

В. Н. РЕВИНОВ

ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА СТАЛЕЙ Я1Т И Я1 С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЛУБОКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

1. Способы интенсификации процесса штамповки листового металла

Холодная листовая штамповка является одним из наиболее прогрессивных способов обработки металлов, позволяющая быстро и качественно изготавливать различные детали весьма сложной конфигурации. XXI съезд КПСС обратил особое внимание машиностроителей на необходимость всемерного внедрения штамповки в производство, как одного из самых экономичных и высокопроизводительных технологических процессов. Листовая штамповка стали в настоящее время широко применяется во многих отраслях машиностроения при изготовлении различных изделий.

Однако при практическом применении данного процесса производственники зачастую наталкиваются на ряд трудностей, в значительной мере снижающих эффект применения холодной листовой штамповки. К таким затруднениям в первую очередь следует отнести многопереходность операций штамповки, необходимость межоперационных отжигов, невозможность местного регулирования степени деформации заготовки и изделия и т. д. Указанные недостатки имеют место особенно при изготовлении глубоких деталей, когда коэффициент вытяжки $K > 2$. Под коэффициентом вытяжки понимается отношение диаметра заготовки D к диаметру пуансона d , т. е. $K = \frac{D}{d}$.

Многочисленные исследования советских и зарубежных ученых показывают, что при достижении $K=2$ в заготовке возникают напряжения, близкие по своей величине к предельным. Поэтому дальнейшее увеличение K в одном рабочем переходе приводит к разрушению заготовки. Таким образом, необходимость вытяжки глубоких деталей с $K > 2$ влечет за собой увеличение числа переходов и, следовательно, числа межоперационных отжигов для снятия наклепа. Естественно, эти мероприятия вызывают значительное удорожание деталей и требуют создания нескольких штампов для последовательной вытяжки. Так, штамповка с $K=2,8$ в обычных производственных условиях выполняется в 3—5 штампах с 2—3 межпереходными отжигами. Перечисленные недостатки усугубляются большой трудоемкостью проектирования и отладки нескольких последовательных штампов, особенно при вытяжке деталей сложной формы.

Естественно, возникает задача найти способы штамповки, позволяющие за один рабочий ход пресса в одном штампе вытягивать детали с коэффициентом $K > 2$. Советские ученые в этом направлении проделали значительную работу и создали ряд способов интенсификации процесса листовой штамповки. В последние годы в промышленности находят применение разработанный в МАТИ кандидатами технических наук К. И. Макаровым, М. Н. Горбуновым, О. В. Поповым, Н. А. Ключаревым и другими авторами способ глубокой вытяжки листовых материалов с

подогревом фланца заготовки (рис. 1). С целью снижения напряжений в опасной зоне заготовки, т. е. в месте сопряжения дна изделия и его стенок, авторы предложили повысить пластические свойства материала фланца заготовки за счет его нагрева до весьма высоких температур. Тем самым достигается уменьшение сопротивления фланца деформированию и, в конечном итоге, увеличение коэффициента вытяжки.

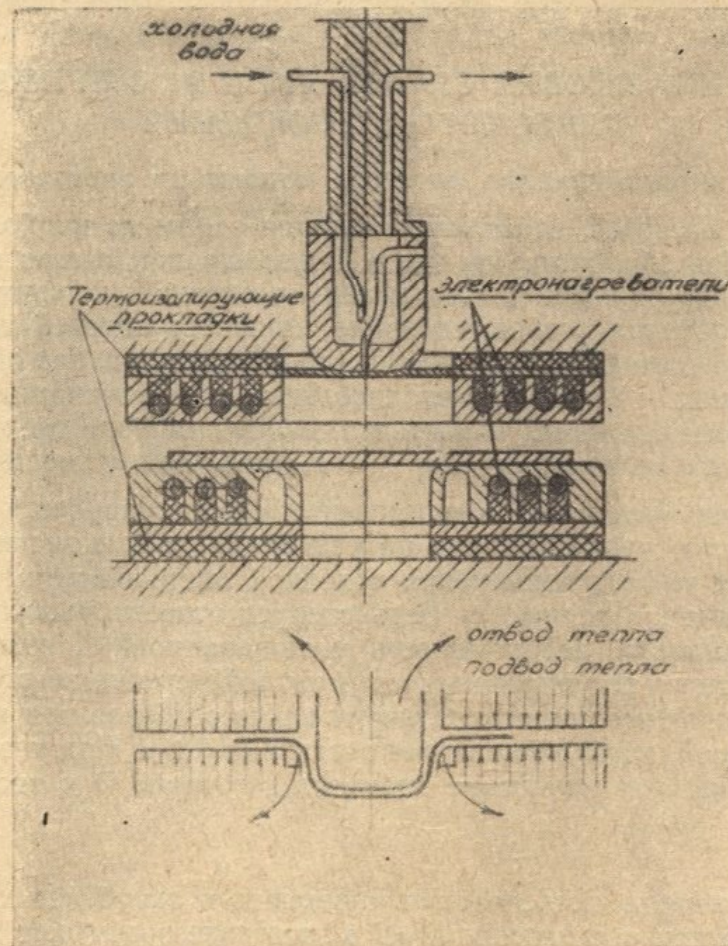


Рис. 1. Конструктивная схема штампа и принципиальная схема обогрева и охлаждения инструмента для вытяжки с подогревом.

Пуансон в процессе вытяжки охлаждается проточной водой, отнимая тепло от нагретого металла заготовки. Нагрев фланца заготовки осуществляется за счет отбора тепла от матрицы и прижимной плиты, имеющих термоэлементы. Штамповка алюминиевых и магниевых сплавов при температуре $320 \div 375^\circ$ позволяет достигнуть за один рабочий ход штампа коэффициентов вытяжки $K=2,8 \div 3,0$. Применение этого способа в промышленности показало его значительные экономические преимущества, особенно при штамповке деталей сложной формы.

В последнее время в литературе нашел отражение предложенный профессором Р. В. Пихтовниковым способ фрикционной листовой штамповки, основанный на использовании сил трения на фланце заготовки в качестве активных сил, способствующих течению материала через протяжное ребро матрицы. Из представленной на рис. 2 схемы штампа для фрикционной вытяжки видно, что при сжатии упруго-фрикционный элемент (обычно резины специальных сортов) за счет сил сцепления с заготовкой перемещает фланец внутрь протяжного ребра матрицы. Исследования, проведенные кандидатом технических наук Н. А. Масленниковым

показывают, что данным способом можно штамповать в одном штампе детали из алюминиевых сплавов с коэффициентами вытяжки, достигающими $K=3,5\div 4,5$.

Однако приведенные выше способы интенсификации процесса листовой штамповки могут быть применимы лишь в обработке алюминиевых, магниевых и некоторых других цветных сплавов. Штамповка листовой конструкционной стали с подогревом фланца заготовки в настоящее время оказывается чрезвычайно затруднительной. Для получения эффективного повышения пластических свойств фланца стальной заготовки (рис. 3) необходимы температуры порядка нескольких сот градусов, что приводит к значительным структурным изменениям в штампуемом материале, а также резко снижает стойкость инструмента и оснастки и делает невозможным применение смазок. Все вышеизложенное в еще большей мере относится к обработке нержавеющей и жаропрочных сталей, которые находят в машиностроении все большее применение. Штамповка сталей фрикционным методом также затруднительна из-за отсутствия в настоящее время сортов резины, способных создать требуемые усилия трения для перемещения фланца внутрь матрицы.

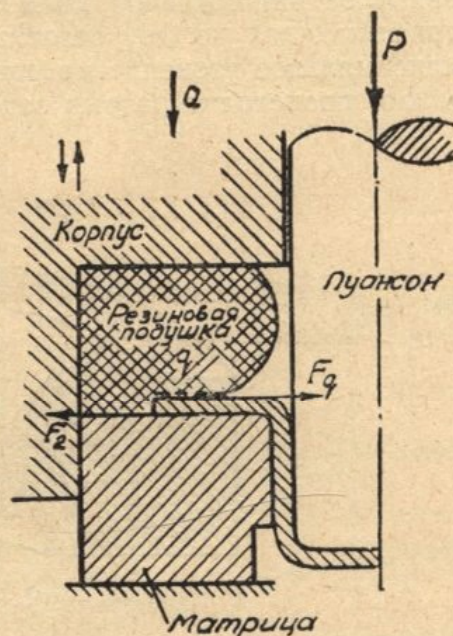


Рис. 2. Принципиальная схема фрикционной вытяжки.

Штамповка сталей фрикционным методом также затруднительна из-за отсутствия в настоящее время сортов резины, способных создать требуемые усилия трения для перемещения фланца внутрь матрицы.

