

Введение

Одним из эффективных путей экономии металла является увеличение производства и поиск новых сфер применения гнутых профилей – наиболее экономичного вида металлопроката. Вопросам разработки сортамента специальных гнутых профилей с местами изгиба на 1800 и освоения их производства в Украине уделяется значительное внимание ввиду эффективности их применения. Наибольшее количество разработок в этом направлении выполнено в Украинском научно-исследовательском институте металлов (УкрНИИМете). Вместе с тем, выполненный в УкрНИИМете комплекс работ направлен на реализацию технологий производства специальных гнутых профилей с элементами двойной толщины из заготовки 2 мм и более. Появившиеся в последнее время в Украине импортные профили, помимо элементов двойной толщины (то есть участков с сопряжением полос металла), содержат места изгиба на 1800, обеспечивающие зазор между полосами металла, равный 2-3 толщинам, служат для создания замковых элементов и производятся из заготовки толщиной 0,5...1,5 мм.

Структура спроса на стальные профили и требования к ним в последние десятилетия претерпевают существенные изменения вследствие повышения требований к их эксплуатационным характеристикам, которые заключаются в: усложнении условий эксплуатации; стремлении к увеличению срока службы; обеспечении удобных соединений в конструкциях (в т. ч. замковых элементов); стремлении к уменьшению массы и габаритов изделий; ужесточении технических требований к профилям из тонколистовых материалов с защитно-декоративными покрытиями.

В строительстве специальные гнутые профили с местами изгиба на 1800 используются в качестве сайдинговых систем (стеновых панелей и подвес-

ных потолков), элементов оконных и дверных систем, несущих элементов опалубок для монолитного домостроения и т.п. При строительстве промышленных и гражданских зданий и сооружений в странах Европейского союза (ЕС) приведенные выше системы с использованием специальных профилей с местами изгиба на 1800 применяются в массовых количествах.

Первоочередная потребность в специальных гнутых профилях с местами изгиба на 1800, выявленная в настоящей работе, только в основных металлопотребляющих регионах Украины составляет около 30 тыс. тонн в год. Поставка модульных профилигбочных агрегатов для организации региональных производств по выпуску специальных гнутых профилей с местами изгиба на 1800 может обеспечить снижение расхода металла и трудовых затрат – на 20...30% в строительстве.

Цель работы – исследование формоизменения в местах изгиба металла на 1800, создание научно обоснованной модели деформированного состояния металла и практических рекомендаций для разработки технологии валковой формовки специальных гнутых профилей.

В соответствии с указанной целью в работе поставлены и решены следующие задачи:

- создана математическая модель для анализа формоизменения металла при его изгибе на 1800 в валках;
- выполнены экспериментальные исследования деформированного состояния металла;
- оценено влияние асимметричной схемы деформации на структуру очага деформации;
- обобщены результаты теоретического анализа и оценена его точность;
- разработаны практические рекомендации по созданию новых технологических процессов валковой формовки специальных гнутых профилей с

элементами изгиба на 1800 и профилегибочных агрегатов модульного типа для реализации технологии производства аналогичных профилей;

- разработана и передана заказчику технология валковой формовки специального гнутого профиля «Опалубка»;

- выданы исходные данные для проектирования модульного профилегибочного стана нового поколения, обеспечивающего технологию производства профиля «Опалубка».

Анализ современного состояния производства специальных профилей с местами изгиба на 1800

Вопросам разработки сортамента специальных гнутых профилей с местами изгиба на 1800 и освоения производства постоянно уделяется значительное внимание ввиду эффективности их применения. Наибольшее количество отечественных разработок в этом направлении выполнено в Украинском научно-исследовательском институте металлов [1-5]. Вместе с тем, указанный комплекс работ направлен на реализацию технологий производства специальных гнутых профилей с элементами двойной толщины из заготовки 2 мм и более. Появившиеся в последнее время в Украине импортные профили, помимо элементов двойной толщины (то есть участков с соприкосновением полос металла), содержат места изгиба на 1800, обеспечивающие зазор между полосами металла, равный 2-3 толщинам последнего и производятся из заготовки толщиной 0,5-1,5 мм. Такие участки обеспечивают создание замковых элементов, надежно соединяющих профили друг с другом в панели.

