \tau_s$, можно заключить, что увеличение актов поперечного скольжения обеспечивает достижение теоретической прочности при больших деформациях.

Следовательно, периодические волны механических напряжений в определенном спектре способны тормозить микроразрушения, увеличивая ресурс пластичности металла. Дополнением к теоретическому доказательству торможения развития очагов разрушения периодической волной механических напряжений служат опыты по одноосному растяжению с одновременным наложением периодических растягивающих импульсов.

Опыты выполнялись на лабораторном гидропрессе усилием $125 \cdot 10^5$ Н, оснащенном электрогидроимпульсным вибратором со следующими параметрами: рабочее напряжение 25—45 кВ, запасаемая энергия до 1,0 кДж, при частоте следования импульсов до 50 Гц. Испытаниям подвергались медь, алюминий, латунь, сталь 11ЮА и другие марки. Стандартные образцы растягивались со скоростью 10^{-1} м/мин. В процессе растяжения металл подвергался действию механических напряжений с периодом возбуждения $10^{-1} - 10^{-2}$ с.

Опытным путем определено, что возбуждение в металле осадки волн механических напряжений приводит к росту относительного удлинения и поперечного сужения, равномерная деформация также несколько увеличивается. Прирост удлинения для стали с содержанием углерода до 0,01 % составил около 35 %. Данные для гранцентрированных — кубических (ГЦК) металлов приведены в табл. 8, где указаны

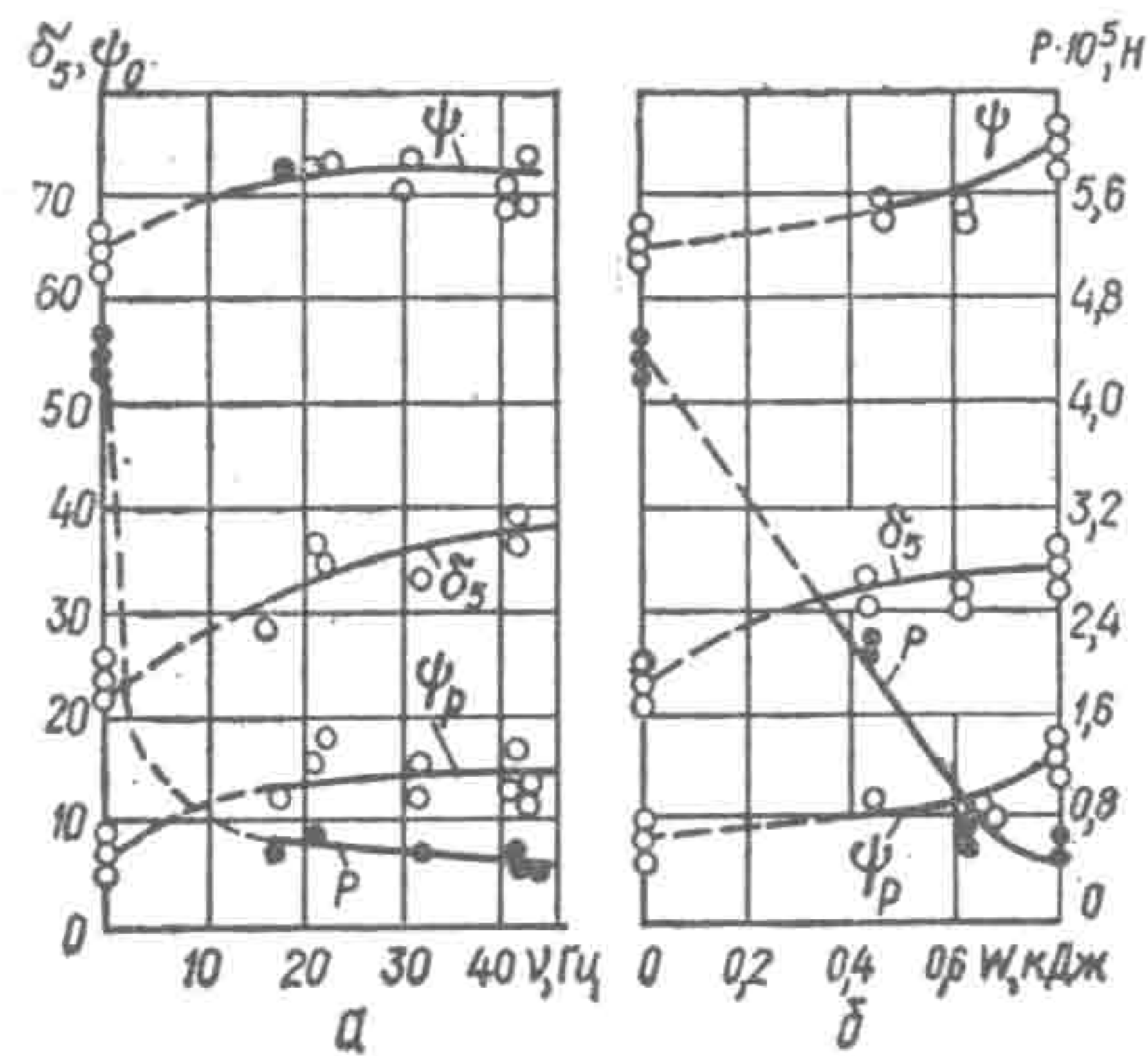


Рис. 17. Изменение относительного удлинения δ , полного и равномерного ψ поперечного сужения и разрывного усилия P стали 11ЮА при растяжении при энергии $W = 0,8$ кДж (а) и частоте $\nu = 20$ Гц (б).

влияние заключается в снижении энергии активации поперечного скольжения при увеличении энергии дефекта упаковки. Тогда нетрудно показать, что при высокой энергии дефекта упаковки следует ожидать большего проявления торможения развития очагов разрушения и большей деформации до разрушения при неизменных условиях, что подтверждается опытными данными (табл. 8). При испытаниях на растяжении установлено не только повышение характеристик деформации до разрушения, но и снижение разрывного усилия. При увеличении энергии импульсов постоянной частоты увеличиваются характеристики деформации до разрушения, снижается разрывное усилие (рис. 17) [53]. Анализ результатов показывает, что характеристики деформации при растяжении в основном зависят от энергии импульсов, возбуждаемых в металле волнами механических напряжений. Исследовалось также влияние параметров импульсного периодического нагружения на

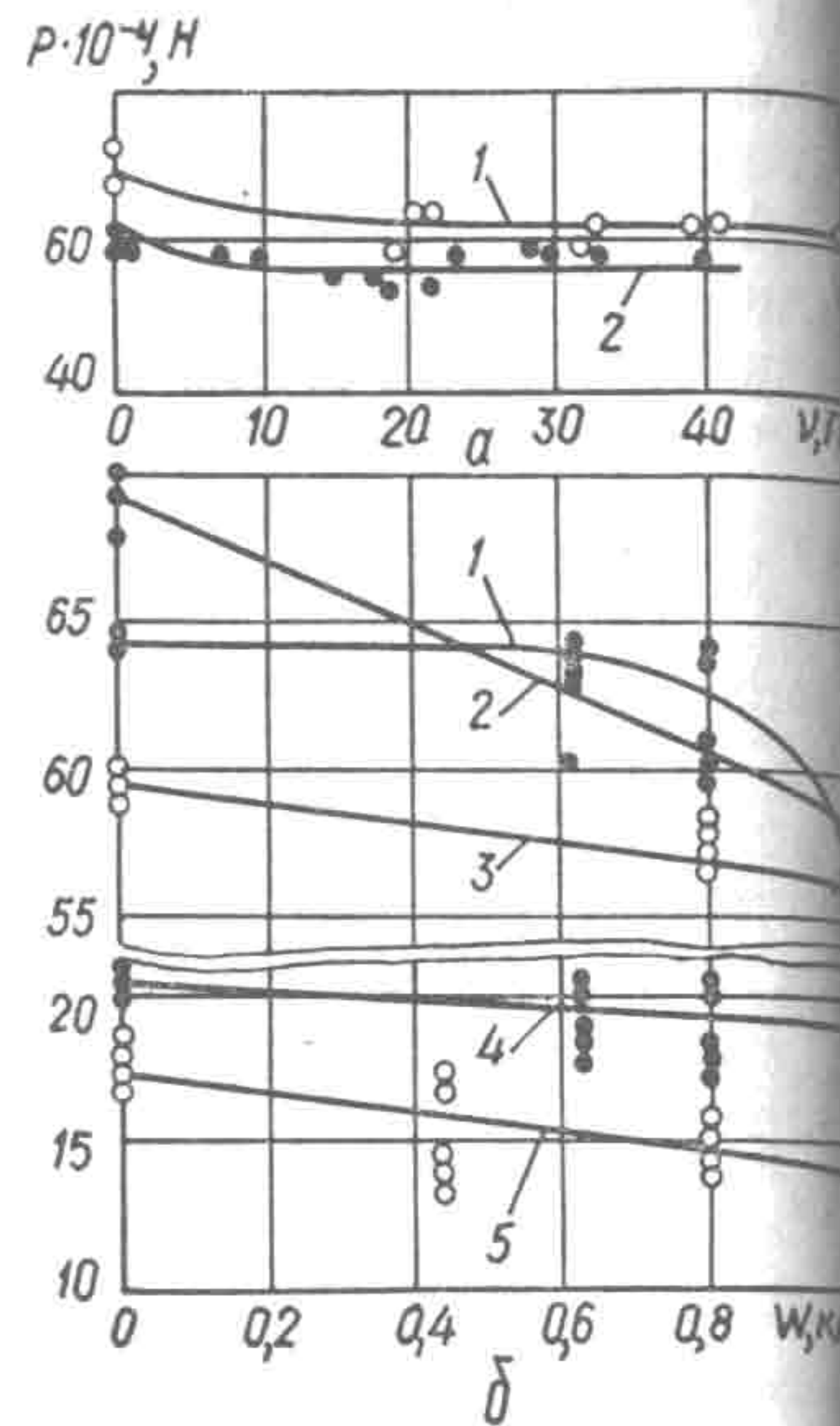


Рис. 18. Изменение рабочего усилия деформирования стали 11ЮА.

также значения энергии дефекта упаковки [85].

характеристики деформации и свойства деформируемого металла с помощью осадки стали 11ЮА, проверялось изменение рабочего усилия деформирования в зависимости от частоты следования импульсов при плоской осадке (рис. 18, а) на образцах $6,85$ см при энергии в импульсе $0,6$ кДж (кривая 1) и на образцах $22,8$ см³ при энергии в импульсе $0,8$ кДж (кривая 2), а также в зависимости от энергии в импульсе при частоте 20 Гц (рис. 18, б) при обратном выдавливании со степенью деформации 65% (кривая 1) при плоской осадке образцов $6,85$ см³ (кривая 2), при осадке образцов $22,8$ см³ (кривая 3), при вытяжке с утонением со степенью деформации 65% (кривая 4) и при вытяжке с утонением со степенью деформации 55% (кривая 5). Снижение усилия осадки практически не зависит от частоты следования импульсов, а зависит от энергии обработки. Распределение твердости по сечению образцов, осажженных в условиях плоской осесимметричной деформации с периодическим возбуждением волны механических напряжений, показал, что характер упрочнения меняется. Установлено существенное падение ($<50\%$) микронеоднородности упрочнения.

Таблица 8. Прирост относительного удлинения ГЦК металлов в результате торможения развития очагов разрушения

Образец	Энергия дефекта упаковки, 10^{-3} Дж/м ²	Прирост относительного удлинения, %
Медь	40	25
Латунь	80	30
Алюминий	200	37

Исследовали образцы деформированной технической меди диаметром 14×12 мм, которые после осадки на лабораторной установке разрезали в меридиональной плоскости и испытывали на приборе ПМТЗ в ряде линейных участков. Исследование неоднородности упрочнения по предельным значениям микротвердости в предварительно деформированной технической меди и после деформации на лабораторной установке со степенью деформации 40% показало существенное падение неоднородности упрочнения. После деформирования с наложением волн механических напряжений среднее значение размаха микротвердости на базе 500 мкм снизилось более чем на 70% .

Волна напряжений при прохождении через кристалл изменяет соотношения между напряжениями в различных плоскостях скольжения, что повышает вероятность более сбалансированного распределения микродеформаций, снижения микро-

неоднородности деформаций и упрочнения. Микронеоднородность является фактором, в значительной мере определяющим кинетику движения вязкой микротрещины. Учитывая наличие механических и химико-механических градиентов, можно показать, что скорость вязкой микротрещины определяется взаимодействием этих градиентов и внешнего напряжения как при диффузионном, так и при дислокационном механизме переноса вещества. Известно, что в пределах некоторой линейной базы в моно- и поликристаллах существует определенная микронеоднородность деформаций и упрочнения, возникающая на начальных стадиях деформирования и с дальнейшей деформацией малоизменяющаяся [43].

Снижение микронеоднородности под действием волны механических напряжений дополнительно снижает скорость развития очагов разрыва на этапах вязкого подрастания и движения трещин. Волны механических напряжений, особенно периодически повторяющиеся, существенно влияют на механизм деформирования, вызывая в пластически деформируемых кристаллических материалах торможение развития очагов разрушения.

Проведенные исследования действия волн механических напряжений при импульсном деформировании кристаллических материалов дали возможность выявить явление торможения развития очагов разрушения и в связи с этим возможность деформирования малопластичных материалов, повышения степени деформирования и повышения упрочнения деформированием без охрупчивания.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ

Высокоскоростное деформирование металлов осуществляется различными способами. Наряду с листовой штамповкой в промышленности используются гидровзрывная, магнитноимпульсная, гидроударная и газодинамическая. Перечисленные способы объединяют ряд преимуществ штамповки жидкими и эластичными средами с высокоскоростным деформированием, осуществляемым импульсным приложением нагрузки. Наиболее распространенные способы (электрогидроимпульсная, гидровзрывная и магнитноимпульсная штамповка) имеют в сравнении друг с другом вполне определенные и наиболее эффективные области применения. Магнитноимпульсная формовка несравнима при выполнении операции «обжим»; гидровзрывная — наиболее эффективна, а в некоторых случаях практически незаменима при штамповке крупногабаритных деталей; электрогидроимпульсная получила распространение при деформировании как плоских, так и трубчатых заготовок в достаточно широком диапазоне их размеров: от нескольких миллиметров до двух метров при толщине заготовки от десятых долей миллиметра до 10—12 мм. Следует отметить, что ЭГ штамповка — самый распространенный в стране способ высокоскоростного деформирования. Это определяется рядом преимущественных особенностей технологии и оборудования, основанных на использовании электрогидравлического эффекта, к которым относятся простота варьирования энергетическими параметрами; многоимпульсное воздействие на заготовку с возможностью изменения параметров каждого импульса; сочетание общего и локального способов нагружения; большие возможности для механизации и автоматизации процесса.

Наиболее просто варьирование энергетическими параметрами осуществляется изменением рабочего напряжения, которое проводится с пульта управления прессом. При этом энергия

в импульсе для большинства прессов может изменяться максимальной до одной четверти максимальной — для прессов с рабочим напряжением до 10 кВ (10, 20 и 40 кДж), и от максимальной до половины максимальной — для прессов с рабочим напряжением до 50 кВ (40, 80 и 160 кДж). В принципе нет препятствий для варьирования напряжением и энергией от нуля до максимума, что и предусмотрено в некоторых моделях ЭГ установок [114]. Кроме того, при необходимости уменьшить энергию в импульсе, оставляя высоким рабочим

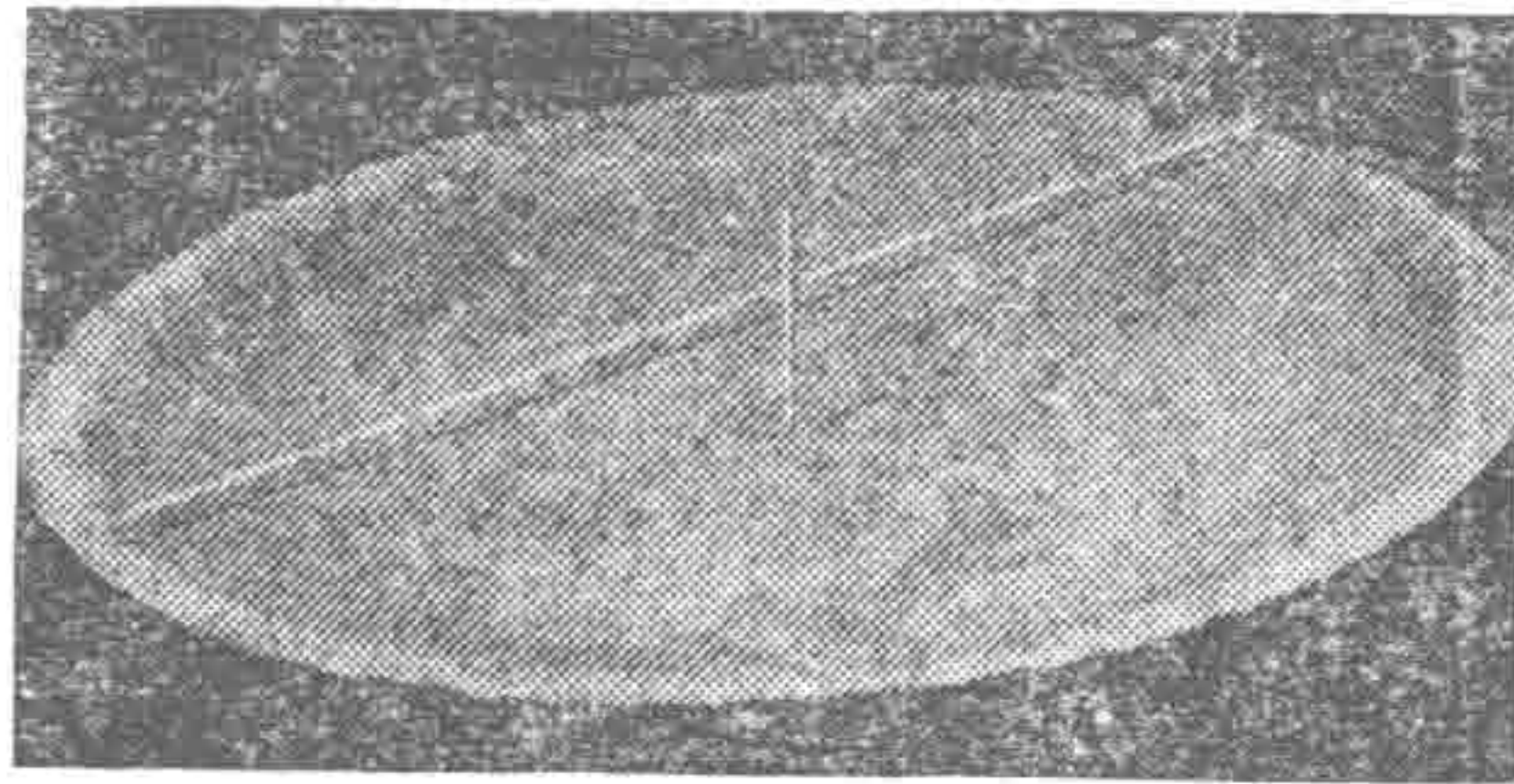


Рис. 19. Днище, отштампованное на ЭГ прессе с энергией в импульсе, равной 150 кДж.

напряжение, можно отключить часть конденсаторов, что хоть и связано с переналадкой оборудования, позволяет расширять диапазон варьирования энергетическими параметрами. Изменением напряжения и емкости, а также варьирование длиной разрядного промежутка дает возможность менять в широком диапазоне характеристики нагружающего импульса проводить деформирование со скоростями как в нескольких десятках или даже сотен метров в секунду, так и в нескольких метров в секунду. Полное деформирование детали с передачей заготовки всей необходимой энергии за один импульс часто оказывается невозможным в силу того, что возникающие при этом большие скорости и ускорения деформации разрушают материал. Особенно это опасно для материалов с малой критической скоростью деформирования, к которым можно отнести холоднокатаные медь, сталь, титан, ниобий и др. Поэтому разделение общей энергии деформирования на отдельные порции и воздействие на заготовку несколькими импульсами расширяет возможности применения технологии высокоскоростного деформирования с использованием высоковольтного разряда в жидкости. Причем, как уже отмечалось выше, энергия каждого импульса может меняться в процессе деформирования, что при общем нагружении в большинстве случаев в практике и делается — с увеличением начального сопротивления заготовки деформированию после каждого импульса энергия следующего импульса или серии импульсов увеличивается. Особенно велика необходимость такого построения процесса при вытяжке. Оптимизация процесса в этом плане достаточно просто осуществляется экспериментально, так как не требуется переналадка оборудования.

При обработке деталей небольших размеров ($< 0,5$ м) число импульсов достигает 25—50 с энергией в каждом импульсе

20—40 кДж, а при обработке крупногабаритных деталей размерами 1,0—2,0 м методом локального нагружения с энергией в импульсе порядка 80—160 кДж число импульсов может достигать 200 и более. Локальное нагружение заготовки осуществляется, как правило, изменением расположения разрядного промежутка, что достигается использованием в прессах подвижных электродов или попеременной подачей напряжения на разные пары электродов в прессах с многоэлектродными разрядными камерами. Причем каждой детали соответствует своя оптимальная траектория перемещения разрядного промежутка. Например, при штамповке днищ на прессе «Удар-11» (рис. 19) разрядный промежуток (конец подвижного электрода) перемещался по спирали от периферии к центру. Кроме того, локальное нагружение заготовки может быть осуществлено перемещением всей разрядной камеры относительно

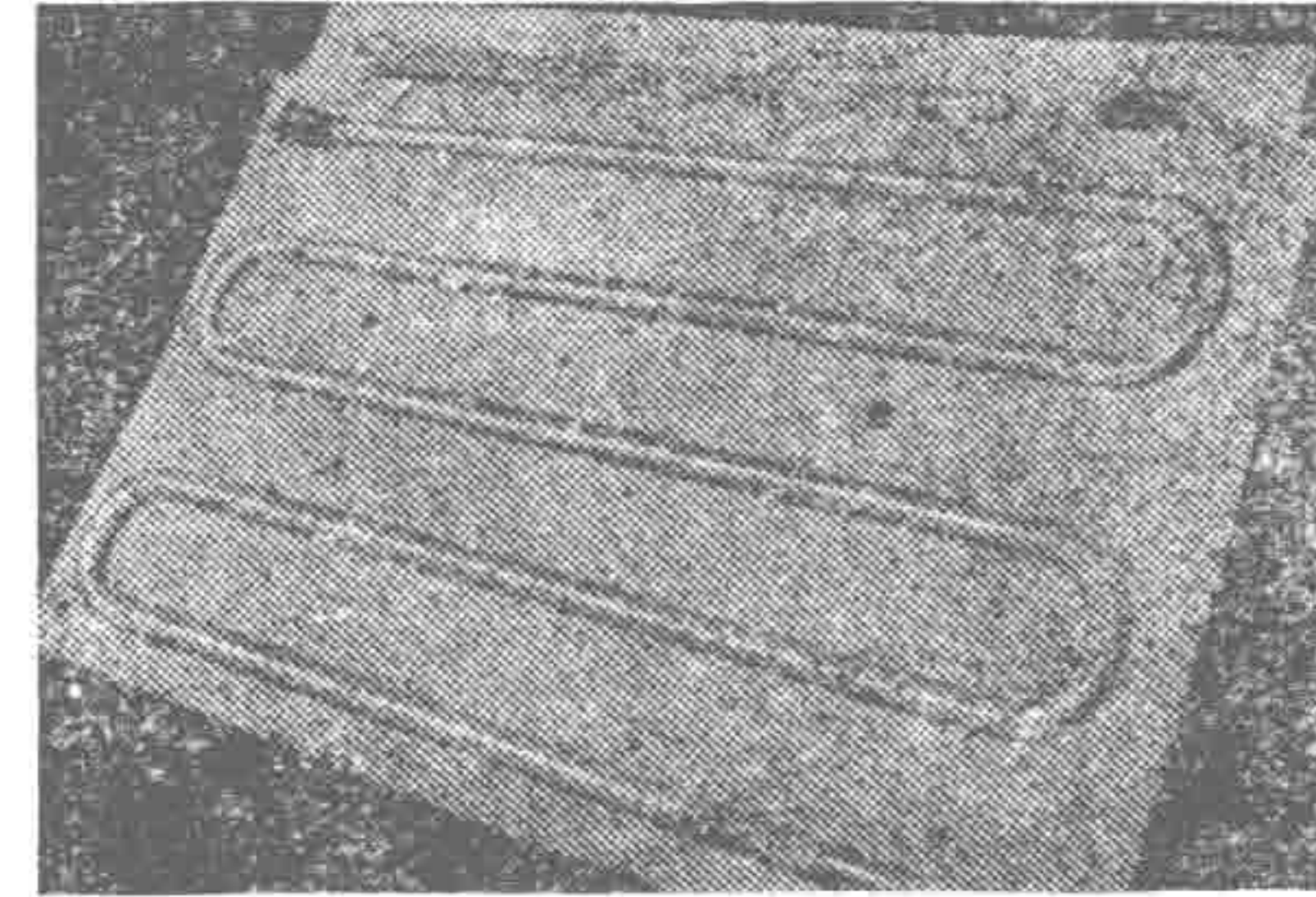


Рис. 20. Панель теплообменника, отштампованная на ЭГ прессе «Удар-1М».

заготовки, что, например, делалось при штамповке крупногабаритных панелей теплообменников (рис. 20) на одном из первых ЭГ прессов «Удар-1М», конструкция которого предусматривала такой способ штамповки; изменением положения выходного отверстия разрядной камеры; путем использования поворотной насадки на камере [56], что может быть реализовано на прессах с общей схемой нагружения и т. д.

Что касается механизации и автоматизации технологических процессов, то эти вопросы решены на уровне, соответствующем назначению оборудования. Универсальные ЭГ прессы имеют системы автоматики, позволяющие проводить все операции без вмешательства оператора-штамповщика после установки заготовки и до выема готовой детали, если не требуется изменение энергии в импульсе в процессе деформирования. Если необходимо менять энергию в импульсе, то оператор изменяет положение переключателя рабочего напряжения, не превышая автоматического цикла. Специализированные ЭГ прессы, например Т1226, имеют непрерывный, повторяющийся цикл и при использовании загрузочных устройств, соответствующих форме и размерам детали, штамповка может проводиться в автоматическом режиме.

Электрогидроимпульсная штамповка, характеризующаяся равномерным нагружением заготовки, изменением пластических свойств металлов вследствие больших скоростей дефор-

мирования, приводящих к тепловому эффекту и появлению дополнительных плоскостей скольжения, позволяет в ряде случаев получать более высокие степени деформации и сокращать число операций по сравнению со штамповкой в жестких штампах.

2. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Главная цель внедрения в производство новых технологических процессов — снижение затрат на изготовление продукции. При этом внедряемый процесс оценивается в сравнении с другими возможными вариантами технологических процессов на основе комплексного анализа сопоставляемых вариантов. Наиболее прогрессивным является процесс, выбранный из ряда возможных вариантов, который обеспечивает минимальную сумму затрат [50] $T_{\Sigma} \rightarrow \min$, т. е.

$$T_{\Sigma} = T_{н} + T_{др} + T_{м} + T_{и} + T_{об} + T_{э} + T_{вм} \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

где $T_{н}$ — непосредственные трудозатраты на изготовление изделия; $T_{др}$ — изменение трудозатрат на других операциях, вызванное принимаемым технологическим решением; $T_{м}$, $T_{и}$, $T_{об}$, $T_{э}$, $T_{вм}$ — затраты соответственно на основные материалы, инструмент, оборудование, энергию и вспомогательные материалы.

В общем случае оценка процесса обуславливается следующим.

1. Каждой детали из множества возможных вариантов конструктивно-геометрических форм в заданных условиях масштаба производства соответствует свой оптимальный процесс обработки. Этот процесс выбирается из множества известных, разработанных для внедрения и используемых на заводах технологических процессов.

2. Каждой детали с ее наиболее выгодным технологическим процессом соответствуют свои наиболее эффективные виды инструмента и оборудования, выбираемые также из множества различных вариантов с учетом наиболее качественного осуществления процесса при минимальных затратах.

Таким образом, как отмечено в работе [50], налицо взаимосвязь детали, исходного полуфабриката, процесса, инструмента и оборудования.

Сопоставляя варианты технологических процессов по затратам, мы фактически сравниваем их по технологичности детали применительно к разным процессам, так как основной показатель технологичности — технологическая себестоимость

изделия [37] — как раз и включает затраты, рассматриваемые при сравнении вариантов (см. формулу (2.1)).
Оценка технологичности детали начинается с рассмотрения ее конструкции: формы, размеров, марки материала, требований к точности и чистоте обработки. Для каждого вида процесса конструкция детали оценивается своими показателями. В листовой штамповке — это коэффициенты вытяжки, раздачи, отбортовки, относительные радиусы закруглений, относительная толщина заготовок, требуемые усилия деформиро-

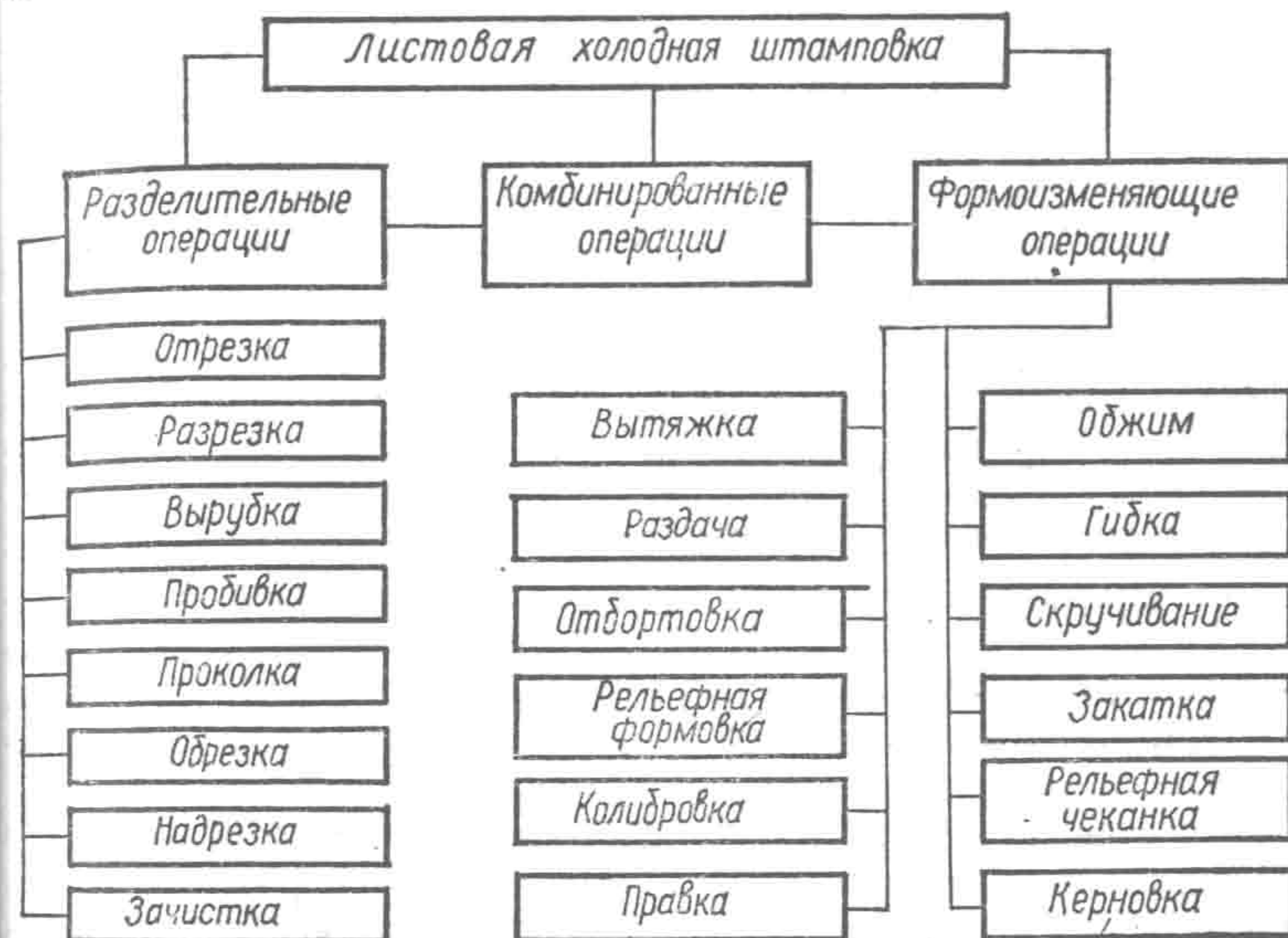


Рис. 21. Классификация операций холодной листовой штамповки.

вания. Они и определяют штампуемость детали. По этим показателям находят число штамповочных переходов и необходимость межоперационной термической обработки (следовательно, затраты на инструмент, трудозатраты основных и вспомогательных операций), тип оборудования, затраты, связанные с его эксплуатацией и т. д.

Если детали изготавливаются с использованием одинаковых операций, то для качественного сравнения их технологичности достаточно сравнить показатели, характеризующие их штампуемость. При оценке конструкции детали применительно к ЭГ штамповке используются такие же показатели, как и для обычной штамповки, однако особенности электрогидроимпульсного способа штамповки вносят свои коррективы в оценку штампуемости детали. Поэтому авторами рассмотрена взаимосвязь технологичности деталей, изготавливаемых с

использованием одинаковых операций, с особенностями штамповки, которая может быть использована при сравнении с другими вариантами технологических процессов, а также при выборе формы детали в процессе ее проектирования с расчетом применения для ее изготовления электрогидроимпульсной штамповки или при обосновании изменения формы детали при переводе ее на ЭГ штамповку.

В принципе электрогидроимпульсное оборудование может охватить практически все виды операций, осуществляемых в области листовой штамповки (рис. 21) [38], но рассматривается

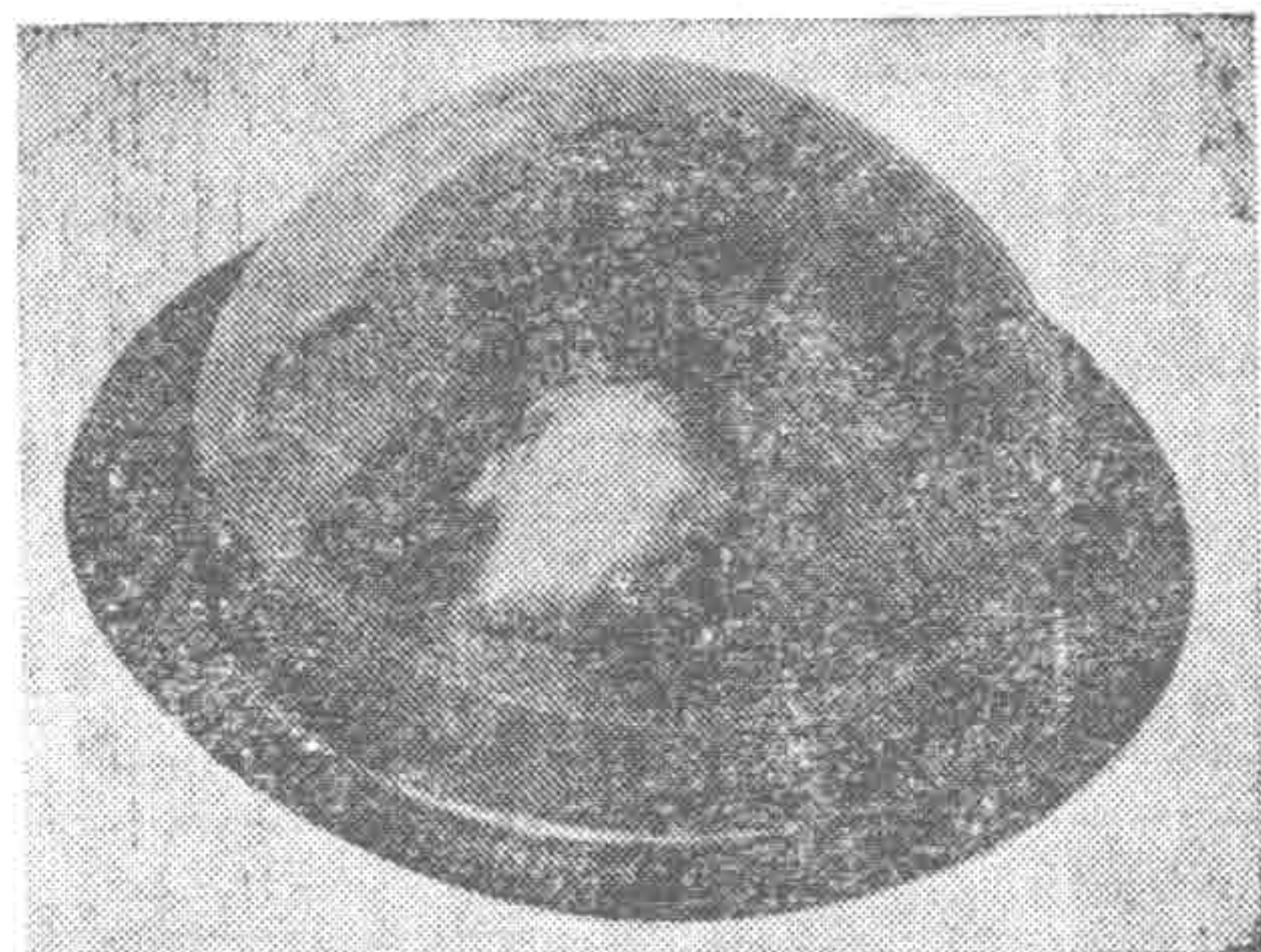


Рис. 22. Сферическое днище.

технологичность различных деталей при выполнении всех этих операций на ЭГ прессе нецелесообразно, так как некоторые из них требуют применения в оснастке пуансонов, что приводит практически к обычной штамповке, ряд операций применяют или могут быть применены крайне редко. Связь технологичности деталей с особенностями ЭГ штамповки рассмотрена для наиболее распространенных операций: вытяжки, раздачи, пробивки и вырубки, отбортовки, рельефной формовки.

Основные особенности ЭГ штамповки, влияющие на оценку технологичности деталей, — относительная равномерность распределения нагрузки; наличие обратного импульса давлений; необходимость обеспечения герметичности в зоне контакта заготовки с прижимом.

Равномерность распределения нагрузки благоприятно сказывается при штамповке деталей, не имеющих резких переходов, как, например, сферообразные или эллиптические днища, детали в виде усеченного конуса с большими переходными радиусами, детали, штампуемые из трубчатых заготовок и заготовки в виде стакана, окончательная форма которых близка к поверхности сферы. Это объясняется тем, что при свободной раздаче центральной части трубчатых заготовок и вытяжке через кольцевую матрицу жидким пуансоном заготовка стремится принять форму, имеющую равномерную жесткость: этим и отличаются куполообразные или сферообразные детали. Если матрица имеет форму, аналогичную форме, которую принимает заготовка при свободном деформировании, то происходит сравнительно одновременное касание заготовки стенок матрицы при относительно равномерном рас-

предел, чии утонения в сечении детали, что способствует получению больших степеней деформации. При выполнении операции равномерно распределенная нагрузка значительно сдерживает потерю устойчивости и гофрообразование той части заготовки, которая выходит из-под прижима [78], что зачастую имеет место при вытяжке таких деталей жестким пуансоном вследствие сосредоточения деформирующего усилия в центре заготовки в начальный период деформирования. Так, вытяжка полусферического днища диаметром 440 и высотой 220 мм из материала X18H9T толщиной 1,5 мм (рис. 22) на прессе Т1223 [105] происходит без складкообразования в процессе деформирования.

Детали, имеющие в вертикальном разрезе форму, близкую



Рис. 23. Изменение формы заготовки в процессе ЭГ деформирования: а — вытяжка; б — раздача.

к прямоугольной (как, например, стаканы с плоским дном), штампуемые из плоских заготовок, или имеющие форму образующей, состоящую из прямых участков, перпендикулярных или параллельных оси с малыми переходными радиусами, при раздаче трубчатых заготовок (рис. 23) имеют значительно меньшую технологичность. При вытяжке или раздаче таких деталей происходит далеко не одновременное касание заготовки всей поверхности матрицы, причем равномерно распределенная нагрузка прижимает к поверхности матрицы при деформировании те участки заготовки, которые контактируют с матрицей, создавая тем самым дополнительные усилия трения [51], препятствующие перетеканию металла в область деформируемого участка заготовки. Вследствие этого та часть заготовки, которая еще не имеет контакта с матрицей, испытывает дополнительные растягивающие усилия, приводящие к повышению местного утонения, что может повлечь за собой разрыв заготовок.

Равномерное распределение нагрузки и трудности в обеспечении ее концентрации на наиболее жестких участках детали

без изменения конструкции оснастки (как, например, на переходных радиусах или в районе местных выштамповок) всегда обеспечивают требуемую нагрузку на этих участках, что повышает энергетические затраты за счет необходимости увеличения энергии в импульсе или увеличения числа импульсов. Иногда приходится применять разупрочняющие отжиги с целью увеличения пластичности материала или вводить дополнительный переход с использованием оснастки, которая обеспечивает необходимую концентрацию нагрузки на труднодеформируемых участках детали.

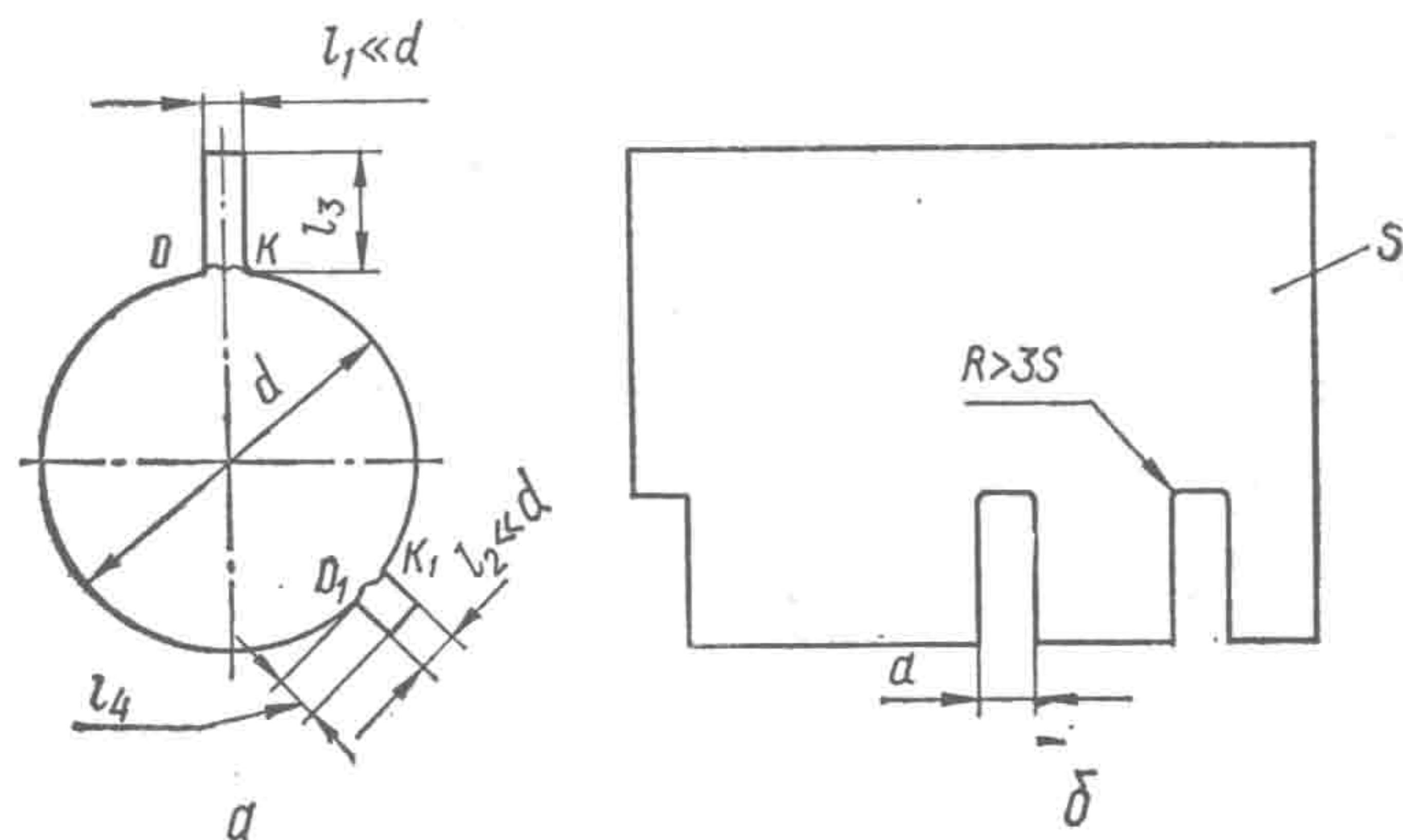


Рис. 24. Контур сложного отверстия (а) и вырубаемой детали (б):
OK и O_1K_1 — линии возможного обрыва отхода.

Равномерность распределения нагрузки влияет на оценку технологичности деталей и при выполнении разделительных операций. При пробивке наиболее технологичными являются детали, в которых размер пробиваемого отверстия (отход) по отношению к толщине заготовки больше. Это позволяет получать требуемые усилия среза при меньшей нагрузке и следовательно, при меньших энергетических затратах. Так для пробивки круглого отверстия требуемая распределенная нагрузка P имеет следующую зависимость:

$$P = \frac{4S\sigma_{\text{ср}}}{d},$$

из которой видно, что требуемая нагрузка (давление) прямо пропорциональна толщине и обратно пропорциональна диаметру.

Более высокой технологичностью при пробивке одновременно нескольких отверстий обладают детали, имеющие примерно одинаковые размеры отверстий. В случае значительной

разницы размеров отверстий в первую очередь пробиваются отверстия больших размеров, как требующие меньшую нагрузку. При этом происходит разгерметизация оснастки, что препятствует дальнейшему росту нагрузки до величины, необходимой для пробивки отверстия меньших размеров. Аналогичные затруднения возникают и при пробивке отверстий сложной формы с большой разницей размеров сопрягаемых фигур (рис. 24, а).

Связь усилия, создаваемого на режущей кромке, с размерами отхода сказывается и на технологичности деталей, получаемых ЭГ вырубкой. Так, при вырубке деталей, имеющих сложную форму контура (рис. 24, б), более технологичными оказываются детали, у которых отношение ширины впадин a к толщине заготовки больше или ширина этих впадин примерно одинакова.

Как при вырубке, так и при пробивке наиболее технологичны детали, лишенные острых внутренних углов. Наличие таковых в контуре режущей кромки матрицы может повести к обрыву заготовки не по кромке матрицы, а по линии, соединяющей стороны угла на некотором расстоянии от его вершины (рис. 25). Производство величины напряжения, необходимого для обрыва заготовки, на длину возможной линии обрыва зачастую оказывается меньшим, чем производство величины требуемого напряжения среза на длину суммы отрезков угла, соединяющих крайние точки возможной линии обрыва:

$$\sigma_{\text{ср}}(l_1 + l_2) > \sigma_{\text{об}}l_{\text{об}},$$

где $\sigma_{\text{ср}}$ — напряжение, необходимое для среза заготовки по кромке матрицы; l_1, l_2 — длина отрезков по кромке матрицы, соединяющих вершину угла с крайними точками линии обрыва; $\sigma_{\text{об}}$ — напряжение, необходимое для обрыва заготовки; $l_{\text{об}}$ — длина линии обрыва.

Так, попытка осуществить обрезку по контуру с острым внутренним углом (рис. 26) в заготовке толщиной 0,4 мм из материала 12Х18Н9 не дала положительных результатов, так как происходил обрыв заготовки не по режущим кромкам матрицы, а по линии, соединяющей стороны угла кромок матрицы

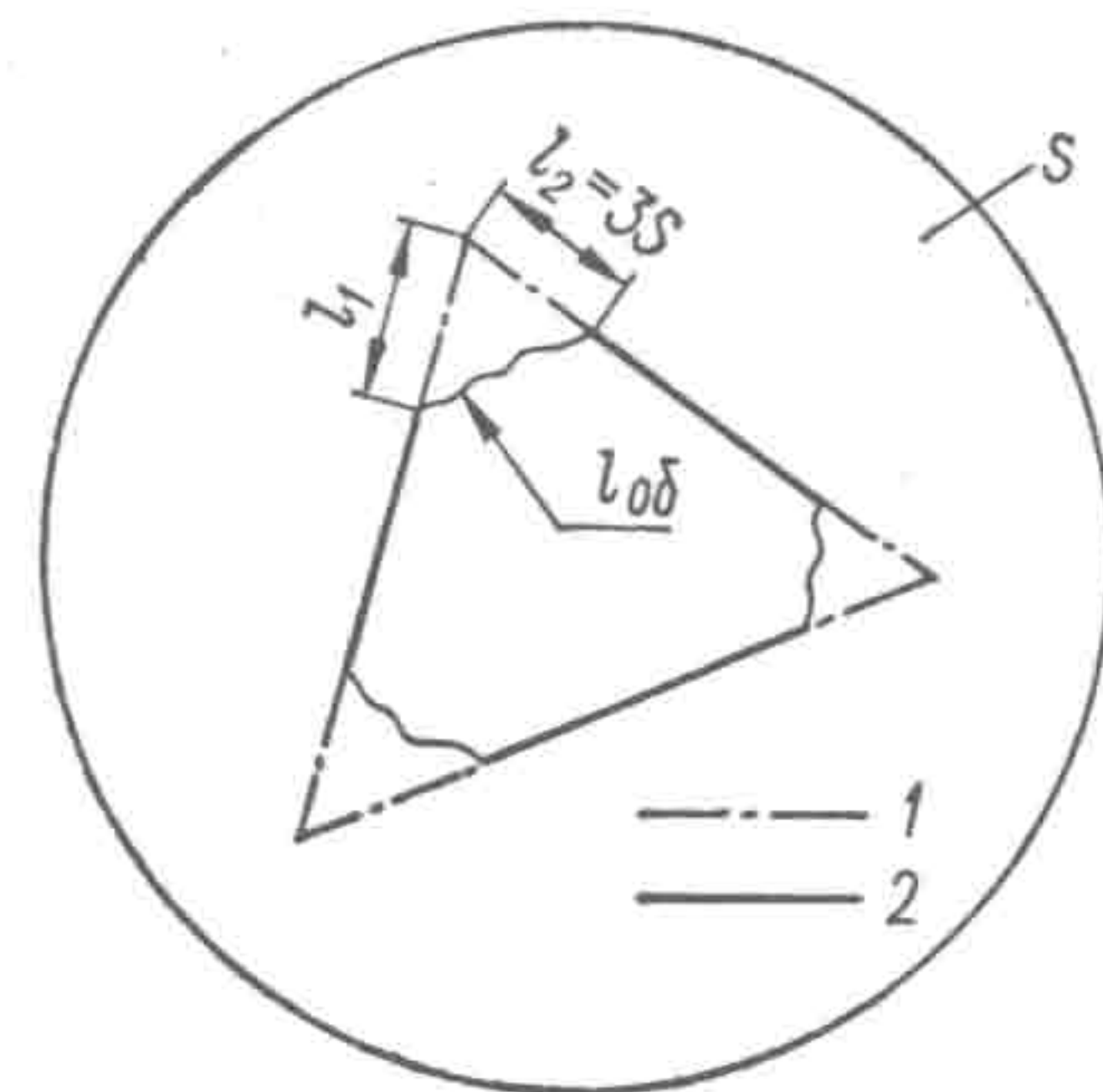


Рис. 25. Контур отверстия при ЭГ пробивке в матрицу, имеющую контур отверстия с острыми углами:

1 — контур отверстия в матрице; 2 — контур отверстия в детали.

на расстоянии 0,6—1,0 мм от его вершины. После замены острого угла на сопряжение по радиусу величиной 0,8 мм обрезка осуществлялась в соответствии с контуром режущей кромки матрицы.

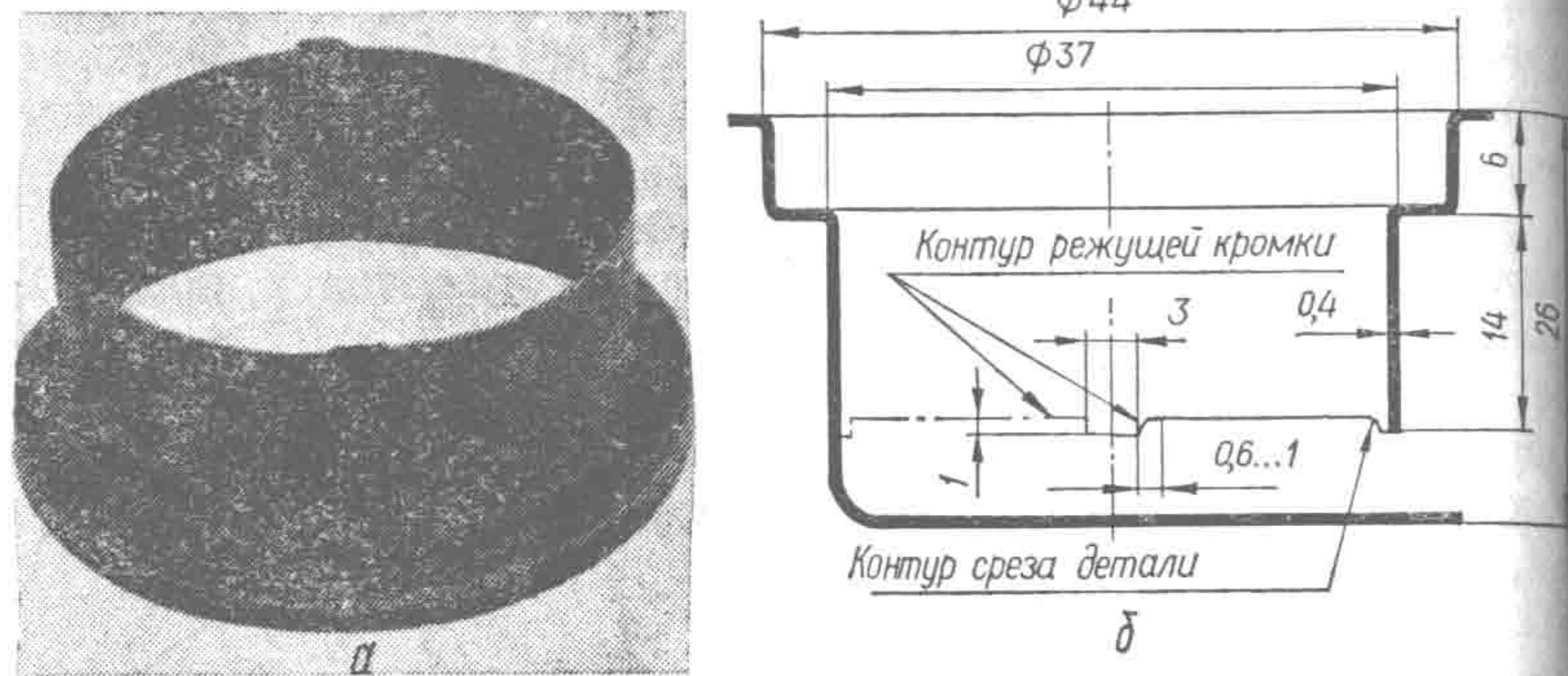


Рис. 26. Деталь (а) и ее эскиз (б), обрезанная на прессе «Удар-20».

Наиболее технологичными деталями, в которых требуется осуществить отбортовку кромок в отверстиях, являются детали, имеющие круглую форму отверстий, что позволяет при минимальных энергетических затратах осуществить совмещение

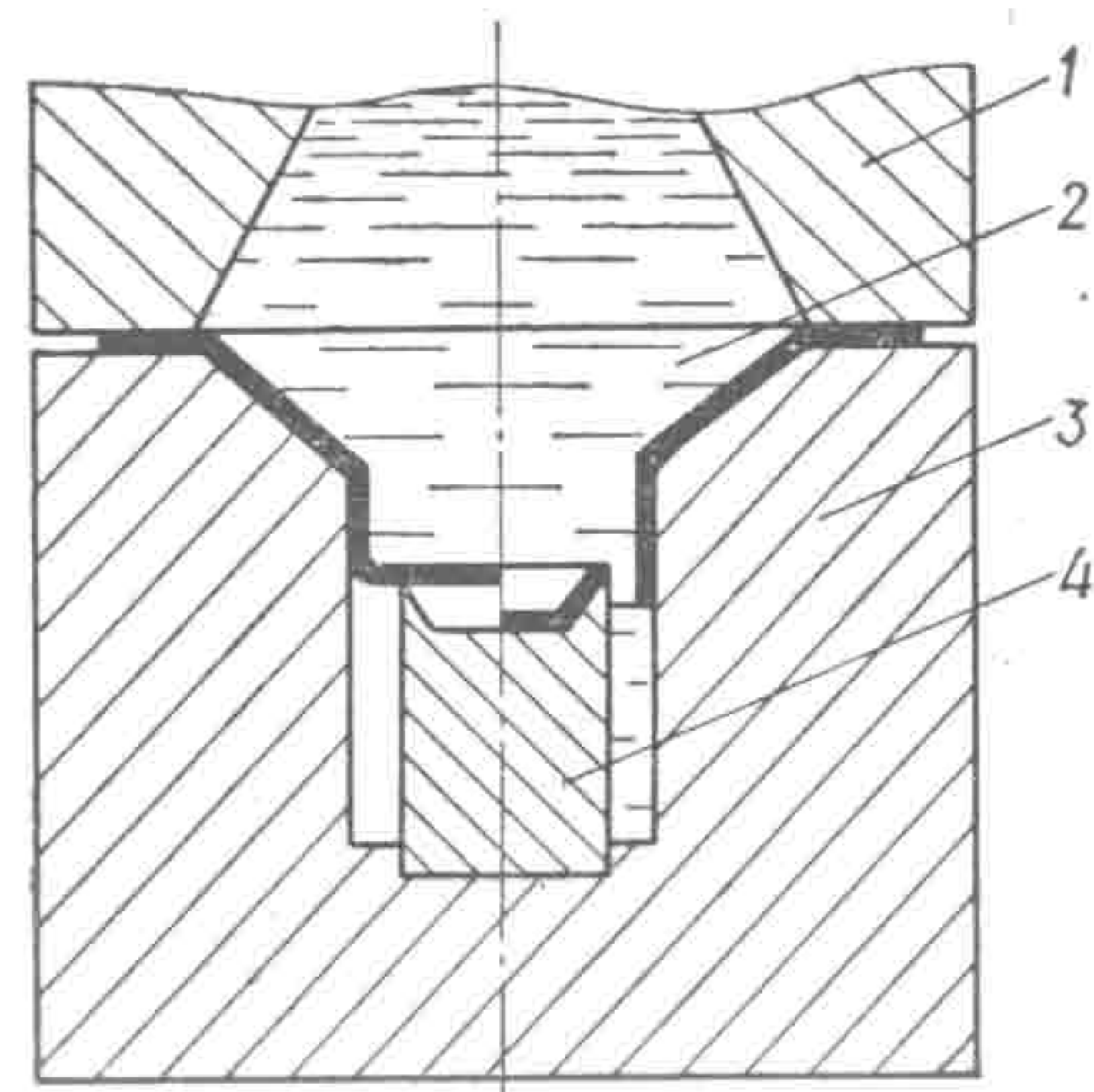


Рис. 27. Схема оснастки для пробивки, совмещенной с отбортовкой:

1 — камера; 2 — штампуемая деталь; 3 — матрица; 4 — пуансон.

для обеспечения качественной отбортовки по всему контуру или отказываться от совмещения операций и производить отбортовку после вырубki отверстия, используя эластичную диафрагму.

Влияние равномерности распределения нагрузки при сравнении технологичности деталей, получаемых рельефной штам-

операции пробивки отверстия с отбортовкой кромок в одноимпульсном режиме по схеме, изображенной на рис. 27. Для качественной отбортовки с минимальными затратами энергии необходимо иметь примерно равную жесткость отбортовываемой части заготовки, что и обеспечивается при отбортовке равновысоких кромок круглых отверстий. Если отверстие не круглое, тогда отбортовываемая часть заготовки имеет разную жесткость и требует разной нагрузки в каждом сечении, что приводит к необходимости увеличивать энергию в импульсе

повкой, аналогично вытяжной операции, поскольку рельефную штамповку можно рассматривать как вытяжку заготовки, имеющей жесткозащемленный фланец.

Невысокой технологичностью отличаются детали, получаемые вытяжкой, жесткость свободной, неподкрепленной оснасткой, деформируемой поверхности которых очень мала. При штамповке таких деталей может неблагоприятно сказываться

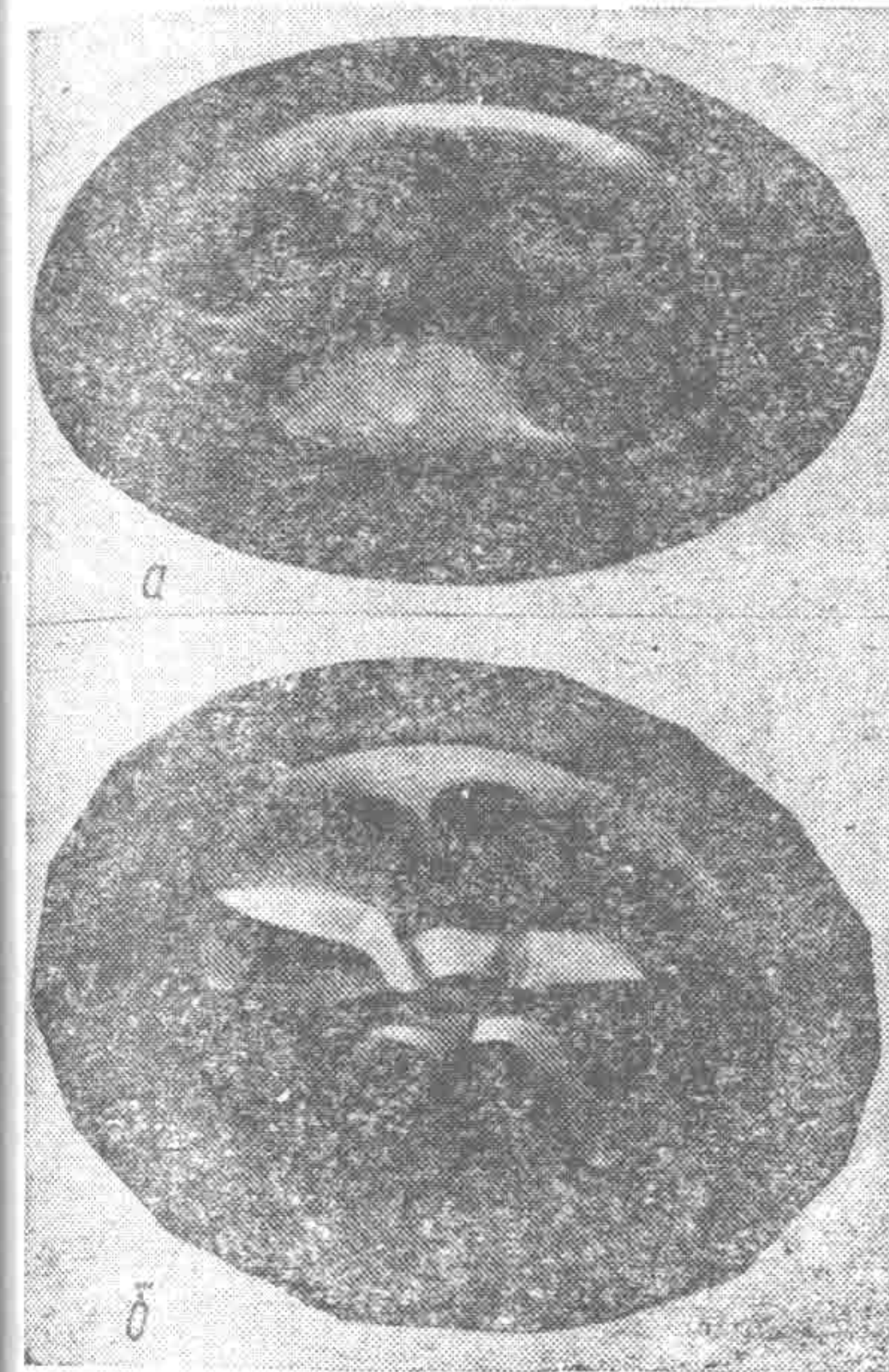


Рис. 28. Форма заготовки малой жесткости, потерявшей устойчивость в результате действия обратного импульса давления:
а — после одного импульса; б — после двух импульсов.

обратный импульс давления. После приложения нагрузки в сторону требуемого деформирования направление нагрузки меняется вследствие схлопывания парогазовой полости, что приводит к резкому падению давления в камере, возможно до величины, ниже атмосферного. В этот

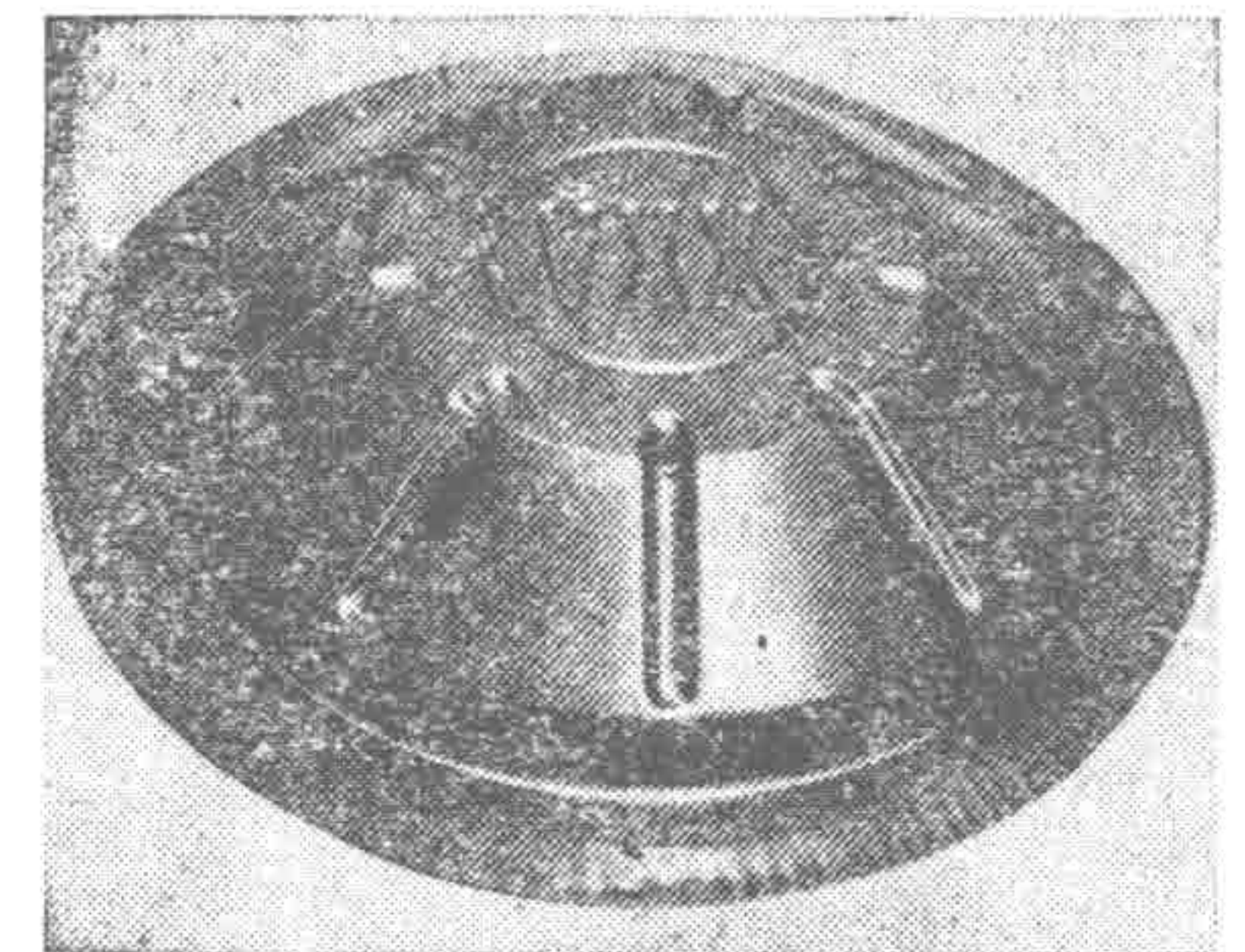


Рис. 29. Экран, вытянутый на прессе Т1223.

момент давление в полости между заготовкой и матрицей оказывается выше, по-

скольку там действует давление, созданное сжатием вытесняемого из-под заготовки воздуха. Если жесткость частично оформленной детали оказывается недостаточной, чтобы противостоять обратному импульсу давления, то происходит потеря устойчивости детали с остаточными деформациями (рис. 28), аналогичными происходящим при потере устойчивости тонкостенных сосудов под действием внешней нагрузки. На рис. 28 показана форма сформированной заготовки из стали толщиной 0,5 мм, энергией в импульсе 20 кДж в матрицу с диаметром очка 440 мм. Этому явлению способствует и пружинение заготовки. Такое поведение заготовки наблюдалось при штамповке детали, изображенной на рис. 29, и некоторых

других деталях. Для устранения этого явления требуется принятие специальных мер, как, например, снижение энергии импульсе, обеспечение вакуумирования или штамповки со «спутником».

Большое влияние на оценку технологичности штампуемых деталей оказывает необходимость обеспечения герметичности в зоне контакта заготовки с прижимным кольцом. Так, если сравнивать детали одинакового диаметра и высоты, штампуемые из плоских заготовок, но одну — имеющую конструктивный фланец, а другую — без него, то становится очевидной более высокая технологичность детали с конструктивным фланцем, так как последний обеспечивает простое решение задачи уплотнения оснастки и предотвращения попадания воды между заготовкой и матрицей на конечном этапе формования. При штамповке деталей без конструктивного фланца приходится вводить фланец технологический, удаляемый после выполнения вытяжной операции. Этот вынужденный прием имеет два отрицательных фактора: снижается коэффициент использования материала и повышается утонение, поскольку использование заготовки больших размеров, чем этого требуют размеры детали, приводит к повышению растягивающих напряжений.

Таким образом, исходя из влияния особенностей ЭГ штамповки на технологичность деталей при оценке конструктивно геометрических форм детали следует особо учитывать следующее:

отношение толщины заготовки к минимальной кривизне поверхности детали, исключая перетяжной радиус, как характеристику, влияющую на требуемую нагрузку, для операций вытяжки, раздачи и рельефной формовки;

наличие конструктивного фланца при вытяжке и цилиндрического пояса у торца детали при раздаче, как факторов, определяющих коэффициент использования материала и влияющих на утонение;

отношение толщины заготовки с учетом характеристик материала к размерам окна матрицы при вытяжке, как характеристику жесткости заготовки, влияющую на возможность штамповки без вакуумирования, применения «спутников» или принятия других мер для устранения потери устойчивости детали под действием обратного импульса давления;

отношение минимального внутреннего радиуса контура детали к толщине при пробивке и вырубке, как характеристику, определяющую возможность обеспечения качественного среза по всему контуру детали;

отношение минимального размера между противоположными линиями контура пробиваемого отверстия и противополо-

жными линиями контура впадин в вырубке детали к толщине, как характеристику, влияющую на требуемую нагрузку;

соотношение размеров одновременно пробиваемых отверстий, размеров сопрягаемых фигур отверстий сложных форм, а также соотношение размеров впадин в контуре детали при вырубке, как характеристику, оказывающую влияние на требуемую нагрузку;

отношение высоты бурта к толщине заготовки и соотношения максимального и минимального радиусов отбортованного отверстия в плане при выполнении отбортовки, как характеристику, влияющую на возможность совмещения операции пробивки и отбортовки.

3. УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВЫТЯЖКЕ

Устойчивость заготовки при листовой вытяжке — одно из основных условий получения качественной детали. Листовая заготовка малой толщины при вытяжке может получить четыре типа потери устойчивости [33]: волнистость (образование складок), сосредоточенное утонение, полосы скольжения и вторичные полосы скольжения. Проявление того или иного типа потери устойчивости зависит от напряженного состояния, скорости деформирования, анизотропии, механических свойств материала и других факторов.

Причиной первого типа потери устойчивости, волнистости и образования складок является сжатие, причиной остальных видов потери устойчивости — растягивающие напряжения. При вытяжке на разных участках заготовка имеет различное напряженное состояние, причем величины сжимающих и растягивающих напряжений взаимосвязаны. Потеря устойчивости наиболее вероятна при получении деталей из тонких заготовок с использованием локального нагружения. В этом отношении наиболее характерен процесс вытяжки часто встречающихся куполообразных деталей со сферическим, эллиптическим дном или деталей в виде усеченного конуса с большой разностью диаметров.

В процессе вытяжки (рис. 30) тонколистовая заготовка 3, уложенная в трафарентное кольцо 4, зажимается между прижимным кольцом 2 и матрицей 5 и вытягивается пуансоном 1 или жидкостью в матрицу. При вытяжке зажатой оказывается только часть заготовки в виде кольца, остальная часть остается свободной. Чем больше свободная поверхность заготовки (между пуансоном и матрицей), тем больше вероятность потери устойчивости за счет сжимающих напряжений на

данном участке с образованием складок. Это особенно опасно при начальной стадии вытяжки, когда через пуансон к заготовке прикладывается усилие, сосредоточенное в центре. Для предотвращения образования складок прибегают к увеличению радиальных растягивающих напряжений, что достигается увеличением трения между прижимом и фланцем заготовки за счет увеличения усилия прижима, использованием тормозных ребер или применением обратного (реверсивного) способа вытяжки. Увеличение трения между прижимом и фланцем сопровождается увеличением деформирующего усилия и соответственно растягивающих напряжений в опасном сечении заготовки, что может привести к появлению сосредоточенного утонения, полос скольжения, вторичных полос скольжения, т. е. к другим видам потери устойчивости. В лучших условиях находится заготовка при вытяжке жидкой или эластичной средой, которая распределяет деформирующее усилие равномерно по всей неподкрепленной части заготовки.

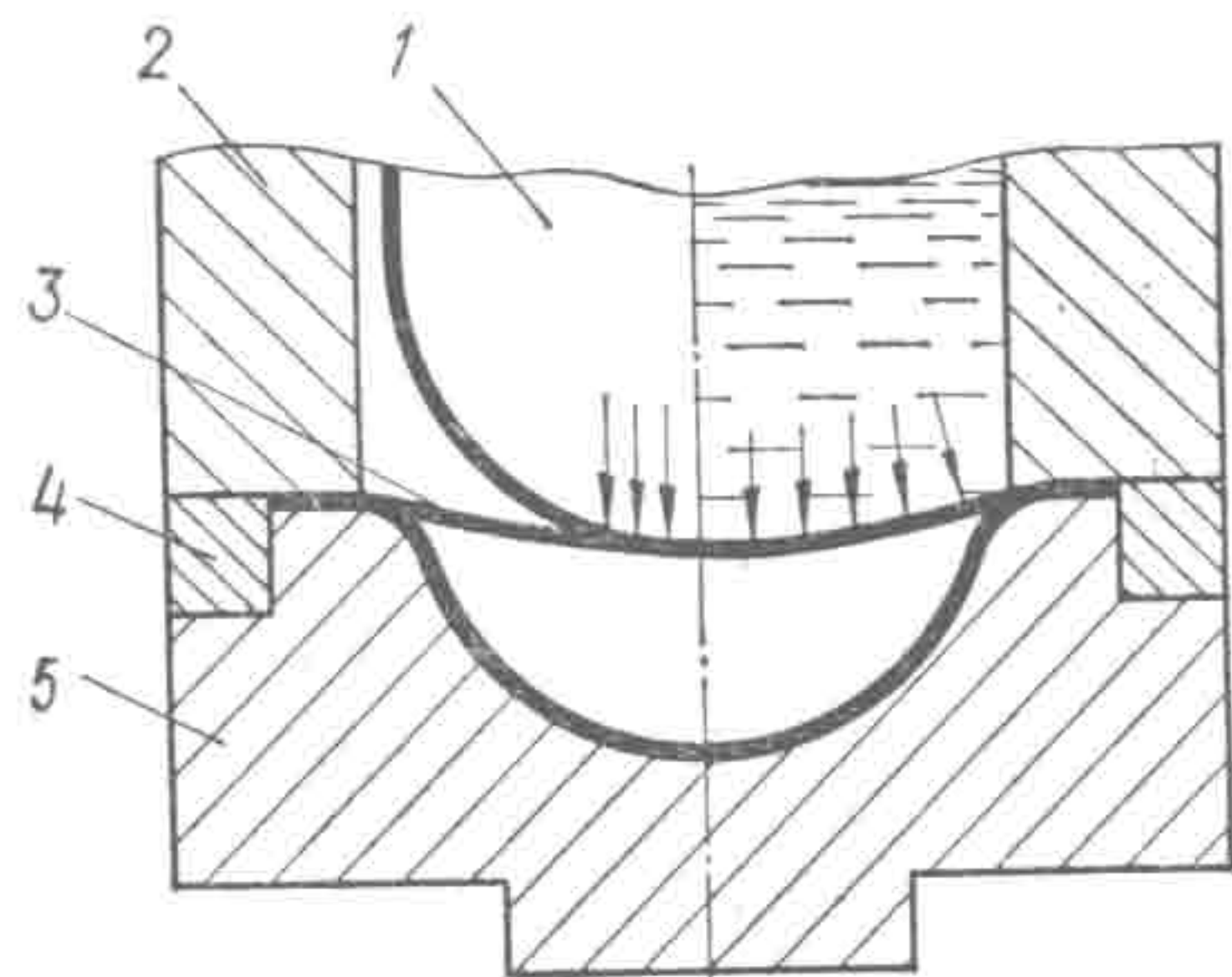


Рис. 30. Схема вытяжки деталей со сферическим дном.

Устойчивость заготовки может быть рассмотрена с использованием энергетического метода [86], согласно которому устойчивое состояние заготовки характеризуется условием $U \geq A$, где U — работа внутренних сил, препятствующих потере устойчивости; A — работа внешних сил на контуре элемента.

Решая совместно уравнения для работы внешних и внутренних сил, Е. Н. Мошнин [86] показал, что исходя из критического напряжения устойчивости можно найти предельное значение относительной толщины заготовки при вытяжке пуансоном деталей со сферическим дном

$$\left(\frac{S}{D_3}\right)_{\text{пр}} = 0,11 \sqrt{\frac{S}{R_{\text{сф}}}}, \quad (2.2)$$

где $R_{\text{сф}}$ — радиус сферы дна.

Определение предельных размеров заготовки для вытяжки сферических днищ при минимальном усилии прижима, достаточном для удержания складкообразования фланца, $q_0 = 0,01\sigma_T$, можно проводить по более простой зависимости

$$\frac{S}{D_{3,\text{пр}}} \cdot 100 \geq 0,57. \quad (2.3)$$

Если увеличить усилие прижима до $0,02\sigma_T$, то относительную толщину заготовки можно уменьшать, при этом утонение, хотя оно и увеличивается, не будет превышать допустимую величину 15 % [86]. В этом случае для сферических днищ

$$\frac{S}{D_{3,\text{пр}}} \cdot 100 \geq 0,485. \quad (2.4)$$

В. П. Романовский [100] указывал, что при вытяжке полусфер с $\frac{S}{D} \cdot 100 < 0,5$ необходимо применять матрицы с вытяжными ребрами или проводить вытяжку с выворачиванием.

