

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РСФСР ПО ДЕЛАМ НАУКИ
И ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

А. А. Дудин Е. П. Смеляков Г. М. Лебедев

ТЕХНОЛОГИЯ ВЗРЫВНОЙ
ШТАМПОВКИ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ

Конспект лекций

УДК 621.98.044.629.07

Технология взрывной штамповки в производстве летательных аппаратов: Конспект лекций / А. А. Дудин, Е. П. Селяжков, Г. М. Лебедев; Куйбышев. авиац. ин-т. Самара, 1991. 74 с. ISBN 5—230—16888—9

Отражены основные материалы по новому способу изготовления деталей летательных аппаратов штамповкой взрывом. Описаны сущность и физические основы процесса; рассмотрены конструктивно-технологические особенности деталей, рекомендуемых для изготовления взрывной штамповкой; дана методика разработки технологических процессов; приведены сведения о технологической оснастке, специализированном оборудовании; отмечены особенности организации рабочих мест, требования по планировке участков и мероприятия по обеспечению охраны труда при взрывной штамповке деталей летательных аппаратов.

Работа подготовлена на кафедре «Производство летательных аппаратов». Предназначена для студентов авиационных вузов спец. 1301, 1306 дневной и вечерней форм обучения, а также слушателей ФПК соответствующих отраслей промышленности.

Табл. 15. Ил. 28. Библиогр.: 28 назв

Печатается по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королева

Под редакцией д-ра техн. наук, проф. В. А. Барвицка

Рецензенты: В. С. Иванов, В. Ф. Лычев

ISBN 5—230—16888—9

© Куйбышевский авиационный институт, 1991

Применение в обработке металлов взрывчатых веществ (ВВ) непрерывно возрастает. С помощью взрыва можно создавать давление в широком диапазоне — от единиц до десятков тысяч меганаскалей. Высокие давления позволяют изменять условия деформирования металлов и их свойства, в связи с чем возникает возможность деформировать многие высокопрочные материалы, труднодеформируемые или не поддающиеся обработке давлением при обычных скоростях и усилиях деформации с высокой точностью.

Специфика ВВ, используемых при штамповке в качестве энергоносителя, позволяет формообразовывать детали практически без ограничения габаритных размеров и толщины из листовых, трубчатых, профильных заготовок, а также из нафельно-оробренных монолитных полуфабрикатов, что дает возможность получать изделия с меньшим числом стыков и разъемов, меньшей протяженностью сварных швов, повышенным ресурсом и надежностью. Процесс позволяет за один прием совместить несколько операций, необходимых для изготовления сложных деталей, например вытяжка, формовка локальных рельефов (рифтов, пуклевок), пробивка отверстий.

Реализация процесса связана с использованием части штампа-матрицы. Функции пуансона выполняет передающая среда, в которой происходит взрыв заряда, что упрощает оснастку, снижает, следовательно, трудоемкость и стоимость ее изготовления. Осуществление взрывной штамповки связано со значительным снижением затрат на оборудование. Установки для этой цели почти в 40 раз дешевле, чем прессы такой же мощности. Листовая штамповка взрывом выгодна при изготовлении не только крупногабаритных изделий, но и изделий средних и малых габаритов. В сравнении с другими процессами импульсного формообразования она характеризуется наибольшей способностью, применимостью в полевых и аэродромных условиях, легкостью создания энергетических запасов и длительностью их хранения. Все это имеет особое значение для авиационной промышленности с частой сменой объектов производства и малой их серийностью.

К недостаткам, ограничивающим применение метода, следует отнести невозможность в ряде случаев ведения процесса в обычном производственном здании. Для круглогодичного ведения работ необходимо иметь закрытые помещения. Взрыв порождает сейсмические волны, поэтому здание должно быть достаточно удалено от жилых и производственных сооружений. Кроме того, бризантные ВВ принадлежат к боевым, и их применение требует выведения строгих правил техники безопасности. Создается определенный психологический барьер — боязнь применения ВВ в технологии.

Относительно большое время подготовительных работ на операциях штамповки и сложность механизации затрудняют применение штамповки взрывом при изготовлении большого количества деталей, что характерно для крупносерийного производства. Имеется и ряд технологических трудностей при введении этого процесса: нельзя устранить неравномерность прижатия заготовки больших размеров, снижается сопротивляемость к потере устойчивости и изменяется характер напряженного состояния.

Многие из недостатков уже преодолены. Большие же преимущества штамповки взрывом по сравнению с традиционными методами штамповки на прессах свидетельствуют о перспективности метода, его больших производственных возможностях.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ

Известные методы использования энергии ВВ для штамповки деталей из листа можно классифицировать по виду энергоносителя (горючие газовые смеси, пороха и БВВ) и способу передачи кинетической энергии от заряда заготовке (непосредственное воздействие через воздух, воду или другую жидкость, через сыпучие материалы, воздействием на поршень, соединенный с формующим инструментом, воздействием на поршень и от него через жидкость на заготовку).

В табл. 1.1 приведена классификация процессов штамповки в зависимости от вида энергоносителя, способа передачи давления на заготовку и вида заготовки.

Штамповка взрывом газовых смесей. Этот метод применяется для изготовления деталей из легкодеформируемых материалов, когда требуются сравнительно невысокие давления. В качестве энергоносителя чаще всего используют горючие газы; из них наиболее подходящими считают смеси воздуха или кислорода с водородом или с ацетиленом, пропан-бутаном и метаном. Энергетические возможности этого метода ниже по сравнению с другими методами, но он отличается своей простотой, дешевизной и безопасностью, низкой стоимостью энергоносителя, обеспечивает равномерное распределение давления на штампуемую заготовку, а также позволяет регулировать его с заданным нарастающим и снижением.

В табл. 1.1 (поз. 1, 2, 3, 11, 12) представлены три принципиальных схемы штамповки взрывом горючими смесями.

В первой схеме (поз. 1, 11) давление газов передается на заготовку через воду. При деформации по этой схеме давление на поверхности заготовки распределяется равномерно, что создает возможность получения деталей с незначительной разнотолщиной. *Во второй схеме* (поз. 2, 12) продукты газовой детонации действуют непосредственно на заготовку. Скорость деформирования при этом максимальная и достигает 60 м/с. *В третьей схеме* (поз. 3) давление на заготовку передается через систему поршень—вода.

Классификация процессов штамповки [1]

Материалы и назначение	Через что на заготовку	Вид заготовки	
		Плоская	Пространственная
Газовые смеси (а) горючие газы, б) кислород	Через жидкость	1	11
	Непосредственно	2	12
	Через паровую воду	3	—
Порошки	Непосредственно	4	13
	Через жидкость	5	14
	Через инструмент	6	15
ВВ	Непосредственно	7	—
	Через воздух	8	16
	Через жидкость	9	17
	Через сыпучую среду	10	18

Штамповка порохом Непосредственное воздействие давления пороховых газов (табл. 1.1, поз. 4,13) применяют в основном для раздачи и калибровки полых деталей из заготовок цилиндрической, конической и бочкообразной формы. Формоизменение осуществляется в разъемной матрице, причем заряд пороха, размещенный внутри полой заготовки, оказывается в замкнутом объеме, ограниченном стенками заготовки и заглушками, закрывающими оба ее торца. По этой схеме более полно используется энергия пороховых газов.

Большое распространение получила штамповка с использованием давления пороховых газов через передающую среду, которой обычно является вода (табл. 1.1, поз. 5,14). Наличие между зарядом пороха и заготовкой упругой передающей среды способствует более равномерному распределению давления на заготовке в процессе штамповки и предохраняет поверхности металла от повреждения и загрязнения пороховыми газами. Скорость деформирования по этой схеме возрастает плавно и составляет 1,5...3 м/с.

В табл. 1.1 (поз. 6,15) приведена схема, в которой энергия пороховых газов используется для привода движущихся частей штамповочного пресса. Изменяя объем камеры сгорания, можно регулировать скорость и давление воздействия газов на заготовку.

Наибольшее применение в отечественной промышленности получили установки на пороховом энергоносителе, называемые *пресс-пушками*. В этих установках под действием пороховых газов снаряд, разогнанный до большой скорости в стволе, ударяет по жидкости, находящейся в переходнике. При этом кинетическая энергия движущегося снаряда сообщается жидкости, которая осуществляет деформирование заготовки. В Харьковском авиационном институте разработаны различные конструкции пресс-пушек, работающих в полуавтоматическом режиме и нашедших применение в авиационной промышленности.

Штамповка БВВ. Использование позволяет при штамповке взрывом в качестве энергоносителя БВВ позволяет обрабатывать толстостенные детали очень больших размеров из высокопрочных материалов. При выборе типа БВВ учитывают форму и размеры обрабатываемой детали, а также прочностные свойства материала. Применяют порошкообразные, пластичные и прессованные заряды ВВ различной формы. Схемы штамповки БВВ приведены в табл. 1.1 (поз. 7—10, 16—18).

Заряд можно располагать непосредственно на заготовке (контактные операции) или на некотором расстоянии от нее (дистанционные операции). При контактных операциях (табл.

1.1, поз. 7) на поверхности заготовки развиваются давления до 15... 20 ГПа [16, 20].

Необходимую степень деформации можно получить, изменяя толщину заряда БВВ. Контактные операции применяют главным образом для разделительных операций: вырубка, пробивка и резка толстых плит.

Наиболее распространена штамповка с применением дистанционных операций. При этом в качестве передающей среды используют воздух, жидкость или сыпучие материалы. Давление, передаваемое на заготовку, а следовательно, и степень деформации зависят от типа ВВ, массы и формы заряда, расстояния от заряда до заготовки и от свойств передающей среды.

При использовании в качестве передающей среды воздуха (табл. 1.1, поз. 8,16) давление на заготовку вследствие его малой плотности меньше, чем при использовании жидкости (табл. 1.1, поз. 9,17) или сыпучего материала (табл. 1.1, поз. 10, 18). Воздух в качестве передающей среды применяют для получения местных деформаций. Для этой цели выбирают сферические заряды в сочетании со специальным отражателем, концентрирующим и направляющим ударную волну на определенный участок заготовки.

Наибольший практический интерес представляют схемы с более плотной передающей средой, так как обеспечивают более равномерное распределение давления по поверхности заготовки.

Обычно в качестве жидкой передающей среды используют воду, которая предотвращает проникновение продуктов взрыва в заготовку и уменьшает звуковой эффект. Сыпучие передающие среды (песок, металлические порошки и др.) обычно применяют при формовке и калибровке с подогревом заготовки.

Одной из перспективных является схема штамповки взрывом, в которой передача давления заготовке осуществляется посредством металла передающей среды (рис. 1.1) [8]. При штамповке по данной схеме энергия ударной волны и расширяющихся продуктов детонации сообщается передающей среде и разгоняет ее до определенной скорости. При соударении передающей среды с заготовкой возникает давление, производящее деформацию.

Штамповка металлом передающей среды обладает рядом достоинств, основные из которых следующие



Рис. 1.1. Схема штамповки металлом передающей среды: 1—основание, 2—прижим, 3—матрица, 4—заготовка, 5—заряд, 6—защитный слой, 7—крепление

щие: возможность регулирования нагрузки изменением массы передающей среды, улучшение условий работы оснастки благодаря тому, что элементы штампа не нагружаются интенсивной ударной волной; возможность эксплуатации установки в цеховых условиях; возможность осуществления штамповки с нагревом заготовки с применением жидкой передающей среды. Данный способ можно применять для формовки толстолистовой заготовки, раздачи трубчатых заготовок, калибровки.

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ

1.2.1. Источники энергии

Газовые смеси. Горючие газовые смеси отличаются с высоким энергосодержанием. Так, теплотворная способность газовой смеси пропана с кислородом составляет 2400, метана с кислородом — 2660 и водорода с кислородом — 3230 ккал/кг.

Химическое превращение газовых смесей происходит по двум основным режимам — нормальное горение и газовая детонация. В режиме нормального горения скорость распространения пламени сравнительно невелика и колеблется от нескольких десятков сантиметров в секунду для смесей горючего газа с воздухом до 10 ... 12 м/с для смесей горючего газа с кислородом. Если процесс горения газовой смеси происходит в камере с замкнутым постоянным объемом, то давление в ней по мере протекания реакции повышается и достигает максимальной величины, приближенно определяемой по формуле термодинамики для изохорического процесса

$$p = p_0 (T/T_0), \quad (1.1)$$

где p_0 — начальное давление исходной газовой смеси; T_0 — начальная температура газовой смеси, К; T — температура продуктов горения, К.

Поскольку температура продуктов горения смеси обычно не превышает 3000 К, а начальная температура ~ 300 К, то при исходном давлении, равном атмосферному, давление, получаемое при сгорании смеси внутри замкнутого объема, как правило, не более 1 МПа. Для получения более высокого давления применяют предварительное сжатие газовой смеси. Однако из-за трудности герметизации и усложнения систем уплотнения начальное давление газовой смеси, как правило, не превышает 300 ... 500 кПа, поэтому давление, образующееся при сгорании смеси, обычно составляет не более 5 МПа.

На практике наиболее целесообразным является режим взрывного химического превращения газовой смеси, называемый *газовой детонацией*. При газовой детонации пламя распространяется от слоя к слою со скоростью, превышающей скорость звука. Для появления детонации необходимо возникновение ударной волны, способной поджечь газовую смесь ударным сжатием. Совокупность ударной волны сжатого слоя еще не реагирующей смеси и зоны реакции представляет собой *детонационную волну*. Скорость распространения детонационной волны, как и скорость пламени, превышает скорость звука и достигает для некоторых смесей 3000...3500 м/с. Ударная волна в газовой смеси может инициироваться достаточно сильным электрическим разрядом, взрывом заряда конденсированного ВВ и др. При определенных условиях нормальное горение газовой смеси может перейти в детонацию.

Работы Б. А. Черененикова показали, что для практического применения наиболее пригоден способ получения детонации, разработанный в институте химической физики АН СССР и основанный на предварительном получении детонационной волны в трубке с последующим выпуском этой волны в объем любой формы. Этот способ применяется для деформирования металлов с помощью газообразных энергоносителей.

Давление в детонационной волне с достаточной для практики точностью можно подсчитать по формуле

$$p_d = p_0 + \rho v D, \quad (1.2)$$

где p_d — давление в детонационной волне, p_0 — начальное давление газовой смеси, ρ — начальная плотность газовой смеси, v — скорость продуктов детонации за фронтом волны; D — скорость детонации.

Можно принять, что давление в ударной волне $p = 2 p_d$. Характеристики детонационных волн для некоторых газовых смесей представлены в табл. 1.2.

Расчеты показывают [26], что если начальное давление взрывной смеси во взрывной камере составляет 300...600 кПа, то давление в ударной волне достигает 100...150 МПа. Таким образом, изменение начального давления газовой смеси в рабочей камере установок позволяет регулировать давление ударной волны, действующей на деформируемую заготовку.

Пороха. Различают нитроцеллюлозные (бездымные) и смесевые пороха. Нитроцеллюлозные пороха получают из нитратов целлюлозы, воздействуя на них различными растворителями. Типичными представителями этой группы являются пирокселиновые пороха. Смесевые пороха получают механическим смешиванием окислителей, горючих и связующих веществ. Простейший из таких порохов — дымный порох.

Параметры детонационных волн в газовых смесях [27]

Газовая смесь	T, K	ρ_d/ρ_0	$D, m/s$	
			расчитанная	измеренная
$2H_2 + O_2$	3960	17,5	2630	2819
$CH_4 + 2O_2$	4080	27,4	2220	2257
$2CH_2 + 5O_2$	5570	54,5	3090	2961
$2(H_2 + O_2) + 5O_2$	2600	14,4	1690	1700

Пороха относятся к группе метательных ВВ. Основным видом взрывчатого превращения порохов является горение, переходящее в детонацию, наблюдающуюся у бризантных ВВ. Пороха легко воспламеняются и горят параллельными слоями, что позволяет в широких пределах управлять процессом. Дымный порох воспламеняется в сотни раз быстрее бездымного. Скорость воспламенения порохов больше скорости горения, которая составляет при атмосферном давлении у дымных порохов около 0,01 м/с; у бездымных — от 0,001 до 0,002 м/с, тогда как скорость воспламенения составляет у дымных порохов от 1 до 3 м/с, у бездымных — от 0,002 до 0,005 м/с.

Основными характеристиками порохов являются: объем газообразных продуктов горения 1 кг пороха V , тепловой эффект горения $Q_{\text{гор}}$, сила пороха \bar{j} , коволюм α , скорость горения пороха u при $p = 10^5$ Па, размеры и форма пороха, плотность заряжения λ .

Силой пороха \bar{j} (единица измерения Н·дм/кг) называется работа, которую могли бы совершить газообразные продукты горения 1 кг пороха, расширяясь под атмосферным давлением при нагревании их от 0 °С до температуры горения. Сила пороха определяется формулой

$$\bar{j} = \frac{p_0 V}{273} T, \quad (1.3)$$

где p_0 — атмосферное давление, Па; V — объем газообразных продуктов горения 1 кг пороха, дм³/кг; T — температура горения при постоянном объеме, К.

Коволюм α (единица измерения дм³/кг) — объем, пропорциональный объему молекул газов, образовавшихся при сгорании 1 кг пороха. В расчетах обычно принимают коволюм постоянной величиной, равной 0,001 V .

Скорость горения пороха v_1 при $p = 1$ Па зависит от физико-химических свойств порохов и имеет размерность $\frac{\text{дм/с}}{\text{Н/дм}^2}$.

Величины f , α и v_1 , зависящие от физико-химических свойств пороха, называют *баллистическими характеристиками пороха*.

Плотность заряжания Δ — это отношение массы заряда к объему, в котором происходит горение пороха.

Баллистические характеристики пороха и плотность заряжания определяют наибольшее давление пороховых газов и скорость нарастания давления при сгорании пороха в постоянном объеме (табл. 1.3). Для приближенных расчетов давления, создаваемого в камере сгорания пороховыми газами, можно воспользоваться уравнением

$$p = \frac{f \Delta}{1 - \alpha \Delta} \quad (1.4)$$

Технологические расчеты по использованию порохов в обработке материалов можно сделать на основе положений и формул внутренней баллистики [26].

Таблица 1.3

Баллистические характеристики порохов

Пороха	f , $10^5 \cdot \text{Н} \times$ $\times \text{дм/кг}$	α , $\text{дм}^3/\text{кг}$	v_1 , $10^{-7} \times$ $\times \frac{\text{дм/с}}{\text{Н/дм}^2}$
Пироксилиновые	77...95	0,90...1,1	6... 9
Нитроглицериновые	90...120	0,75...0,85	7...15

Бризантные взрывчатые вещества. БВВ относятся к числу важнейших энергоносителей, применяемых в процессах высокоскоростной металлообработки. Быстрое химическое превращение бризантных веществ, сопровождающееся выделением большого количества тепла и образованием газов, называется *взрывом*. Основными условиями протекания химического превращения в форме взрыва являются экзотермичность процесса, высокая скорость его распространения и образование большого количества паров и газов. Детонация представляет собой стационарную форму взрыва, распространяющегося с постоянной и максимально возможной для ВВ скоростью, превышающей скорость звука в данном веществе. Детонацию БВВ вызывают с помощью специальных детонирующих устройств — *детонаторов*. Современные БВВ выпускаются в виде порошка, прессованных брикетов (шашек), литых зарядов различной формы, пластичных листов и шнуров.

В идеализированной схеме взрыва, идущего со скоростью детонации D (рис. 1.2), по фронту детонации предполагается разрыв непрерывности, при котором впереди фронта неразложившееся взрывчатое вещество имеет исходную температуру T_0 , давление p_0 , плотность ρ_0 и скорость перемещения u_0 . При этом T_0 и p_0 определяются окружающими атмосферными условиями, а $u_0 = 0$.