Специальные профили используются в строительстве в качестве сайдинга и доборных элементов.

Для разработки первоочередного сортамента специальных профилей с местами изгиба на 1800 выбраны наиболее распространенные конфигурации поперечных сечений обшивочных профилей и доборных элементов (рис. 1-3), учтены технические и технологические требования, обеспечивающие возможность их изготовления формовкой в валках на профилегибочном агрегате с порулонным процессом профилирования.

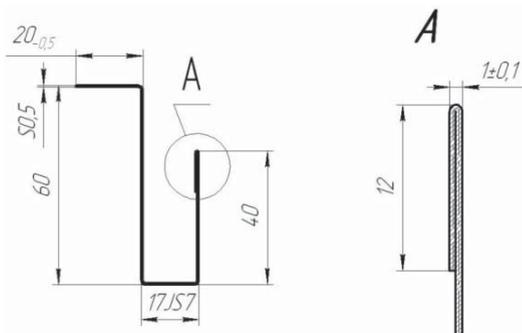


Рис. 2. Доборный элемент «Нащельник»

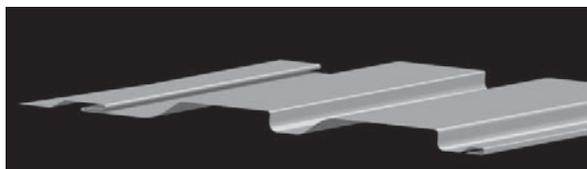


Рис. 3. Сайдинговый профиль

Для фасадных профилей в качестве заготовки используется холоднокатаный рулонный оцинкованный прокат толщиной 0,5 мм с полимерным покрытием. Допускаемые отклонения толщины профилей должны соответствовать допускаемым отклонениям толщины заготовки шириной 1000-2000мм нормальной точности прокатки (Б) для холоднокатаной стали по ГОСТ 19904. Материал – сталь 3кп, по ГОСТ 380, допускается применение Ст. 0,8кп, Ст. 3пс, Ст. 0,8сп по ГОСТ 1050 (табл. 1).

Таблица 1. Механические свойства используемых сталей

Марка стали	Механические свойства			
	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
Сталь 08кп, пс	200	330	33	60
Ст 3кп	240	370...470	27	-
Ст 3пс, сп	250	380...490	6	-

Для профилей «Опалубка» предусмотрено их изготовление из сталей Ст3кп и Ст3пс групп А, Б, В (ДСТУ 2651:2005/ГОСТ 380-2005) категорий 1, 2, а также из стали 09Г2 (ГОСТ 19281). Механические свойства профилей следует определять на заготовках толщиной 2-2,5 мм с группой поверхности III, IV в соответствии с ГОСТ 16523.

Предельные отклонения по толщине профиля должны быть равными предельным отклонениям по толщине заготовки шириной 1000...2000 мм точности проката А и Б по ГОСТ 19903. Однако эти требования не распространяются на участки вытяжки и изгиба.

Предельная величина не плоскостности по продольным кромкам должна соответствовать нормам ПН и ПВ по ГОСТ 19903. Серповидность профиля не должна превышать 0,1% измеряемой длины. Длина

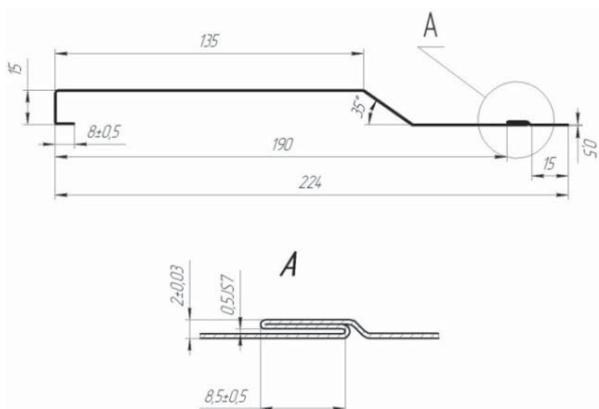


Рис. 1. Специальный гнутый профиль «Сайдинг»

профилей может быть от 3 до 6 м. Остальные технические требования – по ГОСТ 11474.

