

**В. Н. ФАРМАНОВА, С. В. САПАРОВСКИЙ**

## **ПРОЦЕСС ШТАМПОВКИ-РЕЗКИ РЕЗИНОЙ ЗАГОТОВОК И ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Штамповка резиной является одним из эффективных методов изготовления деталей из листового материала в мелкосерийном и среднесерийном производстве. Дорогие металлоемкие штампы заменяются простым инструментом (формоблоком и вырезным блоком). Матрицей же является универсальная резиновая или полиуретановая подушка, смонтированная в контейнер.

До настоящего времени методом штамповки резиной выполняются в основном операции гибки и формовки.

Заготовки для деталей изготавливаются методом фрезерования или резкой на роликовых и вибрационных ножницах с последующей пробивкой отверстий в инструментальном штампе.

Разработка и внедрение в промышленность гидравлических прессов с высоким удельным давлением резины до  $1000 \text{ кг/см}^2$  значительно расширяет возможности процесса штамповки резиной и позволяет ставить вопрос об использовании данного метода для операции вырезки внешнего контура заготовки и пробивки отверстий, что создает замкнутый цикл изготовления деталей. Сущность данного процесса описана в работах [1], [2], [3].

При внедрении в производство процесса резки резиной необходимо установить связь между основными параметрами: удельным давлением резины  $q \text{ кг/см}^2$ , необходимого для разъединения материала, высотой вырезного блока  $h$  и величиной припуска на обрезку  $H$ . Получение этой связи нужно для правильного ведения процесса резки на различных материалах и толщинах.

Для изготовления заготовок и деталей из разных марок материала и толщин требуются определенные оптимальные удельные

давления резины  $q$  припуск  $H$  и высота вырезного блока  $h$ , а следовательно различные степени использования усилия прессы. В статье описываются результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований данного процесса.

В ходе теоретических исследований установлена связь между основными параметрами  $q$ ,  $h$ ,  $H$  и получена формула для практического применения. Раскрыта физическая сущность процесса, на основании чего принята схема напряженно-деформированного состояния. Исследована поверхность среза, в результате чего установлено, что качество ее не уступает качеству кромки, получаемой при других методах. По полученным результатам исследования разработана производственная инструкция.

На рис. 1 дана схема напряженно-деформированного состояния процесса резки резиной. Как видно из схемы, процесс резки состоит из 2-х стадий.

1. Изгиб по относительному радиусу  $\frac{r}{s}$  значительно меньше единицы и получение верхними слоями материала в зоне острой кромки предельной критической деформации.

2. Разрушение материала по контуру вырезного блока вследствие растягивающего усилия.

Таким образом, считаем, что требуемое удельное давление для резки состоит из 2-х компонентов:

1.  $q_{изг}$  — требуемое для пластического изгиба по радиусу, близкому к 0;
2.  $q_{рас}$  — требуемое для окончательного разъединения металла по контуру вырезного блока.

$q_{изг}$  получено из условия равенства моментов внешних и внутренних сил при изгибе широкой полосы на радиусе, близкому к нулю. При решении данной задачи были приняты следующие допущения.

1. В зоне острой кромки имеет место плоско-деформированное состояние.

2. Использовалась гипотеза плоских сечений.

3. Нейтральным слоем считается слой, которому в текущий момент изгиба отвечают положения осей поворота сечений [4].

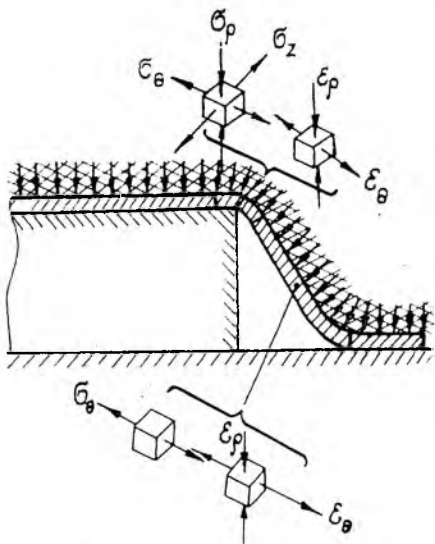


Рис. 1. Схема напряженно-деформированного состояния материала при резке резиной.

4. Аппроксимация диаграммы упрочнения принималась в виде степенной зависимости

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^n,$$

где  $A$  и  $n$  постоянные величины для данного материала;

$\sigma_i$ ;  $\varepsilon_i$  — интенсивность напряжений и деформаций.