Скорость детонации D зависит от природы ВВ. Обычно она находится в пределах 2000...8000 м/с. Для одного и того же ВВ скорость D пропорциональна его плотности [20] или

$$D = A \rho_0, \quad (15)$$

где A — коэффициент пропорциональности.

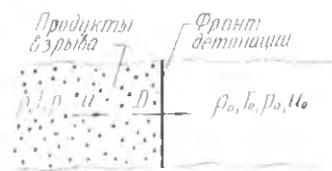


Рис. 1.2. Идеализированная схема детонации

При достаточных размерах заряда постоянной плотности детонация, инициированная в какой-то его точке, распространяется от нее с постоянной скоростью с образованием в неограниченной среде сферического фронта детонации. При плоском заряде на некотором расстоянии от точки инициирования устанавливается цилиндрический фронт. Взрывчатое вещество переходит из твердого состояния в газообразное не мгновенно; граница между исходным и полностью прореагировавшим веществом имеет определенную ширину — ширину зоны реакции. Чем выше скорость детонации ВВ, тем уже зона реакции. Ее ширина колеблется от 2...3 до 20 мм. Если размер заряда соизмерим с шириной зоны реакции, то продукты взрыва, расширяясь в поперечном направлении, могут уносить с собой часть заряда до того, как тот успеет полностью прореагировать. Чем длиннее зона реакции, тем больше эта опасность. В предельном случае, когда размер заряда очень мал, детонация не распространяется из-за рассеяния энергии при механическом уносе значительной части непрореагировавшего ВВ.

Таким образом, при некотором критическом значении диаметра заряда или его толщины $d_{кр}$ детонация становится невозможной, поэтому толщина слоя ВВ при взрывной обработке должна быть существенно больше критической величины.

Максимальное давление определяется свойствами ВВ и металла и не зависит от толщины заряда H , однако с увеличением H растет продолжительность действия давления (рис. 1.3). Давление газов p , развивающееся при взрыве, зависит от скорости детонации и от соотношения плотностей инертного ВВ и продуктов его детонации:

$$\bar{p} = 1.88 \rho_0 D^2. \quad (1.6)$$

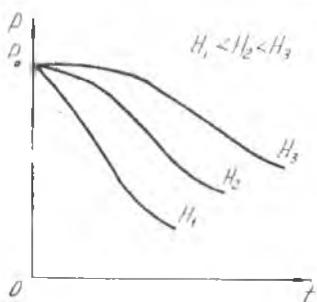


Рис. 1.3. Зависимость давления на металл от времени и толщины заряда [3]

Формула (1.6) основана на предположении, что плотность продуктов взрыва на 30 % выше начальной плотности ВВ.

В контактных операциях на поверхности металлического типа, когда фронт детонации достигает ее, создаются высокие давления и возникает волна напряжений высокой интенсивности. Величина действующих на тело давлений зависит от сочетаний металл — ВВ и от угла падения взрывчатого импульса на поверхность металла. Величину этого давления при нормально падающем фронте детонации можно определить из уравнения

$$p_m = \frac{2p \rho_m c_l}{\rho_m c_l + \rho_0 D}, \quad (1.7)$$

где p_m — давление на поверхности металла; p — давление детонации ВВ; ρ_m — начальная плотность металла; ρ_0 — начальная плотность ВВ; c_l — скорость звука в металле; D — скорость детонации ВВ.

В практике контактных взрывных операций возможно два крайних случая ориентации системы металл — ВВ: когда фронт детонации движется нормально к поверхности металла (нормальное падение) и когда фронт детонации движется в направлении, параллельном поверхности металла (наклонное, под углом 90° , падение). В табл. 1.4 приведены значения давлений, создаваемых при контактном взрыве заряда композиции В 64/36 для этих двух крайних случаев ориентации системы. Данные таблицы показывают, что давление при касательном падении составляет около $1/2$ давления при нормальном падении и его величина зависит от материала.

В дистанционных операциях при нагружении через передающую среду максимальное давление на фронте ударной волны на расстояниях, превышающих $10 r_0$, определяется известной эмпирической зависимостью [12]

$$p_{\max} = A (M^{1/3} / R)^\beta, \quad (1.8)$$

где A и β — постоянные величины, зависящие от свойств ВВ и передающей среды; M — масса заряда ВВ, кг; R — расстояние от заряда, м; r_0 — радиус сферического заряда.

Таблица 1.4

Сравнение давлений при нормальном и наклонном падении фронта детонации [20]

Материал	r	Давление, ГПа	
		Нормальное падение	Наклонное, под углом 90°, падение
Алюминий		36,4	19,6
Медь		49,0	21,0
Железо		47,6	20,3

Изменение давления за фронтом ударной волны во времени аппроксимируется формулой

$$p(t) = p_{\max} e^{-t/\Theta} \quad (1.9)$$

Значение постоянной времени Θ (характерного времени спада давления в ударной волне) вычисляется по эмпирической формуле [26]

$$\Theta = k' (R/M^{1/3})^2 M^{1/3} 10^{-3} \quad (1.10)$$

Величины входящих в формулы (1.8) и (1.10) коэффициентов определены в настоящее время для различных ВВ. Так, для тротила

$$\begin{aligned} p_{\max} &= 530 (M^{1/3}/R)^{1.09}; \\ \Theta &= 0,07 M^{1/3} (R/M^{1/3})^{0.17} 10^{-3}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Малые заряды массой в несколько граммов создают давление по фронту ударной волны в несколько сотен мегапаскалей, а мощные заряды массой до 3 кг создают давление до ~ 5000 МПа.

При гидровзрывном формоизменении часто используют линейные (шнуровые) заряды ВВ. Параметры подводного взрыва ТЭНового детонирующего шнура ($m = 0,01$ кг/м) для диапазона $m^{1/2}/R = 0,3 \dots 0,4$ кг/м определяют по формулам

$$\begin{aligned} p_{\max} &= 857 (m^{1/2}/R)^{0.71}, \\ \Theta &= 0,115 m^{1/2} (R/m^{1/2})^{0.43} 10^{-3}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

где m — масса 1 пог.м шнурового ВВ, кг/м.

Основные характеристики ряда стандартных ВВ приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5
Характеристики некоторых стандартных ВВ [27]

Название ВВ	ρ_0 , кг/м ³	D , м/с	p , ГПа	d_{br} , 10 ⁻³ м
Гексоген	1800	8850	39,0	1,0... 1,5
ТЭН	1770	8600	35,0	1,0... 1,5
Тротил	1620	7000	21,2	8,0... 10,0
Аммонит	1100	4000	11,5	10,0... 12,0

При взаимодействии ударной волны с подвижной жесткой преградой, например со стенками камеры или толстостенной заготовкой, давление на преграду на основании выражений (1.21) и (1.9) удваивается:

$$p_{(1)1} = 2p_{\max} e^{-t/\theta} \quad (1.13)$$

Если отражение ударной волны происходит от преграды, движущейся в том же направлении, что и ударная волна, то эта преграда будет испытывать давление

$$p_{(1)2} = 2p_{\max} e^{-t/\theta} - \rho_0 c_l \frac{dr}{dt} \quad (1.14)$$

где dr/dt — скорость движения преграды.

Соотношение (1.14) применяется при расчетах давления в операциях листовой штамповки.

1.2.2. Волны напряжения в материалах

Под воздействием интенсивных кратковременных нагрузок в металлах возникают нестационарные волны напряжений, способные деформировать и даже разрушать. Напряжения, возникающие на поверхности металла под действием импульса давления, перемещающегося с очень большой скоростью, могут в зависимости от этой скорости распространяться вглубь металла. Исследования показывают, что с увеличением напряжения до предела упругости связь между напряжением и деформацией остается линейной [15]. В этом случае в твердом теле будут распространяться упругие волны. В безграничной изотропной среде могут распространяться два вида упругих волн: *продольные* со скоростью

$$c_l = \{3k(1-\nu) / [\rho(1+\nu)]\}^{1/2} \quad (1.15)$$

и *сдвиговые* или *поперечные* со скоростью

$$c_t = (G/\rho)^{1/2} \quad (1.16)$$

где K — объемный модуль упругости; ρ — плотность; ν — коэффициент Пуассона и G — модуль сдвига материала.

Скорость упругих волн не зависит от амплитуды волны. В упругой волне нет необратимых потерь энергии, если волна распространяется в идеально упругой среде. В реальных условиях имеют место необратимые потери энергии, связанные с наличием в среде внутреннего трения. В табл. 1.6 приведены скорости распространения упругих волн в различных материалах [20].

Если зависимость между напряжениями и деформациями нелинейна, то в твердом теле могут распространяться пластические волны.

Таблица 1.6

Скорость распространения упругих волн в различных материалах

Материал	ρ , кг/м ³	c_L , м/с	c_T , м/с	ρc_L , кг/м ² с
Алюминий	2700	6260	3080	$16,90 \cdot 10^6$
Бериллий	1850	12250	8200	$22,66 \cdot 10^6$
Вольфрам	19100	5460	2870	$104,29 \cdot 10^6$
Железо	7700	5850	3230	$45,04 \cdot 10^6$
Золото	19300	3240	1200	$62,53 \cdot 10^6$
Латунь	8100	4430	2120	$35,88 \cdot 10^6$
Литий	530	3000	—	$1,59 \cdot 10^6$
Магний	1700	4600	2200	$7,82 \cdot 10^6$
Медь	8900	4700	2260	$41,83 \cdot 10^6$
Молибден	10100	6290	3350	$63,53 \cdot 10^6$
Никель	8800	5630	2960	$49,54 \cdot 10^6$
Ниобий	8600	4100	1700	$35,26 \cdot 10^6$
Олово	7300	3320	1670	$24,24 \cdot 10^6$
Платина	21400	3960	1670	$84,74 \cdot 10^6$
Ртуть	13600	1450	—	$19,72 \cdot 10^6$
Свинец	11400	2160	700	$24,62 \cdot 10^6$
Серебро	10500	3600	1590	$37,83 \cdot 10^6$
Титан	4500	6000	3500	$27,00 \cdot 10^6$
Уран	18700	3300	—	$61,71 \cdot 10^6$
Цинк	7133	3750	2290	$26,75 \cdot 10^6$
Цирконий	6500	4900	2900	$31,85 \cdot 10^6$
Резина	900	1480	—	$1,33 \cdot 10^6$
Стекло силикатное	2700	5500	3420	$14,85 \cdot 10^6$
Стекло органическое	1180	2550	1300	$3,01 \cdot 10^6$
Текстолит	1280	2920	—	$3,74 \cdot 10^6$
Эбонит	1200	2400	—	$2,88 \cdot 10^6$
Вода	1000	1490	—	$1,49 \cdot 10^6$
Воздух	1,3	335	—	435,5

Условием распространения пластических волн является монотонное уменьшение производной $d\sigma/d\epsilon_{\text{пл}}$, диаграммы «напряжение — линейная деформация» ($\sigma - \epsilon_{\text{л}}$) с увеличением деформации $\epsilon_{\text{л}}$. Оно выполняется для большинства материалов. Скорость возмущения в пластической волне определяется выражением

$$c_{\text{пл}} = (\rho^{-1} d\sigma/d\epsilon_{\text{л}})^{1/2}. \quad (1.17)$$

Интенсивные возмущения распространяются с меньшей скоростью — в результате пластическая волна растягивается. В пластической волне имеют место необратимые потери энергии, затрачиваемые на пластические деформации материала.

При очень больших напряжениях металл ведет себя, как жидкость. В этих условиях уравнения теории упругости для описания распространения волны неприменимы, и их необходимо заменить гидродинамическими соотношениями. Очевидно, что в этих условиях волны сдвига не возникают. Скорость распространения продольной гидродинамической ударной волны определяется равенством

$$c_{\text{уд}} = (K/\rho)^{1/2}. \quad (1.18)$$

Нормальные напряжения σ в металле, возникающие в направлении распространения продольной волны, зависят от скоростей частиц и определяются соотношением

$$\sigma = \rho c_{\text{л}} u. \quad (1.19)$$

Поэтому распространение напряжений по длине ударной волны аналогично распространению скоростей частиц u . Из формулы (1.19), в частности, следует, что одна и та же скорость частиц u вызовет различные напряжения в разных металлах. Так, при $u = 1$ м/с образуются напряжения, равные в алюминии 9,5, а в стали 24 МПа. В поперечной волне скорость частиц перпендикулярна направлению ее распространения, а в продольной параллельна направлению распространения. При этом следует различать скорость частиц, т. е. скорость движения материала и скорость распространения волны. В случае волны сжатия скорость частицы направлена в сторону распространения волны, а в случае волны растяжения — в противоположную сторону. При падении продольной волны напряжения на границу раздела двух сред различных материалов волна частично проходит во второй материал, частично отражается. Разделенное количество движения на три составляющие, вызывающие напряжения $\sigma_{\text{п}}$ — в падающей, $\sigma_{\text{от}}$ — в отраженной и $\sigma_{\text{пр}}$ — в проходящей волнах, определяется физическими свойствами материалов (рис. 1.4). Граничными условиями предопределяется непрерывность напряжений и скоростей частиц. Напряжения в отраженной и проходящей волнах определяются через напряжение в падающей волне следующими соотношениями [20]:

$$\sigma_{от}/\sigma_n = (\rho_2 c_{12} - \rho_1 c_{11}) / (\rho_1 c_{11} + \rho_2 c_{12}), \quad (1.20)$$

$$\sigma_{пр}/\sigma_n = 2 \rho_2 c_{12} / (\rho_1 c_{11} + \rho_2 c_{12}), \quad (1.21)$$

где ρc_l — акустическое сопротивление.

Если акустическое сопротивление среды, в которой волна возникает, больше, чем акустическое сопротивление среды, в которую волна переходит ($\rho_1 c_{11} > \rho_2 c_{12}$), то амплитуда напряжений в проходящей волне меньше, чем в падающей, и

$\sigma_{пр} < \sigma_n$, и отраженная волна приобретает обратный знак. Если же $\rho_1 c_{11} < \rho_2 c_{12}$, то амплитуда напряжений в проходящей волне больше, чем в падающей и $1 < \sigma_{пр}/\sigma_n \rightarrow 2$, а отраженная волна сохраняет знак падающей. При $\rho_1 c_{11} = \rho_2 c_{12}$ получаем $\sigma_{от}/\sigma_n = 0$, $\sigma_{пр}/\sigma_n = 1$, откуда следует, что отраженная волна не образуется, и волна проходит через границу целиком без отражения и изменения амплитуды. Случай $\rho_2 c_{12} = 0$ соответствует свободной границе, когда $\sigma_{от} = -\sigma_n$, т. е. волна сжатия при отражении становится волной растяжения. Напряжение в проходящей волне всегда имеет тот же знак, что и в падающей. Если второй материал абсолютно тверд, т. е. $\rho_2 c_{12} = \infty$, то напряжение, воспринимаемое границей раздела, равно удвоенному напряжению в падающей волне. Численные значения соотношений напряжений $\sigma_{от}/\sigma_n$ и $\sigma_{пр}/\sigma_n$ с указанием знаков напряжения для некоторых пар материалов приведены в табл. 1.7.

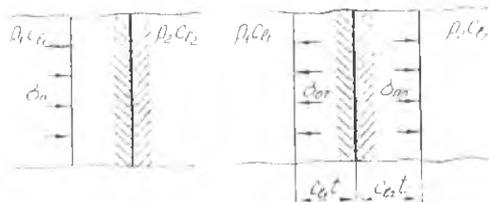


Рис. 1.4. Отражение плоской продольной волны от границы раздела двух материалов

1.2.3. Действие подводного взрыва на заготовку

Листовой штамповке свойственны высокие уровни воздействия взрыва, при которых прогибы заготовки соизмеримы с ее характерными размерами. В условиях малых значений высоты H расположения заряда над заготовкой это приводит практически всегда к появлению эффекта кавитации, т. е. к отрыву заготовки от воды и образованию в последней множественных отколов и пузырьков. При гидровзрывной штамповке основными носителями энергии, действующими на заготовку, следует считать ударную волну и гидропоток (прямого воздействия продукты взрыва, как правило, не оказывают).

Таблица 1.7

Разделение напряжений при нормальном падении плоской волны сжатия на границу раздела двух металлов [20]

Из среды 1	В среду 2	$\sigma_{от}/\sigma_n$	$\sigma_{пр}/\sigma_n$
Сталь	Алюминий	-0,46	+0,54
	Латунь	-0,12	+0,88
	Свинец	-0,31	+0,69
	Магний	-0,61	+0,39
Алюминий	Латунь	+1,36	+0,36
	Свинец	+1,17	+0,17
	Магний	-0,21	+0,79
	Сталь	+0,46	+1,46
Латунь	Алюминий	-0,36	+0,64
	Свинец	-0,19	+0,81
	Магний	-0,53	+0,47
	Сталь	+0,12	+1,12
Свинец	Алюминий	-0,17	+0,83
	Латунь	+0,19	+1,19
	Магний	-0,37	+0,63
	Сталь	+0,31	+1,31
Магний	Алюминий	+0,21	+1,21
	Латунь	+0,53	+1,53
	Свинец	+0,37	+1,37
	Сталь	+0,61	+1,61

Схема воздействия взрыва на заготовку иллюстрируется условной диаграммой $x-t$ движения точек, находящихся на отрезке нормали к заготовке, проходящей через центр заряда (рис. 1.5) [28]. При взрыве заряда 1 по воде начинает распространяться ударная волна, движение фронта которой изображено кривой 2. Одновременно начинается расширение газового пузыря, граница которого обозначена кривой 3. Под действием давления ударной волны начинается движение заготовки 4; при этом внутри жидкости распространяется отраженная волна сжатия 5. В результате смещения заготовки давление в волне сжатия 5 быстро падает. В окрестности заготовки образуется область кавитирующей жидкости 6, частицы которой продолжают двигаться вслед за заготовкой.

Учет эффекта кавитации очень важен для понимания механизма процесса нагружения заготовки при взрыве. Именно из-за кавитации время действия нагрузки на заготовку значительно превышает время действия ударной волны, и нагружение носит немоновтонный характер.

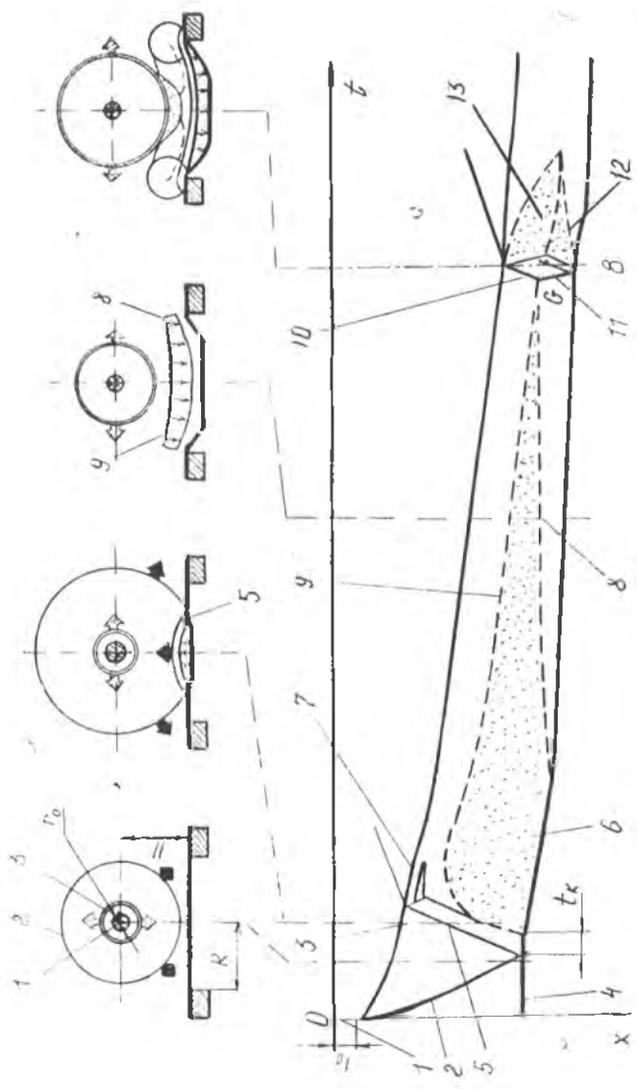


Рис. 1.5. Процесс развития взрыва в окрестности заготовки (x — i диаграмма и растровая съемка) [10]

В момент образования кавитации t_k прямое воздействие ударной волны на заготовку прекращается. Энергия ударной волны 2 преобразуется в энергию отраженной волны 5, кинетическую энергию заготовки и кинетическую энергию потока жидкости в зоне кавитации, которая может быть значительной (часто более 50 % энергии ударной волны). Так если давление внутри зоны кавитации равно нулю, движение заготовки в тех точках, где еще не сказывается закрепление фланца, с момента t_k идет по инерции.