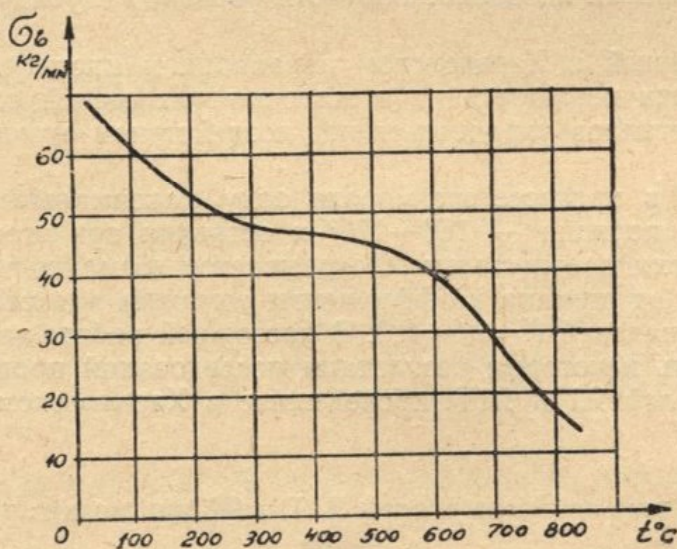


Рис. 3. Изменение предела прочности стали Я1Т при повышенных температурах.

Большая потребность в экономичной, нетрудоемкой штамповке листовых конструкционных, особенно нержавеющей и жаропрочных сталей, с большими коэффициентами вытяжки заставляет искать новые процессы, лишенные перечисленных недостатков. Одновременно ставится задача создания таких способов, которые позволили бы регулировать в про-

цессе штамповки степень деформации в отдельных местах штампуемого изделия.

Из рассмотрения напряженного состояния заготовки известно, что наиболее напряженной является зона стенок изделия, непосредственно примыкающая ко дну заготовки (рис. 4). Именно здесь наблюдается максимальное утонение материала, и при неблагоприятных условиях вытяжки происходит разрыв заготовки.

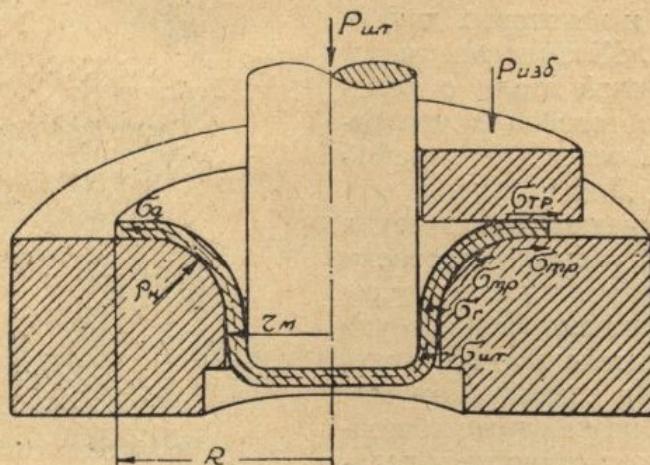


Рис. 4. Схема напряженного состояния штампуемой заготовки.

Поэтому, естественно, возникает вопрос об искусственном упрочнении этой напряженной зоны с тем, чтобы преодолеть сосредоточенное там напряжение от деформации фланца, сил трения и деформации заготовки на протяжном ребре матрицы. Повышение прочностных характеристик стенок изделия при сохранении неизменными свойства материала фланца во время штамповки позволяет получить большую глубину штампуемого изделия.

Разработанный в Харьковском авиационном институте способ листовой штамповки нержавеющей и жаропрочных сталей основывается на способности металлов упрочняться под воздействием отрицательных температур.

Охлаждая в процессе штамповки зону максимальных напряжений до температур порядка -160 — -170° и оставляя при этом температуру фланца заготовки положительной, оказывается возможным получить за один рабочий ход штампа коэффициенты вытяжки для сталей Я1 и Я1Т, достигающие значений $K=2,8 \div 2,9$. В настоящей работе автор делает попытку изложить некоторые результаты исследований процесса листовой штамповки сталей Я1 и Я1Т, проведенные в Харьковском авиационном институте.

II. Механические свойства сталей Я1Т и Я1 при низких температурах

Многочисленные работы советских и зарубежных ученых показывают, что при охлаждении наблюдается увеличение механических характеристик металлов. В результате исследований проф. С. Герша, А. Тулякова, С. Беляева, Г. Грушка, акад. Н. Н. Давиденкова и других авторов установлено, что почти все металлы и сплавы с понижением температуры значительно упрочняются. Так, при охлаждении металла до температур $-160 \div -195^\circ$ возрастают предел текучести, предел прочности и другие механические показатели. Это в первую очередь относится к сталям, у

которых наблюдается резкое изменение всех прочностных характеристик. Относительное удлинение и сужение при этом у углеродистых сталей уменьшается, а у большой группы аустенитных сталей остаются практически неизменными. Для выяснения характера изменения механических свойств сталей Я1 Я1Т при температуре -183° были проведены механические испытания в среде жидкого воздуха. Приспособление для такого рода испытаний, а также испытуемый образец показаны на рис. 5. Сравнительные испытания при нормальной ($+20^\circ$) температуре и

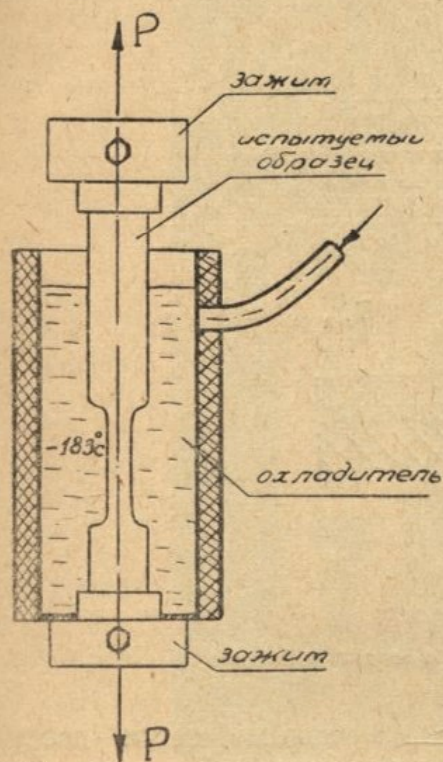


Рис. 5. Схема приспособления для испытания плоских образцов на растяжение при низких температурах.

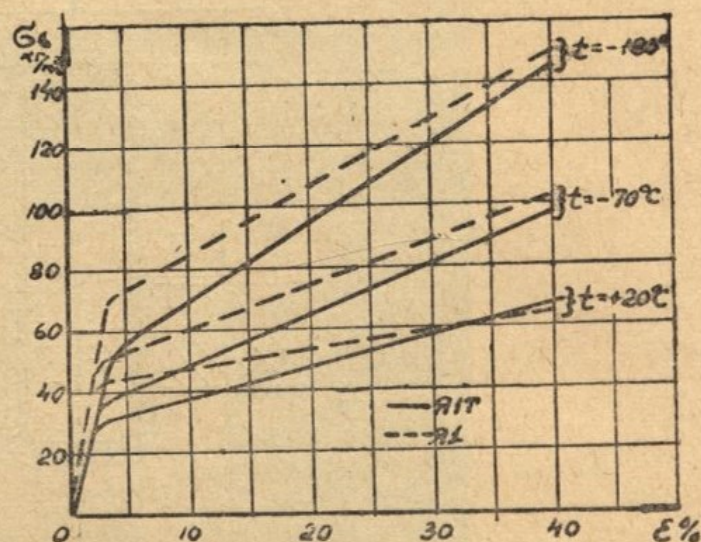


Рис. 6.

температуре кипения жидкого кислорода показывают, что сталь Я1Т упрочняется в $2,0 \div 2,1$ раза, а сталь Я1 — в 2,3 раза. Кривые, приведенные на рис. 6, характеризуют изменение механических свойств этих сталей при глубоком охлаждении. Относительное удлинение в данном случае остается практически неизменным. Все это говорит о том, что весьма целесообразно применить упрочнение наиболее напряженной зоны заготовки при помощи охлаждения ее до температур -160 — -170° .

III. Оснастка и технология листовой штамповки с применением глубокого охлаждения

Для осуществления процессов листовой штамповки стали с охлаждением целесообразно применить несколько измененную конструкцию обычного инструментального штампа (рис. 7). Для обеспечения охлаждения стенок штампуемого изделия пуансон имеет полость, в которую подается хладагент. Подача осуществляется через специальную систему питания из расходного бака. Кроме этого, штамп имеет дренажную трубку для отвода из полости пуансона паров хладагента. Все детали штампа, имеющие в процессе работы низкую температуру, снабжены теплоизоля-

цией, выполненной из стеклоткани, асбеста и текстолита. Предотвращение складкообразования в процессе штамповки осуществляется при помощи пневматического прижимного устройства, позволяющего в широких пределах регулировать удельное давление прижимной плиты. Все части штампа, соприкасающиеся с хладагентом, имеют антикоррозийное покрытие. Геометрия рабочих частей штампа принята по обычным рекомендациям. Диаметр пуансона — 49 мм, радиус гибочного пуансона 6 мм.