В работе использована методика Ренне И. П. [5] для расчета утонения, но с применением степенного закона упрочнения вместо линейного, как указано в работе [5]. Для определения тангенциальных и радиальных напряжений и характера их распределения в зоне острой кромки при гибке заготовки с учетом упрочнения составляем уравнение равновесия, используя полярную систему координат для плоской задачи

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (1)$$

И, решая его совместно с уравнением пластичности, в котором напряжение текучести определяется по формуле

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \pm \frac{2}{3} A \varepsilon_i^n \quad (2) \quad \sigma_s = A \varepsilon_i^n, \quad (2)$$

используем логарифмические деформации

$$\varepsilon = \ln \frac{r}{r_n},$$

где  $r$  — текущий радиус;

$r_n$  — радиус нейтрального слоя, уравнение (2) принимает вид

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \pm \frac{2}{3} A \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^n. \quad (3)$$

При совместном решении уравнения (1) и (3) было получено дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1}{r} \left[ \pm \frac{2}{3} A \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^n \right] = 0. \quad (4)$$

После интегрирования уравнения (4) и отыскания значений произвольных постоянных из условия, что на поверхности заготовки при  $r=r_{вн}$  и  $r=R$  напряжение  $\sigma_r=0$  получено напряжение растяжения  $\sigma_r^p$  и сжатия  $\sigma_r^c$  в радиальном направлении:

$$\sigma_r^p = - \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^n \frac{A}{n+1} \left[ \left( \ln \frac{R}{r_n} \right)^n - \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^{n+1} \right], \quad (5)$$

$$\sigma_r^c = - \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^n \frac{A}{n+1} \left[ \left( \ln \frac{r_n}{r} \right)^{n+1} - \left( \ln \frac{r_n}{r_{вн}} \right)^{n+1} \right]. \quad (6)$$

Напряжение растяжения  $\sigma_r^p$  и сжатия  $\sigma_r^c$  в тангенциальном

направлении получаем после подстановки в уравнение (3) значение  $\sigma_r^p$  из уравнения (5) и значение  $\sigma_r^c$  из уравнения (6).

$$\sigma_{\theta}^p = \frac{2}{\sqrt[3]{3}} \left( \frac{2}{\sqrt[3]{3}} \right)^n \frac{A}{n+1} \left[ \left( \ln \frac{R}{r_n} \right)^{n+1} - \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^{n+1} + n + 1 \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^n \right], \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta}^c = -\frac{2}{\sqrt[3]{3}} \left( \frac{2}{\sqrt[3]{3}} \right)^n \frac{A}{n+1} \left[ -\left( \ln \frac{r_n}{r} \right)^{n+1} + \left( \ln \frac{r_n}{r_{вн}} \right)^{n+1} + (n+1) \left( \ln \frac{r_n}{r} \right)^n \right], \quad (8)$$

$r_{вн}$  — радиус внутренней поверхности заготовки;

$R$  — радиус наружной поверхности заготовки.

По формуле  $r_n = \sqrt[3]{Rr_{вн}}$  находим радиус нейтрального слоя согласно работам [4], [6], но с учетом утонения материала, которое определяем из решения трансцендентного уравнения

$$\left[ \ln \frac{(\mu - \nu)(1 - \nu')}{2(\mu\nu' - \nu)} \right] - \left[ \ln \frac{(\mu + \nu^2)(1 + \nu')}{2(\mu\nu' - \nu)} \right] + \left( \ln \frac{\mu^2 - \nu^2}{2\nu} \right) = 0, \quad (9)$$

где  $\mu = \frac{R}{S_0}$ , а  $\nu = \frac{r_{вн}}{s_0}$ ,

$S_0$  — начальная толщина материала.

Полученное уравнение (9) решалось с помощью графического интегрирования на электронно-вычислительной машине Урал-2. С помощью интегрирования была найдена функция  $\nu = f(\mu)$  и определена функциональная зависимость изменения толщины  $\eta = \mu - \nu$ .

