3. Левшин А. Переход на Windows 7 «неизбежен» — результаты исследования [***Электронный ресурс***]: HiTech Expert. – ***Режим доступа***: http://expert.com. ua /37482.html/ Переход на Windows 7 «неизбежен».
4. Кравченко И. Ф. От электронного документоборота – к CALS-технологиям [***Электронный ресурс***] / И. Ф. Кравченко, Г. И. Ансин, В. М. Чебуклей (ГП «Ивченко-Прогресс») // Всеукраинский журнал «Сделано в Украине». – Режим доступа: http:/madein.dp.ua/view.aspx?type= ja&lang=1&jaid=534/ От электронного документооборота к CALS… – Made in Ukraine.
5. Чечевицына Л. Н. Экономика фирмы: ***учеб. пособ. для студ. вузов*** / Л. Н. Чечевицына, И. Н. Чуев. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 382, (1) с – (Высшее образование).

Надійшла до редколегії 25.10.2013

УДК 621.983

Н. Н. Убизький

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТА ПРИ ГИБКЕ В ШТАМПАХ

Наведена методика підвищення точності розрахунку розмірів заготовок із листа під час згинання у штампах.
Ключові слова: *методика, точність, розміри, заготовки, лист, згинання, штамп.*

Приведена методика для повышения точности расчета размеров заготовок из листа при изгибе в штампах.
Ключевые слова: *методика, точность, размеры, заготовки, лист, изгиб, штамп.*

Methodology over is brought for the increase of exactness of calculation of sizes of purveyances from a sheet at a bend in stamps.
Keywords: *methodology, exactness, sizes, purveyances, sheet, bend, stamp.*

Технология получения гнутых деталей из заготовок, не имеющих припуска, особенно выгодна в условиях многономенклатурного листоштамповочного производства, так как исключаются операции обрезки контура заготовок и, тем самым, сокращаются трудоемкость изготовления деталей и отходы металла.

Процесс формоизменения заготовки по схеме, показанной на рис. 1, включает процессы изгиба материала и последующего спрямления.

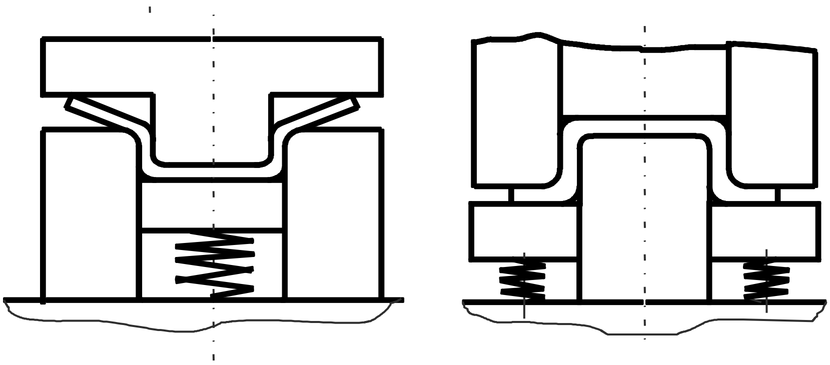

Рис. 1. Формообразование деталей типа «сдвоенный зет»

Продольная сила, действующая на участке изгиба, возникает вследствие трения заготовки о поверхность инструмента, значение этой силы в большинстве случаев составляет менее $0{,}1\ \sigma\ h$, поэтому ею можно пренебречь. В данном случае силы и моменты отнесены к единице ширины заготовки.

На участке заготовки, огибающей кромку матрицы, скругленную радиусом r, происходит увеличение меридионального напряжения, которое может быть подсчитано по приближенной формуле [1]:

$$\Delta\sigma_\alpha^1 = \frac{\sigma h_0}{2r + h_0}\, e^{\mu\varphi}, \tag{1}$$

где: μ – коэффициент трения; φ – угол охвата заготовкой кромки матрицы.

Данная формула отражает условия баланса работ внутренних сил и моментов при изгибе и спрямлении заготовки. С учетом приведенной формулы $\Delta\sigma_\alpha^1$ продольная сила, действующая на участке спрямления заготовки,

$$N = \Delta\sigma_\alpha^1\ h_0 = \frac{\sigma\ h^2{}_0}{2r + h_0}\, e^{\mu\varphi}. \tag{2}$$

Связь между N и нейтральным радиусом $\rho_н$ устанавливаем с помощью анализа напряженно-деформированного состояния заготовки. Запишем уравнение равновесия элемента изогнутой заготовки в начальный момент спрямления:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\alpha}{\rho} = 0. \tag{3}$$

Интегрируем уравнение (3) с использованием условия пластичности Сен-Венана. Материал считаем жесткопластическим. В области сжимающих деформаций спрямления ($r + h_0 \geq \rho > \rho_н$):

$$\sigma_\rho = \sigma \; ln \; \frac{r + h_0}{\rho}, \qquad \sigma_\alpha = \sigma \; (ln \frac{r + h_0}{\rho} - 1). \tag{4}$$

