

зоне, движение вырубаемой детали по цилиндрическому пояску матрицы, а также перемещение точек нижней плоскости матрицы по упругому основанию вызывают силы трения F_1 , F_2 , F_3 , которые пропорциональны величинам нормальных давлений. Давление вырубаемой детали q_3 на стенку матрицы считаем равномерно распределенным ввиду малости участка. Форму матрицы принимаем строго цилиндрической.

Исходными для определения величин удельных давлений q_1 , q_2 и q_3 приняты следующие соотношения:

$$\int_a^{a+m} q_1 2\pi r dr = P - F_3; \quad (1)$$

$$\int_a^b q_2 2\pi r dr = P; \quad (2)$$

$$\int_0^n q_3 2\pi a dz = 0,35P; \quad (3)$$

$$P = k\sigma_{cp}tL, \quad (4)$$

где $k = 1,2$ – коэффициент, учитывающий затупление режущих кромок;

σ_{cp} – сопротивление штампуемого металла срезу, принимается равным $(0,8-0,85)\sigma_{cp}$;

t – толщина штампуемого листового металла, мм;

L – периметр вырубаемого контура, мм.

Вид нагружения распределенными нагрузками q_1 и q_2 принят на основании результатов ранее проведенных экспериментов.

Распирающее матрицу усилие принято равным $0,35 P$, а коэффициент трения в зонах действия q_1 , q_2 и q_3 принят равным $0,3$. Величины контактных зон определяются соотношениями $m = 0,5t$; $n = 0,1t$ [1].

В соответствии с физической постановкой задачи в области Ω ($a \leq r \leq b$, $0 \leq z \leq h$), ограниченной контуром $\partial\Omega$, необходимо решать однородное уравнение Ляме, заданное в области Ω :

$$(\lambda + \mu)\text{grad div } \bar{u} + \mu\Delta\bar{u} = 0, \quad (5)$$

где \bar{u} – вектор перемещений;

λ и μ – упругие постоянные Ляме.

Краевые условия на контуре $\partial\Omega$:

$$\sigma_n = q_1, \tau_n = F_1 \text{ на } \partial\Omega_1 (a \leq r \leq a + m, z = 0);$$

$$\sigma_n = q_2, \tau_n = F_2 \text{ на } \partial\Omega_2 (a \leq r \leq b, z = h);$$

$$\sigma_n = q_3, \tau_n = F_3 \text{ на } \partial\Omega_3 (r = a, 0 \leq z \leq n);$$

$$\sigma_n = 0, \tau_n = 0 \text{ на } \partial\Omega_4, \quad (6)$$

где σ_n и τ_n – соответственно нормальная и касательная составляющие внешних нагрузок;

$\partial\Omega_4$ – участки контура, свободные от внешних нагрузок.

Нахождение вектора перемещений системы (5, 6) можно заменить задачей отыскания минимума квадратичного функционала на множестве функций, удовлетворяющих краевым условиям (6).

Для решения задачи применен вариационно-структурный метод, основанный на функциях В. Л. Рвачева [2]. В процессе исследования определялось влияние усилия вырубки и толщины стенок матрицы для штамповки деталей круглой формы на компоненты тензора напряжений.

Причем отношение a/b изменялось от 0,3 до 0,8 как за счет варьирования внутреннего диаметра при постоянном наружном, так и за счет наружного при постоянном внутреннем. Влияние усилия вырубki определялось за счет изменения толщины штампуемого металла от 2,0 до 10,0 мм. Проведенные численные расчеты позволили определить компоненты тензора напряжений для всех рассмотренных вариантов и представить их в виде графиков, показанных на рис. 2 и 3, где $d = 2a$, $D = 2b$.

Исследования напряженно-деформированного состояния вырубных матриц показали, что наиболее нагруженной областью матрицы в момент вырубki является кольцевая зона вблизи режущей кромки, ограниченная контактнм пояском штампуемого материала и глубиной его внедрения в матрицу. Причем, абсолютные значения максимальных напряжений имеют большие величины на некотором удалении (примерно на 0,1 мм) от режущей кромки по сравнению с соответствующими на самой кромке. Однако величины максимальных напряжений еще не определяют предельное по прочности состояние напряженного элемента, хотя и характеризуют его качественную картину.