Зная величины  $\sigma_{\theta}^p$  и  $\sigma_{\theta}^c$  в любом сечении из условия равенства моментов внутренних и внешних сил определяем требуемое удельное давление для изгиба  $q_{изг}$ .

$$M_{вн} = M_{н}$$

$$M_{вн} = \left( \frac{2}{\sqrt[3]{3}} \right)^{n+1} \frac{A}{n+1} \left[ -\left( \ln \frac{R}{r_n} \right)^{n+1} \frac{R^2}{2} + \left( \ln \frac{r_n}{r_{вн}} \right)^{n+1} \frac{r_{вн}^2}{2} \right] +$$

$$+ (n+1) \int_{r_{вн}}^R \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^n r dr + \int_{r_n}^R \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^{n+1} r dr + \int_{r_{вн}}^r \left( \frac{r_n}{r} \right)^{n+1} r dr, \quad (10)$$

$$M_{н} = \frac{q(H - r_n \varphi)^2}{2}. \quad (11)$$

Решая уравнение (10) и (11) получим  $q_{изг}$ .

$$q_{изг} = \frac{2 \left[ \left( \frac{2}{\sqrt[3]{3}} \right)^{n+1} \frac{A}{n+1} \right] - \left( \ln \frac{R}{r_n} \right)^{n+1} \frac{R^2}{2} + \left( \ln \frac{r_n}{r_{вн}} \right)^{n+1} \frac{r_{вн}^2}{2}}{(H - r_n \varphi)^2} +$$

$$+ \frac{(n+1) \int_{r_{вн}}^R \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^n r dr + \int_{r_n}^R \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^{n+1} r dr + \int_{r_{вн}}^r \left( \ln \frac{r_n}{r} \right)^{n+1} r dr}{(H - r_n \varphi)^2}, \quad (12)$$

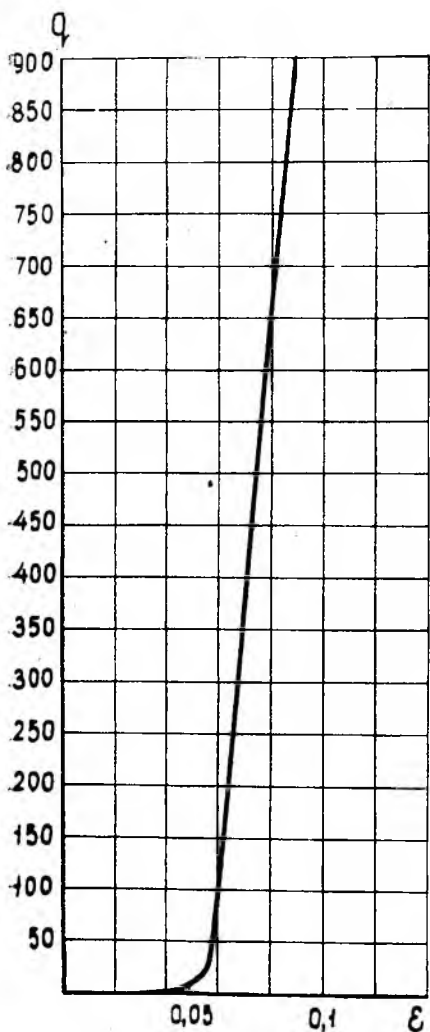


Рис. 2. График зависимости удельного давления от степени сжатия резины

где  $H$  — величина припуска заготовки;

$\Phi$  — уголгиба.

При решении задачи для определения второй составляющей общего удельного давления для резки резиной исходим из следующих условий.

После изгиба заготовки происходит жесткое защемление припуска между подштамповой плитой и резиной и прекращает его перемещение в сторону вырезного блока, и начинается вторая стадия — растяжение до разрушения заготовки. Принимаем, что резина действует как жидкость (рис. 2), тогда на припуске между подштамповой плитой и острой кромкой блока действует равномерно распределенная нагрузка.

В зоне деформируемого участка ОВА (рис. 3) условно принимаем схему линейно напряженного состояния рис. 1.

Тогда при решении задачи для определения  $q_{\text{раст}}$  считаем, что растягивающее напряжение действует только в тангенциальном направлении, а деформация — в тангенциальном и радиальном.

Все необходимые параметры ( $a, R, H, l_i$ ) (рис. 3) определяем геометрическим путем.