В области растягивающих деформаций ($r \le \rho < \rho_н$):

$$\sigma_\rho = \sigma \; \ln \frac{\rho(r + h_0)}{\rho_н^2}, \qquad \sigma_\alpha = \sigma \; [\, 1 + \mathbf{ln} \, \frac{\rho(r + h_0)}{\rho_н^2}]. \tag{5}$$

Контактное радиальное напряжение:

$$\sigma_{\rho / \rho = r} = \; q \; = \sigma \; \mathbf{ln} \frac{r \, (r + h_0)}{\rho_н^2}. \tag{6}$$

Интегрируем функцию σ_α по толщине заготовки и получаем зависимость между значением продольной силы и размером нейтрального радиуса:

$$N = \sigma \, \mathrm{r} \; \mathbf{ln} \frac{\rho_н^2}{r(r + h_0)}. \tag{7}$$

Можно уточнить полученное приближенное решение. Для этого необходимо вывести формулу продольной силы из уравнений равновесия листа и заменить ею формулу (2), полученную с помощью метода баланса работ, не имеющего строгого обоснования. На рис. 2 показаны внешние силы, действующие на участок заготовки, огибающей кромку матрицы, а также силы и моменты, заменяющие действия отброшенных частей заготовки. Заготовка перетягивается через кромку матрицы в направлении действия силы *N*.

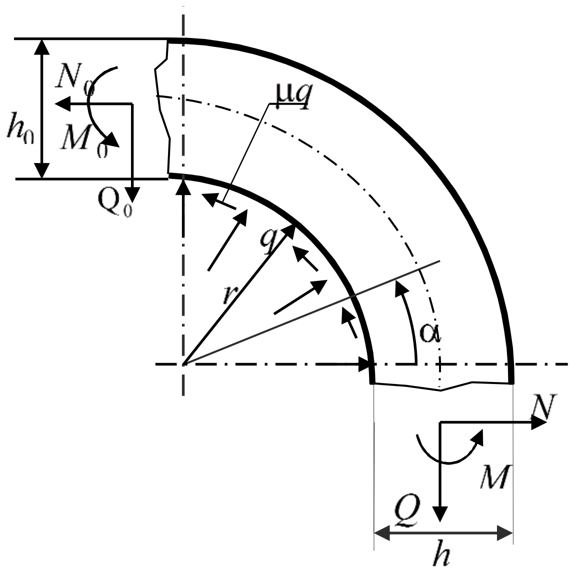

Рис. 2. Схема перехода заготовки через кромку гибочной матрицы

Уравнения равновесия сил в этом случае:

$$N + Q_0 = \int_0^{\pi/2} q\,\mathbf{sin}\,\alpha d\alpha + \mu \int_0^{\pi/2} q\,\mathbf{cos}\,\alpha d\alpha\mathbf{,}$$
$$Q + \int_0^{\pi/2} q\,\mathbf{cos}\ \ \alpha d\alpha = \mu \int_0^{\pi/2} q\ \ \mathbf{sin}\ \ \alpha d\alpha\mathbf{.} \tag{8}$$

Здесь $q = \mathbf{(}\alpha\mathbf{)}$ – неизвестная функция давления заготовки на матрицу. Установить эту функцию можно с помощью численных методов. Выясним возможность определения продольной силы N без использования функции q.

Один из интегралов, содержащих q, выражаем из (8):

$$\int_0^{\pi/2} q\,\mathbf{cos}\,\alpha d\alpha = \frac{\mu N + \mu Q_0 + N - Q}{1 + \mu^2}. \tag{9}$$

Уравнение равновесия моментов относительно точки приложения сил N_0 и Q_0 составим в двух вариантах:

– приближенный вариант, в котором учтен момент только одной, наибольшей силы:

$$M_0 + M = N\ \mathbf{(}r + 0\mathbf{,}5h\mathbf{)}; \tag{10}$$

– точный вариант:

$$\mathbf{(}r + 0\mathbf{,}5h_0\mathbf{)} \int_0^{\pi/2} q\,\mathbf{cos}\,\alpha d\alpha + \mu \int_0^{\pi/2} q\mathbf{[}r - \mathbf{(}r + 0\mathbf{,}5h_0\mathbf{)}\mathbf{sin}\,\alpha\mathbf{]}d\alpha +$$
$$+ Q\mathbf{(}r + 0\mathbf{,}5h_0\mathbf{)} + M_0 + M = N\mathbf{(}r + 0\mathbf{,}5h\mathbf{).} \tag{11}$$