Как известно, нагрузкой, вызывающей напряженное состояние вырубной матрицы, является вертикальное усилие вырубki. Радиальные нагрузки, распирающие матрицу в процессе вырубki, являются производными и по величине представляют собой часть вертикального. Соответственно и возникающие осевые напряжения σ_x в матрицах, с большими и оптимальными толщинами стенок, имеют большие величины по сравнению с радиальными σ_r и тангенциальными σ_e . На рис. 2, 3 индексы 1 и 0,1 означают напряжения соответственно на режущей кромке и на удалении по оси z на 0,1 мм. Как видно из графиков, абсолютные значения максимальных напряжений на самой режущей кромке и на некотором удалении от нее достигают значительных величин – более 200 кгс/мм², что превосходит пределы прочности практически применяемых сталей. Поэтому за критерий прочности вырубных матриц необходимо принимать эквивалентные напряжения; на режущей кромке, вычисляемые по одной из гипотез прочности. По условиям нагружения, виду применяемого материала и характеру напряженного состояния для вырубных матриц наиболее приемлемой является гипотеза прочности удельной потенциальной энергии формоизменения.

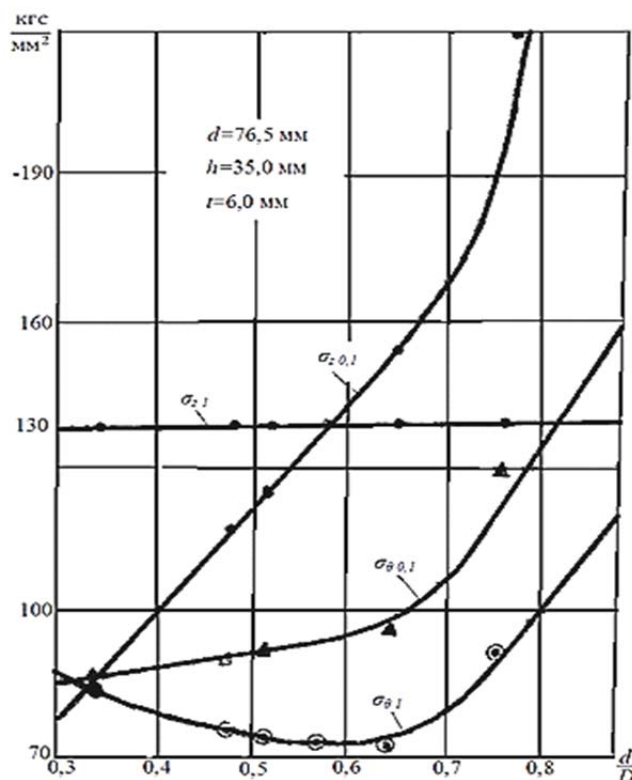


Рис. 2. Зависимость напряжений от толщины стенок вырубных матриц для постоянного усилия вырубki

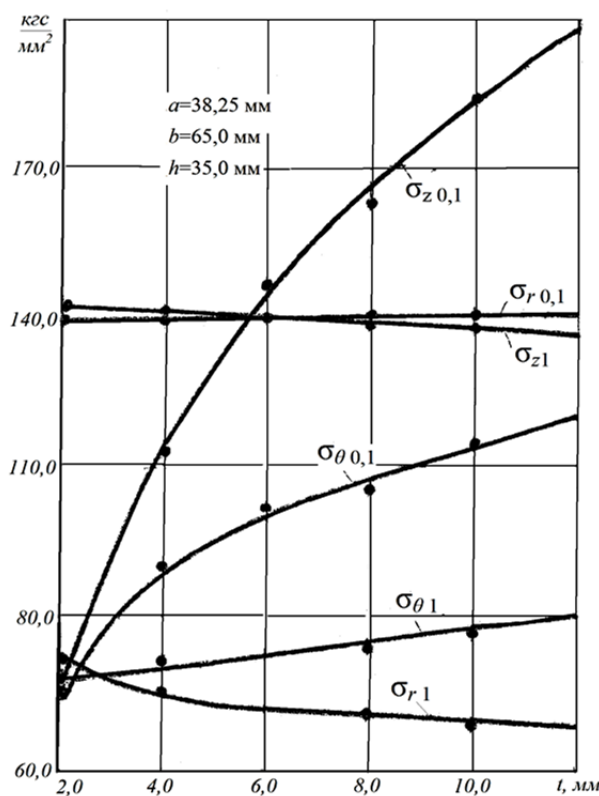


Рис. 3. Зависимость напряжений в матрицах от толщины штампуемого металла

По результатам расчетов на ЭВМ с использованием формулы Губера-Мизеса были получены значения эквивалентных напряжений на режущих кромках матриц во всех рассмотренных вариантах. Полученные результаты подтвердили справедливость утверждения о необходимости принимать за критерий прочности не максимальные, а эквивалентные напряжения. Так для $a/b < 0,7$ максимальными являются осевые напряжения σ_z , достигающее 140 кгс/мм^2 , что согласуется с результатам ранее проведенных экспериментальных исследований методом фотоупругости.