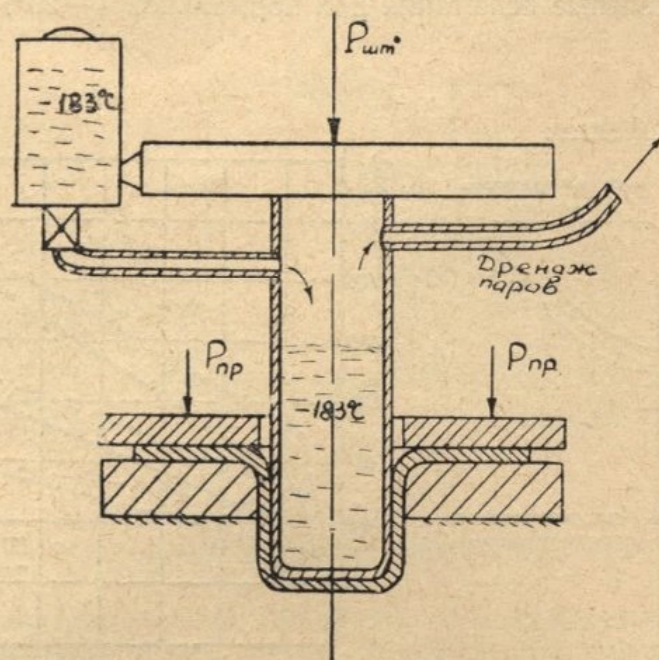


Рис. 7. Схема штампа для вытяжки с охлаждением.

Радиусы протяжного ребра матрицы принимали равными шести—десяти толщинам штампуемого материала. Зазор между матрицей и пуансоном составляет $1,3 \div 1,8$ толщины исходной заготовки.

При проведении экспериментальных исследований в качестве силового возбудителя применялась испытательная гидравлическая машина конструкции инженера И. П. Божок, имеющая максимальное усилие 100 т и снабженная устройством для снятия диаграммы в координатах перемещение — усилие пуансона (рис. 8).

При соприкосновении заготовки с охлажденным пуансоном за счет отбора тепла ее температура резко понижается. Это приводит к значительному упрочнению штампуемого материала. По мере углубления пуансона в заготовку охлаждению (и упрочению) начинают подвергаться стенки вытягиваемого стакана. Благодаря большой массе и хорошему теплообмену с окружающим воздухом, температура матрицы и прижимного кольца остается в процессе штамповки положительной. На протяжном ребре матрицы температура составляет $3 \div 5^\circ$, на внешнем краю $+12 \div 17^\circ$. Такое распределение температурного поля создает благоприятные условия для деформирования фланца заготовки и способствует получению больших коэффициентов вытяжки.

Из рассмотрения схемы процесса штамповки с охлаждением видно, что одним из существенных факторов, влияющим на ход вытяжки, является скорость распространения волны холода по заготовке, так как от этой скорости в значительной степени зависит скорость штамповки. Очевидно, что при большей толщине штампуемого материала потребуется меньшая скорость штамповки, и наоборот. Практически при штамповке

листовой стали толщиной $1 \div 1,2$ мм вполне удовлетворительные результаты вытяжки можно получить при обычных средних скоростях существующих гидропрессов.

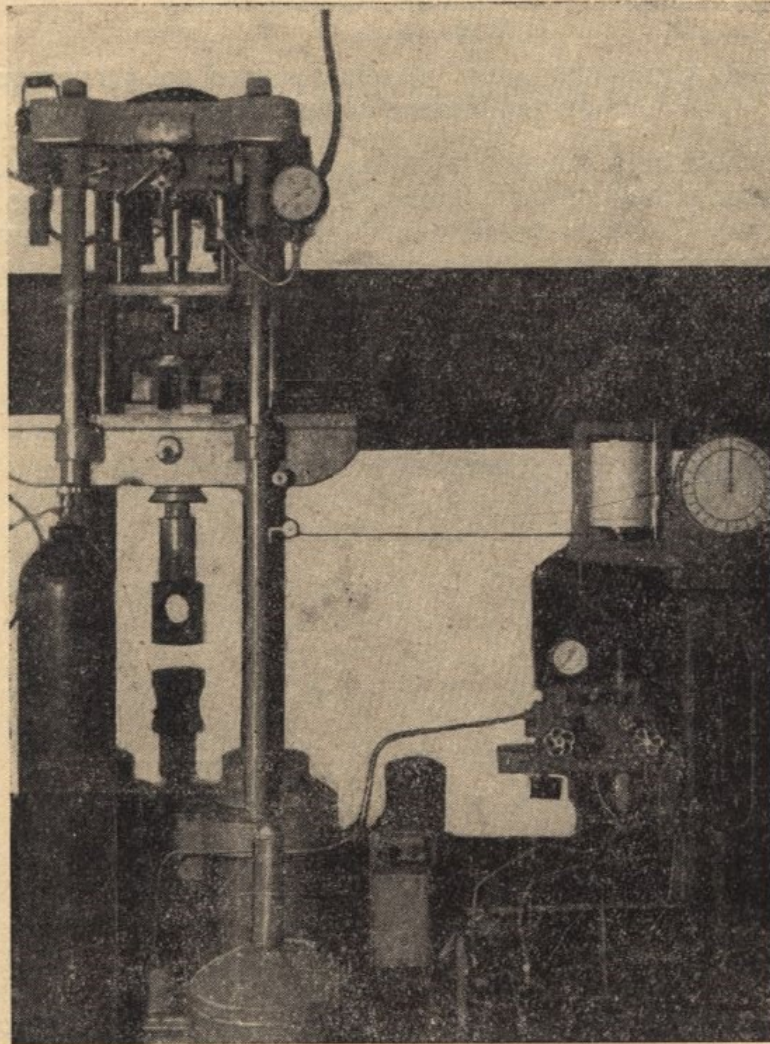


Рис. 8. Общий вид экспериментальной установки для штамповки с охлаждением заготовки.

Как было показано выше, матрицы и прижимное кольцо во время штамповки имеют положительную температуру. Это объясняется тем, что отвод тепла от них может осуществляться лишь по заготовке, а подвод—по значительно большей поверхности, практически по всей внешней поверхности штампа.

Наличие положительной температуры на матрице и прижимной плите позволяет применять для уменьшения сил трения обычные рациональные смазки.

Известно немного жидких хладагентов, имеющих температуру кипения ниже -150° .

Наиболее дешевым и удобным являются жидкий азот ($t_{\text{кип}} = -195^\circ$) и жидкий кислород ($t_{\text{кип}} = -183^\circ$).

Для более интенсивного проведения штамповки с охлаждением наиболее целесообразным является применение жидкого азота. Он имеет низ-

кую температуру, инертен и т. д. Однако жидкий кислород почти не уступает азоту в этом отношении.

В наших исследованиях применялся жидкий кислород, как более дешевый и вырабатываемый промышленностью в больших количествах.

IV. Теоретическое определение максимального коэффициента вытяжки при штамповке с охлаждением

Существующие методы расчета напряженного состояния штампуемой заготовки дают удовлетворительные с достаточной точностью для практики результаты. Так как исследуемый процесс является одним из видов интенсификации штамповки, целесообразно внести определенные уточнения в расчетные формулы. Это дает возможность более тщательно оценить возможности штамповки с охлаждением.

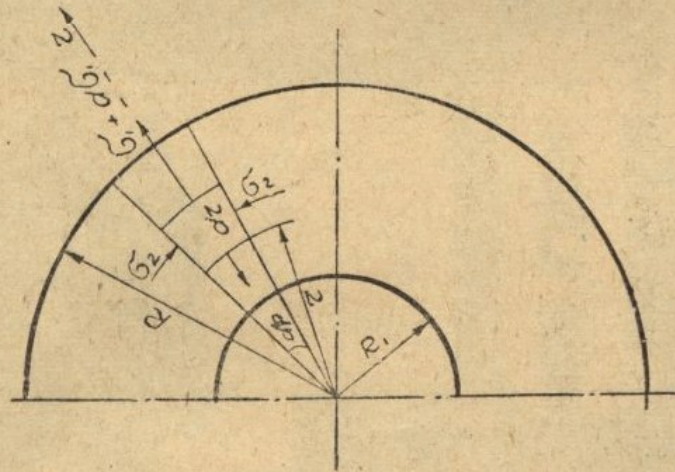


Рис. 9. Схема напряженного состояния фланца заготовки.

Рассмотрим равновесие элемента фланца заготовки при силе давления пуансона, равной P (рис. 9). Толщину материала заготовки принимаем равной δ_0 . Утолщением материала в процессе деформации пренебрегаем. Проектируя все напряжения на ось r , получаем известное уравнение

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2} = -\frac{dr}{r}. \quad (1)$$

Используем условие пластичности, заменяя при этом для большей точности σ_2 обобщенным напряжением σ_1 :

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \beta\sigma_1. \quad (2)$$

После совместного решения уравнений (1) и (2) и интегрирования при граничных условиях ($r=R$, $\sigma_1=0$) получаем

$$\sigma_1 = \beta\sigma_1 \ln \frac{R}{r}, \quad (3)$$

где $\frac{R}{r} = K$ — текущий коэффициент вытяжки.