В последнем уравнении (11) необходимо избавиться от второго интеграла, содержащего неизвестную функцию q. Этот интеграл (момент сил трения) во много раз меньше первого ввиду малого значения коэффициента трения μ, а также из-за знакопеременного характера подынтегральной функции. Пренебрегая им, преобразуем уравнение (11) с учетом выражения (9):

$$\frac{\mu Q_0 + N_0}{1 + \mu^2}\mathbf{(}r + 0\mathbf{,}5h_0\mathbf{)} + Q\mathbf{(}r + 0\mathbf{,}5h_0\mathbf{)}\frac{\mu^2}{1 + \mu^2} + M_0 + M =$$
$$= \frac{1 - \mu + \mu^2}{1 + \mu^2} N\mathbf{(}r + 0\mathbf{,}5h\mathbf{).} \tag{12}$$

Величины μQ_0 и N_0 также весьма малы по сравнению с N, поэтому первое слагаемое можно опустить. Принимая $\mu^2 \approx 0$, окончательно получаем

$$M_0 + M = N(r + 0{,}5h)(1 - \mu). \tag{13}$$

По сравнению с уравнением (12) правая часть уравнения (13) содержит дополнительный множитель $(1-\mu)$, т. е. она уточнена приблизительно на 15%, благодаря учету моментов сил Q и q. Сравнительно небольшие моменты указанных сил, при том, что они имеют одинаковые знаки, подтверждает корректность упрощений уравнения (11).

Для жесткопластичного материала можно принять, что $M_0 = \sigma h_0^2/4$, поскольку величина N_0 незначительна по сравнению с σh_0.

Значение момента на участке спрямления заготовки:

$$M = -\int_r^{\rho_н} \sigma_\alpha \rho d\rho - \int_{\rho_н}^{r+h} \sigma_\alpha \rho d\rho + N(r + 0{,}5h). \tag{14}$$

Подставляем в выражение (14) выражение для σ_α (3) и выражение для N (7) и выполняем интегрирование, в результате получаем:

$$M = \sigma \left[\frac{(r+h)^2 - 2\rho_н^2 + r^2}{4} + \frac{r(r+h)}{2} \mathbf{ln} \frac{\rho_н^2}{r(r+h)} \right]. \tag{15}$$

Заменяя $\rho_н$ с помощью соотношения (7), получаем

$$M = \sigma \left[\frac{h^2}{4} + \frac{r(r+h)}{2} (1 - \mathbf{exp} \frac{N}{\sigma r}) \right] + N \frac{r+h}{2}. \tag{16}$$

При малых радиусах изгиба аргумент экспоненциальной функции в формуле (16) примерно равен единице, поэтому нельзя заменять эту функцию небольшим числом членов степенного ряда. Подставив соотношение (16) в уравнение (13) и заменяя $M_0 = \dfrac{\sigma h_0^2}{4}$, приходим к трансцендентному уравнению типа $f(N) = 0$. Запишем его в развернутом виде:

$$N(\frac{r}{2} - \mu r - \mu \frac{h}{2}) - \sigma \frac{r(r+h)}{2} (1 - \mathbf{exp} \frac{N}{\sigma r}) - \frac{\sigma}{4} (h^2 + h_0^2) = 0. \tag{17}$$

Корень уравнения (17) вычисляется методом Ньютона [2]:

$$N_{i+1} = N_i - f(N_i) / f'(N_i), \text{ где } i = 0, 1, 2, \ldots$$

При этом принимаем $h = h_0$. В принципе, можно уточнить величину h после вычисления силы N и повторно решить уравнение $f(N)=0$, однако второе решение будет мало отличаться от первого.

Введем обозначения: $N_{i+1}^{*}=\dfrac{N}{\sigma h_0}$, $r^{*}=\dfrac{r}{h_0}$, и запишем развернутую формулу вычисления корня приведенного выше уравнения:

$$N_{i+1}^{*}=N_{i}^{*}-\frac{N_{i}^{*}\Big(\dfrac{r^{*}}{2}-\mu r^{*}-\dfrac{\mu}{2}\Big)-\dfrac{r^{*2}+r^{*}}{2}\Big(1-\mathbf{exp}\dfrac{N_{i}^{*}}{r^{*}}\Big)-\dfrac{1}{2}}{\dfrac{r^{*}}{2}-\mu r^{*}-\dfrac{\mu}{2}+\dfrac{r^{*}+1}{2}\mathbf{exp}\dfrac{N_{i}^{*}}{r^{*}}}. \tag{18}$$

В качестве нулевого приближения можно вычислять N из выражения (2).

На рис. 3 приведены расчетные зависимости отношения h/h_0, от относительного радиуса гибки, получены с использованием формул (2) и (18). В расчете принимали $\mu = 0{,}15$.