Основными поставщиками опалубочных систем на украинский рынок сегодня являются предприятия-импортеры. Общая доля украинской продукции не превышает 20%. Отечественный рынок опалубочных систем еще до конца не сформирован и далек от насыщения. Вместе с тем, только 40% объемов потребления опалубки составила продажа новых систем, остальные 60% – аренда и реализация продукции бывшей в употреблении.

В настоящее время в украинском строительстве на первый план выходят технические характеристики интересующей системы опалубки. В последние несколько лет, рынок опалубочных систем не пополнился абсолютно новыми типами продукции. В основном, новые разработки направлены на увеличение несущей способности опалубочной системы при снижении общей массы элементов, увеличение срока службы системы, снижение ее себестоимости, а также упрощение процессов сборки-разборки.

По статистическим данным в странах СНГ доля легких металлоконструкций в различных конструктивных элементах зданий и сооружений составляет 4...11% (в странах ЕС этот показатель оценивается в 50...75%). Для создания импортозамещающих технологий производства специальных гнутых профилей с местами изгиба на 1800 в Украине необходимо выполнение комплекса НИР, направленных на создание аналитической модели валковой формовки указанного вида металлопродукции, а также создание современной, гармонизированной с техническими требованиями системы нормативно-технических документов для обеспечения технического регулирования ее производства в Украине. Реализация указанных мер важна и актуальна, поскольку позволит повысить, как объемы производства, так и потребления в стране и, тем самым, конкурентоспособность отечественной экономики.

Теоретический анализ формовки специальных профилей с местами изгиба на 1800

В настоящей работе для анализа напряженно-деформированного состояния металла при валковой

формовке профилей с местами изгиба на 180° и определения параметров, характеризующих процесс, использован *метод механики сплошных сред с описанием очага деформации полем скоростей перемещений*. Метод предполагает использование уравнений механики сплошных сред в их наиболее общей форме, то есть в виде уравнений движения вязкой жидкости, а также специальных характеристик, позволяющих учитывать отличия в деформировании твердых металлов от течения вязких жидкостей. Разработка и внедрение метода механики сплошных сред применительно к процессам пластического течения металла связана с работами Г.Я. Гуна, А.А. Ильюшина, Л.И. Седова, Ю.Н. Алексева [6-11] и др.

В основе метода лежит основной физический закон, определяющий связь между напряжениями и деформациями, выраженный через девиаторы напряжений (D_{σ}), скоростей деформаций и коэффициент жесткости μ_i .

Зависимость между тензорами напряжений и скоростей деформаций, поскольку при пластическом деформировании выполняется закон сохранения объема $div \vec{V} = 0$, можно записать в виде:

$$T_{\sigma} = \sigma T_0 + 2\mu_i T_{\varepsilon} \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет определить основные параметры пластического формоизменения металла при известном поле скоростей перемещений.

Поле скоростей перемещений в декартовой системе координат в общем виде может быть описано следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v(x, e, z, t) \\ v_y &= v(x, y, z, t) \\ v_z &= v(x, y, z, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Значения интенсивностей напряжений, скоростей деформаций и деформаций определяются по следующим зависимостям:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}; \quad (4)$$

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{yy} - e_{zz})^2 + (e_{zz} - e_{xx})^2 + \frac{3}{2}(e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2)}. \quad (5)$$

Работа пластической деформации определяется по формуле:

$$A = \int_{(t)} \left(\iiint_{(V)} E dV \right) dt, \quad (6)$$

где $E = \sigma_i \varepsilon_i$ – функция диссипации, описывающая работу, затраченную на деформирование единицы объема в единицу времени.