Из совместного решения уравнений (2) и (3) находим, что

$$\sigma_2 = -\beta\sigma_1 \left(1 + \ln \frac{R}{r} \right) \quad (4)$$

на границе протяжного ребра матрицы при $r=r_m + \rho_m$ напряжения σ_1 и σ_2 будут

$$\sigma_1 = \beta \sigma_i \ln \frac{R}{r_m + \rho_m}, \quad (5)$$

$$\sigma_2 = -\beta \sigma_i \left(1 + \ln \frac{R}{r_m + \rho_m} \right). \quad (6)$$

Напряжение $\sigma_{шт}$, т. е. суммарное напряжение в стенке штампуемого стакана, определяется выражением

$$\sigma_{шт} = \sigma_d + \sigma_r + \sigma_{тр}, \quad (7)$$

где σ_d — сопротивление деформированию фланца заготовки, равное σ_1 ,

σ_r — сопротивление деформированию фланца заготовки на протяжном ребре матрицы,

$\sigma_{тр}$ — сопротивление трения между фланцем заготовки и поверхностью матрицы и прижимного кольца.

Наиболее существенной частью уравнения (7) при наличии хорошей смазки, когда $\sigma_{тр}$ мало, является σ_d , составляющее примерно 80% от $\sigma_{шт}$. Поэтому желательно наиболее точно определить σ_d , так как в противном случае получим большие погрешности в значении $\sigma_{шт}$.

Для вычисления достаточно точных результатов в формуле (2) σ_s заменяем на σ_i , а в дальнейшем используем метод численного интегрирования.

Напряжение σ_r определяем по известной формуле, приведенной в работах проф. Р. В. Пихтовникова.

$$\sigma_r = 1,155^{1+\alpha} B \left(\varepsilon_{01} + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho_m}{r_m} \right)^\alpha \ln \frac{\rho_m}{r_m}, \quad (8)$$

где

$$\varepsilon_{01} = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{r_m^2 (K_0^2 - K^2)}{(r_m + \rho_m)^2} + 1 \right], \quad (9)$$

где ε_{01} — радиальная деформация металла в момент выхода его на протяжное ребро матрицы,

K_0 — исходный коэффициент вытяжки,

K — текущий коэффициент вытяжки,

α и β — константы, зависящие от свойств материала,

ρ_m — радиус срединной поверхности штампуемого материала на протяжном ребре матрицы.

При входе на протяжное ребро матрицы при $r=r_m+\rho_m$ $\sigma_s=\sigma_1$. Принимая

$$\sigma_i = B \varepsilon_i^\alpha, \quad (10)$$

где ε_i — интенсивность деформаций, и исходя из условия неизменности объема фланца заготовки (т. е. считая материал заготовки несжимаемым), получаем

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0. \quad (11)$$

В связи с принятым выше условием постоянства толщины штампуемого материала δ_0 $\varepsilon_3=0$ и уравнение (11) принимает вид

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2. \quad (12)$$

Интенсивность деформаций в общем случае имеет вид

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}. \quad (13)$$

В нашем случае с учетом уравнения (12) получаем

$$\varepsilon_i = 1,155 \varepsilon_2. \quad (14)$$

Подставляем в уравнение (10) выражение (14), обозначив $1,155^2$ $B=A$. Тогда имеем

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \beta A \varepsilon_2^\alpha, \\ \sigma_1 &= \beta A \varepsilon_2^\alpha \ln \frac{R}{r}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для определения тангенциальной деформации ε_2 воспользуемся схемой, приведенной на рис. 10.

В момент наступления деформации фланца (рис. 10а) внешний радиус заготовки равен R_0 . Возьмем на фланце произвольную точку A^1 , лежащую на окружности l^1 , радиуса r^1 .

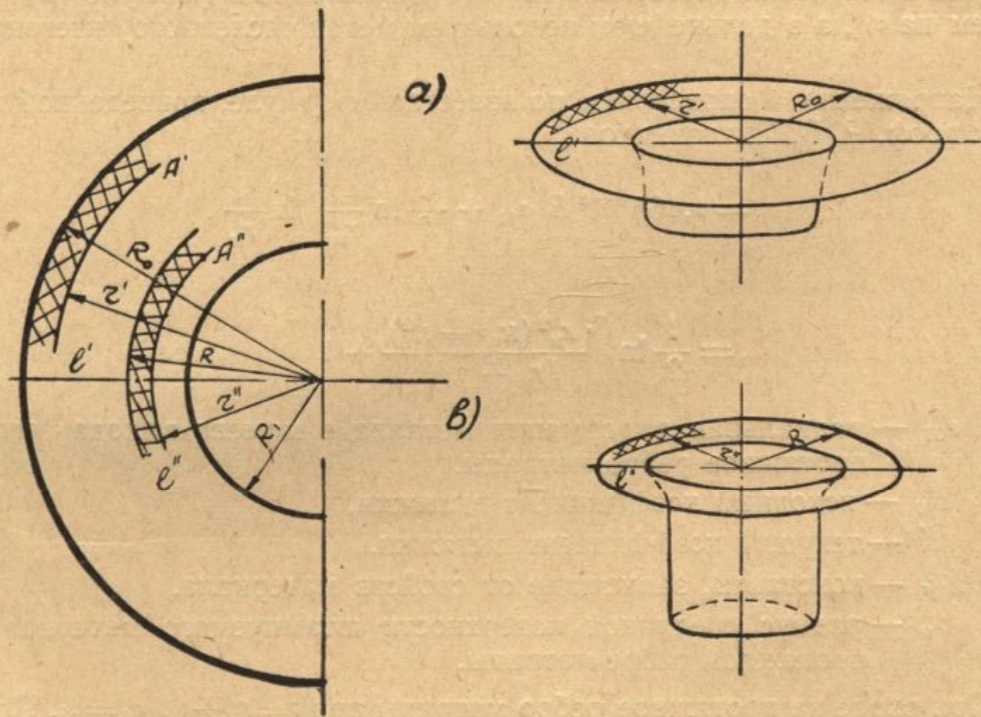


Рис. 10. Схема тангенциальной деформации фланца заготовки.

После деформации точки A^1 переместится в A^2 , окружность l^1 займет положение l^2 радиуса r^2 , а внешний радиус фланца станет равным R (рис. 10в).

Тогда тангенциальную деформацию можно определить как

$$\varepsilon_2 = \frac{l^1 - l^2}{l^2},$$

или $\varepsilon_2 = \ln \frac{r^1}{r^2}$ — для больших деформаций

(16)

Выражая r' через R_0 , R и r , получаем

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \ln \frac{R_0^2 - R^2 + r^2}{r^2}.$$

Отсюда

$$\sigma_i = A \left[\frac{1}{2} \ln \frac{R_0^2 - R^2 + r^2}{r^2} \right]^\alpha. \quad (17)$$

Из уравнений (1), (2) и (17) после интегрирования получаем выражение для σ_d

$$\sigma_d = -\beta A \frac{1}{2^\alpha} \int_{r_M + \rho_M}^R \left[\ln \frac{R_0^2 - R^2 + r^2}{r^2} \right]^\alpha \frac{dr}{r}. \quad (18)$$

Ввиду известной сложности точного решения уравнения (18) целесообразно произвести численное интегрирование, позволяющее получить весьма точный результат.

Определение постоянных α и β может быть произведено по формулам, предложенным проф. М. А. Большаниной и проф. Р. В. Пихтовниковым:

$$\begin{aligned} \alpha &= \varepsilon_{ш}, \\ B &= \sigma_b \frac{e^\alpha}{\alpha^\alpha}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\varepsilon_{ш}$ — относительная деформация плоского образца в момент образования шейки при растяжении,

σ_b — предел прочности материала,

e — основание натурального логарифма.

Для сталей Я1Т и Я1 значения констант α и β приведены в таблице 1.

Таблица 1

Металл	σ_b кг/мм ²	α	B кг/мм ²
Я1Т	67,5	0,29	129
Я1	64,2	0,29	123

В результате численного интегрирования выражения (18) получаем зависимость σ_d от исходного и текущего коэффициентов вытяжки. Суммируя соответствующие значения σ_d со значениями σ_r , вычисленными по формуле (8), получим зависимость между $\sigma_{шт}$ и текущим коэффициентом вытяжки. Значения $\sigma_{шт}$, полученные таким образом, будут отличаться от действительных на величину $\sigma_{тр}$.

На рис. 11 представлены кривые зависимости $\sigma_{шт \cdot \max}$ от исходного коэффициента вытяжки K_0 . На основании этих кривых можно определить предельно возможный коэффициент вытяжки при штамповке с охлаждением. Пользуясь данными, приведенными на рис. 6, находим, что $K_{0 \max}$ для стали Я1Т равен 3,05, а для стали Я1 $K_{0 \max} = 3,1$. Дальнейшее увеличение коэффициента вытяжки за один рабочий переход при данной схеме

штамповки оказывается невозможным, так как при этом должно наступить разрушение материала заготовки вблизи протяжного ребра матрицы, т. е. в зоне повышенных температур.