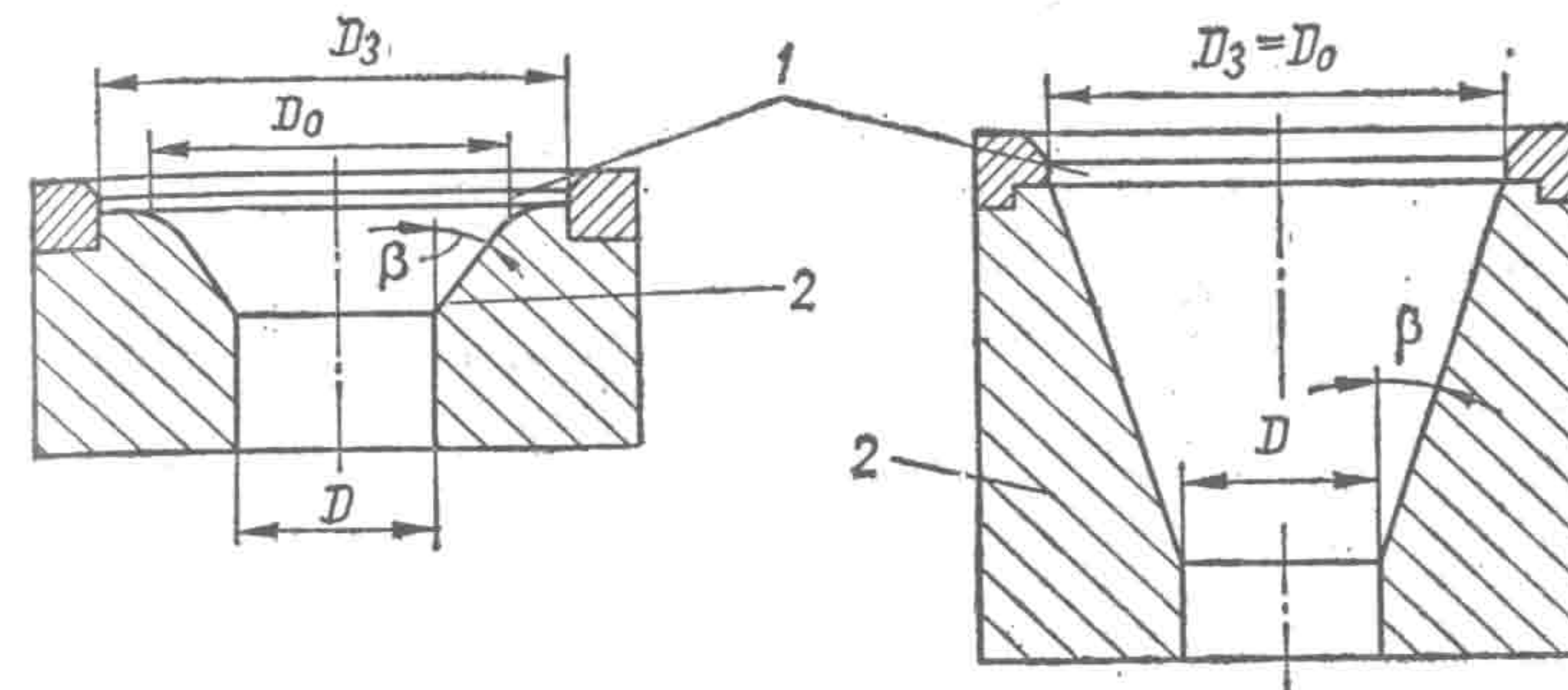


Рис. 31. Матрицы с конусным заходом.

Таким образом, можно считать, что предельно допустимая относительная толщина заготовки при вытяжке полусферических днищ с плоским прижимом равна 0,45—0,50 %.

При больших относительных толщинах и малых степенях деформации устойчивость заготовки может быть обеспечена и без прижима фланца. Теоретически и экспериментально установлены условия вытяжки пуансоном деталей со сферическим дном без прижима [33]:

$$\frac{S}{D} \geq \frac{k - 1,09}{1,05k \left(5,5 + \frac{R_M}{S}\right)}, \quad (2.5)$$

где k — коэффициент вытяжки, $k = \frac{D_3}{D}$.

Для расширения возможностей вытяжки деталей без прижима прибегают к использованию матриц специальной конструкции, например с конусным заходом [124, 139]. В таких матрицах (рис. 31) заготовка укладывается в гнездо 1 и в начале вытяжки скользит по конусному заходу 2. В конце вытяжки заготовка оформляется по пуансону или по полости матрицы. Применение матриц с конусным заходом дает возможность повысить степень деформации с $\epsilon_0 = 0,10—0,32$ до

$\epsilon_\gamma = 0,27—0,50$, т. е. в 1,5—4,0 раза, а коэффициент вытяжки $k = 1,11—1,47$ до $k_\gamma = 1,37—2,00$, т. е. в 1,2—1,5 раза. Чем больше величина конусного захода, характеризуемого отношением его диаметров $\gamma = \frac{D_0}{D}$ и углом $\beta = 15—30^\circ$, тем больше достижимая степень деформации и коэффициент вытяжки. Так, при $\gamma = 1,25$ степень деформации повышается в 1,5—2,7 раза, а коэффициент вытяжки в 1,2—1,3 раза, а при

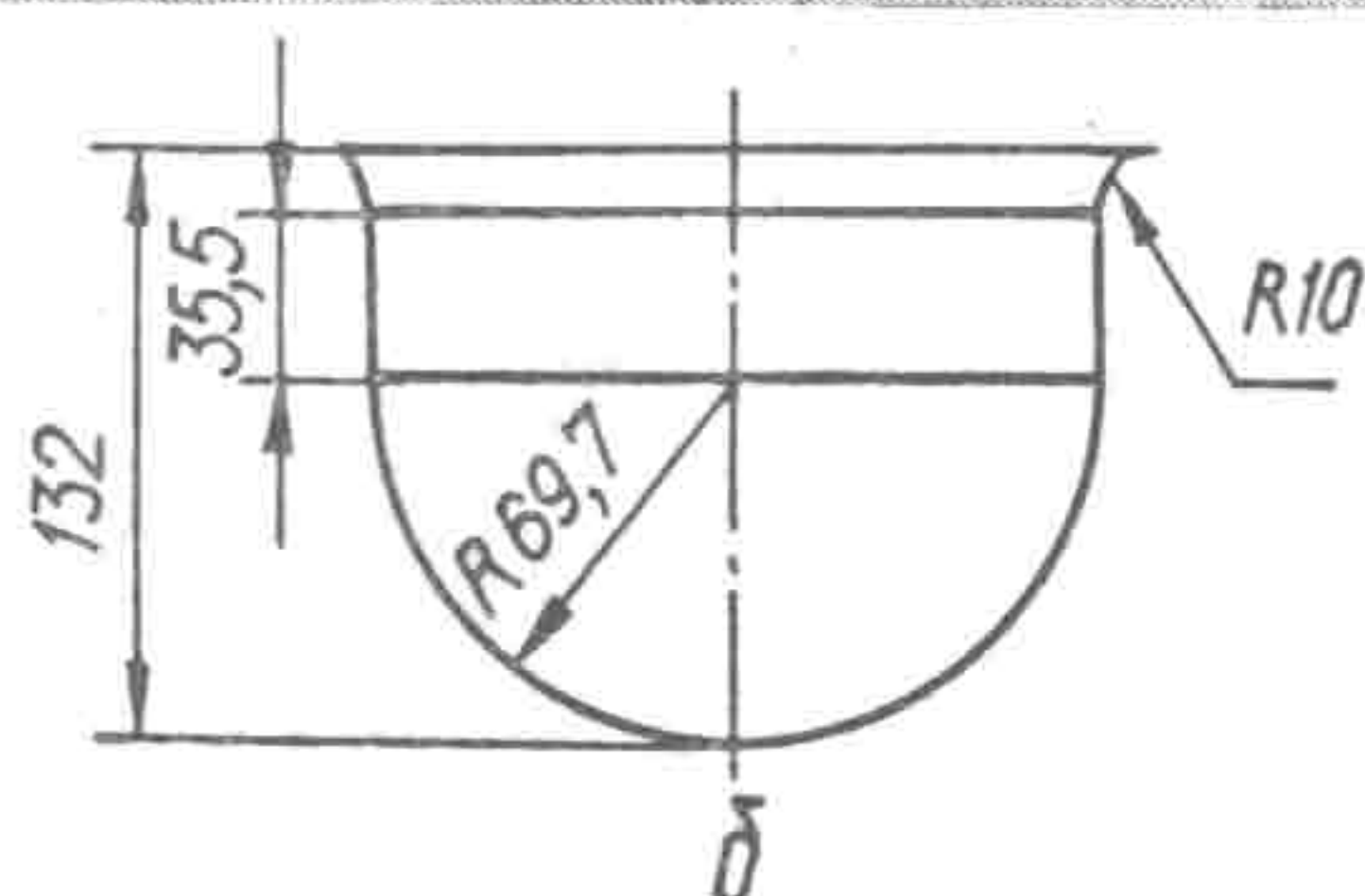
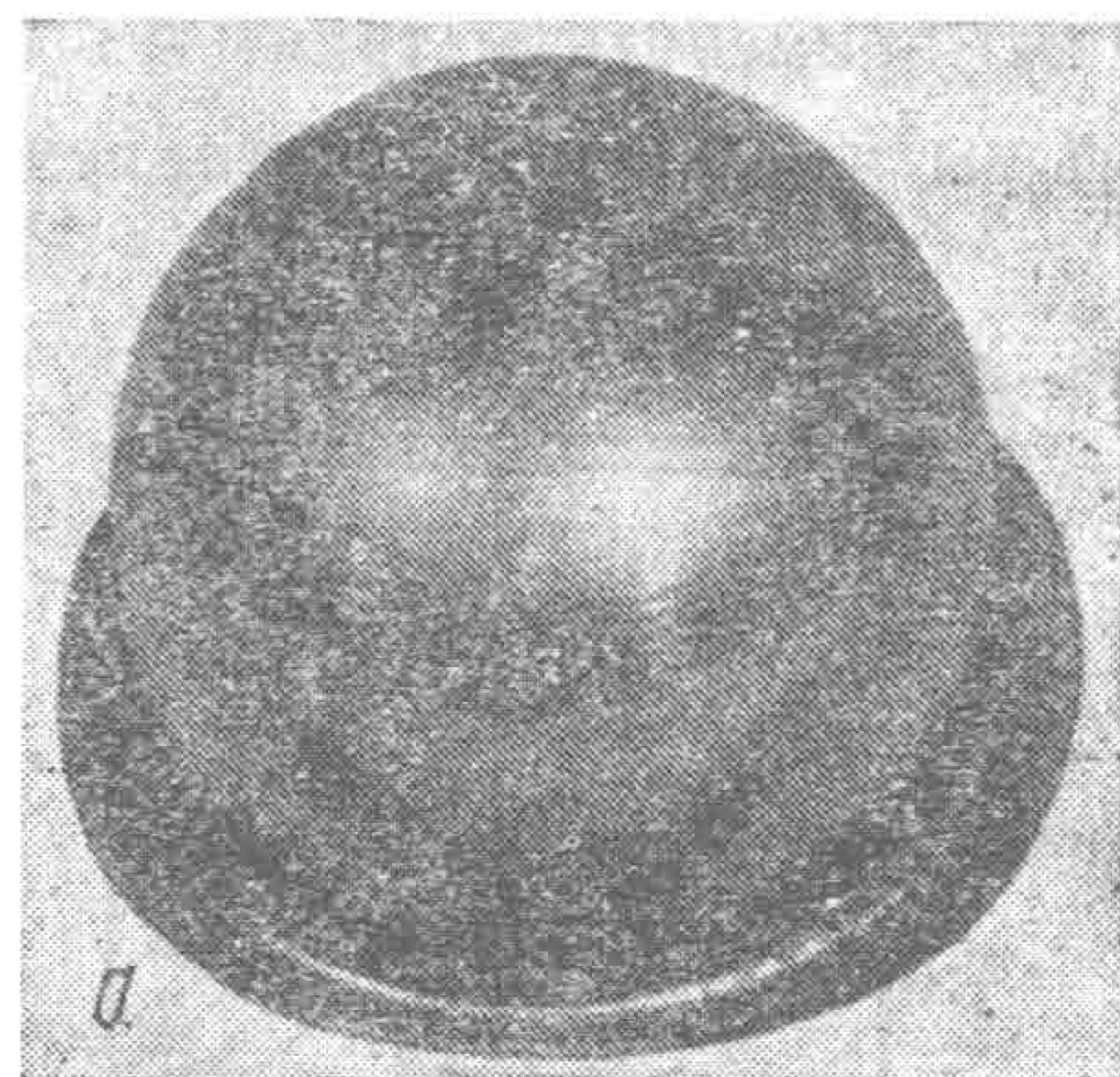


Рис. 32. Цилиндрическая деталь со сферическим дном, вытянутая с конусным прижимом:
а — образец; б — эскиз.

жима может быть осуществлена при деформировании через диафрагму или при штамповке метанием заготовки. В основном вытяжка осуществляется с прижимом, а матрицы с конусным заходом используются для увеличения степени вытяжки за счет предварительного деформирования заготовки конусным прижимом. Угол конуса β принимается равным 75° . Заготовка в этом случае предварительно деформируется в процессе прижима, дальнейшая вытяжка также облегчена из-за увеличения угла перетяжки с 90 до 105° , что позволяет достичь более высоких степеней деформации. Применение такого конусного прижима позволило получить на ЭГ прессе

$\gamma = 1,5$ — соответственно 2,0—4,0 и 1,5 раза [124].

В электрогидроимпульсной штамповке вытяжка без при-

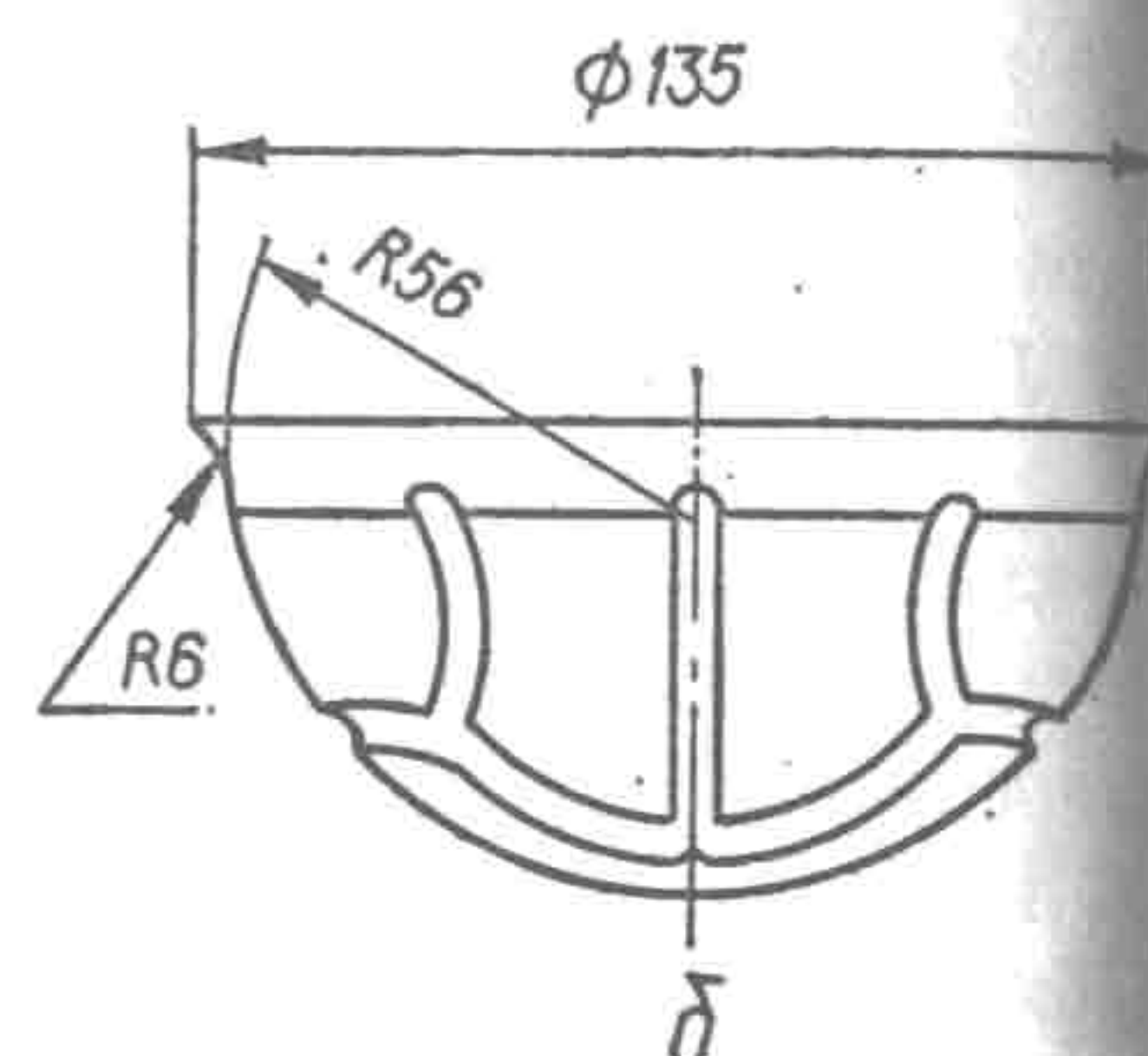
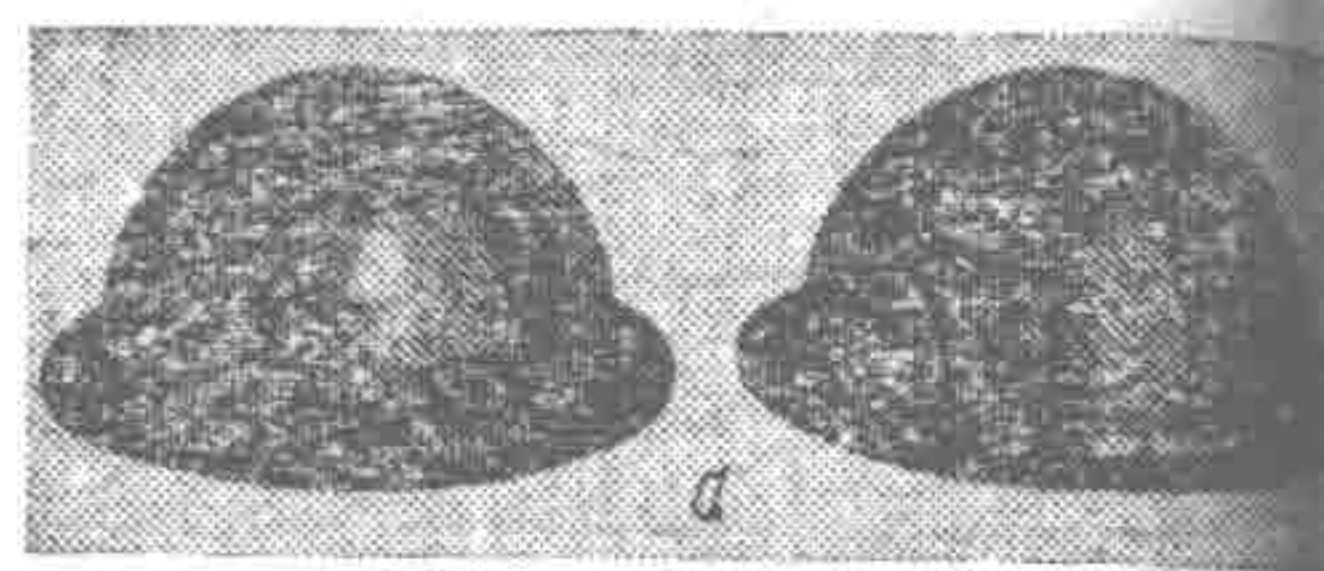


Рис. 33. Деталь сувенира «футбол»:
а — образец; б — эскиз.

«Удар-12М» цилиндрическую деталь со сферическим дном из стали X18H10T с относительной толщиной 0,45 % за один переход без промежуточных отжигов с коэффициентом вытяжки 1,91 (рис. 32).

Вытяжка с плоским прижимом на ЭГ прессах позволяет штамповать заготовки без потери устойчивости с меньшей относительной толщиной, чем в штампе. Так, за одну операцию без специальных конструктивных мероприятий и промежуточных отжигов вытягивалась деталь для сувенира «футбол» (рис. 33) при коэффициенте вытяжки 1,69 и относительной толщине заготовки 0,42 %, что в три раза меньше расчетной — при вытяжке пуансоном по зависимости (2.2) и в 1,1—1,2 раза меньше предельной — при вытяжке с большим усилием при-

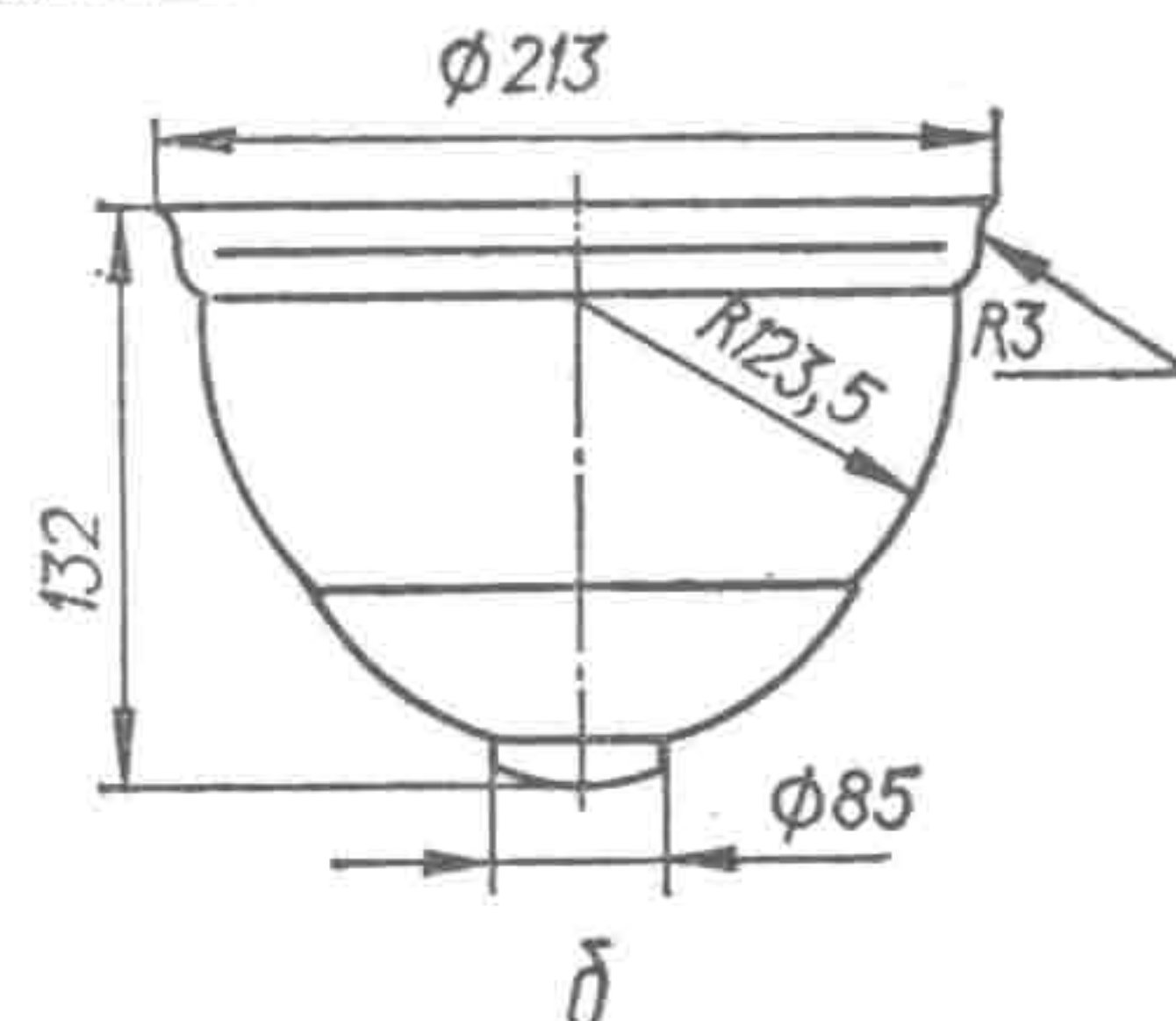
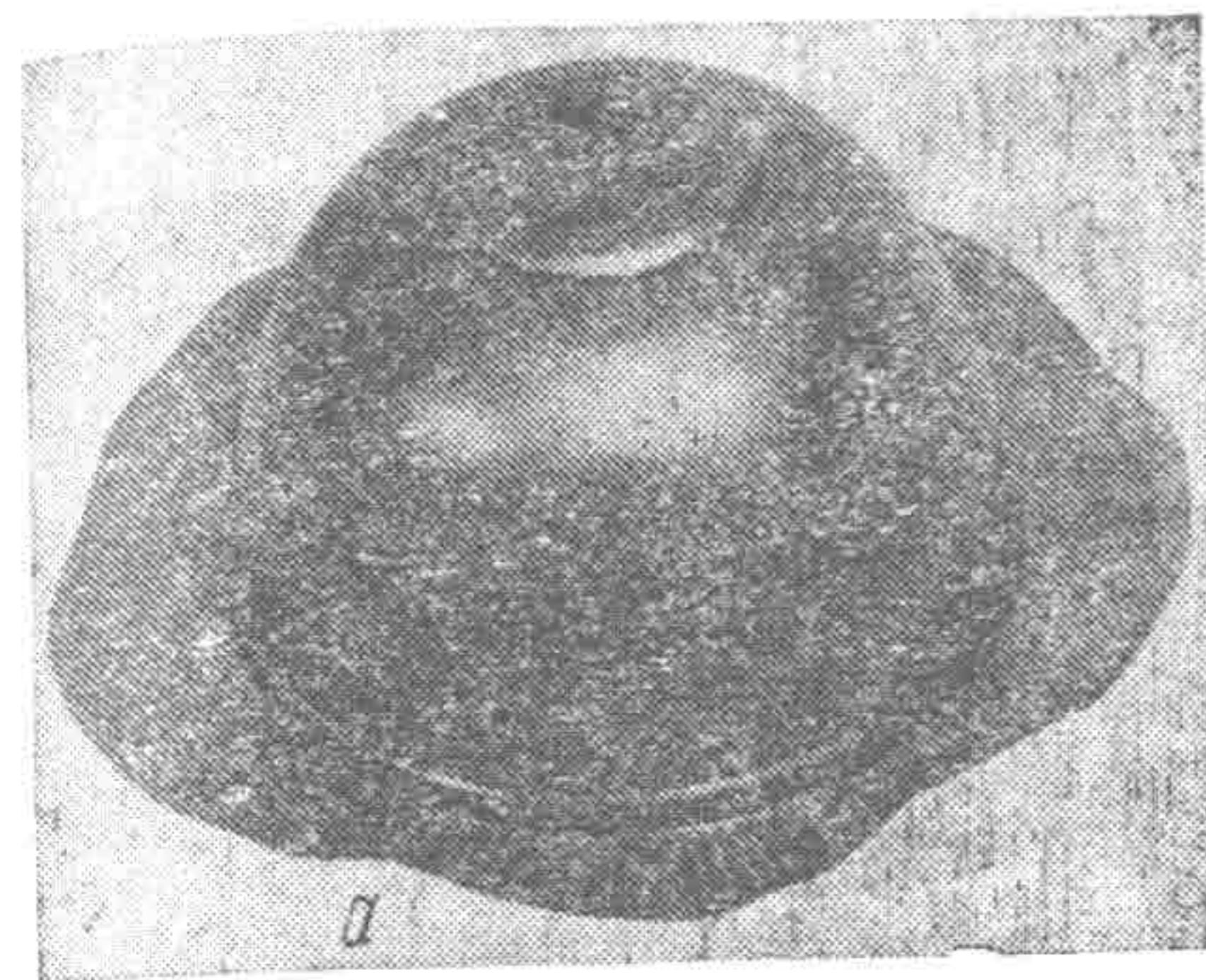


Рис. 34. Деталь «корпус чайника»:
а — образец; б — эскиз.

На ЭГ прессе T1223 вытяжкой получено сферическое днище диаметром 440 мм при относительной толщине 0,23 %, что в 4,15 раза меньше расчетной при коэффициенте вытяжки $k = 1,55$ за одну операцию (см. рис. 22) и в 1,9—2,2 раза меньше предельной.

Особый интерес представляют результаты вытяжки детали «корпус чайника» (рис. 34) и цилиндрического днища (рис. 35) на ЭГ прессе T1220. Коэффициенты вытяжки соответственно равны 1,78 и 1,38, а относительные толщины — 0,31 и 0,33 %, что в 4,2 и 2,5 раза меньше расчетной для вытяжки пуансоном и в 2,06—2,38 и 1,38—1,51 раза меньше предельно допустимой.

При ЭГ штамповке прижим может осуществляться за счет применения неподвижной прижимной плиты, зафиксирован-

ных отжигов вытягивалась деталь для сувенира «футбол» (рис. 33) при коэффициенте вытяжки 1,69 и относительной толщине заготовки 0,42 %, что в три раза меньше расчетной — при вытяжке пуансоном по зависимости (2.2) и в 1,1—1,2 раза меньше предельной — при вытяжке с большим усилием при-

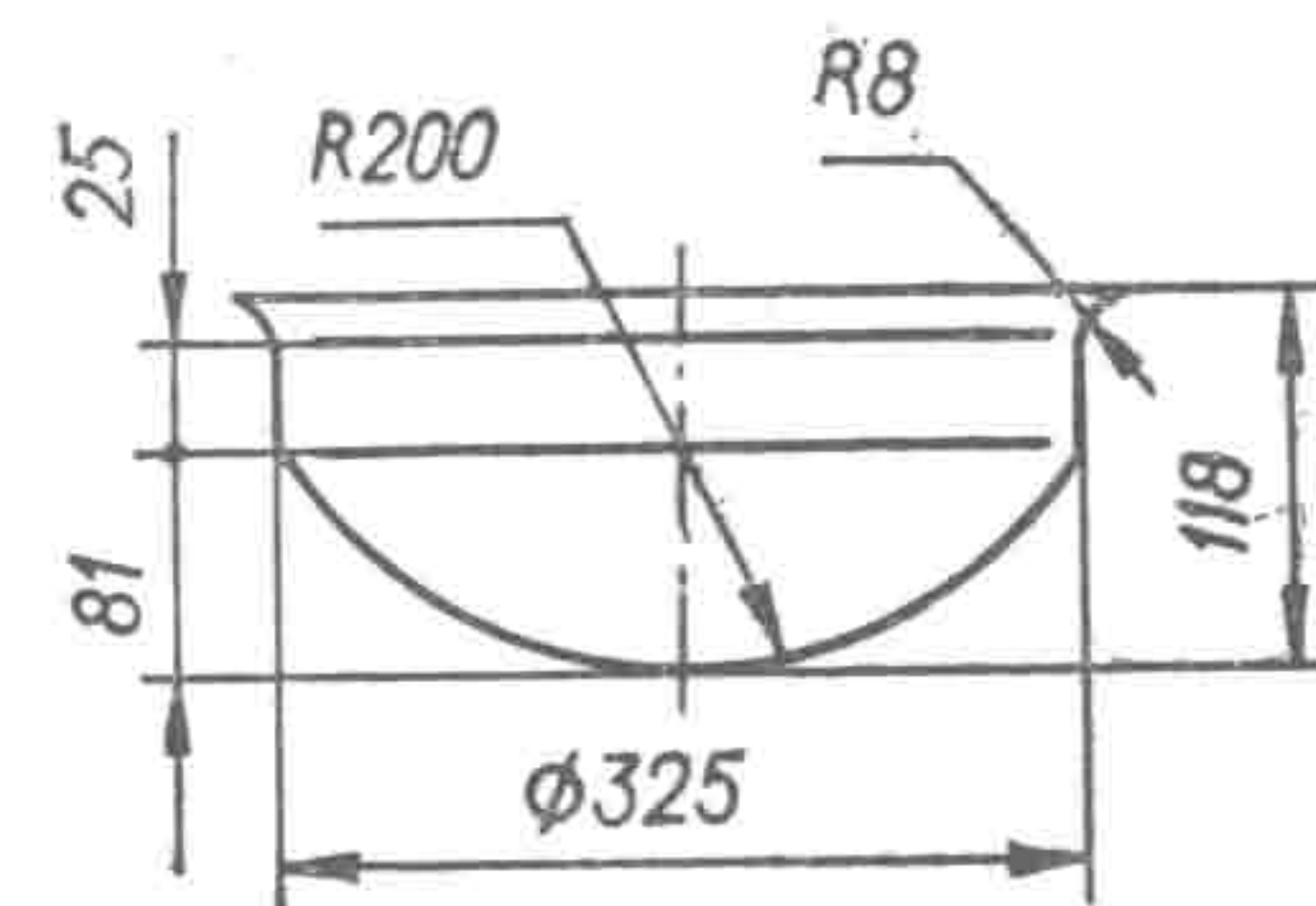


Рис. 35. Цилиндрическое днище.

Таблица 9. Данные о деталях со сферическим дном, полученных вытяжкой на ЭГ прессах

Толщина S, мм	Диаметр D _з , мм	Материал	Относительная толщина $\frac{S}{D_3} \cdot 100 \%$	Допустимая расчетная толщина $\frac{S}{D_3} \cdot 100 \%$ расч	Предельная относительная толщина на $\frac{S}{D_3} \cdot 100 \%$	Отношение $\left(\frac{S}{D_3}\right)_{расч} / \frac{S}{D_3}$	Отношение $\left(\frac{S}{D_3}\right)_{пр} / \frac{S}{D_3}$	Коэффициент вытяжки $\frac{D_3}{d}$	Пресс	Вид прижима	Штампуемая деталь
1,5	650	X18H9T	0,23	0,91	0,455—0,5	3,95	1,98—2,17	1,69	T1223	Прижим на заготовку	Рис. 22 Рис. 33, б Рис. 34, б
0,8	189	Сталь 10кп	0,42	1,29	0,455—0,5	3,08	1,08—1,18	1,69	Удар 20	То же	
0,8	380	X18H10T	0,31	0,89	0,455—0,5	4,23	2,06—2,38	1,78	T1220	Фиксированный зазор 0,95 мм	Рис. 35
1,5	450	Ст.3	0,33	0,82	0,44—0,5	2,50	1,38—1,51	1,38	T1220	Прижим на заготовку	

ной в период деформирования на постоянном расстоянии, несколько большем толщины исходной заготовки, обычно в 1,1—1,2 раза [103, 104], или за счет эластичного прижима с регулируемым усилием привода. Величина гарантированного зазора принимается минимальной при конструктивном фланце и приближается к максимальному значению при удаляемом технологическом фланце. При необходимости в каждом конкретном случае значение зазора уточняется экспериментально за счет регулировки высоты трафарета (см. рис. 30) с целью обеспечения требуемого качества штампуемых деталей.

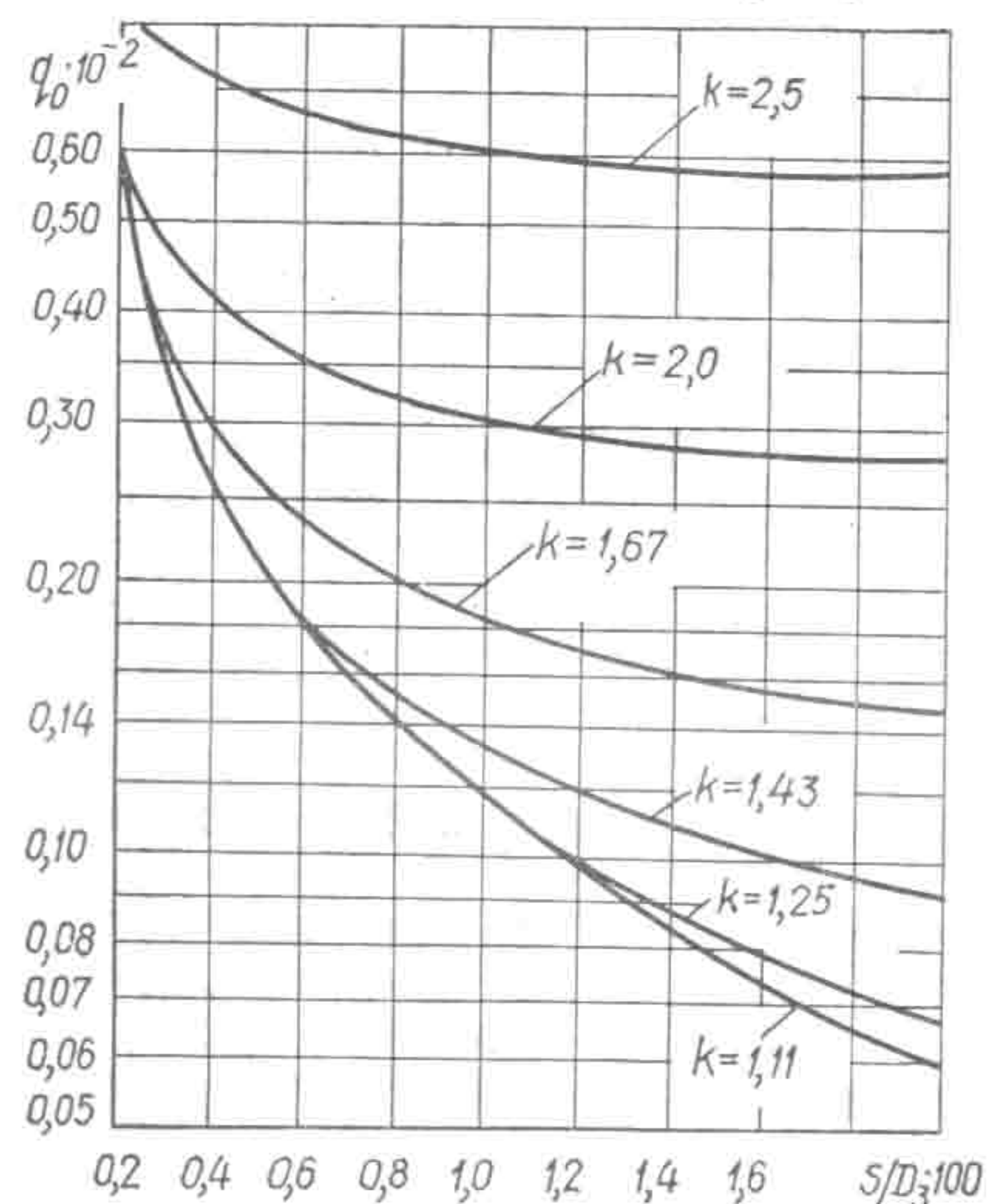


Рис. 36. Зависимость удельного усилия прижима от относительной толщины заготовки для материала с единичным пределом прочности.

При возможности регулировки усилия прижима величина его может быть рассчитана исходя из удельного усилия прижима. Если приведенную Г. Д. Скворцовым [102] формулу преобразовать так, чтобы удельное усилие прижима зависело от относительной толщины заготовки и коэффициента вытяжки, то она примет вид

$$q = 0,0025 \left[(k - 1)^2 + \frac{1}{2k \frac{S}{D_3} \cdot 100} \right] \sigma_B. \quad (2.6)$$

Значения удельных усилий для каждого конкретного случая могут быть рассчитаны по выражению $q = q_0 \sigma_B$, где q_0 — удельное усилие прижима для материала с единичным пределом прочности; может быть определено из графика, приведенного на рис. 36.

Основываясь на результатах вытяжки на ЭГ прессах полусферических и близких к ним по форме днищ можно сделать вывод, что ЭГ штамповка позволяет вытягивать куполообразные детали без применения перетяжных порогов использования штамповки с выворачиванием, двухпереходную штамповку и других специальных методов [77, 94, 100] с относительной толщиной заготовки в два — четыре раза меньше (табл. 9), чем допускается при вытяжке пуансоном. Если расчет предельной относительной толщины заготовки проводится с использованием зависимости, выведенной Е. Н. Мошным для вытяжки пуансоном, то применительно к ЭГ вытяжке коэффициент в зависимости (2.2) может быть уменьшен в четыре раза:

$$\left(\frac{S}{D_3}\right)_{пр} = 0,027 \sqrt{\frac{S}{R_{сф}}}. \quad (2.7)$$

Учитывая, что условия устойчивости заготовки при формовке осесимметричных элементов несферической формы примерно подобны условиям устойчивости заготовки при формовке сферических элементов [86], полученные результаты можно распространить и на вытяжку эллиптических, неглубоких конических и других близких к ним по форме деталей. Исследования показали, что при ЭГ вытяжке увеличение радиуса перетяжного ребра матрицы положительно сказывается до величины $R_m = 10S$. Вместе с тем в практике встречаются детали, у которых переход от поверхности вытягиваемой части

к фланцу конструктивно задан со значительно большими радиусами. Например, в посудном производстве при вытяжке изделий с фланцем применяются радиусы закруглений матрицы 30—40S [100] и более. В связи с тем, что ЭГ вытяжка осуществляется с фланцем, который в конце вытяжки не выдвигается из-под прижима, то увеличение перетяжного радиуса, как правило, не приводит к образованию гофров в конце вытяжки. Однако эксперименты по ЭГ вытяжке с большими радиусами закругления показали, что при радиусах порядка 40—60S на перетяжном ребре могут образовываться складки, поэтому необходимо применять специальные меры, например использовать многослойную вытяжку или штамповку в два перехода.

4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

Целесообразность применения электрогидроимпульсной штамповки определяется экономической эффективностью рассматриваемой технологии в сравнении с другими вариантами реально осуществимых технологических процессов в конкретных производственных условиях с учетом сроков подготовки производства.

В настоящее время расчеты экономической эффективности проводятся по «Методике (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений», утвержденной постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике Госпланом СССР, Академией наук СССР и Государственным комитетом по делам изобретений и открытий от 14 февраля 1977 г.. Данная методика устанавливает единые методические принципы определения экономической эффективности как для технико-экономического обоснования выбора наилучших вариантов создания и внедрения новой техники, так и при расчете фактического экономического эффекта.

Определение годового экономического эффекта основывается на сопоставлении приведенных затрат базовой и новой техники. Приведенные затраты представляют собой сумму себестоимости и нормативной прибыли $Z = C + E_n K$, где Z — приведенные затраты на единицу продукции (работы), руб.; C — себестоимость единицы продукции (работы), руб.; K — удельные капитальные вложения в производственные фонды, руб.; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

При определении годового экономического эффекта должна быть обеспечена сопоставимость вариантов новой и базовой техники по объему производимой с помощью новой техники продукции (работы); качественным параметрам; фактору времени; социальным факторам производства и использования продукции, включая влияние на окружающую среду.

На основании общесоюзной методики разработаны отраслевые, причем в названиях методик некоторых министерств (например, Министерства целлюлозно-бумажной промышленности СССР, Министерства строительного дорожного и коммунального машиностроения СССР) дополнительно к новой технике, изобретениям и рацпредложениям указывается и технология.

Штамповка, как правило, — только составная часть всего процесса изготовления детали в целом. Изменение технологии и оборудования на одном составном этапе технологии может менять затраты как в предыдущих технологических процессах, связанных с изготовлением заготовок для операции деформирования, так и на последующих операциях, поэтому затраты рассматриваются на всех этапах технологии изготовления изделия, на которые влияет внедрение ЭГ штамповки. Например, при повышении точности формы и размеров детали с внедрением ЭГ штамповки необходимо учитывать затраты не только на изготовление детали, но и на сборку изделий, в которых используются эти детали, так как сокращение трудоемкости подгоночно-регулирующих работ может оказаться более значительным или даже главным фактором, определяющим целесообразность внедрения новой технологии изготовления детали.

Изменение качества деталей может повлиять и на процесс сборки изделия, и на его эксплуатационные показатели, поэтому следует рассматривать сравнительные варианты технологии и с точки зрения эксплуатационных показателей изделия. Для проведения расчетов необходимы достаточные данные о технических возможностях технологий и затратах по сравниваемым вариантам применительно к конкретной номенклатуре, оснащенности производства и программе. Естественно, что без проведения расчетов трудно определить целесообразность внедрения ЭГ штамповки, как и любого другого процесса, однако, основываясь на технических возможностях, опыте внедрения ЭГ прессов и исследованиях, можно проводить ориентировочные прогнозы в отношении конкретных условий производства.

Сложилось мнение, что ЭГ штамповка экономически целесообразна при изготовлении деталей небольшими партиями — до 100 штук. При программах от 100 до 1000 штук затраты сравнимы со штамповкой на механических прессах, но они меньше штамповки взрывом [88]. Эти данные распространяют-

ся на процессы штамповки с применением универсальных ЭГ прессов, поэтому целесообразной областью применения этих прессов является опытное и мелкосерийное производство. Экономия по сравнению со штамповкой на механических или гидравлических прессах определяется сокращением затрат на оснастку, несмотря на меньшую производительность этого способа.

Опыт внедрения прессов Т1220 и Т1223 показал, что стоимость оснастки для них может быть в три — пять раз меньше по сравнению со штампами. Однако следует иметь в виду, что если на предприятии имеется недогруженное оборудование, например прессы двойного действия, на котором можно также освоить штамповку рассматриваемых деталей, то приобретение ЭГ пресса может быть оправдано только при большой номенклатуре, порядка 20—30 наименований, так как все затраты на приобретение ЭГ пресса и его внедрение должны быть перекрыты разницей в стоимости оснастки.

Целесообразно внедрение универсальных ЭГ прессов на предприятиях с частой сменой номенклатуры, требующей изготовления опытных образцов для испытаний перед запуском в основное производство. В этом случае ЭГ штамповка позволяет значительно сокращать сроки изготовления опытных образцов.

Универсальные ЭГ прессы могут быть использованы и при замене технологий с преобладающим ручным трудом и малой стоимостью оборудования и оснастки, таких как давящие операции или ручная выколотка. Использование ЭГ штамповки зачастую помогает решать проблему, вызванную недостатком высококвалифицированных рабочих кадров. Однако вводом в процесс более дорогостоящего оборудования не всегда удается снижением трудоемкости, даже в несколько раз перекрыть рост капитальных затрат. Расчет экономической эффективности в сравнении с такими процессами — не в пользу ЭГ штамповки. В случаях, когда конкретные условия производства не позволяют далее использовать технологии с тяжелым ручным трудом в силу острой кадровой проблемы или из-за необходимости существенного повышения качества изделий, экономическую целесообразность ЭГ штамповки, по всей видимости, необходимо оценивать, принимая для сравнения другую технологию, также предусматривающую механизацию труда, например внедрение штамповки с использованием гидравлических прессов, давящего оборудования с программным управлением, формовку резиной или полиуретаном на механических прессах и т. п. Последнее обстоятельство (возможность формовки резиной или полиуретаном) необходимо учитывать при оценке целесообразности ЭГ штамповки во

всех случаях. Эти технологии сокращают расходы на оснастку в такой же степени, как и ЭГ штамповка, и зачастую оказываются более экономичными. Вместе с тем возможности штамповки резиной и полиуретаном ограничиваются их допустимой степенью деформации, кроме того, резина имеет относительно небольшую прочность и допускает невысокие удельные давления.

Иногда универсальные ЭГ прессы позволяют значительно сокращать трудоемкость и расход металла при переходе от токарной обработки к штамповке. Расчеты, проводимые при внедрении ЭГ прессов, показали, что экономический эффект колеблется в зависимости от размеров оборудования и его назначения. Например, внедрение универсальных прессов с энергией 10 и 20 кДж дает экономический эффект 10—20, иногда свыше 30 тыс. руб. в год, а использование прессы «Удар-11» с энергией 150 кДж для изготовления деталей типа днищ позволило экономить до 252 тыс. руб. в год [88].

Более эффективными являются процессы с использованием специализированного или специального оборудования. Например, внедренный пресс Т1226 с энергией в импульсе до 40 кДж для штамповки корпусов самоваров дает по расчетным данным экономию свыше 100 тыс. руб. в год, пресс «Удар-16К» с энергией в импульсе 80 кДж — до нескольких сот тысяч рублей в год. А оценка экономической целесообразности создания специальной ЭГ установки с энергией в импульсе 80—100 кДж для штамповки кожухов картеров ведущих мостов грузовых автомобилей, проведенная после штамповки натуральных образцов этих деталей в лабораторных условиях, показала, что эффект может составить 500 тыс. руб. и больше в год.

5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ

В настоящее время накоплен значительный положительный опыт применения технологии электрогидроимпульсной листовой штамповки в мелкосерийном и опытном производстве на базе созданных универсальных прессов [2, 41, 81, 89]. Опытное и мелкосерийное производство — главная область использования электрогидроимпульсной штамповки в настоящее время и, по всей видимости, останется в числе основных и в будущем. Такие тенденции развития современного производства, как необходимость удовлетворять растущие требования по сокращению сроков освоения выпуска новой техники, а также сокращение сроков обновления продукции, постоянно расширяют задачи в области мелкосерийной и опытной штамповки. Часть этих задач, как показывает

опыт, может быть эффективно решена с помощью электрогидроимпульсной штамповки с использованием универсальных ЭГ прессов. Развитие технологии ЭГ штамповки в опытном и мелкосерийном производстве направлено на расширение возможностей эксплуатируемого и выпускаемого в настоящее время оборудования за счет более полного использования особенностей электрогидроимпульсного нагружения. Большой резерв в этом направлении — расширение схем штамповки. Например, у нас в стране долгое время практически единственной оставалась основная схема, которая не предусматривает разгон жидкости или заготовки до начала деформирования. Эксперименты и практика показали, что использование схем штамповки метанием жидкости и метанием заготовки на универсальных ЭГ прессах позволяет значительно расширять их технологические возможности.

Не всегда полностью использовались и возможности основной схемы, такие как калибровка радиусов закруглений импульсным давлением жидкости на заготовку с одновременной осадкой ее по высоте, вытяжка из разнотолщинных заготовок, пробивка с одновременной отбортовкой кромок отверстия, штамповка с концентраторами силового поля и т. д. [23, 36, 101]. Проводимые исследования, связанные со штамповкой нагретых заготовок, например через диафрагму из фтористой резины типа ФКС [35], раздачей трубчатых заготовок с осевым поджатием, пробивкой отверстий в трубчатых заготовках малого диаметра путем введения внутрь трубы матрицы — вставки и воздействия на заготовку жидкостью снаружи и так далее, могут вскрыть дополнительные резервы в области технологии ЭГ штамповки. Практика проектирования и испытания оснастки при расширении номенклатуры типовых деталей, а также при проведении экспериментальных работ по освоению новых типов деталей, операций или новых схем штамповки показывает, что не всегда удается точно прогнозировать результаты процесса. Это связано с недостаточной изученностью особенностей и возможностей ЭГ штамповки и, как следствие, несовершенством, а для некоторых операций и схем штамповки — практически отсутствием инженерных методик расчета. Недостаточная надежность прогнозирования результатов расчетным путем приводит к необходимости дополнять оценку возможности штамповки детали ЭГ способом по «образцу и подобию», что не всегда возможно, особенно на предприятиях, начинающих осваивать этот процесс. Таким образом, одно из основных направлений в совершенствовании технологии — создание и совершенствование инженерных методик расчета технологических параметров процесса. Главным преимуществом электрогидроимпульсной техноло-

гии в опытном и мелкосерийном производстве является низкая стоимость оснастки по сравнению со стоимостью оснастки для механических и гидравлических прессов. Еще более снизив стоимость оснастки за счет унификации основных ее элементов для типовых операций и разработки групповых типовых чертежей, можно получить дополнительные преимущества для электрогидроимпульсной технологии штамповки. Предварительные исследования в этом направлении оснастки для серийных ЭГ прессов Т1220 и Т1223 показали, что можно унифицировать некоторые детали и сократить число их типовых размеров [71]. Затраты на оснастку можно снизить и повышая ее стойкость, главным образом за счет повышения стойкости неметаллических матриц. Обеспечение достаточной стойкости металлических матриц для ЭГ прессов в опытном и мелкосерийном производстве не представляет проблемы. Работы, проводимые в этом направлении, показывают, что здесь также имеются некоторые резервы, например облицовка рабочих поверхностей матриц листовым металлом. Прогресс в развитии технологии зависит от возможностей, эффективности и надежности создаваемого оборудования в соответствии с растущими потребностями современной техники и производства. В различных отраслях промышленности все чаще возникает необходимость в получении оболочек высокого класса точности.

Экспериментальная проверка разработанной в ПКБЭ АН УССР технологии электрогидроимпульсной калибровки показала целесообразность ее использования для изготовления оболочек диаметром 300—2000, высотой 500—1100 мм и толщиной 2,5—6 мм, основные размеры которых должны быть выполнены по четвертому классу точности [89, 119, 123, 128]. В настоящее время изготовлен и внедрен опытно-промышленный образец пресса «Удар-16К», предназначенный для калибровки оболочек диаметром до 600 и высотой до 1000 мм, который проходит опытно-промышленную проверку в производственных условиях. Электрогидроимпульсная калибровка — одно из наиболее перспективных направлений. Существует потребность в создании высокопроизводительных процессов для нанесения рельефа на боковой поверхности предварительно отформованных полых заготовок при производстве товаров народного потребления [81]. Первый образец специализированного пресса Т1226, созданного в ПКБЭ, также проходит в настоящее время опытно-промышленную проверку. Испытание пресса на формовке корпусов самоваров емкостью 4 л (рис. 37) показали, что пресс обеспечивает производительность до 120 дет./ч, что вполне приемлемо для крупносерийного производства. Одной из важных задач в автомобилестроении является штампование картеров ведущих мостов автомобилей

взамен использования литых. Исследования в этом направлении показали принципиальную возможность получения этих изделий электрогидроимпульсным способом штамповки сварных профилей П-образного сечения. Эксперименты по штамповке натуральных образцов кожухов картеров ведущего моста грузового автомобиля (рис. 38) позволили оценить технические данные специальной установки, которая может быть создана в ближайшее время. Площадь установки 129—150 м² (площадь используемого оборудования в существующей технологии, которое может быть заменено ЭГ установкой, более

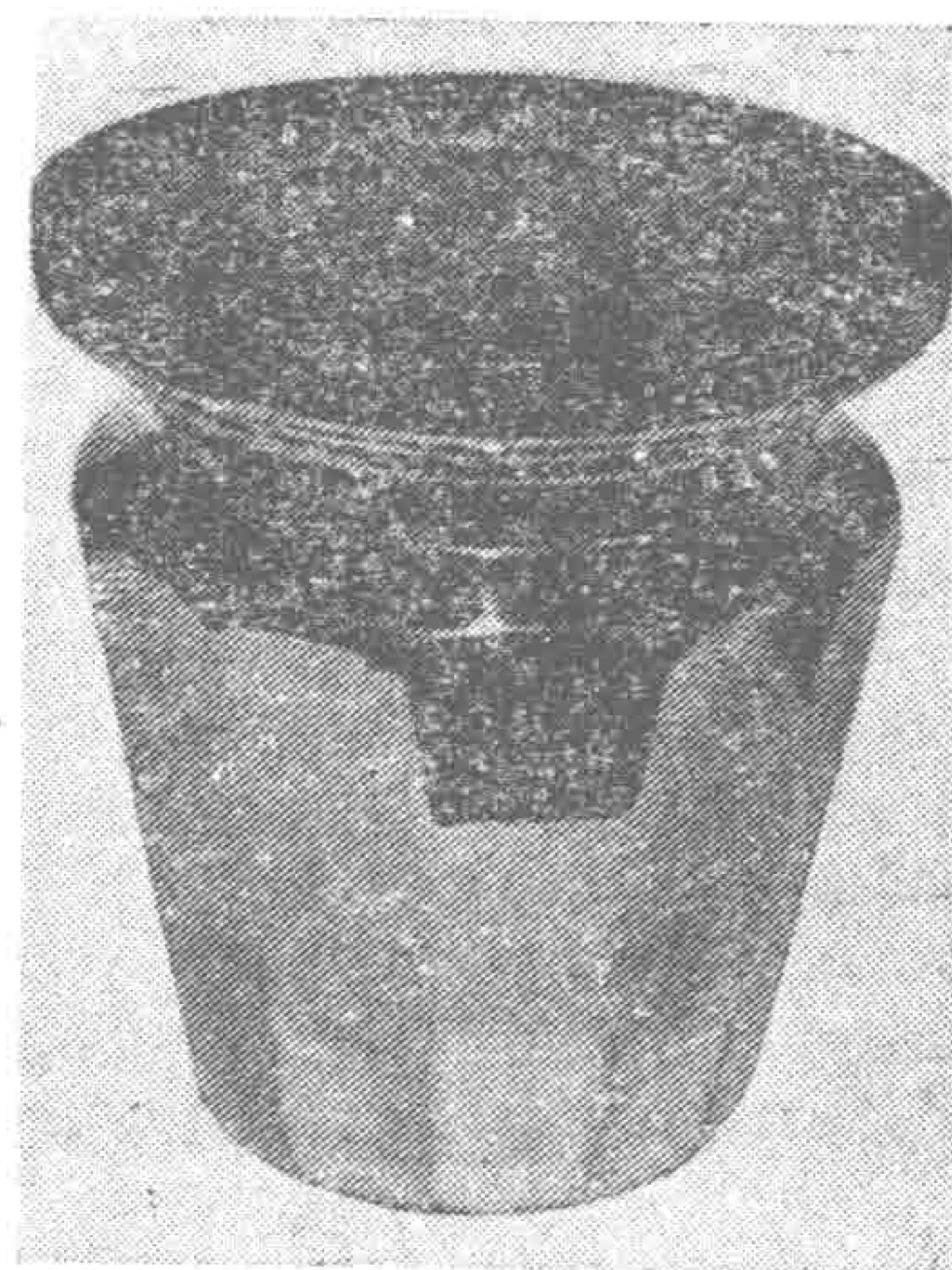
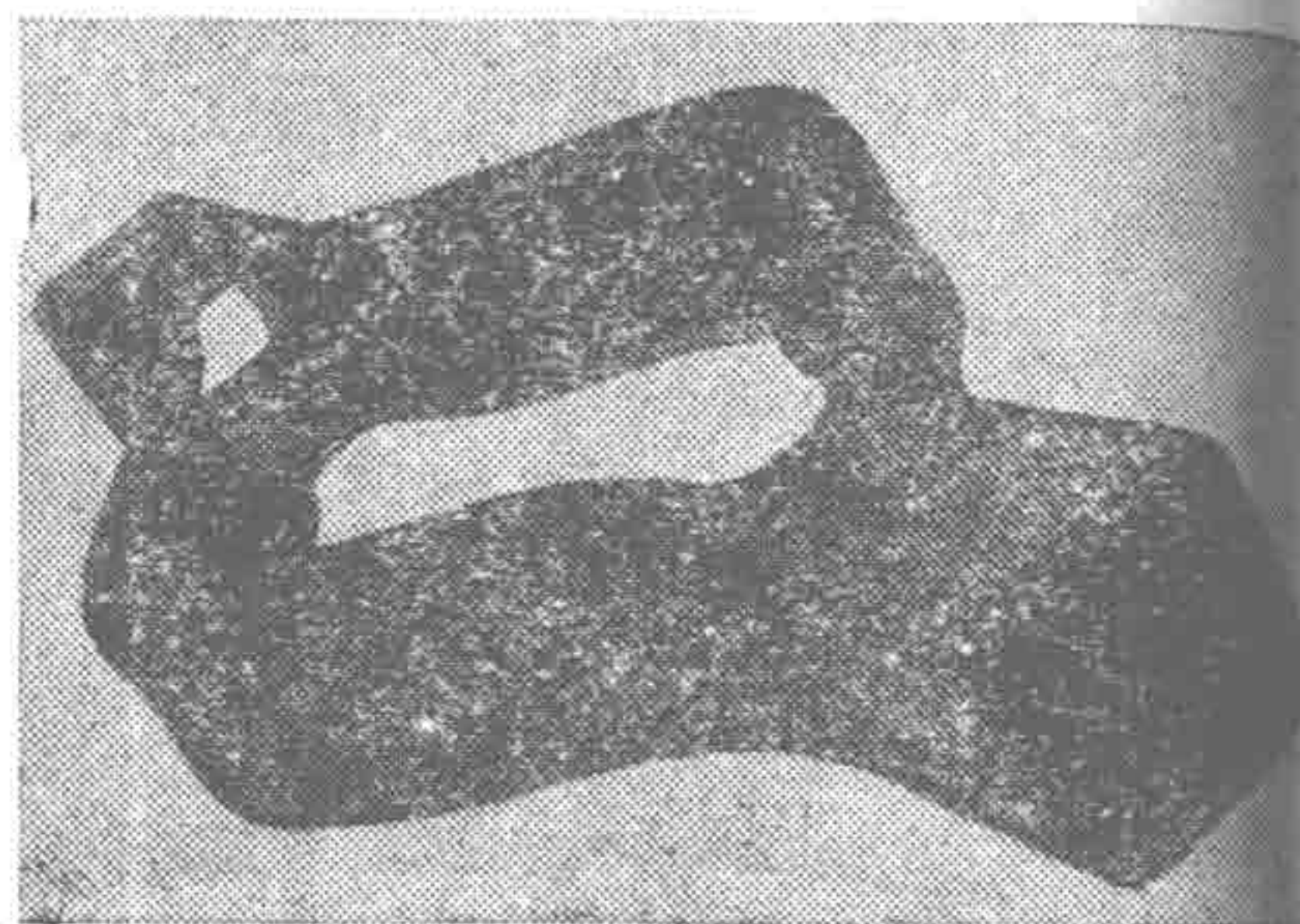


Рис. 37. Корпус самовара с рельефом, полученным на прессе Т1226.

Рис. 38. Корпус кожуха картера ведущего моста автомобиля, отштампованный на ЭГ установке с энергией импульса 100 кДж.



600 м²), стоимость около 300 тыс. руб. (используемого — свыше 4,5 млн. руб. при одинаковой производительности).

Это лишь отдельные примеры развития электрогидроимпульсной штамповки за последние годы. Исследования электрогидроимпульсного способа деформирования дают новые сведения о его возможностях. Особое внимание уделяется характерным для ЭГ штамповки операциям, таким как раздача и калибровка трубчатых деталей, вытяжка тонкостенных деталей со сферическим или эллиптическим дном, деталей, имеющих сложную, неправильную форму, в том числе с несколькими полостями и выштамповками (например, кузовные детали экспериментальных и опытных образцов автомобилей), нанесение рельефа и пробивка отверстий на боковой поверхности полых деталей, рельефная формовка крупногабаритных деталей типа пластинчатых теплообменников и т. д. Большой опыт промышленного использования ЭГ штамповки позволяет критически оценивать получаемые в лабораториях результаты и отбирать наиболее перспективные для использования в производстве.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ

Разработка технологического процесса ЭГ штамповки, как и любого другого, требует проведения определенных технологических расчетов, связанных с выбором оборудования, определением расхода металла, последовательности, вида, количества и трудоемкости операций и т. д. Основные этапы технологических расчетов, проводимых при разработке процесса ЭГ штамповки, связаны с определением осуществимости процесса, возможности использования имеющегося на предприятии оборудования для изготовления детали, а также с определением целесообразности приобретения требуемого оборудования. Для решения этих задач необходимо в первую очередь провести следующие расчеты: размеров исходной заготовки; требуемых и допустимых степеней деформации; давлений и энергии в импульсе; трудоемкости процесса и выбор типоразмера оборудования.

Перечисленные расчеты хоть и не являются достаточными для разработки процесса, однако позволяют определить осуществимость процесса ЭГ штамповки в рассматриваемых условиях производства, получить основные исходные данные по выбору оборудования для изготовления заготовок, определению трудоемкости предшествующих операций, расхода материала, а также по оборудованию и трудоемкости последующих операций, необходимых для получения готовой детали.

2. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ

Расчет размеров заготовки и ее сравнение с соответствующими характеристиками прессы позволяет в первом приближении оценить применимость того или иного ЭГ прессы для штамповки рассматриваемой детали и таким образом определить целесообразность проведения дальнейших технологиче-

ских расчетов. Если на предприятии несколько типоразмеров прессов, то результаты расчета размеров заготовки являются исходными данными при выборе необходимого типоразмера пресса.

Для определения размеров исходной заготовки используется не чертеж детали, а ее технологический эскиз, который разрабатывается с учетом припусков для обеспечения герметичности в процессе деформирования и для обрезки. Припуск для обеспечения герметичности определяется в зависимости от фор-

Таблица 10. Величина припуска на обрезку деталей с фланцем при ЭГ вытяжке

Диаметр детали d , мм	Припуск на сторону при относительном диаметре фланца d_f/d , мм		
	1,3	1,3—1,5	1,5—2,0
50	2,5—3,5	2,2—3,0	2,0—2,8
100	3,5—5,0	3,3—4,5	3,0—4,0
150	5,0—6,5	4,0—5,5	3,5—4,5
200	6—8	5—7	4—6
300	7—14	6—10	5—8
400	10—18	8—15	7—12
600	15—30	12—20	10—16

Примечание. Меньшие значения принимаются для деталей с небольшой глубиной вытяжки ($\sim 0,2$ допустимой), большие — для глубины вытяжки, близкой к предельной.

мы детали. Например, при вытяжке, если деталь не имеет конструктивного фланца, достаточного для обеспечения герметизации, ее дополняют технологическим фланцем. Размеры фланца определяются величиной перетяжного радиуса, который при относительной глубине вытяжки, близкой к предельной, принимается от 8 до 12 толщин заготовки [100, 102—104] и шириной плоской части, равной порядка пяти толщин, необходимой для уплотнения, а также припуском на обрезку из-за неравномерной утяжки фланца (табл. 10). При небольшой глубине вытяжки радиус может быть уменьшен до шести — четырех толщин заготовки.

Аналогично определяют высоту заготовки для деталей, получаемых раздачей. В случае отсутствия у кромки детали цилиндрического пояса вводят пояс технологический, высотой порядка 3—10 толщин материала в зависимости от конструкции уплотнения и размеров детали. В первом приближении можно принимать высоту пояса равную 10 толщинам заготовки. Если планируется раздача через эластичную диафрагму, что делается иногда на ЭГ прессах для небольших тонкостенных деталей, то припуск на герметизацию, естественно, не пред-

усматривается. Размеры и форму исходной заготовки определяют из условия равенства поверхности исходной заготовки и штампуемой детали по технологическому эскизу, используя для этого аналитический, графический или графоаналитический метод.

Графический метод позволяет без проведения расчетов определять размеры исходной заготовки. Например, для деталей в виде шарового сегмента с фланцем и полушария с фланцем (рис. 39) достаточно измерить на технологическом эскизе де-

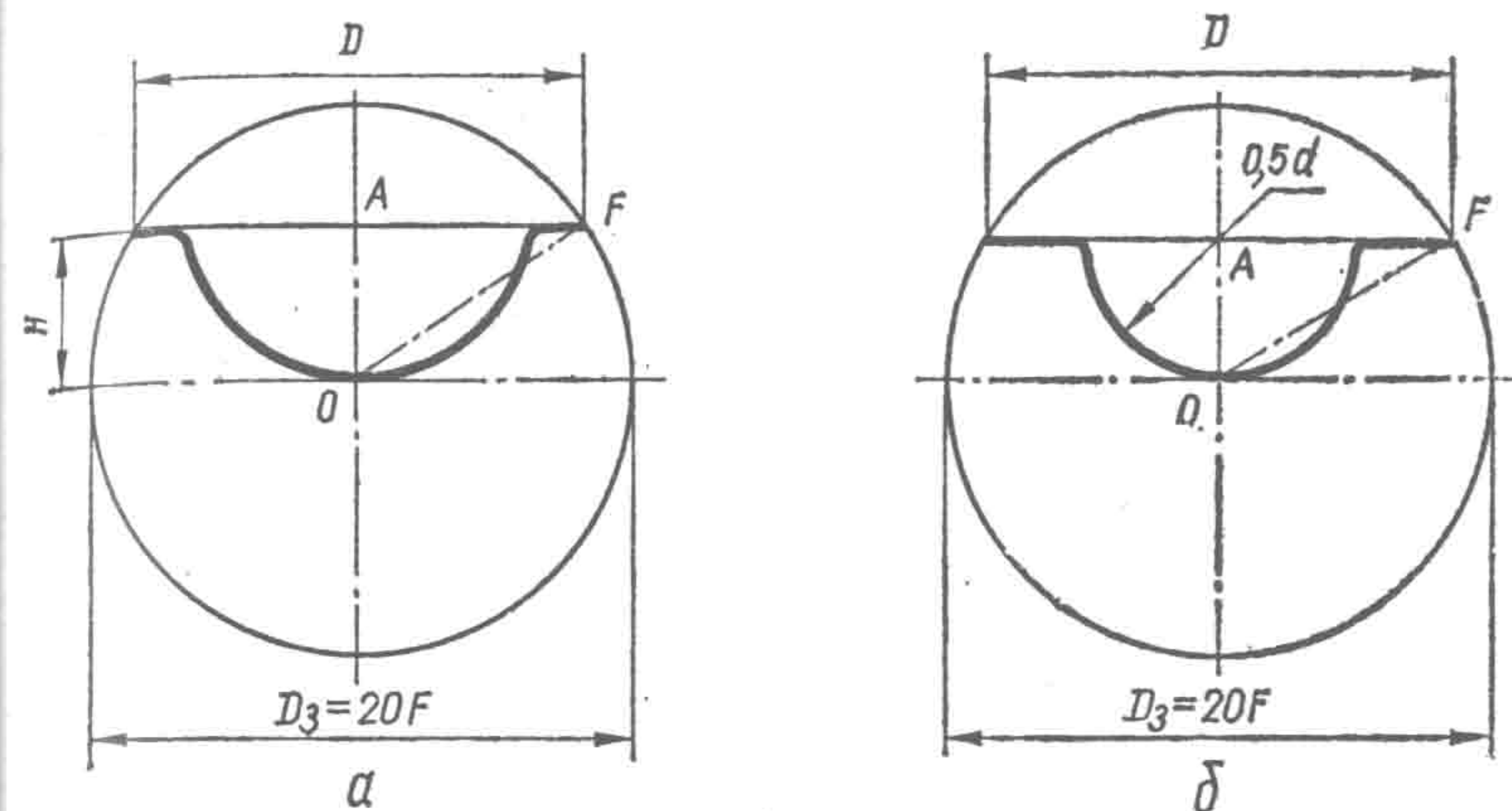


Рис. 39. Определение размеров заготовки графическим методом: а — сегмента с фланцем; б — полушария с фланцем.

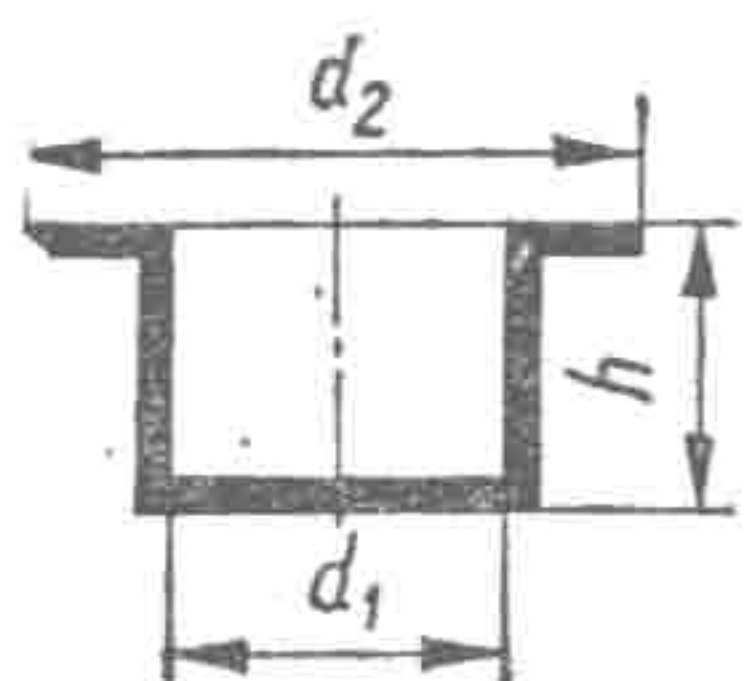
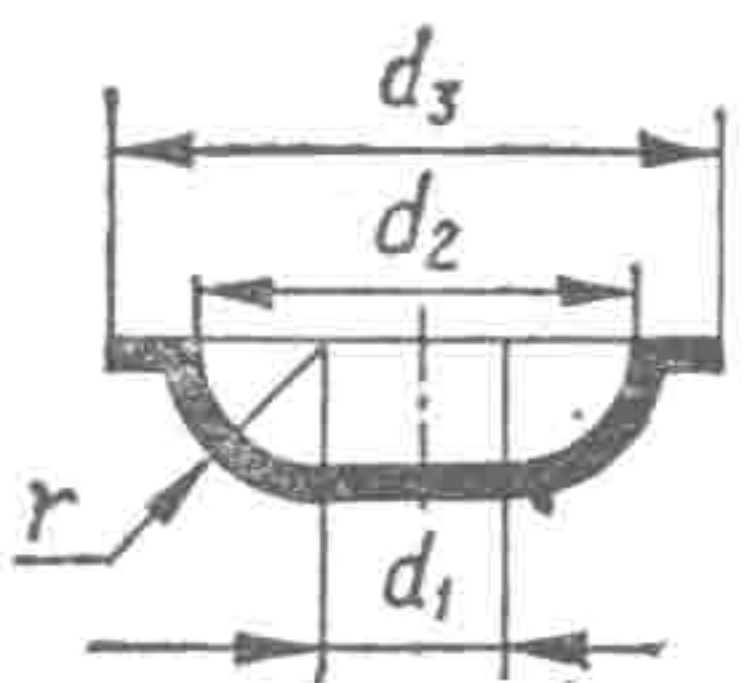
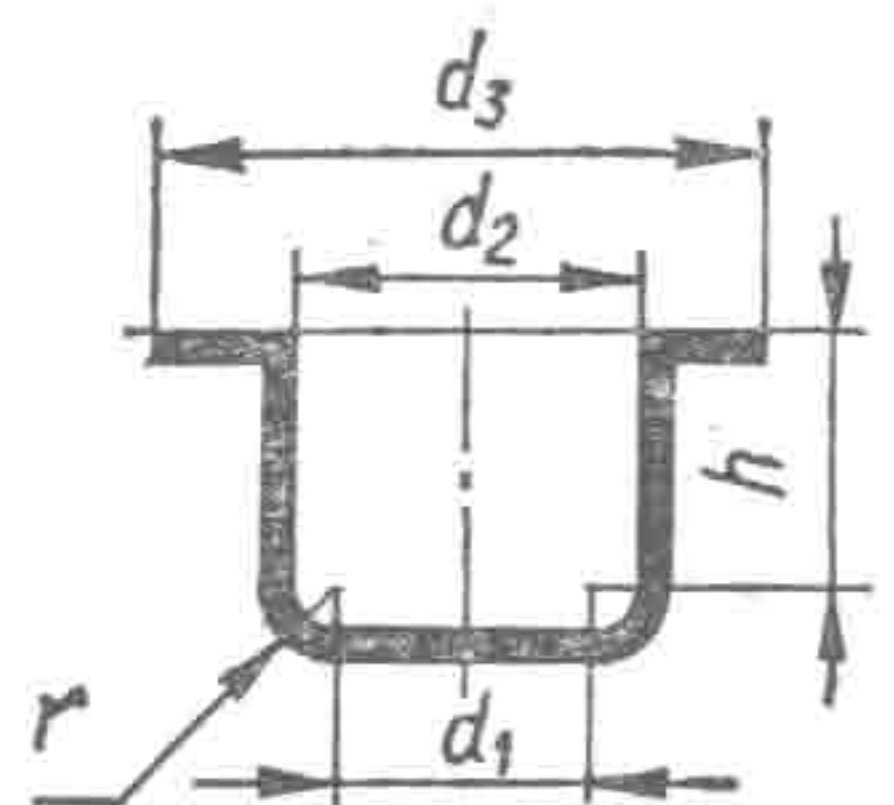
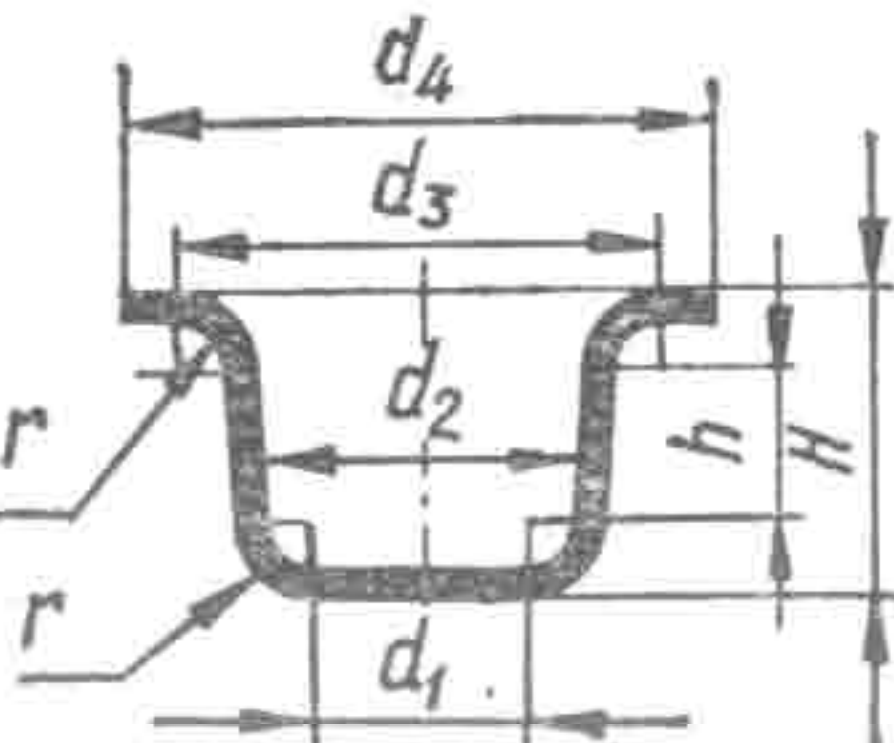
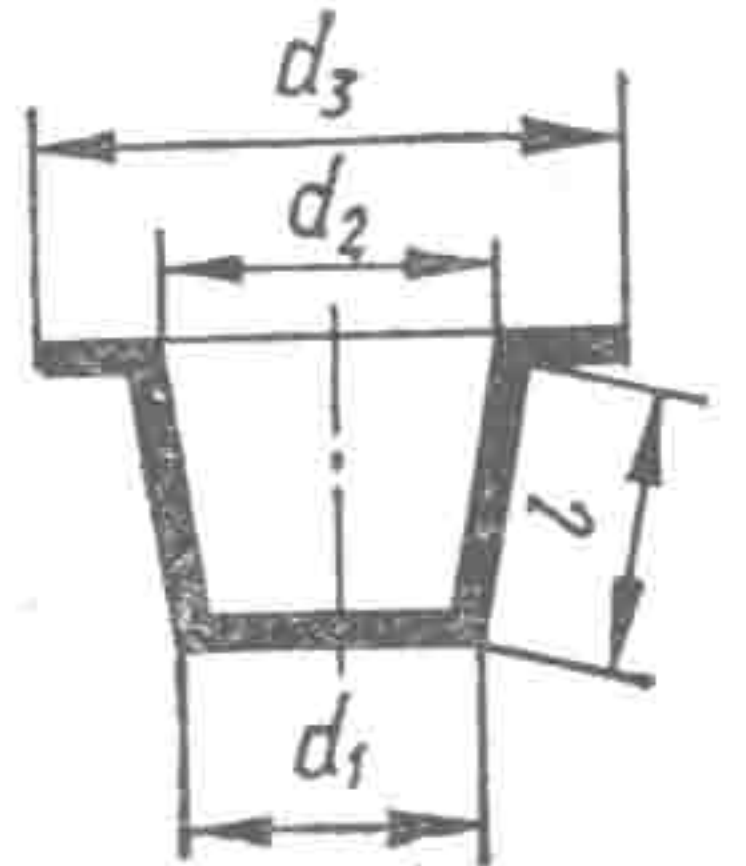
тали расстояние от кромки фланца до центра дна детали. Для остальных деталей требуются специальные геометрические построения, трудоемкость которых соизмерима с трудоемкостью расчета при аналитическом методе, поэтому для более сложных деталей выбор метода определяется исполнителем.