Определив параметры, находим деформации в тангенциальном  $\epsilon_{\theta}$  направлении и радиальном  $\epsilon_r$ ,

$$\epsilon_{\theta} = \frac{\beta R + 2l_i - a}{a}, \quad (13)$$

$$\epsilon_r = \frac{a}{\beta R + 2l_i} - 1 \quad (14)$$

и определяем интенсивность деформации

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_r^2 - \varepsilon_\theta \varepsilon_r}. \quad (15)$$

Зависимость между напряжением и деформацией выражаем степенной функцией

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^n. \quad (16)$$

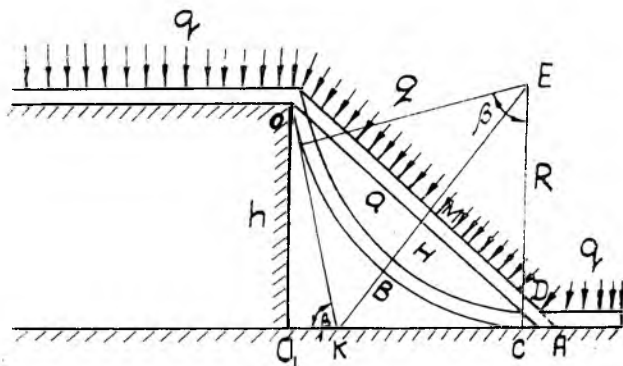


Рис 3. Схема для определения параметров ( $a$ ,  $R$ ,  $H$ ,  $l_i$ )

Учитывая принятое допущение о линейной схеме напряженного состояния, считаем, что  $\sigma_i = \sigma_\theta$ .

Подставляя в формулу 16 вместо  $\sigma_i$  интенсивности напряжения  $\sigma_\theta$  и значение  $\varepsilon_i$  из формулы (15), находим напряжение деформации

$$\sigma_\theta = \frac{2}{3} A \left[ \sqrt{\left(\frac{\beta R + 2l_i - a}{a}\right)^2 + \left(\frac{a}{\beta R + 2l_i} - 1\right)^2} - \left(\frac{\beta R + 2l_i - a}{a}\right) \left(\frac{a}{\beta R + 2l_i} - 1\right)^n \right]^n. \quad (17)$$

Используем уравнение Лапласа, т. к. считаем, что резина действует аналогично жидкости

$$\frac{\sigma_\theta}{R} = \frac{q_l}{S_l}; \quad \sigma_\theta = \frac{R q_l}{S_l}. \quad (18)$$

Считаем, что напряжение по ширине равно нулю. Приравняв уравнение 17 и 18 и решая его относительно  $q$ , находим  $q$  растяжения необходимое для разъединения металла:

$$q_{\text{рас}} = \frac{\frac{2}{3} A \left[ \sqrt{\left(\frac{\beta R + 2l_i - a}{a}\right)^2 + \left(\frac{a}{\beta R + 2l_i} - 1\right)^2} - \left(\frac{\beta R + 2l_i - a}{a}\right) \left(\frac{a}{\beta R + 2l_i} - 1\right)^n \right]^n}{R (2l_i + R\beta)} - \frac{\left[ \sqrt{\left(\frac{\beta R + 2l_i - a}{a}\right) \left(\frac{a}{\beta R - 2l_i} - 1\right)} \right]^n a s}{R (2l_i + R\beta)}. \quad (19)$$