Для обоснованного выбора параметров рациональной технологии профилирования необходимо исследовать характер напряженно-деформированного состояния металла по схеме цилиндрического изгиба.

Скорость частиц металла полосы в месте изгиба зависит от их положения и является функцией координат рассматриваемой точки. Рассматривать процесс будем в цилиндрических координатах.

Перемещение металла в местах изгиба вдоль полосы (ось z) отсутствует, поэтому осевая составляющая скорости также отсутствует. Остальные две составляющие – радиальная v_r и тангенциальная v_φ – будут зависеть от всех трех координат.

Экспериментальные исследования показали, что утонение по ширине места изгиба развивается неравномерно и является функцией угла φ в месте изгиба.

Так как скорости частиц металла тождественно равны перемещениям в единицу времени, изложенное выше позволяет записать радиальную составляющую скорости в общем виде следующим образом:

$$v_r = \left(Ar + \frac{B}{r} \right) J(\varphi) \frac{z}{l}, \quad (7)$$

где r – текущий радиус точки в месте изгиба; A и B – постоянные коэффициенты; $J(\varphi)$ – функция угла, учитывающая зависимость радиальной составляющей скорости этого угла; z – аппликата поперечного сечения полосы; l – длина участка полосы, на котором происходит утонение (сумма длин очагов деформации перед осевой плоскостью валков по всем проходам).

Будем считать, что утонение распределяется равномерно по всей длине l (рис. 4). Тогда после преобразований получим следующее выражение для радиальной составляющей скорости:

$$v_r = - \frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(r - \frac{R_B^2}{r} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \quad (8)$$

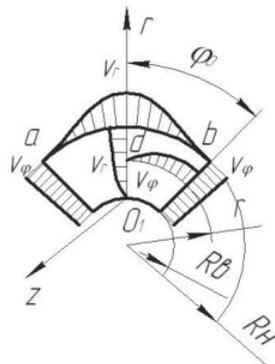


Рис. 4. Эпюры поля скоростей перемещения при изгибе

Для определения тангенциальной составляющей скорости воспользуемся уравнением неразрывности (7) в цилиндрической системе координат и получим следующее значение тангенциальной составляющей скорости:

$$v_\varphi = \frac{1}{\pi} v_0 \varphi_0 \frac{r}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \cdot \left(\frac{3}{4} \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} \right) \frac{z}{l} + C \quad (9)$$

Определив постоянную интегрирования C из граничного условия при $\varphi = 0$, получаем окончательные формулы для определения составляющих скоростей движения частиц металла в месте изгиба полосы за счет уменьшения толщины:

$$\begin{cases} v_r = - \frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(r - \frac{R_B^2}{r} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \\ v_\varphi = \frac{1}{\pi} v_0 \varphi_0 \frac{r}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \cdot \left(\frac{3}{4} \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{32} \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} \right) \frac{z}{l} \\ v_z = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Представленные на рис. 4 диаграммы составляющих скоростей и v_φ в месте изгиба полосы показывают, что наибольшее значение скорости имеют в точках a , b и d , скорость точки O_1 равна нулю, остальные точки имеют промежуточное значение скорости. Из рис. 4 видно также, что с уменьшением угла подгибки (увеличением радиуса в месте изгиба) скорости движения частиц металла уменьшаются, стремясь к нулю, что качественно подтверждается экспериментами по исследованию деформаций по толщине и ширине мест изгиба гнутых профилей.