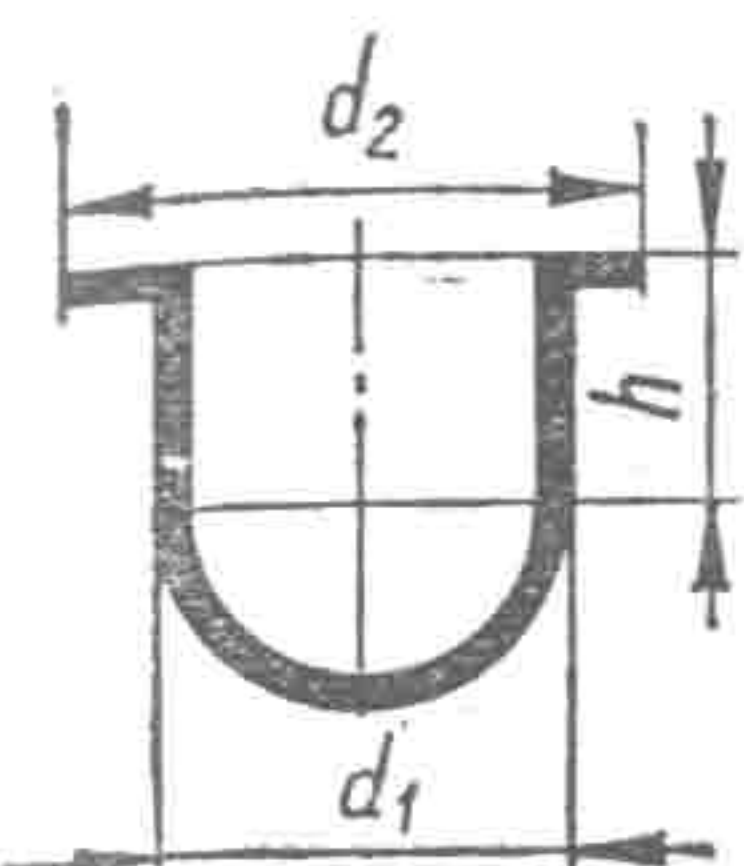
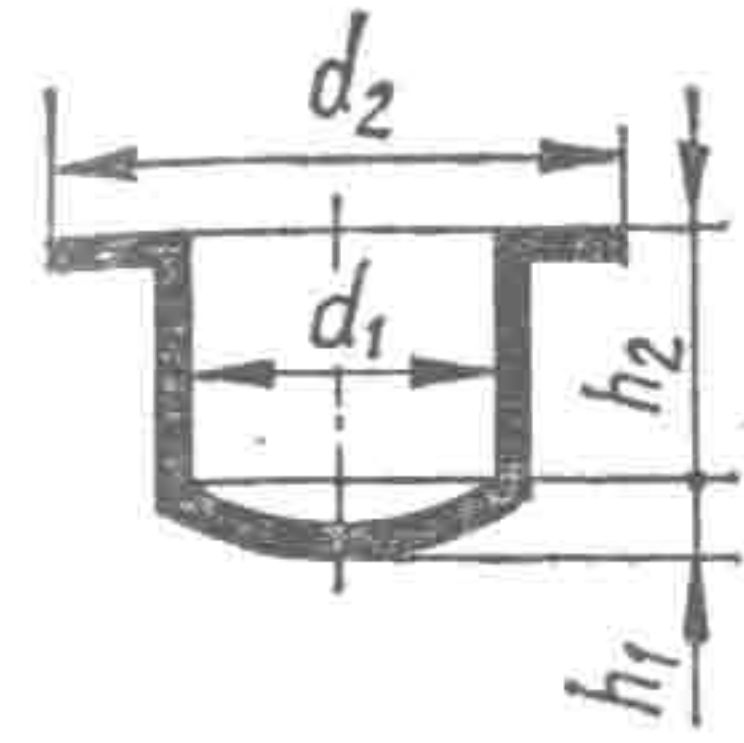
Расчет размеров для ряда осесимметричных деталей, изготавливаемых вытяжкой, проводится по зависимостям, позволяющим определять диаметр заготовки по размерам детали, минуя расчет площади поверхности детали и заготовки [100]. Некоторые из этих зависимостей приведены в табл. 11.

Графоаналитический способ определения заготовки применяется для осесимметричных деталей более сложных форм. При этом диаметр заготовки для вытяжки определяют по формуле

$$D_3 = \sqrt{8\Sigma lr}, \quad (3.1)$$

где l — длина участка образующей; r — расстояние от центра тяжести участка образующей до оси вращения.

Форма детали	Расчетная формула
	$\sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$
	$\sqrt{d_1^2 + 2\pi r d_1 + 8r^2 + d_3^2 - d_2^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 2\pi r d_1 + 8r^2 + 4d_2h + d_3^2 - d_2^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 2\pi r(d_1 + d_2) + 4d_2h + 4\pi r^2 + d_4^2 - d_3^2}$ $\sqrt{d_4^2 + 4d_2H - 3,44rd_2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 2l(d_1 + d_2) + d_3^2 - d_2^2}$

Форма детали	Расчетная формула
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4d_1h}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4(h_1^2 + d_1h_2)}$

В практике электрогидроимпульсной штамповки этот способ часто применяют с упрощением формы детали. Большие радиусы закруглений заменяют прямыми одним или несколькими отрезками, а малые радиусы не учитывают (рис. 40). Графоаналитический способ применяется также при определении площади осесимметричной детали, получаемой при раздаче трубчатой заготовки; по площади детали находится высота заготовки. Площадь детали определяется по формуле

$$F = 2\pi \Sigma lr, \quad (3.2)$$

а высота цилиндрической части заготовки

$$H = \frac{F - F_{\text{дна}}}{2\pi R}. \quad (3.3)$$

Для простых форм детали высоту заготовки можно определять, исходя из длины образующей деформируемой части детали и средней степени

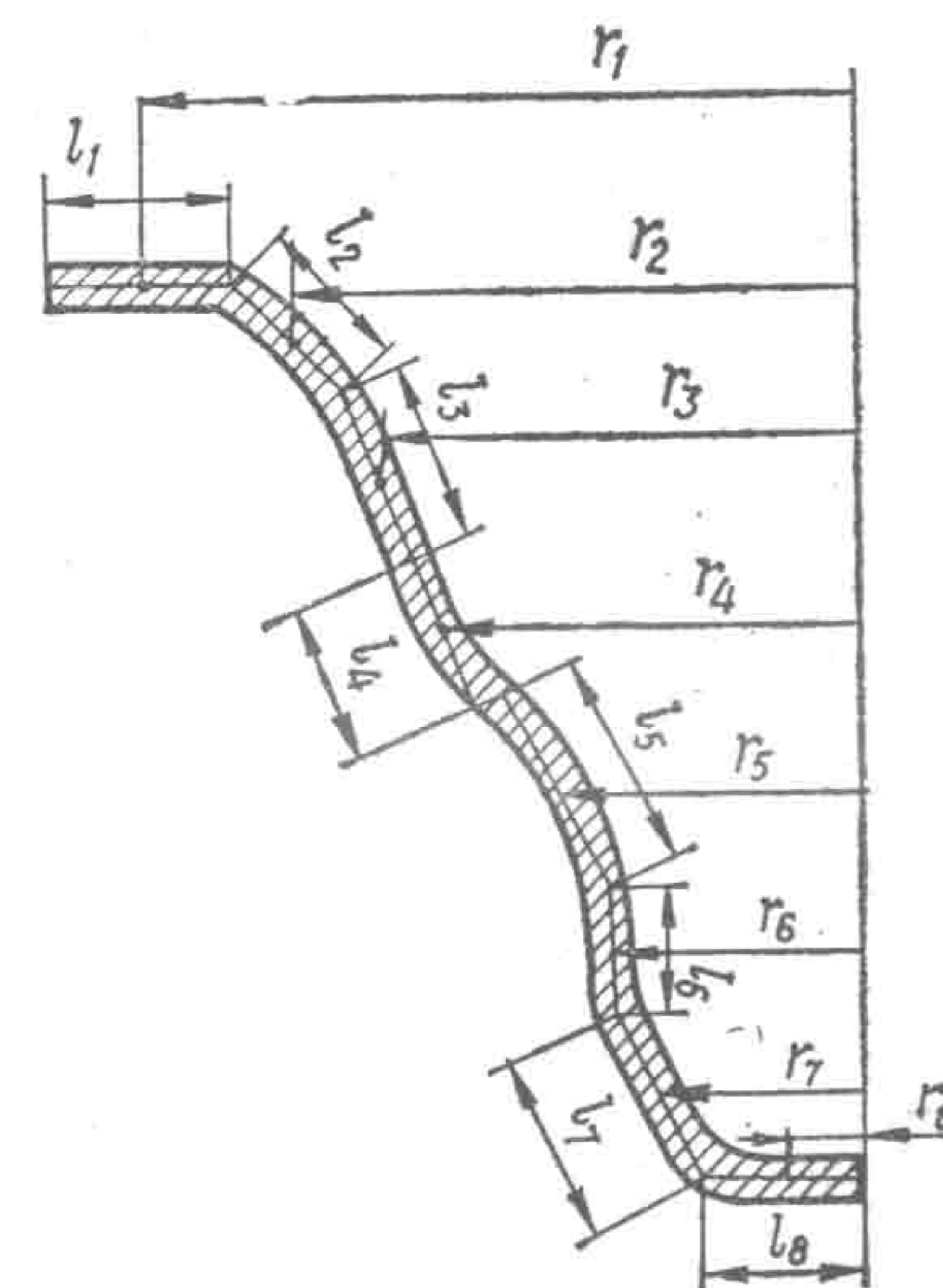


Рис. 40. Упрощение формы детали при расчете размеров заготовки графоаналитическим методом.

деформации

$$l_3 = (1 + \epsilon_{\text{ср}}) l_d + \Delta H, \quad (3.4)$$

где $\epsilon_{\text{ср}}$ — средняя степень деформации; l_d — длина образующей деформируемой части детали; ΔH — высота цилиндрических поясков с припуском.

Средняя степень деформации для типовых геометрических форм деталей, получаемых из трубчатых заготовок, может быть определена из соотношений

для цилиндра

$$\epsilon_{\text{ср}} = \frac{D}{D_3} - 1; \quad (3.5)$$

для сферы

$$\epsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{D}{D_3} - 1 \right); \quad (3.6)$$

для конуса

$$\epsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \left(\frac{D}{D_3} - 1 \right). \quad (3.7)$$

Диаметр исходной трубчатой заготовки для раздачи принимается, как правило, равным наименьшему диаметру детали, если при этом степень деформации не превышает допустимую.

При определении размеров заготовки коробчатых деталей на стадии сравнения размеров заготовки со штамповым пространством пресса необходимо так же, как и при вытяжке осесимметричных деталей, уточнить форму детали в соответствии с требуемыми припусками на герметизацию и обрезку, а затем для определения длины и ширины заготовки к получившимся размерам фланца коробки прибавить с каждой стороны величину, равную высоте коробки. При проектировании оснастки размеры заготовки определяют более точно в зависимости от различного сочетания геометрических параметров коробки [100].

Для деталей сложной формы точно рассчитать размеры заготовки затруднительно. Поэтому, оценивая максимальные размеры заготовки, к размерам детали с припуском можно прибавлять величину, равную глубине детали, по всему периметру. Размеры заготовки уточняются при испытании оснастки и отработке технологии. В большинстве случаев расчетные размеры заготовок оказываются несколько завышенными, так как не учитывается утонение материала. Поэтому расчетные размеры исходной заготовки могут быть уточнены экспериментально.

3. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ

Исходя из требуемой степени деформации проводится оценка деталей, изготавливаемых вытяжкой, раздачей, рельефной формовкой и отбортовкой. Детали, изготавливаемые ЭГ вытяжкой, имеют фланец конструктивный или технологический, причем вытяжка осуществляется за один переход. Степень деформации деталей с фланцем, вытягиваемых за один переход, может быть выражена через наибольшую относительную глубину вытяжки h/d (h и d — глубина и диаметр вытягиваемой части детали). Для оценки возможности получения де-

Таблица 12. Приближенные значения относительной глубины вытяжки h/d цилиндрических деталей с фланцем

Относительный диаметр фланца d_f/d	Значения h/d при относительной толщине заготовки, равной $(S/D_3) \cdot 100\%$				
	2,0—1,5	1,5—1,0	1,0—0,5	0,5—0,2	0,2—0,06
< 1,1	0,90—0,75	0,82—0,60	0,70—0,57	0,62—0,50	0,52—0,45
1,3	0,80—0,65	0,72—0,56	0,60—0,50	0,53—0,45	0,47—0,40
1,5	0,70—0,58	0,63—0,50	0,53—0,45	0,48—0,40	0,42—0,35
1,8	0,58—0,48	0,53—0,42	0,44—0,37	0,39—0,34	0,35—0,29
2,0	0,51—0,42	0,46—0,36	0,38—0,32	0,34—0,29	0,30—0,25
2,2	0,45—0,35	0,40—0,31	0,33—0,27	0,29—0,25	0,26—0,22
2,5	0,35—0,28	0,32—0,25	0,27—0,22	0,23—0,20	0,21—0,17
2,8	0,27—0,22	0,24—0,19	0,21—0,17	0,18—0,15	0,16—0,13

Примечание. Большие значения соответствуют увеличенным радиусам закруглений от $r = (10-12) S$ для $(S/D_3) \cdot 100 = 2 \div 1,5$ до $r = (20-25) S$ для $(S/D_3) \cdot 100 = 0,2 \div 0,06$. Меньшие значения соответствуют уменьшенным радиусам закруглений у дна и у фланца $r \approx (4 \div 8) S$.

тали с фланцем вытяжкой за один переход в обычных штампах В. П. Романовский [100] приводит значения достижимой относительной глубины вытяжки h/d в зависимости от относительного диаметра фланца d_f/d и относительной толщины заготовки S/D_3 (табл. 12).

Как показывает практика электрогидроимпульсной вытяжки цилиндрических деталей с фланцем, существующие рекомендации для обычной штамповки могут быть приняты и для ЭГ вытяжки. При тщательном подборе режимов, смазки и усилия прижима (гарантированного зазора между заготовкой и прижимом) можно получить несколько большую глубину детали, чем указано в таблице, в частности при вытяжке из стали ОХ18Н9 или применяемых в автомобилестроении сталей О8КП и О8Ю для глубокой вытяжки. Например, из отожжен-

ной стали ОХ18Н9 толщиной 0,5 мм вытягивались детали глубиной 26, диаметром 37 мм с диаметром фланца 52 мм без промежуточного отжига. При вытяжке детали матрица имела

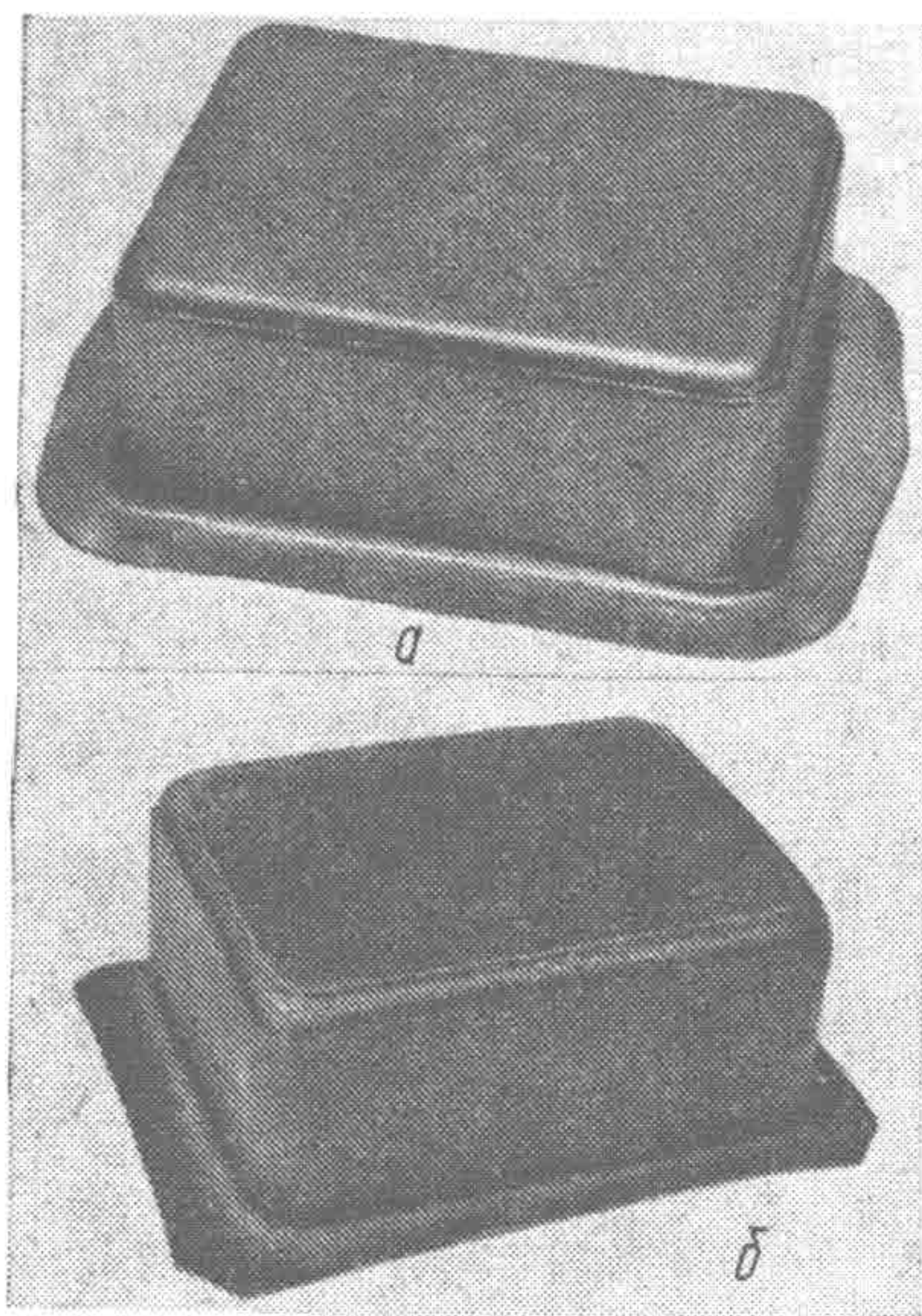


Рис. 41. Коробка из АД1М, вытянутая на прессе Т1220 (а) и из стали О8кп, вытянутая на прессе «Удар-20» (б).

перетяжной радиус 6 мм, а радиус закругления детали у дна — 3,5 мм. Эти результаты достигнуты за счет более равномерного распределения утонения, в частности у приведенных выше деталей утонение равномерно изменялось от максимального — в центре дна, равного 35—40 %, до нулевого — у перетяжного радиуса.

К аналогичным выводам приводит анализ полученных результатов и при ЭГ вытяжке коробчатых деталей с фланцем. Предельная относительная глубина примерно такая же, как и при вытяжке в штампах (табл. 13) [100]. Например, из сплава АД1М толщиной 1,5 мм на ЭГ прессе вытягивается коробочка глубиной 60 мм при ширине 100 мм (рис. 41, а). Следует об-

Таблица 13. Приближенные значения наибольшей относительной глубины H/V прямоугольных коробок с фланцем в зависимости от отношения толщины заготовки S к ее ширине K

Материал	Значения H/V при относительной толщине заготовки, равной $(S/K) \cdot 100\%$			
	1,5—2,0	1,0—1,5	0,5—1,0	0,2—0,5
	Алюминий	0,65—0,70	0,60—0,65	0,55—0,60
Сталь 10—15	0,60—0,65	0,55—0,60	0,50—0,55	0,45—0,50

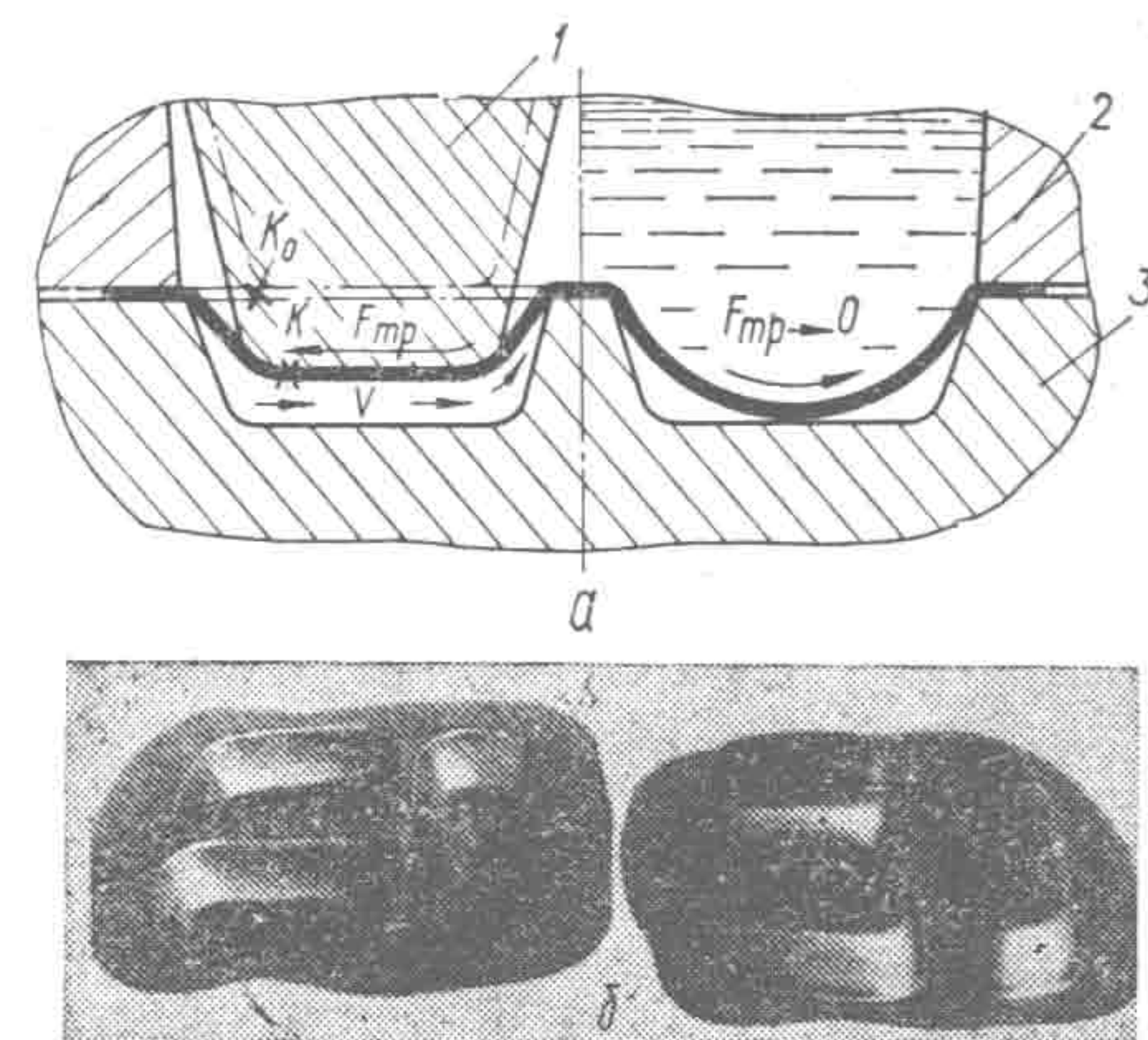
коробочек из металлов, имеющих относительно высокие предел текучести и прочности (например, углеродистые и нержавеющие стали), не всегда удается даже после промежуточного отжига получать требуемые угловые радиусы в месте сопря-

жения стенок коробки с дном. Эта особенность сдерживает использование ЭГ штамповки для вытяжки коробок из стали. Так, при вытяжке коробки глубиной 92 мм при ширине 152 мм и относительном угловом радиусе закруглений $\frac{r}{B} = 0,11$ из

стали О8КП толщиной 1,5 мм (рис. 41, б) калибровка радиусов с тремя разупрочняющими отжигами не обеспечила полу-

Рис. 42. Схема деформирования заготовки при штамповке деталей, имеющих несколько полостей за счет односторонней утяжки фланца пуансоном (слева) и жидкостью (справа) (а) и менажница, вытянутая на прессе Т1220 (б):

1 — пуансон; 2 — прижим; 3 — матрица.



чение угловых радиусов закругления у дна менее 11—14 мм при требуемых 8,5 мм. Вытяжка и калибровка радиусов осуществлялись в одной матрице при энергии в импульсе 20 кДж. Отсутствие пуансона при ЭГ штамповке и равномерное распределение нагрузки благоприятно сказываются при вытяжке

Таблица 14. Оптимальные радиусы угловых закруглений при вытяжке коробок с фланцем (для стали 10)

Относительная высота коробки H/V	Относительное значение r_y при	
	r_y/B	r_y/H
0,2	0,12 — 0,15	0,60 — 0,75
0,3	0,16 — 0,20	0,55 — 0,70
0,4	0,20 — 0,25	0,50 — 0,62
0,5	0,25 — 0,30	0,50 — 0,60
0,6	0,30 — 0,33	0,50 — 0,55
0,7	0,32 — 0,35	0,45 — 0,50

деталей, имеющих несколько полостей, когда формообразование каждой полости осуществляется за счет как бы односторонней утяжки фланца, так как с противоположной стороны контура полости, в центре детали, заготовку можно считать жестко заземленной (рис. 42, а). При штамповке таких деталей отсутствие силы трения $F_{тр}$ между заготовкой и пуансоном (водой) облегчает перемещение металла к центру детали, например от исходного положения K_0 к промежуточному K в направлении v , и позволяет значительно сокращать число переходов. Так, деталь «менажница» (рис. 42, б) вытягивалась на ЭГ прессе за один переход, в то время как для штамповки на обычном гидравлическом прессе потребовалось бы около 10

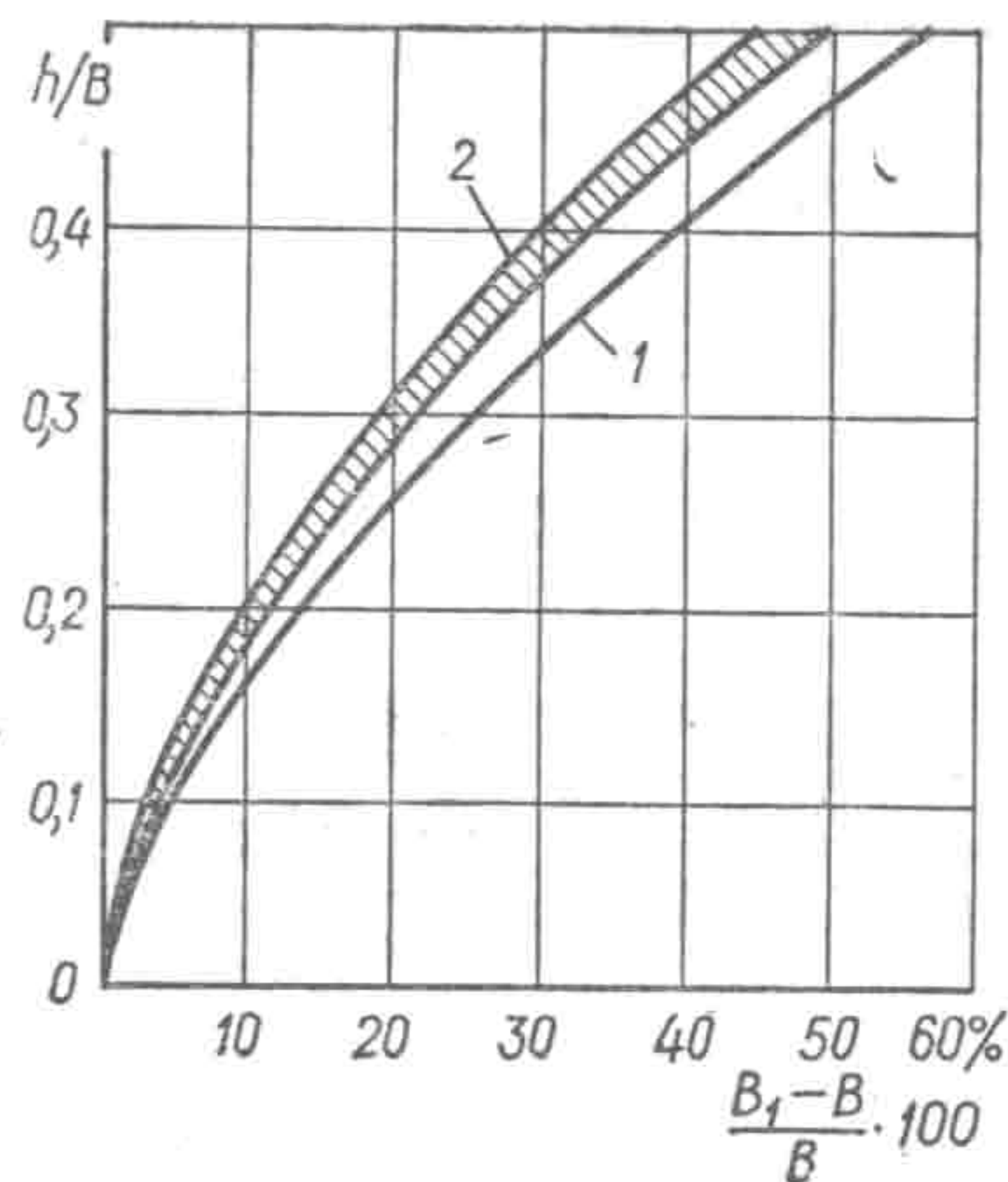
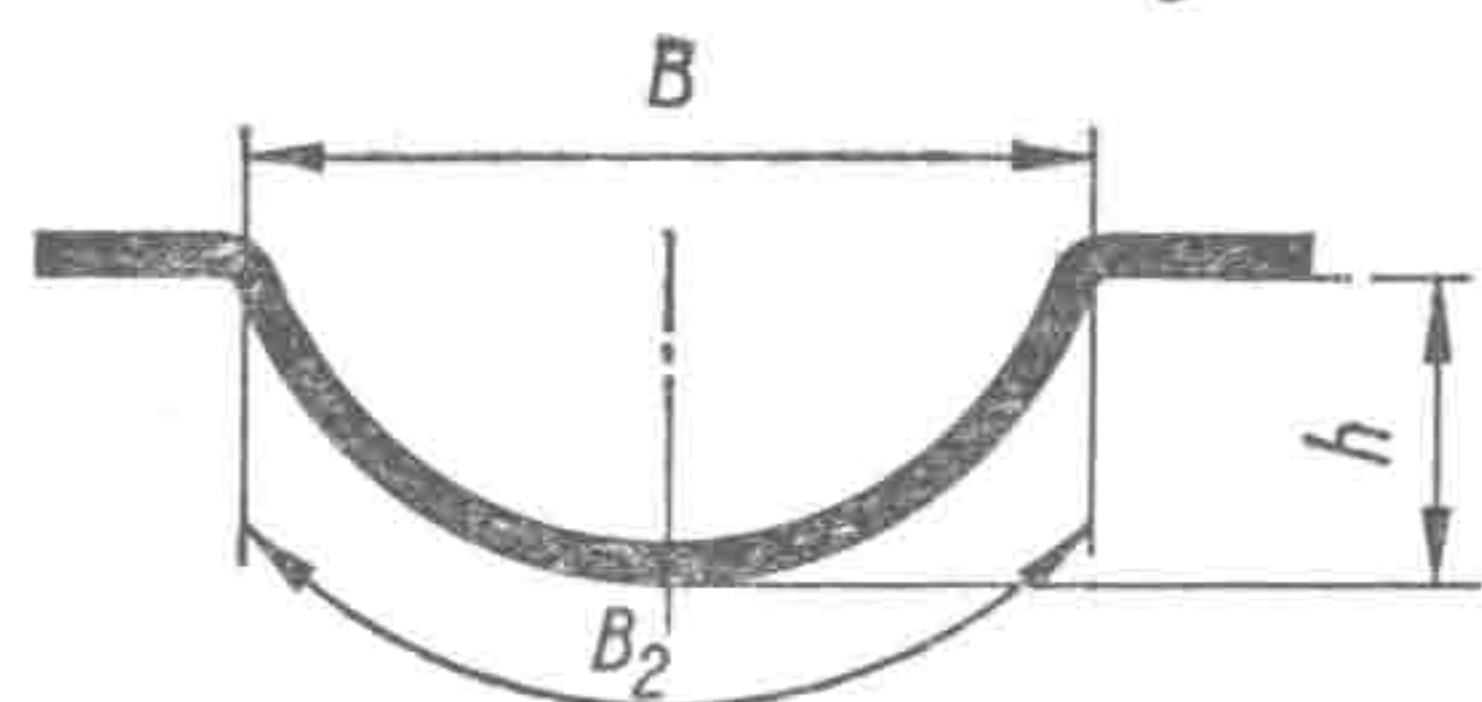


Рис. 43. Удлинение материала при штамповке ребер жесткости: 1 — расчетное; 2 — фактическое.

штампов. Оценка степени деформации для таких сложных деталей затруднена и, как правило, проводится на основе экспериментальных данных (например, используются координатные сетки). Поэтому возможность вытяжки детали сложной формы определяется с использованием опыта по штамповке деталей, подобных рассматриваемой.



Электрогидроимпульсная вытяжка дает ощутимые преимущества при штамповке куполообразных деталей со сферическим или эллиптическим дном. Анализ результатов показал,

что предельные значения относительной толщины заготовок с позиции потери устойчивости материала, находящегося вне прижима, могут быть уменьшены до четырех раз. Вопрос устойчивости заготовок при вытяжке рассмотрен отдельно.

Возможность получения детали раздачи из трубчатых заготовок исходя из допустимой степени деформации в первом приближении можно оценивать величиной равномерного относительного удлинения материала δ_p (по ГОСТ 11701—66):

$$\frac{D - D_3}{D_3} \leq \delta_p, \quad (3.8)$$

где D и D_3 — диаметры детали и заготовки.

При разработке процесса следует иметь в виду, что для достижения степени раздачи, близкой к предельным возможностям материала, заготовки необходимо предварительно отжигать для снятия наклепа в материале заготовки, полученного при ее изготовлении. Возможность получения детали рельефной

Таблица 15. Допустимая относительная глубина пуклевок при штамповке эластичной средой

Материал и марка	h/d (допускаемое)	Наибольшее утонение, %
Д16М	$<0,22$	<23
Алюминий и АМцАМ	$<0,28$	<33
Сталь 20	$<0,26$	<26
X18H9T	$<0,34$	<37

формовкой оценивают по относительной глубине штампуемых пуклевок и рифтов.

Допустимая глубина пуклевок по отношению к их диаметру при статической формовке эластичной средой для основных штампуемых материалов колеблется от 0,22 до 0,34 при наибольшем утонении соответственно 23 и 37 % (табл. 15) [51].

Допустимая глубина длинных рифтов определяется в соответствии с относительным удлинением материала в поперечном сечении рифта

$$\frac{B_1 - B}{B} \leq \delta_p, \quad (3.9)$$

где B_1 — длина образующей рифта в поперечном сечении; B — расчетная ширина деформируемого участка заготовки (рис. 43).

Исследования, проведенные В. П. Романовским, показали, что действительная длина деформируемого участка заготовки несколько больше расчетной, так как зона пластической деформации распространяется и на плоский участок заготовки вблизи перетяжного радиуса [100]. В связи с этим действительное удлинение материала получается несколько меньше расчетного. Например, при формовке полукруглых ребер оно меньше на 7—10 % (рис. 43).

Определяя возможную глубину пуклевки или рифта, можно ориентироваться на предельные возможности материала при статическом нагружении, поскольку импульсная штамповка обеспечивает определенный запас, достаточный для стабильной и качественной штамповки. Сравнительные эксперименты по вытяжке заготовок из различных материалов с «жестко» заземленным фланцем, что соответствует рельефной формовке, показали, что при электрогидроимпульсной штамповке возможности по деформации без разрыва выше в 1,1—1,3 раза по сравнению со статическим нагружением [117].

При отбортовке отверстий степень деформации определяется соотношением между диаметром отверстия и диаметром борта и оценивается коэффициентом отбортовки

$$k = \frac{d}{D} = 1 - \psi,$$

где d — диаметр отверстия до отбортовки; D — диаметр отбортовки (по средней линии).

Наличие дефектов на кромке отверстия (заусеницы, наклеп и т. д.) не позволяют достигать при отбортовке поперечного сужения ψ , получаемого при испытании на растяжение. Экспериментально доказано, что предельно допустимые коэффициенты отбортовки зависят от относительной толщины

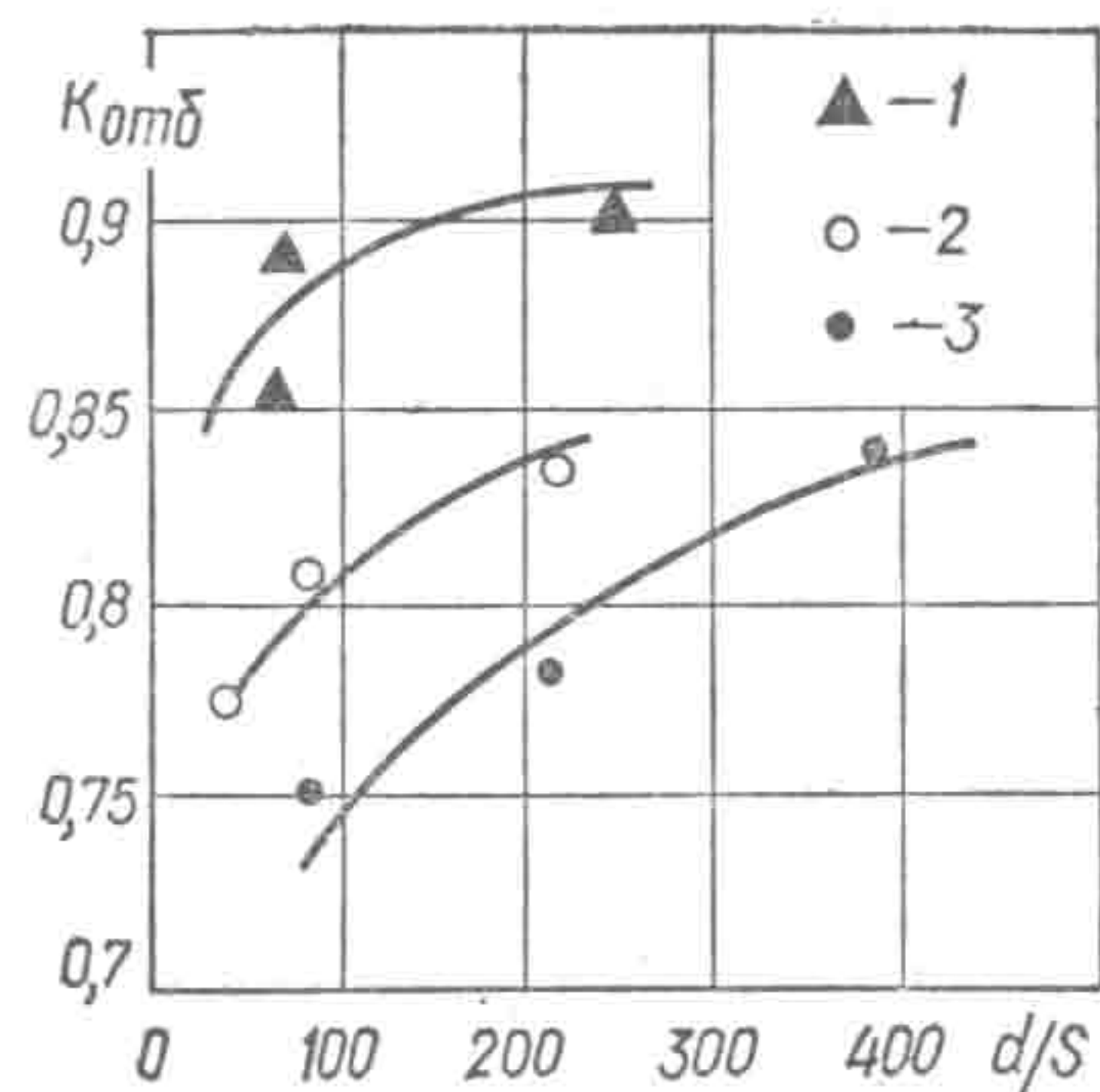


Рис. 44. Величина предельного коэффициента отбортовки, совмещенной с импульсной пробивкой отверстия жидкой средой:

1 — Д16АМ; 2 — АМЦАМ; 3 — сталь 10КП.

электрогидроимпульсной отбортовке является отбортовка сферическим пуансоном с пробивкой отверстия в штампе, так как в обоих случаях отбортовка происходит с плавным изменением кривизны борта. Поэтому при оценке предельных возможностей ЭГ отбортовки можно пользоваться данными для отбортовки сферическим пуансоном. Авторами не проводились специальные исследования предельных возможностей ЭГ отбортовки, однако приемлемость приведенных выше данных подтверждена опытом практического использования.

Следует отметить, что исследование отбортовки, совмещенной с пробивкой отверстия относительных толщин (от 0,01 до

Таблица 16. Значение коэффициентов отбортовки

Отбортовка пуансоном	Способ получения отверстия	Значение коэффициента в зависимости от $S/d \cdot 100\%$ для образцов							
		1	2	3	5	7	10	15	20
Сферическим	Сверление зачисткой заусенцев	0,70	0,60	0,52	0,45	0,40	0,36	0,31	0,30
	Пробивка * в штампе	0,75	0,65	0,57	0,52	0,48	0,45	0,43	0,42
Цилиндрическим	Сверление с зачисткой заусенцев	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,42	0,37	0,35
	Пробивка в штампе	0,85	0,75	0,65	0,60	0,55	0,52	0,50	0,48

* Значения могут быть приняты для ЭГ штамповки.

заготовки (чем больше относительная толщина заготовки, тем больше возможная степень деформации), от способа получения отверстия и состояния его кромки (при отбортовке пробитых отверстий достижимая степень деформации меньше, чем отверстий, полученных рассверловкой или фрезерованием). В зависимости от относительной толщины, способа получения отверстия и формы пуансона при отбортовке в штампах коэффициенты отбортовки могут быть от 0,85 до 0,30 в пределах относительной толщины S/d от 0,01 до 0,2 (табл. 16) [95]. Из приведенных условий наиболее близкой к

0,0025), показывает совпадение значений предельных коэффициентов отбортовки жидкостью и отбортовки сферическим пуансоном при одинаковой относительной толщине $\frac{S}{d} = 0,01$ (рис. 44) [48].

Оценивая возможности получения детали исходя из требуемой и допустимой для рассматриваемой операции степеней деформации, следует иметь в виду, что степени деформации, близкие к предельным, достигаются при ЭГ штамповке на оптимальных режимах, которые уточняются для каждой детали экспериментально в процессе отработки технологии.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСЕ

Задача сводится к определению давления на заготовку, необходимого для штамповки детали из данного материала, и его сравнению с расчетным давлением, которое может создать пресс при штамповке детали. Для определения требуемой распределенной нагрузки (давления жидкости $P_{тр}$ или инерционных сил) при формообразующих операциях ЭГ штамповки можно пользоваться зависимостями, получаемыми из уравнения Лапласа для двухосного напряженного состояния

$$\frac{P_{тр}}{S} = \frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2}, \quad (3.10)$$

где R_1, R_2 — главные радиусы кривизны; σ — напряжение в плоскостях главных радиусов.

Для длинных рифтов, когда $R_2 \rightarrow \infty$, зависимость для определения давления имеет вид [51]:

$$P_{тр} = S\sigma \frac{1}{R}, \quad (3.11)$$

где σ — напряжения, возникающие при деформировании; R — радиус закругления в сечении рифта (рис. 45, а).

Для сферических пуклевок, когда $R_1 = R_2$, а $\sigma_1 = \sigma_2$,

$$P_{тр} = \frac{2\sigma S}{R}. \quad (3.12)$$

При штамповке поверхностей двойной кривизны с разными радиусами закруглений (рис. 45, б), когда $\sigma_1 \neq \sigma_2$, давление будет меньше, чем при штамповке сферических пуклевок, но больше, чем при штамповке рифтов. Завышая для технологических расчетов результат можно принять $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{max}$, и

тогда

$$P_{\text{тр}} = \sigma S \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (3.13)$$

Следует отметить, что действительные напряжения и толщину металла на конечном этапе деформирования вследствие утонения заготовки и упрочнения металла рассчитать довольно сложно, поэтому в технологических расчетах толщину принимают равной исходной толщине заготовки [51]. Учитывая зависимость напряжений от степени деформации, для деформаций, близких к предельным, напряжения можно

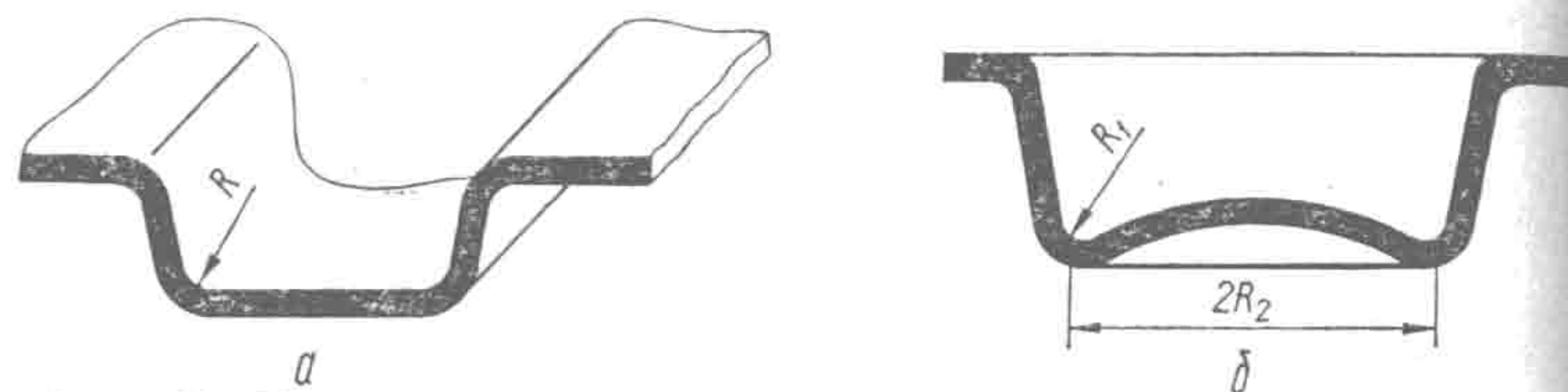


Рис. 45. Учитываемые радиусы закруглений:
а — для длинных рифтов; б — для деталей двойной кривизны.

принять равными пределу прочности, для средних степеней деформации — среднему значению между σ_T и σ_B и для небольших относительных деформаций или при калибровке после отжига — пределу текучести.

Для разделительных операций $P_{\text{тр}} = \frac{Q}{F}$, где Q — требуемое усилие среза, равное произведению предела прочности на срез длины вырубаемого контура и толщины материала; F — площадь отхода.

Например, при пробивке круглых отверстий диаметром d можно пользоваться формулой [24, 60, 61]

$$P_{\text{тр}} = \frac{4S\sigma_T}{d}$$

или

$$P_{\text{тр}} = \frac{3S\sigma_B}{d}.$$

Расчет давлений, действующих на заготовку, необходимо проводить исходя из механизма нагружения, схемы штамповки, характеристик самой заготовки, объема камеры и степени ее герметизации, параметров разрядного контура и т. д. Так, исследования механизма нагружения заготовок, имеющих большую жесткость, в камерах малого объема при рабочем напряжении до 10 кВ показали, что определяющую роль в создании давления играет механизм квазистатического нагружения [83, 114].

Принимая квазистатическое давление за главный фактор, определяющий нагрузку на заготовку при выделении энер-

гии на последних калибрующих импульсах в прессах Т1220, Т1223 и Т1226, можно получить достаточно простую зависимость для определения давления на заготовку при технологических расчетах. Давление в этом случае может быть определено из условия, что энергия, выделяемая в канале разряда, расходуется на сжатие жидкости, образовавшейся при разряде парогазовой полостью, в абсолютно жесткой камере. Считая, что давление распределяется равномерно по всему объему камеры [42, 90] и что изменение объема жидкости пропорционально давлению, выделившуюся в канале разряда, энергию можно представить в виде суммы

$$W_0 = \frac{P_{\text{п}}V_{\text{п}}}{\nu-1} + \frac{P_{\text{ж}}\Delta V_{\text{ж}}}{2}, \quad (3.14)$$

где $\frac{P_{\text{п}}V_{\text{п}}}{\nu-1}$ — внутренняя энергия парогазовой полости объемом $V_{\text{п}}$ при давлении $P_{\text{п}}$ и показателе адиабаты ν ; $\frac{P_{\text{ж}}\Delta V_{\text{ж}}}{2}$ — работа, затраченная на сжатие жидкости до давления $P_{\text{ж}}$, что привело к изменению ее объема на $\Delta V_{\text{ж}}$.

Для принятых ранее условий $P_{\text{п}} = P_{\text{ж}}$ и $\Delta V_{\text{ж}} = V_{\text{п}} = \frac{PV_{\text{ж}}}{E_{\text{ж}}}$, где $E_{\text{ж}}$ — объемный модуль упругости жидкости, а $V_{\text{ж}}$ — объем жидкости. Учитывая эти отношения, из равенства (3.14) найдем давление в камере

$$P = \sqrt{\frac{W_0 E_{\text{ж}} (\nu-1)}{V_{\text{ж}} (1+\nu)^2}}.$$

Для воды можно принять $E_{\text{ж}} \approx 2,1 \cdot 10^9$ Н/м², а для парогазовой полости $\nu = 4/3$. Тогда

$$P \approx 2,45 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{W_0}{V_{\text{ж}}}}. \quad (3.15)$$

Расчет давлений по этой формуле для объемов 4; 1 и 0,2 л дает при энергии в импульсе 20 кДж соответственно $550 \cdot 10^5$; $1100 \cdot 10^5$ и $2450 \cdot 10^5$ Н/м².

В действительности давление отличается от расчетного в связи с тем, что при выводе формулы принят ряд допущений. Оценка давлений, получаемых при ЭГ штамповке на прессах Т1220 и Т1223, по величине радиусов закруглений различных деталей с использованием формулы (3.13) показывает, что для разных объемов необходимо вводить поправочные коэффициенты k разных значений от 0,5 до 1:

$V_{\text{ж}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3$	0,1	0,5	1,0	2,0	4,0
k	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Расчетная формула при этом примет вид

$$P \approx k \cdot 2,45 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{W_0}{V_{ж}}}. \quad (3.16)$$

Приведенная выше зависимость позволяет ориентировочно определять возможность получения деталей при штамповке по основной схеме на прессах Т1220, Т1223 и Т1226.

Увеличение коэффициента k с увеличением объема камеры, видимо, связано с тем, что изменения в условиях расширения парогазовой полости в ограниченном объеме направлены с ростом $V_{ж}$ в сторону условий расширения полости в открытом объеме. При этом увеличивается значение инерционных сил сжимаемой жидкости для создания давления.

Давление на заготовку при штамповке по схеме метанием жидкости, которое возникает в результате резкого ее торможения во время удара о заготовку, может быть определено по формуле М. Е. Жуковского [47], выведенной для определения давления при гидравлическом ударе $P = \rho_1 v_1 c_1$ или несколько точнее, с учетом характеристик преграды

$$P = \frac{\rho_1 v_1 c_1 \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2},$$

где ρ_1, ρ_2 — плотность соответственно жидкости и материала заготовки, v_1 — скорость потока жидкости, c_1 и c_2 — скорость звука соответственно в жидкости и в преграде (заготовке).

В общем случае необходимо учитывать неравномерность распределения скорости жидкости в выходном сечении камеры [55]. Однако эксперименты, проведенные по использованию схемы метанием жидкости для рельефной формовки (художественной чеканки сувенирных изделий размерами до 100 мм) на прессах Т1220 и Т1223, показали примерно равную четкость рельефа по всей поверхности детали при использовании цилиндрических камер с высотой H , примерно равной диаметру d (см. рис. 4). На основании этих экспериментов можно сделать вывод, что при таких соотношениях размеров камеры давление по поверхности заготовки распределяется примерно равномерно и, следовательно, можно условно считать, что и скорость также равномерно распределена по сечению камеры. В этом случае, зная КПД перехода запасаемой энергии в кинетическую энергию потока жидкости, можно определить ее скорость для цилиндрических камер:

$$v = \sqrt{\frac{2\eta W_0}{\rho S H}},$$

где η — КПД перехода запасенной энергии в кинетическую энергию жидкости; H — расстояние от свободной поверхности жидкости до межэлектродного промежутка.

Оценка давлений, получаемых при пробивке по этой схеме на прессах Т1220 и Т1223 с диаметром выходного отверстия камеры до 100 мм, показала, что для технологических расчетов КПД можно принимать равным 0,2. В данном случае $\eta = 0,2$ принято в соответствии с экспериментальными данными по величине зафиксированного давления и не только устанавливает КПД перехода W_0 в кинетическую энергию жидкости, но и учитывает кроме потерь демпфирующее влияние воздушной прослойки, упругопластических деформаций заготовки, упругих деформаций станины пресса и т. д. В разрядных головках прессов Т1220 и Т1223 можно пренебречь объемом воды, находящимся между изолятором и разрядным промежутком. Тогда $HS \approx V_{ж}$.

Подставляя зависимость для определения скорости жидкости в формулу М. Е. Жуковского, получаем зависимость для определения давления при технологических расчетах применительно к схеме штамповки метанием воды в оснастке без конических концентраторов при штамповке деталей размерами до 100 мм в плане на прессах Т1220 и Т1223:

$$P = 3 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{W_0}{V_{ж}}}. \quad (3.17)$$

Следует подчеркнуть, что эта зависимость применима только для прессов Т1220 и Т1223, на которых установлена предусмотренная их конструкцией коаксиальная разрядная головка, при экспериментальном подборе оптимального разрядного промежутка и оптимального зазора между водой и заготовкой.

На другом оборудовании и при использовании других разрядных головок КПД перехода энергии в кинетическую гидротока будет отличаться, следовательно, будут различаться величины получаемого давления.

Штамповка на прессах больших энергий Т1229, Т1229А, «Удар-16К» и Т1232, имеющих максимальную энергию в импульсе 80 и 160 кДж, характеризуется выделением энергии в больших объемах, что не позволяет брать за основу механизм квазистатического нагружения. В этих прессах, по всей видимости, основную долю в нагрузке на последних калибрующих импульсах составляет давление от действия ударной волны. Для определения возможности получения детали расчетным путем необходимо или решать дифференциальное уравнение движения заготовки при известных параметрах ударной волны, которые требуется также рассчитывать ввиду отсутствия этих данных в характеристиках прессов, или проводить более грубую оценку по величине требуемого статического давления, сравнивая его с эквивалентным давлением, которое может

обеспечивать ЭГ пресс, основываясь на экспериментальных данных.

Эксперименты, проведенные в ПКБЭ по штамповке некоторых деталей размерами от 700 до 1200 мм на установках с запасаемой энергией до 160 кДж, позволяющих нагружать заготовку локально (обеспечивая минимальное расстояние между каналом разряда и заготовкой), показали, что при энергиях порядка 80—160 кДж можно штамповать детали для деформирования которых необходимо создавать давление $700—900 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Эти данные и могут быть использованы в качестве ориентировочных при определении возможности штамповки деталей на прессах Т1229, Т1229А и Т1232.

5. ВЫБОР ТИПОРАЗМЕРА ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ТРУДОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ

Типоразмер ЭГ пресса выбирается исходя из максимальных размеров заготовки для рассматриваемой номенклатуры деталей и величины максимального давления, необходимого для штамповки. После выбора пресса, на котором можно осуществить штамповку всей номенклатуры, проводится расчет трудоемкости штамповки каждой детали и определяется загрузка пресса. Если оказывается, что одного пресса недостаточно, то рассматривается вопрос о рациональности использования нескольких прессов. Целесообразно выбирать прессы меньшего типоразмера, обеспечивающие по техническим возможностям изготовление всех деталей. Стремление использовать пресс с большей энергией в импульсе с целью обеспечения более высокой производительности процесса за счет сокращения числа импульсов на штамповку детали или путем групповой обработки приводит к росту удельных капитальных затрат, которые, как правило, не удается компенсировать снижением трудоемкости.

Следует иметь в виду, что обеспечение более высокой производительности на прессе с большей энергией в импульсе весьма проблематично, так как с ростом типоразмера пресса растет длительность операций, предшествующих операции деформирования и следующих после нее, выполняемых механизмами пресса, таких, как перемещение стола, прижим и в большинстве случаев заполнение камеры водой. Кроме того, не всегда можно увеличивать энергию в импульсе, поскольку это может привести к разрыву заготовки или повышенному уточнению.

Целесообразность использования прессов меньших типоразмеров необходимо рассматривать наряду с прессами боль-

ших энергий для штамповки небольших деталей, даже если штамповка всего объема может быть обеспечена одним большим прессом. Стоимость оснастки, необходимой для штамповки нескольких небольших деталей на крупном ЭГ прессе, может оказаться соизмеримой со стоимостью небольшого пресса, поскольку размеры оснастки определяются не только размерами детали, но и присоединительными размерами пресса, в частности разрядной камеры, и минимальной высотой штампового пространства. Определение трудоемкости изготовления детали необходимо как для оценки экономических показателей процесса, так и для определения загрузки оборудования. Трудоемкость штамповки детали на ЭГ прессе определяется как сумма времени, отпущенного на выполнение вспомогательных операций по циклограмме пресса, и времени, необходимого на деформирование, что определяется числом требуемых для штамповки импульсов и частотой их следования. Последнее оговаривается характеристиками пресса; число импульсов определяется работой пластической деформации заготовки и параметрами ЭГ пресса:

$$n = \frac{A_{\phi}}{W_0 \eta}, \quad (3.18)$$

где A_{ϕ} — работа формоизменения заготовки; W_0 — энергия в импульсе (главный параметр оборудования).

Работу формоизменения при импульсной листовой штамповке представляют, как правило, исходя из удельной работы формоизменения и объема деформируемого металла [88]

$$A_{\phi} = \int_0^V A_y dV.$$

При расчете удельной работы формоизменения интенсивность деформации усредняется.

Следует отметить, что определение истинной деформации для двухосного напряженно-деформированного состояния — очень сложная задача, поэтому оценку величины деформации сводят к упрощению. В частности, У. У. Вуд считает возможным использовать средние значения деформаций, полученных исходя из одноосного растяжения материала [28]. Однако приведенные им зависимости для оценки деформации при штамповке днищ дают завышенные значения, так как не учитывается утяжка фланца. Вообще по оценке величины деформации при вытяжке, и в частности при вытяжке днищ существует несколько зависимостей, используемых разными авторами [28, 30, 51, 125].

Достаточно простая зависимость для определения средней степени деформации при вытяжке с перемещением фланца

получается на основании классических представлений о распределении деформаций при вытяжке [49, 107]:

$$\epsilon_{\text{ср}} = 1 - 0,5 \left[\frac{R_{\text{ф}}}{R_3} + \frac{\frac{R_{\text{м}}}{R_3}}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_{\text{ф}}}{R_3}\right)^2 + \left(\frac{R_{\text{м}}}{R_3}\right)^2}} \right],$$

где $R_{\text{ф}}$ — радиус фланца детали; R_3 — радиус заготовки; $R_{\text{м}}$ — радиус очка матрицы.

Значение КПД электрогидроимпульсных прессов (%) при выполнении расчета трудоемкости в зависимости от выполняемых операций можно брать в следующих пределах:

Раздача	8—15
Вытяжка малогабаритных деталей	4—8
Вытяжка крупногабаритных деталей локальным нагружением	< 3

Следует отметить, что в процессе штамповки детали КПД преобразования электрической энергии в работу пластической деформации меняется с каждым импульсом: от максимального при первом импульсе до минимального на последнем. Например, при вытяжке малогабаритных деталей КПД первого импульса может достигать 20 %, а КПД последних импульсов, когда большая часть заготовки прилегает к матрице и происходит деформирование отдельных участков детали таких, как угловые радиусы, может быть менее 1 %. Поэтому приведенные значения КПД по операциям усреднены.

При раздаче меньшее значение приведенного КПД принимается при отношении длины трубчатой заготовки к ее диаметру $L/D_3 < 1$, а большее — при $L/D_3 \geq 1,4$. При выборе КПД для вытяжки малогабаритных деталей меньшее значение принимается для деталей размерами более 250 мм, большее — для деталей до 150 мм.

Проведение технологических расчетов для каждой детали на этапе подбора номенклатуры способствует обеспечению наиболее эффективной загрузки электрогидроимпульсных прессов.

ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

1. ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

Электрогидроимпульсные прессы и установки для листовой штамповки отличаются использованием вместо пуансона рабочей жидкости, как правило, обыкновенной водопроводной воды, кратковременно действующей на заготовку в виде импульсов высокого давления длительностью от десятков микросекунд до нескольких десятков миллисекунд. Их начали использовать в производстве с 60-х годов на многих предприятиях как в нашей стране, так и за рубежом. Сначала применения ЭГ штамповки было спроектировано и изготовлено большое число прессов и установок.

Наиболее широкое распространение промышленное оборудование для ЭГ штамповки получило в США и Японии. В США установки изготавливаются рядом фирм как для собственных нужд, так и по заказам. Имеются специализированные фирмы «Electrohydraulic» по выпуску ЭГ оборудования для обработки металлов давлением и «Advanced Kinetics» по выпуску отдельных элементов и узлов ЭГ установок [135]. Выпускаемое этими фирмами оборудование имеет широкий диапазон технологических возможностей.

Созданы установки для штамповки куполообразных днищ диаметром свыше 2000 мм (фирма «Republic Aviation Co» совместно с ВВС США).

Фирма «Rohr Aircraft Corporation» изготовила установку, которая производит формовку деталей диаметром от 6,5 до 405 мм и длиной до 760 мм [135]. В Японии с середины 60-х годов выпуском промышленного оборудования для ЭГ штамповки занимаются фирмы «Jарах» и «Shimadzu» [36, 126, 140]. Краткая техническая характеристика некоторых образцов оборудования этих фирм приведена в табл. 17.

В Советском Союзе создано свыше 40 моделей ЭГ прессов и установок для обработки металлов давлением. Большинство отечественного ЭГ оборудования для этих целей, в том числе

Таблица 17. Технические характеристики оборудования для ЭГ штамповки фирм «Jарах» и «Shimadzu» (Япония)

Показатель	«Jарах»			«Shimadzu»	
	PF — 50	PF — 100	SHT — 45	SHT — 45	SHE — 45
Наибольшая энергия в импульсе, кДж	50	100	45	45	45
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	6	6	30	30	30
Габаритные размеры матрицы, мм	450 × 450 × 300	1300 × 700 × 650	680 × 580 × 450	700 × 620 × 500	880 × 780 × 300
Наибольшее усилие прижима, кН	2200	3000	1000	900	1000
Наибольшее давление в гидро-системе, Па	70 · 10 ⁵	70 · 10 ⁵	70 · 10 ⁵	70 · 10 ⁵	70 · 10 ⁵

Таблица 18. Основные технические данные некоторых ЭГ прессов типа «Удар»

Показатель	Модель				
	«Удар-1»	«Удар-12М»	«Удар-20С»	«Удар-11»	«Удар-17»
Наибольшая энергия в импульсе, кДж	12,5	10	20	150	80
Наибольшие размеры заготовки при вытяжке (длина, ширина), мм	2500 × 1200	400 × 400	500 × 500	2000 × 2000	2400 × 1400
при формовке (диаметр, высота)	—	250 × 275	500 × 700	—	—
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	10	10	10	50	50
Масса, кг	50 000	3350	6600	94 000	60 000
					600 × 1000
					46 300

прессов и установок (табл. 18), являются опытно-промышленными образцами, которые проектировались для изготовления определенной номенклатуры деталей конкретного заказчика. Некоторые ЭГ прессы, созданные на базе опытно-промышленных образцов, рекомендованы для серийного производства (табл. 19). Каждая установка или пресс для ЭГ штамповки состоит из двух основных частей — энергетической и технологической.

Таблица 19. Основные технические данные ЭГ прессов, рекомендованных к серийному производству

Показатель	T1220	T1223	T1225	T1228	T1231
Наибольшая энергия в импульсе, кДж	10	20	32	64	128
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	10	10	40	40	40
Наибольшие размеры заготовок, мм					
плоских (диаметр)	400	650	400	800	1200
пространственных (диаметр, высота)	250 × 275	400 × 450	300 × 250	800 × 350	1200 × 500
Масса, кг	33 500	7300	8100	30 000	55 000

Из упрощенной принципиальной электрической схемы (см. рис. 1) видно, что энергетическая часть электрогидроимпульсных прессов и установок состоит из следующих основных элементов: повышающего трансформатора 1, высоковольтного выпрямителя 2, батареи импульсных конденсаторов 3, разрядника 4 и электродов 5.

Все эти элементы, кроме электродов, совмещены в одном агрегате — генераторе импульсных токов (ГИТ), предназначенном для генерирования высоковольтных импульсов и передачи их на электроды. В настоящее время генераторы импульсных токов выпускаются отдельными унифицированными блоками и используются для разных типоразмеров установок и прессов в сочетании с технологическими узлами различного назначения.

Технологическая часть ЭГ установки или пресса состоит из технологического узла (собственно пресса) и агрегатов: гидроагрегата, станций водоснабжения и вакуумирования (рис. 46). В прессах малых энергий часто отсутствуют станции водоснабжения (вода поступает из водопровода) и вакуумирования, а гидроагрегат встраивается в техузел, при этом технологическая часть остается нерасчлененной и состоит из одного технологического узла — устройства для размещения оснастки.

Он включает в себя в общем случае станину (как правило), разрядную камеру с электродами, механизмы перемещения оснастки, ее зажима, выталкивания детали, смыкания и размыкания частей разъемных матриц и т. д.

Кроме того, в состав пресса входит система управления, выносимая в отдельный шкаф, пульт управления чаще всего выполняют отдельным, редко встроенным на небольших прессах. В зависимости от назначения прессы отличаются энергетическими характеристиками (параметрами ГИТ), размерами обрабатываемых заготовок или штампового пространства и со-

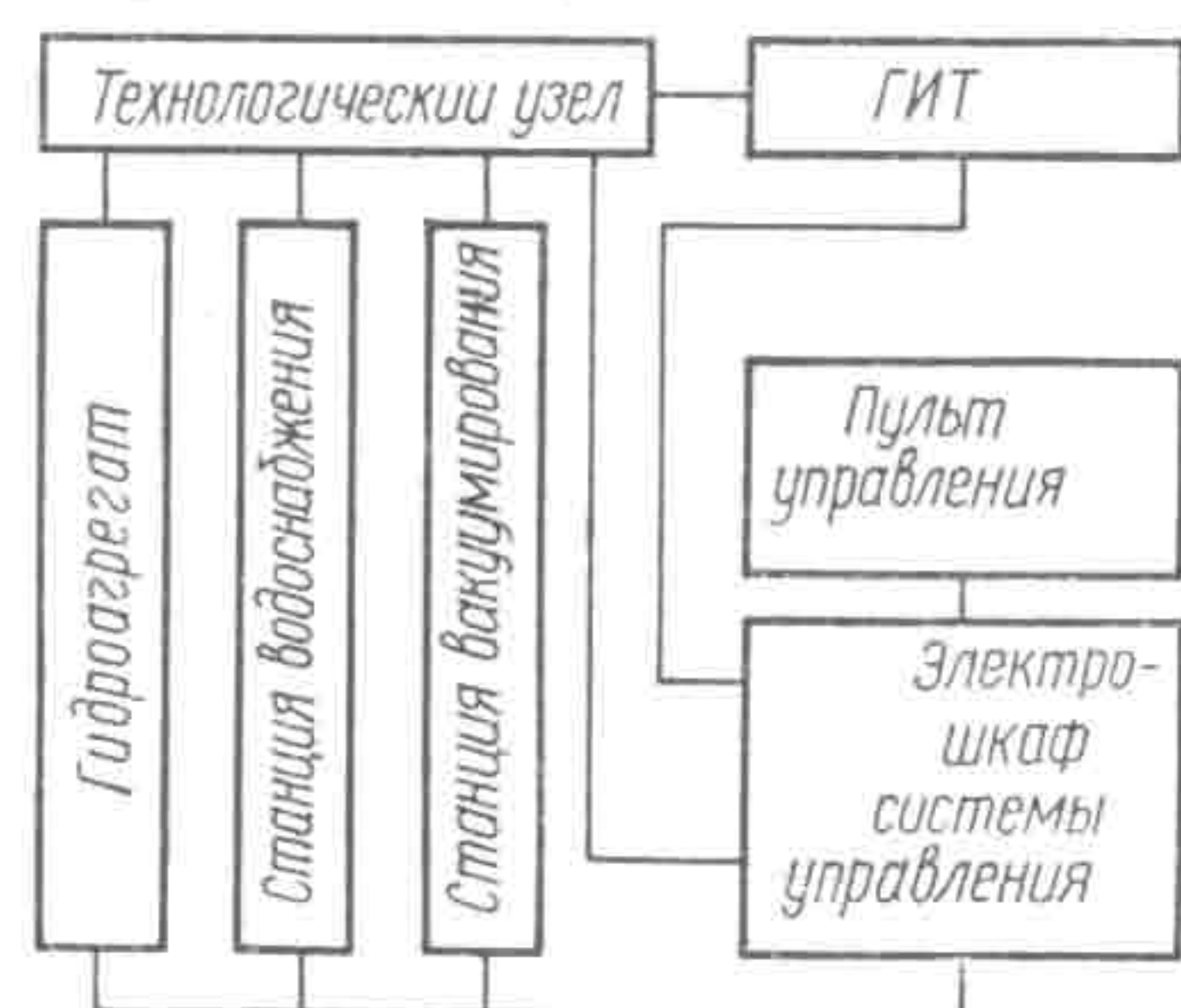


Рис. 46. Типовая схема агрегатирования ЭГ прессы.

ответственно конструктивной схемой технологического узла. К основным энергетическим характеристикам ГИТ относятся: энергия в импульсе, выражаемая в килоджоулях; рабочее напряжение (напряжение, до которого заряжается конденсаторная батарея) — в киловольтах; частота следования импульсов при максимальной энергии в импульсе — в импульсах в секунду.

Максимальная энергия в импульсе различных типов отечественных ЭГ прессов лежит в диапазоне от 10 до 160 кДж, максимальное рабочее напряжение от 10 до 50 кВ, частота следования импульсов от 0,125 до 0,5 имп/с. Каждый пресс может работать на различных режимах, так как схема предусматривает варьирование энергий в импульсе путем изменения величины рабочего напряжения. Диапазон изменения напряжения различен. Он может быть от 1 до 10 кВ, как, например, на комбинированной установке ЭМОМ-25, разработанной в Физико-техническом институте АН БССР [114]; от 5 до 10 кВ в прессах Т1220, Т1223, «Удар-20С», Т1226 и от 35 до 50 кВ в прессах больших энергий «Удар-16К», «Удар-17», Т1229, Т1229А и др. Например, изменение рабочего напряжения в диапазоне от половины максимального до максимального меняет энергию в импульсе от $0,25 W_{\max}$ до W_{\max} , т. е. в более широком диапазоне, что позволяет в свою очередь менять характеристики нагружающего импульса в зависимости от характеристик обрабатываемых заготовок.

Обобщая опыт по созданию и эксплуатации ряда ЭГ прессов и установок, ПКБЭ АН УССР разработан «Типоразмерный ряд ЭГ прессов и установок для обработки металлов давлением», который в соответствии с ГОСТ 8032—56 классифицирует все ЭГ прессы и установки по величине главного параметра —

энергии в импульсе. Типажный ряд ЭГ установок по значениям своего главного параметра совпадает с типажным рядом на магнитно-импульсные установки для обработки металлов давлением, что позволяет унифицировать энергетическое оборудование машин обоих типов.

В табл. 20 приведен «Типоразмерный ряд ЭГ прессов и установок для обработки металлов давлением» с энергией в импульсе от 10 до 160 кДж. Типоразмерный ряд включает две группы прессов: прессы малых энергий с энергией в импульсе до 40 кДж включительно и прессы для штамповки крупногабаритных деталей с энергией в импульсе 80 и более кДж. Энергия

Таблица 20. Основные технические данные ЭГ прессов и установок для обработки металлов давлением типоразмерного ряда

Энергетические характеристики		Наибольшие размеры заготовок, мм			
		плоских		трубчатых	
Номинальная энергия в импульсе, кДж	Наибольшее напряжение, кВ	длина × ширина	диаметр	высота	толщина при $\sigma_B < 25 \times 10^7 \text{ Н/м}^2$
10	10	400 × 400	250	275	4
20	10	650 × 650	400	450	5
40	10	900 × 900	600	500	6
40	50	900 × 900	600	500	6
80	50	1400 × 1400	800	1000	8
160	50	2000 × 2000	1500	1200	10

в импульсе выбрана в качестве главного параметра электрогидроимпульсных прессов и установок с самого начала создания этого оборудования. Этот выбор не случаен, так как энергия в импульсе — наиболее подходящая характеристика, отвечающая требованиям, предъявляемым к главному параметру.

Однако энергия в импульсе не является достаточно информативной характеристикой для оценки технологических возможностей прессы или установки, поскольку эффективность ее преобразования в работу деформирования и деформирующее усилие даже на одном и том же прессе различны в зависимости от размеров и формы штампуемой детали, схемы нагружения и выполняемой операции. Поэтому наряду с общепринятой для прессового оборудования характеристикой — размерами штампового пространства, которые определяют размеры штампуемых заготовок и деталей (для ЭГ прессов и установок часто указывают непосредственно размеры штампуемых заготовок), как правило, приводится дополнительная характеристика — толщина штампуемого материала в зависимости от характеристик материала и вида выполняемой операции. Эта характеристика — ориентировочна. В каждом конкретном случае в зависи-

мости от формы и размеров детали необходимо уточнять возможность ее штамповки на рассматриваемом оборудовании расчетным или экспериментальным путем.

Характерным параметром ЭГ прессов и установок является частота следования импульсов, которая влияет на производительность оборудования, хотя и неоднозначно ее определяет. Штамповка проводится, как правило, в многоимпульсном режиме, причем число импульсов, требуемых для получения разных деталей, различно и может колебаться от одного до нескольких десятков на одном и том же прессе. Поэтому в качестве дополнительной ориентировочной характеристики часто приводят производительность пресса, причем в достаточно широком диапазоне. Например, для пресса Т1223 производительность дается от 10 до 30 деталей в час. Максимальная производительность достигается при штамповке мелких деталей.

Электрогидроимпульсные прессы и установки, как и любое другое оборудование, отличаются по назначению и величине главного параметра — энергии в импульсе. С величиной энергии в импульсе связаны размеры и толщина штампуемых заготовок. Исключение составляют специализированные установки, где эта связь не всегда соблюдается в той мере, в какой это принято для универсальных прессов. Например, специализированная установка Т1226, имеющая энергию в импульсе 40 кДж, предназначена для штамповки деталей, размеры оснастки для которых могли бы пройти в штамповке пространства пресса Т1220, имеющего энергию в импульсе всего 10 кДж. Это сделано с целью обеспечения больших деформирующих усилий, необходимых при рельефной формовке и калибровке, а также для повышения производительности. Наоборот, пресс «Удар-1», имевший энергию в импульсе 12,5 кДж, был предназначен и использовался для штамповки методом локального нагружения крупногабаритных панелей длиной до 2,5 м, так как он проектировался с целью заменить крупное прессовое оборудование обычного типа при штамповке конкретных панелей мелкими партиями.

Все ЭГ прессы и установки можно разделить на три группы: универсальные, специализированные и комбинированные.

Универсальные прессы и установки созданы для использования в опытном и мелкосерийном производстве при штамповке широкой номенклатуры деталей. На них можно выполнять различные штамповочные операции. Это оборудование составляет основную часть всех выпускаемых ЭГ прессов и установок.

Специализированные установки создаются, как правило, на основе универсальных и предназначаются для выполнения какой-либо одной штамповочной операции или штамповки из одного типа заготовок. Для этих установок используются

генераторы импульсных токов основного типоразмерного ряда универсальных прессов.

Создание комбинированных установок — одно из новых направлений в поисках наиболее эффективного вида оборудования, в котором используется электрогидравлический эффект. Эти установки обеспечивают возможность деформирования различными способами, например гидростатическим, гидровзрывным и ЭГ способом или ЭГ способом и магнитоимпульсным и т. п.

Создание ЭГ оборудования для листовой штамповки в полном соответствии с требованиями, предъявляемыми к промышленному оборудованию Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР, началось в нашей стране только в 70-е годы. Первым был создан и рекомендован к серийному производству в 1972 г. пресс «Удар-12М», получивший в последствии марку Т1220. Позднее были рекомендованы на серию прессы Т1223, Т1225, Т1228, Т1231. Внедрение в промышленность серийного оборудования началось с 1973 г. Накопленный опыт эксплуатации свидетельствует о целесообразности продолжения работ по совершенствованию конструктивных схем ЭГ прессов и установок и их отдельных элементов. Многообразие в возможности выбора конструктивных схем электрогидроимпульсных прессов и установок в поиске наиболее оптимальных вариантов наложило отпечаток не только на оборудование различных разработчиков, но и на оборудование разного типоразмера и назначения. Некоторые наиболее существенные конструктивные особенности ЭГ прессов и установок рассматриваются ниже.

2. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕССЫ И УСТАНОВКИ

Универсальные ЭГ прессы и установки — основная часть всего созданного оборудования данного типа. Эти прессы имеют широкие технологические возможности с точки зрения числа выполняемых штамповочных операций при деформировании как плоских, так и пространственных заготовок (в виде отрезков труб, сварных оболочек, предварительно вытянутых стаканов и т. д.).

Технологический узел универсальных отечественных прессов и установок выполнен по наиболее распространенной конструктивной схеме — вертикальная четырехколонная станина с верхним относительно заготовки расположением разрядной камеры, которая закрепляется на прижимной траверсе. Прессы имеют выдвижной стол и многие снабжены выталкивателем. К универсальным прессам можно отнести следующие: Т1220,

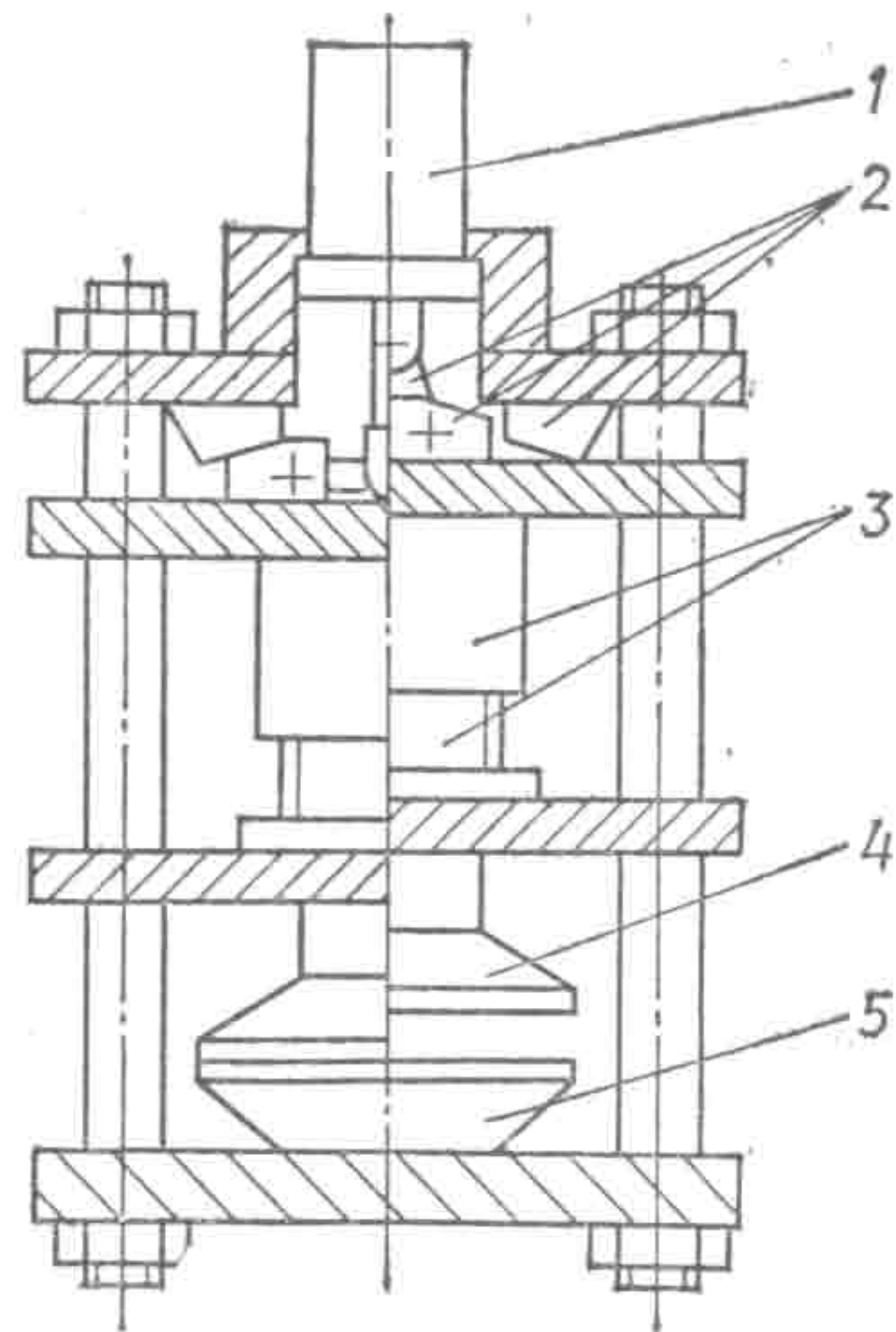


Рис. 47. Схема технологического узла:
1 — гидроцилиндр; 2 — клинорычажный механизм; 3 — механизм изменения высоты штампового пространства; 4 — разрядная камера; 5 — матрица.