Отраженная от заготовки волна сжатия 5 несет обычно незначительную долю энергии падающей волны. При выходе этой волны на границу пузыря продуктов взрыва 3 возможно возникновение дополнительной зоны кавитации 7, временно исключаящей действие пузыря в направлении заготовки, так как давление пузыря должно погасить энергию отколовшегося слоя жидкости. Возникновение областей кавитации 6 и 7 показывает, что давление жидкости между пузырем и заготовкой в этот период взаимодействия равно нулю.

При торможении заготовки частицы жидкости из области кавитации будут оседать на заготовку, передавая ей свою энергию, а внутри области кавитации начнет двигаться граница скачка уплотнения с фронтом 8. Давление на границе скачка определяется относительной скоростью и плотностью частиц потока кавитирующей жидкости. Поглощение энергии кавитирующей жидкости определяется характером торможения заготовки. Если начальный период разгона заготовки под действием ударной волны занимает малое время $t_k < \Theta$, то нагружение заготовки кавитирующей жидкостью происходит сравнительно медленно и значительно превышает время действия ударной волны. Действие потока скакнутававшей воды на заготовку не связано в это время с поведением продуктов взрыва. Двигающаяся от пузыря жидкость оттесняет верхнюю границу зоны кавитации 9, сдвигая ее вслед за заготовкой. В точке G происходит захлопывание зоны кавитации, сопровождающееся резким повышением давления. От места соударения жидкости, движущейся от пузыря, с жидкостью, осевшей на заготовке, начинают распространяться волны сжатия 10 и 11. Волна сжатия 11 действует на заготовку, вызывая появление отраженных волн сжатия и разрежения. У заготовки вновь возможно появление области кавитации 12. Характер этого взаимодействия аналогичен первому этапу отражения ударной волны.

Распространяющаяся в направлении пузыря волна сжатия 9 вызывает появление области кавитации на его границе 13. Кавитационная полость снизу закрывается вследствие торможения заготовки и сверху за счет остаточного давления продуктов

детонации. Возникновение кавитации в этот момент времени определяется не только инерционным сопротивлением заготовки, но и ее жесткостью, что может иметь решающее значение. У заготовок, обладающих большой жесткостью, кавитация может и не наступить. И наоборот, при малой жесткости заготовки процесс возникновения и исчезновения области кавитации может повторяться неоднократно.

Таким образом, воздействие взрыва на заготовку носит сложный, многоэтапный характер, причем заготовка по меньшей мере дважды подвергается интенсивному разгону (моменты времени А и В). Поскольку нагружение заготовки осуществляется в течение всего времени, то использование для расчета процесса представления о нагружении заготовки как импульсном в большинстве случаев не соответствует действительности и, как правило, приводит к грубым ошибкам.

1.3. ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ И ИХ СВОЙСТВА ПОСЛЕ ВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ

Поведение металлов при статических нагрузках изучено достаточно хорошо. При динамических нагрузках поведение металла изменяется, причем это изменение для различных металлов различно. Если скорость распространения пластических волн зависит от механических характеристик металла и степени деформации, то для разных металлов существуют свои оптимальные диапазоны высоких скоростей деформирования, что и подтверждается опытом. Например, мягкий и неинтенсивно упрочняющийся алюминий при высоких скоростях деформирования проявляет хрупкость и может деформироваться слабыми взрывчатыми веществами, и наоборот, высокопрочные нержавеющие стали можно штамповать при очень высоких скоростях деформирования, развивающихся при взрыве сильных БВВ, при этом они проявляют лучшие пластические свойства.

Экспериментальные исследования по высокоскоростному нагружению металлов на растяжение показывают, что в условиях динамического нагружения пластичность одних материалов увеличивается, других — уменьшается по сравнению с пластичностью при статическом нагружении. Вместе с тем независимо от изменения пластичности предел текучести и предел прочности материала в условиях динамического нагружения увеличиваются. Возрастание прочностных характеристик материала с повышенной в условиях динамического нагружения пластичностью требует для высокоскоростного деформирования большей, чем при статических методах, энергии деформации.

На рис. 1.6 и 1.7 показаны результаты экспериментальных исследований зависимости характеристик прочности и пластичности стали 45 и алюминиевого сплава Д16 при растяжении от

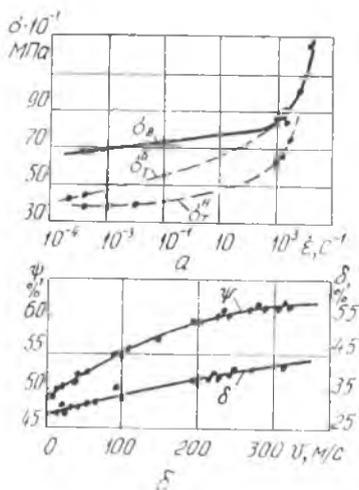


Рис. 1.6. Зависимость характеристик прочности (а) и пластичности (б) стали 45 от скорости деформации (деформирования)

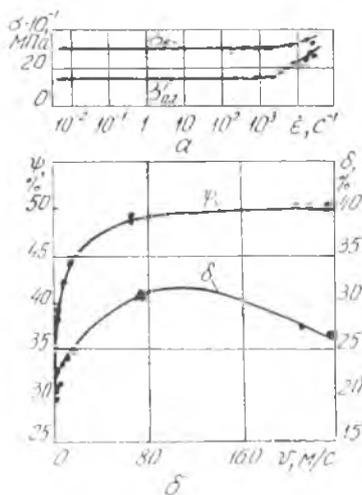


Рис. 1.7. Изменение характеристик прочности (а) и пластичности (б) сплава Д16 от скорости деформации и деформирования

скорости деформации в диапазоне изменения $(10^{-4} \dots 3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1})$ [25]. Выбор данных материалов обусловлен различной чувствительностью к скорости деформации и существенным различием характеристик прочности и пластичности. На образцах из стали 45 наблюдается высокий уровень разности напряжений на верхнем и нижнем пределах текучести (рис. 1.6, а). Величина верхнего предела текучести сильно зависит от термообработки: в образцах термообработанных (нагрев до 900°C , выдержка 2 ч, охлаждение с печью) верхний предел текучести (при $\dot{\epsilon}$ выше 10^2 с^{-1}) значительно превышает предел прочности, тогда как при испытании образцов, не прошедших термообработку после изготовления, предел прочности и верхний предел текучести близки по значению [25]. Характеристики пластичности стали 45 с ростом скорости деформации в диапазоне $\dot{\epsilon} > 10^2 \text{ с}^{-1}$ монотонно возрастают (рис. 1.6, б).

Влияние скорости деформации на характеристики прочности алюминиевых сплавов значительно меньше, чем у малоуглеродистых сталей. Характер изменения прочностных характеристик

в общем такой же, как и у сталей: более интенсивное возрастание со скоростью деформации сопротивления в области малых деформаций и более слабая зависимость от скоростей деформации предела прочности; достаточно резкое изменение прочностных характеристик от скорости в области скоростей $\dot{\epsilon} \approx 10^3 \text{ с}^{-1}$ (рис. 1.7, а). Характеристики пластичности (относительное удлинение δ и поперечное сужение Ψ в области шейки образца) с повышением скорости деформации возрастают. При высоких скоростях, выше 20 м/с (рис. 1.7, б), у сплава Д16 в эксперименте наблюдается некоторое снижение относительного удлинения и отсутствие снижения уровня поперечной деформации в области шейки образца.

В работе [22] приведены динамические испытания на растяжение цилиндрических образцов на установке с использованием энергии ВВ. Скорость деформирования изменяли в пределах $10^{-4} \dots 650 \text{ м/с}$. В табл. 1.8 приведены результаты испытаний. Из данных проведенной работы следует, что с повышением скорости деформирования возрастают характеристики пластичности (δ_5 и Ψ) до определенного предела, при повышении которого пластичность резко падает. Так, для стали 1Х18Н9Т в состоянии закалки пластичность повышается до скорости деформирования примерно 200 м/с, после чего снижается до нуля при скорости, равной 650 м/с.

Таблица 1.8

Влияние скорости деформирования на пластичность сплавов [22]

Материал и термообработка	Скорость деформирования, м/с	δ_5 , %	Ψ , %
АД1, отжиг	20/100	36/53	93/95
Д16, старение	70/110	16/22	20/31
Д16, отжиг	70/110	16/27	34/49
1Х18Н9Т, закалка	100/250	57/76	73/76
1Х18Н9Т, отпуск	160/300	54/73	73/75
ОТ4, отжиг	25/100	20/25	48/55
ОТ4, закалка	80/150	7/16	24/45

Примечание. В числителе — данные статических, в знаменателе — динамических испытаний при указанных скоростях растяжения.

При испытании материалов, подвергнутых импульсному нагружению, помимо известных показателей физико-механических свойств важно знать также такие свойства, как критическая скорость удара и критический период запаздывания начала

пластического течения. Под *критической скоростью удара* понимают скорость, при которой образец в точке удара разрушается. Экспериментально определенные для ряда металлов значения критических скоростей удара находятся в пределах 15..60 м/с.

Критический период запаздывания— это время, соответствующее запаздыванию пластической деформации от момента нагружения. Многие материалы, в первую очередь такие, у которых на статической кривой напряжение—деформация наблюдается ярко выраженный предел текучести, имеют период запаздывания начала пластической деформации от момента нагружения, измеряемый несколькими миллисекундами [6]. Период запаздывания зависит от приложенного напряжения и температуры. С ростом приложенного напряжения при постоянной температуре время, необходимое для начала пластической деформации, уменьшается. При постоянном приложенном напряжении период запаздывания уменьшается с повышением температуры.

Установлено, что точность деталей, имеющих форму замкнутых осесимметричных оболочек, возрастает с увеличением скорости соударения заготовки с матрицей. При штамповке взрывом в матрицу в отдельных случаях можно обеспечить снижение пружинения в 8..10 раз и повысить точность обечаек до 8..12 квалитетов только за счет увеличения веса заряда. Уменьшение пружинения можно объяснить податливостью матрицы, изменением напряженно-деформированного состояния заготовки и термическим эффектом. Эффект податливости матрицы уменьшает пружинение не более, чем на 10 %.

Если предположить, что половина тепла, образуемого при соударении заготовки с матрицей, идет на нагрев заготовки, то увеличивая величину заряда, можно довести температуру ее до 500..600°С. При таких температурах наблюдается заметное изменение механических свойств материала: предел текучести уменьшается в 8 раз, а пружинение — на порядок.

Испытание циклическими нагрузками показало, что штамповка взрывом по оптимальным режимам благоприятно влияет на усталостную прочность; отмечено повышение предела усталости для исследуемых материалов на 10..27 %. Установлено, что значительное повышение характеристик, определяющих прочность в условиях знакопеременных нагрузок, связано с повышением чистоты поверхностных слоев и образованием более равномерной микрогеометрии поверхностей. Штамповка взрывом не приводит к изменению стойкости материалов к атмосферной коррозии в условиях длительного вылеживания и не изменяет показателей вакуумной плотности,

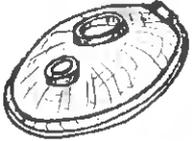
2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКОЙ

2.1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКОЙ

Учитывая, что внедрение в производство процессов изготовления деталей взрывной штамповкой не требует применения сложного оборудования и дорогой оснастки, можно с большой уверенностью рекомендовать их использование в мелкосерийном, а при наличии средств механизации — и в среднесерийном производстве. В принципе использование энергии взрыва позволяет осуществлять большинство операций листовой штамповки. Вместе с тем производственный опыт показал, что наиболее целесообразно применять такой способ деформирования в операциях формовки, неглубокой вытяжки, получения отверстий и отбортовки их в предварительно отформованных деталях, калибровки, раздачи трубчатых заготовок. Габариты, материал и сечение заготовок, которые можно деформировать взрывной штамповкой, зависят от вида и количества энергоносителя, а также от технологических возможностей специальных установок. Так, если энергией взрыва БВВ можно деформировать заготовки любых габаритов и толщин, то при использовании энергии сгорания порохов или горючих газов размеры заготовок ограничиваются габаритами выходного сечения взрывной камеры, прочностью ее стенок.

По конструктивно-технологическим особенностям детали, изготавливаемые взрывной штамповкой, можно разделить на шесть классов. В 1-й класс (табл. 2.1) входят детали типа «днище», получаемые из листовых заготовок и предназначенные в качестве замыкающих элементов герметизируемых отсеков, баков, смонкостей, баллонов и др. По форме образующей детали могут быть сферические, эллиптические, конусообразные, оболочки с плоским или криволинейным дном. Днища в ряде случаев имеют горловинны—отверстия с отбортовками для соединения с трубопроводами. По размерам детали классифицируются на малогабаритные (диаметр $D_d < 300$ мм), среднегоабаритные ($D_d = 300 \dots 1000$ мм) и крупногабаритные ($D_d > 1000$ мм). В зависимости от относительной толщины стенки $\bar{S}_0 = 100 S_0/D$ днища

Таблица 2.1
 Классификатор деталей, изготавливаемых
 взрывной штамповкой

Класс	Наименование детали	Эскиз
I	Днище	
II	Корпус	
III	Эжектор	
IV	Полупатрубок	
V	Обтекатель	
VI	Компенсатор	

различают толстостенные $S_0 = 10 \dots 5$, среднестенные $S_0 = 5,0 \dots 1,5$, тонкостенные $S_0 = 1,5 \dots 0,15$, особо тонкостенные $S_0 < 0,15$. По точности выдерживания геометрических параметров (допуск на диаметр детали ΔD_d , отклонение контура сечения от теоретического обвода δ ; утончение стенки ΔS_0 ; высота местных волнистостей, вмятин, гофр Δh) детали подразделяют на особо точные (I категории), повышенной точности (II категории), нормальной точности (III категории) и пониженной точности (IV категории).

В качестве ориентировочных в табл. 2.2 приведены значения предельных параметров точности для деталей $D_d = 300, 1000 \dots 2000$ и $3000 \dots 4000$ мм.

Таблица 2.2

Значения предельных параметров точности [14]

Категория точности	ΔS_0 , %	$D_d < 300$			$D_d = 1000 \dots 2000$			$D_d = 3000 \dots 4000$		
		ΔD_d , мм	δ , мм	Δh , мм	ΔD_d , мм	δ , мм	Δh , мм	ΔD_d , мм	δ , мм	Δh , мм
I	10	$\pm 0,5$	0,5	0,3	$\pm 1,5$	1,5	0,8	$\pm 3,0$	4,0	2,0
II	15	$\pm 0,8$	0,8	0,5	$\pm 2,0$	3,0	1,5	$\pm 5,0$	8,0	2,5
III	25	$\pm 1,5$	1,5	1,0	$\pm 4,0$	6,0	2,0	$\pm 8,0$	12,0	3,0
IV	25	$\pm 2,5$	$> 1,5$	$> 1,0$	$\pm 5,0$	$< 6,0$	$> 2,0$	$\pm 9,0$	$> 12,0$	$> 3,0$

Весьма важной геометрической характеристикой деталей данного класса является относительная глубина дна $P = H/D_d$. Этот параметр в сочетании с диаметром изделия и относительной толщиной заготовки S_0 является основой для выбора способа изготовления детали.

II класс — детали типа «кожух» — изделия корытообразной формы; в большинстве случаев они имеют различные конструктивные элементы — рифты жесткости, выштамповки, отверстия с отбортовками, подседки и др. По сечению и в плане детали могут быть как симметричными, так и несимметричными. Для соединения с другими деталями кожуха зачастую имеют фланцы.

III класс — детали типа «жесткость» — относительно плоской формы с выштамповками и фланцем, кривизна поверхности которого соответствует кривизне агрегата в районе установки данной детали. Основное назначение — укрепление обшивок лючков, используемых при монтаже и осмотре элементов систем оборудования летательных аппаратов. К деталям предъявляются высокие требования точности выполнения кривизны привалочной поверхности.

IV класс объединяет *детали типа полупатрубок, полурам*, получаемых штамповкой из листовых заготовок. Основные требования к таким деталям диктуются назначением и условиями их работы в конструкции. Например, в местах сгиба силовых полурам или полупатрубок, предназначенных для гидросистем высокого давления, утонение материала не должно быть более 15 %.

V класс — *детали типа «обтекатель»*, получаемые из пространственных сварных заготовок. Для обеспечения необходимого качества детали в технологическом процессе ее изготовления перед операциями взрывной штамповки рекомендуется осуществлять операции проковки и зачистки сварного шва с последующей разупрочняющей термической обработкой для снятия нагартовки и выравнивания структуры материала.

VI класс — *детали трубопроводов*, изготавливаемые из трубчатых заготовок с использованием операций формовки, редуцирования и др.

2.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ

Для разработки технологических процессов изготовления деталей взрывной штамповкой необходимо определить следующие параметры:

- размеры и форму (в плане) заготовки;
- число операций штамповки;
- количество взрывчатого вещества;
- форму и расположение заряда (для БВВ);
- радиус вытяжной кромки матрицы.

2.2.1 Определение размеров и формы заготовки

Взрывная штамповка листового материала обычно проводится с использованием промежуточной среды — воды, песка, резиновых или полиуретановых диафрагм. Эта особенность выдвигает некоторые специфические требования к размерам заготовок. Известно, что формовка (вытяжка) материалов эластичной средой требует в обязательном порядке наличия у детали фланца. Ширина последнего должна быть такой, чтобы после окончания формообразования детали его торец не доходил до начала вытяжной кромки матрицы. Фланец не позволяет допускать разрывов эластичной диафрагмы о торец отформованной детали при повторных нагружениях заготовки, а также способствует упрощению выполнения герметизации полости матрицы, которую необходимо производить перед каждым нагружением заготовки. В случае отсутствия в конструкции детали

фланца (по чертежу), тот искусственно должен быть образован за счет технологического припуска. Величину последнего (рис. 2.1) можно определить, исходя из рекомендаций работы [14]. Ширина фланца для прижима заготовки $b = (0,025 D_d + k)$, где $k = 8, 12$ и 18 мм для $D_d < 300$; $D_d = 300 \dots 400$ и $D_d > 400$ мм соответственно.

Радиус закругления кромки матрицы r_m выбирается в зависимости от материала и толщины заготовки. Ориентировочно для заготовок из алюминиевых сплавов и $S_0 < 3$ мм он принимается $r_m = (7 \dots 14) S_0$; при $S_0 > 3,0$ $r_m = (4 \dots 11) S_0$. Для заготовок из высокопрочных нержавеющей сталей при $S_0 < 3,0$ мм $r_m = (8 \dots 14) S_0$; при $S_0 > 3,0$ $r_m = (7 \dots 12) S_0$. Для титановых сплавов $r_m = (10 \dots 14) S_0$. Величина припуска на подрезку детали $h_1 = (1,5 \dots 3,0) S_0$. Если чертежом для лучшего оформления кромки детали предусматривается введение цилиндрического пояса, то величину последнего рекомендуется принимать $h_2 = (2 \dots 5) S_0$.