После определения скорости перемещения частиц металла в месте изгиба, возможно определение компонентов скорости деформаций:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{r\varphi} = \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r}; \quad \varepsilon_{\varphi z} = \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} \\ \varepsilon_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{zr} = \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{2\pi}{\varphi_0} \frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}$$

$$\varepsilon_{\varphi z} = \frac{1}{\pi} \frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \frac{r\varphi_0}{l} \left(\frac{3}{4} \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{2\pi\varphi}{\varphi_0} \right)$$

Подставив поле скоростей (10) в (11), после некоторых преобразований получим следующие выражения для компонентов скоростей деформаций:

$$\varepsilon_{rr} = -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(r - \frac{R_B^2}{r^2} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}$$

$$\varepsilon_{zr} = -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(1 - \frac{R_B^2}{r} \right) \frac{\cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}}{l}$$

$$\varepsilon_{zz} = 0 \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}$$

Скорости деформаций в радиальном и тангенциальном направлении по абсолютной величине равны и отличаются только знаком.

Графики ε_{rr} в зависимости от геометрических размеров образцов приведены на рис. 5-9.

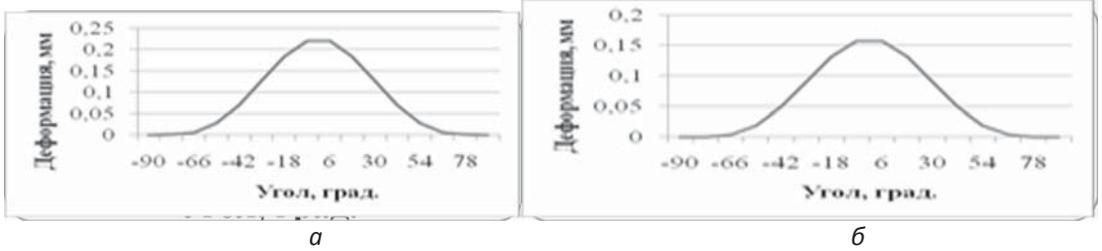


Рис. 5. Результаты расчета для $s=1$ и $h=s$ (а) и $s=1$ и $h=2s$ (б)

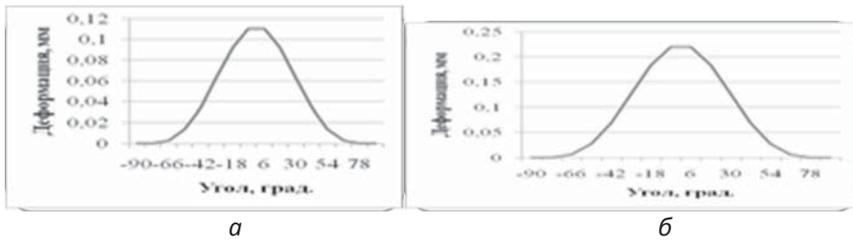


Рис. 6. Результаты расчета для $s=1$ и $h=3s$ (а) и $s=1,5$ и $h=s$ (б)

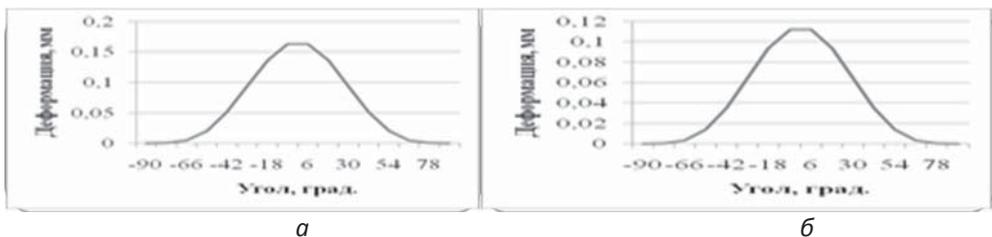


Рис. 7. Результаты расчета для $s=1,5$ и $h=2s$ (а) и $s=1,5$ и $h=3s$ (б)