T1223, T1225, T1228, T1231, характеристики которых приведены в табл. 19, и прессы типа ПЭГ (табл. 21). Кроме того, ПКБЭ АН УССР разработаны прессы T1229А и T1232 для штамповки крупногабаритных деталей.

Принятая конструктивная схема с верхним расположением разрядной камеры — не единственно возможная для универсальных прессов. Например, фирмой «Ярах» принята для своих прессов PF-50

и PF-100 схема с нижним расположением разрядной камеры. Прессы этой фирмы имеют еще одну особенность — в качестве рабочей жидкости в них используется не вода, а масло. Прессы имеют достаточно широкие технологические возможности и используются для изготовления большой номенклатуры деталей как из плоских, так и трубчатых заготовок. Своеобразна конструктивная схема модификации для штамповки деталей из трубчатых заготовок прессы и другой японской фирмы — «Shimadzu». Эта фирма имеет модификации прессов для штамповки деталей из плоских заготовок, у которых технологический узел имеет вертикальную четырех-

Таблица 21. Технические характеристики прессов типа ПЭГ

Параметр	ПЭГ-25	ПЭГ-60М	ПЭГ-100М	ПЭГ-150
Энергия в импульсе, кДж	25	60	100	150
Максимальные размеры штампуемых заготовок (длина × ширина), мм	580 × 580	1150 × 950	1550 × 1150	1800 × 1300
Число разрядных контуров, шт	1	2—3	3—5	4—8
Минимальная площадь технологического участка, м ²	13,5	37	44	55
Масса прессы, кг	8200	27 000	32 000	46 400

Примечание. Максимальное рабочее напряжение этих прессов составляет 40 кВ.

колонную станину с возможностью установки разрядной камеры как над заготовкой, так и под ней, а также модификацию прессы для штамповки деталей из трубчатых заготовок, технологический узел которой представляет собой горизонтально расположенную станину. Обе модификации комплектуются одинаковыми генераторами импульсных токов с запасаемой энергией 45 кДж при напряжении 30 кВ.

Несмотря на общность конструктивной схемы технологического узла, универсальные прессы отечественного производства имеют существенные различия в конструкции механизмов зажима оснастки, электродов, а также схем нагружения заготовки в прессах, предназначенных для штамповки крупногабаритных деталей.

В этих прессах используются два типа механизмов зажима оснастки — клинорычажный, с приводом от гидроцилиндра, и непосредственно гидроцилиндрами. Клинорычажные механизмы зажима оснастки, которые используются в прессах ПКБЭ АН УССР моделей T1220, T1223, T1229А и T1232, обеспечивают наиболее жесткое замыкание рабочего объема жидкости в разрядной камере, а также жесткое смыкание полуматриц при штамповке деталей из трубчатых заготовок [79]. Использование таких механизмов позволяет исключать раскрытие оснастки при разряде, действие импульсов давления, создаваемых в камере при разряде на гидропривод, и создавать большие усилия прижима при использовании гидропривода с невысоким рабочим давлением. Конструктивно эти механизмы сложнее, чем прижимы непосредственно гидроцилиндрами, так как содержат дополнительные подвижные траверсы и мощные винтовые пары для изменения высоты штампового пространства (рис. 47). Подобные схемы зажима оснастки есть и на японских ЭГ прессах.

Прессы типа ПЭГ и прессы T1225, T1228, T1231 имеют прижим в виде гидроцилиндра, приводимого в действие от гидроагрегата с высоким рабочим давлением. Эффективность гидроприжима ниже из-за податливости жидкости при импульсном нагружении. Конструкция одного из этих прессов, ПЭГ-100Н, приведена на рис. 48.

Пресс имеет четырехколонную станину 1, в которой гидроцилиндром камера 2 прижимается к матрице 5, установленной на выдвижном столе. Камера снабжена диафрагмой 4. Энергия, накопленная ГИТ 6 выделяется между электродами 3.

Имеют различия прессы и по конструкции электродов и схем нагружения заготовки при деформировании. Прессы T1220 и T1223 (рис. 49) в качестве электродной системы имеют разрядную коаксиальную головку, в которой в качестве изолятора используются сменные детали из полиэтилена, «плюсовой»

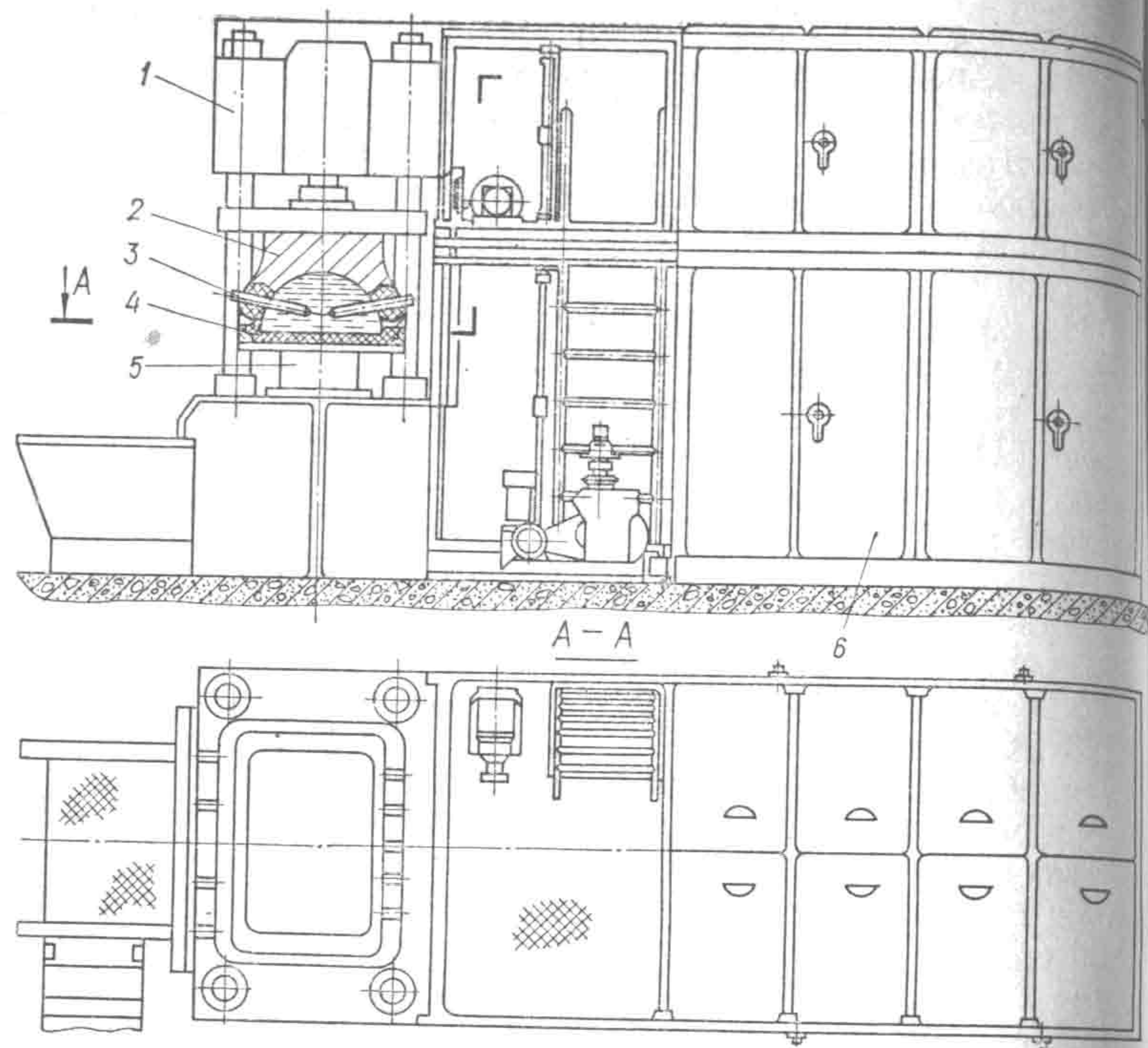


рис. 48. Пресс модели ПЭГ-100Н.

электрод выполнен также сменным, а разряд осуществляется на «минусовое» кольцо, контактирующее с минусовым выводом конденсаторной батареи и корпусом пресса (рис. 50, а—в). Разряд осуществляется без инициирования путем пробоя межэлектродного промежутка. Эти прессы снабжены разрядной головкой, к которой подстыковываются камеры-прижимы, входящие в оснастку. Полость разрядной головки и камеры-прижима образуют разрядную камеру. Использование камер-прижимов минимальных объемов и оптимальных форм применительно к штампуемой детали оптимизирует размеры и форму разрядных камер и повышает эффективность использования энергии. Все универсальные прессы, предназначенные для штамповки небольших деталей, имеют один разрядный промежуток, и деформирование происходит с «общей схемой нагружения», т. е. с относительно равномерным распределением деформирующего давления по поверхности заготовки. Исключение составляет штамповка со специальными концентраторами силового поля, вводимыми в оснастку. Прессы типа ПЭГ и Т1225, Т1228 и Т1231 имеют универсальные разрядные камеры со стержневыми электродными системами. Прессы, предназначенные для

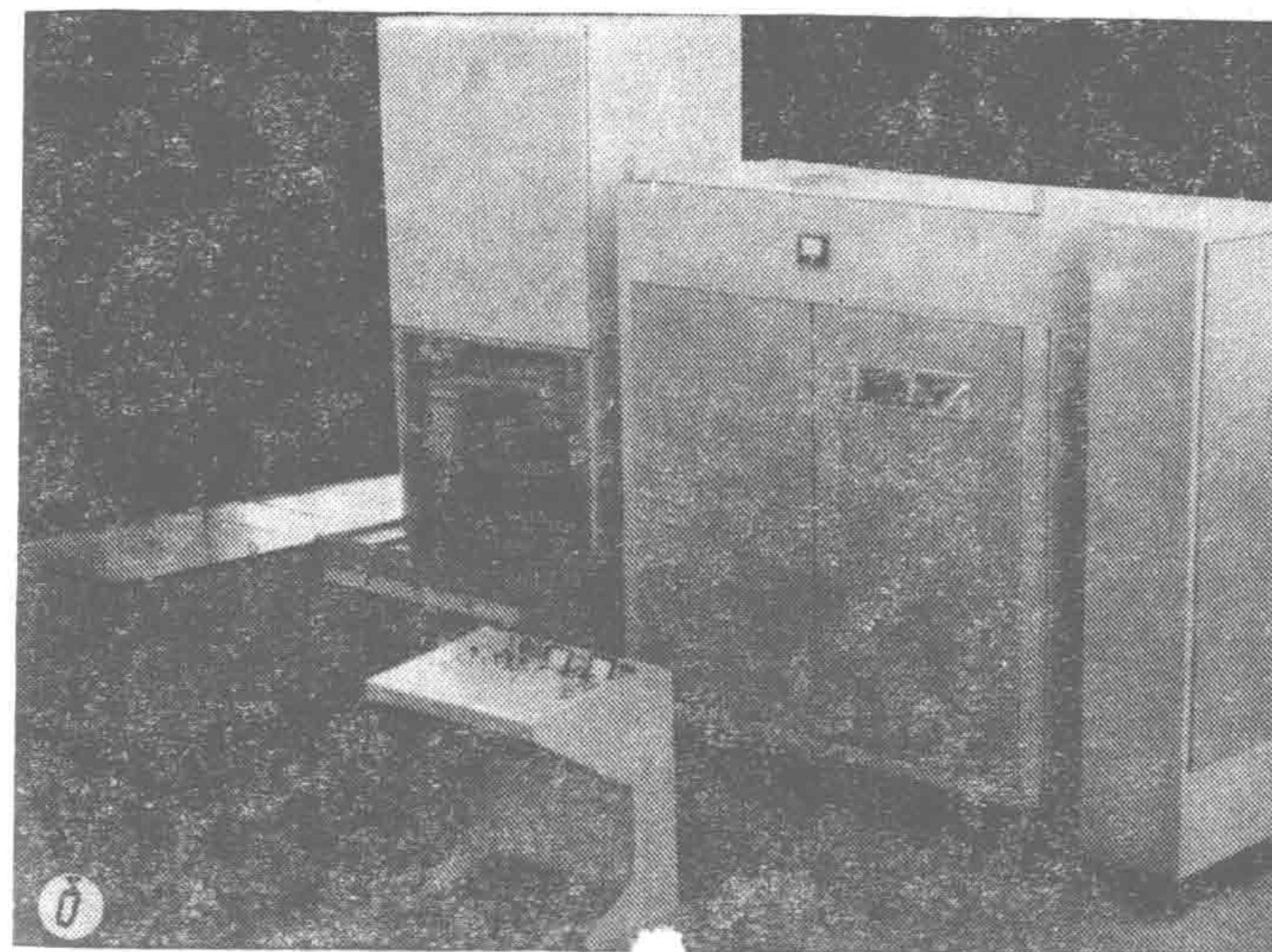
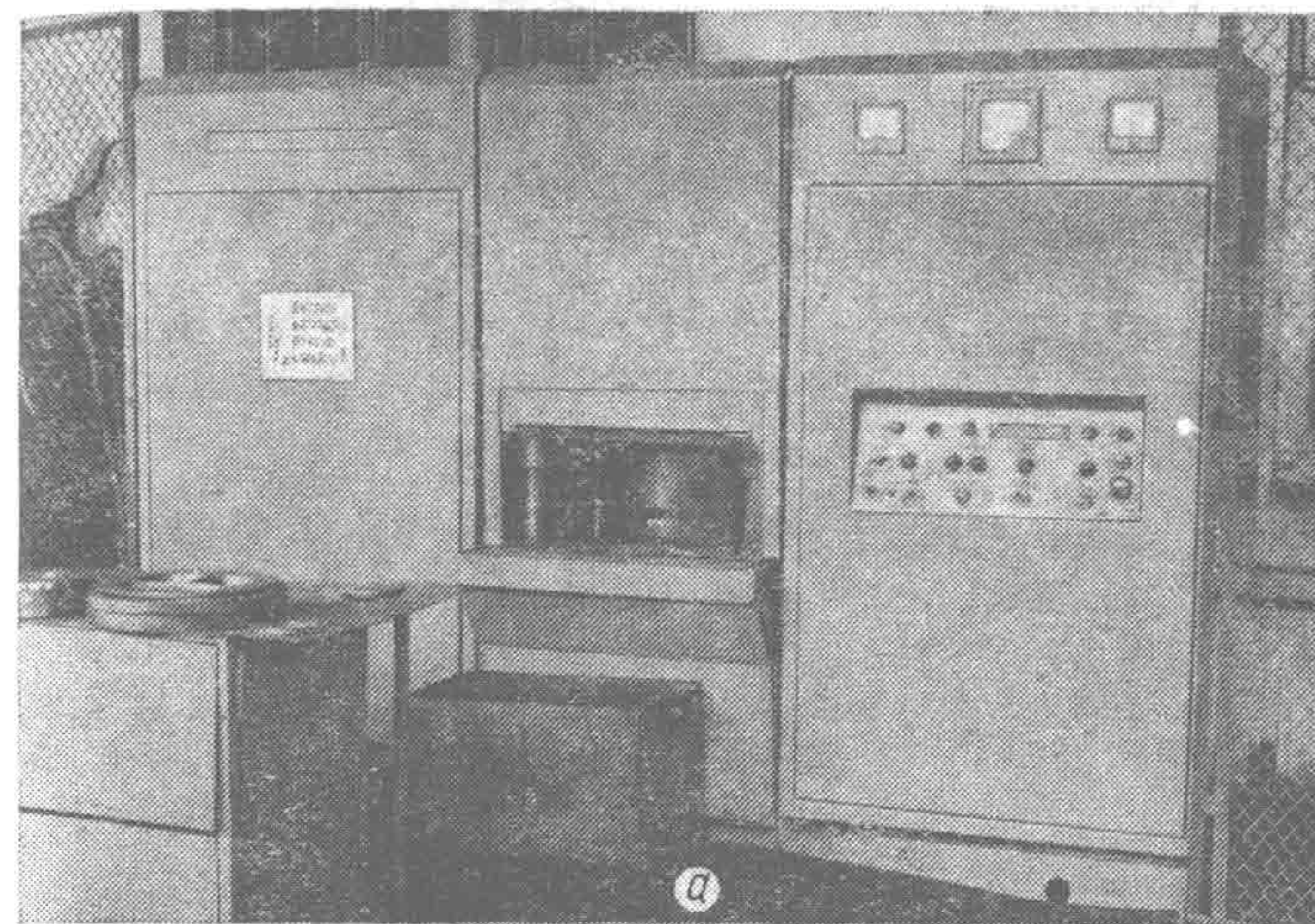


Рис. 49. Прессы Т1220 (а) и Т1223 (б).

штамповки крупных деталей, имеют несколько пар электродов, разряд на которых осуществляется одновременно, реализуя, таким образом, общую схему нагружения заготовки. Разрядный промежуток в этих прессах также не инициируется.

В прессах Т1229А, Т1229, Т1232, предназначенных для штамповки крупных деталей, может осуществляться схема штамповки как с общим нагружением заготовки, так и с локальным

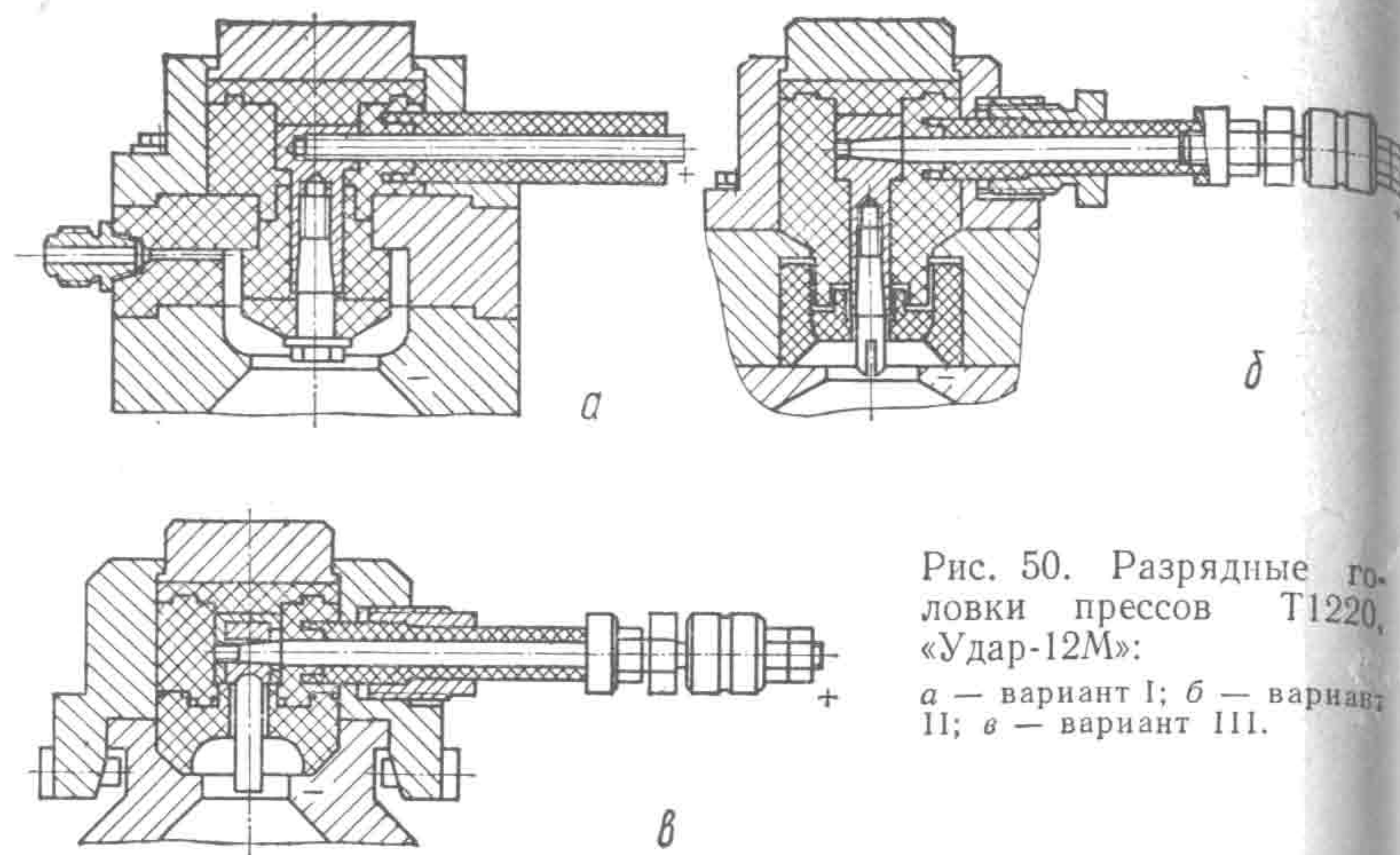


Рис. 50. Разрядные головки прессов Т1220, «Удар-12М»:
 а — вариант I; б — вариант II; в — вариант III.

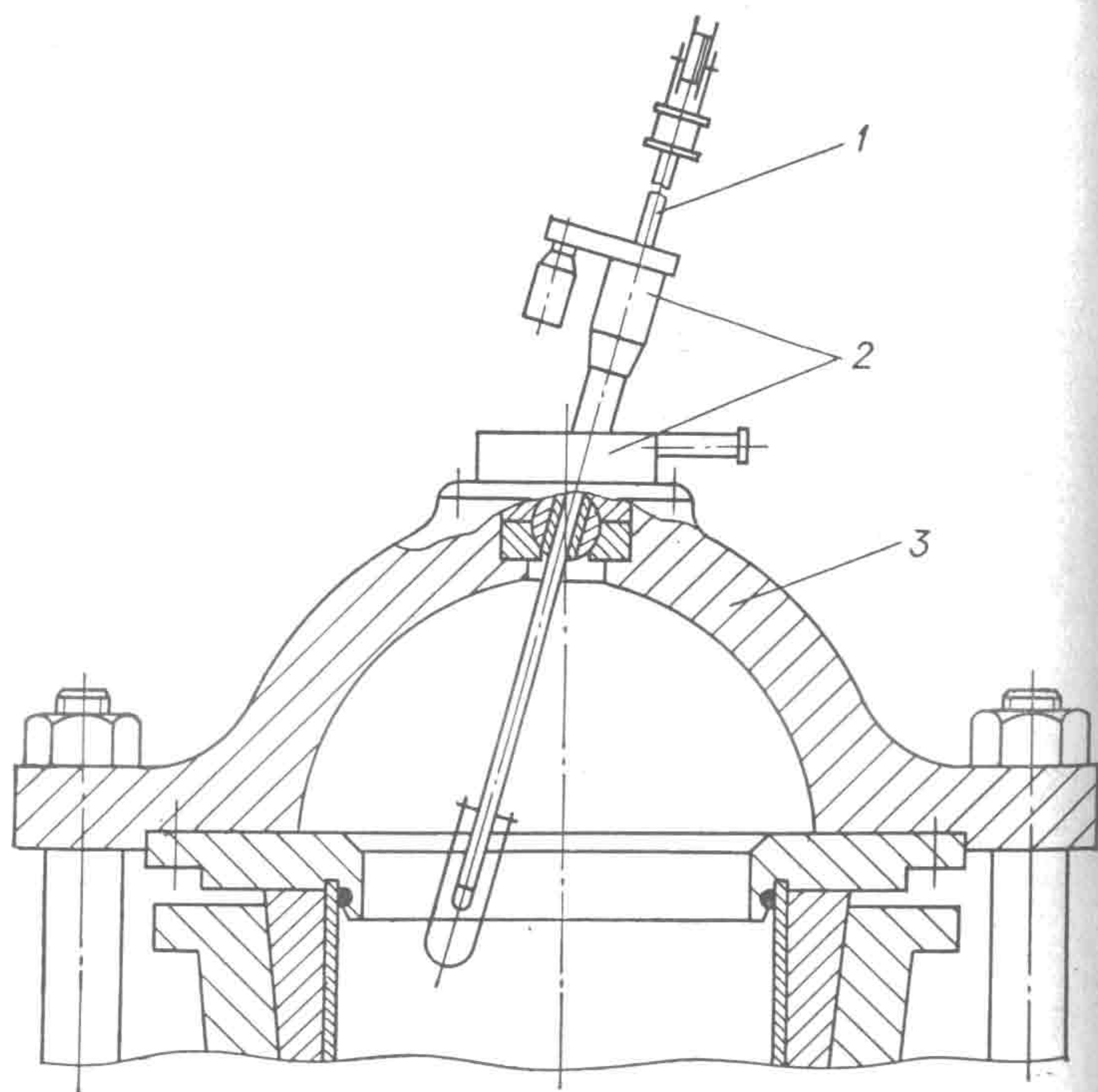


Рис. 51. Разрядная камера с подвижным электродом:
 1 — электрод; 2 — механизм перемещения электрода; 3 — камера.

нагрузением отдельных ее участков. Это достигается использованием в универсальной разрядной камере подвижного электрода (рис. 51), что позволяет менять расположение разрядного промежутка в камере в процессе штамповки. Вся энергия выделяется в одном разрядном промежутке, инициируемом проволочкой. Для подачи проволочки электроды снабжены специальными подающими механизмами, которые подают проволоку, сматывая ее с барабана перед каждым разрядом. Перемещение разрядного промежутка и инициирование позволяют наиболее эффективно использовать энергию, накапливаемую в ГИТ, и создавать значительно большие деформирующие усилия, чем в прессах с общей схемой нагружения. За основу такого конструктивного решения приняты локальная схема нагружения и электрод-автомат, использовавшиеся на одном из первых ЭГ прессов для штамповки крупногабаритных днищ «Удар-11», имеющего энергию в импульсе до 150 кДж, на котором штамповались днища диаметром до 2000 мм.

Прессы Т1220 и ПЭГ-25 для штамповки небольших деталей компонуются на одной раме. Остальные прессы имеют отдельную компоновку. В связи с тем, что в прессах Т1229А и Т1232 вся запасаемая энергия выделяется в одном разрядном промежутке, что соответственно сопровождается повышенным шумовым эффектом, управление прессами осуществляется из специальной звукоизолированной пультовой.

3. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕССЫ И УСТАНОВКИ

Для выполнения какой-либо одной штамповочной операции или штамповки из одного типа заготовок, создаются специализированные ЭГ прессы и установки с различными назначениями и соответственно существенно отличаются конструктивными схемами технологических узлов. Как уже отмечалось ранее, для специализированных прессов взаимосвязь главного параметра с размерами заготовок отличается от принятой для универсальных прессов. К специализированным относится ряд первых отечественных прессов, из которых можно отметить прессы «Удар-1М» и «Удар-11», явившиеся аналогами многих конструктивных решений в более поздних разработках.

На прессе «Удар-1М» с энергией в импульсе 12,5 кДж благодаря использованию локального нагружения с подвижной разрядной камерой штамповались панели теплообменников с фигурным расположением профильных каналов длиной до 2500, шириной до 1250 и толщиной до 2,5 мм. Разрядная камера

перемещалась над заготовкой по заданной траектории с помощью механизма перемещения во взаимно перпендикулярных направлениях или по любой другой траектории при совмещенной работе обоих приводов (рис. 52).

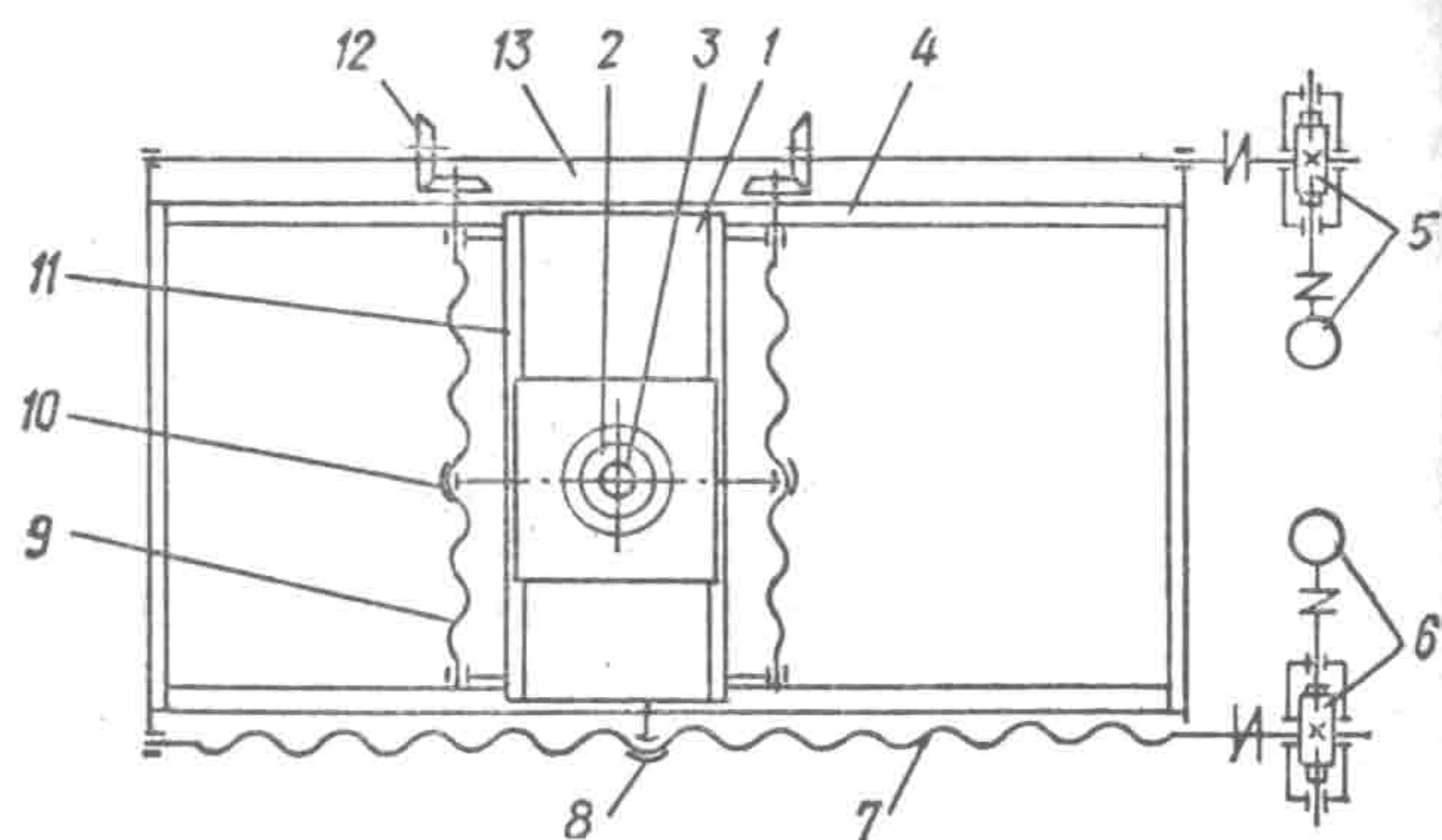


Рис. 52. Схема механизма перемещения электрода ЭГ пресса «Удар-1М»:

1 — каретка; 2 — разрядная камера; 3 — электрод; 4 — продольные направляющие; 5, 6 — приводы; 7, 9 — винты; 8, 10 — гайки; 11 — поперечные направляющие; 12 — конические пары; 13 — валик.

Пресс «Удар-11» был создан для штамповки днищ диаметром до 2000, глубиной до 600 мм при толщине материала до 10 мм. Штамповка на этом прессе осуществлялась с использованием

схемы локального нагружения в открытой камере с помощью перемещающегося в пространстве электрода в полярных координатах. Механизм перемещения электрода (рис. 53) выполнен в виде червячного венца 4, горизонтально смонтированного посредством подшипника 7 на раме 6 над разрядной камерой технологического узла установки. Внутри червячного венца

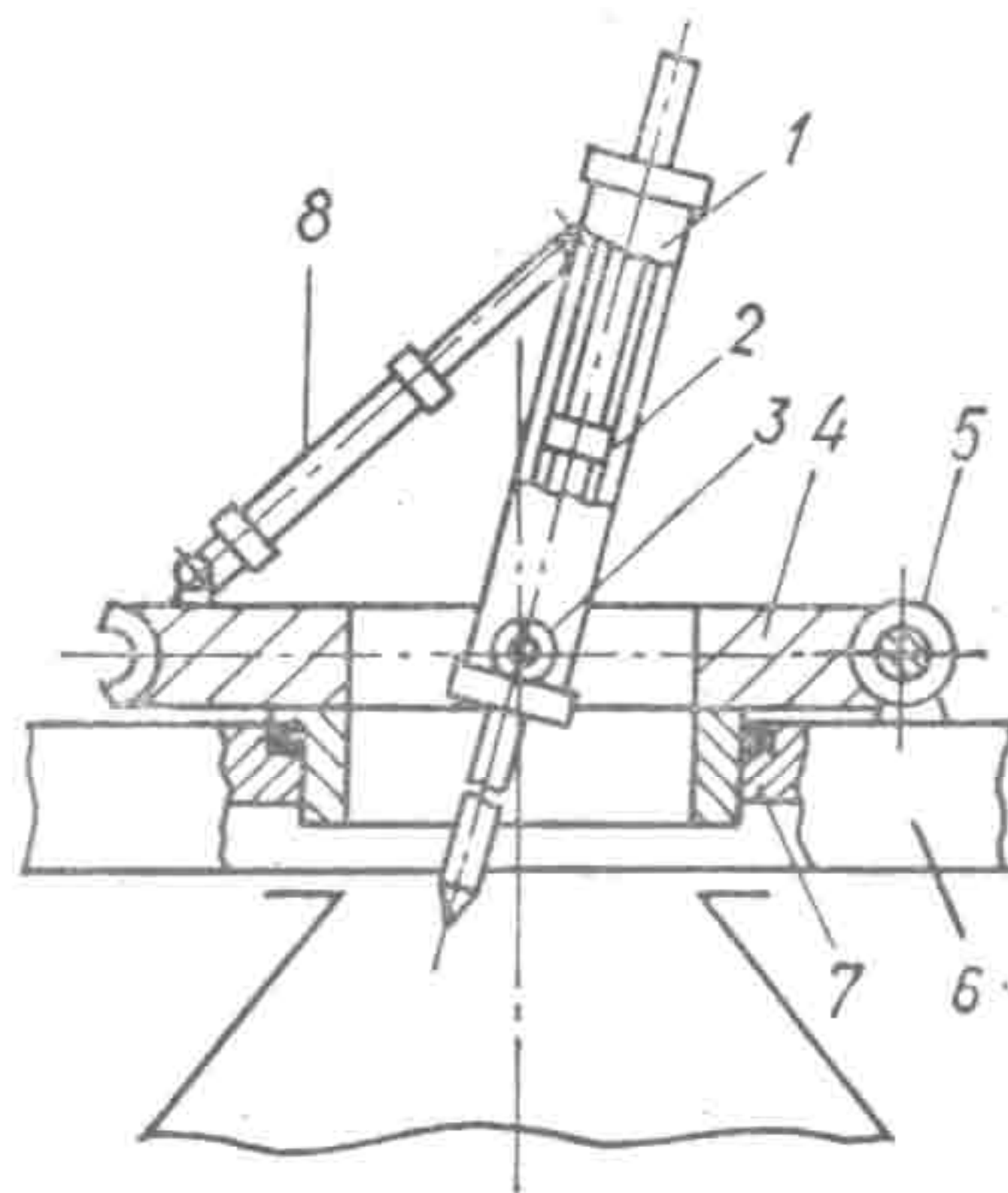


Рис. 53. Механизм перемещения электрода установки «Удар-11».

с помощью цапф 3 закреплена гильза 1. Через нее пропущен электрод 2, снабженный поршнем, образующим с гильзой силовой цилиндр осевого перемещения электрода. Этот цилиндр имеет возможность наклоняться относительно цапф с помощью цилиндра 8, связывающего гильзу с торцом червячного венца.

Поворот оконечности электрода по окружности осуществляется червячным венцом 4 и «червяком» 5. Разрядный промежуток электрода инициировался стальной проволочкой, подава-

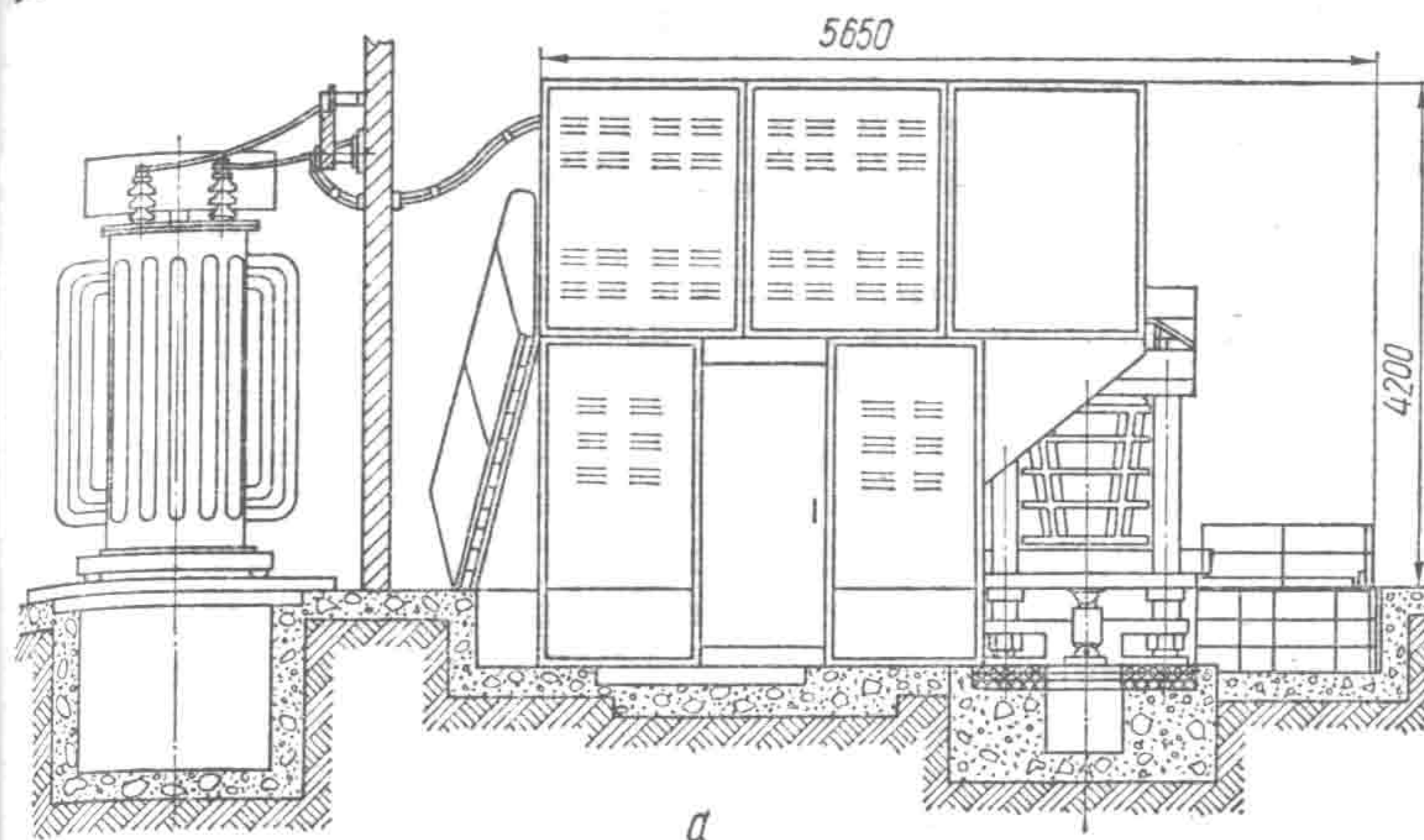


Рис. 54. Общий вид пресса «Удар-16К»:

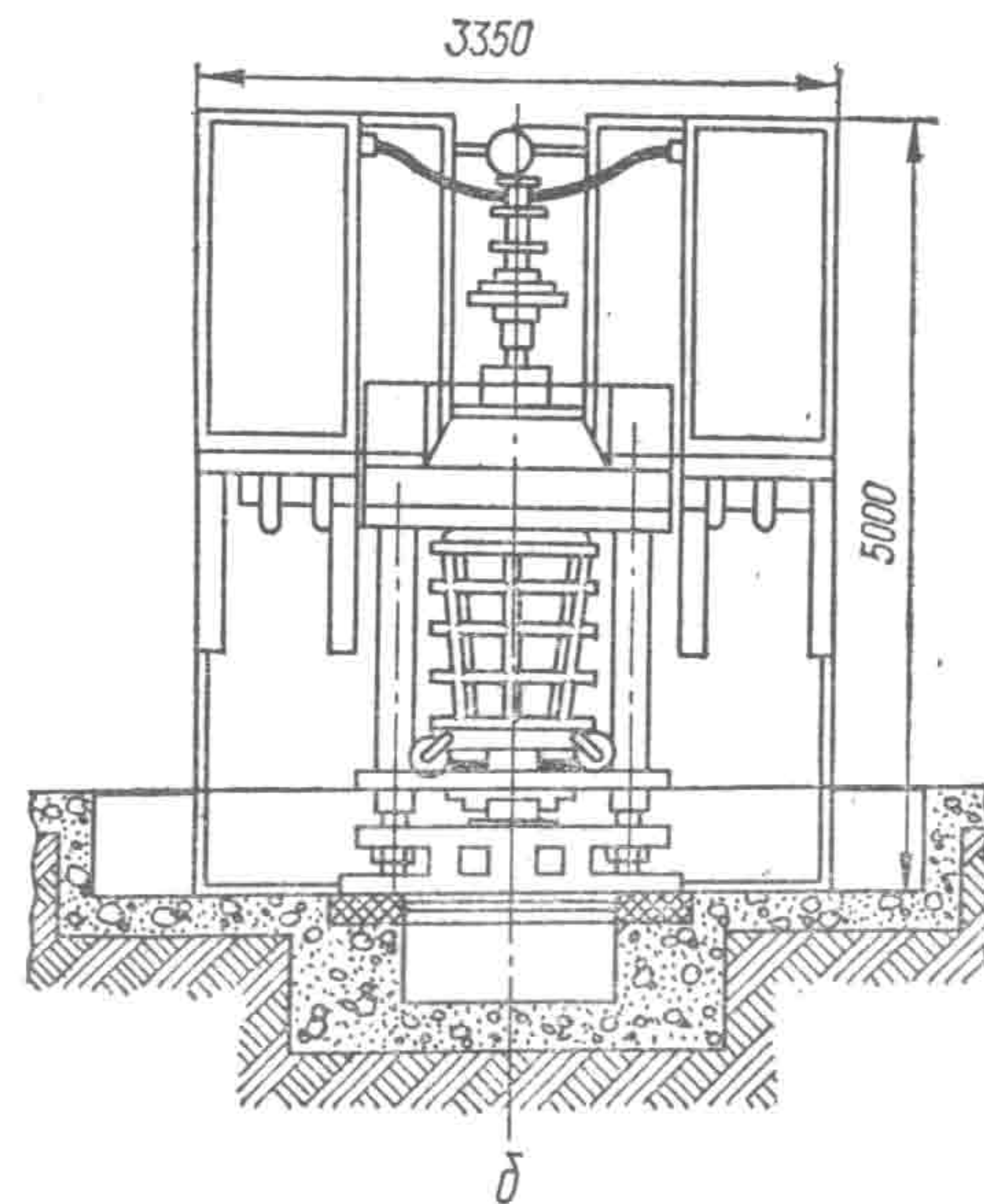
а — сбоку; б — спереди.

емой с барабана, укрепленного на конце электрода, автоматическим механизмом подачи, встроенным в электроде. Пресс имел оригинальную схему зажима оснастки — в виде кремальеры.

Из более поздних разработок специального оборудования следует отметить прессы «Удар-16К», Т1226 и Т1032.

Пресс «Удар-16К» предназначен для калибровки сварных оболочек

диаметром до 600 мм и высотой до 1000 мм (см. табл. 18). Созданию этого пресса предшествовало проведение исследований по определению осуществимости калибровки таких оболочек, выбору режимов, наиболее оптимальных схем загрузки и т. д. Технологический узел пресса «Удар-16К» (рис. 54) имеет четырехколонную станину, сверху колонны объединены



разрядной камерой, на которой размещен механизм перемещения электрода с электродом. Зажим оснастки осуществляется клинорычажным механизмом, размещенным под подвижной траверсой с расположенным на ней выдвижным столом.

Выталкивание детали осуществляется вне штампового пространства после выдвижения оснастки с помощью гидроцилиндра. Механизм перемещения электрода обеспечивает возможность менять положение электрода по трем координатам. Разрядный промежуток электрода перед каждым разрядом закорачивается стальной проволокой с помощью механизма ее подачи, приводимого в действие сжатым воздухом. Пресс может работать как в ручном, так и в полуавтоматическом режимах.

К недостаткам конструктивной схемы этого прессы можно отнести отсутствие механизмов регулировки высоты штампового пространства, что приводит к необходимости изготавливать специальные, достаточно сложные проставки при переходе на штамповку деталей с высотой меньше максимальной.

Оригинальную конструкцию имеет пресс Т1226, предназначенный для штамповки деталей из заготовок в виде предварительно вытянутого стакана путем их раздачи или нанесения рельефа на боковую поверхность. На прессе могут штамповаться относительно небольшие детали, до 250 мм в диаметре и высотой до 300 мм при максимальной энергии в импульсе до 40 кДж. Пресс имеет два генератора импульсных токов (ГИТЗЗ) с энергией в импульсе до 20 кДж, которые выдают энергию в разрядную головку или одновременно, т. е. до 40 кДж, или попеременно до 20 кДж, но, соответственно, с большей в два раза частотой.

Ниже дана техническая характеристика электрогидроимпульсного прессы Т1226:

Энергия в импульсе	5—40 кДж
Рабочее напряжение	5—10 кВ
Частота следования импульсов	0,125; 0,25 имп/с
Расстояние между колоннами в свету	715 мм
Высота штампового пространства	
наибольшая	450 мм
наименьшая	200 мм
Ход прижимной траверсы	150 мм
Ход механизма раздвижения полуматриц	250 мм
Размеры установки в плане	5100 × 4900 мм
Высота установки	2500 мм
Ориентировочная производительность	100 дет/ч
Масса установки	10 000 кг

Технологический узел представляет собой вертикальную станину с верхним расположением разрядной камеры и клинорычажным механизмом зажима оснастки. Механизм зажима

оснастки и механизм изменения высоты штампового пространства аналогичны механизмам, используемым в универсальных прессах Т1220 и Т1223.

Для повышения уровня механизации и производительности этот пресс взамен выдвижного стола, используемого в универсальных прессах, снабжен четырехпозиционным устройством подачи заготовок и удаления готовых деталей. На каждой позиции установлен комплект раздвижных матриц. На первой позиции в оснастку устанавливается заготовка, на второй — заготовка заполняется водой, на третьей, основной, находящейся в штамповом пространстве, осуществляются зажим оснастки и штамповка детали, и на четвертой позиции полуматрицы раздвигаются и деталь попадает в специальный приемник. Самый высокопроизводительный из отечественных ЭГ прессы — Т1226. При штамповке корпуса емкостью 4 л (см. рис. 37) пресс обеспечивает производительность 120 дет/ч. Это позволяет использовать его при крупносерийном производстве товаров народного потребления. Если пресс укомплектовать загрузочным устройством, то он может работать в автоматическом режиме.

Совершенно необычная конструктивная схема для отечественных ЭГ прессы заложена в конструкции прессы Т1032 для штамповки панелей теплообменников. Технологический узел имеет нижнее расположение рядом установленных разрядных камер, выходные отверстия которых перекрывают всю штампуемую поверхность заготовки. Штамповка будет осуществляться попеременной подачей импульсов энергии (160 кДж) в каждую камеру. Пресс не имеет мощной станины с механизмами прижима. Прижим матрицы и заготовки осуществляется грузом с большой массой, т. е. использована схема с инерционным замыканием камеры. Выбранная конструктивная схема относительно проста и позволяет использовать схему штамповки метанием жидкости для повышения деформирующего усилия.

Специализация при создании ЭГ прессы позволяет или частично устранять принципиальные для данного типа оборудования недостатки (например, низкую производительность), или максимально использовать такие преимущества, как небольшие габариты и относительно низкая стоимость ЭГ оборудования при штамповке крупногабаритных деталей. Вместе с тем создание специализированного оборудования требует тщательного подхода к определению его потребности и вероятности изменения номенклатуры деталей, на которые он рассчитан. На практике оборудование для ЭГ штамповки узкоспециализированным выполняется весьма редко. Первый опыт создания и внедрения такого прессы, как Т1226, дал положительные результаты.

4. КОМБИНИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Электрогидроимпульсный способ деформирования, обладая рядом положительных особенностей, выгодно отличающих его от других импульсных способов и гидростатической штамповки, имеет в то же время и свои недостатки. Так, на практике ЭГ штамповка ограничена максимальной энергией в импульсе, а следовательно, и деформирующим усилием, соответствующими максимальной запасаемой энергии используемого оборудования, в то время как гидровзрывная штамповка такого ограничения практически не имеет. На электрогидроимпульсном оборудовании сложно осуществлять операцию обжима, что легко делается магнитно-импульсным способом. Деформирование на ЭГ прессах всегда связано с действием на заготовку инерционных сил, причем, как правило, неравномерно распределенных по ее поверхности, а также с наличием ударных нагрузок, действующих на материал штампуемого изделия и оснастки, что иногда отрицательно сказывается на результате. Гидростатическая штамповка, имея более равномерное распределение нагрузки по деформируемой поверхности заготовки и малую скорость деформирования, исключает воздействие приведенных выше факторов.

Стремление объединить положительные качества различных способов деформирования в одном оборудовании и тем самым расширить его технологические возможности и области его применения привело некоторые зарубежные фирмы к созданию комбинированного оборудования, в котором ЭГ способ совмещается с другими. Фирмой «LTV-Aerospace» создана установка, на которой штамповка может осуществляться одним из трех способов: гидростатическим, гидровзрывным или электрогидроимпульсным [138, 141]. Причем для одной и той же детали процесс деформирования может осуществляться двумя способами, например: сначала предварительная формовка статическим давлением жидкости, а затем окончательное формообразование ЭГ способом. Максимальная запасаемая энергия конденсаторной батареи составляет 132 кДж. Толщина штампуемых деталей может быть более 12 мм, продолжительность штамповки — порядка 10 мин. На этой установке штамповались, например, полусферы диаметром 900 мм, а также цилиндрические детали диаметром 450 и высотой 90 мм.

Фирмой «Локхид» создана комбинированная установка для электрогидроимпульсной и магнитно-импульсной формовки [137]. Для обоих процессов используется один ГИТ с запасаемой энергией, равной 25 кДж.

Физико-техническим институтом АН БССР создана и внедрена комбинированная установка ЭМОМ-25, позволяющая

штамповать детали электрогидроимпульсным и магнитно-импульсным способами. Напряжение регулируется от 1 до 10 кВ безступенчато. Высота штампового пространства может меняться от 70 до 650 мм, ширина 610 мм. В установке, имеющей вертикально расположенную двухколонную станину [114], для зажима оснастки используется пневмопривод.

Возможность создания комбинированных установок предусматривалась и ПКБЭ АН УССР при разработке типажного ряда ЭГ прессов и установок, который совпадает с ранее разработанным рядом магнитно-импульсных установок, что позволяет использовать унифицированные ГИТы для обоих типов машин, а следовательно, допускает в принципе использование магнитно-импульсной штамповки на ЭГ прессах.

5. ЭЛЕКТРОДНЫЕ УСТРОЙСТВА

Электрод (электродное устройство) — одно из основных элементов, входящих в разрядный контур электрогидроимпульсных прессов и установок. С самого начала использования электрогидравлического эффекта в промышленных целях встал вопрос о создании электродных устройств с прием-

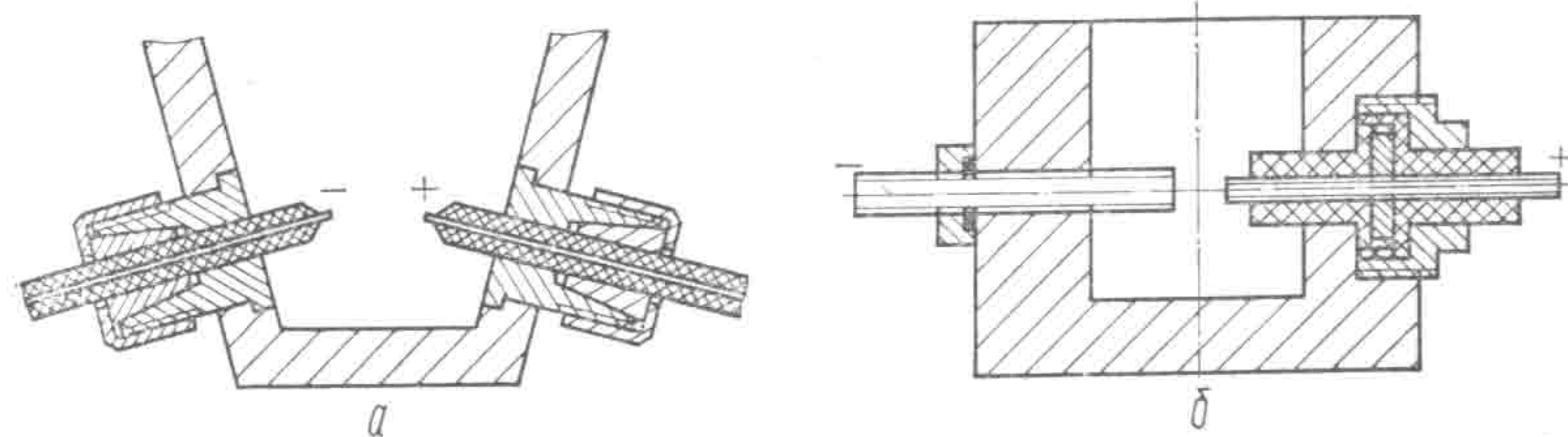


Рис. 55. Двухстержневые электродные устройства с изолированным (а) и не изолированным (б) минусовым электродом.

лемым для производственных условий сроком службы при достаточно высокой эффективности выделения энергии в канале разряда. В оборудовании, использующем электрогидравлический эффект, это единственное звено, которое нельзя было заимствовать из других областей техники и практически не имело аналогов, используемых в условиях, близких к тем, в которых находятся электроды в ЭГ установках. Например, создание импульсных конденсаторов и разрядников, хотя и потребовало решения ряда задач, выдвинутых спецификой ЭГ оборудования, не было новым направлением в технике, так как они использовались уже в других областях. До настоящего времени в некоторых ЭГ прессах используются игнитронные разрядники и импульсные конденсаторы, которые не создавались специально для этого оборудования. Этим и объясняется

тот факт, что до настоящего времени электродные устройства остаются самым слабым звеном в ЭГ установках для листовой штамповки и постоянно происходит процесс их совершенствования и поиск новых принципиальных решений.

Существует много разных электродных устройств, которые можно разделить на две группы: с иницируемым и неиницируемым межэлектродным промежутком. Конструктивное исполнение электродных устройств этих групп может быть различным и в общем случае включает в себя следующее: электрод, подсоединяемый к плюсовому кабелю ГИТа непосредственно или через токоподводы, называемый часто плюсовым; изоляцию положительного электрода от корпуса камеры; электрод, подсоединяемый к минусовому кабелю ГИТа, называемый часто минусовым; устройства фиксации электродов изоляторов в камере; механизмы подачи инициатора в межэлектродный промежуток (в иницируемых электродных устройствах).

В настоящее время в отечественных прессах используются электродные устройства в основном трех типов: двухстержневые

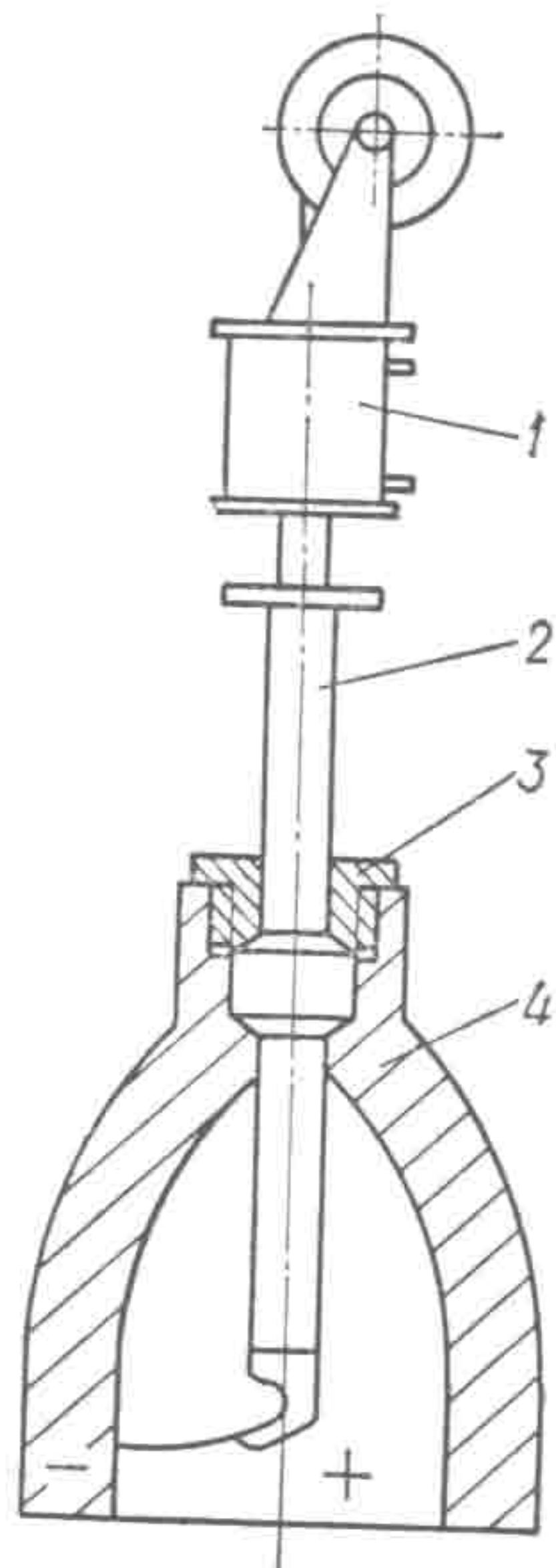


Рис. 56. Одностержневое электродное устройство: 1 — механизм подачи проволоки; 2 — электрод; 3 — гайка; 4 — камера.

с неизолированным или изолированным минусовым электродом (рис. 55); одностержневые, в которых в качестве минусового электрода используется корпус разрядной камеры (см.

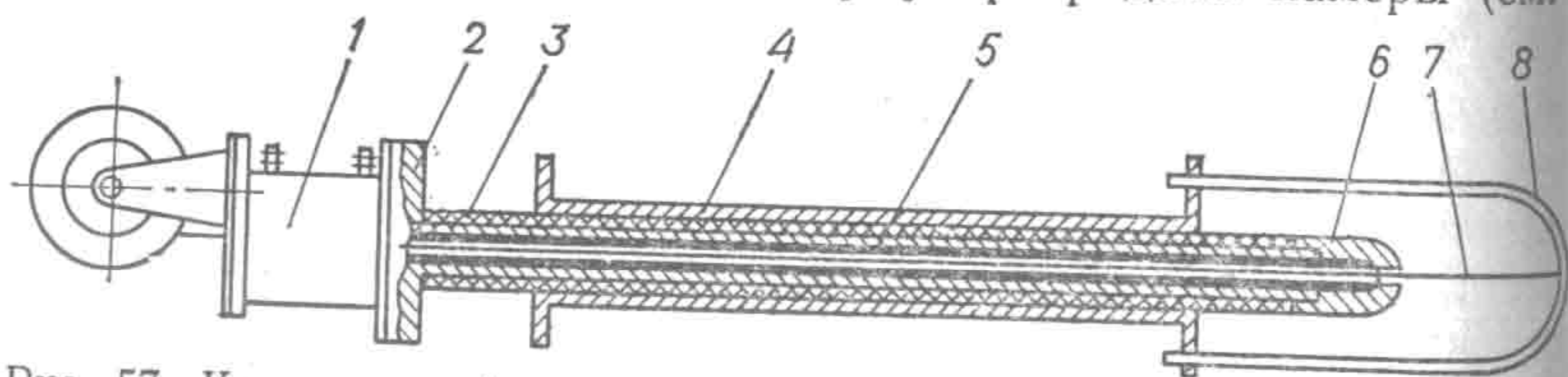


Рис. 57. Коаксиальный электрод:

1 — механизм подачи проволоки; 2 — плюсовый токовод; 3 — изолятор; 4 — минусовый токовод; 5 — трубка; 6 — наконечник; 7 — иницирующая проволока; 8 — скоба.

рис. 50; 56); коаксиальные электроды, в которых плюсовой и минусовый токоподводы выполнены в виде двух соосно расположенных труб, разделенных изолятором (рис. 57).

Все перечисленные типы электродных устройств могут быть как иницируемые, так и неиницируемые.

Электроды и их изоляторы подвергаются температурным воздействиям со стороны канала разряда и в последствии парогазовой полости; происходит также нагрев за счет выделения тепла в тоководах при протекании по ним разрядного тока. Части электродных устройств, контактирующих с водой, подвергаются действию гидродинамических нагрузок — ударных волн, гидротоков и квазистатического давления. На токоведущие части и изоляцию действует также электрическое поле. Таким образом, электроды работают в очень тяжелых условиях, во всяком случае они испытывают самые большие механические и тепловые нагрузки по сравнению с любыми другими частями ЭГ установок.

В процессе работы каждый разряд сопровождается эрозионным износом электродов, величина которого зависит от энергии в импульсе напряжения, материала электрода и др. По мере эрозионного износа канал разряда с каждым последующим импульсом приближается к изолятору и условия его работы еще более ухудшаются, поскольку увеличивается механическое, тепловое и гидродинамическое воздействие на его поверхность.

Таким образом, электродные устройства должны отвечать следующим требованиям: возможно меньшая скорость эрозионного износа электродов; возможно большее расстояние от канала разряда до изолятора; минимальные потери энергии на предпробивной стадии и стабильность параметров разряда; высокая механическая прочность при действии динамических нагрузок; высокая диэлектрическая прочность изоляции; низкое электрическое сопротивление электродов и тоководов.

Вместе с тем электроды и их изоляторы должны изготавливаться из достаточно распространенных и сравнительно недорогих материалов. Скорость эрозионного износа электродов может быть уменьшена в результате применения материалов, наименее подверженных эрозии при разряде или путем увеличения массы той части электрода, эрозионный износ которой допускается в процессе эксплуатации. Как показывают исследования, эрозионный износ металлов различен. Например, масса металла, уносимого с электрода за один разряд, может быть определена по формуле [88]

$$m_{\text{в}} = \frac{k_d u'_3 \alpha}{\frac{3c_p (T_{\text{пл}} - T_0) + r_{\text{пл}}}{k_{\text{в}}} + r_{\text{и}}}$$

где k_d — коэффициент, учитывающий влияние диаметра токоведущего стержня на эрозию; $k_{\text{в}}$ — коэффициент выброса материала за разряд; u'_3 — эквивалентный энергетический потенциал; α — интеграл от модуля разрядного тока; c_p — удельная

теплоемкость материала стержня электрода; $T_{пл}$, T_0 — температура плавления и начальная температура материала стержня электрода; $r_{пл}$, $r_{и}$ — удельная теплота плавления и испарения материала электрода.

Коэффициент выброса, определенный экспериментально, составляет для стали Ст.3 — 0,055, для меди — 0,065, для латуни — 0,06, для алюминия — 0,2, для молибдена — 0,025, для вольфрама — 0,03 [88]. Сравнение эрозионной стойкости металлов показало, что их можно расположить в определенный ряд по мере увеличения эрозионной стойкости: Cu, Co, Fe, Ni, Mo, W.

Высокую эрозионную стойкость имеют композиции медь — карбид вольфрама — никель (МКВ70НЗ) и медь — вольфрам — никель (МВ70НЗ). Они обладают не только высокой эрозионной стойкостью, но и малыми потерями энергии на предпробивной стадии.

В ряду эрозионно-стойких материалов достаточно высокое место занимают железо и сплавы на его основе. Малая стоимость конструкционных углеродистых и малолегированных сталей при относительно высокой эрозионной стойкости сделали их наиболее целесообразным материалом для изготовления электродов в ЭГ прессах и установках для листовой штамповки. В качестве материала для изоляторов электродов лучший комплекс свойств (диэлектрическая и механическая прочность, стоимость, затраты на обработку, доступность и т. д.) имеет полиэтилен высокого давления, который и является в настоящее время самым распространенным для этих целей материалом. В конструкции стержневых электродов также используются изоляция из стеклопластика на эпоксидной основе и некоторые другие материалы.

Увеличение эрозионной стойкости электрода до его замены и увеличение расстояния от канала разряда до изолятора могут быть достигнуты путем увеличения размеров выступающей из изоляции части электрода. Однако увеличение выступающей поверхности электрода приводит при отсутствии инициирования к увеличению предпробивных потерь и снижению эффективности использования энергии. Используемые в настоящее время неиницируемые электроды в ЭГ прессах имеют небольшую выступающую поверхность токоведущего стержня обычно не более 30 см².

Как уже отмечалось выше, используются три типа электродных устройств: двухстержневой, одностержневой и коаксиальный. Двухстержневые электроды позволяют просто регулировать величину разрядного промежутка, а, кроме того, канал разряда образуется в направлении оси электрода, что создает благоприятные условия работы изолятора. К недостаткам

двухстержневых электродов относится необходимость частой регулировки длины разрядного промежутка по мере эрозионного износа как плюсового, так и минусового электродов.

Эксперименты, проведенные в ПКБЭ АН УССР, показали, что при энергии в импульсе 10 кДж и напряжении 10 кВ стержень плюсового электрода диаметром 10 мм из стали укорачивается в длине на 1 мм после 50 импульсов. А стержень диаметром 16 мм при энергии 100 кДж укорачивается на 1 мм после каждых 10 импульсов. В серийной разрядной головке пресса Т1220 стержень диаметром 16 мм укорачивается на 10 мм после 1000 импульсов при энергии в импульсе 10 кДж. Таким образом, если подсчитать эрозию плюсового электрода для приведенных условий, то получится, что выделение в неиницируемом разрядном промежутке 1 кДж энергии при напряжении 10 кВ сопровождается уменьшением объема электрода порядка 0,16—0,20 мм³. Минусовой электрод также подвергается эрозии, но в меньшей степени, порядка 70 % эрозии плюсового электрода.

Изменение разрядного промежутка в процессе работы приводит к изменению КПД выделения энергии в канале разряда и за частую требует от оператора-штамповщика корректировки режимов штамповки.

В двухстержневых электродных устройствах часто используют конструкцию электрода, состоящую из электрода-стержня и изолятора, выполненного заодно с электродом путем намотки на него стеклоткани, пропитанной смолами, в частности, эпоксидными. Такие электроды, удерживаемые в камере за счет сил трения в цанговом зажиме, что позволяет быстро менять величину разрядного промежутка и сами электроды, зачастую самопроизвольно выдавливаются из камеры под действием импульсных нагрузок со стороны канала разряда и требуют дополнительных мер для исключения этого явления.

Следует отметить, что каждой конструкции электродного устройства соответствует «свой» материал изолятора. Например, для описанной конструкции совершенно непригоден в качестве изолятора полиэтилен, так как такой электрод практически невозможно удержать в камере за счет цанговых зажимов. Наоборот, испытание изоляторов в разрядной головке пресса Т1220 из стеклопластика на основе эпоксидных смол взамен полиэтиленовых показали, что стеклопластиковые изоляторы имеют стойкость в несколько раз ниже. При использовании для двухстержневых электродных устройств полиэтилена применяют соответствующую конструкцию, например по типу приведенной на рис. 55, б.

Значительно медленнее меняется длина разрядного промежутка по мере эрозионного износа электрода в одностержневых

электродных устройствах, в которых разряд проходит между плюсовым электродом-стержнем и стенкой камеры или минусовым кольцом-электродом (см. рис. 50 и 56).

Если в двухстержневых электродных устройствах изменение длины разрядного промежутка Δl в зависимости от изменения длины A плюсового электрода и K минусового электрода можно представить в виде суммы последних величин, то в одностержневых электродных устройствах (рис. 58) эта величина значительно меньше для одинакового A , а K' одностержневых

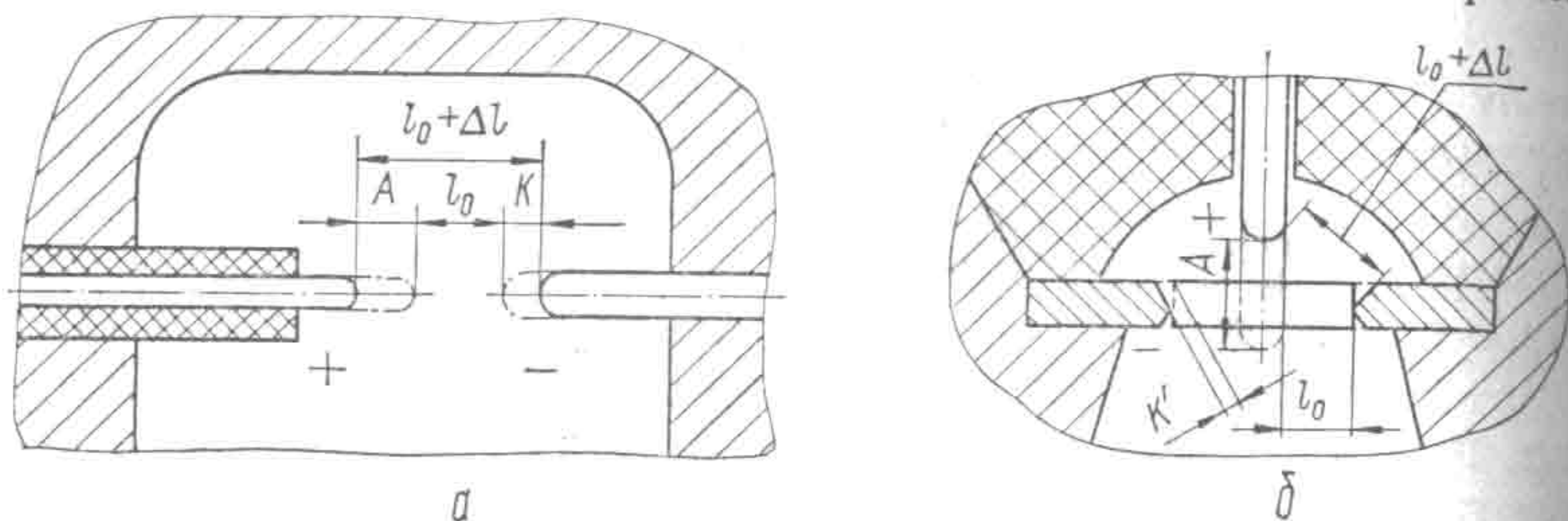


Рис. 58. Изменение длины разрядного промежутка в двухстержневом (а) и одностержневом (б) электродных устройствах.

вой системы много меньше K — двухстержневой, так как поверхность кольца значительно больше поверхности торца минусового стержня-электрода. Такие электродные устройства позволяют не регулировать величину разрядного промежутка в процессе работы.

Недостатком этих устройств являются более тяжелые условия работы изолятора, чем в двухстержневых, поскольку канал разряда параллелен торцу изолятора. Однако, как показывает опыт, изолятор, например в разрядных головках прессов Т1220 и Т1223, интенсивно разрушается после того, как канал разряда начинает образовываться в непосредственной близости от его поверхности, т. е. после того, как плюсовой электрод сгорает до минимально допустимых размеров. При замене электрода одновременно меняется и изолятор. Вообще стойкость электродных устройств необходимо рассматривать с учетом их эффективности. Конструктивные меры, принимаемые для увеличения стойкости стержней электродов и их изоляторов, зачастую приводят к изменению эффективности выделения энергии за счет изменения величины предпробивных потерь и изменению эффективности использования выделившейся в канале разряда энергии, в частности за счет влияния формы электродного устройства, коэффициента поглощения энергии ударных волн материалом изолятора, объема изолятора. Например, совершенствование конструкции разрядной головки пресса Т1220 увеличивало стойкость сменных частей, однако одновре-

менно менялась и эффективность использования энергии (число требуемых разрядов) при штамповке одной и той же детали (табл. 22). Таким образом, если учесть разницу эффективности и использовать приведенную стойкость, то изменение стойкости оказывается не прямо пропорционально числу разрядов, которое выдерживают сменные части электродного устройства до замены. Наибольшую эффективность имела разрядная головка наиболее ранней конструкции (вариант I) (см. рис. 50, а), в которой площадь выступающей поверхности электрода была меньше, чем в последующих вариантах, и объем, занимаемый изолятором из полиэтилена, также был меньше. Деталь «соусник» (рис. 59) штамповалась с использованием этой головки за пять импульсов с общим выделением энергии, равной 40,5 кДж. Увеличение выступающей поверхности электрода

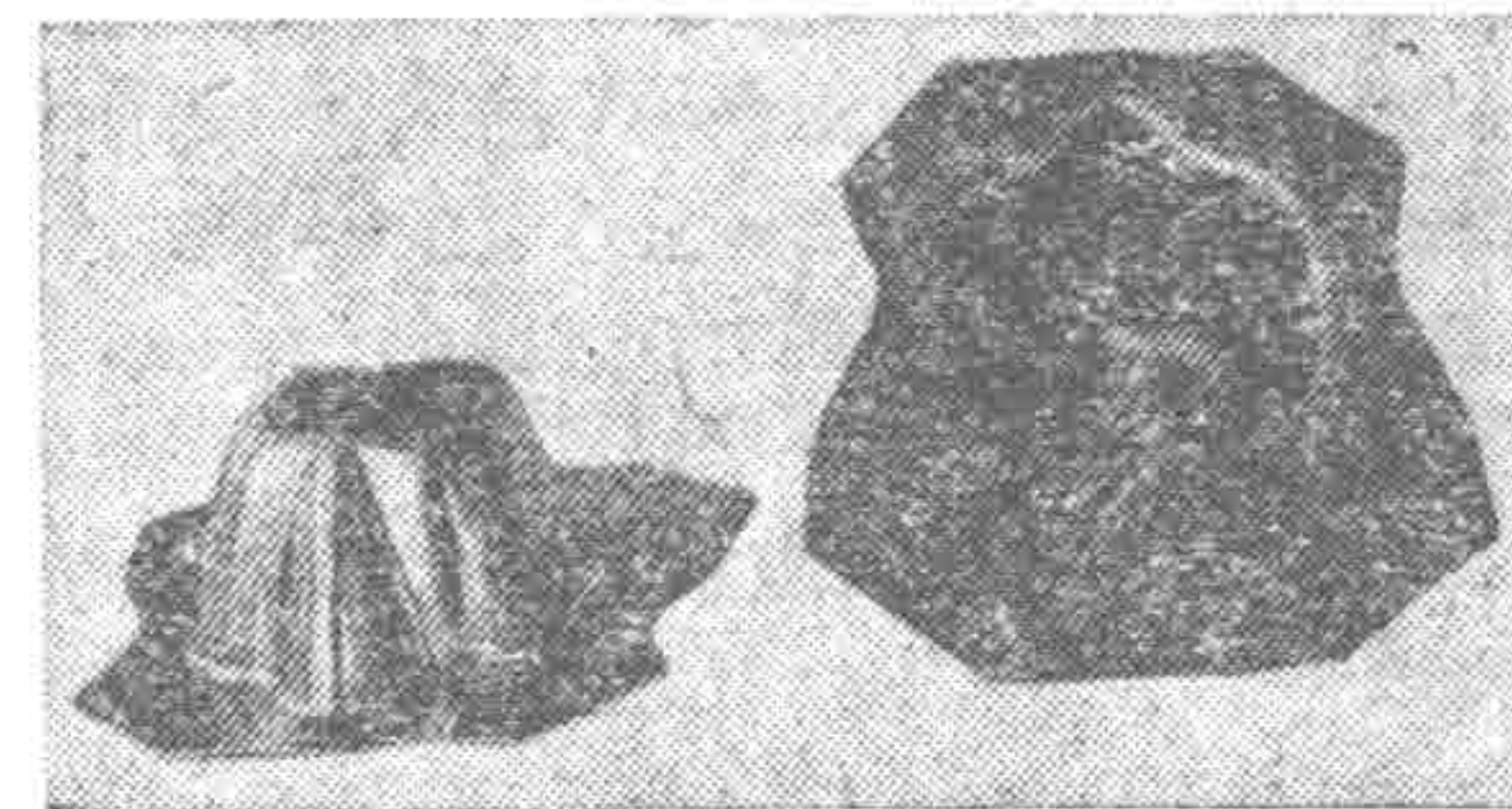


Рис. 59. Соусник, вытягиваемый на прессе «Удар-12М».

Таблица 22. Стойкость и эффективность разрядных головок разных модификаций прессов «Удар-12» и Т1220

Вариант	Эскиз рис. 50	Стойкость N	Общее количество W_i энергии на деталь	Стойкость, приведенная к варианту I, $N' = N \frac{W_I}{W_i}$
I	а	~800	40,5	800
II	б	~5000	121,0	1666
III	в	~5000	60,0	3333

и введение зазора между изолятором и электродом (рис. 50, б) значительно увеличивает стойкость стержня и изолятора до их замены, однако эффективность упала в три раза, так как увеличение площади выступающей части электрода привело к увеличению предпробивных потерь, а увеличение объема полиэтилена в камере вызывает падение эффективности использования выделяемой энергии, поскольку он, имея большой коэффициент поглощения ударных волн и малую жесткость, стал в большей мере играть роль демпфера по сравнению с изолятором меньшего объема в варианте I. Использование такой разрядной головки требовало для штамповки детали уже 15 импульсов с общим выделением энергии, равной 121 кДж. Дальнейшая модернизация [106], приведшая к уменьшению объема полиэтилена в камере (вариант III) (см. рис. 50, в), привела при

практически одинаковой площади выступающей части электрода с вариантом II к увеличению эффективности в 2 раза, требовалось 12 импульсов с общим выделением энергии, равной 60 кДж. Разрядные головки последнего варианта используются в прессах T1220, T1223 и T1226. В настоящее время совершенствование этой конструкции направлено по пути уменьшения времени, необходимого на замену электрода и изолятора, которое, впрочем, сравнительно невелико и составляет порядка 15—20 мин.