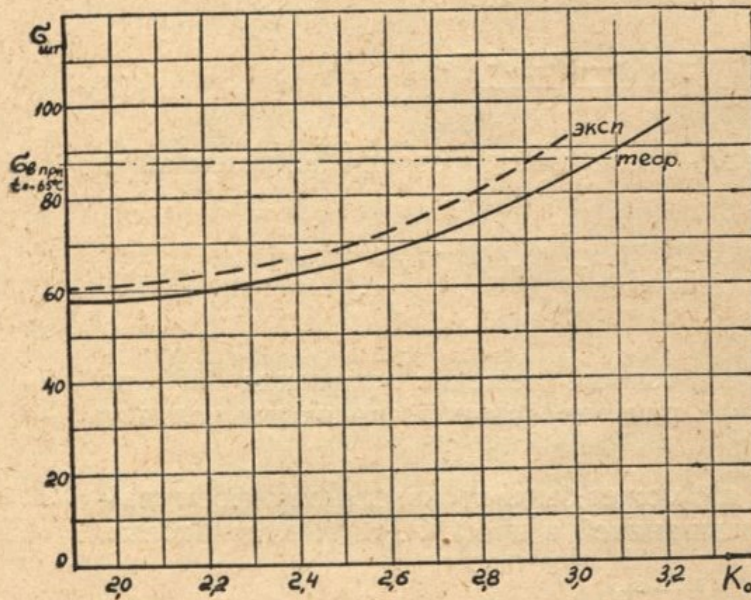


Рис. 11. Зависимость от исходного коэффициента вытяжки при штамповке с охлаждением.

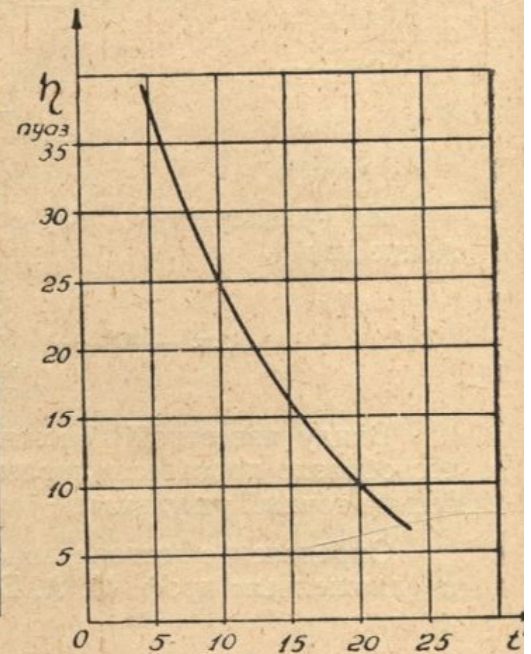


Рис. 12. Изменение вязкости касторового масла с повышением температуры.

V. Исследование влияния трения

Как известно, процесс деформирования фланца заготовки сопровождается значительными силами трения между поверхностью фланца заготовки и поверхностями прижима и матрицы. Эти силы оказывают существенное влияние на получение максимальной вытяжки детали. Поэтому, естественно, встает вопрос о снижении сил трения за счет применения рациональной смазки поверхности заготовки. До настоящего времени процесс трения между фланцем заготовки и элементами штампа исследовался применительно к постоянной температуре вдоль радиуса заготовки, т. е. считалось, что вязкость смазки постоянна в любой точке фланца заготовки и не изменяется в процессе штамповки (работы профессора Р. В. Пихтовникова, кандидата технических наук Е. И. Исаченкова и др.). Нами была поставлена задача исследовать процесс трения в процессе штамповки при наличии переменной вязкости смазки вдоль радиуса заготовки.

Как было сказано выше, в процессе штамповки с применением глубокого охлаждения пуансона температура матрицы и прижимного кольца не является постоянной, а изменяется от центра к периферии, причем к центру температура понижается. Это понижение температуры сравнительно невелико, однако оно оказывает существенное влияние на изменение свойств смазки.

Вязкость смазки, составленной из касторового масла и канифоли, даже при незначительном колебании температуры изменяется в довольно широких пределах (рис. 12).

Поэтому, производя расчет сил трения при штамповке с применением охлаждения и не учитывая влияние температуры на вязкость смазки, можно получить неверные значения сил трения.

Как показывают эксперименты (рис. 13), даже при длительном повторении процесса штамповки температура матрицы и прижимного кольца

остаётся положительной, при этом температура гибочного ребра матрицы ниже температуры внешнего края матрицы на 5—7°. Причем это изменение температуры матрицы с достаточной точностью подчиняется прямолинейному закону. То же относится и к прижимному кольцу.

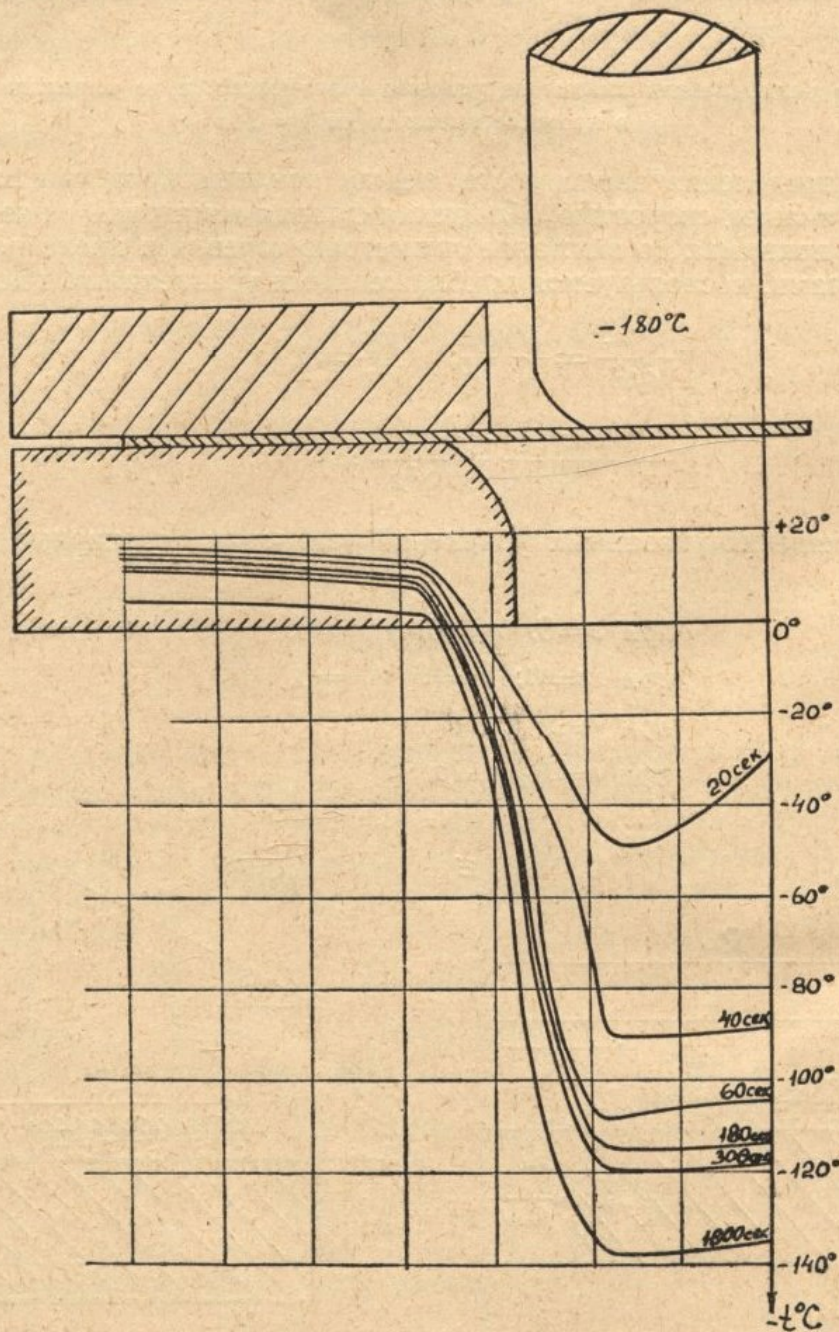


Рис. 13. Распределение температур по заготовке в процессе штамповки с охлаждением.

Анализ изменения свойств смазки показывает (рис. 12), что вязкость смазки изменяется при изменении температуры по экспоненциальному закону. Однако в расчетах сил трения при штамповке можно с достаточной точностью считать это изменение свойств смазки подчиняющимся линейному закону.