Таким образом, используя принцип равенства площадей исходной заготовки и отштампованной детали (с учетом технологических припусков), можно определить размеры заготовки. Для деталей простой формы (тела вращения, коробки) ее развертку определяют по формулам и методикам, приведенным в литературе [13, 21, 24]. Для деталей сложной формы размеры заготовки обычно определяют экспериментальным путем, например предварительно — путем «проштамповки» листа бумаги в ручье матрицы с помощью песка, гипса или оснастки, по которой обрабатывалась матрица, а затем окончательно — в процессе отработки технологического процесса. В дальнейшем в таком случае нарезка исходных заготовок производится по отработанному шаблону заготовки (ШЗ).

2.2.2. Определение количества операций для формообразования детали

Количество операций штамповки устанавливают исходя из условия получения готовой детали с толщиной материала, укладываемой в требованиях ТУ, а также технических характеристик установок для взрывной штамповки. Учет первого требования связан с расчетом для наиболее «опасных» зон

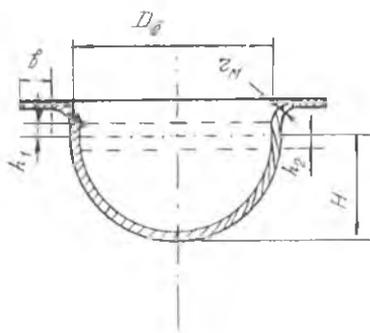
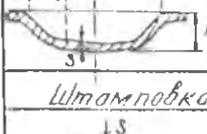
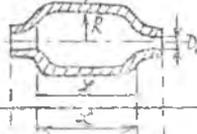
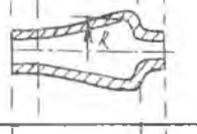
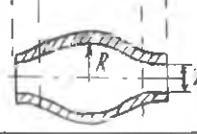


Рис. 2.1. К расчету размеров заготовки полуфабриката днаща

заготовки остаточных, после формообразования, толщины материала. Если толщина укладывается в пределы ТУ, то формообразование детали можно выполнить за одну операцию. В противном случае необходимо использовать различные технологические приемы вплоть до введения многооперационной штамповки на различных матрицах с промежуточными разупрочняющими термообработками. Формулы для расчета (в первом при-

Таблица 23.
Формулы для определения работы деформации при формообразовании деталей

Форма деталей	Средняя деформация ϵ_x	Объем деформированного материала V_0	Работа деформации A
<i>Штамповка детали из плоской заготовки</i>			
	$\epsilon_x = \sqrt{1 + \frac{S^2}{2R^2} \left(\frac{y}{2R}\right)^2} - 1$	$V_0 = 2\pi R \cdot S \cdot y$	$A = 2\pi R \cdot S_0 \left(\frac{K}{n+1}\right) \times y \cdot e^{-0,9\epsilon_x} \cdot \epsilon_x^{n+1}$
	$\epsilon_x = \sqrt{1 + \left(\frac{y}{R_0}\right)^2} - 1$	$V_0 = \pi R_0^2 \cdot S \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{y}{R_0}\right)^2}$	$A = \pi R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{y}{R_0}\right)^2} \times \left(\frac{K}{n+1}\right) S_0 \cdot e^{-0,9\epsilon_x} \cdot \epsilon_x^{n+1}$
	$\epsilon_x = \left(\frac{y}{2} - 1\right) \frac{R_1}{R_0}$	$V_0 = \pi S \left[(\pi - 2) R_1 R_0 + (1 - \pi) R_1^2 + R_0^2 \right]$	$A = \pi (R_0^2 + 1,14 R_0 R_1 - 2,14 R_1^2) S_0 \left(\frac{K}{n+1}\right) e^{-0,9\epsilon_x} \cdot \epsilon_x^{n+1}$
<i>Штамповка детали из трубчатой заготовки</i>			
	$\epsilon_A = \frac{R}{R_0} - 1$	$V_0 = 2\pi R \cdot S \cdot y$	$A = 2\pi R y S_0 \left(\frac{K}{n+1}\right) \times e^{-0,9\epsilon_A} \cdot \epsilon_A^{n+1}$
	$\epsilon_A = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right)$	$V_0 = \pi \cdot S \cdot y \cdot (R_0 + R)$	$A = \pi (R_0 + R) y \cdot S_0 \times \left(\frac{K}{n+1}\right) e^{-0,9\epsilon_A} \cdot \epsilon_A^{n+1}$
	$\epsilon_A = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right)$	$V_0 = 2\pi S (4R^2 - R_0^2)$	$A = 2\pi (4R^2 - R_0^2) S_0 \times \left(\frac{K}{n+1}\right) e^{-0,9\epsilon_A} \cdot \epsilon_A^{n+1}$

ближении) степени деформации некоторых геометрических форм деталей приведены в табл. 2.3 [2]. Более подробно методика анализа напряженно-деформированного состояния различных зон заготовки описана в работах [4, 11, 16, 18].

Для ориентировочных расчетов степени деформации деталей, формуемых без перетяжки фланца, можно использовать зависимость $\varepsilon_t = (L_1 - L_0) / L_0$, где L_0 и L_1 — начальная и конечная длины образующей деформируемой детали.

При формовке взрывом большая часть заготовки испытывает следующие основные виды напряженного состояния:

при штамповке днищ — равномерное двухосное растяжение (в куполе); в этом случае толщину материала после деформирования определяют по формуле $S_k = S_0 \cdot e^{-2\varepsilon_t}$;

при местной формовке, например, мелких выштамповок, рифтов — плоское растяжение, при котором $S_k = S_0 \cdot e^{-\varepsilon_t}$;

при раздаче цилиндрической заготовки наблюдаются условия, близкие к плоскому растяжению; конечная толщина материала в этом случае определяется из выражения $S_k = S_0 \cdot e^{-0,9\varepsilon_t}$.

При многооперационной листовой штамповке или с целью повышения качества детали при однооперационном деформировании заготовок в техпроцессе вводят различные технологические приемы:

предварительный набор материала для формообразования локальных зон детали;

направленное перемещение массы металла;

использование упругих прокладок;

деформирование заготовки в «пакете»;

концентрация нагрузки в труднодеформируемых зонах детали.

Первый прием заключается в предварительном деформировании на равней стадии процесса с помощью прокладок из резины или на специально для этого созданных жестких матрицах отдельных зон деталей, требующих для окончательного формообразования большей степени деформации заготовки (выштамповки, угловые закругления, зоны сопряжения отростков полупатрубок, центральная зона днищ и т. д.). Идею этого приема можно легко понять, рассмотрев механизм так называемой реверсивной штамповки днищ (рис. 2.2). На первой стадии процесса производится набор материала преимущественно путем перетяжки его с фланца заготовки и утонения боковых стенок детали. При этом материал наиболее опасной — центральной зоны детали — благодаря силам трения между эластичным пуансоном и поверхностью матрицы не подвергается большой степени деформации. Тем самым создаются благоприятные условия для формообразования на последующей стадии процесса, в основном протекающей за счет утонения материала. Из рис. 2.2

Видно, что вторая операция штамповки заключается в выворачивании набранного материала и калибровке детали по матрице. Такой прием применяется для штамповки деталей с относительной глубиной вытяжки $h/D_d > 0,25$. Очень часто для восстановления пластических свойств материала между операциями вводят промежуточную термообработку.

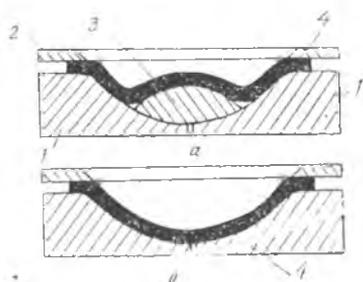


Рис. 2.2. Схема реверсивной штамповки: а—1-я операция, б—2-я операция; 1—матрица, 2—прижим, 3—вкладыш, 4—заготовка

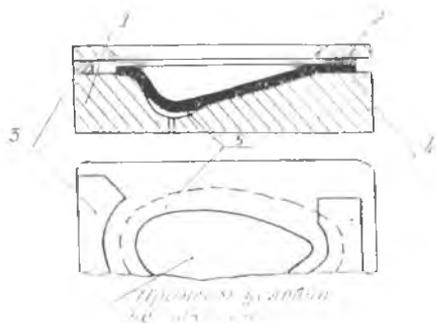


Рис. 2.3. Схема вытяжки деталей несимметричного профиля: 1—матрица, 2—прижим, 3—прокладка, 4—накладка, 5—деталь

Второй прием применяется при вытяжке деталей несимметричного профиля (рис. 2.3). В этом случае на фланец заготовки устанавливают в определенных местах эластичные накладки (толстолистовая резина). На противоположной от них стороне на поверхности матрицы размещают по периметру заготовки жесткие прокладки, которые создают зазор между складкодержателем и заготовкой и обеспечивают при вытяжке заготовки свободное течение материала в просел матрицы. Благодаря этому в процессе деформирования заготовки достигается направленное перемещение массы металла.

Следующий прием, обеспечивающий увеличение степени деформации при взрывной штамповке, связан с реализацией принципа зависимости величины деформации от массы площади поперечного сечения заготовки. Сущность его сводится к размещению на поверхности заготовки упругой прокладки (металл, пластмасса, фанера, резина), которая перекрывает опасную зону детали, увеличивая при этом местную массу сечения материала. В результате максимальная деформация достигается на фланце и в кольцевой зоне заготовки, свободной от действия упругой прокладки. Процесс утонения материала в опасной зоне детали протекает менее интенсивно. Такой же эффект достигается при штамповке предварительно обработанной механическим путем толстолистовой заготовки (создание сечения конической формы).

Для получения детали из тонколистовых (фольговых) материалов выгодно применять деформирование заготовки в «пакете». Заготовка для детали перед штамповкой помещается между двумя более толстыми заготовками из мягкого металла. В процессе штамповки наружные листы как бы амортизируют и перераспределяют по всей площади заготовки мгновенно приложенную нагрузку. Применение данного приема сводит к минимуму влияние неравномерности прижима фланца заготовки, которое может преждевременно вызвать образование разрушающей пластической волны.

В конструкциях деталей детальных аппаратов, изготавливаемых штамповкой, часто встречаются различные элементы (выштамповки, рифты, подсежки, угловые закругления), получение которых взрывной штамповкой связано с определенными трудностями; из-за большой жесткости и невозможности создания на всей поверхности заготовки высоких давлений (более 80 ... 100 МПа) на готовых деталях наблюдается «недоштамповка» этих элементов. Ликвидация подобных недостатков требует применения в процессе штамповки различных приемов, позволяющих увеличить в области этих элементов энергию, передаваемую заготовке. С этой целью, например, при штамповке заготовок большой толщины (более 2,0 мм) или заготовок из высокопрочных материалов для калибровки отдельных конструктивных элементов применяют жесткие накладки или вкладыши (жесткая резина, дельтадревесина, алюминиевые сплавы), которые выполняют роль местных «пуансонов» для создания окончательной геометрической формы элемента.

Второе требование, которое необходимо учитывать при определении количества операций, необходимых для формообразования детали, обусловлено, как отмечено выше, техническими возможностями специальных установок и технологической оснастки. Такие установки характеризуются такими данными, как габариты и глубина бассейна для штамповки заготовок энергией взрыва БВВ, площадь выходных сечений взрывных камер, масса используемых для взрыва зарядов, исходное давление газовой смеси в установках для газодетонационной штамповки и др. Поскольку проектирование технологического процесса взрывной штамповки в каждом конкретном случае проводится под определенный тип установки, отмеченные характеристики в ряде случаев могут выступать как основные критерии для расчета количества операций штамповки. Например, процесс формообразования детали требует использования заряда такой массы, которая не может быть применена в установке из-за ограниченной прочности стенок взрывной камеры. Поэтому деформирование заготовки осуществляют более мелкими зарядами за несколько операций.

2.3.3. Определение количества взрывчатого вещества

Все способы взрывной штамповки характеризуются сложным механизмом деформирования заготовок. Выше было отмечено, что это связано не только с особенностями образования силового поля при импульсном приложении к заготовке деформирующего усилия, но и нетрадиционным поведением материала при таком виде нагружения. Поэтому в настоящее время ученым пока не удается разработать достаточно точную математическую модель процесса деформирования. Вместе с тем для проектирования техпроцессов взрывной штамповки создана методика приближенного определения силовых параметров процесса, основанная на энергетическом принципе — сопоставлении величин механической работы деформации заготовки и энергии от внешнего источника нагружения с учетом КПД процесса:

$$E = A/\eta, \quad (2.1)$$

где E — энергия взрыва, A — работа деформации при формообразовании детали, η — КПД процесса передачи энергии от энергоносителя к заготовке.

Работа деформации определяется по формуле

$$A = a_{ед} V_d, \quad (2.2)$$

где $a_{ед}$ — работа деформации при формообразовании единичного объема заготовки, V_d — объем деформированного материала детали.

Единичную работу определяют путем интегрирования кривой $\sigma_i = f(\epsilon_i)$, построенной по результатам испытания образцов из листового материала (исходной заготовки) на растяжение. Если принять, что кривая $\sigma_i \sim \epsilon_i$ аппроксимируется уравнением $\sigma_i = k \epsilon_i^n$, то после интегрирования получим

$$a_{ед} = \frac{k}{n+1} \epsilon_i^{n+1}, \quad (2.3)$$

где k и n — константы механических свойств материала; для наиболее распространенных в производстве летательных аппаратов материалов их величины приведены в табл. 2.4.

Окончательный вид формул для расчета работы деформации наиболее распространенных форм деталей приведен в табл. 2.3. При штамповке деталей сложной формы общая работа деформации складывается из отдельных работ, затрачиваемых на формообразование конструктивных элементов.

КПД процесса для каждого способа взрывной штамповки, вида выполняемой технологической операции и конструкции установки имеет различное значение. Так, для штамповки деталей зарядом БВВ его значение зависит от состава БВВ, типа бассейна, расстояний от заряда до заготовки и до свободной поверх-

Некоторые типичные свойства материалов [14]

Марка материала	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_{10} , %	$\bar{\sigma}_D$, %	Ψ^* , %	$\sigma_s = k \varepsilon^n$	
						k , МПа	n
<i>Алюминиевые сплавы</i>							
АД1М	95	35	35	20	75	176	0,27
АМЦ1АМ	135	55	33	18	65	247	0,255
АМГ3М	230	120	19	15	50	398	0,214
АМГ6М	330	165	24	20	40	574	0,23
Д16АМ	200	95	18	13	55	365	0,236
Д16АТ	450	300	19	17	25	712	0,17
В95АМ	210	100	18	13	55	387	0,239
В95АТ	520	440	12	4,5	23	800	0,125
1420Т	474	316		6	8,1	761,6	0,22
<i>Магниеые сплавы</i>							
МА8М	260	190	18	11	28	402	0,15
МА2-1М	290	200	10...40				
<i>Титановые сплавы</i>							
BT1-2	650	550	24	10	50	900	0,1
OT4	800	700	20	8	45	1100	0,095
BT14	1000	900	10	5	30	1410	0,0985
<i>Стали</i>							
08КП	380	240	37	23	70	590	0,156
20	480	300	33	18	64	748	0,161
30ХГСА	700	450	22	12	52	1110	0,166
12Х18Н9Т	660	300	50	40	50	1150	0,239
ЭИ-654Н (15Х18Н12С7ТЮИ)	900	750	15	7	40	1280	0,107
СН 2 (09Х15Н19Ю)	950	400	30	18			

ности воды, формы заряда (сферическая, плоская, линейная), жесткости заготовки, механических свойств материала. По данным работы [16] КПД процесса такой штамповки при расположении заряда от поверхности заготовки на расстоянии $H = 0,25 D_d$, где D_d — диаметр формуемой детали, составляет: для стационарных бассейнов $\eta = 0,099...0,142$, для бассейнов с разрушаемыми стенками $\eta = 0,075...0,113$. С увеличением расстояния H КПД заметно снижается.

При штамповке заготовок взрывом пороховых ВВ в закрытых камерах КПД процесса составляет 0,025 (формовка дисков из листовых заготовок) и 0,05 (раздача цилиндрических заготовок) [2]. Для случая газодетонационной штамповки какие-либо сведе-

ния в литературе о значениях КПД процесса отсутствуют. Однако можно предполагать, что они, по-видимому, находятся на уровне процессов штамповки заготовок энергией сгорания порохов.

Определив значение работы деформации и приняв ориентировочно КПД процесса, можно рассчитать энергию, а затем и массу заряда ВВ, необходимую для формообразования детали. В литературе [16, 17, 20] приводятся различные формулы и номограммы для определения ориентировочной массы заряда. Например [16], при расположении сферического заряда БВВ на расстоянии $0,3 D_d \leq H < 2 D_d$ от поверхности заготовки его масса определяется по формуле

$$Q = \left[\frac{a_{ед} s_0 H^{0,8}}{1 - \nu^2} N \right]^{0,8}, \quad (2.4)$$

Масса линейного заряда

$$q = \left[\frac{a_{ед} s_0 H^{0,55}}{1 - \nu^2} M \right]^{0,8}, \quad (2.5)$$

где $a_{ед}$ — удельная работа деформации, кг·см/см²; s_0 — толщина заготовки, см; H — расстояние центра заряда от поверхности заготовки, см.

Значения N , M и $1 - \nu^2$ приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Значения коэффициентов для формул (2.4) и (2.5)

Материал	ρ , кг·с ² / см ⁴	$1 - \nu^2$ при $\bar{\rho} = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot \theta}{\rho \cdot s_0} > 2$	N	M
Алюминиевые сплавы	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,824	$0,494 \cdot 10^{-6}$	$79,7 \cdot 10^{-6}$
Титановые сплавы	$4,5 \cdot 10^{-6}$	0,813	$0,792 \cdot 10^{-6}$	$128 \cdot 10^{-6}$
Стали	$7,8 \cdot 10^{-6}$	0,781	$1,376 \cdot 10^{-6}$	$222 \cdot 10^{-6}$

В табл. 2.5 входят следующие обозначения:

$\rho_0 = 1,02 \cdot 10^{-6}$ кг·с²/см⁴ — массовая плотность воды;

$c = 0,15 \cdot 10^8$ см/с — скорость звука в воде;

θ — характеристическое время, определяющее интенсивность падения давления в данной точке с течением времени для сферического заряда

$$\theta = 10^{-4} \cdot Q^{1/3} \left[\frac{H_0}{Q^{1/3}} \right]^{0,24} c, \quad (2.6)$$

для линейного заряда

$$\Theta = 10^{-4} \cdot q^{1/2} \left[\frac{H_0}{q^{1/2}} \right]^{0,45} \text{ с.} \quad (2.7)$$

где $H_0 = 1,5 Q^{1/4}$ — высота столба жидкости над зарядом, м. Размерность Q — в килограммах (кг), q — в килограммах на метр (кг/м).

Для случая, когда заряд БВВ расположен на расстоянии $H < 0,3 D_d$ над поверхностью заготовки, штамповка должна производиться рассредоточенным в плоскости, параллельной поверхности заготовки, зарядом, так как в изготовленном изделии может возникнуть область локальной деформации с большим утонением материала. В работе [16] рекомендована формула расчета массы плоского заряда для наиболее распространенного бризантного взрывчатого вещества — тротила (теплота взрыва 1000 ккал/кг ($4 \cdot 10^6$ Дж/кг) при механическом эквиваленте тепловой единицы, равном 427 кг·м/ккал ($1,07 \text{ Н} \cdot \text{м/Дж}$):

$$Q = \frac{A}{42,7 \cdot 10^6 \cdot \eta}, \quad (2.8)$$

где A — работа пластической деформации при формообразовании детали, кг·см; η — КПД передачи энергии взрыва к заготовке.