Важным фактором, влияющим на долговечность электродных устройств, является плотность контакта токоведущих частей: наконечника кабеля, токовода и электрода. Практика

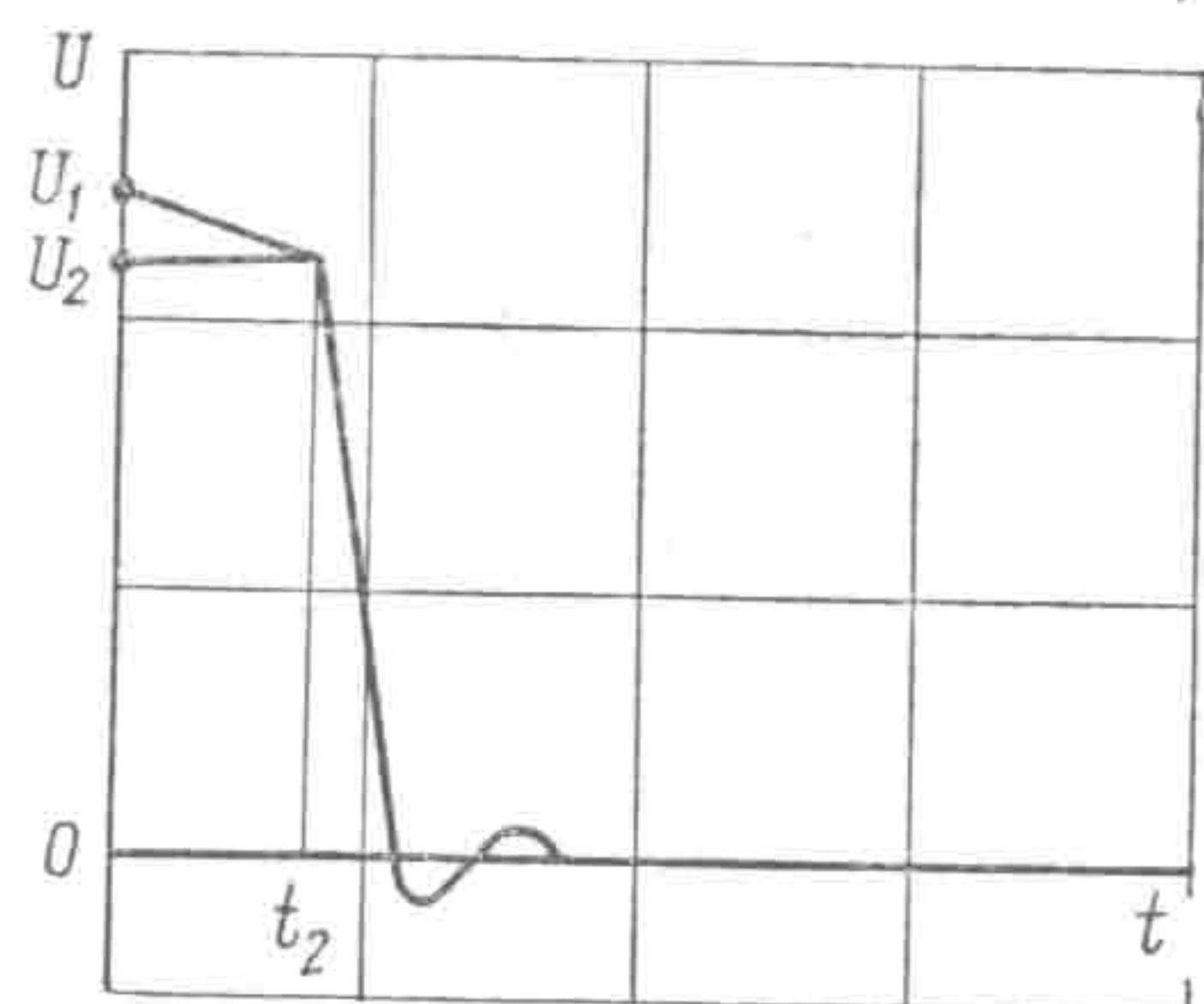


Рис. 60. Изменение напряжения при пробое разрядного промежутка.

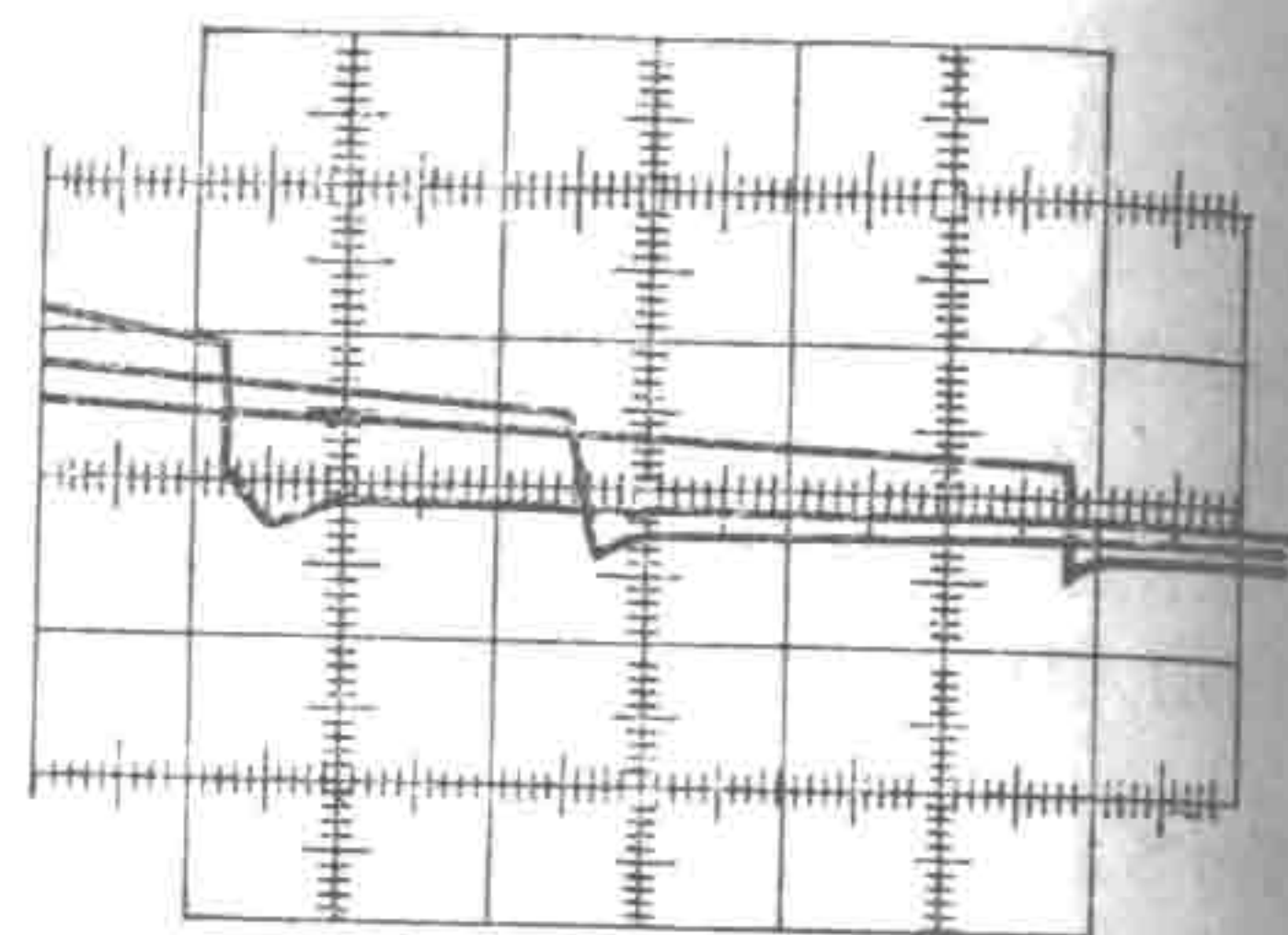


Рис. 61. Осциллограммы напряжений при пробое разрядного промежутка в прессе T1220.

показывает, что лучшее — это конусное соединение с плотно поджатыми поверхностями. Отсутствие плотного контакта приводит к подгоранию сопрягаемых поверхностей и быстрому выходу из строя токоведущих деталей электродного устройства.

Один из путей увеличения стойкости сменных частей электродных устройств — использование инициирования, в частности путем подачи в разрядный промежуток перед каждым разрядом проволоочки. Иницирование, как известно, повышает эффективность выделения энергии, например, за счет сокращения предпробивных потерь. Так, в разрядной головке прессы T1220 предпробивные потери при максимальном напряжении 10 кВ составляют порядка 20 % (рис. 60, 61). Первоначально подаваемое на электрод напряжение U_1 к началу образования канала разряда за время t_2 падает до напряжения U_2 , до величины порядка $0,9U_1$, что соответственно уменьшает в квадратичной зависимости величину выделяемой энергии. Уменьшение напряжения при неизменной величине разрядного промежутка приводит к увеличению доли потерь и они могут превышать 50 % (рис. 61). Введение инициатора значительно сокра-

щает предпробивные потери, причем в этом случае площадь оголенной части электрода уже не играет существенной роли и представляется возможность увеличивать ее без ущерба для эффективности, повышая тем самым срок службы сменной части электрода и изолятора, так как с увеличением выступающей части электрода увеличивается расстояние от канала разряда до изолятора. Кроме того, использование инициатора позволяет сократить длину изолирующей поверхности от плюсового электрода до стенок камеры. В электродных системах без инициирования с целью исключения пробоя с плюсового электрода на стенку камеры по поверхности изолятора длина образующей поверхности изолятора между плюсовыми и минусовыми электродами выполняется значительно большей, чем величина разрядного промежутка (в три раза). Это приводит к увеличению объема изолятора, находящегося в камере, а также к увеличению самого объема камеры. Эксперименты показали, что при инициировании разрядного промежутка проволочкой длина изолирующей поверхности может быть взята меньше длины разрядного промежутка, оптимальная длина которого на практике устанавливается экспериментально. Это объясняется тем, что в настоящее время нет достаточно точных зависимостей для расчета, которые учитывали бы в комплексе такие характеристики, как напряжение, емкость и индуктивность разрядной цепи, конструктивные особенности электродного устройства и электрическое сопротивление воды. Например, для «малоинерционных процессов» [64] оптимальный разрядный промежуток может быть определен по формуле [66, 121]

$$l_0 \approx 0,3 \sqrt[4]{\frac{r^2 z}{A} W_0},$$

где r — расстояние от разрядного промежутка до объекта обработки; z — волновое сопротивление цепи, $z = \sqrt{L/C}$; A — искровая характеристика.

Однако в этих же работах отмечается, что для более эффективного использования энергии в практике необходимо учитывать особенности конкретного технологического процесса, включая источник и объект обработки в единую динамическую систему. Это достаточно сложная теоретическая задача, поэтому в практике вопрос оптимизации длины разрядного промежутка, как уже отмечалось ранее, решается опытным путем.

При напряжении до 10 кВ в неиницируемых электродных устройствах длина разрядного промежутка в зависимости от сопротивления воды колеблется в пределах 10—25 мм. Увеличение напряжения приводит к росту оптимальной длины разрядного промежутка, и он при напряжении 50 кВ достигает

порядка 100 мм. При иницировании разрядного промежутка оптимальная его длина зависит как от параметров цепи, так и от диаметра проволоочки. В практике выбор размеров иницирующей проволоочки приводится не только с учетом оптимальности выделения энергии, но и из конструктивных соображений, поскольку необходимо обеспечить надежную работу механизмов подачи инициатора. Как правило, используют стальные проволоочки диаметром свыше 0,8 мм.

Ориентировочные размеры проволоочек приведены ниже:

Диаметр проволоочки, мм	0,8	1,2	1,5	1,2	1,5	1,8
Длина проволоочки, мм	30—40	40—60	50—80	100—180	150—200	170—250
Запасаемая энергия, кДж	10	20	40	40	80	160
Напряжение, кВ	10	10	10	50	50	50

Иницирование разрядного промежутка проволоочками нашло практическое применение в отечественных ЭГ прессах и установках для листовой штамповки, в основном разработанных в ПКБЭ АН УССР, в которых используются коаксиальные подвижные электроды, причем при энергиях в импульсе, равных 80 кДж и выше. Разряд осуществляется между наконечником 6 плюсового токовода 2 и скобой 8 минусового токовода 4 (см. рис. 57). Проволочка подается с помощью механизма подачи 1, приводимого в действие сжатым воздухом. Для подачи может быть использована энергия ударных волн, в этом случае механизм подачи встраивается внутрь электрода у наконечника. Запас проволоочки, обеспечивающий работу пресса не менее одной смены, размещается на барабане, установленном на конце электрода. Применение перемещающихся электродов с иницированием значительно усложняет работу, так как требует постоянного контроля за исправностью механизма подачи проволоочки и определенных навыков в управлении перемещением электрода.

Вопросы оптимизации конструкции электродных устройств, как уже отмечалось выше, остаются актуальными и в настоящее время. Наиболее перспективны — иницируемые устройства, как более эффективные. Задача состоит в создании надежных механизмов подачи проволоочки.

6. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

Генератор импульсных токов — основная часть любого технологического оборудования, работающего на принципе использования электрогидравлического эффекта. Как ис-

точник высоковольтных импульсных токов с конденсаторным накопителем энергии генераторы импульсных токов начали использоваться еще до создания оборудования, основанного на электрогидравлическом эффекте [88], и находят применение в настоящее время в различных областях науки и техники. Основные параметры генераторов, характеризующих их возможности — энергия в импульсе W , рабочее напряжение U и емкость конденсаторной батареи C , частота следования импульсов и индуктивность разрядного контура L . Кроме того, важными показателями являются диапазон варьирования рабочего напряжения, а также ресурс используемых конденсаторов и разрядника. Генераторы импульсного тока состоят из следующих основных частей, определяющих их характеристики: дросселя D , высоковольтного трансформатора-выпрямителя $ВТМ$, конденсаторной батареи C , разрядника P (рис. 62). Кроме основных узлов генераторы содержат элементы управления, контроля и защиты электрооборудования: блокировку с сопротивлением $БС$ и короткозамкнутую блокировку $Б$, блок поджига $БП$, регулируемое пороговое устройство $РПУ$, блок защиты от перенапряжений $БЗ$, киловольтметр и т. д. Генератор работает следующим образом. При подаче команд системой управления $СУ$ подготовка и пуск ГИТа блокировки рассоединяют выводы конденсаторной батареи, а выводы дросселя подключаются к питающей сети и начинается зарядка конденсаторной батареи. После того, как напряжение на выводах конденсаторной батареи достигает заданной регулируемым пороговым устройством величины, срабатывает блок поджига и открывает разрядник, вследствие чего напряжение подается на выходные высоковольтные кабели, подсоединяемые к нагрузке H , и происходит разряд конденсаторной батареи на нагрузку. В электрогидроимпульсных прессах нагрузкой является разрядный промежуток электродного устройства. После того, как произошел разряд, конденсаторы снова заряжаются, поскольку дроссель все время подсоединен к питающей сети и цикл повторяется столько раз, сколько предусмотрено программным устройством системы управления. Отсчитав требуемое число разрядов, система управления отключает дроссель от питающей сети и соединяет плюсовой и минусовой

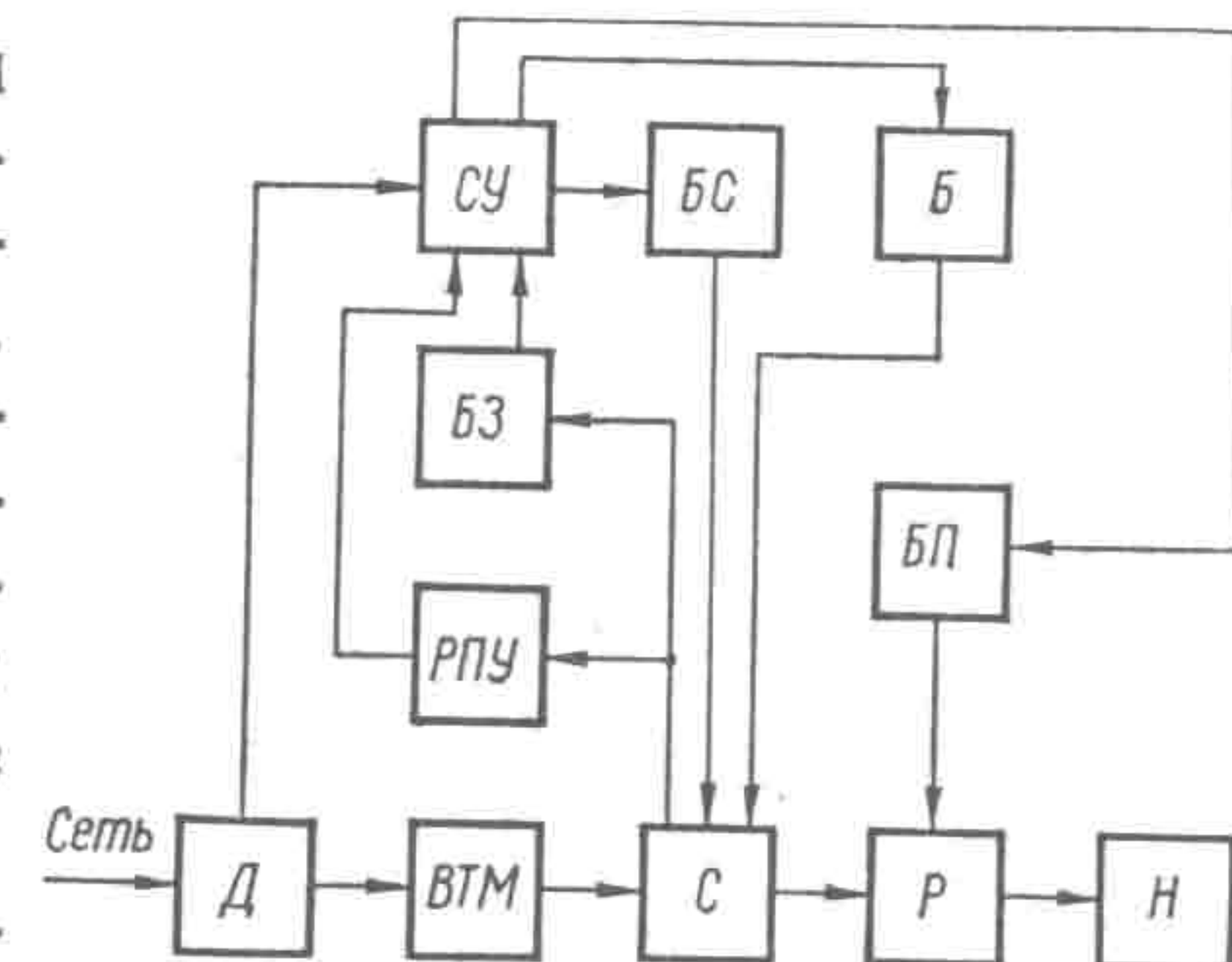


Рис. 62. Блок-схема генератора импульсных токов.

дросселя D , высоковольтного трансформатора-выпрямителя $ВТМ$, конденсаторной батареи C , разрядника P (рис. 62). Кроме основных узлов генераторы содержат элементы управления, контроля и защиты электрооборудования: блокировку с сопротивлением $БС$ и короткозамкнутую блокировку $Б$, блок поджига $БП$, регулируемое пороговое устройство $РПУ$, блок защиты от перенапряжений $БЗ$, киловольтметр и т. д. Генератор работает следующим образом. При подаче команд системой управления $СУ$ подготовка и пуск ГИТа блокировки рассоединяют выводы конденсаторной батареи, а выводы дросселя подключаются к питающей сети и начинается зарядка конденсаторной батареи. После того, как напряжение на выводах конденсаторной батареи достигает заданной регулируемым пороговым устройством величины, срабатывает блок поджига и открывает разрядник, вследствие чего напряжение подается на выходные высоковольтные кабели, подсоединяемые к нагрузке H , и происходит разряд конденсаторной батареи на нагрузку. В электрогидроимпульсных прессах нагрузкой является разрядный промежуток электродного устройства. После того, как произошел разряд, конденсаторы снова заряжаются, поскольку дроссель все время подсоединен к питающей сети и цикл повторяется столько раз, сколько предусмотрено программным устройством системы управления. Отсчитав требуемое число разрядов, система управления отключает дроссель от питающей сети и соединяет плюсовой и минусовой

выводы конденсаторной батареи сначала через блокировку с сопротивлением, а потом, с задержкой порядка 2—3 с, дополнительно через короткозамкнутую блокировку. Если по какой-то причине разрядник не срабатывает (в ручном режиме не подана команда «разряд», неисправен блок поджига или разрядник и т. д.), то по достижении на выводах ВТМ максимально допустимого напряжения срабатывает блок защиты от перенапряжения, отключает дроссель от сети и закорачивает

Таблица 23. Характеристики ГИТ, используемых в ЭГ прессах

Параметр	Марка ГИТа и пресса		
	ГИТ Т1220 (пресс Т1220)	ГИТ33 (прессы Т1223 и Т1226)	ГИТ50—40/32—У4 (прессы Т1229А, Т1232, Т1032 и др.)
Энергия в импульсе, кДж	2,5—10	5—20	15—40
Рабочее напряжение, кВ	5—10	5—10	30—50
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	200	400	32
Частота следования импульсов, имс/с	0,25	0,125	1
Габаритные размеры, мм в плане высота	Встроен в пресс Т1220	965×2030 2200	1630×2620 2450

выводы заряженной батареи сначала через блокировку с сопротивлением, а затем через короткозамкнутую блокировку. Некоторые ГИТы имеют регулируемое пороговое устройство РПУ, которое отключает дроссель от питающей сети при достижении заданного напряжения и переводит таким образом ГИТ в «ждущий» режим. При этом конденсаторы остаются заряженными до срабатывания блока поджига по команде, не зависящей от РПУ, а зависящей, например, от положения электрода.

Унифицированные генераторы выполняются в виде отдельных блоков, закрытых кожухами, дверцы которых имеют конечные выключатели, отключающие питание пресса при открытии. Наиболее важными элементами ГИТа являются конденсаторы и разрядник.

В прессах используются конденсаторы, как специально разрабатываемые для электрогидроимпульсного оборудования, так и импульсные конденсаторы широкого применения, характеристики которых удовлетворяют требованиям данного оборудования. Например, в прессах Т1223, Т1226 используются

ГИТ33 (табл. 23) со специальными конденсаторами ИК10/50 × 4, изготавливаемыми Опытным заводом ПКБЭ АН УССР, с напряжением до 10 кВ, емкостью 200 мкф. Однако в процессе эксплуатации в случае выхода из строя их можно заменять четырьмя конденсаторами ИК10/50 ТУ 16—521.149—72, изготавливаемыми Серпуховским конденсаторным заводом, или четырьмя ИС5/200 с последовательно-параллельным включением последних, так как при такой замене совпадают как габариты конденсаторной батареи, так и допустимая частота следования импульсов.

В прессах Т1229А, Т1232, Т1032 используются генераторы импульсных токов ГИТ50—40/32—У4 с высокоресурсными конденсаторами ИК50/2У4, которые нельзя заменить другими: эти конденсаторы предназначены для работы с частотой до 60 импульсов в минуту, а подходящих по энергоемкости конденсаторов с такой или большей допустимой частотой нет.

В ГИТах используется два типа разрядников: игнитронные (ИРТ-2, ИРТ-3, ИРТ-6) и воздушно-искровые. Игнитронные разрядники используются в ГИТах до 10 кВ, а воздушно-искровые — в ГИТах до 50 кВ. Использование автономных унифицированных ГИТов (ГИТ33 и ГИТ50—40/32—У4) позволяет комплектовать ими прессы с различной запасаемой энергией или использовать их для других технологических процессов.

7. УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТЫ

Каждая электрогидроимпульсная установка для обработки металлов давлением является одновременно и высоковольтным устройством, имеющим в своем составе высоковольтный трансформатор, импульсные конденсаторы, высоковольтные коммутаторы и т. д. Безопасность работы на таких установках может быть обеспечена при соблюдении ряда организационно-технических мероприятий, предусмотренных правилами эксплуатации электроустановок с напряжением свыше 1000 В [96], техническими условиями безопасности на кузнечно-прессовые машины, временными правилами по технике безопасности при работе на электрогидроимпульсных установках для штамповки металлов и другими нормативными документами. Согласно требованиям этих документов, электрогидроимпульсные установки для обработки металлов давлением оснащаются рядом специальных устройств для безопасности работы.

Высоковольтное оборудование электрогидроимпульсных прессов размещают в отдельных блоках, закрытых металлическими кожухами. Это делается с целью исключения доступа к высоковольтному оборудованию во время работы, защиты об-

служивающего персонала при коротком замыкании внутри самого оборудования или между высоковольтными выводами, защиты от электромагнитного излучения. На дверях кожухов устанавливаются конечные выключатели, отключающие установку от сети при открывании дверей.

Так как при отключении установки импульсные конденсаторы могут некоторое время сохранять электрический заряд или же, будучи незакороченными, накапливать его вследствие влияния электромагнитных полей от атмосферного электричества или рядом действующих установок, то в разрядном контуре устанавливаются защитные блокировки. С целью повышения надежности закорачивания и заземления конденсаторов устанавливаются два-три параллельно подсоединенные блокировки. Для защиты электрооборудования генератора импульсных токов в разрядной цепи устанавливаются приборы защиты от коротких замыканий, перенапряжений и перегрузок по току.

Для получения информации о включении генератора установки оснащаются звуковой и световой сигнализациями. Быстрое снятие питания с установки в аварийном режиме осуществляется с помощью кнопки «Стоп». Электрооборудование и конструкции установки должны иметь надежное заземление. В низковольтной части электрической схемы для защиты электрооборудования от перенапряжений устанавливаются пробивные предохранители и защитные емкости. В электрогидроимпульсных прессах, где необходимо постоянное присутствие оператора, штамповое пространство закрывается в период работы пресса подвижным ограждением с автоматическим приводом. Во время настройки прессов Т1220 и Т1223 кроме подвижного ограждения предусматривается поднятие вверх переднего кожуха. В верхнем положении кожух закрепляется с помощью специального фиксатора автоматически. Для опускания кожуха фиксатор необходимо освободить вручную.

Продукты эрозии и ионизированных газов из искровых разрядников установок энергией выше 20 кДж удаляются с помощью индивидуального вентилятора или общецеховой вытяжкой вентиляционной системы. Выброс воздуха в атмосферу производится выше границы зоны аэродинамической тени здания цеха. Для полного снятия напряжения с установок их необходимо оснащать выключающими устройствами с расцепителями. Возможность травмирования рук оператора при управлении со встроенных пультов в момент работы механизма прижима исключается применением двуручного включения. При этом для включения двумя руками кнопки «Пуск» механизмы прижима располагаются друг от друга на расстоянии 300—600 мм между центрами.

Каждая установка оснащается индивидуальными средствами защиты обслуживающего персонала (заземляющая штанга, диэлектрические боты, перчатки, коврики). Применение устройств, обеспечивающих безопасность работы, способствует снижению интенсивности импульсных магнитных полей на рабочих местах до безопасного уровня.

Замеры напряженности магнитных полей, возникающих при работе электрогидроимпульсных прессов «Удар-12М» с энергией с импульсе 10 кДж и «Удар-11» с энергией в импульсе 150 кДж, показали, что они удовлетворяют условиям безопасной работы.

Конструкции электрогидроимпульсных прессов и установок снабжены достаточным числом устройств, обеспечивающих их безопасную работу при строгом соблюдении правил эксплуатации, изложенных в инструкциях по обслуживанию конкретно для каждого пресса или установки.

8. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

При обработке металлов давлением комплекс процессов с использованием жидких и эластичных сред, нашедших производственное применение, составляет ничтожно малую долю от комплекса научно обоснованных Е. И. Исаченковым [50] процессов, способных вооружить производство и расширить его технические возможности. Внимание научных работников и конструкторов обращается на разработку новых и совершенствование применяемых процессов и оборудования обработки металлов давлением. Совершенствование электрогидроимпульсных прессов и установок определяется прогрессивными тенденциями в обработке металлов давлением, внедрением в производство новых труднодеформируемых материалов, увеличением коэффициента использования материала, принципом непрерывности производственных процессов и т. п.

А. И. Зимин¹ разработал «Периодическую систему энерготипов кузнечно-прессовых машин», несчитывающую 15 энерготипов, восемь из которых — с использованием импульсного нагружения (рис. 63). Каждый из восьми энерготипов может иметь n конструктивных вариантов. В типоразмерный ряд электрогидроимпульсных прессов и установок, разработанный ПКБЭ АН УССР, входит шесть машин. Принимая аналогично

¹ Зимин А. И. Периодическая система энерготипов кузнечно-прессовых машин. — В кн.: Машины и технология обработки металлов давлением. МВТУ им. Баумана. М.: Машиностроение, 1967, с. 3—23.

А. И. Зимину $n = 5-10$, получаем число типоразмеров новых машин 240—480.

Таким образом, данные рис. 63 свидетельствуют о широких возможностях перспективного проектирования новых электрогидроимпульсных прессов и установок, обладающих различными энергетическими, силовыми и скоростными возможностями. Подавляющее большинство созданных электрогидроимпульсных машин для обработки металлов давлением относятся

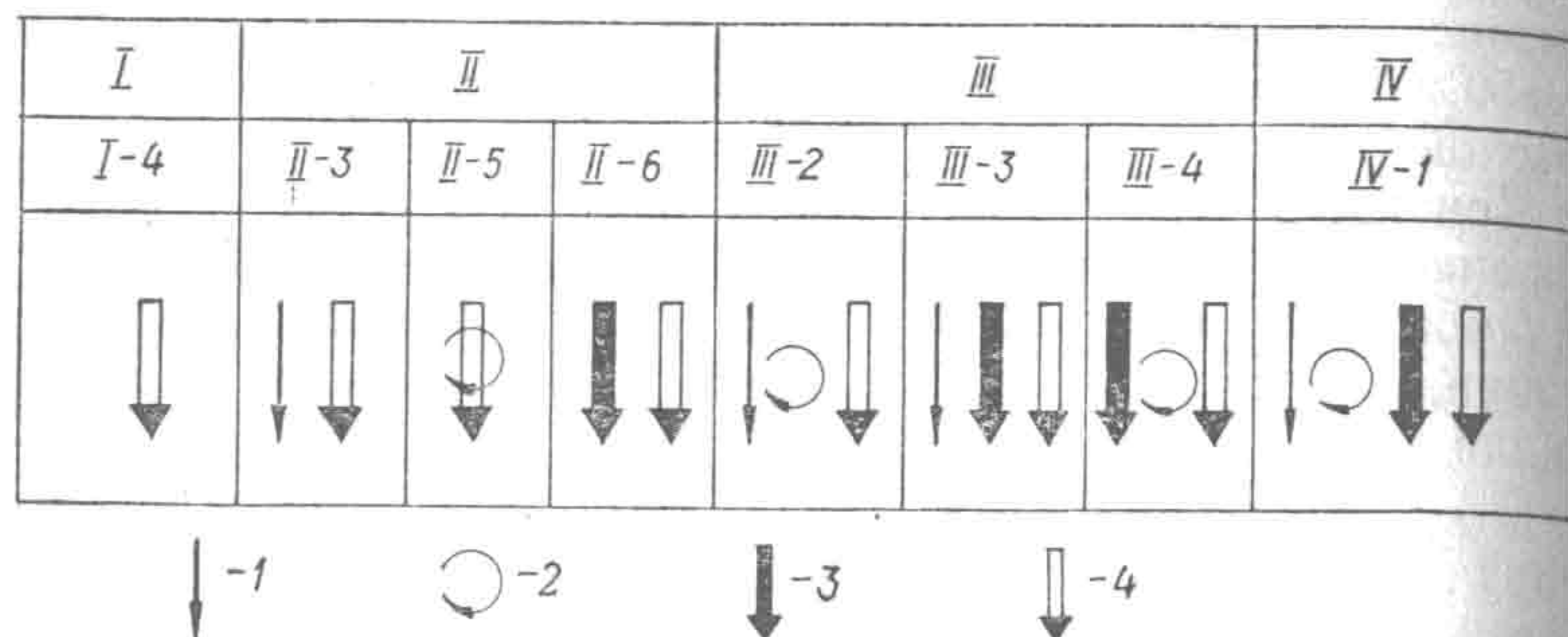


Рис. 63. Возможные варианты сочетания импульсной энергии с другими видами (по А. И. Зимину):

I—IV — число видов энергии; 1, 2 — кинетическая энергия поступательного и вращательного движений соответственно; 3 — энергия давления; 4 — импульсная энергия.

к первому энерготипу Т-4, предусматривающему самостоятельное использование импульсного нагружения. К ним относятся такие прессы и установки, как «Удар-4», «Удар-7», «Удар-11», «Молния-3», «Молния-5», «Молния-6У» и др. Электрогидроимпульсный пресс Т1220 и созданные на его базе прессы Т1223 и Т1226 можно считать одной из первых попыток создания машин энерготипа II-6 с использованием импульсной энергии и энергии давления.

Пути совершенствования имеющегося электроимпульсного оборудования определяются анализом его недостатков. Один из главных недостатков электрогидроимпульсных прессов — относительно низкая производительность, колеблющаяся от двух деталей в час на прессе Т1232 до ста деталей на прессе Т1226. Повышение производительности электрогидроимпульсных прессов осуществляется за счет сокращения машинного и вспомогательного времени обработки.

При одноимпульсной штамповке, вырубке, пробивке и тому подобное машинное время составляет 7—10 % длительности рабочего цикла, и в этом случае целесообразно основные усилия сконцентрировать на сокращении вспомогательного времени. При многоимпульсной штамповке, особенно при локальном нагружении заготовки, машинное время может достигать

65—75 % длительности рабочего цикла, а максимальное повышение производительности достигается сокращением машинного времени. Последнее можно сократить путем повышения частоты следования импульсов, колеблющейся в современных машинах в пределах 0,125—0,250 Гц. Применение более мощных зарядных устройств, более совершенных накопителей энергии и коммутационных устройств способствует этому. Вполне реальной представляется работа на частотах 1,5—2,0 Гц, которая позволяет поднять производительность при многоимпульсной штамповке в 2,5—3 раза.

Основной путь сокращения вспомогательного времени — автоматизация цикла. Для этого должны быть решены вопросы встраивания механизмов подачи заготовок, удаления отштампованных деталей и отходов, синхронизации работы этих механизмов с остальными узлами прессы или установки. В зависимости от размеров и числа деталей возможно применение специально спроектированных для данного случая линий приспособлений, механизмирующих процесс подачи заготовок и извлечения готовой детали и ее удаления [3]. При одноимпульсной обработке удельный вес вспомогательного времени, составляющий 90—93 % времени всего цикла, в случае применения средств механизации разделительной диафрагмы может быть сокращен в 2,5 раза, что повысит производительность труда в 2,2 раза.

Для обработки деталей с длительно стабильной повышенной программой (например, панелей пластинчатых теплообменных аппаратов) представляется целесообразным создание машин-автоматов с непрерывным технологическим циклом, бункерной или рулонной загрузкой, использованием инструмента повышенной стойкости. Производительность таких автоматов с учетом сокращения как вспомогательного, так и машинного времени может быть в 2,5—3 раза выше производительности электрогидроимпульсных прессов и установок. Одним из примеров приближения к решению такой задачи является создание прессы Т1226 с револьверным стволом для обработки деталей типа «стакан» и прессы Т1032 для штамповки панелей пластинчатых теплообменников.

К существующим недостаткам последних следует отнести относительно низкий КПД, составляющий на разных операциях от нескольких десятых до 20 %. Повысить его можно за счет создания более совершенных разрядных камер; увеличения эффективности электроразрядных устройств в случае применения инициирования; снижения индуктивности установок и т. п.

Один из важных путей совершенствования конструкций электрогидроимпульсных прессов и установок — повышение их

надежности на базе статистического анализа отказов отдельных узлов, механизмов, деталей. Особого внимания заслуживает работа по совершенствованию основного рабочего органа — электрода, поскольку от надежности, удобства замены и других его характеристик зависит в значительной степени производительность и эффективность установки. Этот вопрос решается как путем поиска новых конструктивных решений, так и за счет применения материалов, обладающих более высокими физико-механическими характеристиками.

Высокий уровень шума при работе электрогидроимпульсных прессов и установок в сочетании с импульсным характером повышает утомляемость человека. Борьба с шумом идет путем его предотвращения, снижения и глушения за счет создания бесшумных разрядников, применения шумопоглощающих кожухов, наушников и т. д.

Для облегчения проектирования и снижения затрат при подготовке производства новых машин целесообразно создание унифицированных электрических и механических узлов (например, унифицированных конденсаторов, разрядников, универсальных генераторов, механизмов прижима и др.) с использованием их в машинах разных энерготипов и конструктивных вариантов.

Прогнозы развития импульсного оборудования, данные А. И. Зиминим, подсказывают целесообразность создания таких машин, которые сочетали бы в себе использование различных видов энергии (рис. 63). В перспективе до конца столетия обработка металлов давлением в технологии машиностроения должна удвоиться. Резко увеличится удельный вес импульсных методов, в том числе и электрогидроимпульсной обработки. Задачей сегодняшнего дня является создание новых и совершенствование существующих моделей электрогидроимпульсных прессов и установок с целью повышения их производительности, эффективности, надежности и других показателей.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

1. ОСОБЕННОСТИ ОСНАСТКИ

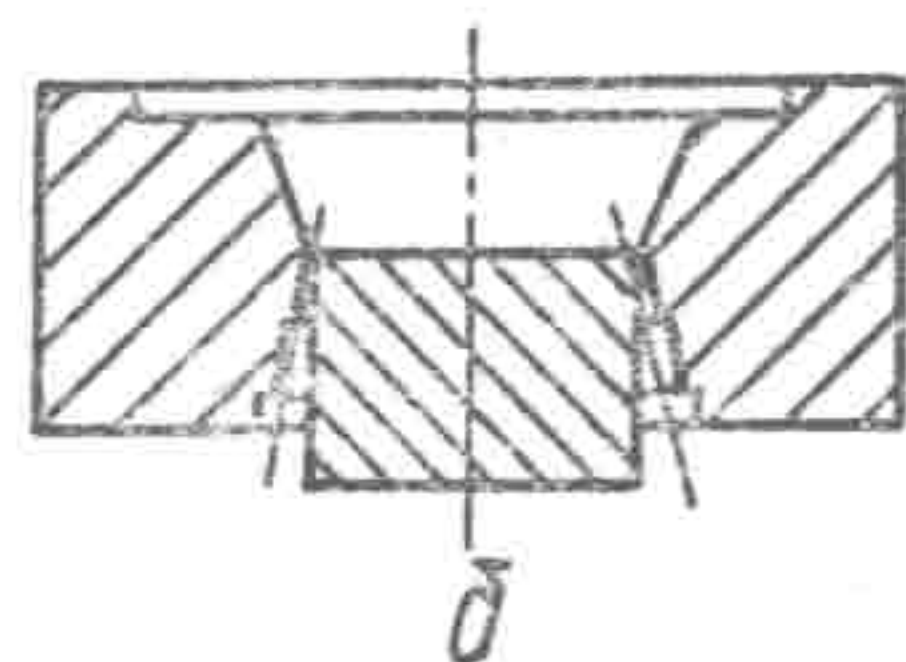
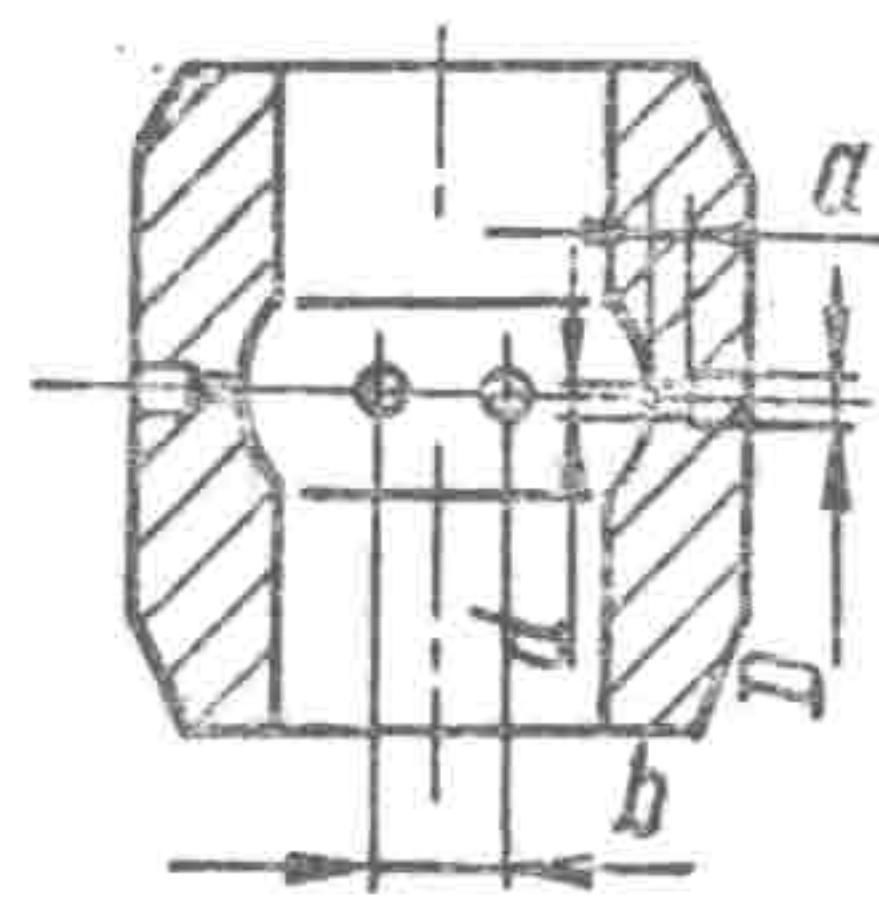
Наряду с общими требованиями, предъявляемыми к оснастке для листоштамповочного оборудования [100, 102], оснастка для электрогидроимпульсных прессов имеет некоторые специфические особенности: использование жидкости в качестве пуансона, большие скорости деформирования, высокие динамические нагрузки.

При использовании жидкости в качестве пуансона необходима герметизация оснастки в процессе формообразования. Герметизация может быть осуществлена с помощью эластичных диафрагм, стандартных или специальных уплотнительных колец, шнуров [или без них], за счет зажима заготовки между камерой и матрицей без зазора. При выполнении таких операций как пробивка, вырубка, рельефная формовка, пробивка с отбортовкой, раздача заготовок в виде стакана с фланцем без утяжки материала с фланца на деформируемые участки заготовки, фланец или периферийные участки заготовки не перемещаются в процессе деформирования как, например, при вытяжке, поэтому они прижимаются камерой к матрице без зазора. Если отклонения от плоскостности прижимных поверхностей камеры и матрицы невелики, то для герметизации не требуются резиновые уплотнения. Вытяжка деталей без гарантированного зазора, с прижимом на заготовку также осуществляется без уплотнительных элементов: достаточно смазать заготовку, что, как правило, делается с целью улучшения условий вытяжки фланца из-под прижима.

В практике, часто даже при вытяжке с гарантированным зазором, использование консистентных смазок для заготовки исключает необходимость применения уплотнительных шнуров. Оснащение разрядных камер эластичными диафрагмами при обеспечении достаточной их стойкости дает ряд преимуществ [35], основными из которых можно считать следующие: расширение технологических возможностей прессов за счет

выполнения таких операций листовой штамповки, как гибка, формовка, формообразование перфорированных заготовок, вытяжка деталей, не имеющих фланца по всему контуру, возможность штамповки деталей с нагревом и так далее; повышение производительности оборудования, поскольку отпадает необходимость в удалении воды из отштампованных деталей и в просушке матрицы; улучшение условий труда оператора-штамповщика.

В связи с большими скоростями деформирования для удаления воздуха из полости между матрицей и заготовкой пре-



дусматривают отверстия, число которых выбирают исходя из конфигурации детали и объема замкнутой полости. Наличие отверстия для выхода воздуха особенно важно при штамповке тонколистовых заготовок толщиной до 1 мм. Если деталь имеет осесимметричную простую форму, то отверстия располагаются в одном сечении (рис. 64), а при вытяжке может быть одно отверстие в центре дна матрицы. Если деталь имеет слож-

Рис. 64. Схема расположения отверстий для выхода воздуха:

a — в матрице для раздачи трубчатой заготовки;
б — в матрице для вытяжки.

ную форму, то отверстия располагаются в нижних точках, образуемых заготовкой замкнутых полостей, например при вытяжке коробчатых деталей отверстия делают в углах полости матрицы. Диаметр отверстия принимают меньше толщины штампуемого материала, глубину сверления не менее 8—10 мм, а диаметр перехода может быть в пределах 5—10 мм. Шаг отверстия *t* принимается от 30 до 100 мм, меньший — для меньших размеров оснастки, больший — для оснастки больших размеров. Выполнение этих условий обеспечивает своевременное удаление воздуха и качественную штамповку деталей.

Практика показала, что высокие динамические нагрузки и возникающая при них вибрация в конструктивных элементах оснастки могут приводить к быстрому их разрушению. Для повышения стойкости оснастки целесообразно исключение концентраторов напряжений и надежное контркрепление резьбовых соединений. Следует также избегать сварных швов, воспринимающих нагрузку при разряде.

Ввиду того, что оснастка из-за использования воды в процессе ее эксплуатации подвергается повышенному коррозион-

ному воздействию, необходимо обеспечить ее антикоррозионную защиту с учетом планируемой длительности ее эксплуатации. Если оснастка предназначена для штамповки небольшой партии деталей (до 1000 штук), то антикоррозионным покрытием можно пренебречь. При неоднократном использовании оснастки целесообразно ее рабочие поверхности хромировать, что одновременно повышает ее износостойкость.

Использование в качестве пуансона воды значительно упрощает оснастку, используемую на ЭГ прессах по сравнению со штампами, включающими пуансон и матрицу, и, несмотря на необходимость удовлетворения изложенных выше специальных требований, стоимость ее значительно ниже.

2. ОСНАСТКА ДЛЯ ШТАМПОВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Крупногабаритные детали из плоских заготовок штампуются на прессах, разрядная камера которых имеет верхнее расположение и входит в конструкцию пресса. Штамповка может осуществляться непосредственным воздействием жидкости на заготовку или через диафрагму. Диафрагмы создают ряд преимуществ, что позволило широко их использовать на прессах типа ПЭГ [35]. Однако применение диафрагм для штамповки крупногабаритных деталей требует в дополнение к оснастке для штамповки изготавливать оснастку для формовки диафрагм и иметь соответствующее оборудование для формовки крупных деталей из резины, поэтому целесообразность использования диафрагмы должна обосновываться в каждом конкретном случае.

Штамповка с непосредственным воздействием жидкости на заготовку отличается более простой оснасткой. Она состоит из матрицы 4 и прижимного кольца 3 с установленным в нем уплотнением 2 (рис. 65). Прижимное кольцо играет роль не только складкодержателя, но и переходника, с помощью которого изменяются размеры выходного отверстия камеры прессы в зависимости от размеров и формы штампуемой детали. Канавка для уплотнения, в качестве которого используются резиновые шнуры или трубки из вакуумной резины, как и в оснастке для штамповки небольших деталей, выполняются в соответствии с рекомендациями для канавок невыпадающих уплотнений [1]. Прижимные кольца изготавливаются из стали и при установке оснастки на пресс крепятся к его камере. Конструкция их достаточно проста, и при наличии металлорежущего оборудования, на котором можно обработать прижимные поверхности колец, их изготовление несложно.

Относительно просты в изготовлении и матрицы для деталей, имеющих осесимметричную форму, например такие, как днища, так как рабочие поверхности матриц имеют форму окружности, очень технологичную для обработки резанием. Например,

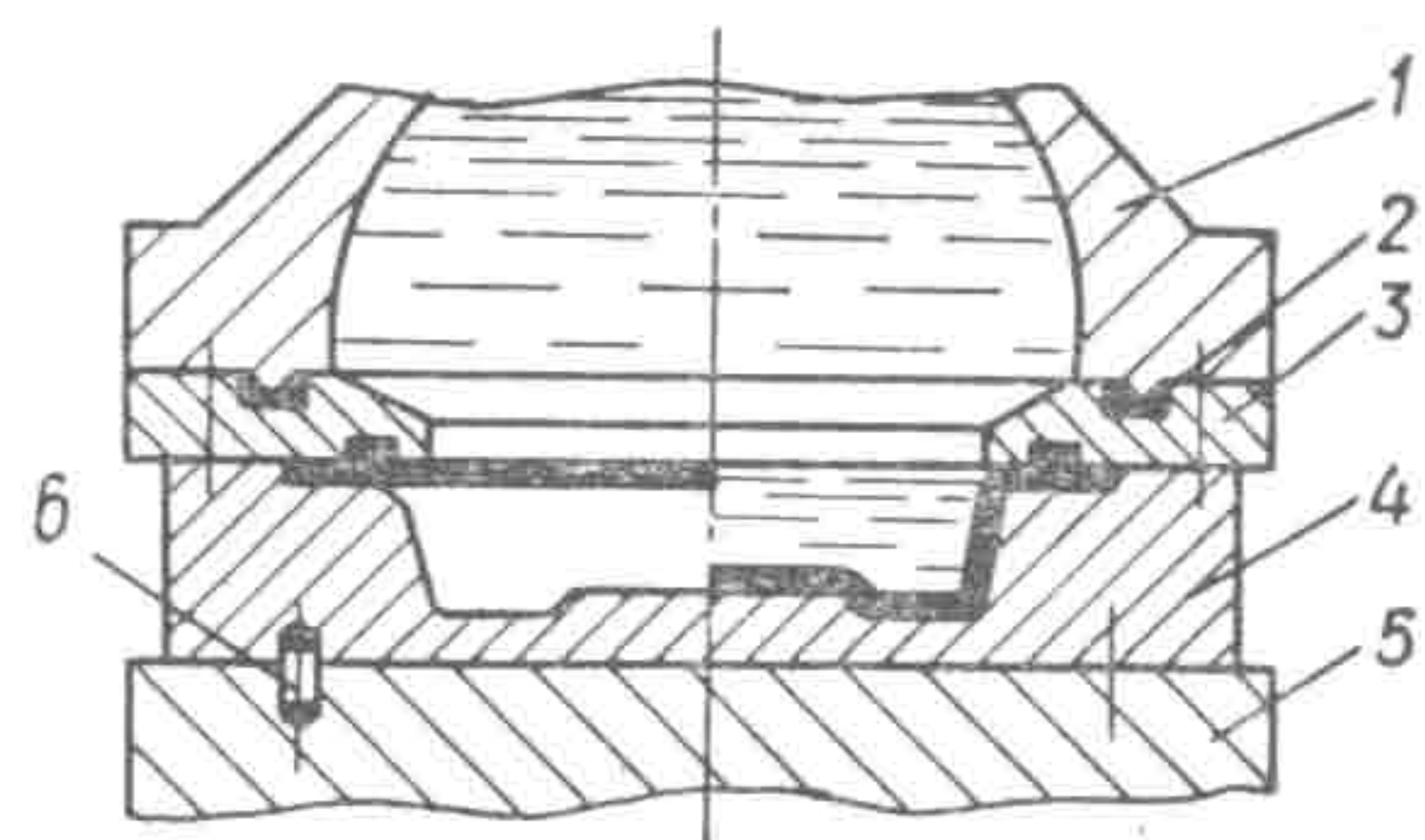


Рис. 65. Оснастка для вытяжки крупногабаритных деталей:

1 — камера пресса; 2 — уплотнение; 3 — прижимное кольцо; 4 — матрица; 5 — стол пресса; 6 — фиксирующий штифт.

рица для штамповки днищ наибольшего размера, изготовленная из стали 35ЛШ с толщиной стенки 80 мм и восемью радиальными ребрами жесткости. Вместе с тем большинство крупногабаритных деталей, которые могут штамповаться на ЭГ прессах, имеют не осесимметричную форму, зачастую с очень сложными поверхностями, как, например, кузовные детали легкового автомобиля, обработка поверхности матрицы для которых очень сложна. Для таких деталей и в опытном, и мелкосерийном производстве матрицы могут быть изготовлены литьем из свинцово-цинковых сплавов, которые обладают достаточной стойкостью при штамповке нескольких десятков деталей.

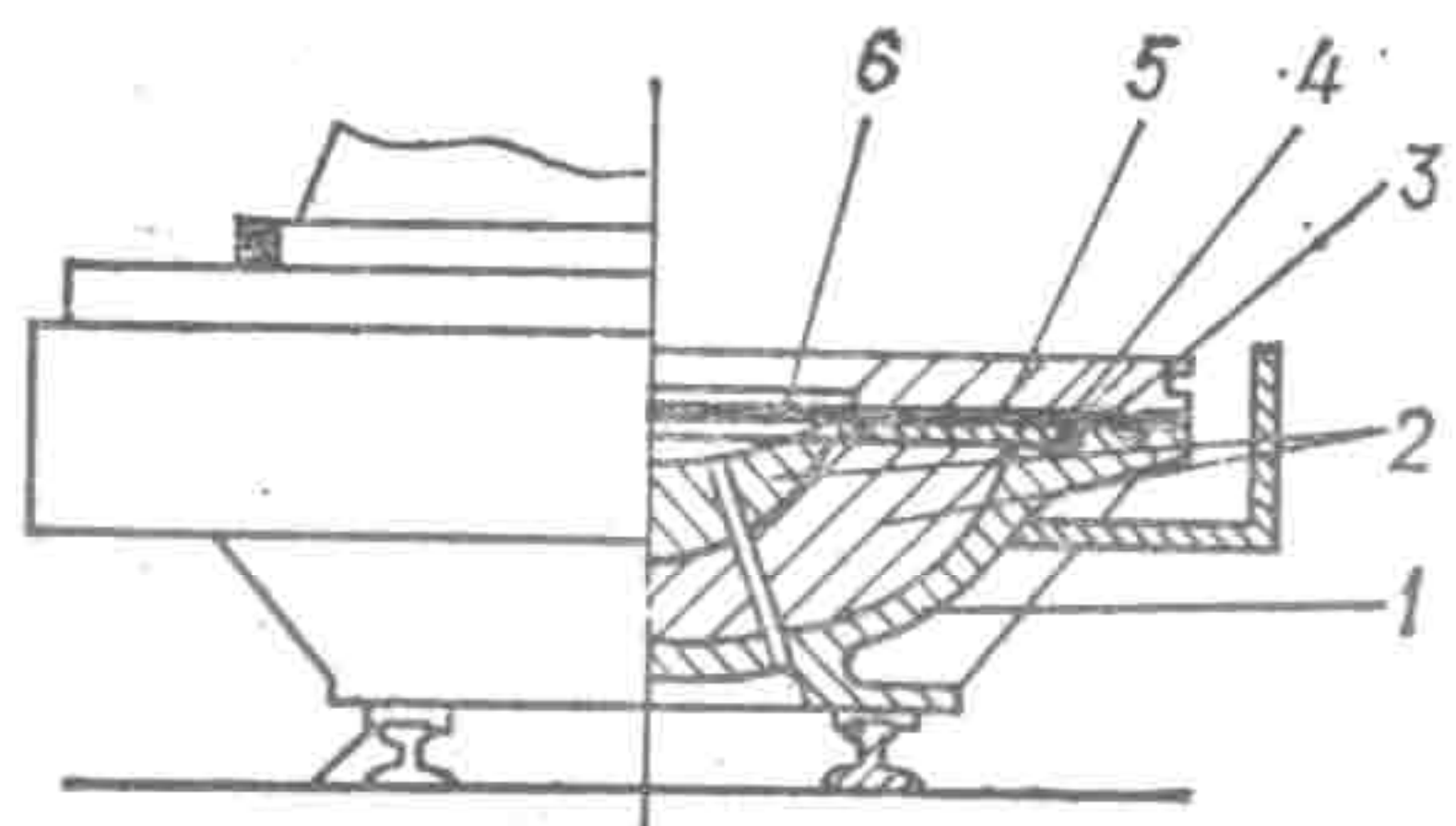


Рис. 66. Оснастка пресса «Удар-11»:

1 — матрица; 2 — вкладыши; 3 — трафарет; 4 — вытяжное кольцо; 5 — прижимная плита; 6 — заготовка.

металлической рабочей поверхностью, например из эпоксидной смолы с наполнителем (рис. 67) или из дерева. Эксперименты по ЭГ штамповке кузовных деталей для опытных образцов автомобилей, имеющих сложную форму с различными выштамповками,

для прессов «Удар-4», «Удар-4М», «Удар-7», «Удар-7Ж» и «Удар-11» с энергией в импульсе до 150 кДж применялись матрицы диаметром до 2990, высотой до 825 мм, которые с помощью стальных и свинцово-цинковых вкладышей позволяли штамповать детали разных размеров (рис. 66). Диаметры вкладышей менялись от 600 до 1500 мм [88]. Иногда использовались вкладыши из дерева. В качестве основания применялась матрица

В отдельных случаях можно использовать матрицы с не-

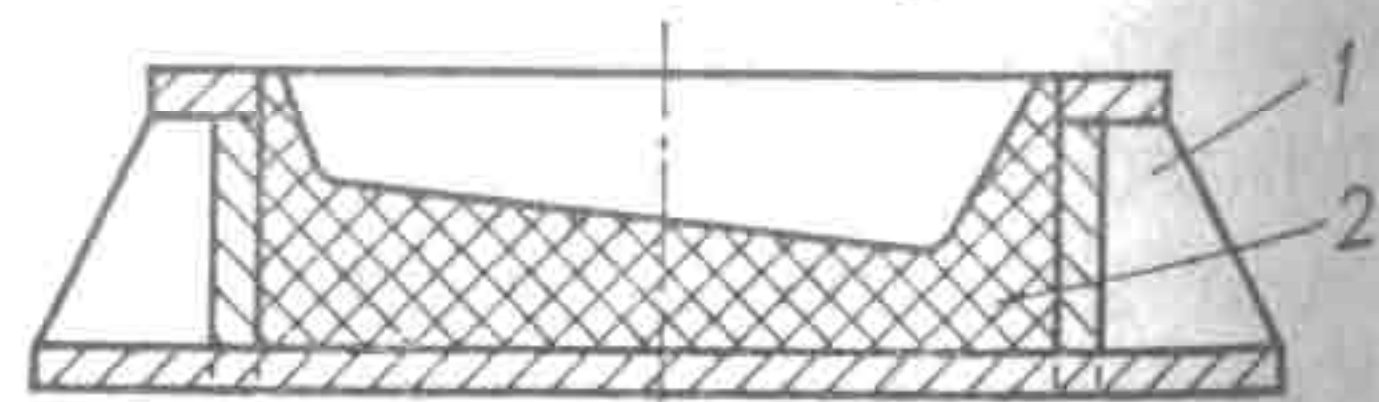


Рис. 67. Матрица с неметаллической формирующей поверхностью:

1 — контейнер; 2 — матрица.

показали, что на необлицованной эпоксидной смолой матрице можно отштамповать несколько деталей, предохраняя профиль матрицы в районе резких переходов резиновыми накладками. При этом деталь после штамповки не имеет окончательной формы, но объем ручных доводочных работ во много раз меньше, чем ручная выколотка детали по «болвану», широко используемая при изготовлении опытных образцов. Стойкость неметаллических матриц может быть повышена, если рабочую поверхность облицевать листовым металлом. Для этого матрицу необходимо изготовить с рабочими размерами, отличающимися на толщину листа, отштамповать в нее первую деталь, провести ручную доводку недоштампованных участков и после ремонта поверхности матрицы, если на ней появились дефекты, закрепить в ней отштампованную деталь. Стойкость таких облицованных матриц значительно выше. Например, эксперименты по ЭГ штамповке деталей типа «пластина теплообменника» в бетонную матрицу, облицованную сталью толщиной 1,5 мм, показали, что матрица, имеющая достаточно жесткую сварную обойму, может выдерживать штамповку нескольких десятков деталей при больших импульсных нагрузках. Учитывая рекомендации по изготовлению неметаллических матриц [30], а также совершенствуя конструкцию этих матриц с целью повышения их стойкости, можно значительно сократить затраты на изготовление оснастки для крупногабаритных деталей в экспериментальном и опытном производстве.

3. ОСНАСТКА ДЛЯ ВЫТЯЖКИ

Вытяжка — наиболее сложная операция в листовой штамповке, успешное осуществление которой зависит от многих факторов: правильности определения требуемой для детали и допустимой для материала степени деформации, размеров заготовки, усилия прижима фланца, радиусов перетяжных ребер; учета требований к допустимому утонению материала, а также правильности расчета усилия деформирования. Эти факторы учитываются при выборе оптимальной технологической схемы вытяжки и проектировании оснастки независимо от способа штамповки. При ЭГ вытяжке добавляются требования обеспечения герметичности оснастки в течение всего процесса деформирования, исключения попадания воды между заготовкой и матрицей и удаления воздуха из-под заготовки. К наиболее распространенной относится однопереходная схема для вытяжки детали с конструктивным или технологическим фланцем (рис. 68), в которой заготовка 3 деформируется в матрицу 4 под действием импульсного давления жидкости, непосредственно контактирующей с заготовкой. Герметизация обеспечивается

уплотнениями 2, устанавливаемыми в специальных канавках камеры 1, а выход воздуха из полости матрицы осуществляется через отверстия 5.

При такой схеме глубина вытягиваемых деталей обычно не больше, чем достигаемая вытяжкой в жестких штампах за один переход. Вытяжка за два и более переходов с целью полу-

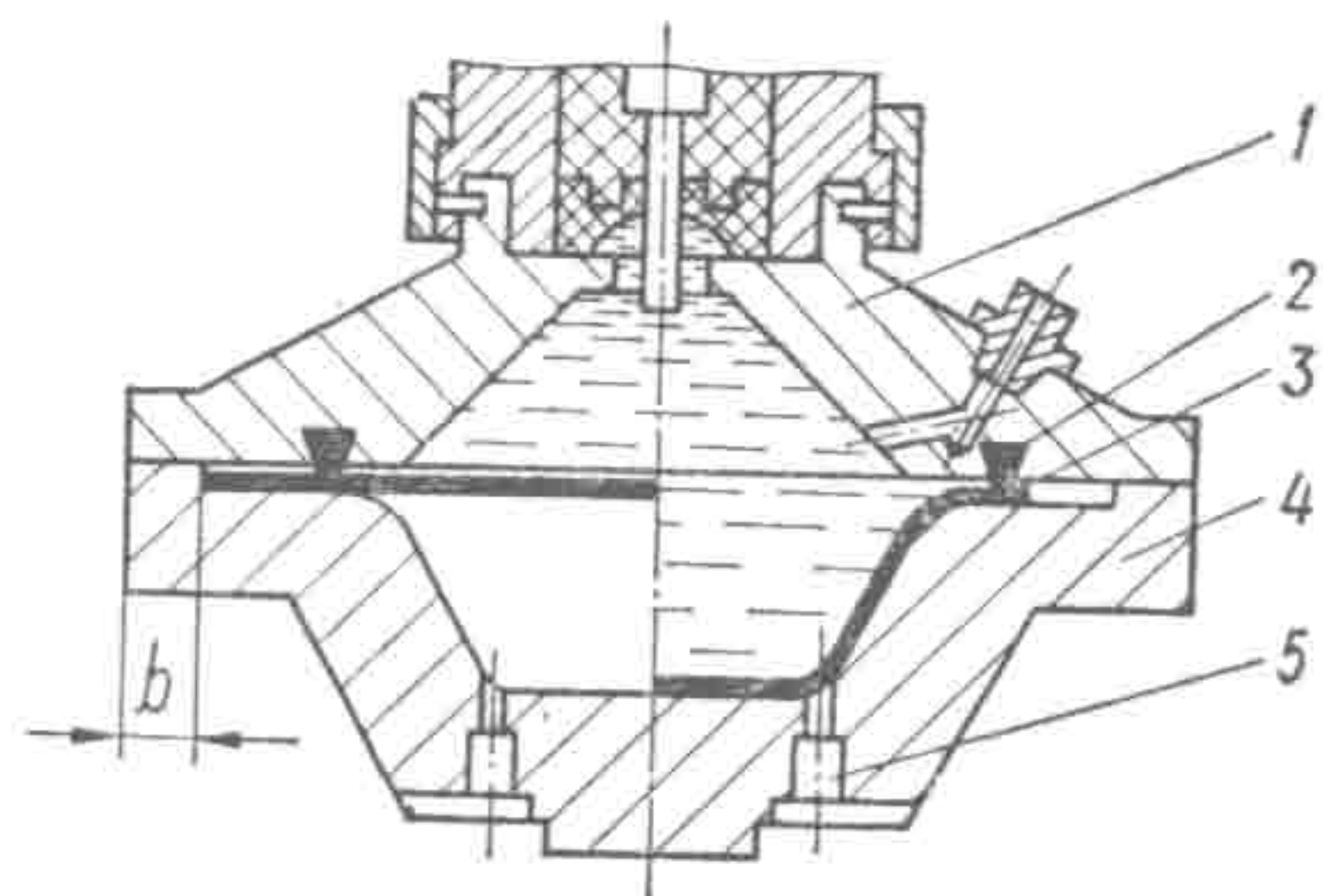


Рис. 68. Схема оснастки для вытяжки.

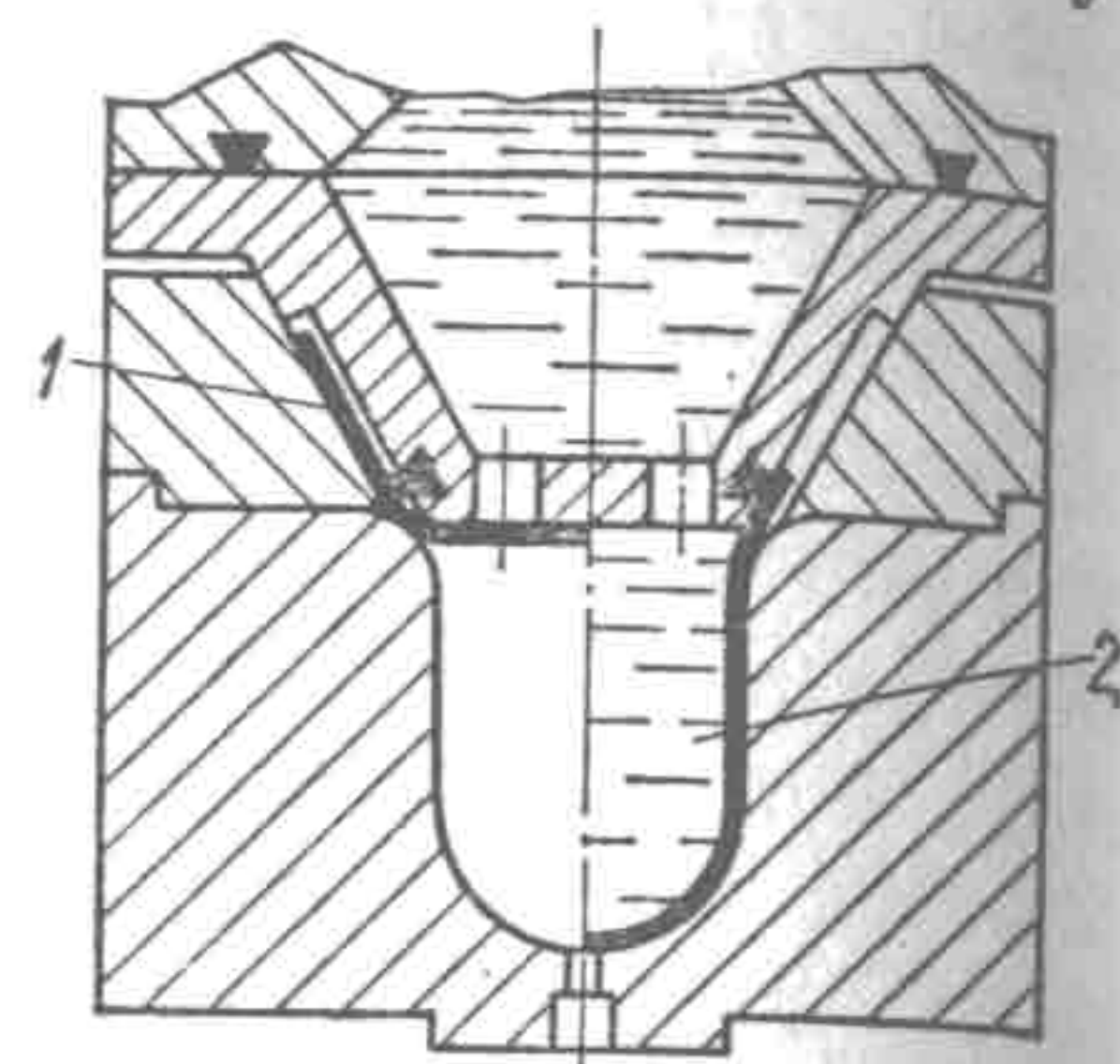


Рис. 69. Схема для двухпереходной ЭГ вытяжки:

1 — заготовка; 2 — вытягиваемая деталь.

чения более глубоких деталей, хотя в принципе и осуществима (рис. 69), пока находится в стадии лабораторных исследований. В производственных условиях она может быть применима в особых случаях, так как сложность ее изготовления не уступает сложности изготовления вытяжных штампов для механических прессов.

Дополнительные переходы применяются, как правило, не для увеличения глубины вытяжки, а для калибровки радиусов закруглений. Причем если деталь имеет в плане некруглую форму, то калибровка проводится в вытяжной матрице без переналадки оснастки после разупрочняющего отжига вытянутой на первом переходе детали. Радиус закругления донной части детали, имеющей в плане круглую форму, может быть откалиброван без промежуточного отжига с незначительной переналадкой оснастки. На первом переходе деталь вытягивается несколько большей глубины, чем требуется по чертежу, с радиусами закруглений, которые оформляются давлением, получаемым в камере при максимальной энергии в импульсе в процессе вытяжки. Для получения меньшего радиуса на втором переходе в матрицу 2 устанавливается вкладыш 3 (рис. 70), при котором глубина матрицы становится равной требуемой глубине детали. Фланец детали прижимается камерой 1 к матрице. При этом происходит уменьшение высоты детали и создаются сжимающие напряжения в районе калибруемого радиуса, которые значительно снижают требуемое давление

со стороны жидкости для оформления радиуса закругления. Между поверхностью матрицы в районе перетяжного ребра и центра дна образуются зазоры.

При разряде импульсное давление жидкости перемещает «лишний» металл из района перетяжного ребра и дна детали к радиусу закругления и, таким образом, калибрует радиус

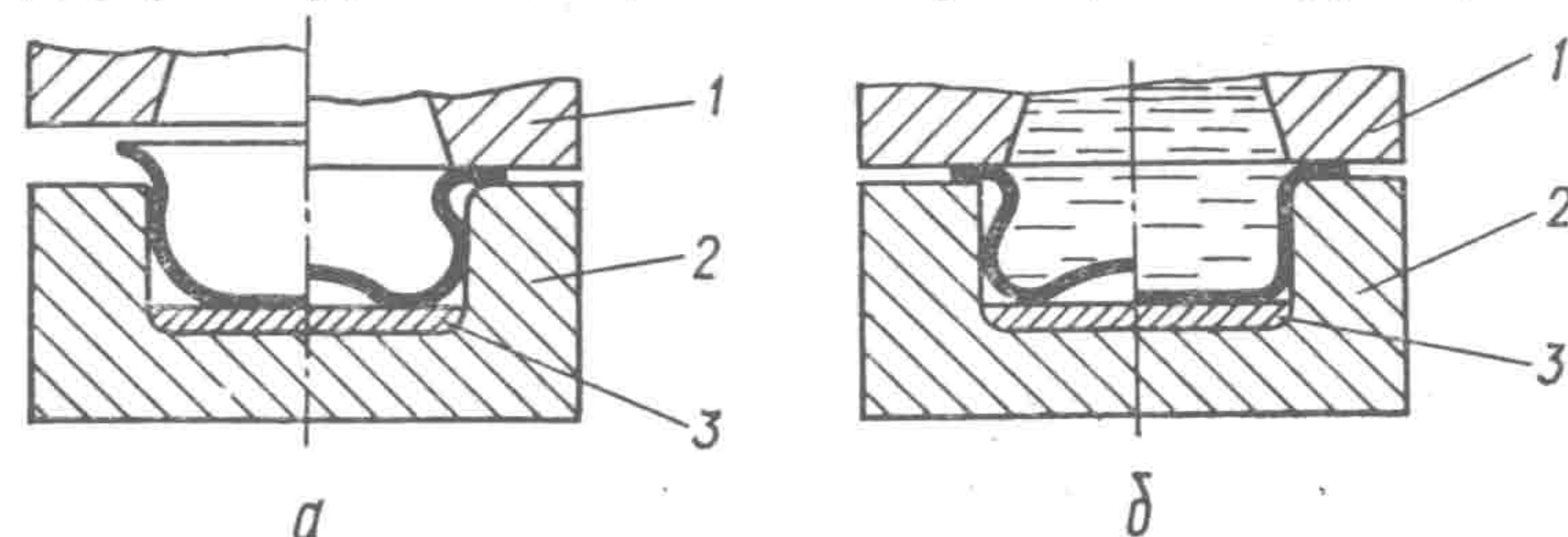


Рис. 70. Схема калибровки радиусов:

a — положение заготовки и ее форма до и после прижима; б — форма заготовки после прижима и форма детали после калибровки.

детали. Эксперименты показали, что такая двухпереходная схема штамповки позволяет уменьшить радиусы в несколько раз и в отдельных случаях доводить их до величины, равной толщине материала [101]. Высота детали на первом переходе выбирается из расчета равенства площадей деталей на первом и втором переходах. В качестве компенсации за рас-

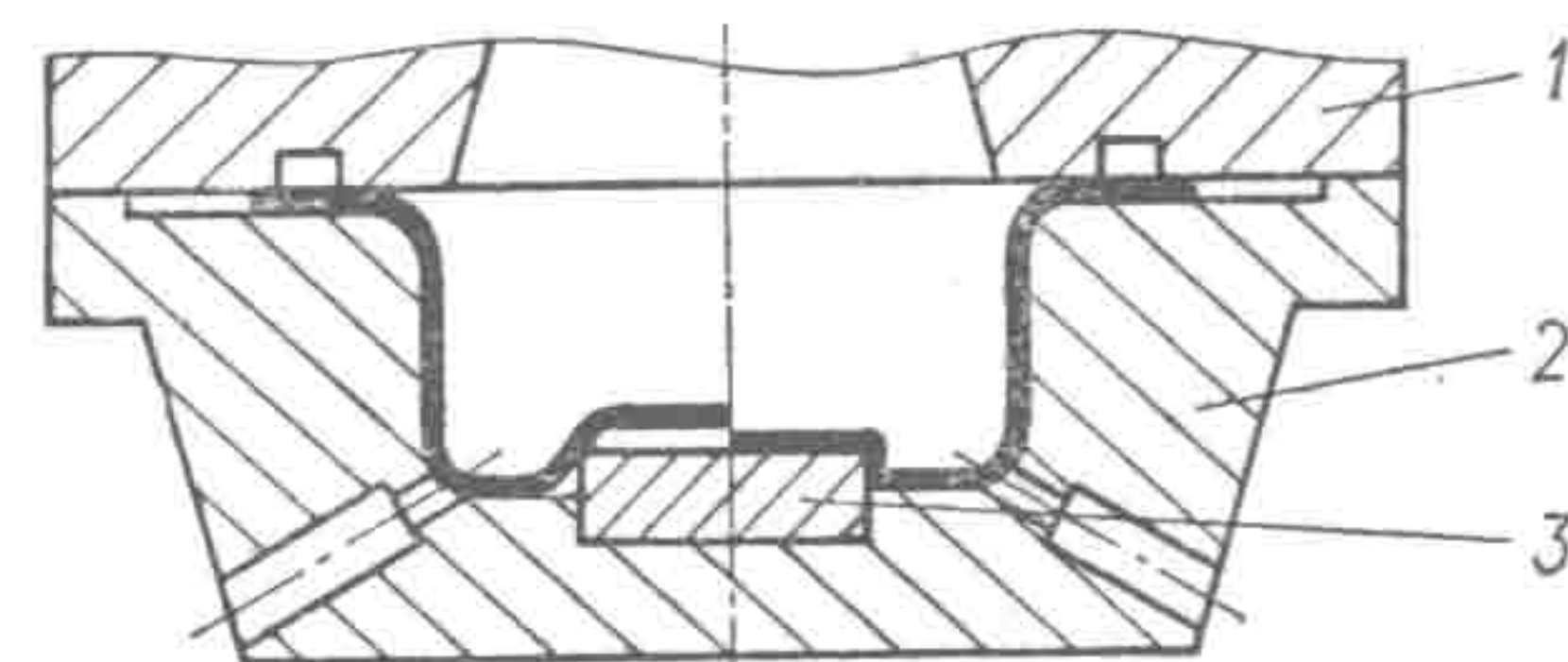


Рис. 71. Схема оснастки для калибровки радиусов выштамповок:

1 — камера; 2 — матрица; 3 — сменный вкладыш.

четные неточности и во избежание складкообразования при калибровке площадь поверхности детали после первого перехода целесообразно закладывать несколько меньшей, на 1—2 %.

Аналогичная двухпереходная схема принимается и при калибровке радиусов выштамповок в донной части вытягиваемых деталей (рис. 71). После первого перехода выштамповка имеет высоту и радиусы закруглений больше требуемых по чертежу. На втором переходе уменьшение высоты выштамповки осуществляется импульсным давлением жидкости одновременно с калибровкой радиусов. При осуществлении этой схемы могут быть использованы резиновые накладки, наклеиваемые на выступающие участки матрицы (рис. 72) при выполнении первого перехода. Эксперименты по ЭГ вытяжке кузовных деталей автомобиля, имеющих выштамповки, показали,

что использование таких накладок не только позволяет уменьшить радиусы закруглений выштамповок, но и исключить разрыв заготовки по ребру выштамповки, а также повысить стойкость неметаллических матриц.

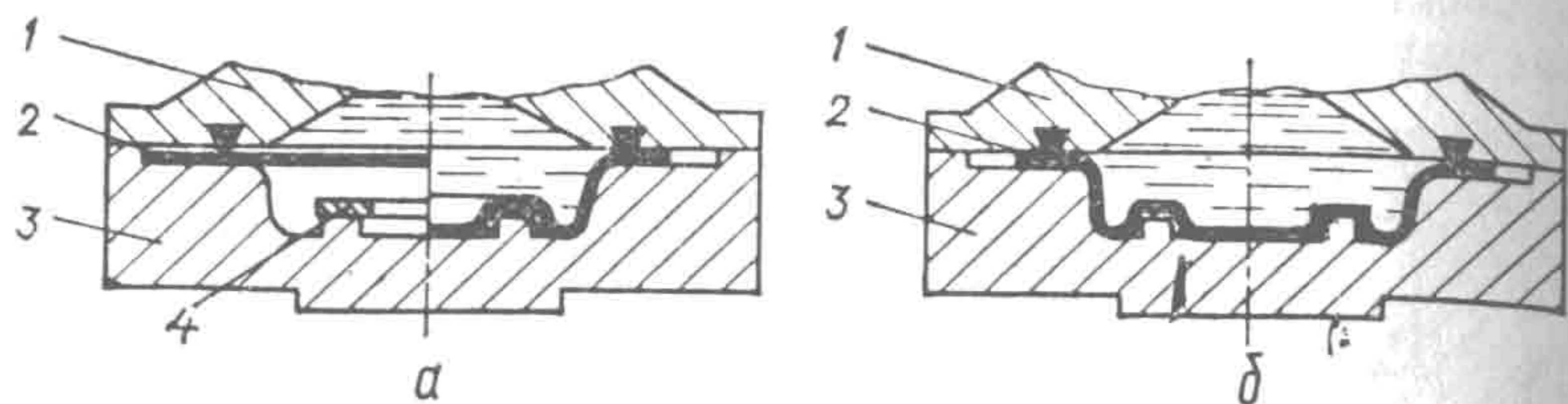


Рис. 72. Схема калибровки радиусов с использованием резиновых накладок:

1 — камера; 2 — заготовка; 3 — матрица; 4 — резиновая накладка.