Известно, что наименьшие силы трения возникают тогда, когда отсутствует непосредственное соприкосновение между трущимися поверхностями, т. е. имеет место так называемое жидкостное трение. Для обеспечения такого процесса необходимо, чтобы в течение всего времени штампов-

ки поверхность заготовки не соприкасалась с поверхностями матрицы и прижимного кольца, а это возможно лишь в том случае, когда толщина смазочного слоя h везде будет больше двух микронеровностей трущихся поверхностей.

Это требование и кладется в основу расчета для выбора необходимой смазки.

Выбор рациональной смазки из условия невозможности ее выдавливания в процессе вытяжки до $h = 2\Delta$

Для определения зависимости между усилием прижима заготовки, вязкостью смазки, скоростью сближения фланца и матрицы и геометрией заготовки, принимая во внимание симметрию течения и пренебрегая массовыми силами, воспользуемся приближенными уравнениями движения

$$\frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (20)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad (21)$$

Для решения указанных уравнений установим граничные условия (рис. 14):

$$\begin{aligned} \text{при } z=0; \quad V_r=0; \quad V_z=0, \\ \text{при } z=h; \quad V_r=0; \quad V_z=0, \\ \text{при } r=R \quad p=p_0, \\ \text{при } r=R_1 \quad p=p_0. \end{aligned} \quad (22)$$

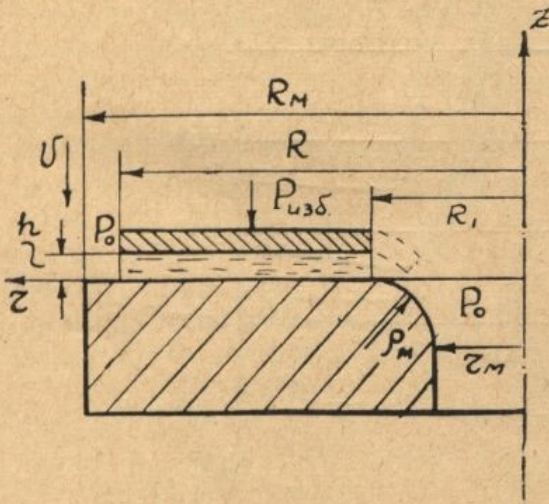


Рис. 14. Изменение свойств смазки вдоль радиуса заготовки при штамповке с охлаждением.

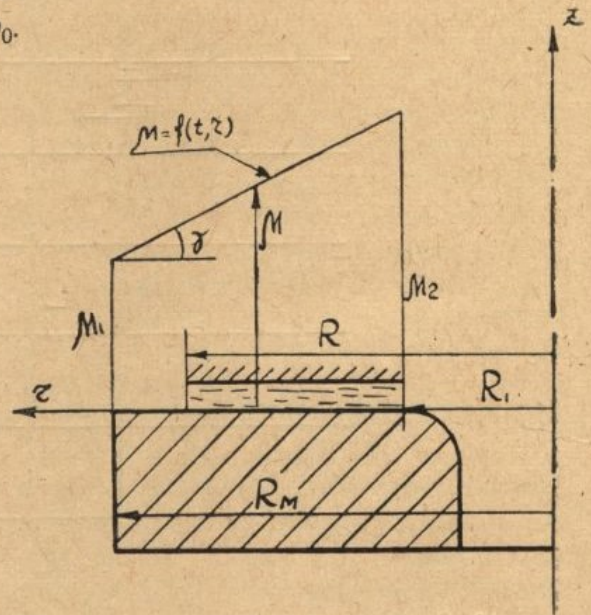


Рис. 15.

Интегрируя уравнение (20) по z , получаем

$$V_r = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} z^2 + C_1 z + C_2, \quad (23)$$

где μ — вязкость смазки.

Используя граничные условия для V_r и подставляя их в (23), получаем

$$V_r = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} (z^2 - hz). \quad (24)$$

Для определения $\frac{\partial p}{\partial r}$ воспользуемся уравнением (21). Интегрируя правую и левую его части по z в пределах от 0 до h и используя граничные условия для V_z и то, что h не зависит от r , получаем

$$V = \frac{1}{r} \int_0^h \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} dz = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^h rV_r dz. \quad (25)$$

Отсюда, умножая обе части равенства на rdr и интегрируя по r , найдем

$$\int_0^h rV_r dz = \frac{1}{2} Vr^2 + M. \quad (26)$$

где M — постоянная интегрирования.

Подставляя в левую часть (26) выражение (24) и интегрируя, получаем

$$\frac{\partial p}{\partial r} = - \frac{6\mu (Vr^2 + 2M)}{rh^3} \quad (27)$$

Для получения закона распределения давления между фланцем и матрицей вдоль радиуса необходимо проинтегрировать выражение (27). Как было указано выше, вязкость смазки в нашем случае изменяется вдоль радиуса по линейному закону (рис. 15). Поэтому в уравнение (27) необходимо подставить выражение для μ с учетом его изменения под воздействием температуры

$$\mu = \mu_1 + b(R_m - r), \quad (28)$$

где μ_1 — вязкость смазки на внешнем краю матрицы,
 b — тангенс угла γ (рис. 15).

Учитывая выражение (28), получаем для (27)

$$\frac{\partial p}{\partial r} = - \frac{6[\mu_1 + b(R_m - r)](Vr^2 + 2M)}{rh^3}. \quad (29)$$

Интегрируя уравнение (29), имеем

$$p = - \frac{6}{h^3} \left\{ (\mu_1 + bR_m) \frac{Vr^2}{2} + 2M[(\mu_1 + bR_m) \ln r - br] - \frac{Vbr^3}{3} \right\} + N. \quad (30)$$

Используя граничное условие для p при $r=R_1$ и $r=R$, получаем следующий закон изменения давления вдоль радиуса фланца:

$$p = p_0 + \frac{6V}{h^3} \left\{ (\mu_1 + bR_m) \frac{(R^2 - r_1^2)}{2} + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{(\mu_1 + bR_m) \frac{(R^2 - R_1^2)}{2} - b \frac{(R^3 - R_1^3)}{3}}{[(\mu_1 + bR_m) \ln \frac{R_1}{R} + b(R - R_1)]} \left[(\mu_1 + bR_m) \ln \frac{R}{r} - b(R - r) \right] - \\
 & - \frac{b(R^3 - r^3)}{3} \Bigg| . \quad (30a)
 \end{aligned}$$

Полное давление на кольцевую пластинку можно получить интегрированием по площадке кольца выражения (30a)

$$P = 2\pi \int_{R_1}^R p r dr.$$

Избыточное давление получаем, вычитая составляющую атмосферного давления

$$P_{\text{изб}} = 2\pi \int_{R_1}^R p r dr - p_0 \pi (R^2 - R_1^2). \quad (31)$$

После интегрирования имеем

$$\begin{aligned}
 P_{\text{изб}} = \frac{6\pi V}{h^3} & \left\{ (\mu_1 + bR_m) \frac{R^2 (R^2 - R_1^2)}{2} - \frac{bR^3 (R^2 - R_1^2)}{3} - \right. \\
 & - (\mu_1 + bR_m) \frac{R^4 - R_1^4}{4} - \frac{2b}{15} (R^5 - R_1^5) + \\
 & + \frac{(\mu_1 + bR_m) \frac{(R^2 - R_1^2)}{2} - b \frac{(R^3 - R_1^3)}{3}}{[(\mu_1 + bR_m) \ln \frac{R_1}{R} + b(R - R_1)]} \left[(\mu_1 + bR_m) R_1^2 \ln \frac{R_1}{R} + \right. \\
 & \left. \left. + (\mu_1 + bR_m) \frac{(R^2 - R_1^2)}{2} - \frac{bR^3}{3} + bR_1^2 \left(R - \frac{2}{3} R_1 \right) \right] \right\} \quad (32)
 \end{aligned}$$

Для удобства вычислений целесообразно в формуле (32) выражение, стоящее в фигурных скобках, обозначить через G :

$$P_{\text{изб}} = \frac{6\pi V}{h^3} G. \quad (32a)$$

Решая выражение (32a) относительно скорости сближения пластин V , находим, что V является функцией $P_{\text{изб}}$, R , свойств смазки и h^3

$$V = \frac{P_{\text{изб}} h^3}{6\pi G}. \quad (33)$$

В каждом конкретном случае штамповки мы имеем постоянными усилия прижима $P_{изб}$, радиус фланца заготовки R и заданную смазку.

На рис. 16 показаны графики $V=f(h)$ для касторового масла и давления прижима $P_{изб}=2650$ кг. В данном случае кривые соответствуют коэффициентам вытяжки $K_0=2,8$; $K=2,4$ и $K=2,0$.

Кривую (рис. 16) перестраиваем в координатах $h=f(T)$, где T — время сближения пластин.