При штамповке деталей в установках с использованием энергии пороховых зарядов массу последнего определяют исходя из предположения, что деформация заготовки происходит под действием расширяющихся газов — продуктов сгорания. Выражение для ее расчета имеет следующий вид [16]:

$$Q = \frac{P(V_0 + V) + A(n-1)}{k f}, \quad (2.9)$$

где $P \cong \frac{2 \cdot \sigma \cdot S_0}{R}$ — среднее давление, потребное для деформации заготовки (деталь имеет форму сферического сегмента); σ — напряжение, возникающее в заготовке на конечной стадии штамповки детали; S_0 — толщина материала; R — радиус кривизны сферического сегмента; V_0 — первоначальный объем камеры сгорания; $V = \frac{\pi \cdot h}{6} (3a^2 + h^2)$ — объем, созданный при штамповке детали; h — глубина вытяжки детали; a — радиус (в плече) детали; $n = 1,2$ — показатель политропы; $k \cong 0,56$ — коэффициент, учитывающий потери энергии пороха вследствие теплоотдачи, срабатывания давления и др.; f — сила пороха, выражающая работу, которую могли бы совершить газы при сгорании 1 кг пороха, если их нагреть до температуры T и дать расшириться при их атмосферном давлении (табл. 2.6).

Значения силы порохов [16]

Пороха	Сила пороха \bar{f}	
	кг · см/кг	Дж/кг
Пирокселиновые	$7,7 \cdot 10^6 \dots 9,5 \cdot 10^6$	$75,46 \cdot 10^4 \dots 93,1 \cdot 10^4$
Нитроглицериновые	$9 \cdot 10^6 \dots 12 \cdot 10^6$	$89,18 \cdot 10^4 \dots 117,6 \cdot 10^4$
Дымные	$2,8 \cdot 10^6 \dots 3 \cdot 10^6$	$27,44 \cdot 10^4 \dots 29,4 \cdot 10^4$

При использовании в качестве энергоносителя горючей газовой смеси, сгорающей во взрывной камере в режиме детонации, для расчета развивающегося при этом давления используется формула, полученная в теории детонации:

$$P_{дв} = P_0 + \rho_0 u D_{н}, \quad (2.10)$$

где P_0 и ρ_0 — начальное давление и плотность газовой смеси; u — скорость продуктов детонации за фронтом ударной волны, за вычетом $D_{н}$ и L — длины взрывной камеры; $D_{н}$ — скорость детонации, для наиболее распространенных горючих газов (водород, ацетилен, пропан, метан) составляет 2800 ... 2200 м/с.

Давление детонационной волны, определяемое по формуле (2.10), возникает в результате комбинированного действия давления ударной волны сжатого слоя еще не реагирующей смеси и давления, образующегося в результате сгорания газовой смеси. Поскольку заготовка в начальный момент времени начинает движение от действия ударной волны, давление в последней приблизительно можно оценить по данным работы [16] как

$$P_{удв} \cong 2 P_{дв} \quad (2.11)$$

Исследования, проведенные различными учеными, показали, что давление, возникающее в результате детонационного сгорания газовой смеси, может превышать на два порядка давление исходной смеси. Практически в установках для газодетонационной штамповки газовые смеси используют под начальным давлением не выше 1,0 ... 1,5 МПа.

2.2.4. Определение формы и расположения зарядов

При штамповке деталей зарядами БВВ большое влияние на качество изделий имеет форма, а также расположение заряда над поверхностью заготовки. Заряды могут иметь форму цилиндра, сферы, шпура, пластины. Такое разнообразие формы заряда позволяет в каждом конкретном случае создавать нап-

более благоприятное для деформации заготовки силовое поле. Например, при штамповке деталей из листа целесообразно генерировать плоскую волну давления. Ее можно создать путем применения зарядов в форме пластины или ленты (шнура), уложенной в плоскости по спирали (кольцу). При калибровке пространственных замкнутых оболочек типа корпусов ускорителей, обтекателей удобно внутрь заготовки устанавливать опорный каркас, на который наматывается по спирали ленточный заряд. Создание наиболее рационального для конкретного случая силового поля влияет и на экономические показатели процесса. В работе [16] с этой точки зрения приводится пример, когда использование заряда из детонационного шнура, содержащего 0,3 кг взрывчатки, позволило получить эффект при штамповке детали типа днище, эквивалентный применению для этой цели сосредоточенного заряда массой 8,2 кг. Вопрос о влиянии расположения заряда БВВ над поверхностью листовой заготовки на качество отштампованной детали был освещен в п. 2.2.3 этой работы.

2.2.5. Определение радиуса вытяжной кромки матрицы

Получение качественной детали во многом зависит от конструкции оснастки и особенно от величины радиуса вытяжной кромки матрицы r_m . Исследованиями доказано, что давление заготовки на вытяжное ребро матрицы при взрывной штамповке в бассейне с использованием зарядов БВВ не выше, чем при традиционной штамповке. Это объясняется тем, что под действием силового поля в начальный момент времени заготовка начинает прогибаться в просе матрицы; возникающие при этом центробежные силы массы заготовки стремятся отбросить частицы металла по касательной к закруглению кромки матрицы — происходит как бы некоторая разгрузка кромки от давления заготовки. В общем случае величину радиуса закругления вытяжной кромки матрицы можно принимать по справочникам для статической штамповки. Вместе с тем в литературе имеются сведения об особенностях выбора величины r_m для взрывной штамповки в бассейне деталей со сферическим дном [16]. Для образования такого дна необходимо выдержать определенное равновесие сил, образующих сферическую форму дна, и сил, деформирующих фланец заготовки. Поскольку при такой схеме штамповки (жидкостным пуансоном по жесткой матрице) из-за анизотропии механических свойств материала заготовки и неодинаковых силах трения по всей поверхности вытяжной кромки легко возникает явление «утяжки», для поддержания указанного равновесия сил рекомендуется уменьшить величину r_m по сравнению со статической штамповкой в 1,5—2 раза.

2.3. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

При проектировании технологического процесса изготовления деталей взрывной штамповкой кроме расчета основных технологических параметров необходимо учесть и другие факторы, непосредственно влияющие на качество изделия. К ним относятся выбор смазки, не используемой при штамповке, применение межоперационной термической обработки, оценка возможной точности штамповки детали, конструктивные особенности оснастки, требования техники безопасности, охраны труда и окружающего пространства.

2.3.1. Выбор смазки

Импульсный режим нагружения заготовки при взрывной штамповке требует особых условий осуществления контактного трения между заготовкой и поверхностью матрицы. Научно обоснованный подбор смазки позволит в значительной степени снизить отрицательное воздействие на процесс штамповки вредных сил трения, предохранит поверхности изделия и матрицы от царапин, налупания металла и задиров. Общие рекомендации по выбору смазки для процессов обработки металлов давлением даны в монографии профессора Е. И. Исаченкова [10] и сформулированы в виде следующих требований.

1. Для заданных условий штамповки, определяемых геометрическими параметрами трущихся поверхностей, величиной контактного давления между деформируемой заготовкой и инструментом и скоростью их взаимного перемещения, смазка должна обладать строго определенными физико-механическими свойствами, в первую очередь — оптимальной вязкостью.

2. Смазки должны обладать хорошей адгезионной способностью и растекаемостью (создавать на поверхности слой равномерной толщины).

3. Смазка должна иметь определенные технологические свойства, позволяющие легко ею пользоваться в эксплуатации (стабильность свойств при хранении, простота нанесения и последующего удаления, безопасность применения).

Необходимо отметить, что точное определение оптимальной величины вязкости смазки затруднено из-за наличия большого количества факторов, влияющих на процесс штамповки изделия. В связи с этим в производственных условиях вид смазки обычно выбирают предварительно по таблицам, приведенным в справочниках [10, 14, 21], а затем ее состав уточняют экспериментальным путем при пробной штамповке. Аналитически, с определенными допущениями, оптимальную величину вязкости смазки можно рассчитать по формуле [14]

$$\eta_{\text{опт}} = \frac{\sigma_{\Sigma \text{ макс}} h}{k_1 v_0 s_0} \frac{A}{B} \quad (2.12)$$

где $\sigma_{\Sigma \text{ макс}}$ — максимальные контактные напряжения при штамповке заготовок на вытяжной кромке матрицы; h — толщина смазочного слоя; определяется экспериментально.

Для сферообразных, куполообразных деталей

$$\sigma_{\Sigma \text{ макс}} = \sigma_T k_1 s_0 \left\{ (1/r_m) + 0,87 [(1 - (k_1/k_2)) / (R_d + 0,14 R_{II})] \right\}, \quad (2.13)$$

для цилиндрических деталей значение $\sigma_{\Sigma \text{ макс}}$ увеличивается в 1,8 раз, для деталей коробчатой формы — в 2,5 раза.

Для различных значений $\sigma_{\Sigma \text{ макс}}$ толщина h ориентировочно составляет:

$\sigma_{\Sigma \text{ макс}}$, МПа	0..50	50..100	свыше 100
h , мм	~ 0,2	~ 0,4	~ 0,6

Значения коэффициентов A и B определяются из выражений

$$A = k_1 - k_2 \left(\ln \frac{R_{II}}{R_d + 0,14 r_m} + \frac{s_0}{2r_m + s_0} \right),$$

$$B = \frac{R_{II}^2 - (R_d + r_m)^2}{R_{II} s_0} + \frac{r_m^2}{(h + r_m)(h + 2r_m)}.$$

k_1 — коэффициент, учитывающий соотношение между максимальными меридиональными напряжениями и условным пределом текучести материала заготовки;

k_2 — коэффициент, учитывающий соотношение между средним сопротивлением деформированию заготовки на фланце и условным пределом текучести материала заготовки.

Ориентировочные значения коэффициентов k_1 и k_2 приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Коэффициенты k_1 и k_2 для различных материалов

Материалы	k_1	k_2
Магний и его сплавы	1,25	1,95
Алюминий и его сплавы	1,35	2,35
Сталь	1,55	2,95
Титан и его сплавы	1,65	2,55

При штамповке деталей в бассейне зарядами БВВ сферической, цилиндрической или конической формы средняя скорость деформирования составляет $v_0 = 40 \dots 65$ м/с; при использовании кольцевых зарядов $v_0 = 70 \dots 120$ м/с [16]. При изготовлении деталей в пороховых и газодетонационных устройствах величины v_0 можно принимать на уровне или чуть ниже приведенных значений. Значения $R_n = \frac{D_s}{2}$, $R_d = \frac{D_d}{2}$, $t_m \cong (3 \dots 5) s_0$ следует принимать в соответствии с рис. 2.4.

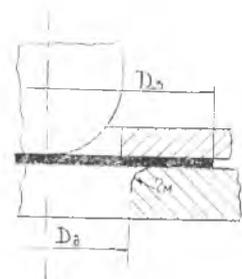


Рис. 2.4. Расчетная схема вытяжки куполообразных деталей

Численные расчеты, выполненные по формуле (2.12), показывают, что смазка при взрывной штамповке должна иметь вязкость весьма небольшой величины, менее 1-го Пуаза. По данным [16], при взрывной штамповке можно использовать в качестве смазки заготовок из алюминиевых сплавов 10-процентную водную мыльную эмульсию или вазелиновое масло. Для заготовок из других сплавов рекомендуется использовать приведенную в работе [10] номограмму и методику экспериментального определения вязкости нетрадиционных смазок.

2.3.2. Применение межоперационной термической обработки

В процессе любой холодной пластической деформации изменяются исходные свойства обрабатываемого материала. Причина этого явления заключается в нагартовке (наклепе) сплава в процессе штамповки заготовок, возникновении микропарушений структуры, появлении локальных микродефектов, которые в дальнейшем при эксплуатации изделия будут являться концентраторами внутренних напряжений. Нагартовка повышает прочностные характеристики материала (σ_b , σ_T , HRC_s), снижает пластические (δ , Ψ) и динамические (ударную вязкость — КС, склонность к трещинообразованию — КСТ) свойства, изменяет усталостную прочность, вязкость разрушения, коррозионную стойкость и другие исходные показатели. Способность сплава к выполнению формообразующих операций обработки металлов давлением (ОМД) оценивается его пластическими свойствами. При многооперационной штамповке после каждой операции ОМД необходимо снять нагартовку, т. е. восстановить исходные пластические свойства. Этого можно достичь путем введения в технологический процесс между операциями ОМД разупрочняющей термической обработки, например отжига заготовок. Пос-

кольку в большинстве случаев на летательный аппарат ставят детали из термоупрочняемых сплавов, окончательную (упрочняющую) термообработку наиболее целесообразно выполнять после последней формообразующей операции. Для ликвидации «поводки» детали от действия такой термообработки в технологический процесс необходимо ввести операцию калибровки детали. В некоторых случаях, например при изготовлении деталей из заготовок небольших толщин (до 1,2...1,5 мм), в технологическом процессе взамен калибровки можно предусмотреть подгонку (вручную) детали по оснастке, выполняемую на доводочном участке.

2.3.3. Точность отштампованных деталей

Качество изделий, получаемых взрывной штамповкой, главным образом зависит от величины прилагаемого к заготовке давления силового поля, конструкции и качества применяемой технологической оснастки. Методика определения давления была изложена выше. Необходимо отметить, что калибровочные операции выполняют под действием энергии, превышающей расчетное значение, необходимое для штамповки. Однако при этом необходимо помнить, что не всегда таким путем можно достичь повышения точности штамповки — при чрезмерно большом запасе энергии движущейся заготовки возможен ее «отскок» от поверхности жесткой матрицы.

В монографии [20] приведены примеры получения деталей взрывной штамповкой зарядами БВВ в бассейнах. Так, например, линза волновода диаметром 1980 мм и глубиной вытяжки 560 мм была отштампована из листовой алюминиевой (сплав типа АД33) заготовки толщиной 4,76 мм с точностью по контуру $\pm 0,178$ мм. В этой же работе указана точность штамповки таким же способом днищ эллиптического контура сечения диаметрами от 1020 до 1520 мм из нержавеющей высокопрочной стали толщиной от 2,03 до 3,81 мм:

- по диаметру — $\pm 0,13...0,25$ мм;
- по контуру сечения — $\pm 0,25...0,5$ мм.

В книге [3] на примере использования способа газодетонационной штамповки для изготовления оболочки носовой части ракеты из пространственной заготовки показана точность получения детали — в пределах 0,178...0,254 мм. Оболочка имеет длину 2134 мм, больший диаметр 787 мм, меньший диаметр 406 мм с переходом в цилиндрические пояски длиной 13 мм на переднем и заднем концах. Сопоставив точность деталей, например днищ, отштампованных с использованием энергии взрыва, с величиной допустимых предельных отклонений геометрических размеров таких деталей, указанных в табл. 2.2, можно сделать вывод о

несомненном преимуществе метода взрывной штамповки по сравнению с традиционными способами изготовления деталей данного класса.

Практическое освоение процессов взрывной штамповки выдвинуло ряд специфических требований к конструкции и качеству изготовления технологической оснастки. Вопросы проектирования, а также техники безопасности, охраны труда и окружающего пространства будут освещены в 3 и 4 разделах. Что касается требований к изготовлению оснастки, то их влияние на качество отштампованных деталей можно оценить тем, что малейшие неровности или даже капли воды на поверхности матрицы оставляют отпечаток на готовом изделии. Это заставляет особенно тщательно обрабатывать или облицовывать эпоксипластом рабочую поверхность матрицы, внимательно следить и поддерживать ее состояние и чистоту в процессе штамповки. Приведем

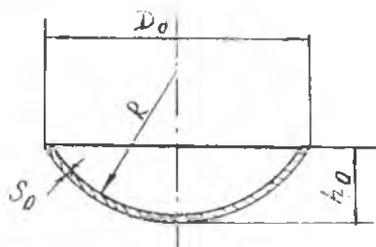


Рис. 2.5. Сферическое днище

пример разработки технологического процесса изготовления взрывной штамповкой детали типа «днище» (рис 2.5). Исходные данные: $D_d = 1920$ мм, $R = 1200$ мм, $h_0 = 500$ мм, $h_1 = 8$ мм, $s_0 = 4$ мм; допустимое утонение в центре детали — 25 %; материал — АМг6М; штамповать в бассейне зарядом БВВ.

Определим ширину фланца для прижима заготовки:

$$b = (0,025 D_d + k) = (0,025 \cdot 1920 + 18) = 66 \text{ мм.}$$

Суммарная глубина вытяжки

$$h_{\Sigma} = h_0 + h_1 + h_2 + r_m,$$

где $h_2 = 12$ мм — припуск на обрезку;

$r_m = 30$ мм;

$$h_{\Sigma} = 500 + 8 + 12 + 30 = 550 \text{ мм.}$$

Диаметр заготовки [14]

$$D_3 = \sqrt{d_2^2 + 4 h_{\Sigma}^2},$$

$$d_2 = D_d + 2(r_m + b) = 1920 + 2(30 + 66) = 2112 \text{ мм.}$$

$$D_3 = \sqrt{2112^2 + 4 \cdot 550^2} \approx 2381 \text{ мм.}$$

Ориентировочная степень деформации материала, необходимая для формообразования детали

$$\varepsilon_L = \frac{L_1 - L_0}{L_0},$$

где $L_0 = 1920$ мм;

$L_1 = \sqrt{D_d^2 + \frac{16}{3}h_d^2}$ — конечная длина образующей сечения детали [1],

$$L_1 = \sqrt{1920^2 + \frac{16}{3} \cdot 550^2} \cong 2302 \text{ мм};$$

$$\varepsilon_L = \frac{2302 - 1920}{1920} = 0,199.$$

Толщина материала в центре купола отштампованной детали

$$s_k = s_0 \cdot e^{-2\varepsilon_L} = 4,0 \cdot e^{-2 \cdot 0,199} = 2,68 \text{ мм}.$$

Минимально допустимая толщина материала детали по ТУ (с учетом возможного утонения) $s_k^{\text{дон}} = s_0 \cdot 0,75 = 4,0 \cdot 0,75 = 3,0$ мм.

С учетом того, что $s_k < s_k^{\text{дон}}$, деталь необходимо штамповать за несколько операций. Для этого применяем реверсивную схему вытяжки. Принимаем в первом приближении, что полное формообразование можно выполнять за две операции: на 1-й — произвести «набор» материала (80—90 % работы деформации формообразования детали), а на 2-й — «выворачивание» набранного купола и калибровку детали по матрице. Между операциями введем разупрочняющую термообработку. Окончательно количество операций вытяжки установим при экспериментальной обработке параметров техпроцессов.

Определим величину заряда БВВ [16]: для сферической формы заряда

$$Q = \left(\frac{a_{\text{сш}} s_0 H^{1,8}}{1 - \nu^2} \cdot N \right)^{0,8}.$$

Рассчитываем единичную работу деформации:

$$a_{\text{сш}} = \frac{k}{n+1} \cdot \varepsilon_L^{n+1} = \frac{57,4}{0,23+1} \cdot 0,199^{0,23+1} \cong 6,41 \text{ кг/мм}^2.$$

Значения коэффициентов N и $1 - \nu^2$ принимаем по табл. 2.5; расстояние от поверхности заготовки до центра заряда $H \cong D_d/2$, т. е. 1,0 м. После подстановки имеем

$$Q = \left(\frac{6,41 \cdot 0,4 \cdot 100^{1,8}}{0,824} \cdot 0,494 \cdot 10^{-6} \right)^{0,8} \cong 0,675 \text{ кг}.$$

Для упрощения расчетов на обеих операциях предполагаем использовать одинаковые по массе заряды аммонита $Q = 0,675$ кг. Примем следующий технологический план изготовления детали:

- вырезка заготовок из листов на фрезерном станке РФП-1;
- вытяжка детали на 1-й операции;
- отжиг;

вытяжка детали на 2-й операции;

доводка детали до чертежных размеров.