Эквивалентные же напряжения, характеризующие работоспособность матрицы по условиям прочности, не превосходят и 80 кгс/мм^2 . Более того, в окрестности $a/b = 0,7$, когда σ_r и σ_θ возрастают и приближаются к σ_z , что, казалось бы, усугубляет опасность разрушения матрицы, эквивалентные напряжения уменьшаются до 40 кгс/мм^2 и менее. И лишь для $a/b > 0,75$, т. е. при недостаточной толщине стенки матрицы, когда σ_r и σ_θ по величине значительно превосходят σ_z (для $a/b = 0,77$, например, $\sigma_z = 155 \text{ кгс/мм}^2$, а $\sigma_\theta = 276 \text{ кгс/мм}^2$), эквивалентные напряжения достигают 130 кгс/мм^2 и уже вызывают опасения по прочности. Таким образом, при конструировании вырубных матриц УСШ толщины стенок необходимо назначать такими, чтобы выполнялось отношение внутреннего диаметра к наружному $a/b = 0,7 \div 0,75$.

Это соотношение справедливо для усилий вырубки до 250 тс листового металла с пределом прочности до 80 кгс/мм^2 .

Для удобства использования результатов исследования при конструировании универсально-сборных штампов и определении основных размеров вырубных матриц или проверке их на прочность необходимо получить аналитические зависимости толщин стенок матриц от эквивалентных напряжений, а также эквивалентных напряжений от толщин штампуемого материала.

При теоретическом исследовании напряженно-деформированного состояния вырубных матриц для возможности сравнения получаемых данных с результатами ранее проведенных экспериментов толщины стенок назначались такими, что при постоянном наружном диаметре $2b = \text{const} = 130 \text{ мм}$ отношения a/b были равными 0,46; 0,53; 0,59; 0,67; 0,77.

В результате машинного счета было поручено пять вариантов тензоров напряжений и соответствующих напряжений. Далее по методу наименьших квадратов была получена аналитическая зависимость толщин стенок от эквивалентных напряжений, возникающих на режущих кромках матриц:

$$a/b = 7,013(10 - 21,992p + 17,542p^2 - 5,998p^3 + 0,743p^4), \quad (7)$$

где $p = \frac{\sigma_3}{\sigma_B}$ – отношение эквивалентного напряжения на режущей кромке матрицы к пределу прочности штампуемого листового металла.

Формула (7) может быть использована для проверки и уточнения рекомендуемого отношения a/b для реально возникающих на режущих кромках эквивалентных напряжений при штамповке конкретного металла определенной толщины.

Как показали исследования, величина максимального эквивалентного напряжения на режущей кромке практически не зависит от длины периметра вырубного контура, а определяется сопротивлением срезу и толщиной штампуемого материала. Выражение для определения величины эквивалентного напряжения на режущей кромке вырубной матрицы имеет вид:

$$\sigma_3 = 0,761K(100 - 40,894t + 13,189t^2 - 1,64t^3 + 0,0686t^4), \quad (8)$$

где t – толщина штампуемого металла, мм;

K – коэффициент, зависящий от предела прочности штампуемого металла. Для $\sigma_B = 40$ кгс/мм² и $K = 1$; для других металлов $K = 0,025 \sigma_B$.

Формула (8) получена для оптимального отношения $a/b = 0,71$ и справедлива для листовых материалов толщиной от 2 до 10 мм.

ВЫВОДЫ

Получены аналитические зависимости для определения эквивалентных напряжений на режущих кромках матриц от сопротивления среза и толщины штампуемого материала.

Получена аналитическая зависимость геометрических параметров вырубных матриц от усилия вырубки и толщины штампуемого материала.

Установлены рациональные конструктивные параметры вырубных матриц УСШ при штамповке конструкционных сталей толщиной 2–10 мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чижигов В. Н. Влияние величины зазора между матрицей и пуансоном на точность деталей, изготавливаемых вырубкой-пробивкой / В. Н. Чижигов, А. Я. Мовшович, А. Я. Горницкий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2002. – № 11. – С. 25–28.
2. Бых А. И. Напряженно-деформированное состояние вырубных матриц специализированных переналаживаемых штампов / А. И. Бых, А. Я. Мовшович, Л. Г. Кузнецова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – № 8. – С. 30–33.
3. Кутейкин К. К вопросу определения истинного напряжения пластического течения металлических материалов / К. Кутейкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2005. – № 8. – С. 42–46.

Мовшович А. Я. – д-р техн. наук, проф. УИПА;

Ткачук Н. А. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой НТУ «ХПИ»;

Федосеева М. Е. – ассистент УИПА;

Черная Ю. А. – ассистент УИПА.

УИПА – Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков.

НТУ «ХПИ» – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

E-mail: fedmari251985@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2012 г.