При штамповке на обычных прессах наибольшее утонение наблюдается на радиусах скругления и боковых стенках. При штамповке на ЭГ прессах в результате более равномерного распределения нагрузки максимальное утонение сосредоточено обычно в центре дна и при глубине вытяжки, близкой к предельной, может превышать допустимые величины.

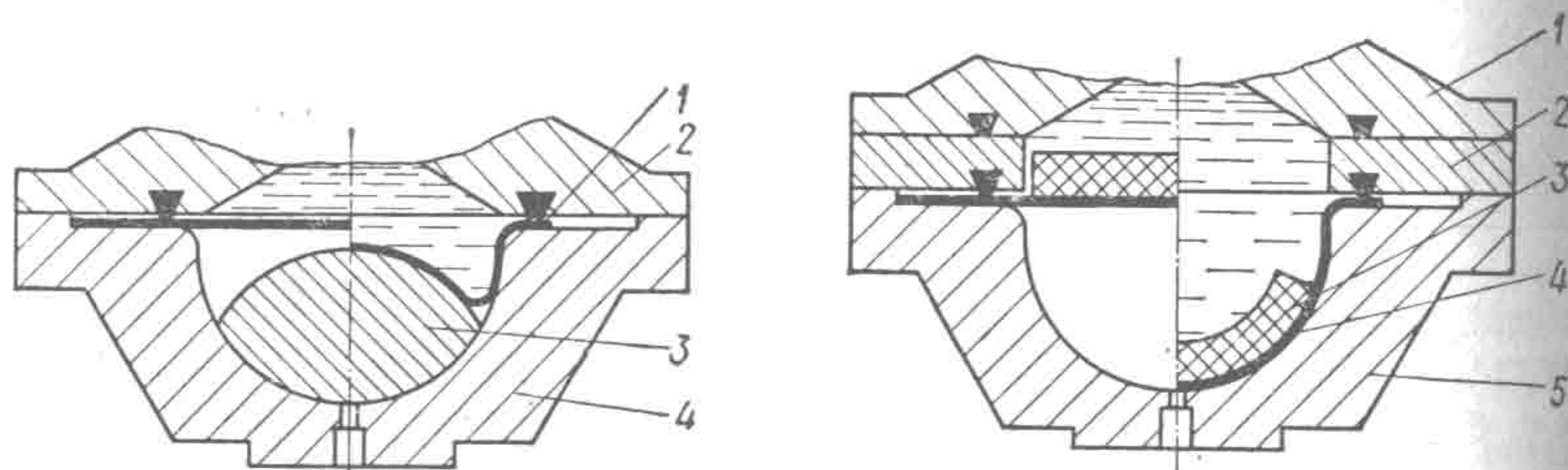


Рис. 73. Схема оснастки для вытяжки с набором материала на вкладыш:

1 — заготовка; 2 — камера; 3 — вкладыш; 4 — матрица.

Рис. 74. Схема оснастки для вытяжки с присоединенной массой:

1 — камера; 2 — кольцо; 3 — накладка; 4 — штампуемая деталь; 5 — матрица.

Для предотвращения разрывов детали могут быть рекомендованы схемы штамповки, которые позволяют уменьшать утонение при ЭГ вытяжке в центральной зоне в 1,1—1,4 раза. К таким относится двухпереходная схема вытяжки с набором материала на первом переходе за счет использования вкладыша 3, который иногда называют «грибком» (рис. 73) [103, 104]. Высота вкладыша обычно не превышает половины высоты детали. После первого перехода вкладыш из матрицы удаляется и происходит выворачивание набранного материала на втором переходе с оформлением детали по матрице. Кроме того,

иногда применяют схему штамповки с так называемой присоединенной массой (рис. 74), в качестве которой используют эластичные накладки, например из полиуретана толщиной более 10 толщин заготовки.

Схемы штамповки с набором материала на вкладыш и штамповки с присоединенной массой целесообразно иметь в виду как запасные варианты при отработке технологии в случае получения деталей с утонением, превышающим допустимую величину, или при разрывах заготовки. Утонение детали может быть уменьшено или перераспределено также и при использовании в оснастке концентраторов силового поля, которые изменяют распределение нагрузки по поверхности заготовки, что в свою очередь изменяет распределение утонения по сечению детали. Исследования концентраторов различных форм показали, что наибольший

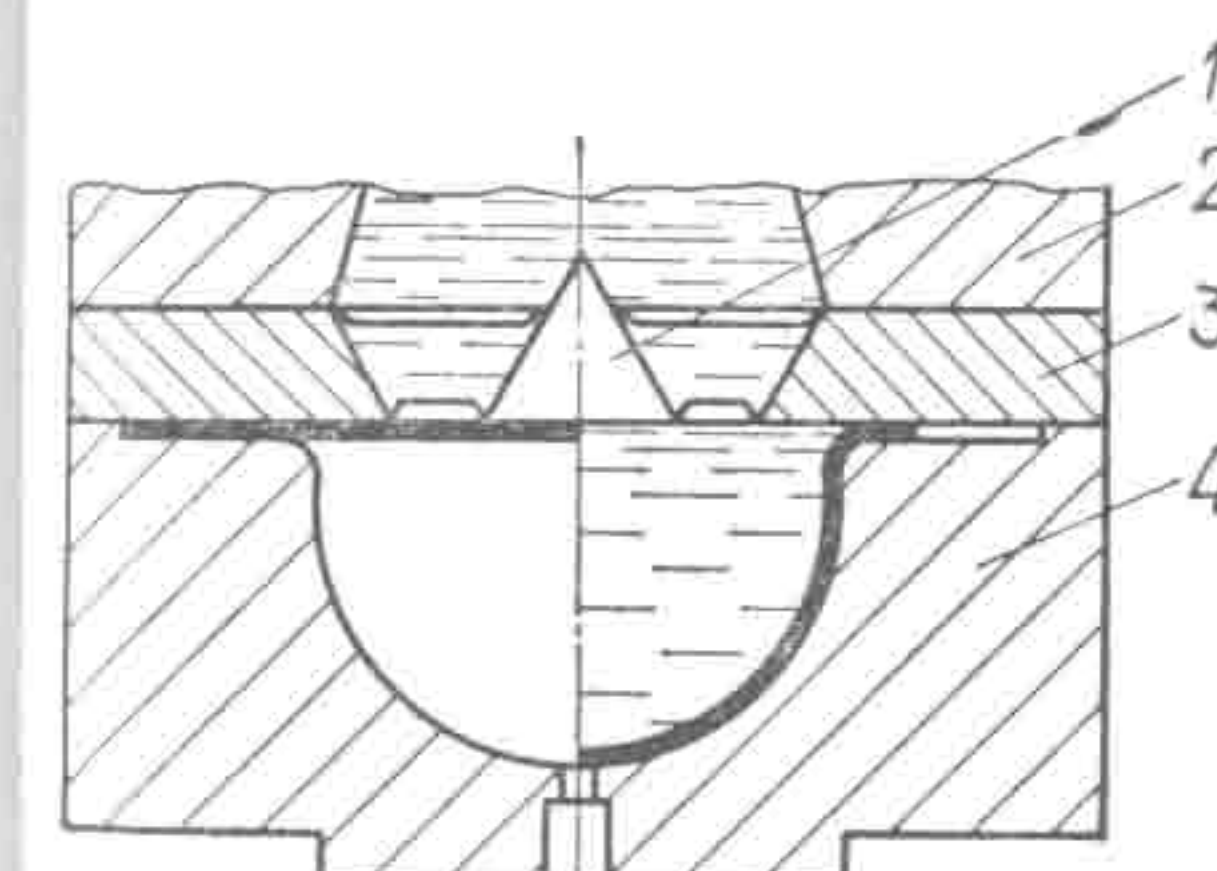
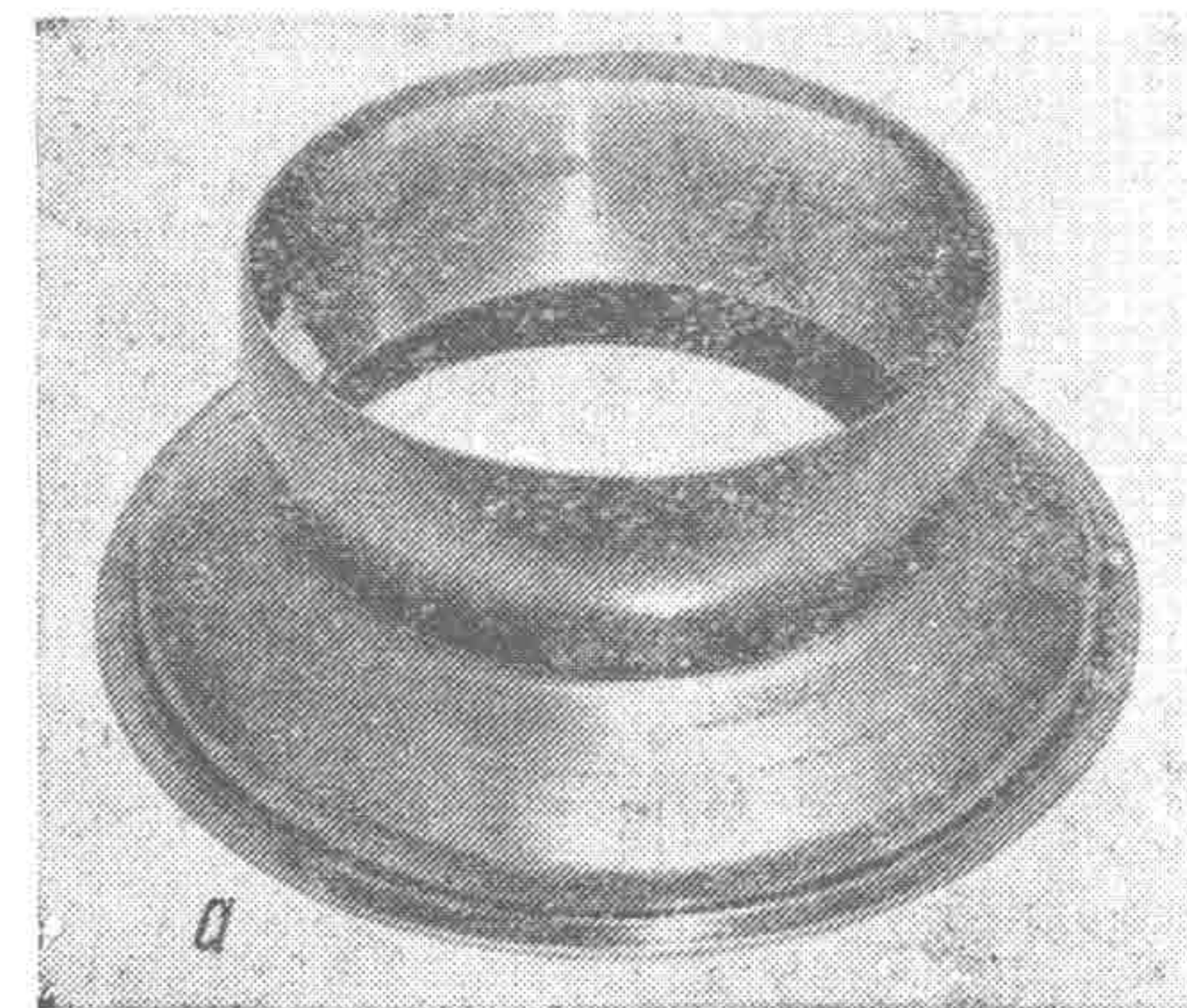


Рис. 75. Схема оснастки для вытяжки с комбинированным концентратором:

1 — конический концентратор; 2 — камера; 3 — кольцевой концентратор; 4 — матрица.

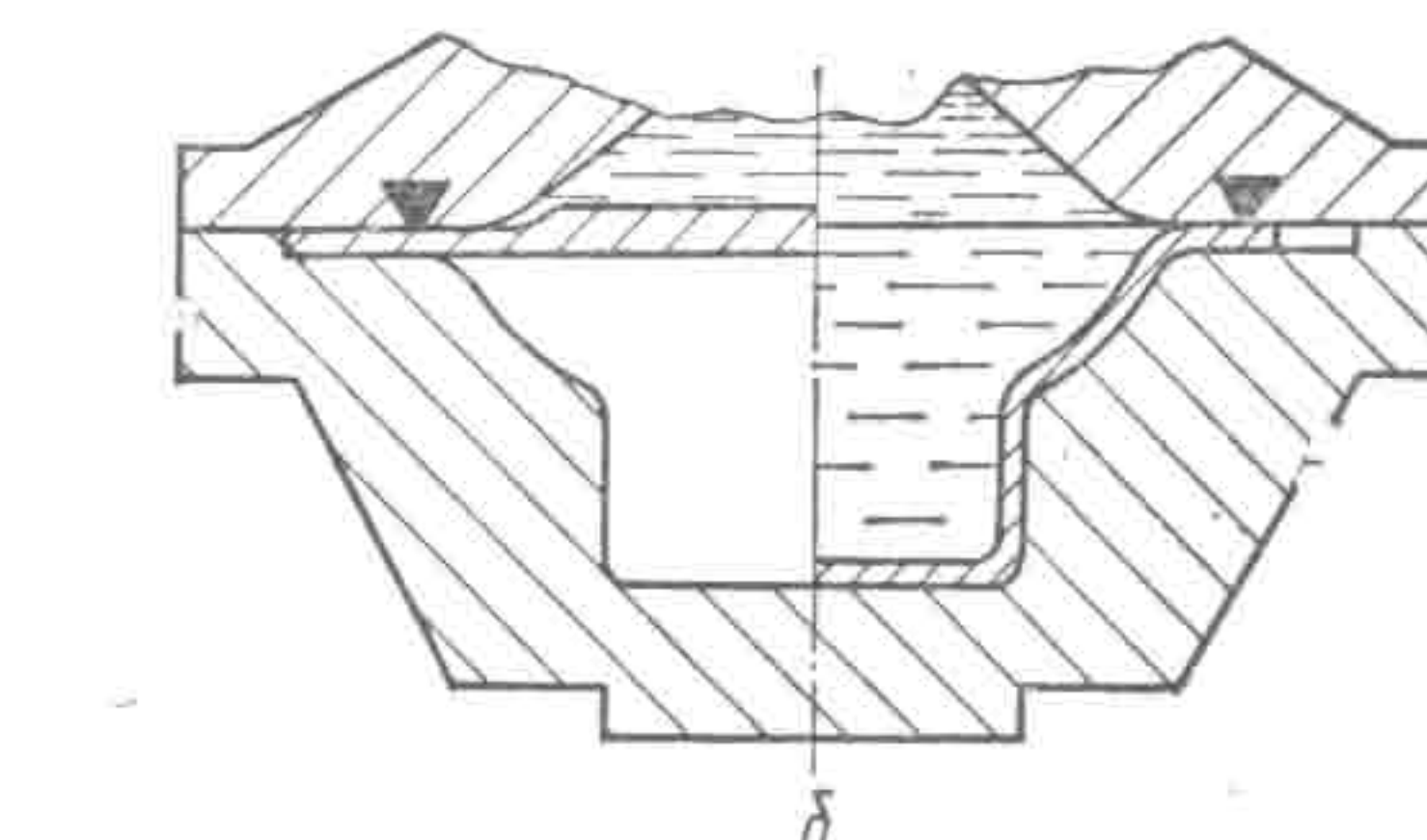


Рис. 76. Экран, вытянутый на прессе Т1220 (а) по схеме вытяжки из разнотолщинной заготовки (б).

эффект дает комбинированный концентратор (рис. 75) [23].

Перечисленные способы, уменьшающие утонения центральной зоны дна заготовки, дают относительно невысокие результаты. Более эффективна в этом плане схема штамповки из разнотолщинной заготовки, которая не только позволяет получать детали с толщиной дна, близкой к толщине фланца, но и значительно увеличивать при этом степень вытяжки. Суть данной схемы заключается в том, что увеличивается исходная толщина центральной части заготовки, вследствие чего после деформирования, которое сопровождается утонением центра, толщина детали оказывается более равномерной. Кроме того,

при штамповке заготовок разрушение наступает при больших степенях вытяжки вследствие уменьшения растягивающих напряжений в донной части детали. Таким способом был отштампован, например, первый переход детали «Экран» (рис. 76, а):

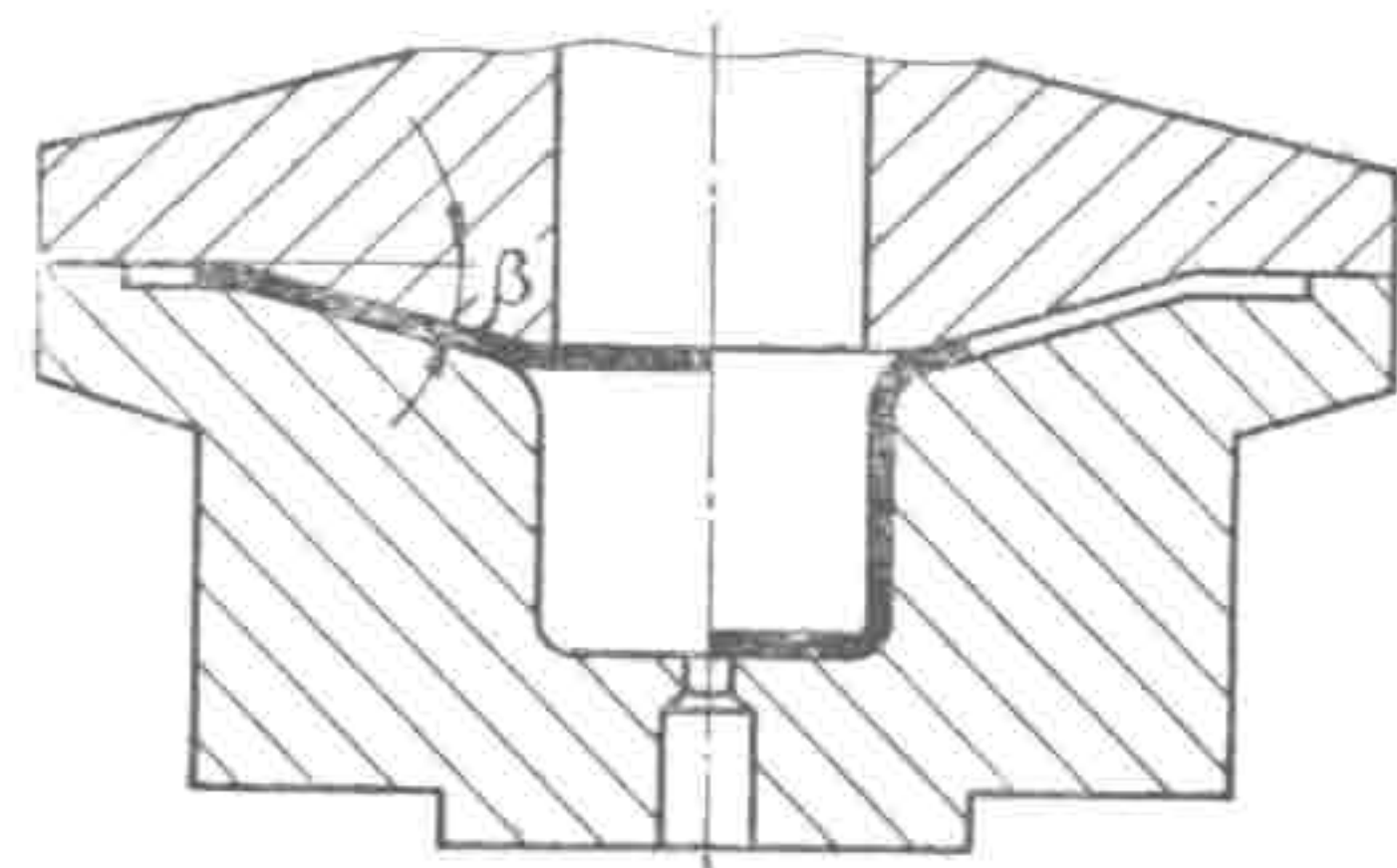


Рис. 77. Оснастка с конусным прижимом.

диаметр фланца детали 208, вытягиваемой части 128 мм, глубина вытяжки 90 мм, материал АМцМ. Заготовка диаметром 160 мм в центральной части имела толщину 3,5 мм, в остальной части — 2,4 мм, что соответствовало чертежу детали. После вытяжки центральная часть равномерно утонилась до 2,2 мм.

Такая схема штамповки предполагает повышенный расход металла, поскольку при изготовлении заготовки снимается лишний металл по периферийной ее части, но зато сокращается число переходов и уменьшается стоимость оснастки. При изготовлении деталей малыми партиями она может быть во многих

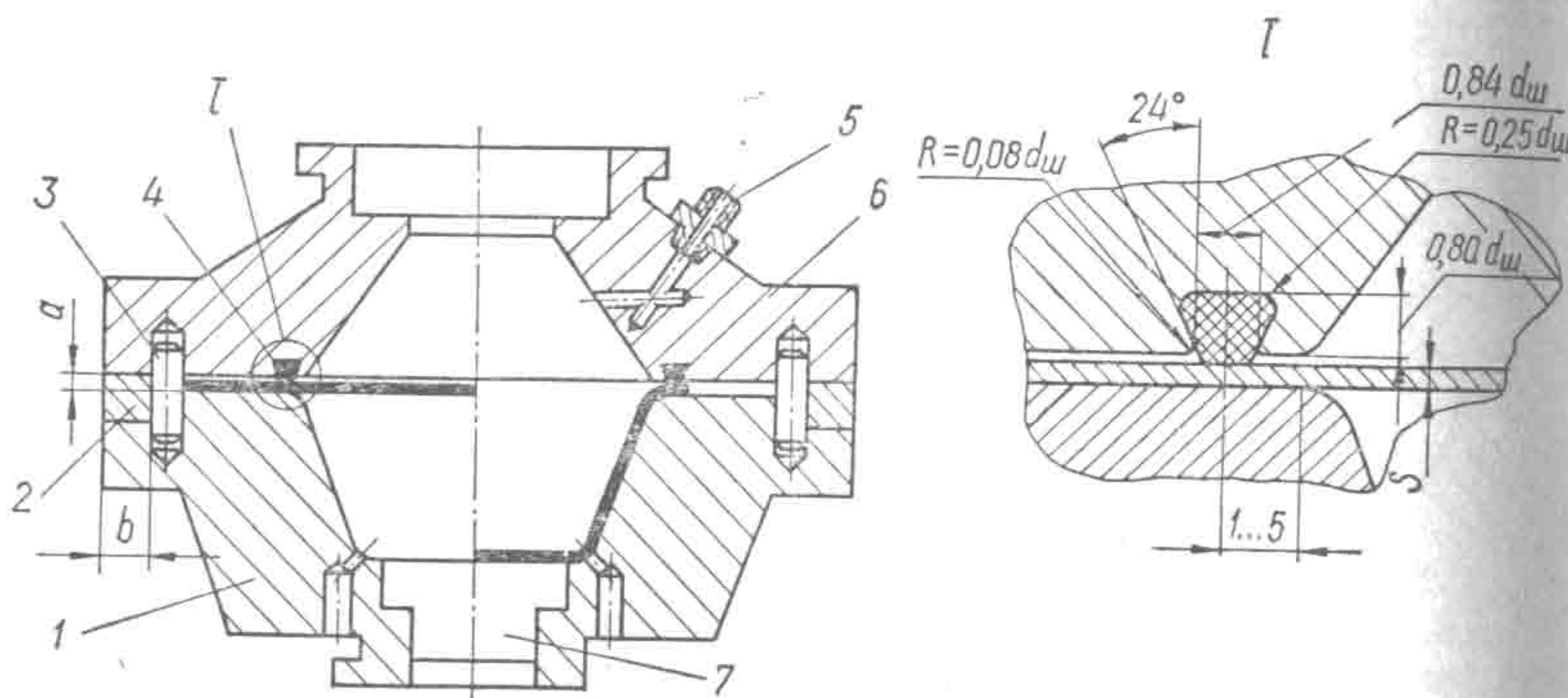


Рис. 78. Типовая технологическая оснастка для вытяжки.

случаях целесообразна. Следует иметь в виду, что переход от утолщенной части заготовки к периферийной должен быть плавным и заготовка должна укладываться на матрицу плоской стороной (рис. 76, б).

В некоторых случаях для увеличения глубины вытяжки используется конусный прижим с углом конуса β до 15° (рис. 77). В этом случае предварительное деформирование заготовки прижимом пресса способствует увеличению глубины вытяжки, но в то же время процесс вытяжки имеет повышенную чувствительность к факторам, обеспечивающим симметричную утяжку фланца. Неравномерность зазора между конусными

прижимными поверхностями, толщины заготовки, слоя смазки, неточная центровка заготовки и тому подобное из-за несимметричной утяжки фланца приводят к браку чаще, чем в оснастке с плоским прижимом.

При вытяжке используется также схема с использованием эластичных диафрагм. Эта схема применяется в основном при вытяжке деталей небольшой относительной глубины и при рельефной формовке для сокращения времени на вспомогательные операции, связанные с заполнением камеры водой, и исключения из цикла штамповки времени на удаление воды из отштампованной детали и просушивание матрицы.

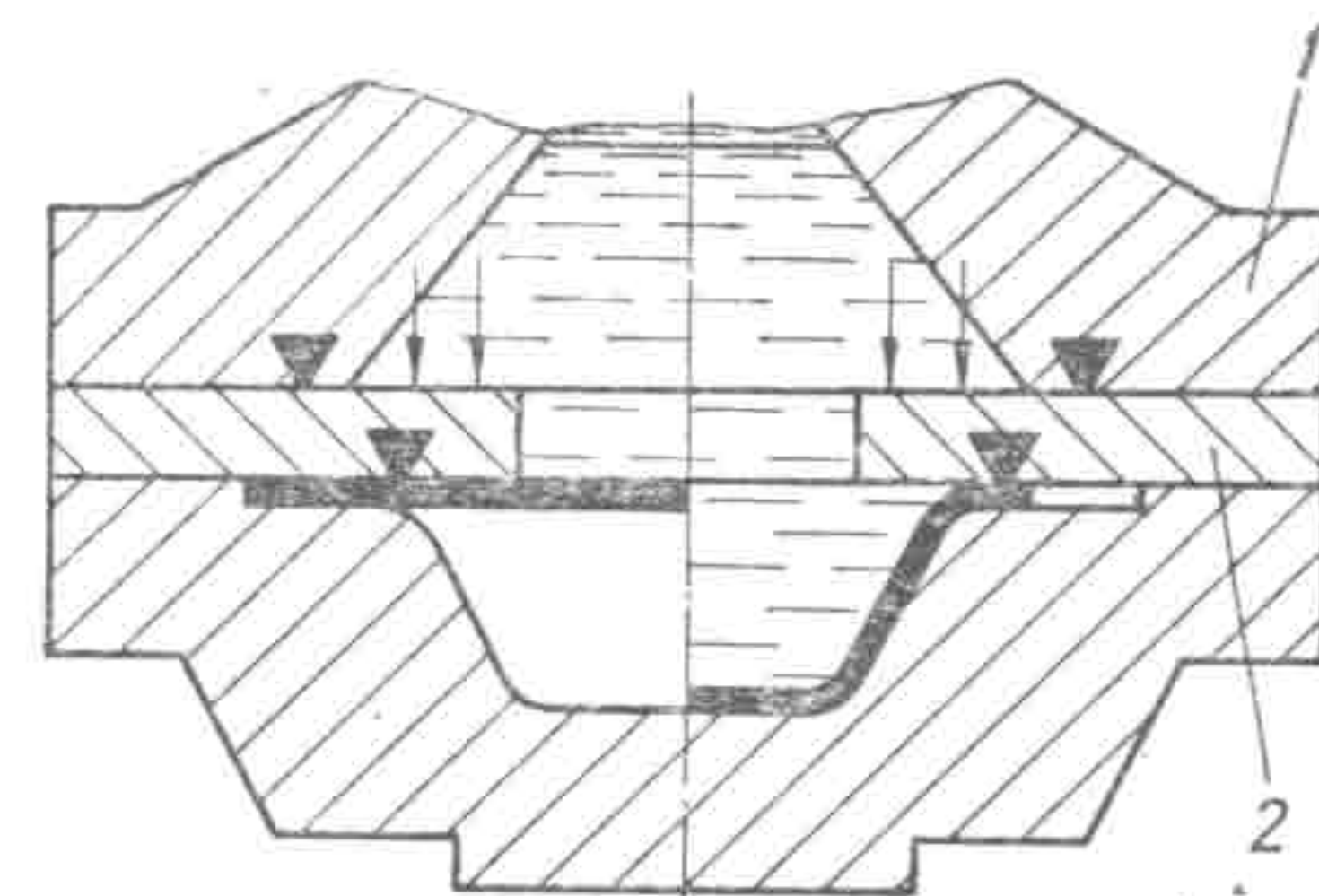


Рис. 79. Схема вытяжки с гидродинамическим прижимом.

Типовая технологическая оснастка для вытяжки, используемая, например, на прессах Т1220 и Т1223, состоит (рис. 78) из разрядной камеры 6, являющейся одновременно прижимом (складкодержателем), с установленными в ней уплотнительным кольцом 4 и штуцером для подвода воды 5, и матрицы 1 с фиксаторами заготовки 3. Так как пресс Т1223 снабжен выталкивателем, то оснастка для этого пресса содержит выталкивающий вкладыш 7.

На всех прессах, разработанных ПКБЭ, прижим осуществляется жесткими клинорычажными механизмами, регулировка усилия которых затруднена и во многом зависит от опытности оператора-штамповщика, поэтому вытяжка на этих прессах проводится с гарантированным зазором. В принципе возможна вытяжка и с гидродинамическим прижимом, когда ограничительное кольцо 2 имеет отверстие меньше, чем выходное отверстие камеры 1 (рис. 79). В этом случае для прижима заготовки используется давление, создаваемое в разрядной камере пресса. Однако эта схема, помимо того, что усложняет оснастку, требует дополнительных расчетов по обеспечению оптимального значения усилия прижима и сложна в доводке, так как для изменения усилия прижима при одинаковой энергии в импульсе необходимо менять выходное отверстие камеры; поэтому она не применяется на прессах, имеющих достаточное усилие прижимных механизмов.

Гарантированный зазор, необходимый для уменьшения трения между матрицей и заготовкой, создается за счет ограничительного выступа высотой 1,1—1,2 толщины заготовки, расположенного по периметру прижимной поверхности матрицы. Ширина выступа b (см. рис. 78) выбирается так, чтобы

исключить его смятие при максимальном усилии прижима, обеспечить возможность увеличения размеров заготовки при отработке технологии и размещении при необходимости фиксаторов заготовки. Обычно выступ делается шириной 20—30 мм. Внутренние размеры выступа определяются расчетными размерами заготовки. Верхний предел габаритов заготовки и прижимом, равный 20 % толщины заготовки, ограничивается допустимой высотой складок, возникающих в результате потери устойчивости фланца, резко увеличивающих сопротивление вытяжки. Такой зазор рекомендуется выбирать при технологическом (удаленном) фланце. Если фланец конструктивный, то величина зазора принимается равной 10 % толщины заготовки, что является нижним пределом, который ограничен утолщением фланца при вытяжке.

Гарантированный зазор можно создать ограничительным кольцом 2 (см. рис. 78) шириной 2—30 и высотой 10—20 мм. Меньшие размеры следует принимать при штамповке небольших деталей, большие — при штамповке деталей максимальных размеров.

Следует избегать использования трафаретов из тонколистового материала взамен ограничительных выступов или колец, особенно при штамповке деталей круглой формы, поскольку под действием импульсного давления жидкости, проникающей в зазор между прижимом и заготовкой при разряде, тонколистовые трафареты деформируются и быстро выходят из строя.

Если оснастка предназначена для штамповки небольшой партии деталей, до 200—300 шт., то ограничительные кольца могут играть роль фиксаторов заготовки. При этом во время эксплуатации оснастки необходимо контролировать положение заготовки после задвижения стола так как ограничительное кольцо или выступ не гарантируют надежной ее фиксации во время «страгивания» и остановки стола пресса. При больших программах предусматриваются фиксаторы заготовки (четыре штуки) (см. рис. 78, 3), которые устанавливаются в вытяжных матрицах после уточнения размеров заготовки в процессе отработки технологии.

При установке фиксаторов в матрицу в прижиме соответственно делают гнезда. При этом необходимо предусмотреть фиксацию камеры и матрицы, чтобы предупредить их вращение, и обеспечить надежное совпадение оси гнезда с осью фиксатора при зажиме оснастки. Иногда используют подпружиненные утопающие фиксаторы, для которых не требуются гнезда и соответственно дополнительная фиксация камеры и матрицы.

В качестве уплотнения, устанавливаемого на прижимной поверхности разрядной камеры, используются или стандартные резиновые кольца, или круглые резиновые шнуры. Диаметр

шнура (диаметр сечения кольца) выбирается в пределах 3—6 мм, верхний предел — для заготовок максимальной толщины, нижний — для тонких заготовок. Форма и размеры канавки под уплотнение в зависимости от диаметра уплотнительного шнура $d_{ш}$ приведены на рис. 78 [1]. Ось симметрии канавки под уплотнение располагается на расстоянии 1—5 мм от точки выхода перетяжного радиуса на прижимную поверхность матрицы (см. рис. 78, узел 1). Большие значения принимаются

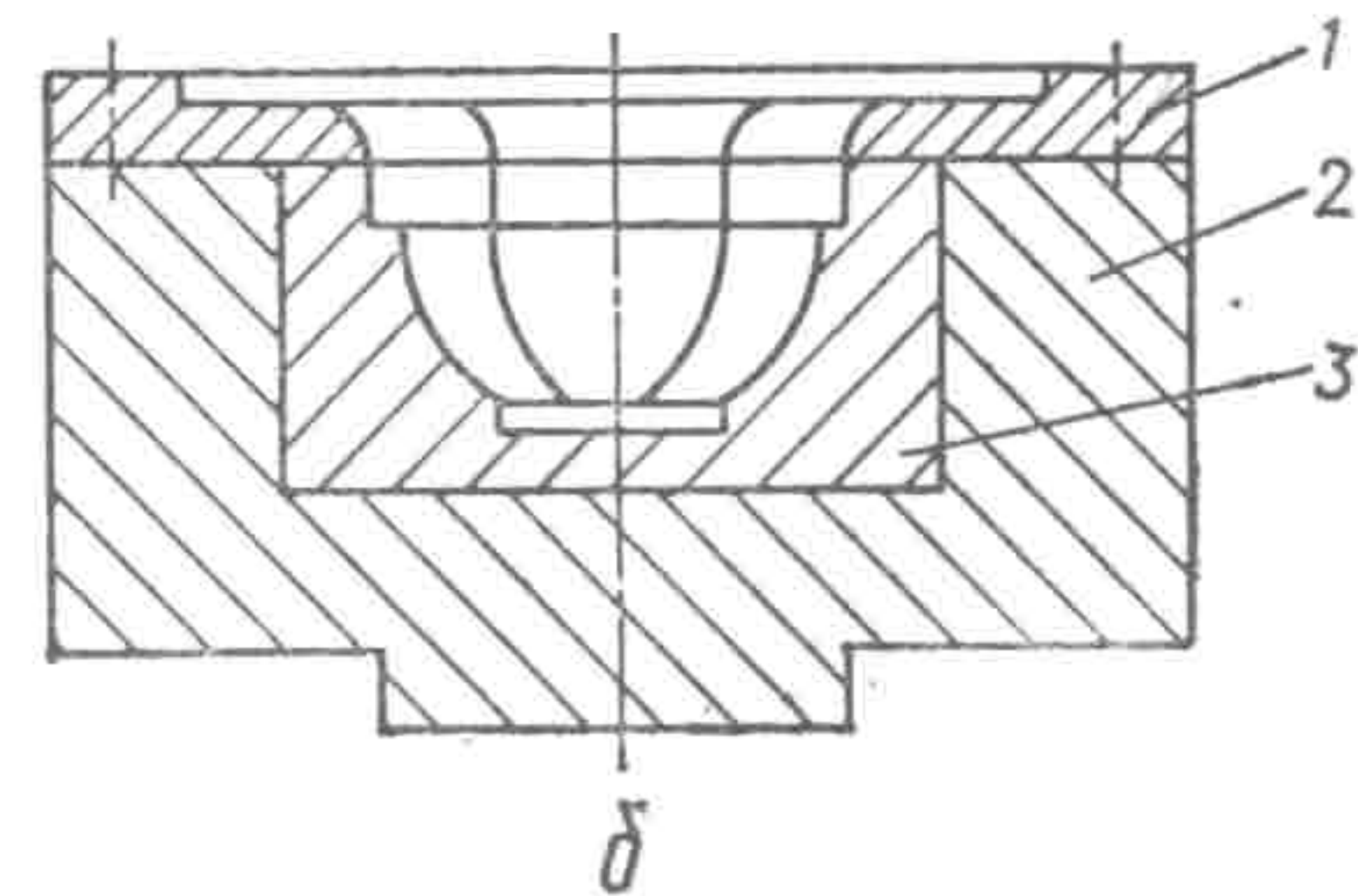
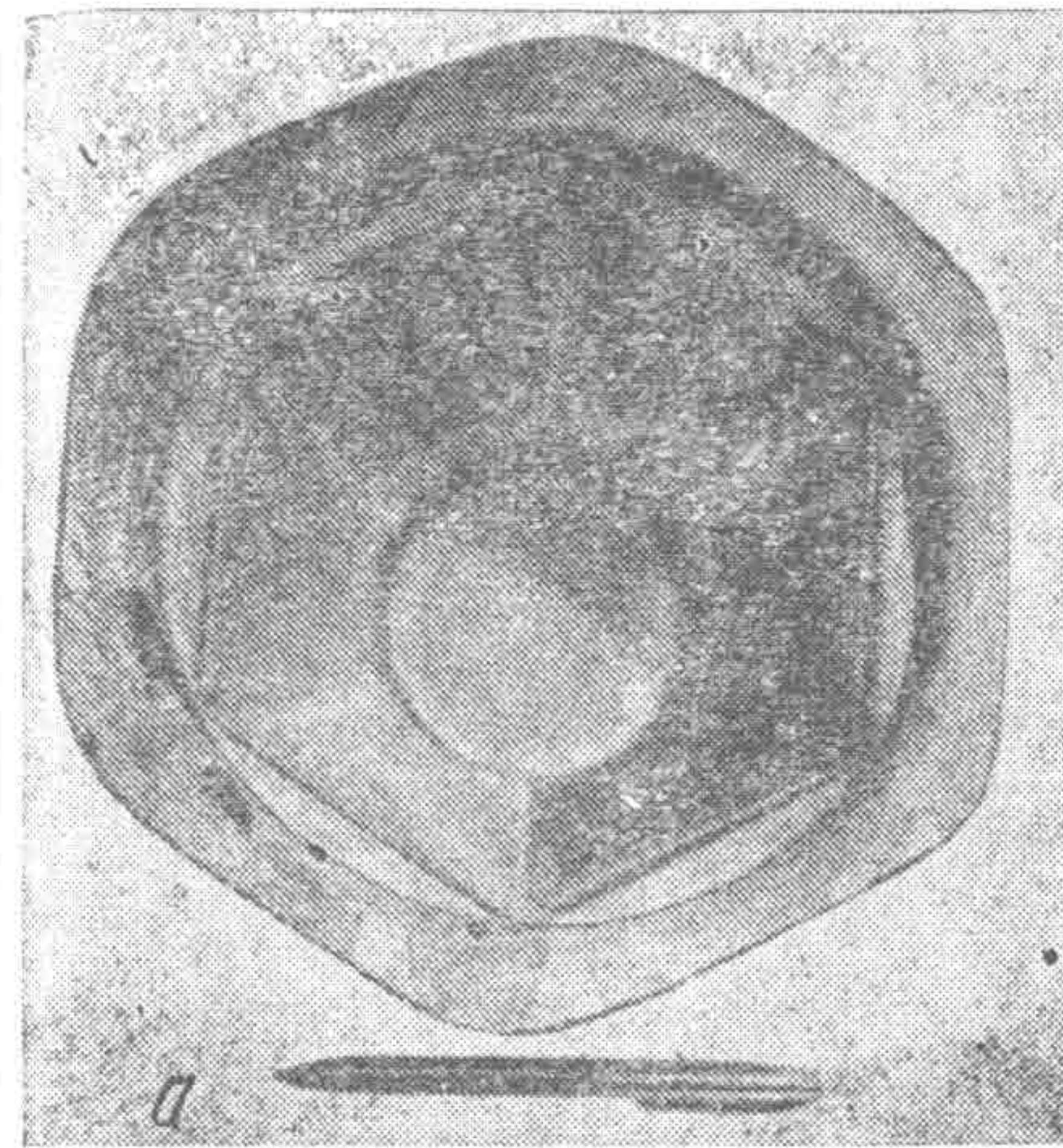


Рис. 80. Крышка, вытянутая на прессе Т1220 (а) и комбинированная матрица (б) для ее вытяжки:

1 — вытяжное кольцо; 2 — обойма; 3 — литой вкладыш.

для больших толщин штампуемого материала. При использовании в качестве уплотнения шнура концы его обрезаются под углом 15—30° и склеиваются.

Форма окна камеры оснастки для вытяжки должна соответствовать контуру вытягиваемой части детали по линии перехода от стенки к перетяжному радиусу.

Форма разрядной камеры определяется, с одной стороны, формой заготовки и детали в плане, а с другой — присоединительными размерами пресса. Наиболее распространенной формой полости в осевом разрезе является усеченный конус. Толщина стенок камеры должна быть достаточной, чтобы выдерживать многократные воздействия импульсов давления, возникающих при разряде. Практика показывает, что при изготовлении камер из стали 45 с HRC 32—36 толщина стенки для прессов Т1220 должна быть не менее 30 мм, для прессов Т1223 и «Удар-20с» — 40 мм. Толщина стенок матриц принимается на 5—10 мм больше толщины стенок камер.

Вытяжные матрицы на небольшие детали в большинстве случаев изготавливают из стали 45. При сложной неосесимметричной форме штампуемой детали (рис. 80, а), обработка

резанием формирующих поверхностей матрицы затруднена. Это иногда приводит к необходимости делать матрицу составной, например из вкладышей, охватываемых обоймой. Опыт показал, что для штамповки относительно небольших партий таких деталей (до 100—300 шт.), к которым не предъявляются высокие требования по точности размеров, могут быть применены комбинированные матрицы (рис. 80, б) с использованием легкоплавких металлов или сплавов для формирования рабочей поверхности литьем.

Исполнительные размеры матрицы для вытяжки детали, заданной наружным размером, могут быть рассчитаны по формуле $D_m = (D - \Delta) + \delta_m$, где D_m — диаметр матрицы; D — номинальный наружный диаметр детали; Δ — допуск на ее наружный размер; δ_m — допуск на изготовление матрицы, который рекомендуется выбирать на два класса выше допуска на деталь.

Если штампуемая деталь задана внутренним размером, то исполнительные размеры матрицы рассчитывают по формуле $D_m = \left(D_v + \frac{\Delta_v}{2} + 2S \right) + \delta_m$, где D_v — номинальный внутренний размер детали; Δ_v — допуск на внутренний ее размер.

В этом случае при выборе допуска на размер матрицы следует предусматривать, чтобы $\delta_m < \frac{\Delta_v}{2}$.

Величина радиуса перетяжного ребра матрицы выбирается в зависимости от степени вытяжки относительной толщины заготовки, формы матрицы, показателей пластичности штампуемого материала [100, 102—104]. При большой глубине вытяжки радиус принимается равным 8—12 толщинам заготовки, при небольшой глубине детали он может быть уменьшен до четырех толщин.

Матрицы для вытяжки деталей должны иметь такие размеры и форму, чтобы обеспечить свободную выемку детали. Это достигается введением небольшого конуса на ходу выталкивания. Если на штампуемых деталях такой уклон не предусмотрен, он может быть создан путем неравномерности распределения поля допуска, в этом случае верхний и нижний диаметры рассчитываются отдельно.

4. ОСНАСТКА ДЛЯ РЕЛЬЕФНОЙ ФОРМОВКИ

Рельефная формовка менее сложная операция, чем вытяжка. Она не требует решения вопросов по обеспечению оптимального усилия прижима фланца в таком плане, как это требуется при вытяжке. Несравненно проще определяются размеры заготовки, степень деформации материала, необхо-

димая для получения детали (как правило, не превышает допустимую величину при штамповке за один переход). Требования к утонению менее жесткие и чаще специально не оговариваются, поскольку сама операция предусматривает деформацию только за счет растяжения материала. Все это значительно упрощает задачи по выбору технологических схем. На практике используется основная схема штамповки с непосредственным воздействием на заготовку или через диафрагму.

При непосредственном на нее воздействии заготовка должна иметь припуск на уплотнение, если деталь не имеет плоского участка по периметру. В дополнение к этому существуют рекомендации по увеличению размеров выходного отверстия камеры по отношению к размерам деформируемого участка заготовки на величину b , равную 10 толщинам заготовки на сторону (рис. 81) [88], соблюдение которых в сочетании с припуском на уплотнение приводит к значительному перерасходу материала. При штамповке через диафрагму вопрос с уплотнением решается автоматически и отпадает необходимость в этих припусках, кроме того, матрица остается сухой, что для рельефной формовки очень важно, поэтому схему штамповки через диафрагму, как правило, предпочитают с непосредственным воздействием. В самом простом варианте диафрагму не крепят в камере, а просто укладывают каждый раз на заготовку. Причем размеры диафрагмы берут несколько больше, порядка трех-четырех ее толщин, чем размеры матрицы, и, таким образом, практически исключают попадание воды на матрицу: вода не подтекает под заготовку после раскрытия оснастки. Следует отметить, что стойкость диафрагм из резины не очень высока и колеблется обычно в пределах 50—500 деталей в зависимости от ее толщины и характеристик материала, а также от формы профиля детали по периметру. Выбор марки резины и толщины диафрагмы, которая не крепится к камере, не требует строгого подхода и обычно определяется имеющейся в наличии резиной, при этом толщина может быть как 1, так и 10 мм. Следует отметить, что с увеличением толщины стойкость диафрагм растет, но в то же время сопровождается снижением эффективности передачи энергии. Приемлемыми считаются диафрагмы толщиной до 10—12 мм [35, 88]. Если ведется подготовка к штамповке не единичной партии деталей, и сроки

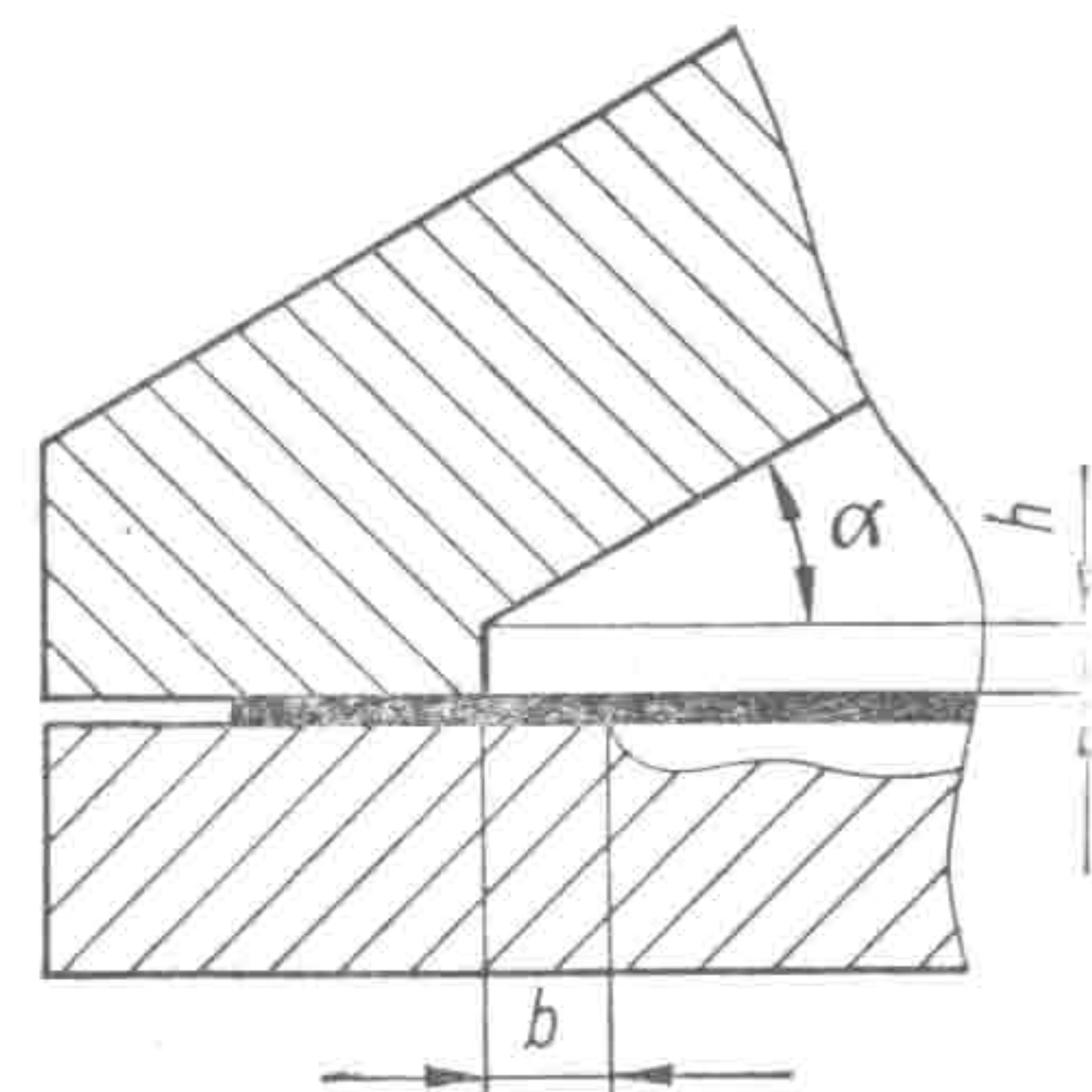


Рис. 81. Соотношение размеров камеры и профиля матрицы.

Рис. 81. Соотношение размеров камеры и профиля матрицы.

подготовки позволяют усложнить конструкцию оснастки с целью получить выигрыш в производительности, то целесообразно диафрагму крепить к камере. В этом случае замена вышедшей из строя диафрагмы, а тем более переход на другую толщину — значительно более длительный процесс, чем в предыдущем варианте, поэтому выбор толщины диафрагмы и ее материала требует уже более строгого подхода. Необходимо, с одной стороны, обеспечить достаточную ее стойкость, чтобы потери времени на замену компенсировались выигрышем в производительности, а с другой — гарантировать достаточную эффективность преобразования энергии, чтобы получить качественную деталь. Для удовлетворения этих требований в настоящее время на прессах Т1220 и Т1223 используют диафрагмы толщиной в пределах 6—8 мм из высокоэластичных резин. Быстрее всего диафрагмы разрушаются в местах заделки. Для повышения стойкости можно увеличивать толщину диафрагмы в местах заделки в 1,5—2 раза [35]. Однако эта мера требует изготавливать дополнительную оснастку для вулканизации диафрагм. По всей видимости такой прием оправдан при изготовлении диафрагм больших размеров и диафрагм для вытяжки, которые должны иметь форму детали, если не может быть использована выпускаемая промышленностью листовая резина. В остальных случаях, в частности для рельефной формовки небольших деталей, целесообразнее решать проблему путем обеспечения быстросменности диафрагм. Один из вариантов такого крепления диафрагм представлен на рис. 82. Такая схема крепления не требует при смене диафрагмы демонтажа камеры с пресса. Для установки новой диафрагмы зажимное кольцо 1 устанавливается на матрицу соосно с камерой 2, на него укладывается диафрагма 3, прижимом пресса диафрагма зажимается между кольцом и камерой; далее кольцо фиксируется с помощью болтов 4 (3—8 шт.).

Внутреннюю полость камер для приведенных схем рельефной формовки выполняют в виде усеченных конусов с углом в основании α , равным 20—30°, и вертикальной стенкой 5—7 мм (см. рис. 81); наличие вертикальной стенки существенно увеличивает деформирующее усилие по периметру детали.

Рельефная формовка некоторых деталей требует значительного давления на заготовку, например детали типа «художественная чеканка» с толщиной свыше 0,5 мм и мелкими элементами рисунка. В таких случаях можно использовать схему штамповки метанием жидкости или метанием заготовки.

Зазор между заготовкой и водой в схеме метанием жидкости лучше всего обеспечивать при нижнем расположении разрядной камеры. Для штамповки с нижним расположением разрядной камеры на прессах Т1220 и Т1223 необходимо разряд-

ную камеру (разрядную головку с прижимным кольцом) установить на столе пресса через переходник, меняющий присоединительные размеры, а матрицу закрепить на прижимной траверсе через отверстия для крепления головки. При этом штамповка осуществляется в ручном режиме управления прессом без выдвижения стола. Чтобы использовать эту схему при верхнем расположении разрядной камеры, необходимо между заготовкой и камерой ввести кольцо с уложенной на него разрушаемой диафрагмой из фольги, конденсаторной бумаги, полиэтиленовой пленки и т. д. Как показывает практика, на прессах Т1220 и Т1223 эта схема дает хорошие результаты при размерах детали до 80—100 мм. Зазор между заготовкой и водой для таких размеров выходного отверстия камеры может быть 7—30 мм в прямой зависимости от энергии в импульсе и обратной от размеров заготовки. Величина зазора выбирается

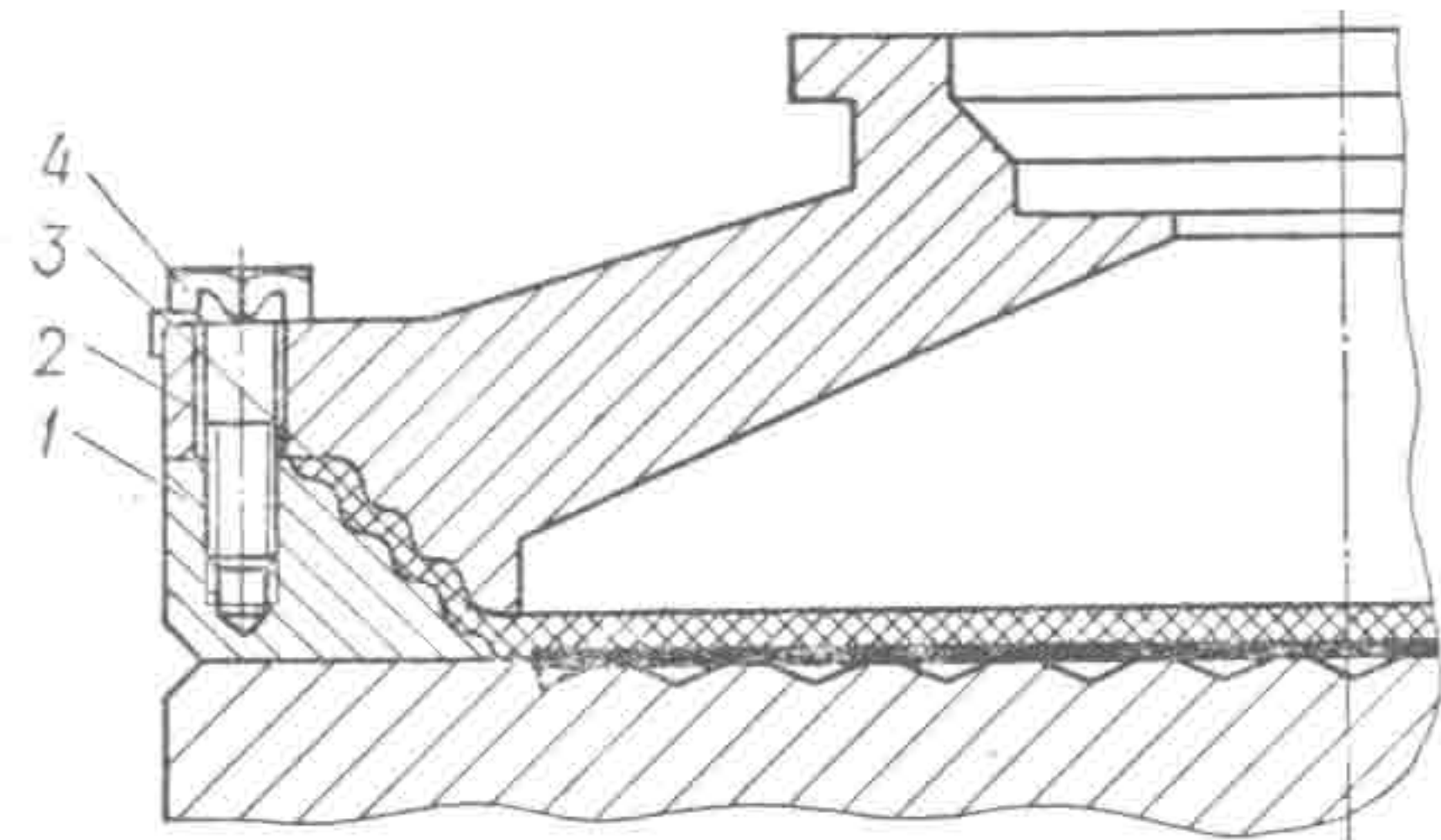


Рис. 82. Вариант крепления быстросменной диафрагмы.

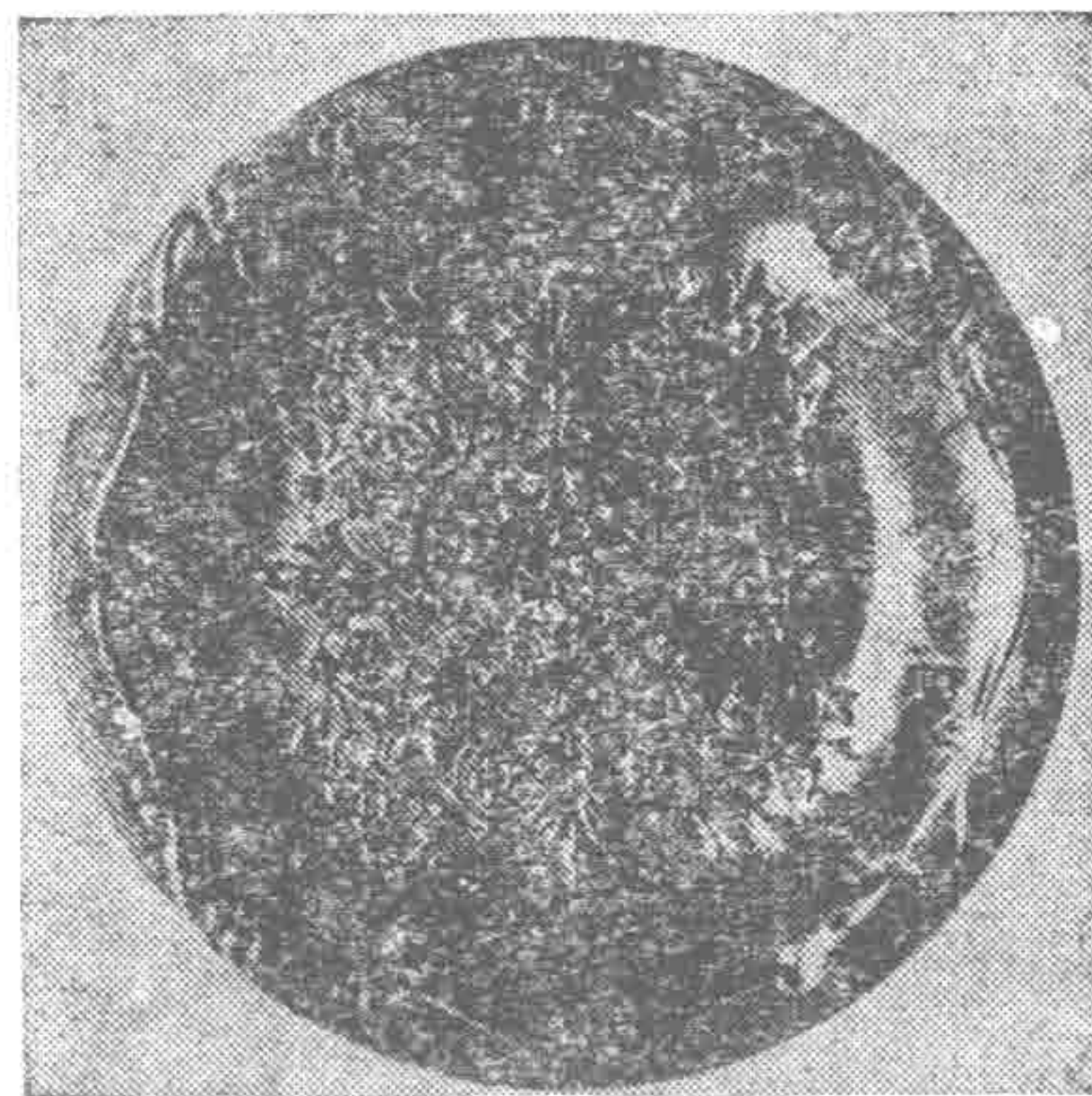
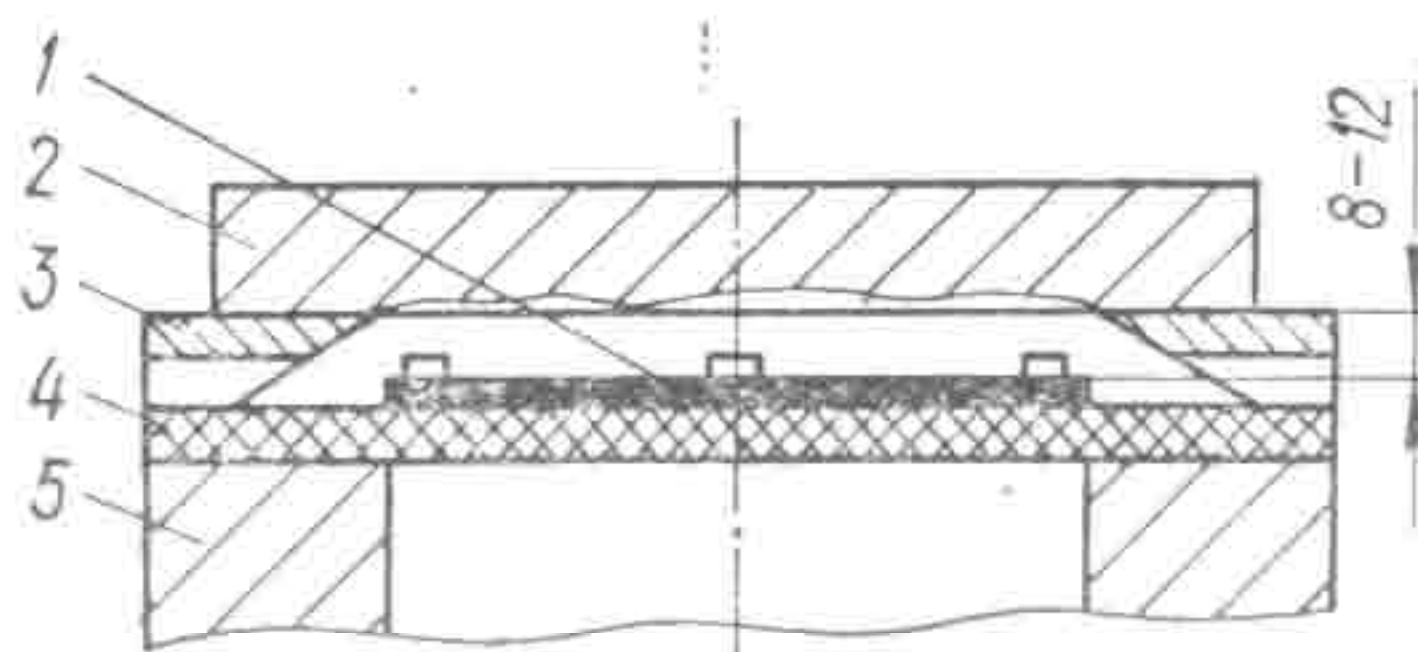


Рис. 83. Лимонница, отформованная на прессе «Удар-20».

Рис. 84. Схема оснастки для рельефной формовки метанием заготовки:

1 — заготовка; 2 — матрица; 3 — проставка; 4 — диафрагма; 5 — камера.



экспериментально. Использование схемы штамповки метанием жидкости позволяет получить очень четкий рельеф художественных чеканок с мелким рисунком, как уже указывалось, при толщинах заготовки свыше 0,5 мм.

Хорошие результаты в этом плане дает также схема штамповки метанием заготовки, и хотя эта схема не позволяет проводить штамповку в многоимпульсном режиме, как при метании жидкости, что является ее недостатком, однако, она может быть более эффективной при штамповке деталей, размеры

которых превышают возможности схемы штамповки метанием жидкости. Использование этой схемы при энергии в импульсе 20 кДж, например, позволило получить четкий рельеф при размерах детали 160 и толщине 0,8 мм, которые имеет лимонница из мельхиора (рис. 83).

Схема метанием заготовки может быть осуществлена без диафрагмы, когда заготовка вырубается из листа на провал, разгоняясь при этом до удара о матрицу, и с диафрагмой, когда заготовка укладывается на нее при нижнем расположении разрядной камеры.

Проверка схемы разгона без диафрагмы показала, что иногда на матрицу попадает вода, которая обгоняет заготовку, и при рельефной формовке это приводит к браку в виде непроштампованных «пятен» на детали, поэтому для рельефной формовки схема с диафрагмой предпочтительнее. При использовании этой схемы на прессах Т1220 и Т1223 зазор между заготовкой и матрицей должен быть порядка 8—12 мм (рис. 84).

Если схемы метанием жидкости и метанием заготовки не дают четкого рельефа, что возможно при штамповке деталей, размеры которых более указанных выше, то можно использовать схему метанием жидкости, локально нагружая заготовку. Эту схему на прессах Т1220 и Т1223 можно осуществить при нижнем расположении неподвижной разрядной камеры, выходное отверстие которой имеет размеры, обеспечивающие требуемую нагрузку, передвигая матрицу с закрепленной на ней заготовкой.

Возможность применять различные схемы нагружения позволяет использовать ЭГ штамповку для рельефной формовки в широком диапазоне.

5. ОСНАСТКА ДЛЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Разделительные операции на электрогидроимпульсных прессах могут быть выполнены путем воздействия на заготовку непосредственно жидкостью, а также с использованием в качестве промежуточных элементов между заготовкой и водой эластичных диафрагм или пуансонов. В зависимости от этого оснастка делится на три типа: с непосредственным воздействием; с воздействием через эластичные диафрагмы; с воздействием через пуансоны. Основной является оснастка первого типа. Оснастка второго типа применяется при вырубке — пробивке плоских деталей, не требующих больших деформирующих усилий, толщиной до 0,3 мм. Это связано с необходимостью обеспечивать приемлемую стойкость диафрагмы, что приводит к увеличению ее толщины, например по сравнению

с диафрагмами для рельефной формовки, и, следовательно, снижает эффективность использования энергии разряда.

В практике, например, для вырубki деталей типа «прокладка» (рис. 85), при программах свыше 10 тыс. шт. использовали диафрагмы толщиной порядка 40 мм. В качестве матрицы использовали вырезные шаблоны толщиной 6—8 мм.

Увеличение стойкости диафрагмы может быть достигнуто использованием накладок толщиной 2—3 мм, укладываемых на заготовку перед штамповкой [35].

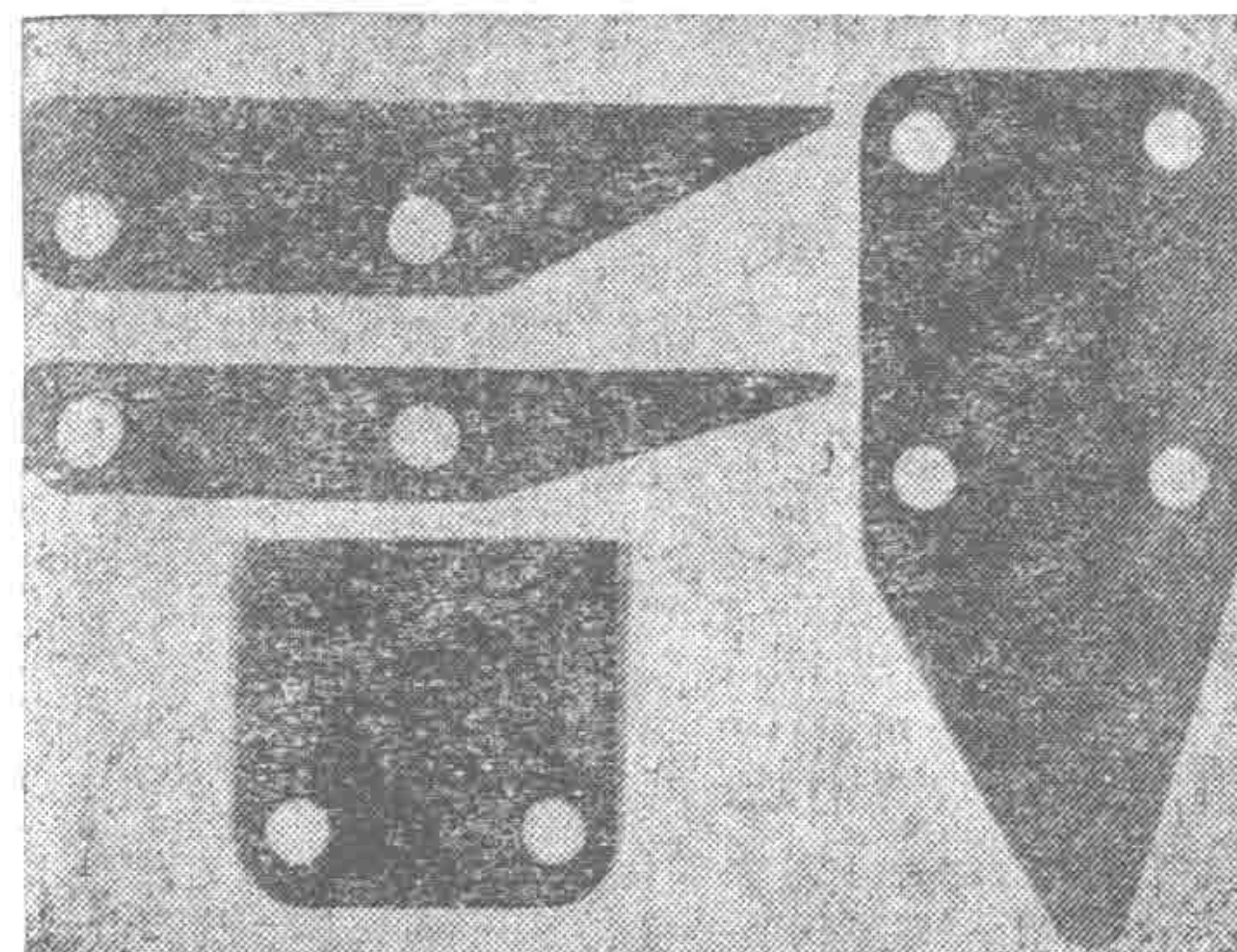


Рис. 85. Прокладки, вырубленные на прессе «Удар-12».

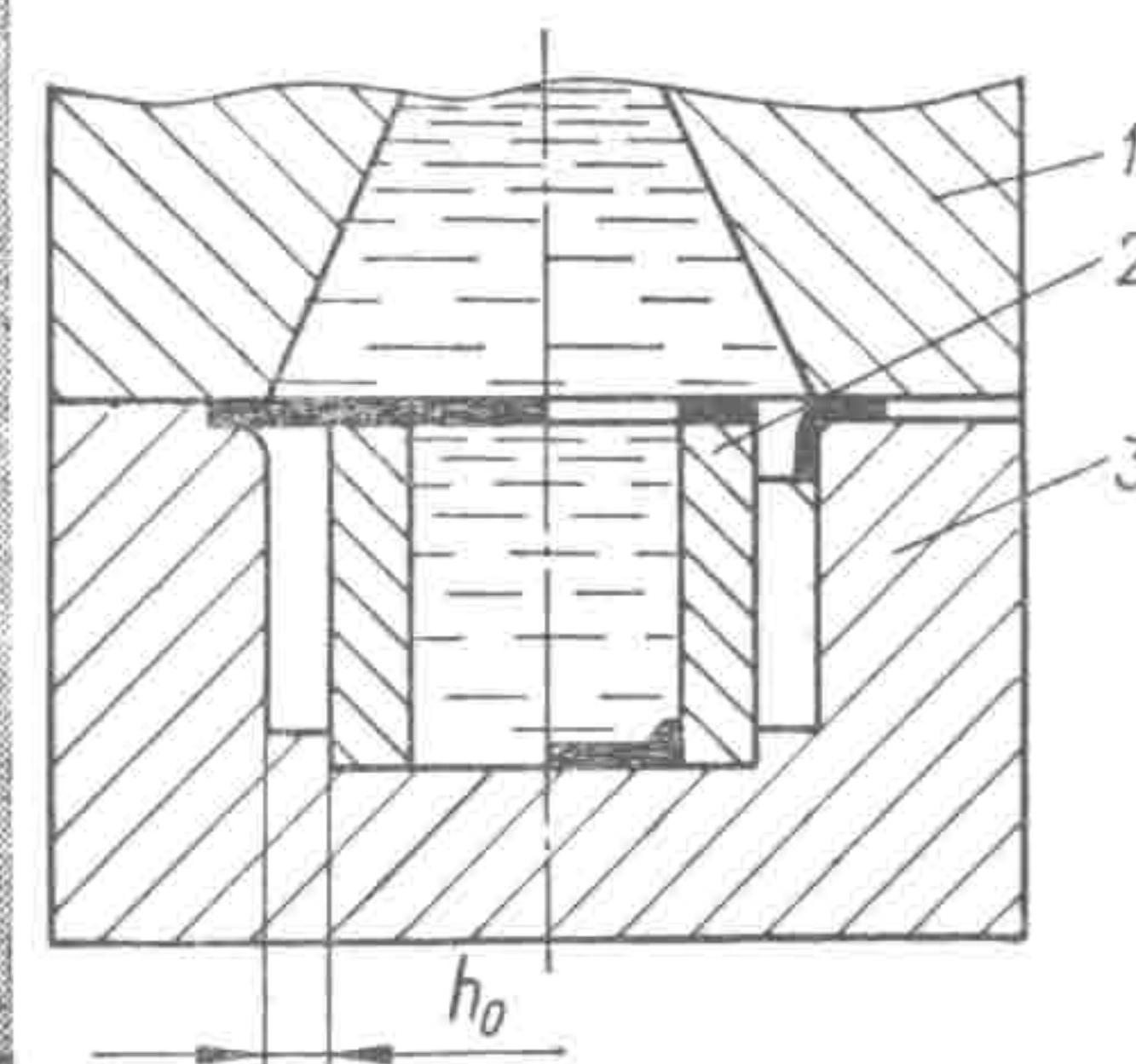


Рис. 86. Типовая схема оснастки для пробивки — вырубki.

Оснастка третьего типа используется в отдельных случаях на ЭГ прессах для пробивки и вырубki из заготовок толщиной более 0,8 мм [88], однако ввиду сложности она не получила распространения. Осваиваемые в настоящее время схемы штамповки метанием жидкости и метанием заготовки, позволяют значительно увеличить деформирующие усилия и дают возможность пробивать и вырубать детали из заготовок толщиной более 0,8 мм без использования пуансонов в качестве промежуточного элемента между водой и заготовкой, поэтому такая оснастка (с пуансонами) может быть применена только в случае крайней необходимости воздействовать пуансоном на заготовку с большой скоростью.

Оснастка с непосредственным воздействием жидкости на заготовку, которая является основным типом оснастки для разделительных операций на ЭГ прессах, используется для выполнения следующих операций: пробивка; вырубка; вырубка, совмещенная с пробивкой; пробивка, совмещенная с отбортовкой отверстия; обрезка. Заготовки могут быть как плоские, так и полые. Непосредственное воздействие на заготовку осуществляется по трем схемам: по основной, по схеме метанием

жидкости и по схеме метанием заготовки. Типовая конструкция оснастки основной схемы, предназначенной для выполнения вырубки и пробивки одновременно, представлена на рис. 86. Оснастка включает в себя камеру 1, пуансон-матрицу 2 и обойму 3. Зазор h_0 между пуансоном и кромкой обоймы необходим для обеспечения требуемого усилия на режущей кромке пуансона. При проектировании оснастки расчет этого зазора можно проводить упрощенно. Считая, что длина режущей кромки равна длине кромки обоймы и что она воспринимает половину действующего на отход усилия, можно получить зависимость

$$h_0 = \frac{2\sigma_{cp}S}{P}$$

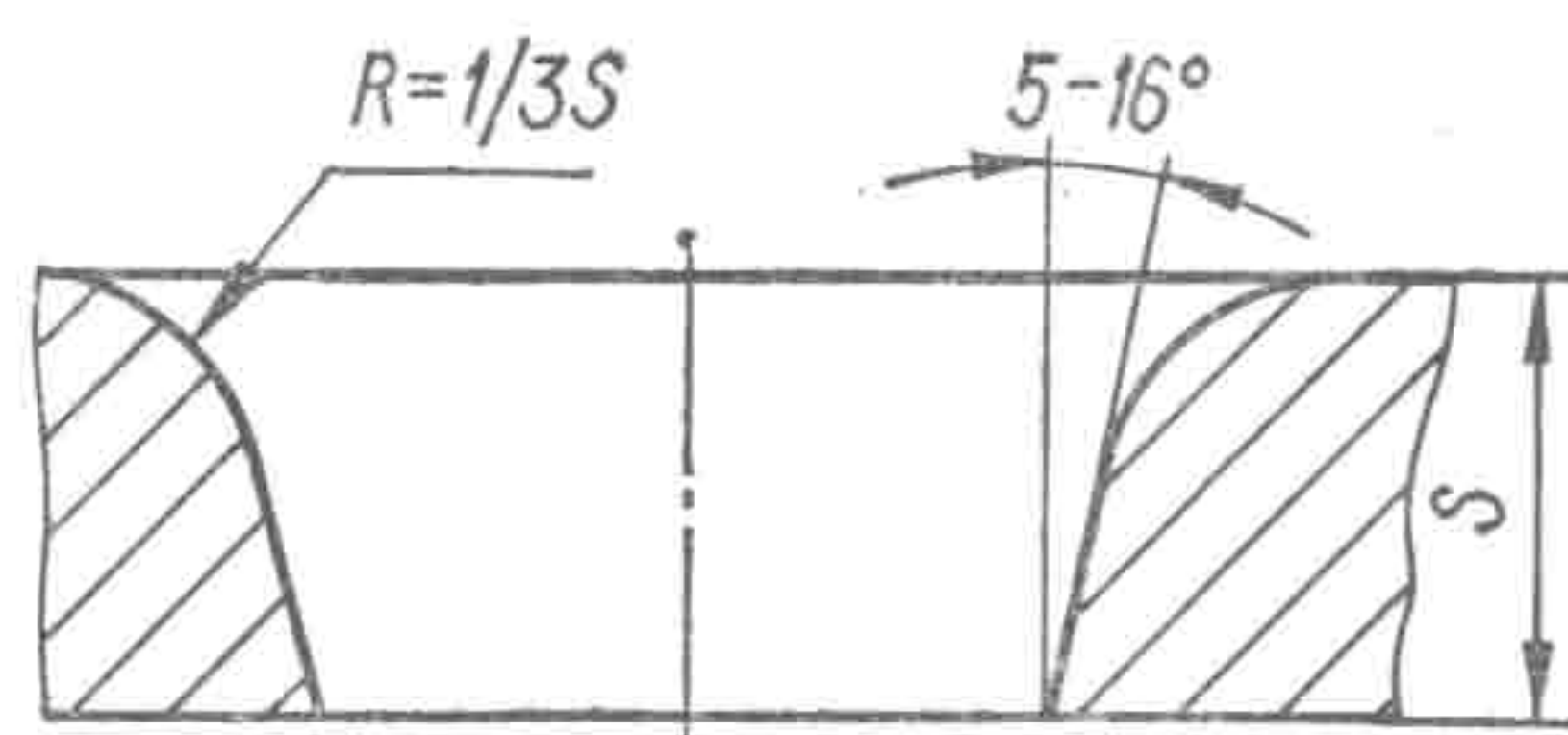


Рис. 87. Форма среза при ЭГ пробивке.