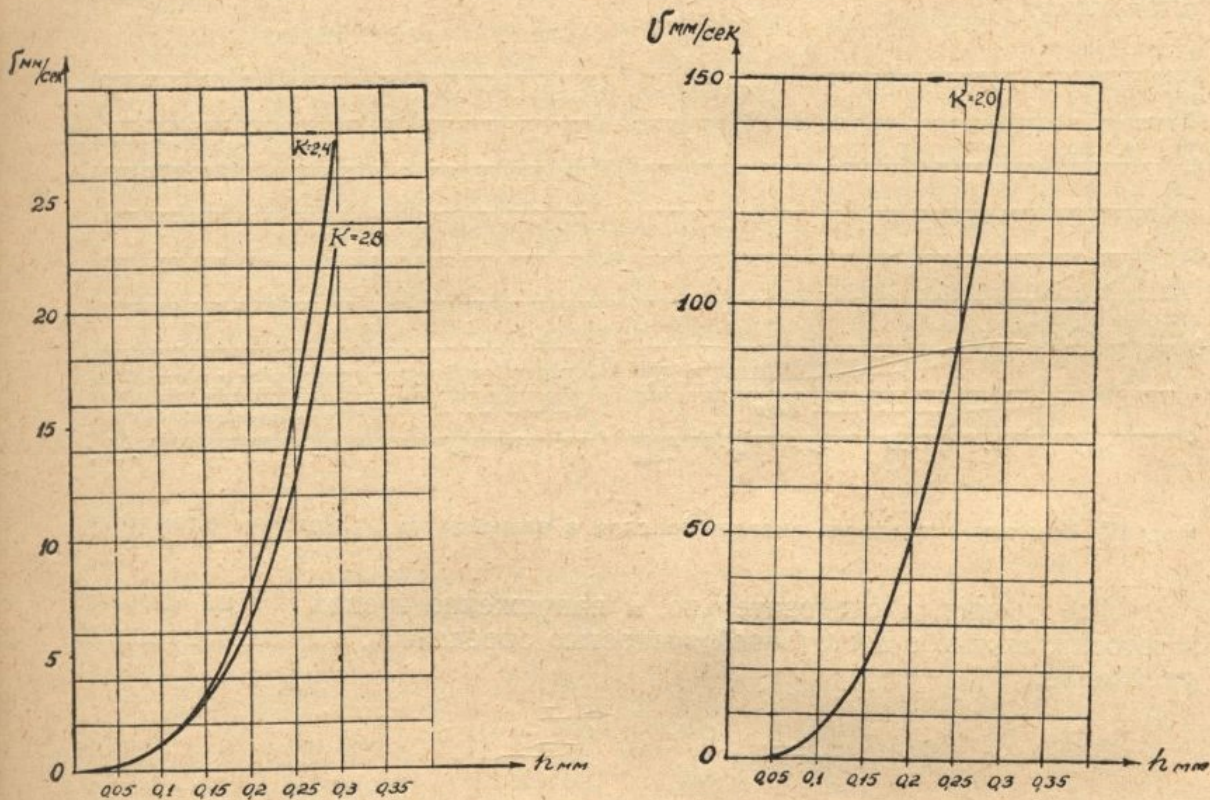


Рис. 16. Изменение скорости сближения фланца заготовки, матрицы и прижимного кольца.

На основании кривой $h=f(T)$ (рис. 17) можно определить время, за которое пластины сблизятся до расстояния $h=2\Delta$. Это и будет максимальное время штамповки, в течение которого имеет место жидкостное трение. В связи с тем, что в процессе штамповки желательно обеспечить минимальные силы трения между фланцем заготовки и поверхностью штампа, необходимо производить выбор смазки из условия только жидкостного трения, т. е. за все время штамповки толщина смазочного слоя не должна достигать 2Δ . Так как удельное давление прижима в процессе штамповки непрерывно возрастает из-за уменьшения площади фланца, выполнение этого условия потребовало бы выбора смазки по максимальному удельному давлению, что привело бы к крайне вязкой смазке и завышенным поэтому силам трения.

Поэтому, определяя максимальное время наличия в процессе штамповки жидкостного трения для разных текущих коэффициентов вытяжки, получаем результирующую кривую. Эта кривая будет характеризовать зависимость толщины смазочного слоя от времени с учетом изменения вдоль радиуса удельного давления прижима.

Инструментальные штампы обычно изготавливаются с чистотой поверхности $\nabla\nabla\nabla 9$, со средним квадратичным отклонением в $0,002$ мм и наибольшими отклонениями, достигающими в некоторых местах матрицы и прижимной плиты до $0,02$ мм. Заготовки из листового металла имеют весьма

малые шероховатости, не превышающие 0,0002 мм. Таким образом, возможно принять минимальную толщину слоя смазки равной

$$h=2(0,02 \div 0,0002) \approx 0,04 \text{ мм.}$$

Из кривых (рис. 17) видно, что $h=0,04$ мм может быть достигнуто сравнительно быстро лишь тогда, когда удельное давление прижима достигнет очень больших величин, т. е. в конце вытяжки. Это незначительное ухудшение условий вытяжки не оказывает существенного влияния на штамповку.

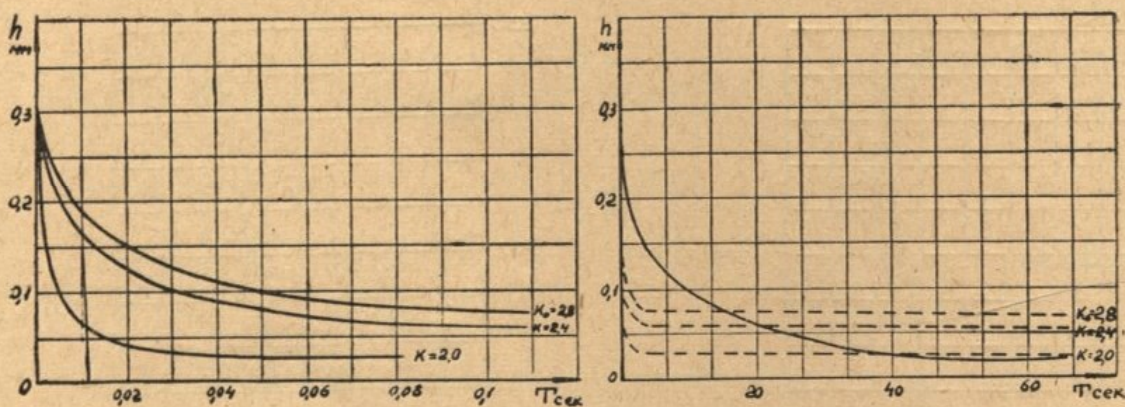


Рис. 17. Изменение толщины смазочного слоя в зависимости от времени штамповки.

Силу трения, а следовательно, и напряжение трения τ_{rp} на фланце заготовки, можно с достаточной точностью определить, воспользовавшись уравнением

$$\tau_{rz} = \mu \left(\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right). \quad (34)$$

В нашем случае $V_z = 0$, а V_r будем считать независимым от r , хотя это и не совсем точно. Такое упрощение, однако, не приводит к существенным погрешностям в определении силы трения.

Тогда

$$\tau_{rz} = \mu \frac{\partial V_r}{\partial z}. \quad (35)$$

После интегрирования с использованием граничных условий при $r=h$, $V_r=U$, где U — скорость перемещения фланца заготовки, а также учитывая закон распределения вязкости смазки в зависимости от температуры вдоль радиуса фланца, получаем выражение для интенсивности силы трения

$$f_{i_{rp}} = 2 \frac{U}{h} \left[(R-R_1) (\mu_1 + bR_m) - \frac{b(R^2 - R_1^2)}{2} \right]. \quad (36)$$

Для получения полной силы трения на фланце отнесем выражение (36) к площади фланца, развернув кольцо по среднему радиусу $\frac{R+R_1}{2}$.

Тогда сила трения будет

$$F_{rp} = \frac{2\pi U}{h} (R^2 - R_1^2) \left[(\mu_1 + bR_m) - \frac{b(R+R_1)}{2} \right], \quad (37)$$

VI. Экспериментальные исследования

Экспериментальное исследование процесса листовой штамповки стали с охлаждением ставило перед собой задачу определения максимально возможных коэффициентов вытяжки за один рабочий ход штампа.

Одновременно был исследован вопрос о влиянии смазки на величину усилия штамповки, а также изменение толщины стенок штампуемого изделия в зависимости от коэффициента вытяжки и степени охлаждения заготовки.

Исследования были проведены в экспериментальном штампе (рис. 7 и рис. 8). Штамповка проводилась в матрицах с радиусами протяжного ребра $\rho_m = 7,5; 8,5; 9,5$ и 13 мм со скоростью $0,1$ м/мин. Экспериментам была подвергнута сталь Я1Т л $1,2$ мм и Я1 л $1,0$ мм, закалена в воде $t = 1050^\circ$. С целью уменьшения трения поверхность матриц и прижимной плиты была обработана с чистотой $\nabla\nabla\nabla 9$ и отхромирована.

Перед проведением эксперимента пуансон заполнялся хладагентом из расходного бачка.

Спустя $30-40$ сек пуансон принимал температуру охлаждающей жидкости. Затем проводилась штамповка по обычной технологии. Усилие прижима задавалось соответствующим давлением воздуха в пневмосистеме и контролировалось по тарированному манометру. График зависимости усилия прижима от коэффициента вытяжки приведен на рис. 18.