Для разработки рабочего техпроцесса каждый пункт плана заменяем на типовые технологические процессы выполнения указанных работ. При этом необходимо дополнительно использовать технические условия чертежа детали, действующие технологические инструкции и руководящие материалы по обработке и покрытиям данного сплава, типовую технологию контроля операций обработки, технические характеристики оборудования и оснастки, инструкции по технике безопасности, охране труда и окружающего пространства, тарифно-квалификационный справочник, нормативы времени на выполнение приведенных работ.

2.4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ

Известно, что задача нахождения наиболее рационального техпроцесса изготовления детали может быть решена многовариантным путем, в зависимости от выбранных критериев. В качестве последних принимаются технологические возможности способа деформирования, экономическая целесообразность, трудоемкость изготовления детали, себестоимость, материалоемкость, цикл и трудоемкость подготовки производства, особые требования по охране труда и окружающего пространства и др. На практике технолог, в большинстве случаев учитывая производственную обстановку, выбирает вариант техпроцесса по технико-экономическим критериям: возможности изготовления детали на имеющемся на предприятии оборудовании и минимум затраченных для этого средств. Последний критерий обычно характеризуется величиной приведенных затрат — суммой текущих и капитальных вложений, требуемых для осуществления данного техпроцесса:

$$Z_{пр} = C_d N_r + E_n K,$$

где C_d — себестоимость изготовления детали, руб.;

N_r — годовая программа выпуска деталей, шт.;

$E_n = 0,15$ — нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности;

K — капитальные вложения (для оценки варианта техпроцесса учитываются затраты на оборудование и технологическую оснастку), руб.

В опубликованной литературе стоимость оборудования учитывают для взрывной штамповки не приводится, поэтому для ориентировочных расчетов, проводимых при выборе варианта тех-

процесса, можно ограничиться сравнением величин технологической себестоимости деталей:

$$C_d = C_{мд} + C_{шд} + C_{нд} + C_{об-д} + C_{то-д},$$

где $C_{мд}$ — стоимость материала на одну деталь;

$C_{шд}$ — основная заработная плата производственных рабочих, выполняющих основные операции технологического процесса;

$C_{нд}$ — основная заработная плата наладчиков оборудования, отнесенная к одной детали;

$C_{об-д}$ — затраты на эксплуатацию оборудования, отнесенные к одной детали;

$C_{то-д}$ — расходы на изготовление и содержание технологической оснастки, отнесенные к одной детали.

Расчеты составляющих технологической себестоимости производят по традиционной методике, изложенной, например, в пособиях [19, 23]. Некоторые затруднения могут возникнуть из-за отсутствия нормативов времени на выполнение основных и вспомогательных операций взрывной штамповки. В этих случаях можно использовать следующую информацию.

Трудоемкость штамповки деталей из листовых заготовок на пороховых и газодетонационных установках принять равной трудоемкости штамповки таких деталей на листоштамповочных молотах.

Затраты времени на штамповку крупногабаритной детали (диаметром более 2,0 м) взрывом БВВ в бассейне составляют ~ 2,0 ч.

Трудоемкость работ по калибровке замкнутой оболочки диаметром $D \approx 400$ мм и высотой $H \approx 1200$ мм (головная часть корпуса ракеты) при использовании разъемной матрицы с гидравлическим прижимом и размещением заряда БВВ внутри детали, заполненной водой, составляет ~ 0,4 ч [20].

Объем доводки детали после взрывной штамповки снижается в 1,5—2,0 раза по сравнению с объемом доводки детали, полученной традиционным способом штамповки [2].

Стоимость технологической оснастки (матрицы и прижима) для взрывной штамповки можно ориентировочно определить, используя методику, приведенную в пособии [23].

3. ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОСНАСТКИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ

3.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКЕ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМ УСТРОЙСТВАМ

Взрывная штамповка является беспрессовым и высокоскоростным методом обработки листовых и трубчатых заготовок. Как было показано, сам процесс весьма прост и в зависимости от выбора типа энергоносителя, способа передачи давления и вида заготовки осуществляется с использованием упрощенной технологической оснастки на специальном несложном оборудовании. Он позволяет изготавливать детали любых размеров, создавая при этом практически неограниченные усилия. В зависимости от размеров и формы штампуемых деталей взрывная штамповка осуществляется различными способами: в бассейнах с водой или бронекерах — при больших габаритах деталей, в наземных специализированных установках — при небольших размерах деталей.

Существенным достоинством оснастки для взрывной штамповки является конструктивная простота и сравнительно невысокая стоимость. По внешнему виду оснастка для взрывной штамповки напоминает оснастку, применяемую при штамповке на прессах. Оснастка для взрывной штамповки обычно состоит из матрицы при штамповке на вытяжку или пуансона при штамповке на обжим, устройств для прижима заготовки, вакуумирования полости матрицы и крепления заряда ВВ. Таким образом, из классической пары пуансон-матрица во взрывной штамповке используется только один элемент. Это обстоятельство значительно снижает стоимость оснастки и дает возможность ускорить процесс подготовки производства.

Важным элементом в оснастке, определяющим качество изделия, является матрица (пуансон). По своей конструкции матрицы могут быть цельными или разъемными, а также составными, матрица имеет рабочую полость соответствующей формы и отверстия для удаления воздуха.

Для изготовления большого количества деталей из толстолистовых заготовок применяются стальные или чугунные мат-

рицы; в мелкосерийном или опытном производстве, а также при штамповке тонколистовых деталей из материала невысокой прочности — матрицы из цинка, железобетона с пластмассовой облицовкой рабочего контура, льда с наполнителями, дерева. Требования, предъявляемые к прочности матрицы, определяются массой заряда, расстоянием между зарядом и заготовкой, свойствами и размерами обрабатываемой детали, ее формой, требуемыми допусками. Кроме того, при выборе материала матрицы учитывают количество намеченных к изготовлению деталей. Вне зависимости от сложности детали и количества операций взрывная штамповка производится, как правило, в одном штампе. Специфическим требованием, предъявляемым к оснастке для взрывной штамповки, является герметичность полости между заготовкой и рабочей поверхностью матрицы, возможность быстрого удаления воздуха из этой полости и создание вакуума [6, 26].

Оборудование для штамповки подразделяется на основное и вспомогательное. К основному относятся бассейны для гидровзрывной штамповки, разовые емкости, различные взрывные бронеканеры для штамповки, сварки и упрочнения металла, специализированные установки, а также устройства для удаления воздуха из полости матриц и вакуумных камер. Вспомогательное оборудование — это устройства для подъема и транспортировки заготовок, деталей и оснастки, для сборки и разборки матриц, разовых емкостей и вакуумных камер и т. п.

Опыт взрывной штамповки в бассейнах показал, что процесс может быть осуществлен в помещении, если вес зарядов БВВ не превышает 200 г. Большой заряд вызывает сильные колебания грунта, разрушающие здание цеха, и мощный выплеск воды. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к установкам для безбассейновой штамповки, является создание легких и прочных каркасов этих установок [17].

При безбассейновой штамповке КПД взрыва не имеет такого большого значения, как при штамповке в бассейне. Увеличение заряда при взрыве в бассейне вызывает повышенные колебания и необходимость утолщения стенки бассейна, что увеличивает стоимость последнего. Поэтому естественно стремиться к уменьшению веса заряда путем создания процессов с высоким КПД. Увеличение заряда БВВ в разумных пределах мало отражается на прочности специализированных установок и бронеканер для безбассейновой штамповки, поэтому с учетом низкой стоимости БВВ (20...30 к. за кг) целесообразно переходить на штамповку по схеме с низким КПД.

3.2. ТИПОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ОБРАЗЦОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ

В настоящее время наибольшее применение получила гидровзрывная штамповка с использованием воды в качестве среды, передающей давление от заряда ВВ к заготовке [9, 26].

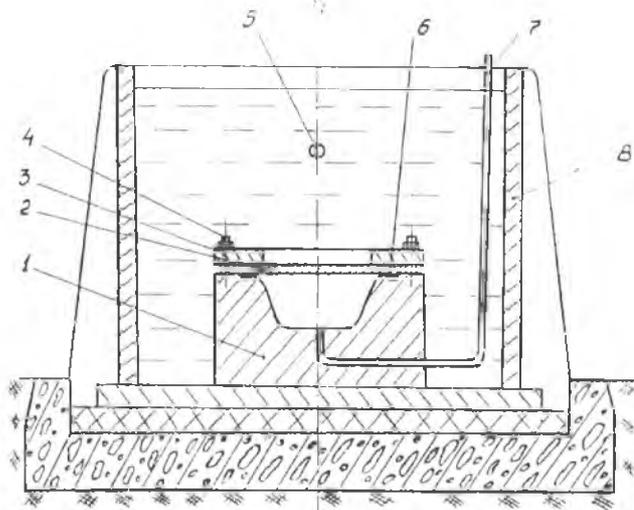


Рис. 3.1. Стационарный металлический бассейн с матрицей для штамповки с предварительным вакуумированием: 1—корпус матрицы, 2—заготовка, 3—прижимное кольцо, 4—болт-прижим, 5—заряд ВВ, 6—уплотнительное кольцо, 7—вакуумная система, 8—металлический бассейн

На рис. 3.1 показана типовая (цельная) матрица для штамповки в воде, которая установлена в цилиндрическом металлическом бассейне. Матрица состоит из корпуса, на который укладывается заготовка. Сверху заготовка прижимается жестким прижимным кольцом, которое крепится при помощи болтового, клинового или какого-либо другого соединения. При применении предварительного вакуумирования для герметизации используются резиновые прокладки. В случаях, когда штамповка осуществляется без предварительного вакуумирования, герметизация рабочей полости матрицы от воды достигается с помощью густой смазки. Прижимные кольца применяются для предотвращения складкообразования (сморщивания) металла заготовки во фланцевой части и частичного регулирования степени вытяжки.

Конструкция цельнолитой стальной матрицы для штампов-

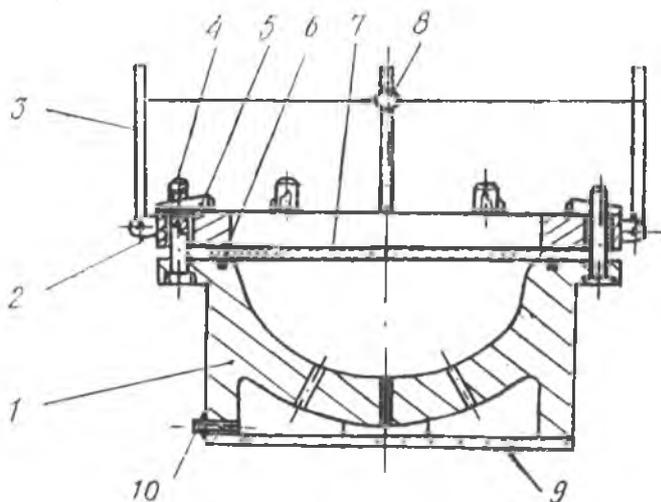


Рис. 3.2. Цельнолитая матрица для гидровзрывной штамповки деталей типа днищ: 1—матрица, 2—прижимное кольцо, 3—стойка для подвески ВВ, 4—болт, 5—клин, 6—уплотнительное кольцо, 7—плоская заготовка, 8—заряд ВВ, 9—днище воздухозаборника, 10—штуцер

ки деталей типа «днище» представлена на рис. 3.2. Основными частями матрицы являются вытяжное кольцо или ребро, формирующая рабочая полость, определяющая размеры и форму готовой детали, и воздухозаборник с днищем, в которой через отверстия в стенках матрицы вытесняется воздух из-под движущейся заготовки. Удаление воздуха в процессе штамповки путем его вытеснения самой заготовкой применяется лишь в редких случаях — при формоизменении деталей из толстолистового металла. Кратковременность процесса взрывного деформирования приводит к тому, что воздух, как правило, не успевает вытесниться из матрицы, что порождает недоштамповку детали. Чтобы избежать брака деталей, а также уменьшить нагрузку на матрицу, перед штамповкой с помощью вакуумного насоса, присоединяемого к штуцеру, применяется принудительное удаление воздуха из-под заготовки. Заряд ВВ над заготовкой, уложенной в матрицу, обычно привязывается к стойкам, закрепленным на прижимном кольце или фланце матрицы. Стойки выполняют откидывающимися на осях для предотвращения их разрушения при взрыве.

Заряды ВВ для штамповки деталей типа «днище» необходимо располагать строго по центру заготовки, что делает уста-

новку заряда довольно трудоемкой операцией. Производительнее установка заряда на поплавок с креплением поплавка к прижимному кольцу или центру заготовки с помощью гибких не растяжимых связей фиксированной длины.

Цельнолитые матрицы для штамповки крупногабаритных деталей имеют ряд существенных недостатков, к которым следует отнести трудоемкость литья и термообработки, необходимость применения в ряде случаев уникального оборудования для механической обработки матриц, большой вес и трудоемкость их транспортировки.

Этих недостатков лишены составные матрицы (рис. 3.3). Такие матрицы выполняют из отдельных элементов: формирующей

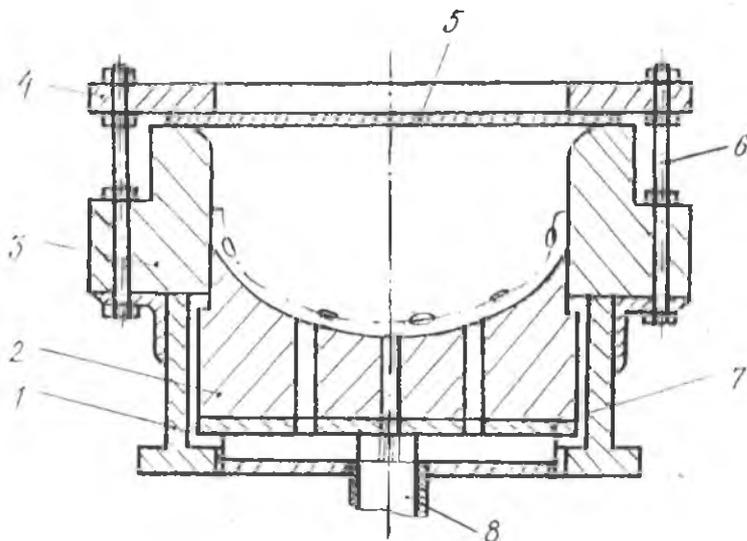


Рис. 3.3. Типовая составная матрица для гидровзрывной штамповки деталей типа днищ: 1—корпус матрицы, 2—вставка, 3—вытяжное кольцо (ребро), 4—прижимное кольцо, 5—заготовка, 6—прижимное устройство, 7—днище матрицы с ребрами, 8—воздухопровод

полости матрицы в виде вставки из металла или какого-либо неметаллического материала, входящей в металлическое вытяжное кольцо, на котором перед штамповкой размещают заготовку. Металлическое вытяжное кольцо (ребро) изготавливается отдельно и крепится к фланцу корпуса матрицы. Прижимное кольцо может выполняться из отдельных секций.

Один из вариантов конструкции составной матрицы— пакетного типа— представлен на рис. 3.4 и основан на применении набора плоских пластин, стянутых между собой болтами и меха-

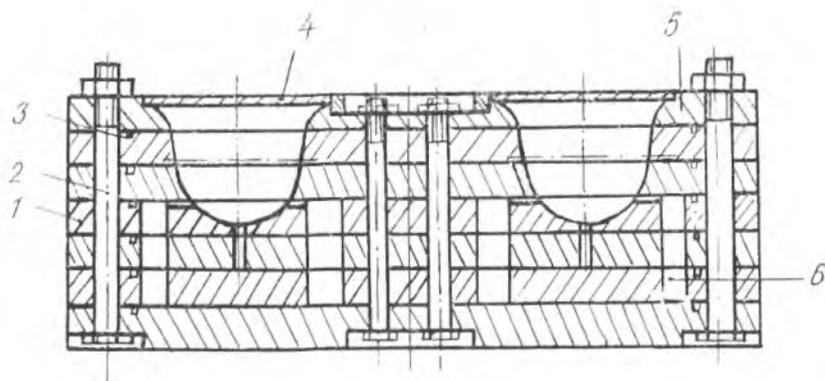


Рис. 3.4. Составная матрица пакетного типа: 1—пластина, 2—болт, 3—резиновая прокладка, 4—заготовка, 5—вытяжное кольцо, 6—воздухосборник

нически обрабатываемых вместе. Для герметизации между пластинами прокладывают резиновые прокладки. Пластины, составляющие пакетную матрицу, изготавливают из листового проката или поковок, что обеспечивает матрице высокую прочность.

Для штамповки деталей значительной толщины применяют также стальные матрицы, имеющие сплошное вытяжное кольцо и формующую полость, состоящую из отдельных ребер, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии и соединенных с помощью сварки. С целью защиты металлических матриц от коррозии при гидровзрывной штамповке рекомендуется наносить на поверхность коррозионностойкую пленку в виде смазки из специального состава и вводить в воду ингибитор коррозии.

В мелкосерийном и опытном производстве применяют матрицы из легкоплавких металлов и сплавов, например из цинкового сплава. Такие матрицы просты в изготовлении, легко переплавляемы. Железобетонные матрицы также просты и менее трудоемки, кроме того, дешевле и менее металлоемки по сравнению с цельнометаллическими.

Как указывалось, матрицы для гидровзрывной штамповки изготавливают из льда. Такие матрицы дешевы и просты в изготовлении, их легко реставрировать. На рис. 3.5 показана ледяная матрица с наполнителем из древесной стружки (опилок). Конструкция матрицы состоит из металлического вытяжного кольца и сварного корпуса, в котором находится смоченная водой и замороженная древесная стружка. Матрицы, рабочая полость которых изготовлена из льда с наполнителем из опилок, стружки или шамотового песка, могут применяться для изготовления деталей в количестве от нескольких штук до нескольких десятков. Хранятся матрицы в специальных рефрижераторах.

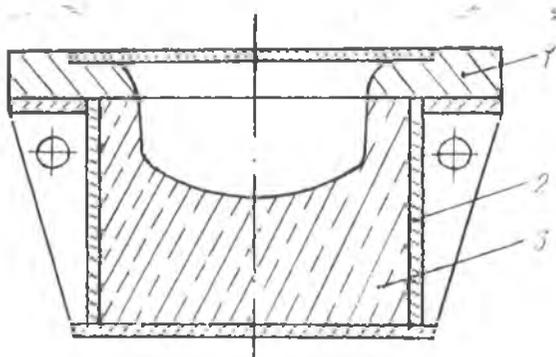


Рис. 3.5. Матрица с формирующей полостью из льда:
1—вытяжное кольцо, 2—корпус, 3—часть матрицы
из льда

Иногда для штамповки небольших партий тонколистовых деталей из невысокопрочных металлов, требующих применения заряда ВВ малой величины, корпуса матриц изготавливают из деревянных брусков или балништа.

Основной частью у большинства существующих установок для гидровзрывной штамповки является бассейн — цельнометаллический или железобетонный с металлической облицовкой. Корпус металлического бассейна изготавливается из углеродистой стали (см. рис. 3.1). Толщина его стенки определяется путем расчета на прочность: стенка должна выдерживать давление максимального заряда ВВ, применяемого в процессе штамповки, без следов остаточной деформации. Диаметр бассейна определяется габаритными размерами штамповой оснастки, которые, в свою очередь, зависят от размеров и материала штампуемых деталей. Обычно внутренний диаметр бассейна в 2...3 раза превышает габаритные размеры штампуемых деталей. Глубина бассейна должна обеспечивать определенную высоту столба воды над заготовкой и зарядом ВВ.