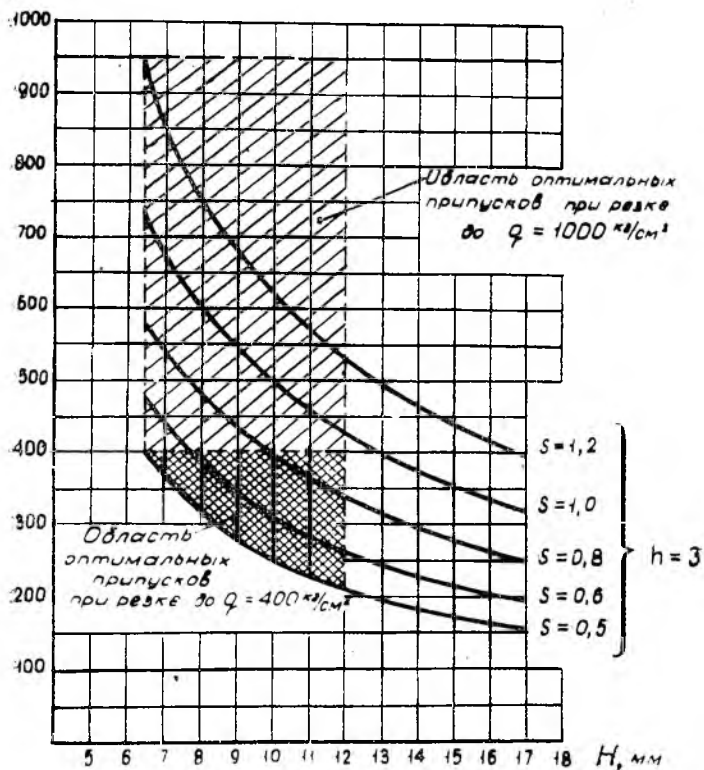
$q \text{ кг/см}^2$ 

Рис. 4. График зон оптимальных припусков и удельных давлений для материала Д16 АМ различной толщины.

Для практического использования данных расчетов с помощью электронно-вычислительной машины Урал-2 получены данные, на основании которых построены графики для различных толщин материала Д16АМ и высоты блока  $h$ . На рис. 4 дан график, с помощью которого легко установить необходимое удельное давление для операции вырезки и припуск  $H$ . Как видно из рис. 5, теоретические данные исследования с достаточной точностью совпадают с экспериментом.

Сравнительным исследованием поверхности среза под микроскопом и с помощью микротвердости установлено, что качество кромки полученной резкой резиной не уступает поверхности среза, полученной в инструментальном штампе.

Процесс вырезки резиной успешно внедряется в промышленности на прессах ПШР-1 с удельным давлением резины до  $400 \text{ кг/см}^2$ . При этом по предварительным подсчетам годовой экономический эффект при внедрении только 50 наименований составляет 12 тысяч

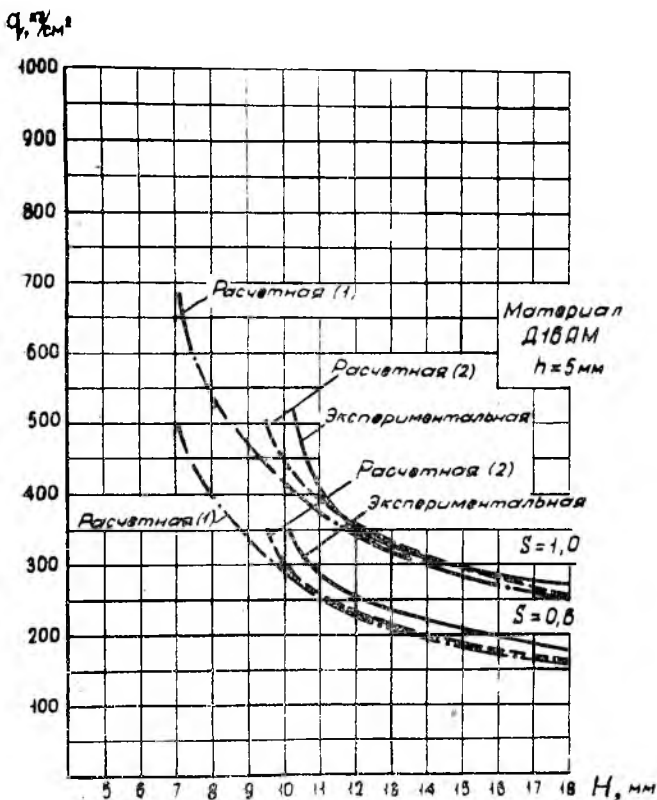


Рис. 5. График сравнения теоретических и экспериментальных данных

рублей. При внедрении в производство прессов с удельным давлением до  $10000 \text{ кг/см}^2$  данный процесс будет значительно эффективней.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Мендлин. Штамповка резиной, Оборонгиз, 1944.
2. М. И. Разумихин, С. В. Сапаровский, В. Н. Фарманова. Резка резиной контуров на гидравлических прессах с высоким удельным давлением. Кузнечно-штамповочное производство, № 11, 1963.
3. С. В. Сапаровский, А. Д. Комаров, Е. П. Смеляков, В. Н. Фарманова. Штамповка резиной. Куйбышевское книжное издательство, 1964.
4. И. П. Ренне. Пластический изгиб листовой заготовки. Изменение толщины листовой заготовки. Труды Тульского механического института. Вып. 4. М. Оборонгиз, 1950.
5. Е. А. Попов. Основы теории листовой штамповки. «Машинное строительство», Москва, 1968.
6. Е. И. Исаченков. Штамповка резиной и жидкостью. Машгиз, 1967.