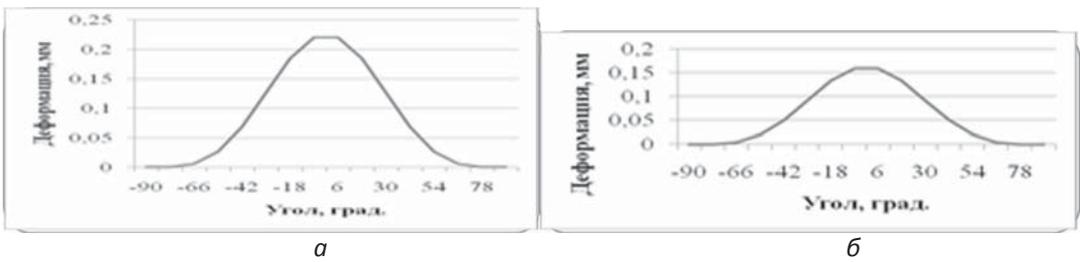


Рис. 8. Результаты расчета для $s=2,4$ и $h=s$ (а) и $s=2,4$ и $h=2s$ (б)

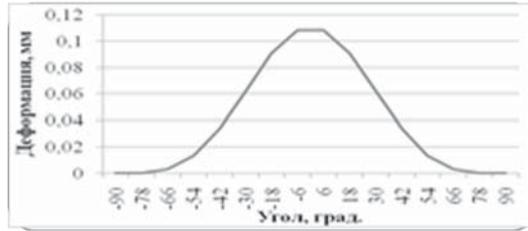


Рис. 9. Результаты расчета для $s=2,4$ и $h=3s$

Зная компоненты скоростей деформаций, можно определить скорость деформации на площадке, рав-

но наклоненной к главным осям, т.е. интенсивность скоростей деформаций, по следующей формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \frac{\cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}}{l} \left[\left(1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times \left[z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left(\frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Из выражения (13) видно, что интенсивность скоростей деформаций зависит от всех трех координат и переменна по всему объему места изгиба.

На внутреннем и наружном контуре места изгиба максимальное значение деформации, находится на биссектрисе угла изгиба и по мере удаления от нее уменьшается, принимая минимальное значение при $\varphi = \varphi_0$.

В сечении $\varphi = 0$ интенсивность скоростей деформаций возрастает при изменении радиус-вектора r от R_H до R_B .

Это говорит о том, что нормальные напряжения в этом сечении в растянутой зоне меньше, чем в сжатой. Чтобы проанализировать напряженное состояние в процессе уменьшения толщины полосы в месте изгиба, необходимо вычислить коэффициент жесткости, который определяется по формуле:

$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{2\sqrt{3}} \frac{\left(R_H - \frac{R_B^2}{R_H} \right)}{v_0 \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left[\left(1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2} \right)^2 \right] \times \left[z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left(\frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

где σ_i – интенсивность напряжений.

Определив коэффициент жесткости (14) и используя зависимости между напряжениями и скоростями деформаций для процесса пластического формоизменения при условии постоян-

ства объема, можно определить касательные напряжения, возникающие за счет уменьшения толщины в местах изгиба профиля, по формулам:

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 & \tau_{r\varphi} = \frac{\pi}{\sqrt{3}\varphi_0} \tau_i z \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \times \\
 & \times \left[\left(1 + \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \times \right. \\
 & \left. \times z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left(\frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{-\frac{1}{2}} \\
 & \tau_{\varphi z} = \frac{2}{\pi\sqrt{3}} \frac{\sigma_i \varphi_0 r}{\cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \times \\
 & \times \left[\left(1 + \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \times \right. \\
 & \left. \times z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left(\frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{-\frac{1}{2}} \\
 & \tau_{zr} = \frac{\sigma_i}{2\sqrt{3}} \tau_i z \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \cos \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \times \\
 & \times \left[\left(1 + \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \times \right. \\
 & \left. \times z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left(\frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{-\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \right\} (15)
 \end{aligned}$$

Для определения значений касательных напряжений по формулам (15) необходимо знать выражения для интенсивности напряжений; для упрочняющегося материала выражается степенной зависимостью следующего вида:

$$\sigma_i = K e_i^m \quad (16)$$

где K и m – константы для данного материала, характеризующие физико-механические свойства и определяемые экспериментально при испытаниях на растяжение – сжатие; e_i – интенсивность деформаций, определяемая по зависимости:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{rr} - e_{\varphi\varphi})^2 + (e_{\varphi\varphi} - e_{zz})^2 + (e_{zz} - e_{rr})^2 + \frac{3}{2}(e_{r\varphi}^2 + e_{\varphi z}^2 + e_{zr}^2)} \quad (17)$$

где e_{rr} , $e_{\varphi\varphi}$, e_{zz} , $e_{r\varphi}$, $e_{\varphi z}$, e_{zr} – компоненты деформаций.