Металлические бассейны либо устанавливают выше уровня земли на бетонный фундамент, либо заглубляют в грунт и опускают в бетонированные ямы. При этом пространство между стенками металлической емкости и бетонированной ямы засыпают песком. Между дном металлического бассейна и бетонной ямы обычно помещаются амортизирующие материалы (резина, древесина и др.)

Однако намного чаще на существующих производственных участках и в цехах для гидровзрывной штамповки крупногабаритных

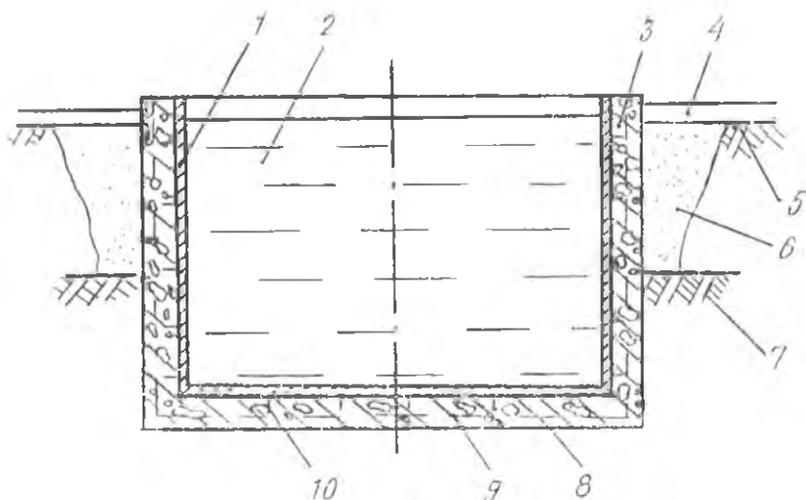


Рис. 3.6. Цилиндрический железобетонный бассейн для гидровзрывной штамповки: 1—стальная облицовка, 2—вода, 3—железобетонная стенка бассейна, 4—лоток, 5—рыхлый грунт, 6—засыпка из песка, 7—твердый грунт, 8—стальное днище, 9—железобетонное основание, 10—якорные болты

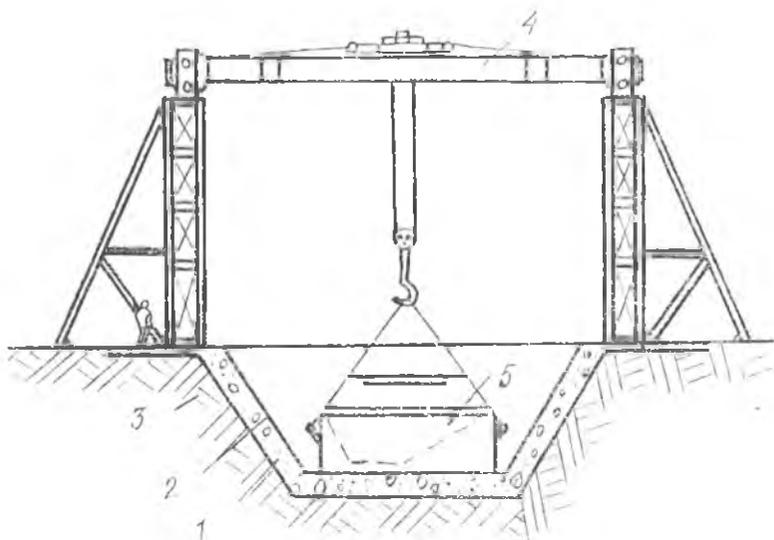


Рис. 3.7. Конический бассейн для гидровзрывной штамповки; 1—стенка бассейна, 2—металлическая облицовка, 3—грунт, 4—подъемное устройство, 5—штамп

деталей применяют заглубленные в грунт железобетонные бассейны с металлической облицовкой (рис. 3.6). Металлическая облицовка бассейна жестко связана с бетонными стенками, она защищает их от воздействия взрыва и предотвращает попадание в воду частиц бетона. С целью защиты от коррозии на поверхность стальной облицовки наносятся специальные покрытия. Глубину бассейна обычно принимают в пределах 0,7...1,0 от размера его диаметра.

Бассейны, заглубленные в грунт, могут иметь не только цилиндрическую, но и коническую форму (рис. 3.7). Такие бассейны более дороги, но лучше противостоят действию ударной волны, что делает их применение целесообразным при штамповке крупногабаритных деталей. Чтобы ослабить действие ударной волны, дополнительно облицовывают стенки бассейна резиной и другими материалами, а также применяют специальные устройства, создающие перед стальной облицовкой завесу из пузырьков воздуха. Бассейны такого типа долговечны и позволяют применять более мощные заряды.

Перечисленные средства защиты позволяют существенно снизить напряжения, возникающие в стенках бассейна, и, следова-

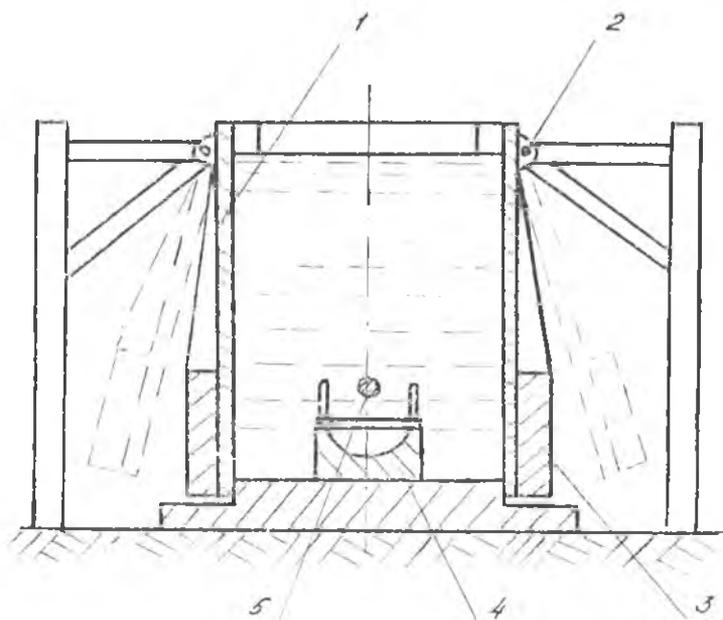


Рис. 3.8. Разъемный бассейн для гидровзрывной штамповки: 1—секция бассейна, 2—ось секции, 3—груз секции, 4—матрица, 5—заряд ВВ

тельно, уменьшить их толщину— вследствие этого уменьшается и стоимость бассейна.

Известны также конструкции разъемных металлических бассейнов, составные части которых разлетаются при взрыве (рис. 3.8). Бассейн состоит из отдельных секций, стыкуемых в вертикальной плоскости. Верхние части этих секций установлены на осях, а нижние снабжены грузами, масса которых рассчитывается так, чтобы стенки бассейна выдерживали, не расходясь в стороны, массу заполняющей его воды. На дне бассейна размещена матрица. При взрыве заряда ВВ под действием ударной волны секции расходятся в стороны, поворачиваясь вокруг осей на определенный угол, зависящий от массы грузов, после чего возвращаются в исходное положение. Описанную конструкцию можно применять не только как самостоятельный бассейн, но и как устройство, предохраняющее от разрушения стенки стационарного бетонного бассейна, так как разъемные секции с грузами принимают на себя основную часть энергии ударной волны. Опускание матрицы на дно и ее извлечение из бассейна с водой осуществляется обычно с помощью мостовых и других подъемных кранов, тельферов и т. п.

Находят применение также бассейны для гидровзрывной штамповки, оснащенные плавучими площадками, предназначен-

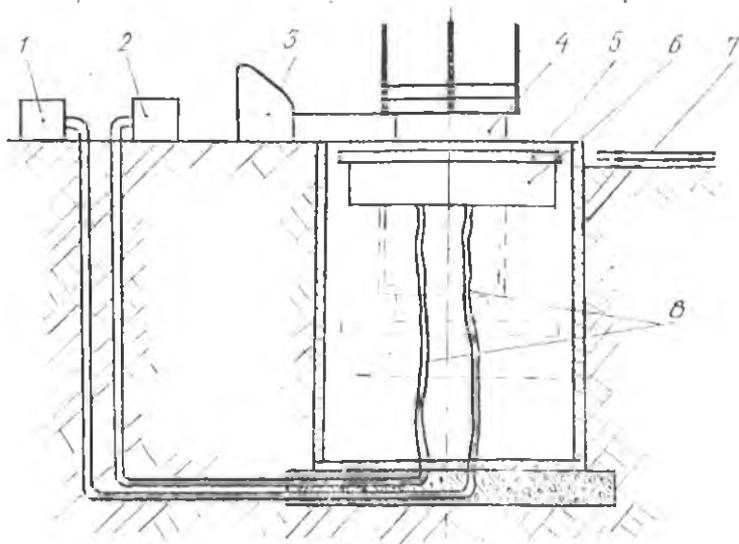


Рис. 3.9. Схема использования плавучей площадки для опускания матрицы в бассейн: 1—насос для подачи воздуха, 2—насос для подачи воды, 3—лебедка, 4—матрица, 5—плавучая площадка, 6—полая камера, 7—бассейн, 8—соединительные шланги

ными для установки матриц и опускания их в воду на заданную глубину (рис. 3.9). Такая площадка имеет полую камеру, соединенную шлангами с насосами, один из которых служит для подачи воздуха, а другой — воды. Перед штамповкой матрицу устанавливают на площадку с помощью лебедки, затем насосом подают в камеру воду до тех пор, пока площадка не погрузится в бассейн на заданную глубину. После взрыва заряда ВВ вода из камеры вытесняется воздухом, который подается другим насосом, в результате чего площадка всплывает на поверхность воды в бассейне.

Для гидровзрывной штамповки деталей относительно небольших габаритов и толщины в условиях опытного и мелкосерийного производства используют переносные установки наземного типа со съемными емкостями (рис. 3.10), которые устанавливают на матрицу с уложенной на нее заготовкой. В этом случае водой заполняется только съемный бак, внутри которого осуществляется взрыв заряда.

При штамповке деталей незамкнутого контура, а также из труднодеформируемых металлов с нагревом в качестве среды, передающей давление от заряда ВВ к заготовке, применяется песок (рис. 3.11).

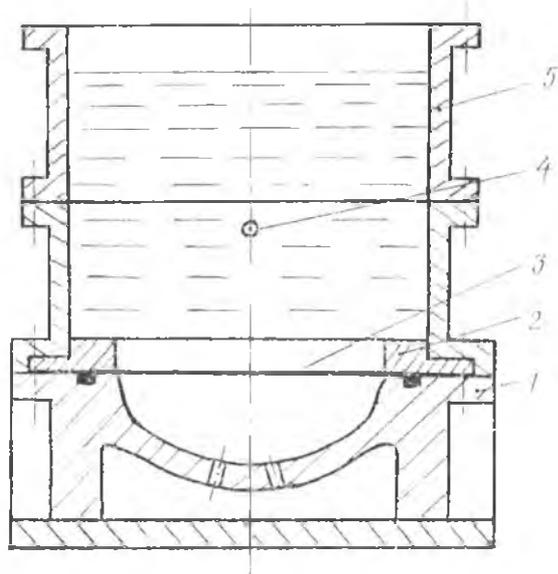


Рис. 3.10. Переносная установка для взрывной штамповки со съемными емкостями: 1—матрица, 2—прижимное кольцо, 3—заготовка, 4—заряд ВВ, 5—съемная емкость

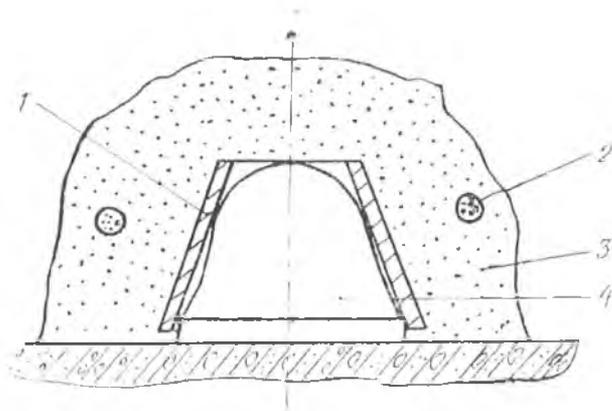


Рис. 3.11. Схема взрывной штамповки в песке: 1—заготовка, 2—заряд ВВ, 3—песок, 4—пуансон

Пуансон с уложенной на него заготовкой засыпается песком, в котором осуществляется взрыв заряда ВВ. Для проведения таких процессов, как и для гидровзрывной штамповки крупногаба-

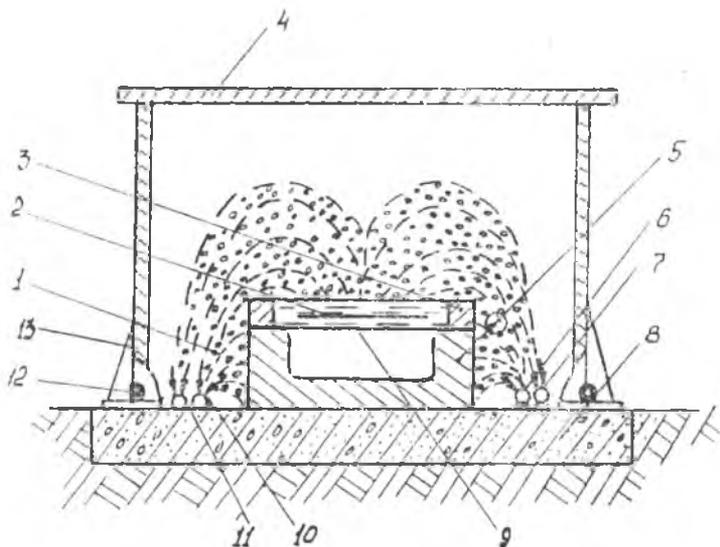


Рис. 3.12. Установка для гидровзрывной штамповки с использованием съемной емкости малой глубины, водяной завесы и подвижной бровекамеры: 1—водяная завеса, 2—плоский заряд ВВ, 3—прижимное кольцо, 4—крышка камеры, 5—матрица, 6 и 7—внутренний и внешний коллекторы, 8—фундамент, 9—заготовка, 10 и 11—форсунки, 12—колеса, 13—стенка камеры

ритных деталей с помощью мощных зарядов ВВ, применяют разовые емкости, разрушаемые при взрыве. Изготавливаются они из картона, фанеры, полиэтилена, тонколистового металла и других материалов, которые должны, имея по возможности низкую стоимость, обеспечивать прочность емкости, достаточную для удержания заполняющего ее песка или воды.

В некоторых случаях съемные бассейны выполняются как одно целое с прижимным кольцом матрицы. Если для штамповки используются плоские заряды листовых ВВ, то емкость может служить само кольцо, но его толщину следует увеличить. Такая конструкция емкости в специальной установке часто снабжается устройством для создания водяной завесы над заготовкой в момент взрыва заряда ВВ (рис. 3.12). В этой установке матрица с прижимным кольцом и плоским зарядом ВВ поставлена на фундамент. Вокруг матрицы расположены внутренний и внешний коллекторы с форсунками. За несколько секунд до взрыва в форсунки коллекторов подается вода, образующая водяную завесу над зарядом и заготовкой.

Применение бассейнов наряду с известными преимуществами имеет недостатки. Строительство бассейнов, особенно больших размеров, требует большого объема земляных и бетонных работ, а эксплуатация связана с применением мощных грузоподъемных средств. Кроме того, одним из недостатков штамповки в бассейнах является возможность повреждения близко расположенных зданий и сооружений под воздействием сейсмических волн. Отмеченные недостатки можно устранить при переходе на безбассейновую штамповку. Безбассейновая взрывная штамповка с использованием разрушаемых или съемных емкостей может проводиться на открытых площадках и в специальных бронекамерах стационарного и подвижного типа (см. рис. 3.12). Стенки бронекамеры изготавливаются из листового металла толщиной, обеспечивающей способность камеры противостоять воздействию воздушной ударной волны при взрыве. Стационарные бронекамеры устанавливаются в цехе или на открытой площадке. В их стенках предусмотрены двери. Для удаления из бронекамеры продуктов взрыва создана система интенсивной вентиляции. Подвижная бронекамера (см. рис. 3.12) может передвигаться на колесах по специальным желобам или рельсам. Она представляет собой металлическую коробку с боковыми стенками и крышкой. Крышка камеры подвижна и смонтирована так, что может при взрыве перемещаться вверх на 30...50 мм, поглощая при этом часть энергии ударной волны. Гашение воздушной ударной волны осуществляется также сплошной завесой из водяных струй.

Для снижения звукового эффекта и сейсмического действия

варыва на окружающие сооружения штамповку можно производить в вакууме. Матрица с заготовкой и зарядом устанавливается в специальную камеру, которая перед взрывом вакуумируется.

Большое распространение получила штамповка с использованием пороха и газовых смесей, которые применяются в промышленности как для непосредственного деформирования листового металла, так и для приведения в движение рабочего инструмента в высокоскоростных машинах. В отличие от других видов высокоэнергетической обработки взрыв пороховых и газообразных энергоносителей осуществляется в замкнутых герметичных камерах. Штамповка на пороховом энергоносителе осуществляется обычно на пресс-пушках (рис. 3.13). Деформирование заготовки, находящейся на матрице, осуществляется давлением жидкости, в которую с большой скоростью внедряется блок-снаряд, движущийся по каналу ствола под действием давления пороховых газов от порохового заряда. Заряд пороха воспламеняется от капсуля при спуске ударного механизма.

Пресс-пушка применяется для изготовления деталей операциями обжима и раздачи из грубчатых заготовок, а также для штамповки и калибровки листовых деталей. В качестве среды, передающей давление от снаряда к деформируемой заготовке, в пресс-пушках используется в основном вода. Однако в большинстве случаев более технологично применение плотных передающих сред, позволяющее отказаться от уплотнения заготовок в матрицах, облегчающее установку заготовок и удаление готовых деталей, а также устраняющее возможность коррозии металлических частей установки и технологической оснастки.

Штамповка взрывом газовых смесей применяется для изго-

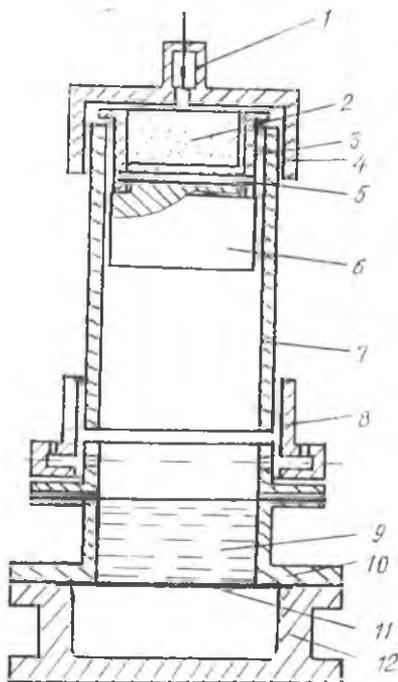


Рис. 3.13. Пресс-пушка на пороховом энергоносителе: 1—ударный механизм, 2—пороховый заряд, 3—патронник, 4—затвор, 5—чека, 6—снаряд, 7—ствол, 8—муфта, 9—жидкость (вода), 10—переходник, 11—заготовка, 12—матрица

товления деталей из листовых плоских, цилиндрических и конических заготовок. В качестве энергоносителя чаще всего используется смесь кислорода с водородом или природным газом (метаном). Этот метод штамповки по сравнению со штамповкой с использованием порохового энергоносителя характеризуется более низкими энергетическими возможностями, но отличается простотой, дешевизной, безопасностью, а также тем, что обеспечивает равномерное распределение давления на штампуемую заготовку. Вследствие этого применение указанного способа в некоторых случаях более предпочтительно по сравнению со штамповкой взрывом бризантных ВВ.