ка отверстия со стороны матрицы острая, а с противоположной стороны — скругленная, с радиусом скругления приблизительно равным $1/3$ толщины заготовки, угол скоса колеблется в пределах 5—16° (рис. 87) [114]. Шероховатость поверхности разделения для большинства материалов обычно соответствует $R_z = 20 \div 40$. Пробиваемые отверстия несколько больше, чем отверстие в матрице. Отклонение размеров не превышает допуска по квалитетам H10.

При выполнении разделительных операций ЭГ способом отход перед отделением от неподвижной части заготовки деформируется значительно больше, чем при пробивке в штампе и его площадь становится значительно больше площади отверстия в матрице. Использование подпорков не дает положительных результатов, поэтому, как правило, на ЭГ прессах вырубка на провал не осуществляется. Исключение составляют случаи, когда вырубка совмещается с формообразующей операцией, например при изготовлении деталей типа «доннышко» с небольшой высотой относительно диаметра (h/d порядка 5—10 %). Схема оснастки для совмещения этих операций изображена на рис. 88. Получаемая высота буртика может быть определена из условия равенства площадей отхода и требуемой детали. При импульсной пробивке жидкостью отверстий круглой формы отход имеет форму части сферы диаметром d , равным диаметру пробиваемого отверстия, и высотой h , которая зависит

от диаметра отверстия и характеристик материала. Например, при пробивке отверстий в меди, в алюминиевом сплаве АД1М высота h отхода может достигать более $0,3d$ (рис. 89) [115].

Конструктивная схема оснастки для пробивки отверстий в цилиндрических заготовках представлена на рис. 90. Заго-

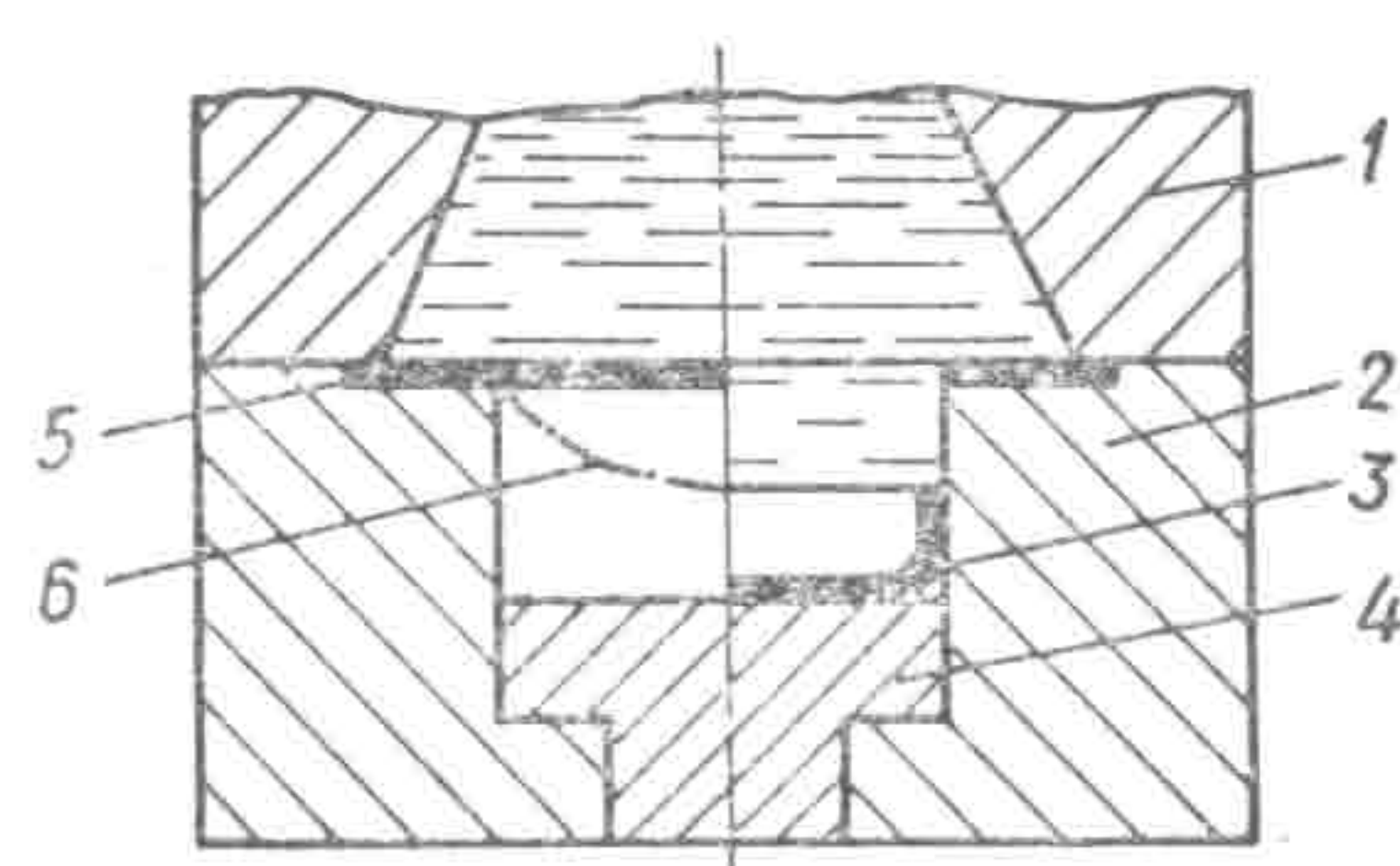


Рис. 88. Вырубка, совмещенная с формовкой:

1 — камера; 2 — матрица; 3 — деталь; 4 — выталкиватель; 5 — заготовка; 6 — форма отхода перед отделением от заготовки.

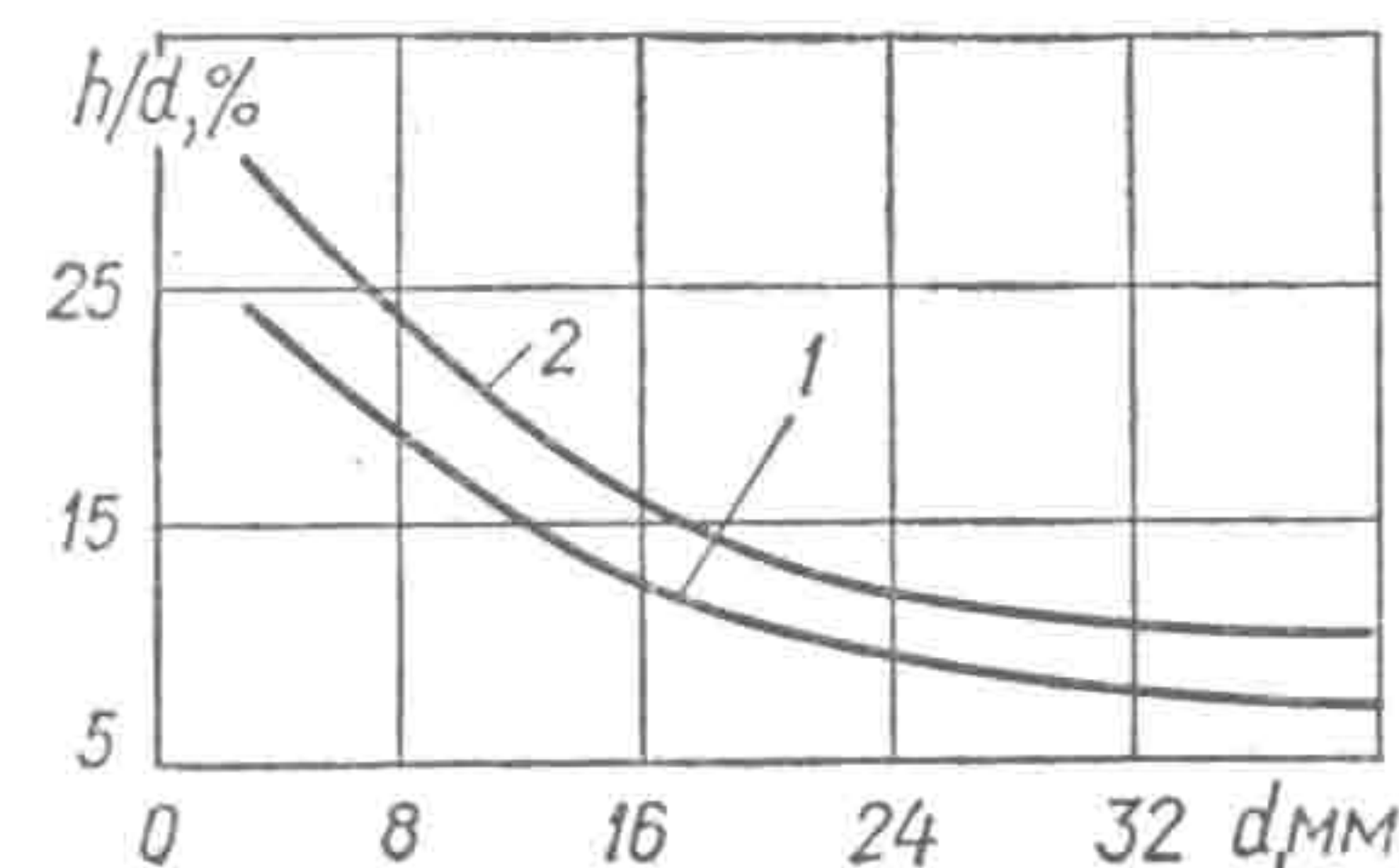


Рис. 89. Зависимость относительной величины прогиба h/d от диаметра пробиваемых отверстий: 1 — медь М1; 2 — сплав АД1М.

товка 1 зажимается между камерой 3, матрицей 4 и доннышком 5. Для уменьшения объема жидкости в полости матрицы и для увеличения эффективности использования энергии отраженных волн внутри заготовки устанавливается отражатель 2.

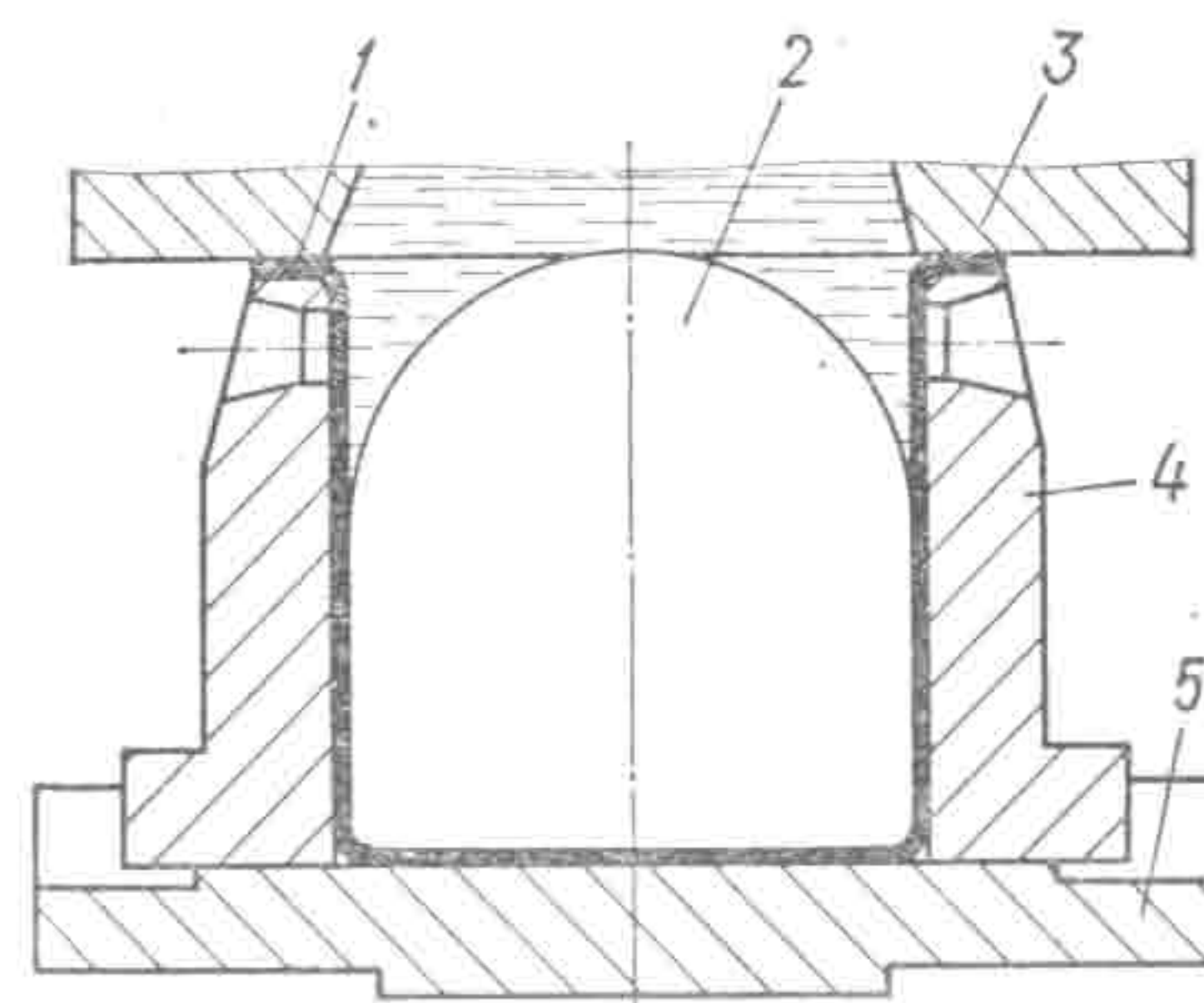


Рис. 90. Схема оснастки для пробивки отверстий в цилиндрических заготовках.

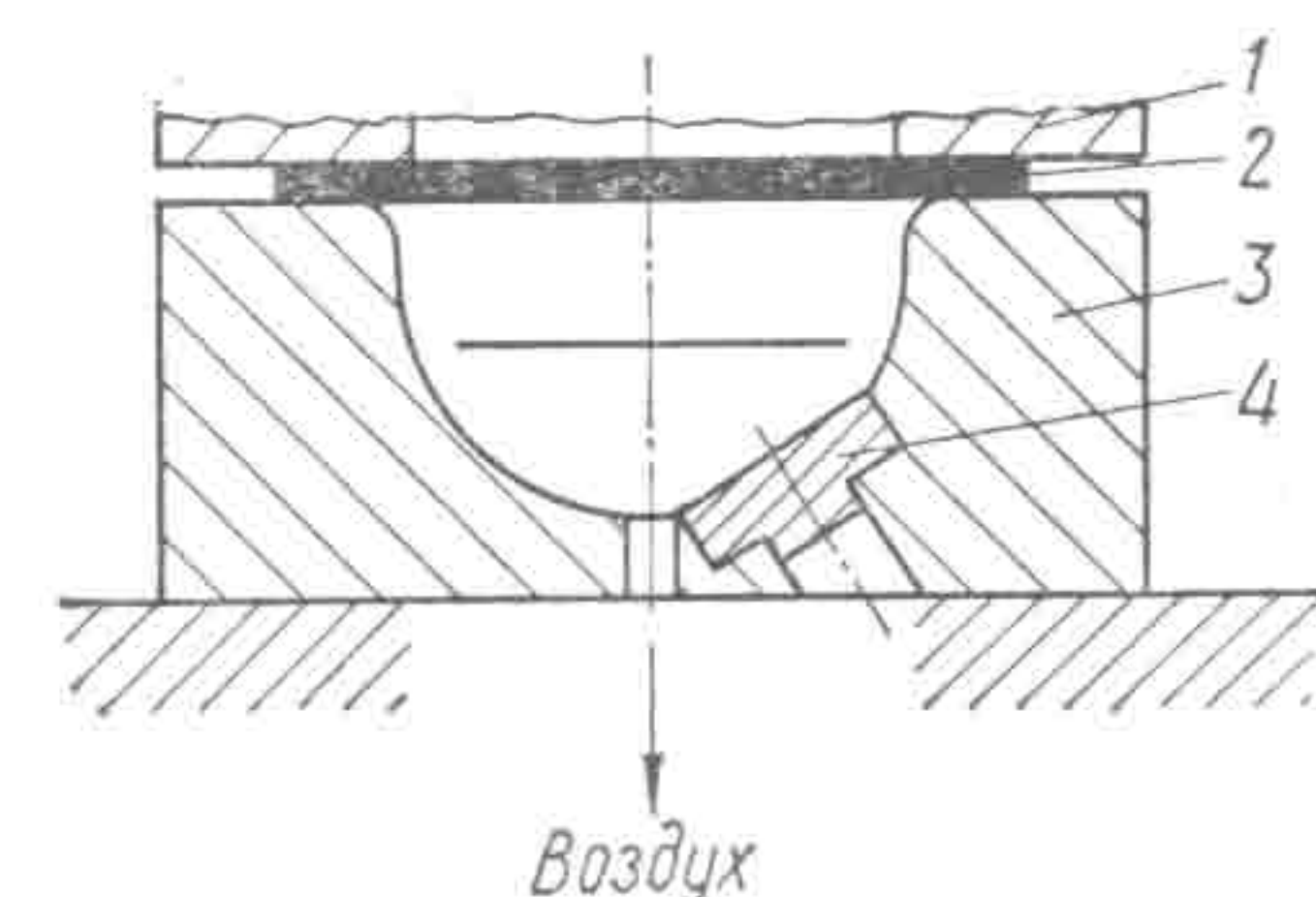


Рис. 91. Схема оснастки для вытяжки с последующей пробивкой:

1 — камера; 2 — заготовка; 3 — матрица; 4 — заглушка.

Для пробивки отверстий в деталях, изготавливаемых вытяжкой на ЭГ прессах может быть использована вытяжная матрица, в которой отверстия в процессе вытяжки заглушены (рис. 91). После вытяжки заглушки удаляются, и осуществляется пробивка отверстий.

Достаточно проста оснастка для пробивки отверстия с одновременной отбортовкой его кромок (см. рис. 24). Под

действием импульсного давления жидкости неподкрепленный участок заготовки начинает деформироваться с большим ускорением, происходит пробивка заготовки по режущей кромке пуансона, и далее за счет инерции, а также под действием жидкости кромка отверстия отбортовывается.

Обрезка полых деталей осуществляется в оснастке, схема которой представлена на рис. 92. Заготовка должна выступать за режущую кромку матрицы на высоту отхода h_0 , достаточную для создания требуемой для обрезки нагрузки. Предварительно рассчитав давление,

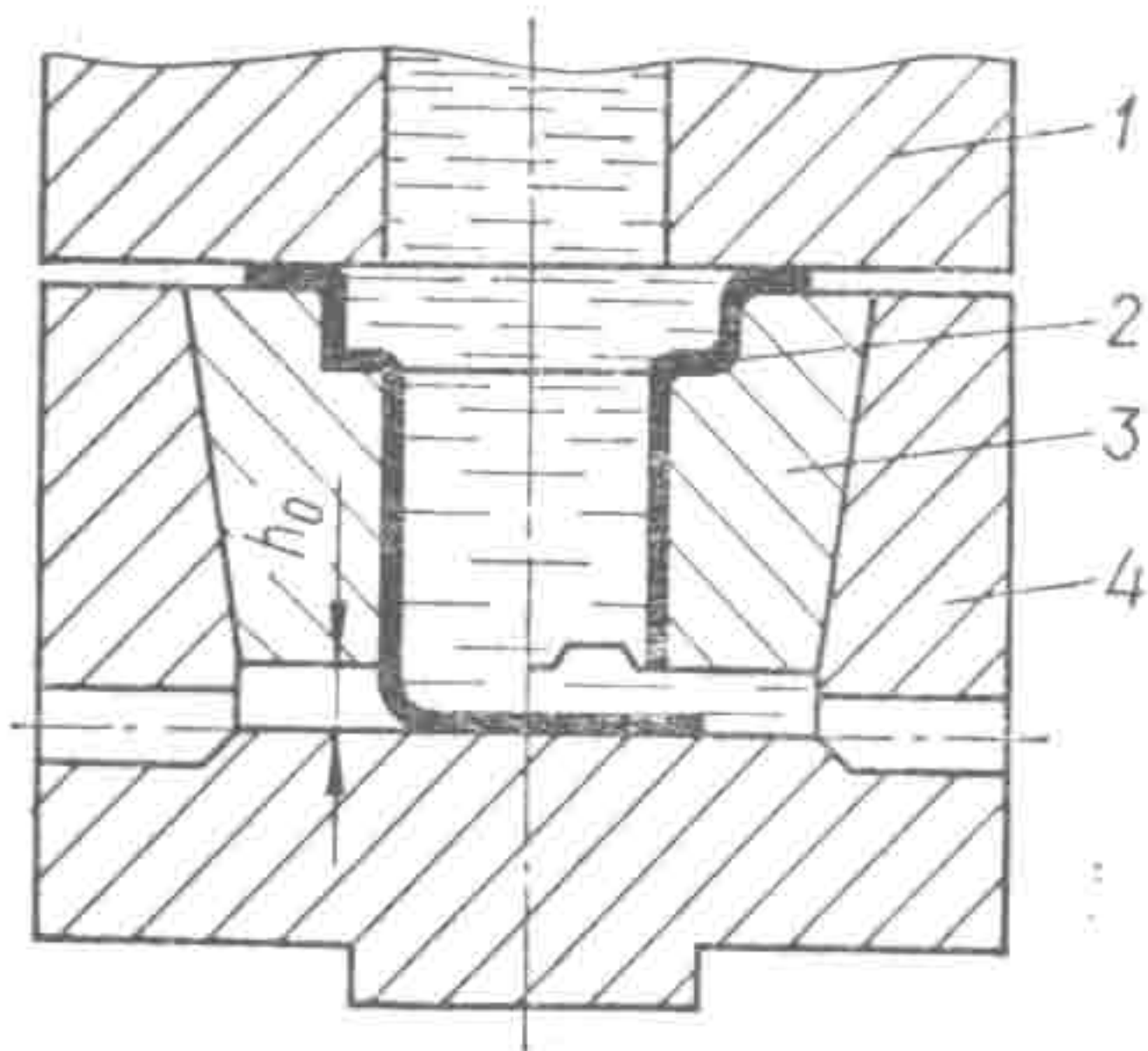


Рис. 92. Схема оснастки для обрезки полых деталей:
1 — камера; 2 — деталь; 3 — матрица; 4 — обойма.



Рис. 93. Схема оснастки для пробивки отверстий разных диаметров:
1 — камера; 2 — заготовка; 3 — матрица; 4 — подпор.

которое может быть создано в камере пресса при максимальной энергии в импульсе для объема, определяемого размерами заготовки, можно найти требуемую высоту заготовки, исходя из необходимого размера h_0 . Считая, что на режущую кромку приходится половина распределенной по высоте h_0 нагрузки и принимая длину режущей кромки, равную длине контура детали в сечении, перпендикулярном ее оси, можно определить этот размер аналогично определению зазора между вырубным пуансоном и кромкой обоймы при вырубке из плоских заготовок. Зачастую в детали необходимо пробить отверстия разных размеров. Одновременная пробивка отверстий в этом случае имеет свою особенность, которая заключается в том, что для разных размеров пробиваемых отверстий требуется разное давление. Отверстия меньшего размера могут не пробиться несмотря на то, что энергии в импульсе вполне достаточно для создания требуемого давления. Это происходит из-за преждевременной разгерметизации камеры при пробивке больших отверстий, которая бывает при меньшем давлении. В таких случаях в отверстиях матрицы устанавливают подпоры, уменьшая неподкрепленную площадь отхода больших отверстий (рис. 93), чтобы выравнять давление, требуемое для пробивки разных отверстий.

Если в процессе технологических расчетов оказывается, что давление, которое может быть создано в камере пресса, недостаточно для осуществления операции по основной схеме штамповки, то используют схемы штамповки метанием жидкости или метанием заготовки.

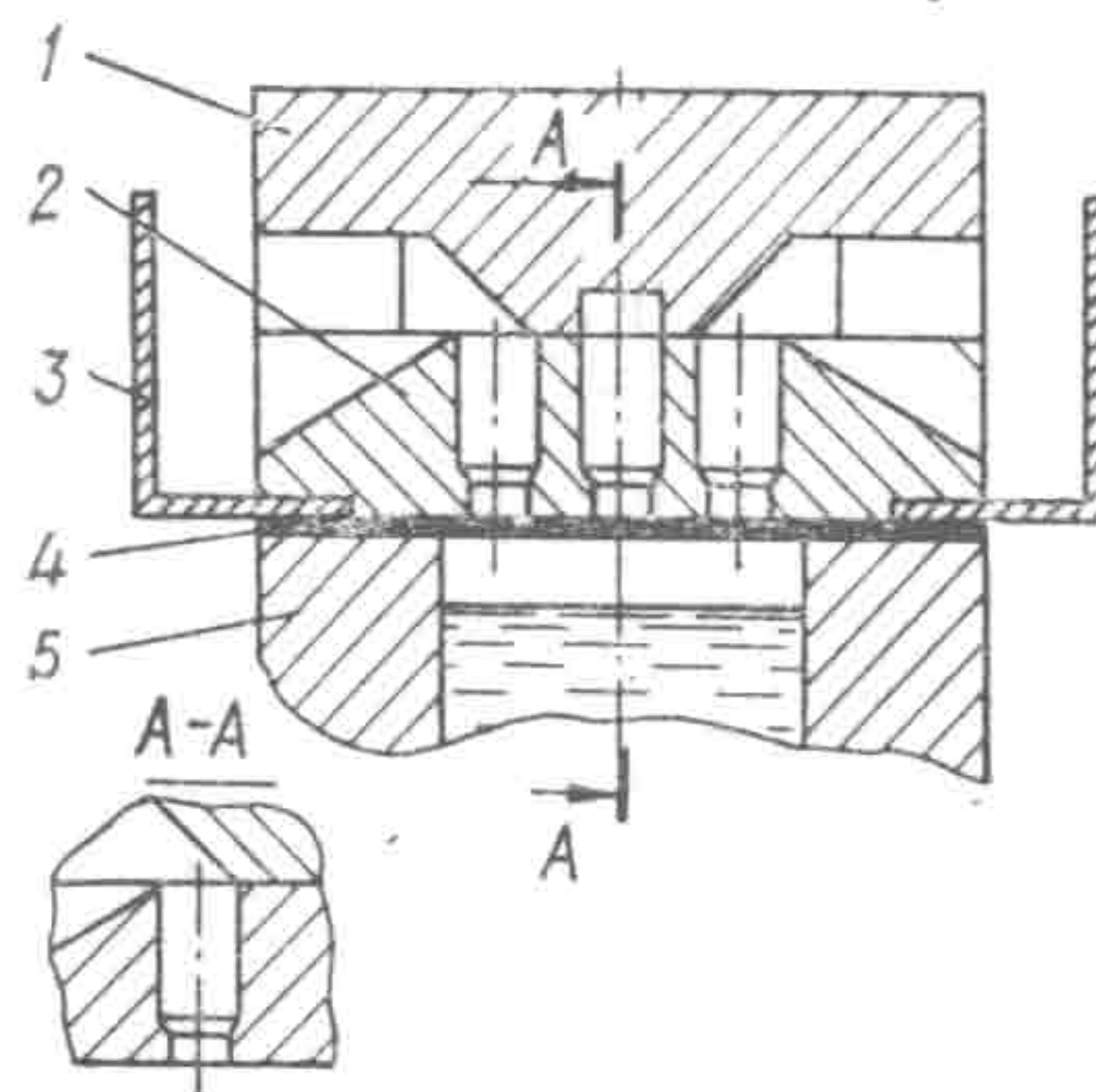


Рис. 94. Схема оснастки для пробивки с нижним расположением разрядной камеры:
1 — отражатель; 2 — матрица; 3 — экран; 4 — заготовка; 5 — камера.

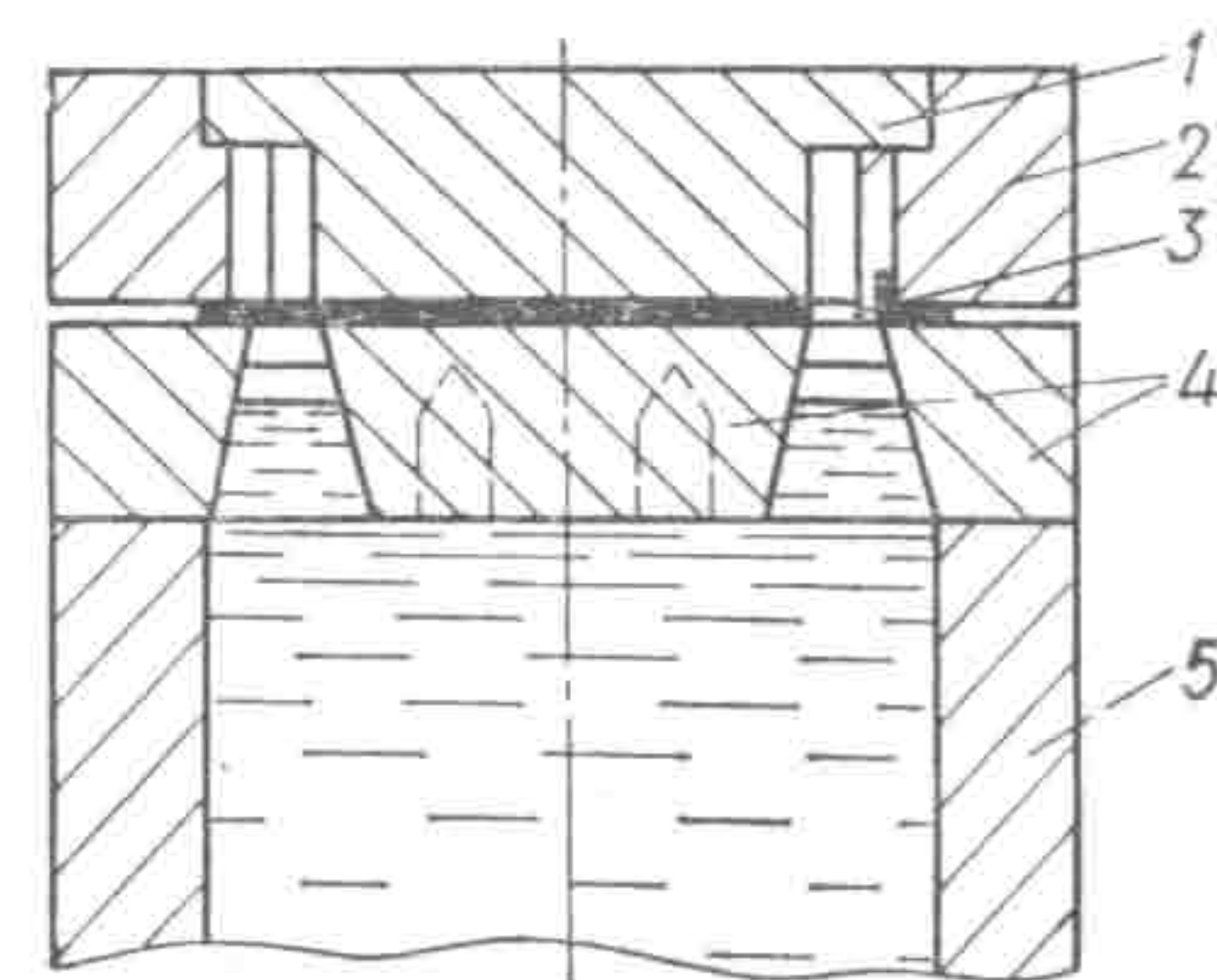


Рис. 95. Схема оснастки для вырубке с нижним расположением разрядной камеры:
1 — матрица; 2 — обойма; 3 — деталь; 4 — проставка; 5 — камера.

Схема метанием жидкости используется в основном при нижнем расположении разрядной камеры. При проектировании оснастки с нижним расположением разрядной камеры для пробивки отверстий в плоских заготовках необходимо предусматривать отражатели, исключая попадание отходов в камеру (рис. 94), а при вырубке необходимо включать в оснастку проставку (рис. 95),

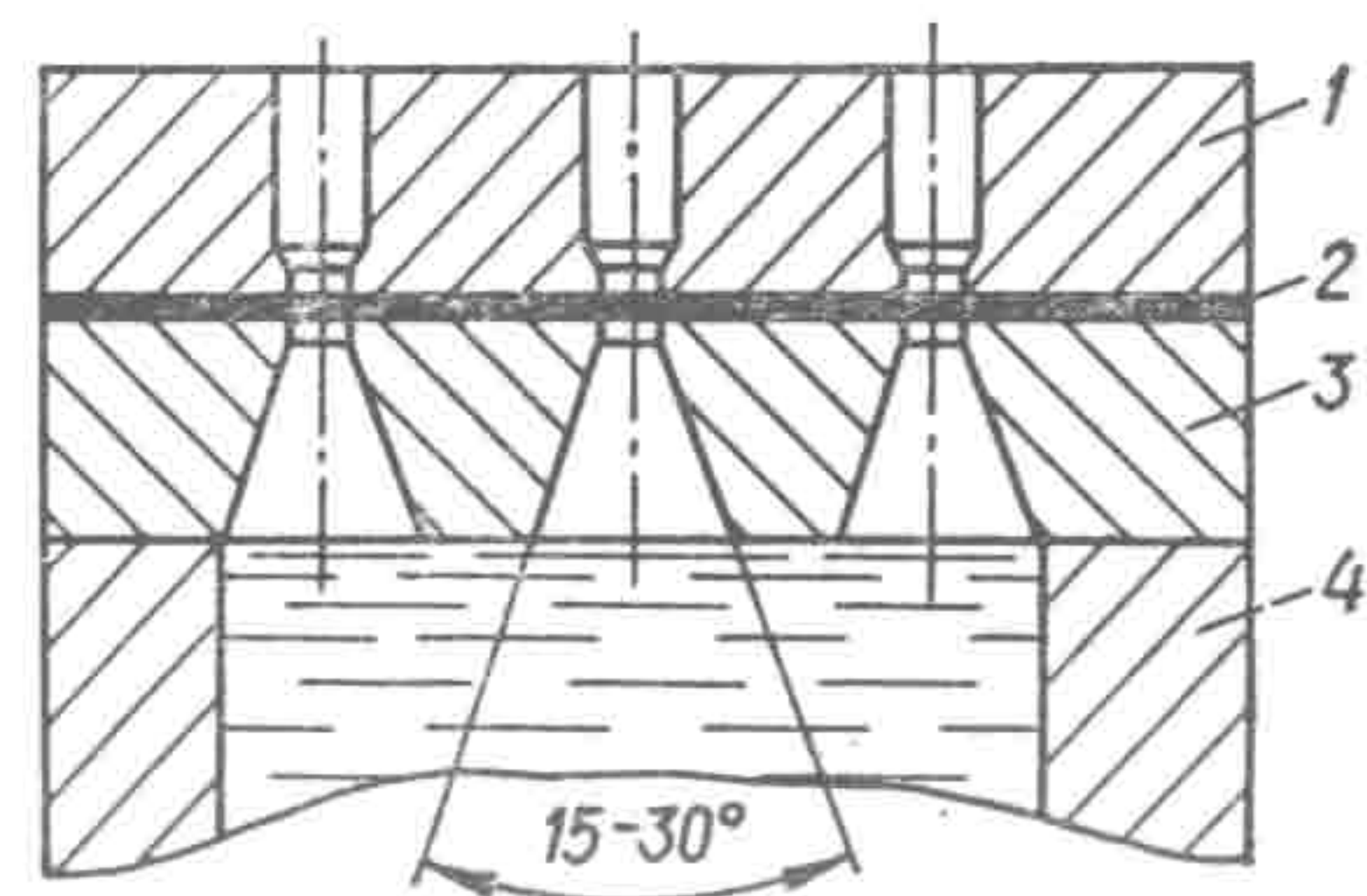


Рис. 96. Схема оснастки для пробивки метанием жидкости:
1 — матрица; 2 — деталь; 3 — концентратор; 4 — камера.

исключающую падение вырубленной детали в камеру. Как указывалось ранее, схема штамповки метанием жидкости дает преимущество при обработке небольших деталей. Например, для прессов с энергией до 20 кДж заметно преимущество при площади детали порядка до 100 см². При этой площади детали можно рассчитывать на увеличение деформирующего усилия в два-три раза. Если площадь детали, а вернее размеры воздушной прослойки в плане будут меньше, то эффект увеличивается. Например, при площади 5 см² можно рассчитывать на пятикратное увеличение усилия, а использование проставок

с конусными отверстиями (рис. 96) (угол конуса до 30°) позволяет увеличивать нагрузку более чем в десять раз, и пробивать отверстия в стали ОХ18Н9Т, равные толщине материала. Оптимальный зазор между заготовкой и водой подбирается экспериментально и колеблется в пределах 5—30 мм в обратной зависимости от площади детали.

Если схема штамповки метанием жидкости может быть использована для всех разделительных операций, осуществляемых ЭГ способом, то схема метанием заготовки в этой области используется преимущественно для вырубки, которую, впрочем можно совмещать с пробивкой, отбортовкой и рельефной формовкой. Такое ограничение объясняется тем, что разгон заготовки сопровождается ее деформацией, и, таким образом, попытка осуществить, например, пробивку отверстий в детали, контур которой уже соответствует чертежу, приведет к искажению ее размеров.

Как указывалось ранее, эта схема с точки зрения увеличения деформирующего усилия может быть более эффективной, чем схема метанием жидкости для деталей несколько больших размеров. Однако недостаточная ее изученность пока не позволяет рекомендовать ее в качестве исходной при проектировании оснастки. Вместе с тем ее можно всегда использовать в качестве запасного варианта, так как переход к ней не требует значительной доработки оснастки. Например, переход от основной схемы осуществляется постепенным уменьшением высоты вырубного пуансона (см. рис. 86).

При проектировании оснастки для разделительных операций следует иметь в виду, что при пробивке отходы могут вылетать из отверстий в матрице с большой скоростью, поэтому необходимо для обеспечения безопасности работы предусматривать в оснастке специальные сборники, исключающие вылет отходов за пределы штампового пространства пресса. Относительная простота оснастки позволяет эффективно использовать ЭГ штамповку на разделительных операциях в опытном и мелкосерийном производстве.

6. ОСНАСТКА ДЛЯ РАЗДАЧИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

В различных отраслях машиностроения обширная номенклатура деталей изготавливается или может быть изготовлена из трубчатых заготовок и заготовок в виде стакана путем их раздачи или калибровки. Использование электрогидроимпульсной штамповки для изготовления многих деталей из таких заготовок является экономически эффективным вариантом технологического процесса, в чем немалую роль играет просто-

та оснастки. Для выполнения раздачи и калибровки деталей из трубчатых заготовок в виде стакана в настоящее время используется в основном схема штамповки с общим способом нагружения без диафрагмы или с диафрагмой в виде резинового стакана с фланцем, а также с локальным способом нагружения заготовки. Схема с локальным нагружением используется на прессах, имеющих перемещающиеся электроды, как, например, прессы «Удар-16К» и «Удар-20С». Отличие в способе нагруже-

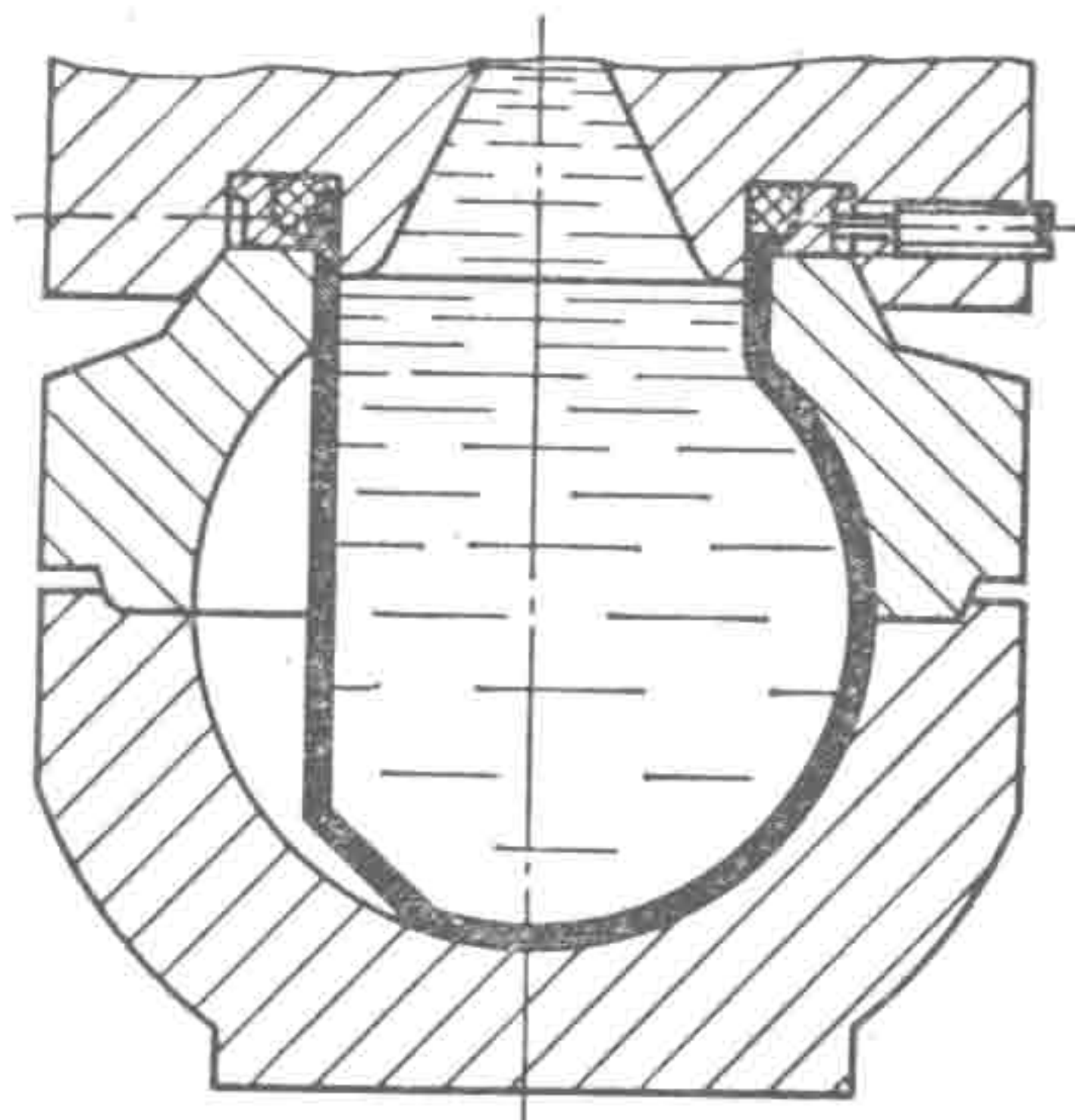


Рис. 97. Схема оснастки с горизонтальным разъемом матриц.

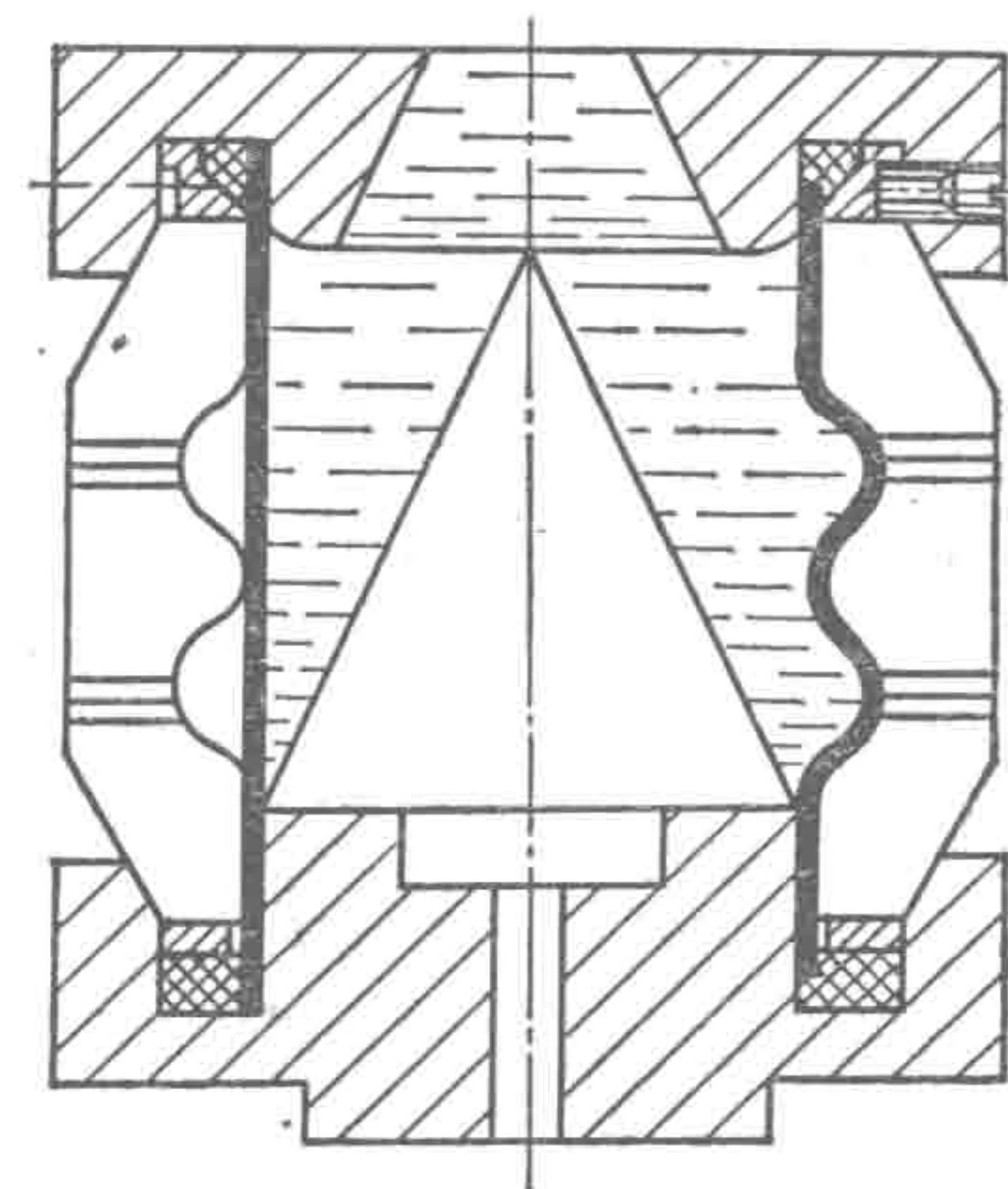


Рис. 98. Схема оснастки с вертикальным разъемом матриц.

ния, общего или локального, не приводит к принципиальному различию в конструкции оснастки. Оснастка для штамповки из трубчатых заготовок выполняется разъемной. Расположение плоскости разъема существенно влияет на сложность конструкции оснастки. Самая простая в изготовлении — с горизонтальным разъемом. Она применяется для изготовления небольших деталей, форма которых позволяет сделать такой разъем (рис. 97). Эта оснастка проста в изготовлении и имеет высокую жесткость. В процессе штамповки с такой оснасткой оператору-штамповщику необходимо снимать верхнюю часть матрицы, поэтому для больших деталей данная оснастка требует использования грузоподъемных средств.

Значительно сложнее в изготовлении оснастка с вертикальным разъемом (рис. 98). Однако такой разъем во многих случаях определяется формой детали, кроме того, она более удобна в эксплуатации при штамповке относительно больших деталей, так как для выема последней необходимо только раздвинуть половинки матриц, предварительно освободив их из нижней обоймы, что полностью или частично выполняется с использованием механизмов выталкивания, если на прессах они

имеются. Оснастка с вертикальным разъемом может быть в виде обоймы с вкладышами (рис. 99) или в виде полуматриц, зажимаемых двумя крышками, которые охватывают полуматрицы и прижимают их друг к другу только в верхней и нижней частях (см. рис. 98). При этом роль верхней крышки играет камера, а нижняя может быть одновременно матрицей, по которой формируется донная часть детали. Оснастка из полуматриц с крышками менее металлоемка и более удобна в эксплуатации, но из-за

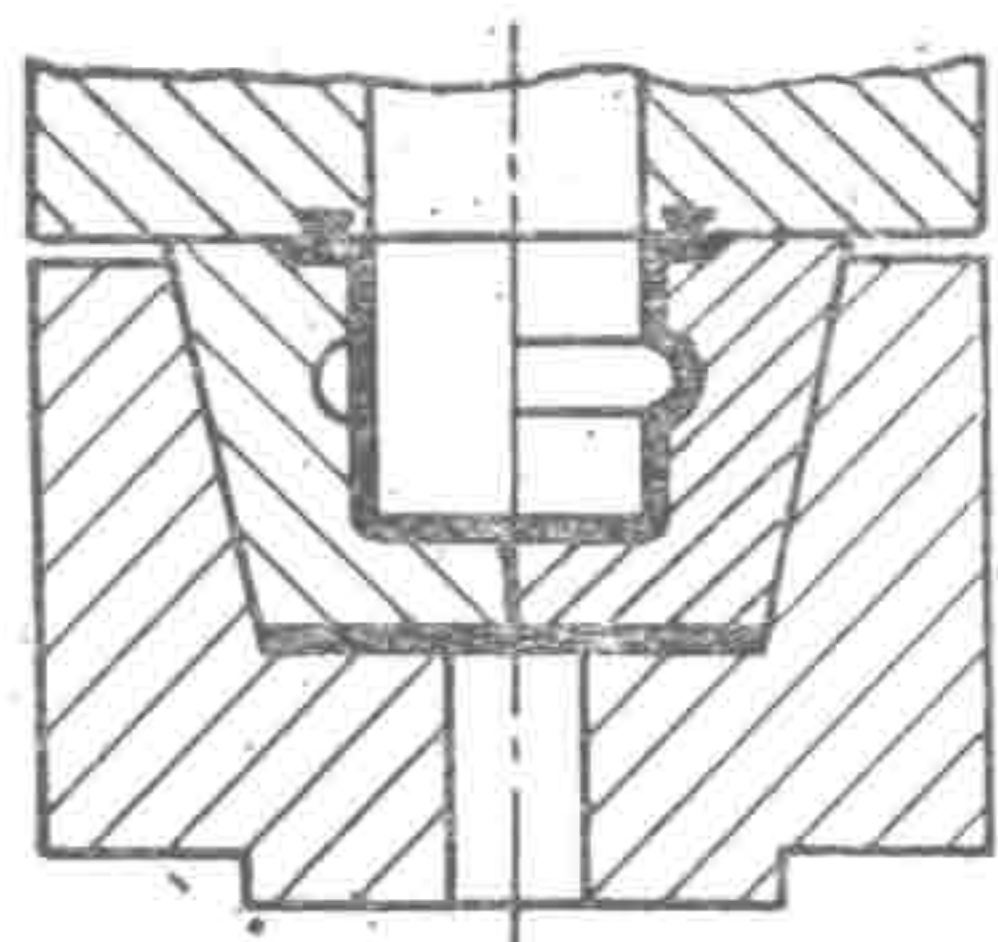


Рис. 99. Схема оснастки повышенной жесткости с вертикальным разъемом матрицы.

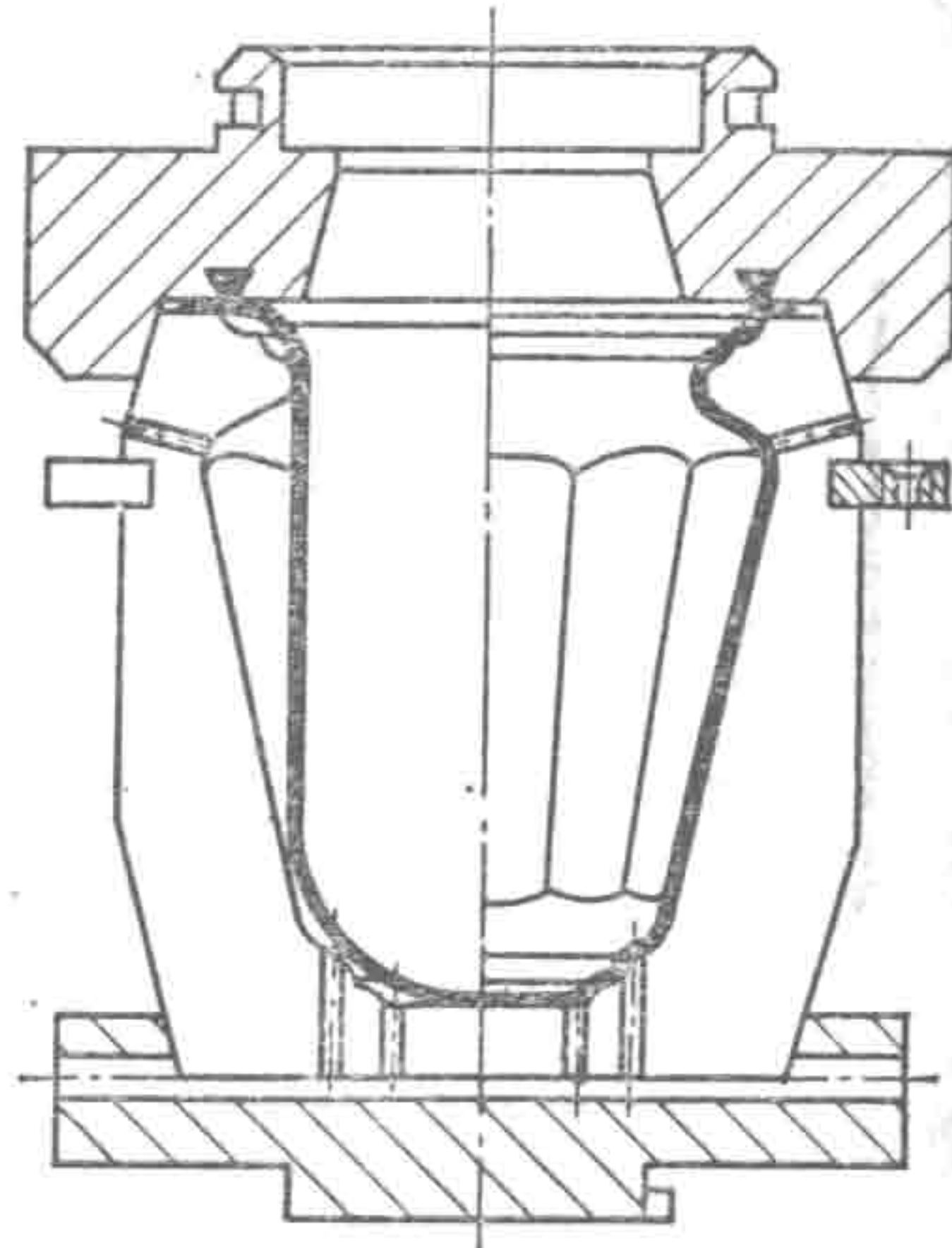


Рис. 100. Оснастка пресса Т1226.

неравномерной жесткости она не может быть использована для калибровочных операций и штамповки деталей повышенной точности. При штамповке в такой оснастке на деталях зачастую остаются отпечатки по линии разъема матрицы, а также имеет место неравномерность отклонения размеров, например эллипсность для осесимметричных деталей. Эта оснастка используется для штамповки деталей, к которым предъявляются невысокие требования по точности. Такая оснастка используется, например, на прессе Т1226 (рис. 100) для штамповки корпусов самоваров.

Если требования по точности высоки, то матрица выполняется в виде жесткой обоймы с вкладышами. При штамповке небольших деталей на прессе Т1220 вкладыши вынимаются вручную. На прессе Т1223 для раздвижения вкладышей можно использовать выталкиватель.

Конструкция уплотнений оснастки зависит от формы детали и существенно влияет на эффективность процесса. Наиболее эффективен процесс, который не предусматривает технологических припусков для уплотнения оснастки, так как обрезка технологических припусков после штамповки, как правило, более громоздкая операция, чем сама штамповка.

Наиболее простая конструкция уплотнения применяется при раздаче заготовок в виде стакана с плоским фланцем. Задача по уплотнению решается в этом случае так же, как и при вытяжке путем установки уплотнительного кольца по фланцу (см. рис. 99). Не представляет особого труда обеспечить надежную герметизацию и для деталей, оканчивающихся цилиндрическим пояском, диаметр которого равен диаметру заготовки, а высота порядка 5 мм. Для таких деталей используется уплотнение в виде колец, охватывающих заготовку по наружной

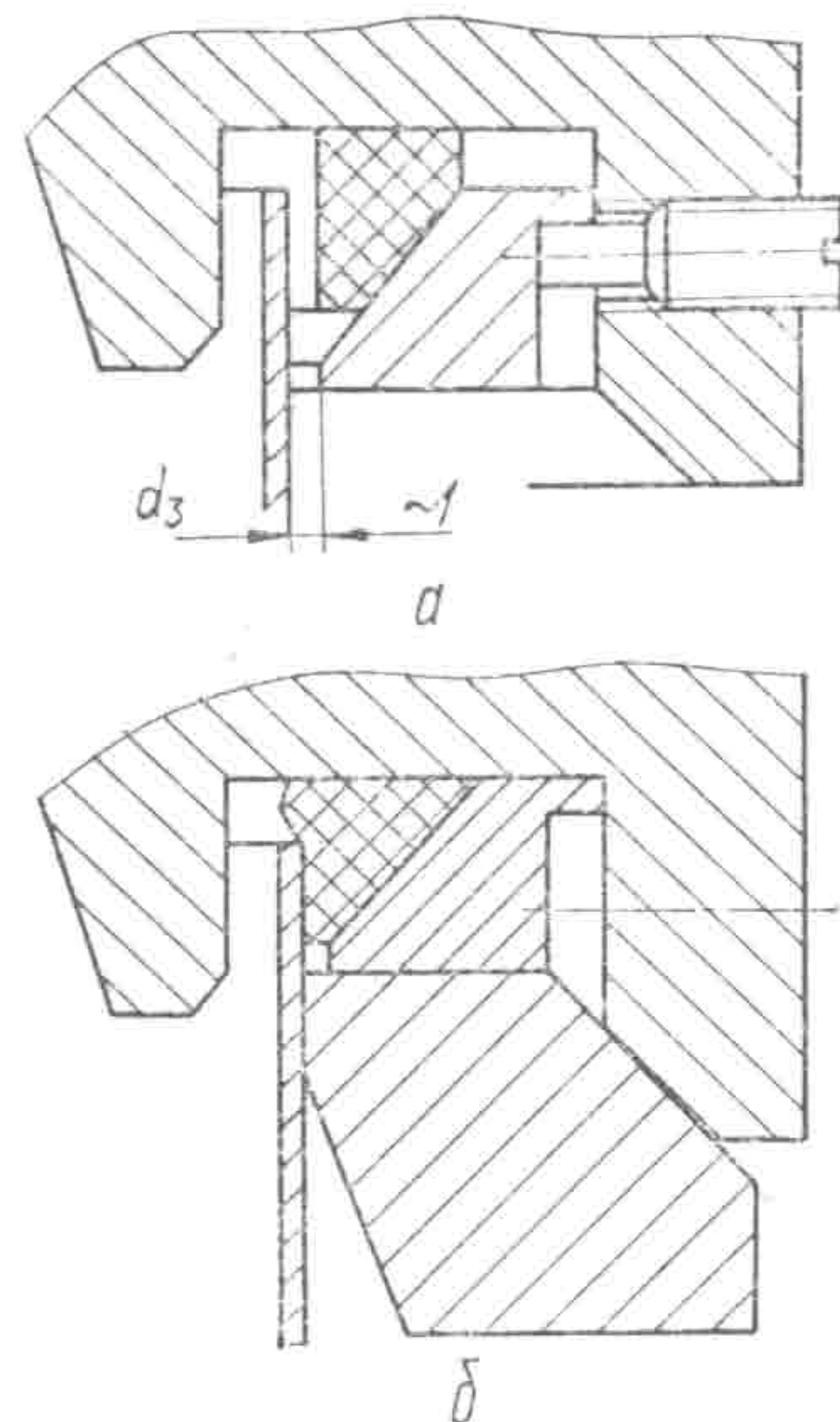


Рис. 101. Уплотнение трубчатой заготовки при незажатой (а) и зажатой (б) оснастках

поверхности. В свободном состоянии внутренний диаметр кольца больше диаметра заготовки на 1,5—3 мм и более, но из расчета, чтобы сжатие уплотнительного кольца при зажиме оснастки выбирало зазор между заготовкой и кольцом и обеспечивало герметичность (рис. 101). Если деталь не имеет цилиндрического пояска или его высота очень мала, менее 2—3 мм, а деформация заготовки не вызывает значительного уменьшения ее высоты, то уплотнение обеспечивается не только по наружной поверхности заготовки, но и по торцу (рис. 102). Однако такое уплотнение имеет существенные недостатки. Во-первых, стойкость резиновых колец мала, они быстро надрезаются, особенно когда толщина заготовки менее 1—0,8 мм; во-вторых, требуется после раскрытия оснастки контролировать положение заготовки, поскольку бывают случаи, когда деталь «залипает» в верхнем уплотнительном кольце и при выдвигении стола деформируется, а уплотнение при этом выходит из строя. Поэтому при штамповке тонкостенных деталей толщиной 0,5 мм и менее, не имеющих цилиндрических поясков, иногда целесо-

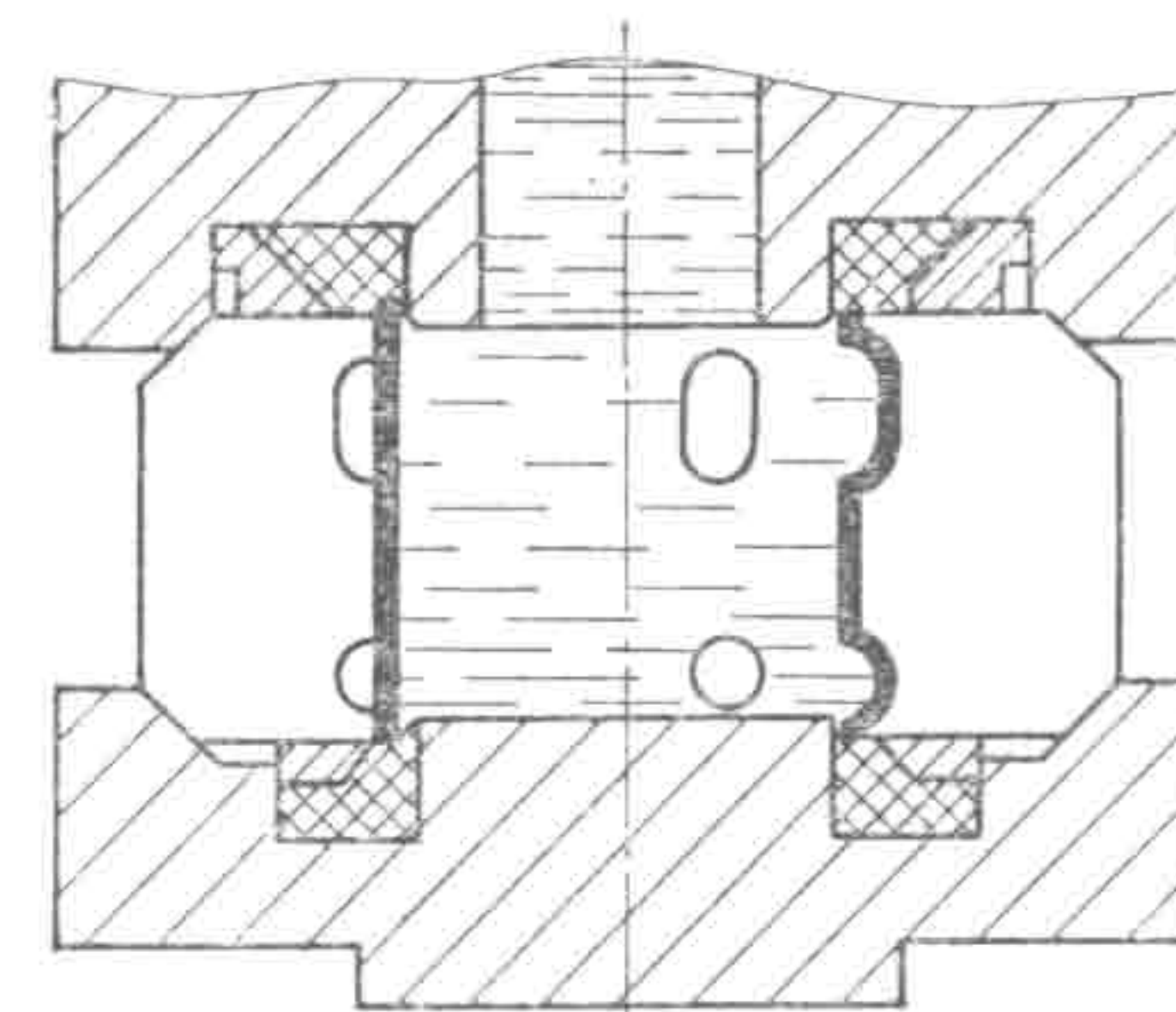


Рис. 102. Уплотнение деталей по торцу.

образнее использовать оснастку с диафрагмой в виде цилиндрического колпачка с фланцем (рис. 103). Стойкость такого колпачка, изготавливаемого вулканизацией в специальной прессформе, — 50 деталей и более в зависимости от марки резины, толщины стенки и формы детали.

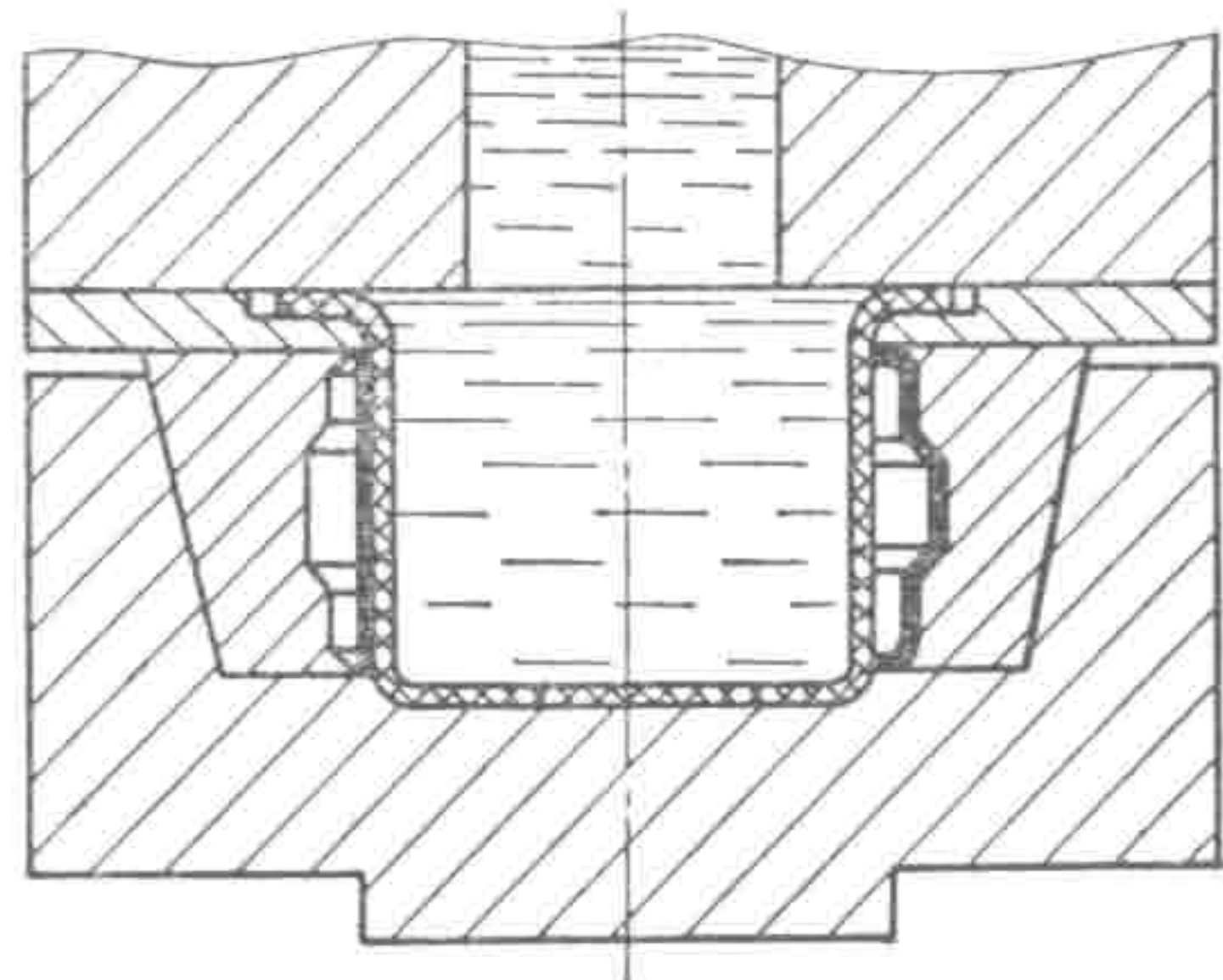


Рис. 103. Схема оснастки для раздачи с диафрагмой.

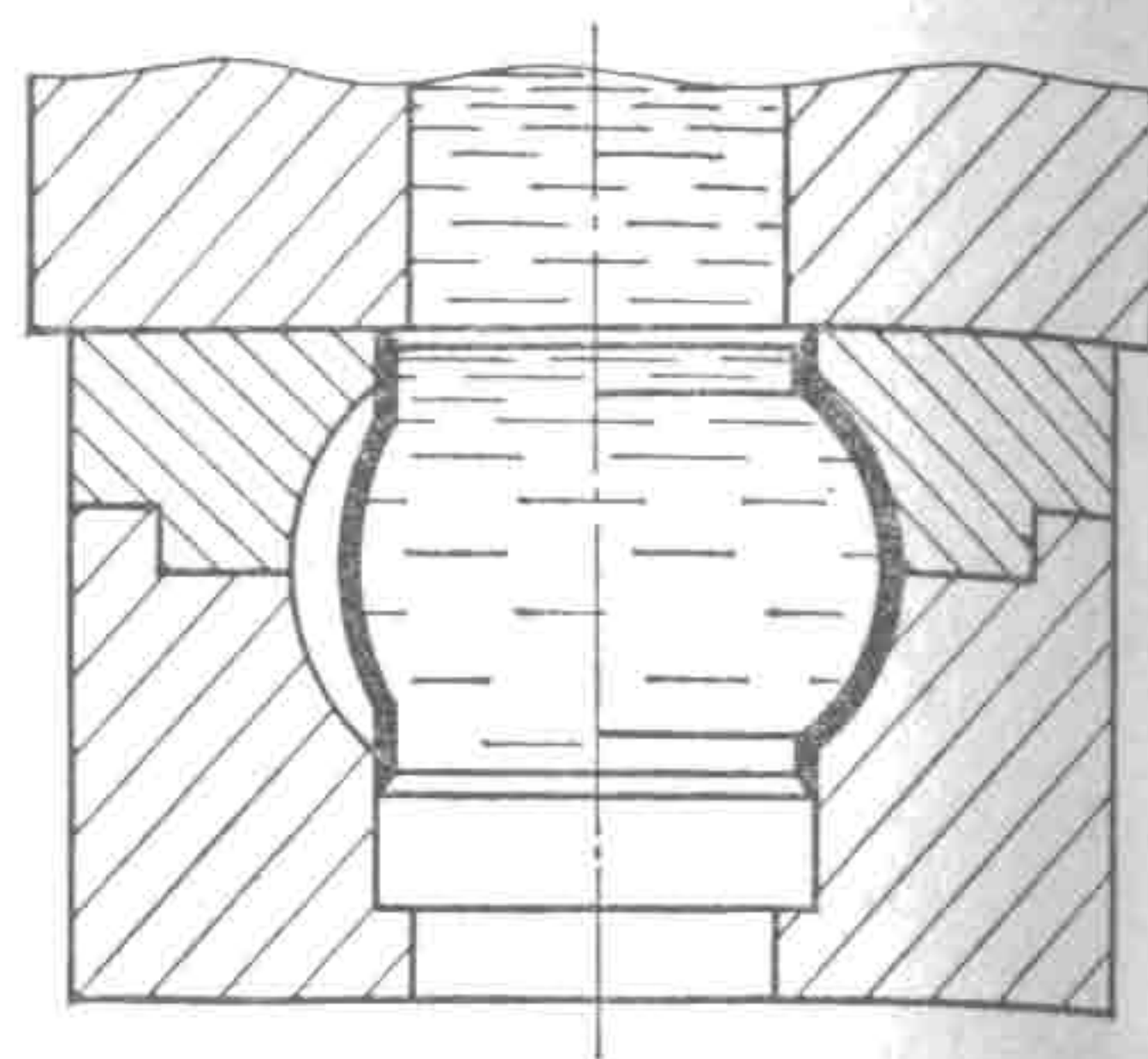


Рис. 104. Схема оснастки для раздачи заготовок с большой осевой жесткостью.

В отдельных случаях при большой осевой жесткости детали оснастка может не иметь резиновых уплотнений. Герметичность обеспечивается за счет смятия кромок заготовки при ее сжатии прижимом пресса (рис. 104). В такой оснастке, например, штампуются детали из нержавеющей стали диаметром 25—

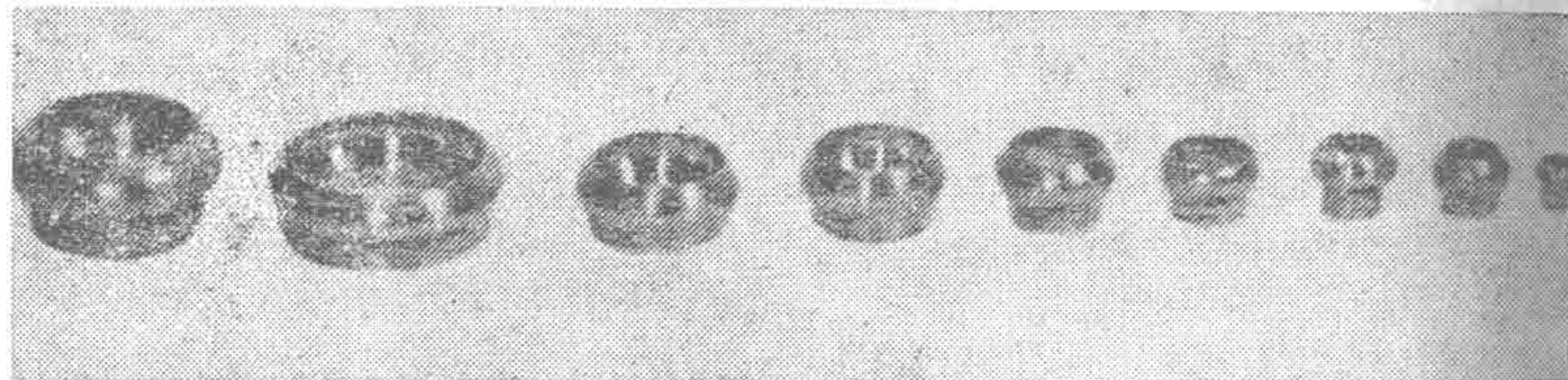


Рис. 105. Детали, изготовленные на ЭГ прессах без резиновых уплотнений.

55, высотой порядка 20 мм при толщине стенки свыше 1 мм (рис. 105). Этот принцип уплотнения за счет осевого сжатия с большим усилием исключает необходимость использовать резиновые уплотнительные кольца и при нем создается предварительное напряженное состояние, уменьшающее требуемое давление со стороны жидкости для деформации заготовки. В этом плане следует отметить, что существуют схемы раздачи с одновременным осевым сжатием как в обычной штамповке, так и в электрогидроимпульсной. Штамповка с осевым сжатием обеспечивает увеличение степени деформации без разрыва заготовки по сравнению с обычной раздачей. Для создания осевого усилия на торец заготовки в электрогидроимпульсной

штамповке используется импульсное давление жидкости (путем введения в оснастку поршня с отверстием), благодаря которому осевое усилие на торец заготовки сопровождается радиальным давлением на ее внутреннюю поверхность (рис. 106).