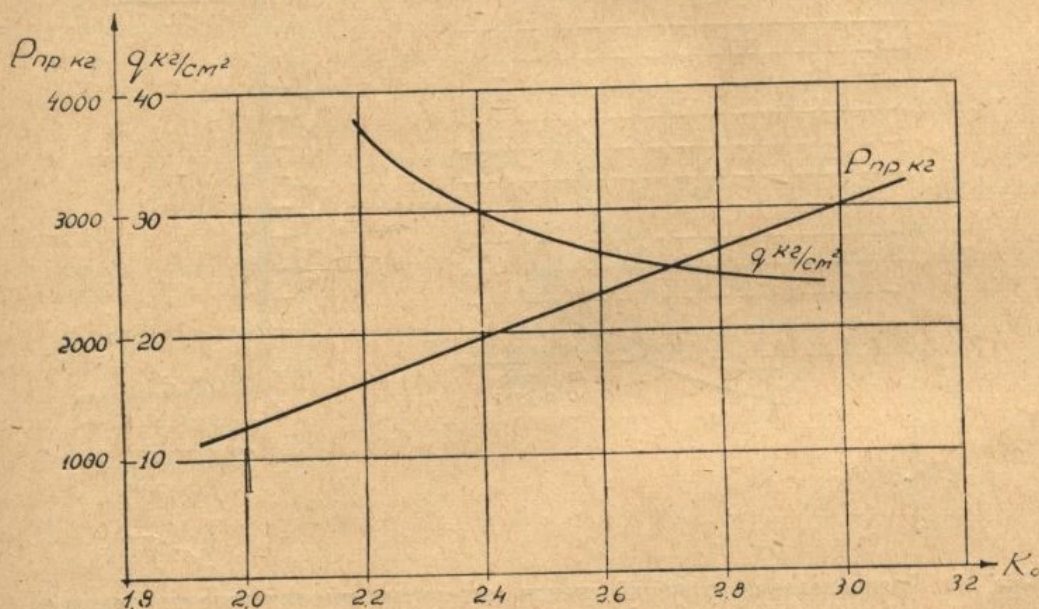


Рис. 18. Зависимость требуемого усилия и удельного давления прижима от исходного коэффициента вытяжки.

На рис. 11 показана зависимость $\sigma_{штmax} = f(K_0)$. Применяя глубокое охлаждение, оказалось возможным за один рабочий ход пресса получить коэффициенты вытяжки, достигающие $K_0 = 2,7$. Дальнейшее увеличение K_0 привело к разрушению материала заготовки вблизи протяжного ребра матрицы.

Исследования штамповки с применением смазки состава канифоль и касторовое масло позволили получить $K_{0max} = 2,9$ (рис. 19).

На рис. 20 приведены результаты замеров распределения утонений стенок стаканчиков. По сравнению с обычными способами штамповки в инструментальном штампе вытяжка с охлаждением позволяет получить значительно меньшую степень утонения стенок.

Экспериментальные кривые распределения температур по заготовке в процессе штамповки (рис. 13) показывают наличие на матрице и прижимном кольце положительных температур.

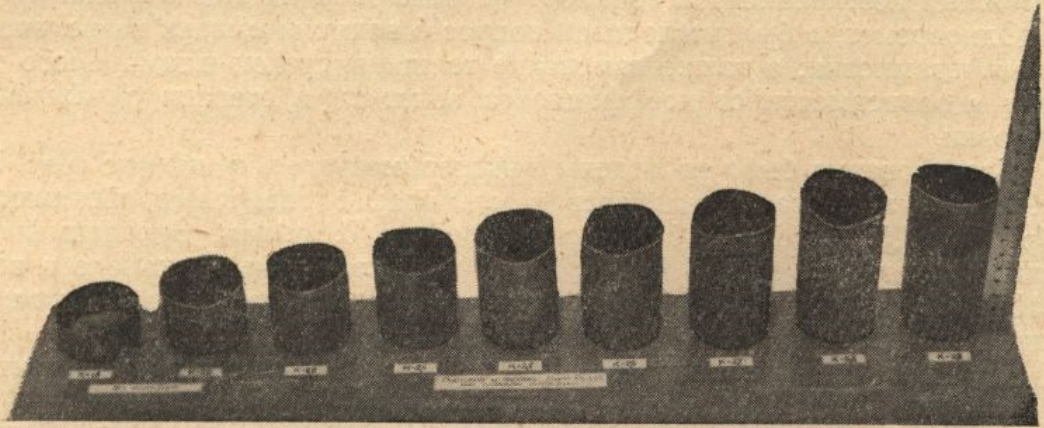


Рис. 19. Стаканы, вытянутые за один переход с применением охлаждения.

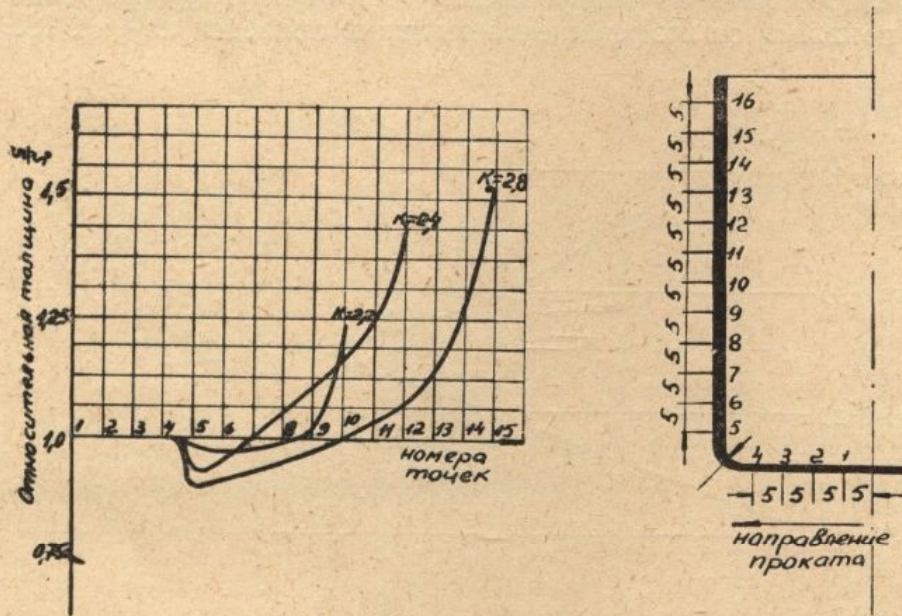


Рис. 20. Распределение утонений стенок вытянутых цилиндрических стаканов.

ВЫВОДЫ

1. Штамповка с применением сверхнизких температур нержавеющей сталей Я1Т и Я1 позволяет за один рабочий ход штампа получить $K_{0\max} = 2,9$.
2. Конструкция штампа мало отличается от обычных инструментальных штампов. Исключение составляет лишь конструкция пуансона, который выполнен полым, и наличие в штампе системы подвода хладагента.
3. Штамповка с охлаждением проводится по обычно принятой технологии со скоростью, равной 0,1 м/мин.

4. Применение глубокого охлаждения в обычной штамповке позволяет разгрузить наиболее напряженные места заготовки, что особенно важно при изготовлении деталей сложных форм.

5. Потребность только в одном штампе вместо нескольких для получения $K_0=2,9$ позволяет значительно снизить расходы на подготовку производства.

6. Наличие на фланце заготовки положительных температур позволяет применять в процессе штамповки рациональные смазки.

7. Штамповка с охлаждением дает возможность уменьшить степень утонения стенок изделия и получить более равномерную толщину стенок, чем при обычной штамповке.

Данная работа является первым исследованием процесса штамповки с охлаждением и поэтому не может претендовать на исчерпывающее разрешение всех вопросов. Дальнейшие исследования помогут в полной мере оценить возможности предложенного процесса глубокой вытяжки

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Е. Беляев. Механические свойства авиационных металлов при низких температурах. Оборонгиз, 1940.
2. В. Т. Мещерин. Листовая штамповка. Атлас схем. Машгиз, 1951.
3. А. П. Туляков. Механические свойства металлов при низких температурах. «Химическое машиностроение», 1935, № 1, 2.
4. А. А. Ильюшин. Пластичность. Гостехиздат, 1948.
5. Р. В. Пихтовников. Теория однопереходной штамповки-вытяжки. Автореф. докторской дисс., ХАИ, Харьков 1952.
6. С. Я. Герш. Глубокое охлаждение. Ч. II, изд-во «Советская наука» 1949.
7. С. М. Тарг. Основные задачи теории ламинарных течений, Гостехиздат, М.-Л., 1951.
8. Труды МАТИ № 29. Исследования в области глубокой вытяжки металлов. Оборонгиз, 1956.
9. G. Gruschka. Zugfestigkeit von Stählen bei tiefen Temperaturen. VDJ Verlag, Berlin, 1934.