Для идеально-пластичного материала

$$\sigma_i = \sigma_s. \quad (18)$$

Таким образом, получено поле скоростей движения частиц металла (10) и компоненты скоростей деформаций (12), зная которые можно установить степень влияния утонения на величину нормальных и касательных напряжений и на величину деформаций в местах изгиба.

Площадь, заключенная между наружной поверхностью места изгиба в деформированном и недеформированном состояниях, будет определять приращение ширины исходной заготовки при ее формоизменении.

Эту площадь можно определить следующим образом:

$$F = \int_{\varphi_0}^0 v_r R_H d\varphi, \quad (19)$$

где v_r – радиальная составляющая скорости; $R_H d\varphi$ – длина элемента дуги на наружной поверхности места изгиба.

Подставив выражение радиальной составляющей скорости при $r = R_H$ в (19) и проинтегрировав, получим (при $Z/l = 1$):

$$F = \frac{3}{4} v_0 R_H \varphi_0. \quad (20)$$

Величина приращения ширины заготовки определяется выражением (с учетом значений φ_0 и v_0):

$$\Delta b = \frac{3}{8} \frac{\Delta s_{\max}}{s_0} R_H \alpha. \quad (21)$$

Таким образом, на основании исследования процесса утонения в местах изгиба, получена формула для определения величины приращения ширины заготовки.

Теоретическое исследование очага деформации методом конечных элементов

Моделирование процесса изгиба посредством Deform 3D требует учета особенностей этого процесса, а также особенностей реализации этого процесса в Deform.

Для создания моделей процессов листового металла, пригодных к обработке в Deform 3D требуются высокая плотность сетки заготовки и высокополигональные модели оснастки. В противном случае в ходе работы алгоритма моделирования процесса возможны сбои. Главной сложностью является получение качественной сетки на заготовке: при заданном разработчиками пределе числа конечных элементов в 500000 на толщину заготовки размером 30x80x1 мм приходится в среднем около 7 узлов (или 6 конечных элементов). При числе элементов в 30000 (минимальное количество элементов, при котором не страдает форма заготовки) на толщину заготовки приходится 2 узла или 1 конечный элемент. Достаточно качественная сетка генерируется начиная с 150000 элементов, выдавая 3-4 конечных элемента на толщину.

Для получения достоверных результатов моделирования процесса гибки требуется выполнение ряда условий, возникающих вследствие особенностей, типичных для геометрии оснастки и заготовки:

1) плотность сетки моделей оснастки для данной модели должна быть достаточной, чтобы обеспечивать не меньше 10 узловых точек на элементах скругления. Для данной задачи это предполагает межузловое расстояние не больше 0,5 мм;

2) плотность сетки модели заготовки должна обеспечивать не меньше 5 конечных элементов по толщине заготовки;

3) плотность сетки инструмента должна быть постоянной, в противном случае в ходе моделирования могут возникать ошибки, связанные с неравномерной плотностью геометрии.

Для проведения симуляции эксперимента посредством программного комплекса Deform 3D были созданы модели оснастки, преобразованные в формат *.stl. Шаг сетки моделей составляет 0,1 мм, что обеспечивает достаточную плавность скругленных элементов оснастки. При создании сетки модели заготовки число конечных элементов составило 150000, ведущим весовым фактором построения сетки была задана кривизна поверхности заготовки.

Ход процесса моделирования приведен на рис. 10-12.