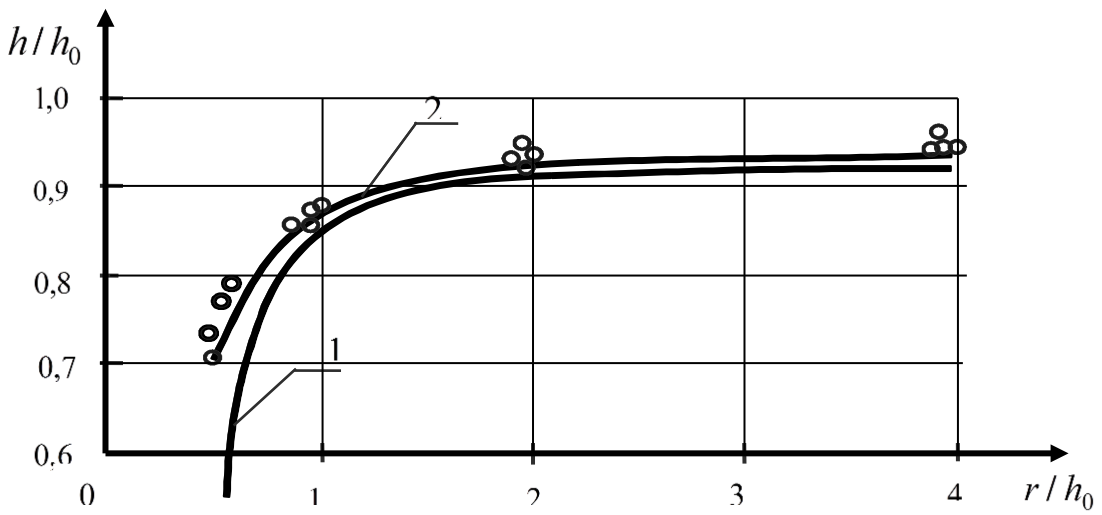

Рис. 3. Изменение толщины заготовок из низкоуглеродистой стали при переходе через кромку гибочной матрицы, скругленной радиусом *r*:
1 – расчет с использованием формулы баланса работ (2);
2 – расчет с использованием уравнений равновесия, формулы (18);
° – отмечены полученные экспериментальные данные

Выводы: Сравнение расчетных и действительных значений толщины стенок заготовки позволяет сделать вывод о том, что данное решение задачи спрямления листового материала можно применять в практических расчетах разверток гнутых деталей, если радиусы изгиба достаточно велики: $r \geq 2h_0$. Формула баланса работ (2) по сравнению с формулой (18), полученной из уравнения равновесия заготовки, дает несколько большее расчетное значение продольной силы, соответственно, увеличивается и расчетное утонение материала. При значениях $r \leq h_0$ наблюдается значительный (до 25%) разброс значений h. Это объясняется тем, что состояние заготовки на участке спрямления приближается к пределу устойчивого растяжения, при этом небольшие различия свойств заготовок и условий изгиба приводят к существенному неодинаковому утонению. В практических расчетах размеров разверток рекомендуется вычислять L – длину образующей серединной поверхности гнутой детали и вычитать из нее ΔL – удлинение указанной образующей в процессе гибки. Значение ΔL подсчитывается по формуле $\Delta L = \left(\frac{h_0 - h}{h_0} \right) (\sum l + 0{,}5 \sum r\varphi)$, где: $\sum l$ – суммарная длина стенок детали, образующихся из деформированного материала; $\sum r\varphi$ – суммарная длина участков сопряжения указанных стенок с плоскими соседними участками детали. На участках сопряжения утонения материала в среднем принято из расчета 50% утонения стенок. Значение h необходимо вычислять по формуле, приведенной в [3], а значение нейтрального радиуса $\rho_н$ находить из соотношения (7). Для определения нейтрального радиуса необходимо знать значение продольной силы N, его можно подсчитать по формуле (2) или (18). Последняя из них более точная, хотя и более громоздкая, ее рекомендуется использовать для расчетов, выполняемых на ЭВМ. Формула (18) выведена из расчета угла охвата заготовкой кромки матрицы $\varphi = \frac{\pi}{2}$. При изгибе заготовок ступенчатым пуансоном (см. рис. 1) угол φ изменяется в процессе гибки и становится равным $\frac{\pi}{2}$ в конечный момент. Эту особенность можно учитывать, используя среднее значение φ, которое подставляется в формулу (2). Расчетные значения h во многом зависят от принятого коэффициента трения μ, действительное значение которого, в свою очередь, зависит в основном от материала заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки: ***2-е изд., перераб. и доп.*** / Е. А. Попов. –М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
3. Убизький Н. Н. Учет утонения материала при расчете разверток гнутых деталей из листовых заготовок / Н. Н. Убизький // Системні технології: ***регіон. міжвуз. зб. науков. праць***. – Д., 2002. – №3 (20) – С. 43–48.

Надійшла до редколегії 24.09.2013