В нашей стране разработаны установки, в которых взрыв газовой смеси осуществляется с помощью предварительно полученной детонационной волны в трубе.

Установка для штамповки деталей типа «дныше» взрывом газовой смеси (97 % метана + 3 % кислорода), как показано на рис. 3.14, состоит из взрывной камеры, имеющей форму усечен

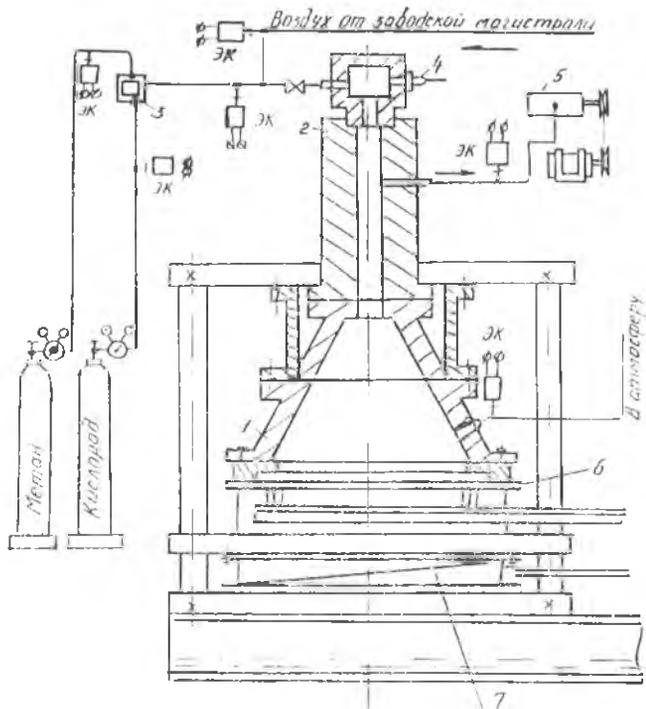


Рис. 3.14. Установка для штамповки деталей типа «дныше» взрывом газовой смеси: 1—взрывная камера, 2—цилиндрическая труба, 3—смеситель, 4—свеча зажигания, 5—вакуум-насос, 6—матрица, 7—клиновой механизм

ного конуса, и толстостенной цилиндрической трубы, предназначенной для инициирования плоской детонационной волны. Матрица с заготовкой устанавливается на плиту, подается в рабочую зону установки и прижимается к основанию взрывной камеры с помощью клинового механизма. Перед пуском рабочей смеси взрывную камеру вакуумируют с помощью вакуум-насоса. После заполнения взрывной камеры рабочей смесью осуществляется воспламенение смеси электрической искрой от свечи зажигания. По мере распространения горения газовой смеси по трубе возникает движущаяся со скоростью 2500 м/с детонационная волна, которая из трубы переходит в коническую полость камеры и воздействует на заготовку, вызывая ее деформацию.

4. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЛАНИРОВКЕ УЧАСТКОВ, ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧИХ МЕСТ И ОБЕСПЕЧЕНИЮ ОХРАНЫ ТРУДА ПРИ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКЕ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Процесс взрывной металлообработки осуществляется на специализированных участках как открытого, так и закрытого типа [26]. В настоящее время в отечественной промышленности разработаны различные схемы организации типовых участков для взрывной штамповки. Примерный перечень решаемых вопросов организации и планировки таких участков следующий:

подбор номенклатуры изделий, подлежащих взрывной штамповке;

отбор изделий с наибольшими габаритами;

расчет максимального веса заряда;

выбор типа установок для взрывной штамповки;

проектирование и расчет на прочность установок;

выбор типа оснастки;

определение степени механизации и подбор номенклатуры средств ее осуществления;

оборудование участка подъемно-транспортными средствами;

выбор типа участка и определение потребности в помещениях для основных и вспомогательных служб;

планировка и проектирование участка;

разработка мероприятий по обеспечению техники безопасности.

Решающим фактором в выборе номенклатуры и количества типов деталей, переводимых на новый технологический процесс, является оснащенность заготовительно-штамповочного производства предприятия по выпуску летательных аппаратов прессовым и штамповочным оборудованием — мощными гидравлическими прессами, листоштамповочными молотами, обтяжными прессами, — а также степень его загрузки.

При подборе номенклатуры для перевода на взрывную штамповку в первую очередь выявляют и включают в список детали и изделия из высокопрочных металлов и сплавов сложной конфигурации или требующие для своего изготовления комплекса таких операций, как вытяжка, отбортовка, просечка, загибка, пуклевка и т. д.

Для определения габаритов специализированных установок для взрывной штамповки: бассейны в земле, съемные и разъемные бассейны, бронеканеры, вакуум-камеры, установки закрытого типа и др.—проводится отбор и анализ деталей с наибольшими габаритами, выявляются исходные данные к их проектированию. Для типовых деталей определяется потребный вес заряда. Наибольший вес заряда не должен превышать 1..2 кг БВВ, так как в противном случае усложняется конструкция установок. Если потребный вес заряда окажется большим, то выгоднее переходить на многоимпульсную штамповку, формообразуя деталь за несколько последовательных взрывов. Наибольший вес будет положен в основу расчета на прочность установок для взрывной штамповки.

При выборе установки необходимо также предусматривать, для какого типа участка — открытого или закрытого — она предназначена. Для помещения пригодны бронеканеры подвижные и стационарные, вакуум-камеры, установки для горячей штамповки и комбинации стационарной бронеканеры с вакуум-камерой. Эти же установки, кроме установок для горячей штамповки, могут использоваться и на открытом полигоне. На полигоне или открытом участке закладывается обычно также несколько фундаментов для проведения взрывной штамповки экспериментальных деталей и изделий, выпускаемых малыми партиями, в разных бассейнах.

Проектирование и расчет на прочность установок проводят с учетом специфических особенностей динамического нагружения. Специфичность нагрузок, создаваемых взрывом, накладывает определенный отпечаток и на конструкцию установок. При выборе типа оснастки для конкретного участка взрывной штамповки и определенных деталей главное внимание уделяют стойкости оснастки и степени трудности ее изготовления. Часто бывает выгоднее, особенно для крупногабаритных деталей и изделий, использовать менее стойкую цинковую оснастку вместо более прочной, но зато трудноизготавливаемой, стальной.

Механизация взрывной штамповки является основной проблемой, от успешного решения которой зависит дальнейшее развитие этого технологического процесса. Штамповка безбассейновым способом открывает неограниченные возможности для осуществления механизации, главным образом, из-за малых нагрузок, передаваемых взрывом на оснастку через газоводяную среду. В настоящее время для прижима фланца заготовки к матрице широко используются гидропневматические зажимы, для подъема и опускания прижимной плиты используются гидравлические подъемники. Трудный и далеко не решенный воп-

рос — механизация установки заряда ВВ. В этом плане предстоит большая исследовательская работа.

Для осуществления грузоподъемных и транспортных операций участок взрывной штамповки оборудуется различными подъемно-транспортными средствами. На открытых участках применяются козловые краны и электротали, на закрытых — мостовые краны и кран-балки. Перемещение подвижных бронекламер производится специальными лебедками. Для транспортировки оснастки, заготовок и готовых изделий по территории взрывного участка и заготовительно-штамповочного цеха используются авто- и электрокары, автомашины, тягачи, автопогрузчики. Грузоподъемность подъемно-транспортного оборудования подбирают в соответствии с наибольшим весом оснастки и изделий.

В зависимости от конкретных условий и возможностей предприятия, наличия степени потребности во взрывной штамповке решается вопрос о типе участка — открытый или закрытый, закрытый цех. Номенклатура помещений для участка любого из типов приблизительно одинакова. Разница только во взаимной компоновке и размерах.

Для создания нормального производственного процесса изготовления листоштамповочных изделий необходимо иметь склад листового металла, заготовительный участок, где производится раскрой листа и изготовление трубчатых заготовок, термический участок для производства предварительной, промежуточной и окончательной термообработки заготовок и изделий, участок окончательной доводки изделий после штамповки взрывом.

Необходимы также производственный участок изготовления оснастки, включая литейный участок для отливки цинковых штампов, и склад хранения оснастки. Участок может обслуживаться по всем подготовительным работам заготовительно-штамповочным цехом предприятия и входить в него неотъемлемой частью.

Помещения, которые образуют взрывной участок, следующие: помещение или открытое место, где расположены установки, в которых осуществляется взрывная штамповка (бронекламеры, вакуум-камеры и т. д.), и соответствующее подъемно-транспортное оборудование. Если помещение закрытое, то в нем же, за перегородками, могут быть размещены другие установки — гидродинамические прессы-пушки, установки для горячей взрывной штамповки с электрическими и газовыми печами, установки для электрогидравлической и магнитно-импульсной штамповки;

помещение и площади для работы с ВВ, для их хранения (суточного запаса БВВ и средств инициирования) — комната для подготовки зарядов ВВ, пультавая с оборудованием пультом.

убежище для укрытия обслуживающего персонала в момент взрыва;

насосное отделение, где устанавливается вакуум- и гидронасосы, водоотделитель для очистки воздуха, поступающего в гидронасос;

вентиляционная камера с вентиляционной системой, обеспечивающей нижний отсос продуктов детонации;

технологические площадки для сборки и разборки осколки, площадки суточного запаса заготовок и складывания готовых изделий;

бытовые помещения, площадки с запасными емкостями для воды.

Расходный склад ВВ и электродетонаторов располагается в отдельном помещении на определенном расстоянии от места производства взрывов.

Важным мероприятием в процессе планировки и проектирования участка для взрывной штамповки является выбор территории для размещения участка. Выбор территории определяется наибольшими размерами штампуемых деталей, максимальным весом используемых зарядов, количеством хранящихся на территории участка взрывчатых веществ и средств инициирования, масштабом производства и наличием расположенных вблизи производственных, жилых и других сооружений. Территорию участка открытого типа обносят оградой высотой не менее двух метров. В ограде со стороны дороги изготавливают ворота и калитку, запирающиеся на замок и имеющие надпись «Осторожно! вход воспрещен» и звонок для вызова. Участок взрывной штамповки радиофицируют, оборудуют телефонной связью, пожарной сигнализацией, рабочей звуковой и световой сигнализацией.

Расположение от центра взрыва зданий и складов определено нормами, установленными Госгортехнадзором [7].

На участке (рис. 4.1), имеющем бетонную перегородку и взрывозащитное ограждение, размещен бассейн цилиндрической или конической формы с водой. Для подъема и перемещения осколки и заготовок участок оборудован мостовым краном. На участке имеются веточник сжатого воздуха и устройства для вакуумирования матриц. Сборка и демонтаж осколки осуществляются на закрытой площадке. Для погрузки и разгрузки грузового транспорта используется эстакада. Бассейн оборудован системой очистки и циркуляции воды.

На расстоянии 6—10 метров от взрывного участка сооружается здание или помещение, в котором располагается укрытие для людей и пульт управления, помещение для временного хранения зарядов ВВ и средств взрывания, а также помещение

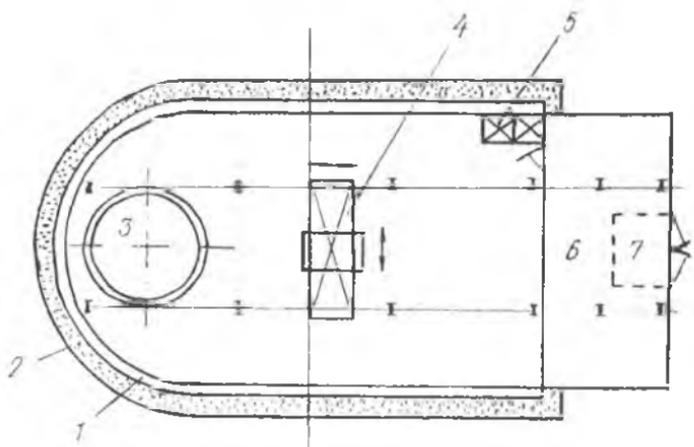


Рис. 4.1. Схема планировки и организации участка на одно рабочее место для гидровзрывной штамповки: 1—бетонная перегородка, 2—взрывозащитное ограждение, 3—бассейн, 4—мостовой кран, 5—вакуумные насосы, 6—закрытая площадка, 7—эстакада

для подготовки зарядов к штамповке. Укрытие для людей, как правило, совмещено с пультом управления и представляет собою бронеканеру, способную выдержать нагрузку от взрыва максимального заряда ВВ. Пульт управления оборудован смотровой амбразурой с защитным безосколочным стеклом. Во многих случаях участки взрывной обработки размещены под навесами или в закрытых отапливаемых зданиях (цехах). Однако строительство закрытых участков (цехов для взрывного формоизменения) требует значительных капитальных затрат и экономически оправдано лишь при большом объеме взрывной обработки.

При организации и производстве взрывной штамповки большое внимание уделяют вопросам техники безопасности. Все работы, связанные с использованием энергии взрыва, должны проводиться в соответствии с «Едиными правилами безопасности при взрывных работах» [27], утвержденными Госгортехнадзором СССР, а также с разработанными НИАТОМ и согласованными с Госгортехнадзором «Правилами безопасности при металлообработке взрывом».

Бассейн для гидровзрывной штамповки, бронеканера, вакуумные камеры и укрытия для людей должны иметь значительный запас прочности. Для защиты окружающих зданий и людей, находящихся вне участка, от случайного взрыва предусматривается устройство на поверхности земли вокруг территории участка специального взрывозащитного ограждения. На участке

можно хранить лишь небольшой (на одну рабочую смену) запас зарядов ВВ и детонаторов.

Во главе подразделения, занятого взрывной обработкой металлов, может стоять лишь специалист, имеющий право руководить взрывными работами и назначенный на эту должность приказом по предприятию. Лица, непосредственно выполняющие взрывные работы, должны иметь «Единую книжку взрывника», выданную специальной квалификационной комиссией и дающую право на производство взрывных работ.

Для защиты обслуживающего персонала закрытые участки (цехи) так же, как и открытые, оборудуются специальными укрытиями. Точные машины и приборы следует для защиты от сейсмического действия взрыва устанавливать на фундаментах, имеющие виброизоляция. Защитой обслуживающего персонала от звукового эффекта при взрыве служат стенки укрытий, имеющие звукоизоляцию, а также средства индивидуальной защиты органов слуха.

При взрыве заряда ВВ выделяется большое количество различных газов, в том числе и некоторое количество токсичных: окиси углерода, окислов азота, сероводорода и др. В связи с этим закрытые участки и цехи для взрывной штамповки следует оснащать эффективными вентиляционными установками, рассчитанными на работу в нормальном и повышенном режимах.

Все установки, участки и цехи должны быть оборудованы средствами противопожарной безопасности, а также системами производственной, охранной и пожарной сигнализации.

Основным критерием опасности шума при взрывной штамповке считается его уровень, безопасные значения которого устанавливаются в зависимости от длительности и частоты повторения взрывов. Двери в помещения и камеры, где производятся взрывы, должны иметь блокировочные устройства, препятствующие осуществлению взрывов при открытых дверях.

Создание и внедрение высокой механизации и автоматизации работ для проведения процессов взрывной штамповки на участке или в цехе позволят значительно сократить время изготовления деталей и изделий, а также обеспечить высокий уровень безопасности работ, так как присутствие человека на участке станет не обязательным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Броштин И. П., Семендеев К. А. Справочник по математике. М.: Гос. изд.-во тех.-теорет. лит. 1956. 608 с.
2. Вуд У. У. Применение процессов высокоскоростного деформирования и энергетические требования к ним // Высокоскоростное деформирование металлов: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1966. 175 с.

3. Высокоскоростное деформирование металлов: Пер. с англ. /Под ред. А. М. Шахназарова. М.: Машиностроение, 1966. 175 с.
4. Горбунов М. П. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
5. Денель А. К. Дефектоскопия металлов. М.: Металлургия, 1972. 303 с.
6. Деформация металлов взрывом /А. В. Кручин, В. Я. Соловьев, Н. И. Шефтель, А. Г. Кобелев. М.: Металлургия, 1975. 416 с.
7. Единые правила безопасности при взрывных работах. М.: Недра, 1972. 320 с.
8. Елисеев В. П. Взрывная штамповка металлами передающей среды // КИП 1972. С. 20–21.
9. Еришов В. И., Ковалев А. Д. Прогрессивное оборудование и инструмент для листостамповочного производства. М.: Высш. шк., 1989. 79 с.
10. Исаченков Е. И. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.
11. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение, 1967. 367 с.
12. Коул Р. Подводные взрывы. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. 495 с.
13. Любченко А. А. Ковструирование штампов и горячая листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1974. 480 с.
14. Мельников Э. А. Холодная штамповка дини. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
15. Орленко Л. П. Поведение металлов при интенсивных динамических нагрузках. М.: Металлургиздат, 1965. 168 с.
16. Пихтовников Р. В., Завьялова В. П. Штамповка листового металла взрывом. М.: Машиностроение, 1964. 175 с.
17. Пихтовников Р. В., Хохлов Б. А. Безбассейновая листовая штамповка взрывом. Харьков: Гранор, 1972. 165 с.
18. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
19. Пытьев П. Я., Смельяков Е. П. Технология листовой штамповки в производстве летательных аппаратов: Учеб. пособие /Куйбышев. авиац. ин-т. 1984. 80 с.
20. Райнхард Д. С., Пирсон Д. Ж. Взрывная обработка металлов. М.: Мир, 1966. 392 с.
21. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971. 780 с.
22. Высокоскоростная деформация. М.: Наука, 1971. 128 с.
23. Смельяков Е. П. Электрогидроимпульсная штамповка деталей из листовых и трубчатых заготовок: Учеб. пособие / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1987. 54 с.
24. Справочник конструктора штампов. Листовая штамповка /Под общ. ред. Л. И. Рудман. М.: Машиностроение, 1988. 496 с.
25. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наукова думка, 1979. 268 с.
26. Степанов В. Г., Шавров И. А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1975. 280 с.
27. Физика взрыва /Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. Н. Шехтер. М.: Наука, 1975. 704 с.
28. Штамповка взрывом. Основы теории /Под ред. д-ра техн. наук М. А. Андучина. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Физические основы взрывной штамповки	5
1.1. Классификация процессов взрывной штамповки	5
1.2. Физические основы процессов взрывной штамповки	9
1.3. Поведение материалов при высокоскоростном нагружении и их свойства после взрывной обработки	23
2. Разработка технологических процессов изготовления деталей взрывной штамповкой	27
2.1. Конструктивно-технологические особенности деталей, изготавливаемых взрывной штамповкой	27
2.2. Методика расчета параметров процесса взрывной штамповки	30
2.3. Общие рекомендации по разработке технологического процесса	42
2.4. Технико-экономическая эффективность технологических процессов взрывной штамповки	48
3. Типовые конструкции оснастки и оборудования для взрывной штамповки	50
3.1. Основные требования к технологической оснастке и специализированным устройствам	50
3.2. Типовые конструктивные схемы образцов технологического оснащения	52
4. Общие требования к планировке участков, организации рабочих мест и обеспечению охраны труда при взрывной штамповке деталей литейных аппаратов	66
Библиографический список	71

Дудин Анатолий Алексеевич
Смеляков Евгений Петрович
Лебедев Геннадий Михайлович

ТЕХНОЛОГИЯ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Редактор Е. Д. Антонова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. Д. Чанникова

Свод. тем. пл. № 29
Сдано в набор 21.01.91. Подписано в печать 30.04.91.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.
Гарнитура литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 4,42. Усл. кр.-отт. 4,66. Уч.-изд. л. 1,32.
Тираж 500 экз. Заказ 110. Цена 20 к.
Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королёва,
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Типография ЭОЗ Куйбышевского авиационного института,
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.