Увеличение степени раздачи при введении осевого сжатия зависит от величины создаваемых при этом сжимающих напряжений, ограничено устойчивостью заготовки, которая зависит от отношения толщины ее стенки к диаметру и высоте, а также

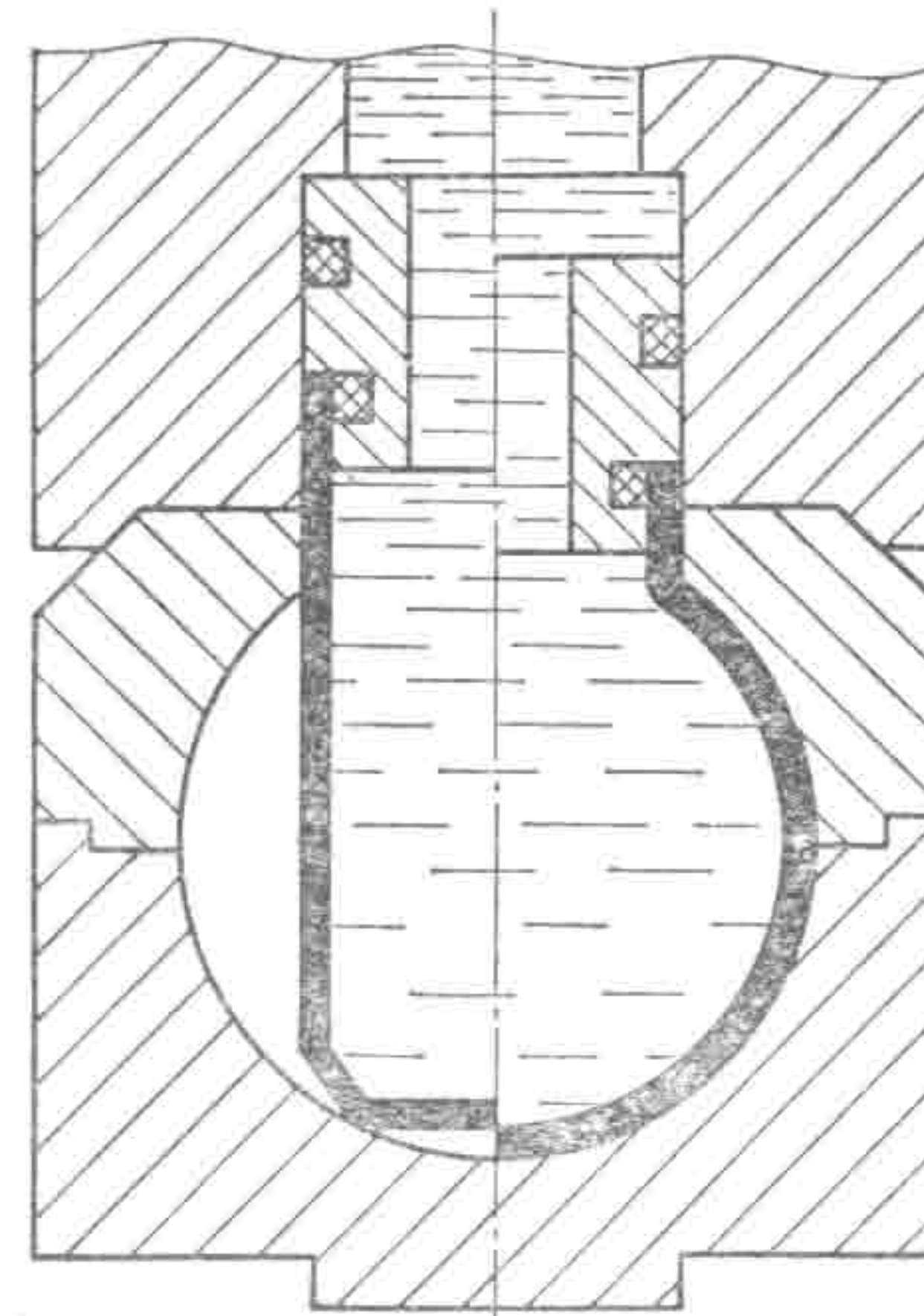
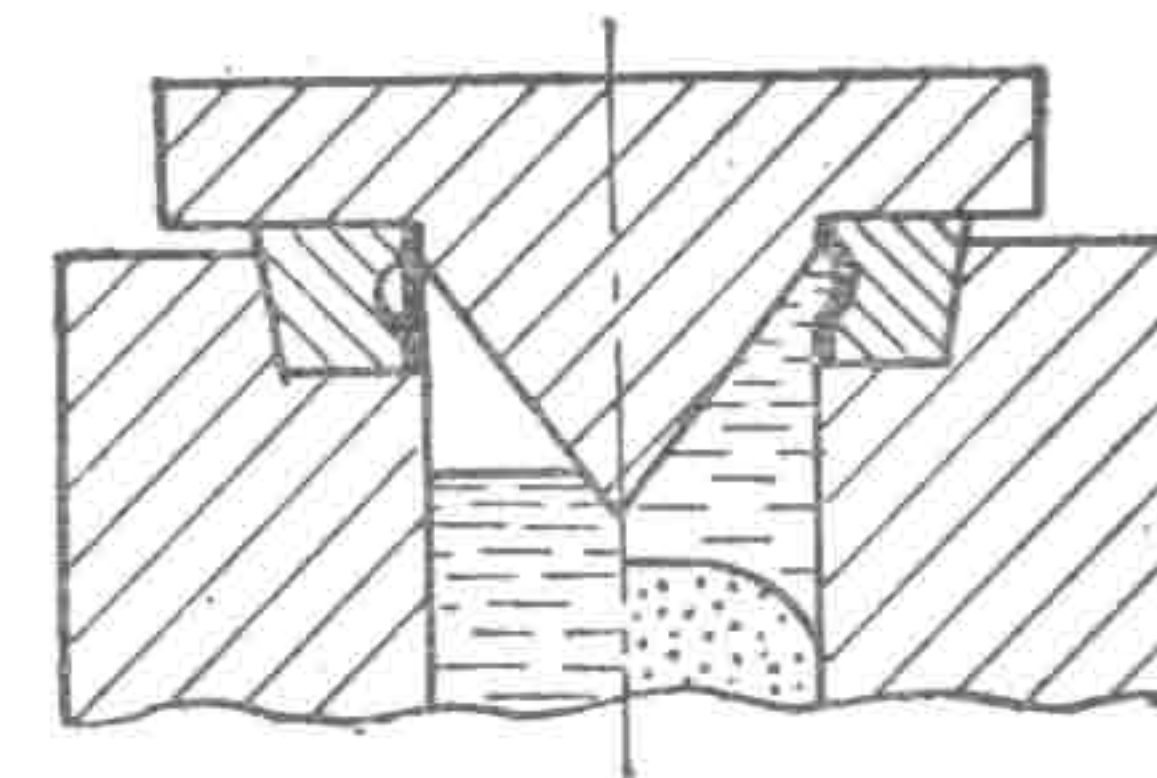


Рис. 106. Вариант схемы оснастки для раздачи с осевым сжатием.

Рис. 107. Схема оснастки для раздачи метанием жидкости.



от кривизны образующей, меняющейся в процессе деформирования. Поэтому эффективность схемы раздачи с осевым сжатием для разных размеров заготовок различна. Введение осевого сжатия может увеличить степень раздачи в 1,1—1,5 раза и более [31, 32, 67, 88]. Практика использования оснастки с такой схемой раздачи на ЭГ прессах показала, что при штамповке заготовок диаметром до 20 мм с толщиной стенки порядка 1 мм из стали ОХ18Н9 достижимы коэффициенты раздачи до 1,6.

Результаты исследований, подтверждаемые практикой, показывают, что давление, создаваемое в камере при раздаче, увеличивается с уменьшением объема жидкости. Поэтому при проектировании оснастки на раздачу целесообразно предусматривать в полости заготовки отражатели (см. рис. 95), которые наряду с уменьшением объема жидкости обеспечивают направленное воздействие волн в зону деформации.

При раздаче небольших заготовок, как и при выполнении разделительных операций и рельефной формовки, для увеличения деформирующего усилия может быть использована схема штамповки метанием жидкости. Например, если объем

Таблица 24. Характеристики матриц для формовки и калибровки деталей из трубчатых заготовок

Энергия в импульсе, кДж	Оборудование	Размеры матриц, мм		Марка стали	Термообработка HRC	Толщина стенки, мм	Наличие ребер жесткости	Конструкция и расположение разъема
		диаметр внутренний	высота					
10	T1220	250	220	45	38—42	30	—	Полуматрицы с продольным или поперечным разъемом или обойма с вкладышами
		100	100			25		
		50	50			20		
20	T1223 «Удар-20С»	400	450	45	38—42	50	—	Полуматрицы с продольным разъемом
		250	220			40		
		100	100			30		
40	T1226	250	300	45	38—42	50	—	То же
		350	1000			60		
80	«Удар-16К» T1229A	600	1000	35ГЛ	—	80	Шесть продольных, три поперечных	Обойма с тремя вкладышами
		800	1200			80		
160	T1232	800	1200	35ГЛ	—	80	Шесть продольных, три-четыре поперечных	То же

полости, ограниченный деформируемым участком заготовки, менее 30 см³ (рис. 107), то схему метанием жидкости на прессах с энергией 20 кДж можно считать наиболее рациональной, так как она обеспечивает большую, чем при обычной схеме нагрузку, и при этом не требует применения уплотнительных колец. Размеры рабочих поверхностей матриц могут быть рассчитаны по зависимостям, приведенным для вытяжных матриц.

Особое внимание должно быть уделено определению минимальной толщины стенки матрицы. В связи с тем, что давления носят импульсный, а возникающие напряжения — местный характер, расчет на прочность матриц представляет собой очень сложную задачу и поэтому в настоящее время пользуются данными, полученными на основании обобщения опыта работы. Накопленный практикой материал позволяет дать рекомендации для выбора толщин стенок матриц для раздачи и калибровки от 20 до 80 мм в зависимости от энергии в импульсе, внутреннего диаметра и материала матрицы (табл. 24).

7. ИСПЫТАНИЕ, ДОВОДКА ОСНАСТКИ И ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ

При освоении каждой новой детали в процессе испытания, доводки оснастки, отработки технологии экспериментальным путем устанавливается оптимальное число импульсов, а также величина энергии в каждом импульсе, состав смазки, уточняются размеры заготовки, величина зазора меж-

ду заготовкой и прижимом, величина перетяжного ребра и т. д. Отработка технологии начинается с проверки марки материала, качества и размеров исходной заготовки.

В связи с тем, что размеры исходной заготовки рассчитываются без учета ее утонения в процессе деформирования, на практике уточнение размера приводит к уменьшению размеров заготовки. В соответствии с уточненными размерами заготовки определяются размеры приемника, фиксирующего положение в оснастке.

Опыт, накопленный при отработке технологий в процессе внедрения прессов T1220 и T1223, а также исследования Минского политехнического института [54, 114] показали, что достигаемая степень деформации, как правило, находится в обратной зависимости от величины рабочего напряжения. Увеличение рабочего напряжения увеличивает ускорение центра заготовки, что способствует отставанию фланца за счет инерционных сил и приводит к росту утонения. При штамповке деталей с большими степенями деформации, когда, например, коэффициенты вытяжки или раздачи близки к предельно допустимым, штамповка на максимальном напряжении зачастую приводит к разрыву заготовки, особенно небольших деталей, размеры заготовок для которых менее трети максимальных для данного пресса, а также при небольшой толщине, менее 0,3—0,5 мм. В то же время штамповка этих деталей при небольшой энергии в импульсе (0,25—0,5 максимальной энергии в импульсе данного пресса) дает положительные результаты. Поэтому при отработке технологии штамповку целесооб-

МОНТАЖ, НАЛАДКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОМЕЩЕНИЯМ И РАЗМЕЩЕНИЮ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫХ ПРЕССОВ. МОНТАЖ И ИСПЫТАНИЕ

Расположение ЭГ прессов в цехе зависит от их назначения, технических характеристик и характера производства. Электрогидроимпульсное оборудование разделяется на прессы, требующие отдельных помещений, и установки, которые могут устанавливаться в общем помещении. Это разделение вызвано различным уровнем создаваемого при их работе шума, который определяется величиной энергии в импульсе. Прессы с энергией в импульсе до 20 кДж могут быть установлены в общем помещении, где уровень шума, создаваемый другим оборудованием, или допускаемый уровень звука по характеру выполняемых работ не ниже уровня шума, создаваемого этими прессами. Они не требуют специального фундамента и устанавливаются на полу цеха без закрепления. Однако тыльная сторона прессов должна иметь ограниченный доступ, необходимый только для его обслуживания, поэтому прессы целесообразно устанавливать у стен цеха или перегородок. Если такой возможности нет, то необходимо устанавливать с тыльной стороны постоянные ограждения, отделяющие зону обслуживания пресса от переходов и проездов. Электрогидроимпульсные прессы, не требующие специальных помещений, при использовании в серийном производстве можно размещать в общей технологической линии с учетом технологических потоков. Расположение оборудования в цехах должно обеспечивать удобство обслуживания и безопасность работ при минимальной занимаемой площади.

С точки зрения правил техники безопасности расположение ЭГ прессов должно удовлетворять требованиям, предъявляемым к кузнечно-прессовому и высоковольтному оборудованию. Размеры производственной площади, необходимой для

разно начинать при минимальной энергии в импульсе с ее постепенным увеличением на последующих заготовках.

Если энергия в импульсе, обеспечивающая вытяжку или раздачу без разрыва заготовки, оказывается недостаточной для оформления переходных радиусов детали, то в конце формообразования осуществляется калибровка радиусов при повышенном напряжении двумя — четырьмя импульсами. Иногда вследствие упрочнения материала при деформировании максимальной энергии в импульсе оказывается недостаточно для оформления переходных радиусов. В этом случае перед калибровкой вводится промежуточный разупрочняющий отжиг.

Глубина вытяжки, а также устойчивость заготовки зависят от величины зазора между заготовкой и прижимом, который при необходимости в процессе отработки технологии может уточняться до оптимального значения. Увеличить зазор можно введением между матрицей и ограничительным кольцом (см. рис. 78) прокладок из фольги. Если необходимо уменьшить зазор, уменьшается высота ограничительного кольца. Детали, перетяжной радиус матрицы для которых более 20—30 толщин материала, склонны к гофрообразованию на перетяжном ребре матрицы. Для устранения этого дефекта необходимо увеличивать усилие прижима или использовать многослойную вытяжку, которая заключается в одновременной штамповке нескольких сложенных в пачку заготовок.

Большое внимание при отработке технологии, особенно при вытяжке, уделяется смазке поверхности заготовки. Согласно рекомендациям Л. А. Шофмана [124], применение эффективных смазок позволяет снизить потребную работу в три—пять раз по сравнению со штамповкой без смазки. Известна способность поверхностно-активных смазок делать поверхностные слои металла более пластичными. Поверхностную активность смазки повышают активизирующие вещества (олеиновая кислота, сера, хлор и т. д.). Проведенные эксперименты показали, что при штамповке на ЭГ прессах деталей из нержавеющей стали лучшие результаты дает смазка следующего состава: олеиновая кислота — 78 %, стеарин — 17 %, сера — 5 %.

Вследствие упрочнения при деформации, а также под воздействием ударных волн металл изменяет свои механические свойства. Величина максимальной деформации заготовки лимитируется деформационным упрочнением и наклепом, в результате чего при штамповке деталей с большими степенями деформации приходится вводить межоперационный разупрочняющий отжиг. К предварительной термической обработке прибегают при штамповке деталей, ранее подвергавшихся деформации или сварке.

размещения прессов и установок, пропорциональны величине их главного параметра и находятся в пределах от 10 до 220 м²:

Энергия в импульсе, кДж	10	20	40	80	160
Занимаемая площадь, м ²	10—12	12—36	30—60	90—110	145—220

Взаимное расположение составных частей пресса или установки может быть различным в зависимости от размеров и формы в плане помещения или участка (рис. 108—110).

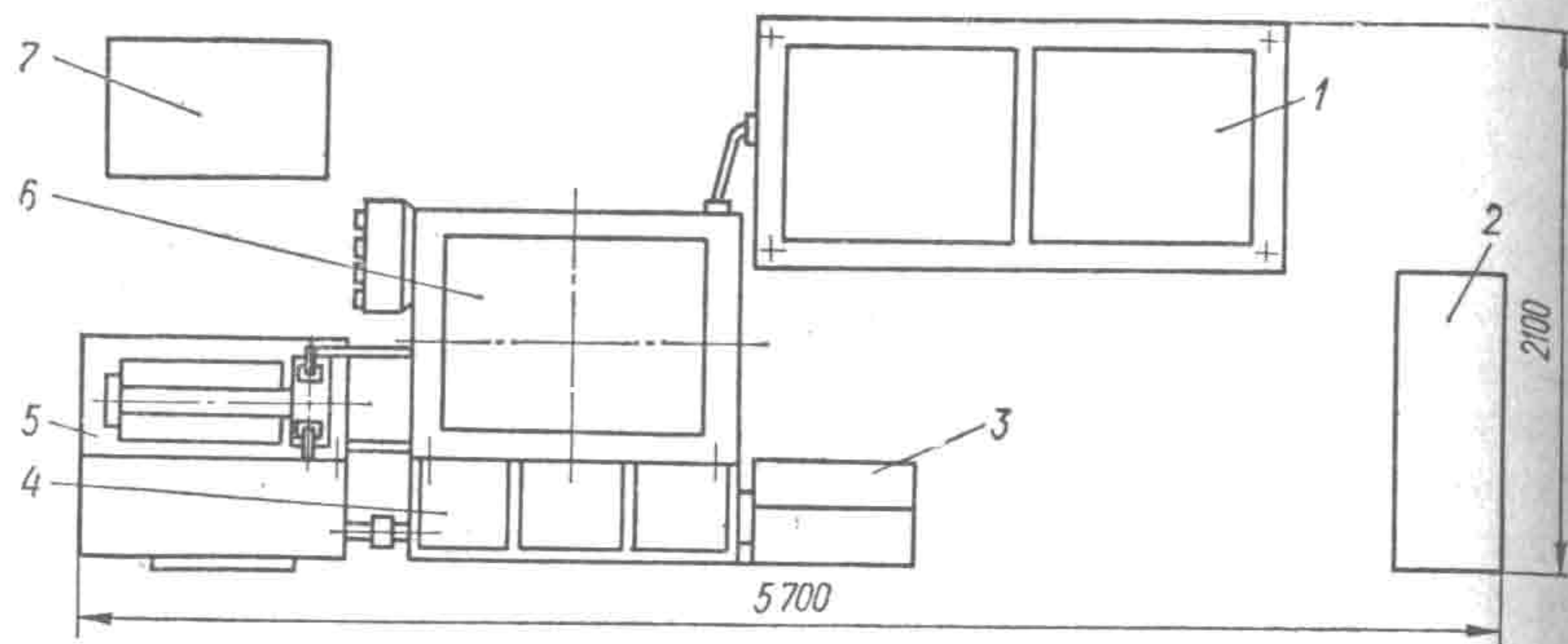


Рис. 108. Планировка пресса Т1223:

1 — генератор импульсных токов; 2 — щит системы управления; 3 — пульт управления; 4 — выдвижной стол; 5, 7 — гидропривод и станция водоснабжения; 6 — технологический узел.

Расстояние от стен и перегородок определяется требуемыми размерами зоны обслуживания каждого агрегата с учетом размеров дверей на кожухах агрегатов и принимается не менее 0,6 м.

Ниже приведены рекомендуемые расстояния от технологического узла ЭГ оборудования до элементов здания и границы прохода или проезда, а также расстояний между ЭГ оборудованием:

Энергия в импульсе, кДж	10	20	40	80	160
Расстояние от колонн, м	1,0	1,2	1,5—2,0	2,2—3,0	3,2—3,5
Расстояние от стены, м	1,2	1,4	1,5—2,0	2,2—2,8	3,0—3,5
Расстояние от границы проезда или прохода, м	0,6	0,6	0,6	0,8	1,2
Расстояние между ЭГ оборудованием, м	1,2	1,5	1,5	3,0	—

Установки с энергией в импульсе, равной 80 и 160 кДж, размещаются в отдельных помещениях, в которых предусмотрен фундамент для технологического узла. При разработке проекта строительной части учитываются требования «Правил технической эксплуатации и обслуживания электроустано-

вок» [93] и «Правил устройства электроустановок». Несущие, ограждающие конструкции и перекрытия рекомендуется выполнять с максимальным использованием сборных железобетонных элементов промышленного изготовления, которые

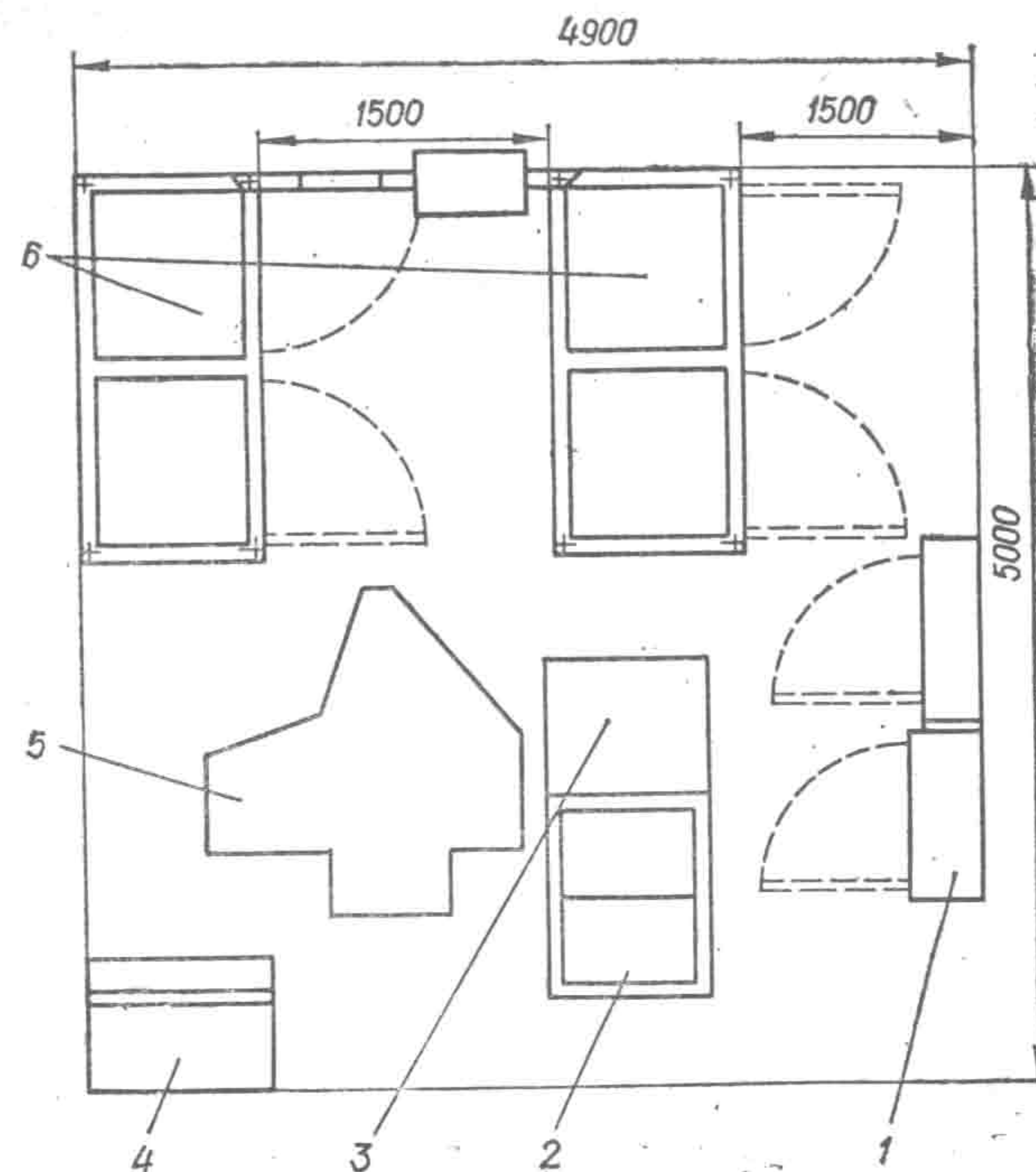


Рис. 109. Планировка пресса Т1226:

1 — шкафы системы управления; 2 — станция водоснабжения; 3 — гидроагрегат; 4 — пульт управления; 5 — технологический узел; 6 — генераторы импульсных токов.

должны соответствовать I и II степеням огнестойкости согласно требованиям «Правил устройства электроустановок». Стены помещения должны обладать необходимой звукоизоляцией согласно требованиям «Санитарных норм и правил по ограничению шума на производстве». Толщина стен должна обеспечить снижение уровня шума до допустимой величины в кузнечно-прессовых цехах. Двери и ворота помещения оборудуются электрическими блокировками, при этом открываться они должны наружу и иметь самозапирающиеся замки, открываемые без ключа с внутренней стороны помещения. Рабочее помещение оборудуется приточно-вытяжной вентиляцией. Отделка производственных помещений ЭГ установок

производится в соответствии с ГОСТ 15548—70 «Цвета сигнальные и знаки безопасности для промышленных предприятий».

В рабочем помещении рекомендуется предусматривать подъемно-транспортные средства для подъема и перемещения обрабатываемых заготовок и деталей и выполнения ремонтных работ на установке. Помещение оборудуется вытяжной

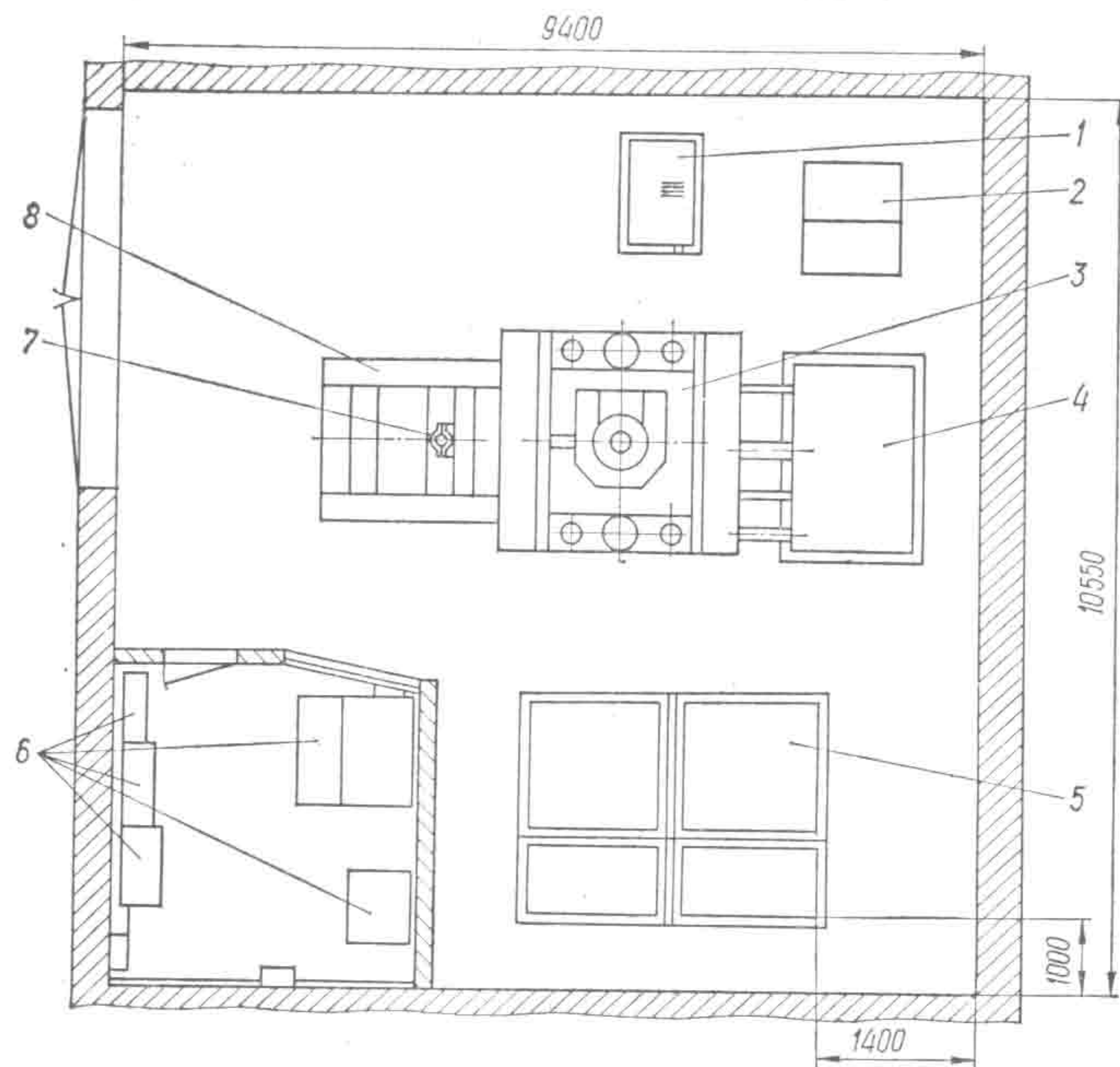


Рис. 110. Планировка пресса Т1229:

1 — гидроагрегат; 2 — станция вакуумирования и пневматика; 3 — технологический узел; 4 — станция водоснабжения; 5 — генераторы импульсных токов; 6 — электрооборудование системы управления; 7 — гидроцилиндр выталкивателя; 8 — стол.

вентиляцией с пятикратным обменом воздуха и освещением лампами накаливания с минимальной освещенностью 50 лк. Пол может быть выполнен из бетона или покрыт асфальтом.

Помещение операторской должно быть высотой 3 м, иметь звукоизолирующее ограждение конструкции согласно требованиям «Санитарных норм» для помещений, требующих разборчивой речевой связи и связи по телефону. Освещение операторской должно обеспечить наименьшую освещенность при люминесцентных лампах 150 лк и при лампах накаливания 50 лк на высоте 0,8 м.

Установкам для штамповки крупногабаритных деталей необходимы отдельные фундаменты, удовлетворяющие требованиям «Строительных норм и правил» на фундаменты

машин с динамическими нагрузками, условиям прочности, устойчивости и экономичности. Колебания фундаментов не должны оказывать вредного влияния на обслуживающий персонал, технологические процессы, оборудование и приборы, находящиеся на самом фундаменте или вне его, и быть опасными для прочности и устойчивости конструкций зданий и сооружений или отдельных их элементов.

Электрогидроимпульсные прессы и установки относятся к электроустановкам с большими токами замыкания на землю. Сопротивление заземляющих устройств в любое время года должно быть не более 0,5 м. Для обеспечения такого максимального сопротивления заземляющего контура иногда приходится делать дополнительные заземлители или индивидуальный контур. Кроме обеспечения безопасности людей заземление имеет еще и другое назначение — ограничение напряжения в электрических цепях и обеспечение функционирования релейной защиты. В качестве материала для заземления обычно используют стержни из стального уголка или трубы диаметром 25—50, длиной 2,5—5 м. Чтобы уменьшить колебания величины сопротивления от температуры, их располагают ниже уровня земли не менее чем на 0,5—0,8 м. Расстояние между вертикальными стержнями, соединяемыми горизонтальными стальными полосами, должно быть не менее их длины, что уменьшает их взаимное влияние, увеличивающее сопротивление контура. Число заземлителей, их размеры и взаимное расположение определяются с учетом удельного сопротивления грунта [98, 130—132].

На место эксплуатации прессы и установки поставляются поагрегатно или в разобранном виде. Процесс монтажа прессов включает сборку узлов, монтаж трубопроводов гидропривода, системы водоснабжения и вакуумирования и др. После монтажа проводят проверку работоспособности систем и их регулировку. Сначала проверяют правильность выполнения команд в ручном режиме без включения ГИТа. При этом последовательно даются команды и проверяется правильность их срабатывания. Командой «подготовка ГИТа» проверяется размыкание контактов блокировок. Срабатывание блокировок проверяется подачей команды «подготовка ГИТа» с последующим нажатием кнопки аварийного отключения ГИТа или кнопки аварийного отключения пресса. При нажатии кнопок аварийного отключения блокировки должны замыкать контакты, причем блокировка с разрядным сопротивлением должна срабатывать раньше, чем короткозамкнутые блокировки, что определяется визуально. После проверки срабатывания блокировок можно проводить испытание работы пресса в полном объеме с включением

ГИТа, предварительно проверив надежность заземления и величину сопротивления заземляющего контура. Целесообразно в процессе испытания провести экспериментальную проверку оптимума величины разрядного промежутка для прессов, у которых он не инициируется проволокой, так как вследствие разности электропроводности воды в различных городах и даже районах одного города величина оптимального разрядного промежутка может значительно отличаться.

Оптимальность разрядного промежутка может быть установлена по величине получаемого в разрядной камере давления, которое оценивается качественно по результатам деформирования одинаковых заготовок в одну матрицу. Чем меньше радиус закругления детали при штамповке на одних и тех же режимах, тем разрядный промежуток ближе к оптимальному. Радиус закругления матрицы должен быть достаточно мал по отношению к толщине заготовки: лучше всего, если он близок к нулю. Одновременно с подбором оптимальной величины разрядного промежутка по результатам штамповки детали проводится количественная оценка величины максимального давления, получаемого при максимальной энергии в импульсе путем его расчета и уточнения поправочным коэффициентом для данного объема камеры. Целесообразно провести количественную оценку величины получаемого давления для нескольких объемов и уточнить расчетные коэффициенты для данной электропроводности воды. Такая тарировка позволит с большей точностью определить возможность штамповки той или иной детали на прессе, исходя из требуемых давлений.

Объем испытаний при сдаче пресса заказчика на месте эксплуатации может быть различен: от простой проверки правильности выполнения всех команд в ручном и автоматическом режимах со штамповкой нескольких деталей при сдаче серийно выпускаемых универсальных прессов до полной проверки всех эксплуатационных характеристик с ресурсным испытанием на стойкость электродных систем при сдаче специализированных прессов.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА ОПЕРАТОРА. ТРЕБОВАНИЯ К ОБСЛУЖИВАЮЩЕМУ ПЕРСОНАЛУ. УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ

Рабочее место оператора-штамповщика должно в первую очередь отвечать требованиям безопасной работы. Электрогидроимпульсные прессы и установки для штамповки

сочетают в себе особенности высоковольтных электроустановок и обычного кузнечно-прессового оборудования с присущими как тем, так и другим требованиям техники безопасности [88].

Особенность большинства ЭГ прессов и установок — наличие отдельного пульта управления, в связи с чем оператору необходимо перемещаться от пульта управления к технологическому узлу и обратно при штамповке каждой детали. Пульты управления прессов с энергией 80—160 кДж располагаются неподвижно в пультовой, а пульты прессов меньших энергий — в общем помещении в зоне обслуживания пресса. Как в том, так и в другом случае необходимо принять меры, исключающие в процессе работы загромождение проходов заготовками и готовыми деталями. Пульты управления прессами, размещаемые в общем помещении, могут переставляться в зону обслуживания в зависимости от размеров штампуемых деталей. При штамповке мелких деталей тара для заготовок и деталей может быть расположена в непосредственной близости у техузла и соответственно пульт целесообразно устанавливать на минимально допустимом расстоянии, чтобы обеспечить сокращение потерь времени на перемещение оператора. При штамповке деталей больших размеров, которые необходимо укладывать за пределами зоны обслуживания прессом, пульт устанавливается так, чтобы обеспечить удобный проход и в то же время наблюдение из-за пульта за показаниями киловольтметра, установленного на ГИТе. Освещенность зоны обслуживания должна быть достаточной для наблюдения за показаниями всех приборов с рабочего места оператора, которое обеспечивается необходимыми защитными средствами.

К работе на ЭГ прессах и установках допускаются специально подготовленные лица по специальности «штамповщик электроимпульсным методом» и имеющие квалификационную группу по технике безопасности, оговоренную руководством по эксплуатации установки. Согласно тарифно-квалификационным характеристикам этой профессии (см. § 47а—47в бюллетня № 7, 1975 г.) Госкомитета Совета Министров СССР по вопросам труда и зарплаты, штамповщики электроимпульсным методом могут иметь квалификацию третьего—пятого разряда и уметь не только вести процессы штамповки на оборудовании, но и подналадку и наладку обслуживаемых установок.

Практически обучение проводится, как правило, по программе, предусматривающей изучение приемов работы и устройство того типа оборудования, которое имеется в эксплуатации на производстве. Опыт организации и проведения ра-

бот по ЭГ штамповке показал, что лучшие результаты можно получить, когда установку обслуживает постоянный, специально подготовленный состав операторов, технологов, ремонтников и электриков; работа проводится по графику с выделением времени на осмотры, наладку, отработку технологии новых деталей, когда производится профилактический ремонт установки и имеются запасные к ней части.

Каждый оператор должен пройти двухнедельную стажировку на ЭГ установке под руководством опытного работника, причем на любом другом предприятии, располагающим соответствующим оборудованием и специалистами. Практическое обучение осуществляется в индивидуальном порядке и проводится непосредственно на установке. Руководит обучением высококвалифицированный рабочий, мастер или приглашенный специалист наладчик. Проверка знаний оператора по электробезопасности производится комиссией того предприятия, где он работает или будет работать. Если операторы работают на предприятиях, не располагающих специалистами для состава комиссии, то их знания можно проверить в комиссиях, созданных при вышестоящих организациях.

Эксплуатация ЭГ прессов и установок требует ежедневного осмотра электрооборудования и периодической замены электродов, их изоляторов или барабанов с иницирующей проволокой, что при нормальной загрузке оборудования приводит к ежедневному проведению работ на токоведущих частях. «Правила технической эксплуатации электроустановок-потребителей» и «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭ и ПТБ) оговаривают, что лица, имеющие по технике безопасности квалификационную группу ниже III, не имеют права проводить единоличный осмотр электрооборудования со вскрытием дверей или снятием крышек, открывающих доступ к электрооборудованию, а лица, имеющие группу ниже IV, не имеют права проводить единолично какие-либо работы на токоведущих частях установок с напряжением выше 1000 В. Исходя из изложенных выше требований оператор (штамповщик) должен иметь квалификационную группу не ниже III, а обслуживание некоторых установок предусмотрено операторами с IV квалификационной группой. Для получения III и IV групп необходимо иметь предварительный стаж работы на электроустановках, предусмотренный ПТЭ и ПТБ, от трех до шести месяцев для лиц с образованием семь классов и выше, прошедших специальное обучение. Это условие создает некоторые трудности в начальный период эксплуатации, поэтому решением лица, ответственного за электрохозяйство предприятия, к работе на ЭГ прессе или

установке может быть допущен «штамповщик электроимпульсным методом» с более низкой квалификационной группой по технике безопасности, чем предусмотрено инструкцией по эксплуатации. В этом случае круг обязанностей штамповщика оговаривается местной инструкцией, согласованной с технической инспекцией профсоюза, а оперативное обслуживание электрооборудования (осмотр, замена электродов и их изоляторов, уход за изоляторами конденсаторов и выпрямителя-трансформатора, контроль плотности подсоединений кабелей к электроду и т. д.) возлагается на дежурный оперативно-ремонтный персонал цеха или предприятия, имеющий право на проведение работ на электроустановках с напряжением свыше 1000 В.

Для обеспечения безопасной работы штамповщик должен руководствоваться следующими основными правилами:

1. Приступая к работе после монтажа или ремонта первый пуск установки осуществлять после прохождения вводного инструктажа в присутствии лица, ответственного за безопасную эксплуатацию данного оборудования.

2. Перед первым пуском внешним осмотром исправность установки и оснастки проверять лицам, ответственным за исправное состояние и безопасную эксплуатацию и имеющим право на допуск к работе. Осмотр установки проводится в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

3. В процессе штамповки осуществлять только те операции, которые предусмотрены технологической картой. Штамповщик может самостоятельно изменять режимы обработки с пульта управления прессом, если требуется их корректировка для получения детали в соответствии с чертежом.

4. Штамповщик должен соблюдать сроки проведения профилактических работ по поддержанию установки в исправном состоянии или контролировать своевременность их проведения, если он не допущен к единоличному выполнению этих работ либо их проведение поручено другому оперативному или ремонтному персоналу. Объем и дата проведения профилактических и ремонтных работ должны фиксироваться в эксплуатационно-оперативном журнале установки, который должен находиться на рабочем месте.

5. Единоличные или в составе бригады работы на токоведущих частях, а также осмотр высоковольтного оборудования допускается проводить только с полным снятием напряжения и с записью в оперативном журнале в порядке текущей эксплуатации по распоряжению или наряду. Допуск на единоличный осмотр и оперативное обслуживание электрооборудования ЭГ установки должен быть зафиксирован докумен-

тально распоряжением главного энергетика предприятия, организации.

Перечень работ, проводимых в порядке текущей эксплуатации, должен быть утвержден главным энергетиком предприятия и согласован с технической инспекцией профсоюза.

6. Штамповщик, допущенный к оперативному обслуживанию установки, должен следить за правильным хранением, состоянием и периодичностью проверки защитных средств, необходимых для оперативного обслуживания электрооборудования.

7. При передаче смены штамповщик обязан сообщить сменщику о состоянии установки.

Указанные правила — не исчерпывающие, они дают лишь общее представление об эксплуатации ЭГ прессов. В каждом конкретном случае эксплуатация установок и безопасное их обслуживание проводятся в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации данной установки или ЭГ пресса.

3. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫХ ПРЕССОВ И УСТАНОВОК

Надежность работы ЭГ прессов, как и любого другого оборудования, во многом зависит от правильной их эксплуатации. Специфика обслуживания ЭГ прессов и установок в процессе эксплуатации определяется следующими факторами: наличием в комплекте пресса источников тока с высоким напряжением; использованием в качестве привода механизмов гидравлических систем; высокой динамичностью нагрузок, действующих на элементы конструкции прессов; использованием в качестве рабочей среды воды; необходимостью периодической замены электродов или их сменных частей.

Источниками тока с высоким напряжением в ЭГ прессах являются выпрямители — трансформаторы и конденсаторы, которые входят в так называемое высоковольтное оборудование прессов. Для контроля состояния и работоспособности электрооборудования необходим ежедневный осмотр, профилактические работы и текущий ремонт в соответствии с руководством по эксплуатации прессов. Ежедневный осмотр проводится при полностью отключенном генераторе импульсных токов. При этом визуальным контролем проверяются отсутствие в ГИТе посторонних предметов, чистота изоляторов ВТМ и конденсаторов и отсутствие на них трещин,

отсутствие выпучивания стенок конденсаторов и следов вытекания пропитывающей жидкости, исправность цепи зарядного и разрядного контуров, состояние токоведущих и изолирующих частей рабочего электрода и контактов в электрической схеме генератора и исправность блокировок, качество подсоединения к заземлению. Необходимо также контролировать наличие защитных средств и их состояние. Проверяется качество подсоединения токоведущих кабелей к электроду и исправность цепи, соединяющей разрядные сопротивления с блокировкой.

В процессе профилактических работ на высоковольтном оборудовании проверяется последовательность срабатывания блокировок, удаляется пыль и грязь и спиртом промываются изоляторы ВТМ и конденсаторы, а также изоляторы разрядников и блокировок. Подтягиваются гайки крепления токоведущих шин и кабелей, проверяется уровень масла в ВТМ.

Наличие пыли и грязи на изоляторах, а также нарушение изоляции кабелей может привести к пробое высокоимпедансным на корпус, сопровождающемуся большим шумом, и послужить причиной выхода из строя элементов высоковольтного оборудования. Разрыв в цепи, соединяющей разрядные сопротивления с блокировкой, при выключении ГИТа оператором до срабатывания разрядника или при срабатывании блока защиты от перенапряжения приводит к разрядке конденсаторной батареи в режиме короткого замыкания через контакты блокировок, что сопровождается большим шумом и может привести к выходу блокировок из строя. Необходимость периодически следить за состоянием крепления токоведущих кабелей вызвано большими динамическими нагрузками, возникающими как от гидродинамических явлений при пробое разрядного промежутка в камере, так и от электромагнитных сил, действующих на тоководы при протекании по ним больших импульсных токов, которые могут привести к ослаблению контактов и появлению искрения, сопровождающегося подгоранием мест контакта.

Ежедневный осмотр элементов гидропривода заключается в проверке отсутствия подтекания масла без вскрытия крышек кожухов техузла и гидроагрегатов. При профилактических работах проводится более тщательная проверка герметичности гидросистемы, вскрываются крышки кожухов, внешним осмотром проверяется состояние трубопроводов, рукавов и уровень масла в баке гидроагрегата.

Поддержание в рабочем состоянии системы водоснабжения так же, как и гидросистемы, не требует проведения особых работ, в основном необходимо контролировать отсутствие утечек, периодически заменять воду в баке с его промывкой.

В процессе работы на ЭГ прессах необходимо обращать внимание на стабильность срабатывания разрядника. Если разрядник не замыкает цепь при достижении заданного рабочего напряжения, то происходит зарядка конденсаторов до максимально допустимого электросхемой напряжения с последующим срабатыванием блока защиты от перенапряжения, разрядом всей запасенной энергии через разрядные сопротивления и отключением ГИТа. При появлении такой неисправности не рекомендуется без выяснения причин включать ГИТ, так как несколько последовательных разрядов через сопротивления приводят к их перегреву и выходу их из строя.

Отсутствие разряда в камере на заданном напряжении может быть вызвано не только неисправностью разрядника. Причиной этого отказа могут быть неисправность блока поджига, неполное заполнение разрядной камеры водой, а также увеличение разрядного промежутка вследствие сгорания электродов при несоблюдении сроков их замены, несрабатывание системы подачи инициатора в разрядный промежуток или разрыв в разрядной цепи. Величина разрядного промежутка и подача инициатора проверяются в первую очередь; при отсутствии отклонений и неисправностей контролируется заполнение камеры водой. Если трубопроводы системы водоснабжения, ведущие к сливу после датчика наличия воды, засоряются, то датчик — реле давления — может сработать и при наличии в верхней части камеры воздушной полости, давление в которой равно давлению в напорной магистрали, передается соответственно на датчик, и тот выдает команду на включение ГИТа. В этом случае разрядный промежуток может оказаться в воздухе и не пробиваться при подаче на электроды рабочего напряжения. Поэтому при таком отказе необходимо проверять наличие слива воды в бак или канализацию (для прессов, не имеющих обратной системы водоснабжения). После чего проверяется исправность блока поджига, системы управления им и исправность разрядника.

Иногда при подаче напряжения на зарядку ГИТа киловольтметр не показывает роста напряжения на выводах конденсаторов. Этот отказ может быть связан как с неисправностью киловольтметра или разрывом цепи подающей на него напряжение, так и с неисправностью одной из блокировок. Неисправная блокировка не срабатывает при подаче команды «подготовка» и не разъединяет плюсовые и минусовые выводы конденсаторов и ВТМ. Выводы ВТМ оказываются короткозамкнутыми, и зарядка не происходит.

Если в процессе зарядки конденсаторов наблюдается самопроизвольный сброс напряжения, что видно по стрелке киловольтметра, а также «потрескивание» в районе конденсаторной

батареи, то причина этого — пробой обкладок одного из конденсаторов; следует поочередно проверить их исправность.

При эксплуатации прессов с клинорычажными механизмами прижима необходимо следить за тем, чтобы при смене оснастки был правильно отрегулирован прижим. Нельзя допускать, чтобы после срабатывания концевого выключателя прижима между сопрягаемыми поверхностями неподвижных и подвижных клиньев оставался зазор. В этом случае вся импульсная нагрузка при разряде в камере будет восприниматься штоком гидроцилиндра прижима, что может привести к чрезмерному повышению давления в гидроцилиндре и выходу из строя самого гидроцилиндра или трубопроводов и рукавов, подводящих к гидроцилиндру масло. Регулировку клинорычажного механизма для каждой оснастки необходимо проводить так, чтобы тяги клиньев при зажиме оснастки не становились в одной плоскости, а подвижные клинья заходили между неподвижными сопрягаемыми без зазора, «с усилием». Максимальное усилие прижима достигается тогда, когда клинья самопроизвольно останавливаются при максимальном давлении в гидроцилиндре прижима, а угол между тягами клиньев меньше 180° (порядка $160-170^\circ$).

Иногда в работе гидросистемы наблюдаются отказы, связанные с кажущейся неисправностью. Так, после поднятия прижимной траверсы, т. е. выполнения команды «разжим», следующая операция — выдвигание стола — не выполняется. Это происходит в ручном режиме управления прессом, когда оператор прекращает подъем траверсы, подняв ее не полностью. При этом концевой выключатель контроля подъема траверсы не срабатывает. В результате команда на выдвигание стола не может быть подана и золотник подачи масла в гидроцилиндр выдвигания стола не срабатывает при включении тумблера на выдвигание. Аналогичное явление может быть и на других операциях, если концевой выключатель, контролирующий выполнение предыдущей операции, не сработал вследствие ее неполного выполнения. В этих случаях повторяется предыдущая операция, а затем дается команда на выполнение последующей. Если это не дает результатов, то необходимо проверять исправность самих концевых выключателей и их упоров.

Высокая динамичность нагрузок, возникающих при штамповке на ЭГ прессах, и распространяющиеся по элементам конструкции ударные волны могут быть причиной самопроизвольного ослабления резьбовых соединений. В процессе эксплуатации пресса следует периодически контролировать контровку всех резьбовых соединений и проводить затягивание ослабленных болтов, гаек и винтов, в том числе и гаек на колоннах. При проведении ремонтно-профилактических работ необходи-

мо обеспечивать надежную контровку разбравшихся резьбовых соединений.

Использование воды в качестве деформирующей среды ставит повышенные требования по защите от коррозии элементов конструкции прессов и оснастки. По окончании смены, а также в перерывах на обед необходимо протирать досуха смачиваемые водой поверхности пресса и оснастки; надо также следить за состоянием антикоррозионных покрытий и периодически покрывать неокрашенные поверхности тонким слоем консистентной смазки.

Для обеспечения надежной работы системы сигнализации о наличии воды в камере пресса необходимо периодически следить за исправностью и регулировкой датчиков наличия воды. На ЭГ прессах устанавливаются датчики двух типов: электрические, которые работают на принципе реагирования на электропроводность среды при наличии между электродами датчика воды и ее отсутствии, и датчики давления, которые реагируют на избыточное давление в магистрали при подаче воды в камеру. Электрические датчики требуют периодической очистки плюсового электрода от загрязнений и окисления. Загрязнение электрода датчика может быть вызвано попаданием на его поверхность масел или смазок, смываемых водой с заготовки при штамповке со смазкой, ржавчиной, окалиной и т. п.

Датчики давления обеспечивают надежную работу при наличии в системе водоснабжения давления выше уровня срабатывания, на который они настроены. Прессы, имеющие обратную систему водоснабжения, включающую водяной бак с напорным насосом, имеют достаточно стабильное давление в водяной магистрали после разрядной камеры, и работа датчиков не вызывает проблем, если оснастка герметична. Если герметичность нарушена, то давление в водяной магистрали может упасть ниже установленного при регулировке датчиков предела срабатывания.

Таким образом, одной из причин отсутствия сигнала о наличии воды в камере, хотя она может быть и заполненной, является недостаточная герметичность оснастки. В этом случае датчик выполняет дополнительную роль контролера качества уплотнения оснастки.

Пробой межэлектродного промежутка как с иницированием, так и без него сопровождается эрозией электродов, приводящей к изменению длины межэлектродного промежутка. В двухстержневых электродных системах предусмотрена возможность поддержания длины разрядного промежутка в заданных пределах путем периодической его регулировки по мере сгорания электродов. В прессах, имеющих коаксиальную электродную систему (Т1220, Т1223, Т1226, «Удар-20С»), изменение разряд-

ного промежутка происходит менее интенсивно, чем при двухстержневой схеме. Коаксиальная схема позволяет обходиться без регулировки разрядного промежутка в процессе работы с целью его восстановления по мере сгорания электродов. Изменение длины разрядного промежутка иногда требует корректировки режимов штамповки детали, поэтому в процессе работы необходимо периодически проверять качество деталей и, если это нужно, вводить коррективы в режимы. Как правило, корректировка режимов сводится к увеличению (на один-два) числа импульсов на деталь или повышению рабочего напряжения.

После того как электроды вырабатывают свой ресурс, они заменяются. При интенсивной эксплуатации оборудования неиницируемые электроды или их сменные части и изоляторы меняются через 4—12 ч работы в зависимости от режимов штамповки, поэтому необходимо иметь определенный запас сменных электродов и изоляторов. Электроды, в которых разрядный промежуток инициируется, имеют больший ресурс.

Сменные электроды сопрягаются с тоководами, как правило, по конусным поверхностям для того, чтобы обеспечивалась посадка без зазора и исключались искрение и подгорание поверхности контакта. При замене сгоревшего электрода целесообразно контролировать состояние контактной поверхности токовода. Конструкция некоторых электродных систем не позволяет проводить непосредственный контроль состояния контактной поверхности токовода без отсоединения от него токоведущих кабелей и разборки разрядной головки или электрода. Поэтому при работе с такими разрядными головками или электродами состояние поверхности контакта токовода может контролироваться косвенно, по состоянию поверхности контакта сменного электрода. При плохом контакте эрозии подвергаются, как правило, обе контактирующие поверхности, и, если на указанной поверхности снимаемого для замены электрода обнаруживаются следы пригара, это говорит о плохом состоянии соответствующей поверхности токовода и о целесообразности его замены.

Приведенная информация по техническому обслуживанию ЭГ прессов и установок дает представление лишь о наиболее характерных особенностях их эксплуатации. Обеспечение нормальной работы оборудования достигается выполнением требований по технической эксплуатации в полном объеме, предусмотренном технической документацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов Е. И., Калинин К. А., Маслов В. Г.* Элементы гидропривода.— Киев : Техника, 1977.— 320 с.
2. *Автоматизация процессов электровзрывной развальцовки труб теплообменных аппаратов / Л. М. Корнюшенко, Н. М. Крашенин, Б. Е. Фридман и др.*— В кн.: Научные основы электрогидравлич. эффекта и использование его в машиностроении и металлообработке, Николаев, 1973, с. 220—221.
3. *Автоматизированная линия для производства стальных прокатно-сварных панельных радиаторов / Э. Ю. Бурменко, В. К. Тригуб, В. Г. Омельченко, Е. Х. Хазанов.*— Кузнеч. штампов. пр-во, 1978, № 12, с. 22—23.
4. *Азаркевич Е. И.* Применение теории подобия к расчету некоторых характеристик электрического взрыва проводников.— Журн. техн. физики, 1973, 43, вып. 1, с. 141—145.
5. *Акользин П. А., Гуляев В. Н.* Коррозионное растрескивание аустенитных сталей в теплоэнергетическом оборудовании.— М.— Л. : Госэнергоиздат, 1963.— 271 с.
6. *Амбросимов Б., Шмеркович В., Марполин Г.* Воздушное место водяного. Наука и жизнь, № 1, 1978, с. 84—86.
7. *Андреев П. А., Гремиллов Д. И., Федорович Е. Д.* Теплообменные аппараты ядерных энергетических установок.— Л. : Судостроение, 1969.— 352 с.
8. *Арсентьев В. В.* К теории мощных электрических разрядов в жидкой среде : Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Новочеркасск, 1965.— 28 с.
9. *А. с. 202050 (СССР).* Патрон многократного действия для развальцовки труб / А. П. Сорочинский, Г. Г. Покладий.— Оpubл. в Б. И., 1975, № 38.
10. *А. с. 204299 (СССР).* Патрон многократного действия для электрогидравлической развальцовки труб / Б. С. Куба — Эмизик, В. В. Шагалин, Г. Г. Покладий, А. П. Сорочинский.— Оpubл. в Б. И., 1975, № 38.
11. *А. с. 37277 (СССР).* Способ для дезинфекции продуктов и стимулирования семян / И. В. Федоров.— Оpubл. 30.06.34.
12. *А. с. 193905 (СССР).* Способ холодной сварки труб / А. А. Дерibas, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеевков.— Оpubл. в Б. И., 1967, № 7.
13. *А. с. 410601 (СССР).* Способ штамповки / М. Я. Демьянов, Б. Я. Мазуровский, В. Г. Куделя, А. С. Шкатов. Оpubл. в Б. И. 1974, № 1.
14. *А. с. 390913 (СССР).* Съёмник / Б. Я. Мазуровский, А. С. Шкатов, Г. В. Беломоин.— Оpubл. в Б. И., 1973, № 31.
15. *А. с. 394137 (СССР).* Устройство для обработки деталей энергией ударной волны / Б. Я. Мазуровский, А. С. Шкатов.— Оpubл. в Б. И., 1973, № 34.
16. *А. с. 397133 (СССР).* Устройство для создания электрических разрядов в жидкости / М. Я. Демьянов, А. С. Шкатов, Б. Я. Мазуровский, В. Г. Куделя, Г. В. Беломоин. Оpubл. в Б. И. 1973, № 36.
17. *А. с. 185331 (СССР).* Устройство для электровзрывной запрессовки труб / В. В. Иванов.
18. *А. с. 211496 (СССР).* Устройство для электровзрывной запрессовки труб / В. В. Иванов.— Оpubл. в Б. И., 1972, № 27.
19. *А. с. 338031 (СССР).* Электрод для электрогидравлической установки / А. В. Цветков, Г. Т. Поддубный, М. Я. Демьянов, К. Г. Балан, В. М. Пономаренко.
20. *А. с. 374908 (СССР).* Устройство для электрогидравлической штамповки / А. В. Цветков, Г. Г. Толмачев, М. Я. Демьянов, Б. Я. Мазуровский, А. С. Шкатов, В. Г. Куделя, Г. В. Беломоин. Оpubл. в Б. И. 1976, № 32.
21. *Атрощенко Э. С., Пашков П. О., Рядинская И. М.* Исследование тонкой структуры армо-железа, упрочненного взрывом.— Физика металлов и металловедение, 1965, № 19, вып. 6, с. 923—925.
22. *Барановский М. А.* Пластическое течение металла при высоких скоростях деформирования : Автореф. дис. ... докт. техн. наук.— Минск, 1974.— 42 с.
23. *Беляев Ю. П., Витевский В. И., Смеляков Е. П.* Интенсификация электрогидроимпульсной штамповки с помощью концентраторов силового поля.— Кузнеч. штампов. пр-во, 1976, № 8, с. 10—12.
24. *Блинов Ш. Л.* Особенности разделительных операций при использовании оснастки с применением полиуретана.— Кузнеч. штампов. пр-во, 1976, № 11, с. 18—20.
25. *Бодяко М. Н., Астапчик С. А.* Электротермообработка сплавов с особыми свойствами.— Минск : Наука и техника, 1977.— 256 с.
26. *Бриф В. М.* Некоторые вопросы технологии развальцовки труб с ограничением крутящего момента.— В кн.: Методы крепления труб в трубных решетках теплообменников. Волгоград : Ниж.— Волж. ЦНТИ, 1970, вып. 3, с. 29—46.
27. *Вудович В. Л., Кужекин И. П.* Расчет импульса напряжения при электрическом взрыве проводников.— Электричество, 1975, № 1, с. 22—26.
28. *Высокоскоростное деформирование металлов / Пер. с англ. под ред. А. Н. Шахназарова.*— М. : Машиностроение, 1966 г.— 176 с.
29. *Гаманович В. И., Стрельцов В. А.* Взаимодействие ударной волны с преградой конечной толщины.— В кн.: Электрический разряд в жидкости и его применение. Киев : Наук. думка, 1977, с. 55—60.
30. *Гидровзрывная штамповка элементов судовых конструкций / В. Г. Степанов, П. М. Сипилин, Ю. С. Навагин, В. П. Панкратов.*— Л. : Судостроение, 1966.— 292 с.
31. *Глазков В. И.* Раздача трубчатых заготовок резиной с осевым подпором.— Кузнеч.-штампов. пр-во, 1969, № 10, с. 18—19.
32. *Глазков В. И., Ковалев А. Д., Савченко Е. Н.* Влияние схемы напряженного состояния на предельно-допустимые деформации при раздаче тонкостенных труб.— Кузнеч.-штампов. пр-во, № 4, 1976, с. 24—26.
33. *Головлев В. Д.* Расчеты процессов листовой штамповки.— М., Машиностроение, 1974.— 135 с.
34. *Гольдсмит В.* Удар и контактные явления при средних скоростях.— В кн.: Физика быстротекающих процессов.— М. : Мир, 1971, 2, с. 153—201.
35. *Горохович А. И.* О применении эластичных диафрагм в разрядных камерах электрогидроимпульсных прессов.— Кузнеч.-штампов. пр-во, 1976, № 8, с. 29—30.

36. *Горохович А. И.* Оборудование для электрогидравлической штамповки.— Кузнеч.-штамп. пр-во, 1974, № 3, с. 44—45.
37. *ГОСТ 18831—73.* Технологичность конструкций. Термины и определения.— М. : Госком. стандартов С. М. СССР, 1973.— 12 с.
38. *ГОСТ 18970—73.* Обработка металлов давлением. Операции ковки и штамповки. Термины и определения.
39. *Грабин В. Ф.* Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов.— Киев : Наук. думка, 1974.— 262 с.
40. *Гуляев А. П., Шигарев А. С.* Образование мартенсита при больших скоростях деформирования.— Физика металлов и металловедение, № 10, вып. 5, 1960, с. 691—697.
41. *Гулый Г. А.* Пути развития электрогидроимпульсной обработки металлов давлением.— Кузнеч.-штамп. пр-во, 1976, № 8, с. 2—3.
42. *Гулый Г. А., Малюшевский П. П.* Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах.— Киев : Наук. думка, 1977.— 177 с.
43. *Гурьев А. В., Кукса Л. В.* К вопросу об оценке уровня микронеоднородной деформации металлов, измеренной на разных базах.— В кн.: Металловедение и прочность металлов.— Волгоград : Тр. Волгоград. политехн. ин-та, 1972, с. 18—24.
44. *Давыдов Ю. П., Покровский Г. В.* Листовая штамповка легированных сталей и сплавов.— М. : Оборонгиз, 1962.— 200 с.
45. *Деформация металлов взрывом / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, Н. И. Шефтель, А. Г. Кобелев.*— М. : Металлургия, 1975.— 416 с.
46. *Елисеев В. И.* Взрывная штамповка метанием передающей среды.— Кузнеч.-штамп. пр-во, 1973, № 1, с. 20—21.
47. *Жуковский М. Е.* О гидравлическом ударе в водопроводных трубах : Избр. соч., 2 — М. Л. : Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1948, с. 3—78.
48. *Зорин В. Я.* Процессы листовой штамповки взрывом с совмещением операций.— Кузнеч.-штамп. пр-во, № 7, 1977, с. 24—26.
49. *Зубцов М. Е.* Листовая штамповка.— Л. : Машиностроение, 1967.— 504 с.
50. *Исаченков Е. И.* Развитие технологии штамповки эластичными, жидкостными и газовыми средами.— Кузнеч.-штамп. пр-во, № 7, 1976, с. 2—5.
51. *Исаченков Е. И.* Штамповка резиной и жидкостью.— М. : Машиностроение, 1967.— 357 с.
52. *Исследования величины теплового эффекта при горячем прессовании некоторых сплавов / Л. В. Прозоров, Н. И. Пищулин, В. А. Совкин, Г. Г. Бескровный.*— Кузнеч.-штамп. пр-во, 1966, № 4, с. 7—11.
53. *Исследование влияния импульсной вибрации на деформирование металла / Л. Е. Басовский, А. Д. Васин, Б. М. Горячев и др.*— В кн.: Технология машиностроения : Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула : Тул. политех. ин-т, вып. 35, с. 107—116.
54. *Исследование операций электрогидроимпульсной листовой штамповки / В. Н. Чачин, В. Л. Шадуя, Г. Н. Здор и др.*— Кузнеч.-штамп. пр-во, № 8, 1976, с. 8—9.
55. *Исследование процесса деформирования заготовки в закрытых камерах методом электродинамической аналогии (ЭГДА) / В. К. Борисевич, С. Н. Кулиш, В. Г. Касьян, А. Н. Потапенко.*— В кн.: Импульсная обработка металлов давлением. Киев : Наук. думка, 1978, с. 87—91.
56. *Исследование процесса локальной электрогидроимпульсной вытяжки на прессах малых энергий / К. Е. Богоявленский, Б. Я. Мазуровский, К. К. Мартенс и др.*— Кузнеч.-штамп. пр-во, 1976, № 8, с. 6—8.
57. *Ищенко Ж. Н., Гуляева Л. Ю.* Исследование подводного электрического взрыва проволок спиральной формы.— Электрон. обработка материалов, 1979, № 2, с. 53—58.
58. *Кварцхава И. Ф., Плютто А. А., Бондаренко В. В.* Электрический взрыв металлических проволок. Журн. эксперимент. и теорет. физики, 1956, 30, № 1, с. 42—53.
59. *Колобнев И. Ф.* Термическая обработка алюминиевых сплавов.— М. : Металлургия, 1972.— 552 с.
60. *Комаров А. Д.* Штамповка деталей из листовых и трубчатых заготовок эластичной средой.— Кузнеч.-штамп. пр-во, 1976, № 7, с. 5—9.
61. *Комаров А. Д., Татько Е. М.* Применение полиуретана в штампах : — Кузнеч.-штамп. пр-во, 1969, № 3, с. 15—19.
62. *Коротков В. А., Несветайлов Г. А.* О форме импульса сжатия при электрическим взрыве в воде.— Физика горения и взрыва, 1970, № 2, с. 250—252.
63. *Кривицкий Е. В.* Исследование влияния продуктов взрыва проводников на характер выделения энергии при высоковольтном разряде в жидкости.— Электрон. обработка материалов, 1973, № 2, с. 68—71.
64. *Кривицкий Е. В., Шамко В. В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев : Наук. думка, 1979.— 208 с.
65. *Кривицкий Е. В., Шолом В. К.* О приближенном подобии электрических характеристик подводного взрыва проводников.— Журн. технич. физики, 1974, 44, № 6, с. 1271—1276.
66. *Кривицкий Е. В., Шамко В. В., Апостоли В. Л.* Оценка энергетических параметров канала подводного искрового разряда. Электронная обработка материалов, 1971, № 5, с. 48—50.
67. *Крино Н. И.* Раздача трубчатых заготовок энергией гидравлического удара.— В кн.: Импульсные методы обработки металлов. Минск : Наука и техника, 1979, с. 97—103.
68. *Мазуровский Б. Я.* Влияние теплового эффекта на горячую штамповку алюминивно-магниевого сплава.— В кн.: Обработка металлов давлением. Тула : Тул. политех. ин-т, 1971, с. 180—197.
69. *Мазуровский Б. Я.* Исследование температурно-силового режима горячей штамповки алюминивно-магниевого сплава.— Дис. канд. техн. наук.— Тула, 1970.— 185 с.
70. *Мазуровский Б. Я.* Особенности электрогидроимпульсной раздачи и запрессовки труб в трубных решетках теплообменных аппаратов.— Кузнеч.-штамп. пр-во, 1979, № 11, с. 13—15.
71. *Мазуровский Б. Я.* Перспективы развития электрогидроимпульсной обработки металлов давлением.— В кн.: Электрогидроимпульсная обработка металлов давлением. Киев : Наук. думка, 1979, с. 3—14.
72. *Мазуровский Б. Я.* Пути совершенствования технологии и оборудования электрогидроимпульсных процессов обработки металлов давлением.— Кузнеч.-штамп. пр-во, 1978, № 8, с. 12—21.
73. *Мазуровский Б. Я.* Тепловой эффект при импульсном деформировании.— Кузнеч.-штамп. пр-во, 1979, № 8, с. 12—16.
74. *Мазуровский Б. Я.* Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов.— Киев : Наук. думка, 1980.— 172 с.
75. *Мазуровский Б. Я., Басовский Л. Е.* Торможение развития очагов разрушения в кристаллических материалах периодической волной механических напряжений.— В кн.: Электрический разряд в жидкости и его применение. Киев : Наук. думка, 1977, с. 61—66.
76. *Мазуровский Б. Я., Иванов А.—Г. Г., Никонова Л. Н.* Электрогидравлическая установка для штамповки и развальцовки.— Технология судостроения, 1972, № 2, с. 44—45.
77. *Мазуровский Б. Я., Панкова Л. С.* Универсальный блок для вытяжки обтекателей.— Кузнеч.-штамп. пр-во, № 9, 1969, с. 41—42.
78. *Мазуровский Б. Я., Школьников В. А.* Устойчивость заготовки при вы-

- тяжке.— В кн.: Разрядноимпульсная технология. Киев : Наук. думка, 1978, с. 98—106.
79. *Мазуровский Б. Я., Школьников В. А., Старков Н. В.* К расчету гидромеханических механизмов прижима прессов для электрогидравлической штамповки.— Кузнеч.-штампов. пр-во, № 3, 1975, с. 12—14.
 80. *Мазуровский Б. Я., Юшанцева Т. В., Волочинская Л. М.* Влияние импульсных нагрузок на свойства алюминиево-магниевого сплава.— Кузнеч.-штампов. пр-во, № 7, 1971, с. 19—21.
 81. *Медзяновский Э. Б.* О самоваре.— Изобретатель и рационализатор, 1977, № 12, с. 20—21.
 82. *Методика* определения массы заряда при взрывной штамповке металлом передающей среды / В. К. Борисевич, В. И. Елисеев, В. И. Исаенко и др.— В кн.: Импульсная обработка металлов давлением. М., Машиностроение, 1977, с. 96—102.
 83. *Механизм* квазистатического давления при электрогидравлической штамповке / В. Н. Чачин, Л. И. Санкович, В. А. Крылевский, Ю. Е. Шарин.— Вестн. АН БССР, 1973, № 2, с. 10—16.
 84. *Мещанчук П. А.* Исследование пластичности и сопротивления деформированию сталей Р6МЗФ2 и Р12 при больших скоростях нагружения.— Кузнеч.-штампов. пр-во, № 10, 1969, с. 5—7.
 85. *Миркин Л. И.* Физические основы прочности и пластичности.— М.: Изд-во МГУ, 1968.— 538 с.
 86. *Мошнин Е. Н.* Технология штамповки крупногабаритных деталей. М., Машиностроение, 1973.— 240 с.
 87. *Наугольных К. А., Рой Н. А.* Электрические разряды в воде.— М.: Наука, 1971.— 155 с.
 88. *Оборудование* и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Под ред. Г. А. Гулого.— М.: Машиностроение, 1977.— 320 с.
 89. *Обработка* металлов давлением на электрогидроимпульсных прессах и установках / Б. Я. Мазуровский, Л. М. Волочинская, А. С. Шкатов, В. А. Школьников.— Вестн. АН УССР, № 11, 1977, с. 59—68.
 90. *О выборе* режимов электрического взрыва для синтеза плотных модификаций углерода / А. И. Вовченко, В. В. Шамко, П. П. Малюшевский, Л. П. Трофимова.— В кн.: Электрогидроимпульсная обработка металлов давлением. Киев : Наук. думка, 1979, с. 91—103.
 91. *Определение* кинематических и силовых параметров гидроудара / В. Н. Чачин, Г. К. Седяко, Т. Н. Наумович.— В кн.: Импульсные методы обработки материалов. Минск : Наука и техника, 1977, с. 87—99.
 92. *Очертин В. Н.* Исследование электрических взрывов проволочек, используемых в импульсных устройствах : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Львов, 1973.— 19 с.
 93. *Плакирование* стали взрывом / Под ред. А. С. Гельмана.— М.: Машиностроение, 1978.— 191 с.
 94. *Поляков Ю. Л.* Опыт вытяжки параболической детали с применением складкодержателя с конической поверхностью.— Кузнеч.-штампов. пр-во, № 4, 1975, с. 43—44.
 95. *Попов Е. А.* Допустимые коэффициенты отбортовки. Вестник машиностроения, 1951, № 3, с. 44—46.
 96. *Правила* технической эксплуатации электроустановок-потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок-потребителей.— М.: Атомиздат, 1971.— 352 с.
 97. *Применение* электрогидроимпульсной обработки для снижения остаточных напряжений в сварных соединениях / В. М. Кудинов, В. Г. Петушков, В. С. Опара, Б. Я. Мазуровский, А. И. Дремлюга.— Автоматическая сварка, 1977, № 1, с. 43—44.
 98. *Расчет* заземлителей подстанций по допустимому сопротивлению растекания / А. А. Воронина, Б. Г. Меньшов, Д. В. Розевич, Е. Я. Рябова. Электрические станции. 1970, № 2, с. 59—65.
 99. *Рева Л. С., Турчин С. П., Краснокаутский А. М.* Штамповка деталей типа полуторов из нагретых заготовок металлом передающей среды.— В кн.: Импульсная обработка металлов давлением, вып. 7. Харьков : ХАИ, 1978, с. 84—86.
 100. *Романовский В. П.* Справочник по холодной листовой штамповке.— Л.: Машиностроение, 1973.— 782 с.
 101. *Сизев А. Н., Саенко В. А., Цветков А. В.* О схемах штамповки на электрогидроимпульсных прессах.— Кузнеч.-штампов. пр-во, 1980, № 6, с. 25—26.
 102. *Скворцов Г. Д.* Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. М., Машиностроение, 1972.— 359 с.
 103. *Сорокин В. В.* Исследование некоторых особенностей вытяжки на электрогидравлических прессах.— В кн.: Электрический разряд в жидкости и его применение. Киев : Наук. думка, 1977, с. 104—109.
 104. *Сорокин В. В.* Экспериментальная работа на прессе «Удар-12М». Кузнеч.-штампов. пр-во, 1976, № 2, с. 47.
 105. *Старков Н. В., Черушев В. В., Саенко В. А.* Электрогидроимпульсный пресс Т1223.— Кузнеч.-штампов. пр-во, № 8, 1976, с. 25—26.
 106. *Старков Н. В., Школьников В. А., Цветков А. В.* Разрядная головка для электрогидроимпульсных прессов.— Кузнеч.-штампов. пр-во, 1975, № 8, с. 26—28.
 107. *Сторожев М. В., Попов Е. А.* Теория обработки металлов давлением.— М.: Машиностроение, 1971.— 424 с.
 108. *Сторожев М. В., Середин П. И., Қирсанова С. Б.* Технологияковки и горячей штамповки цветных металлов и сплавов.— М.: Высш. школа. 1961.— 350 с.
 109. *Теоретические* основыковки и горячей штамповки / Е. М. Макушок, А. С. Матусевич, В. П. Северденко, В. М. Сегал.— Минск : Наука и техника, 1968.— 480 с.
 110. *Тетерин П. К., Манегин Ю. В., Тараненко Г. И.* Изменение температуры металла при горячем прессовании сталей и сплавов.— Кузнеч.-штампов. пр-во, 1969, № 2, с. 8—11.
 111. *Ураков В. Ф.* О применении термопар для измерения температуры в металле при его пластическом деформировании с повышенными скоростями.— В кн.: Машины и технология обработки металлов давлением / Под ред. А. И. Зимина. М.: Машиностроение, 1961, с. 167—178.
 112. *Финкель В. М.* Физика разрушения.— М.: Металлургия, 1970.— 376 с.
 113. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов.— М.: Мир, 1972.— 480 с.
 114. *Чачин В. Н.* Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов.— Минск : Наука и техника, 1978.— 184 с.
 115. *Чачин В. Н., Марченко И. И.* К расчету энергии формообразования при гидроударной пробивке отверстий. № 1266—76. Деп. УДК 621.983.044, Минск, ВИНТИ, 1976.
 116. *Чачин В. Н., Рахуба В. К., Столович Н. Н.* Исследование скорости деформации трубчатых деталей при их электровзрывной раздаче.— Вестн. АН БССР, 1973, № 2, с. 79—81.
 117. *Чачин В. Н., Шадуя В. А.* Исследование предельных технологических параметров процесса формовки плоских заготовок в полную матрицу, № 1272—76. Деп. УДК 621.983.044, Минск, ВИНТИ, 1976.
 118. *Чейс В.* Взрывающиеся проволочки: Крат. обзор исслед. по взрывающ. проволочкам.— М.: Изд-во иностр. лит., 1963.— 431 с.
 119. *Черушев В. В., Литвиненко И. М.* Электрогидроимпульсный пресс «Удар-16К».— Технология и организация пр-ва, 1978, № 1, с. 33.

120. Черушев В. В., Ткаченко А. К. Электрогидроимпульсная установка «Удар-17». — Технология и организация пр-ва, 1979, № 4, с. 22.
121. Шамко В. В. Исследование условий выбора оптимальных параметров разрядного контура. — В кн.: Разрядноимпульсная технология. Киев: Наук. думка, 1978, с. 21—28.
122. Шамарин Ю. Е., Попов В. К., Сорокин В. В., Воронков В. С. Опыт внедрения электрогидравлической штамповки. — Технология судостроения, 1979, № 8, с. 82—83.
123. Шкатов А. С., Родин Е. М., Волочинская Л. М. Электрогидравлическая калибровка сварных оболочек. — Кузнеч.-штамп. пр-во, 1976, № 8, с. 4—5.
124. Шофман Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. — М.: Машиностроение, 1964. — 375 с.
125. Штамповка взрывом. Основы теории / Под ред. М. А. Анучина. — М.: Машиностроение, 1972. — 152 с.
126. Электрогидроимпульсная формовка. Сообщение 3. Машина «Симадзу» модели SF-45 для электрогидравлической формовки и примеры из практики ее использования / М. Косака и др. «Симадзу Херон», 1967, 24, № 1, с. 45—55. ВИНТИ № 84675/0. — 44 с.
127. Эпштейн Г. Н., Кайбышев О. А. Высокоскоростная деформация и структура металлов. — Л.: Металлургия, 1971. — 113 с.
128. Эффективность импульсного нагружения для правки тонкостенных сварных конструкций электрогидроимпульсным методом. / В. И. Махненко, В. М. Шекера, Н. Н. Фортунатова и др. — Автоматическая сварка, 1980, № 5, с. 8—12.
129. Юткин Л. А. Электрический эффект. — М.: Машгиз, 1955. — 51 с.
130. Якобе А. И. Метод расчета сопротивления растеканию сложных заземлителей с помощью коэффициентов использования. — Электричество, 1968, № 5, с. 38—44.
131. Якобе А. И. Применение многослойных электрических структур земли к эквивалентным двухслойным при расчете сложных заземлителей. — Электричество, 1970, № 8, с. 19—22.
132. Якобе А. И., Коструба С. И., Сутин А. Г. Эксплуатация заземления сельских электроустановок. — М.: Колос, 1969. — 171 с.
133. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 313 с.
134. Bennet F. D. High — temperature exploding wires — progress in temperature physics and chemistry. Oxford, London, 1968, v. 2, p. 1—63.
135. Electrohydraulic metal working — Tooling and production. 1968, 34, N 5, p. 65—68.
136. Fukui S., Yoshida K., Kobayashi S. Steel Metal Forming Research in Japan. — Trans. ASME, 1966, N 1, p. 101—103.
137. Lockheed Georgia Puts EDE — EMF to Work. — Machinery, 1965, N 71, p. 122—123.
138. Sandford J. E. Recent Advances Stir Interest in High Velocity Forming. Iron Age Metallworking Internat., 1970, 9, N 10, p. 36—39.
139. Schenk Karl — Heinz, Igel Hans, Effenberger Georg, Währensimmel Hans. Ziehring zum Niederhalterlosen Tiefziehen, Пат. ГДР, кл. 7с 22/20 (B21d 22/20), № 96163, 1973.
140. Tokita M. Technical paper of hydro — spark forming method for industrial use, Japax inc., Tokyo, Japan. — 137 p.
141. Van Cleave David, Reid Marvin. High — energy forming technigues improves parts at reduced costs. Product Engineering, December 21, 1970, p. 25—26.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава	
первая. Основы физики электрогидроимпульсной штамповки	8
1. Сущность электрогидравлического эффекта	8
2. Механизм нагружения заготовки при электрогидроимпульсной штамповке	13
3. Деформирование ударными волнами	18
4. Нагружение заготовки квазистатическим давлением	20
5. Нагружение метанием жидкости и метанием заготовки	24
6. Сопротивление импульсному деформированию	32
7. Тепловой эффект при импульсном деформировании	37
8. Волны механических напряжений при импульсном деформировании	48
Глава	
вторая. Технологические особенности электрогидроимпульсной штамповки	55
1. Особенности технологии	55
2. Технологичность листовых деталей	58
3. Устойчивость заготовки при вытяжке	67
4. Экономическая эффективность электрогидроимпульсной штамповки	74
5. Перспективы развития технологии	77
Глава	
третья. Технологические расчеты при разработке процесса электрогидроимпульсной штамповки	81
1. Основные этапы	81
2. Расчет размеров заготовки	81
3. Оценка степени деформации	87
4. Определение давления и энергии в импульсе	93
5. Выбор типоразмера оборудования и расчет трудоемкости процесса штамповки	98
Глава	
четвертая. Оборудование электрогидроимпульсной листовой штамповки	101
1. Особенности оборудования	101
2. Универсальные электрогидроимпульсные прессы и установки	107
3. Специализированные электрогидроимпульсные прессы и установки	113
4. Комбинированное оборудование	118
5. Электродные устройства	119
6. Генераторы импульсных токов	128
7. Устройства, обеспечивающие безопасность работы	131
8. Пути совершенствования конструкций электрогидроимпульсного оборудования	133

Глава		
пятая.	Технологическая оснастка	137
	1. Особенности оснастки	137
	2. Оснастка для штамповки крупногабаритных деталей из листовых заготовок	139
	3. Оснастка для вытяжки	141
	4. Оснастка для рельефной формовки	150
	5. Оснастка для разделительных операций	154
	6. Оснастка для раздачи деталей из трубчатых заготовок	160
	7. Испытание, доводка оснастки и отработка технологии	166
Глава		
шестая.	Монтаж, наладка и эксплуатация оборудования	169
	1. Общие требования к помещениям и размещению электрогидроимпульсных прессов. Монтаж и испытание	169
	2. Организация рабочего места оператора. Требования к обслуживаемому персоналу. Условия безопасной работы	174
	3. Техническое обслуживание в процессе эксплуатации электрогидроимпульсных прессов и установок	178

Борис Яковлевич Мазуровский
Анатолий Николаевич Сизёв

**ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ
ЭФФЕКТ
В ЛИСТОВОЙ
ШТАМПОВКЕ**

*Утверждено к печати
ученым советом
Проектно-конструкторского бюро
электрогидравлики АН УССР*

Редактор Н. И. Сухомлинская
Художественный редактор И. Т. Лагутин
Технический редактор С. Г. Максимова
Корректоры Р. С. Коган, И. В. Точаненко

Информ. бланк № 5856

Сдано в набор 27.12.82. Подп. в печ. 25.08.83. ЕФ 00733. Формат 84×108^{1/32}. Бумага типогр. № 1. Лит. гарн. Выс.печ. Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт 10,4. Уч.-изд л. 11,42. Тираж 1150. экз. Зак. 2—3104. Цена 1 руб 70 коп.

Издательство «Наукова думка». 252601 Киев 4, ул. Репина, 3.

Изготовлено Нестеровской городской типографией, г. Нестеров, Львовской обл., ул. Горького, 8, с матриц Головного предприятия РПО «Полиграф-книга», 252057, Киев-57, Довженко, 3. Зак. № 3807.