Геометрия моделей оснастки повторяла геометрию инструментов, использованных в ходе экспериментальных исследований.

В ходе моделирования процесса были заданы следующие условия его протекания:

- коэффициент трения 0,12;
- температура окружающей среды, заготовки и оснастки 20°C;
- число элементов заготовки 150000;
- скорость движения пуансона – 10 мм/с;
- число шагов симуляции на каждом этапе – 100.

В результате осуществления расчета были получены следующие данные:

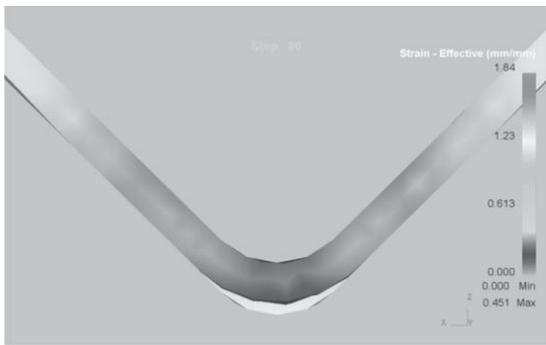
- распределения напряжений и деформаций на участке изгиба;
- графическое представление зависимости усилия гибки от хода пуансона (рис. 13).

Симуляция проводилась в три этапа: 1) подгибка до 90° в специальной оснастке; 2) подгибка до 120° в специальной оснастке; 3) подгибка до 180° на плоских бойках.

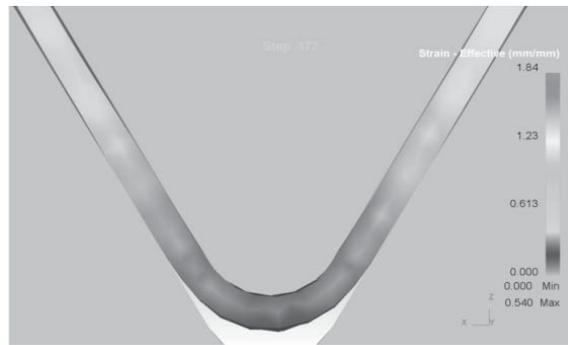
На каждом этапе производилась замена моделей инструмента и пере рассчитывались межэлементные связи.

Сопоставление экспериментальных данных и результатов моделирования процесса в программном комплексе Deform 3D приведены в табл. 2.

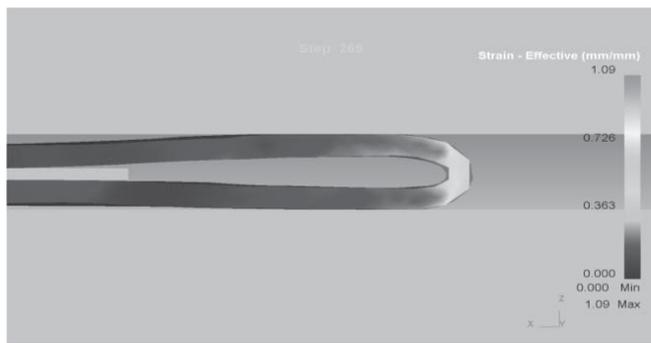
Полученные значения показывают, что программный комплекс Deform 3D применим для анализа процессов формовки листового металла с достаточной для инженерных расчетов точностью.



a

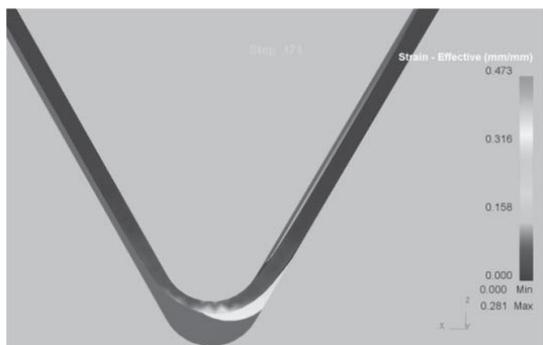


б

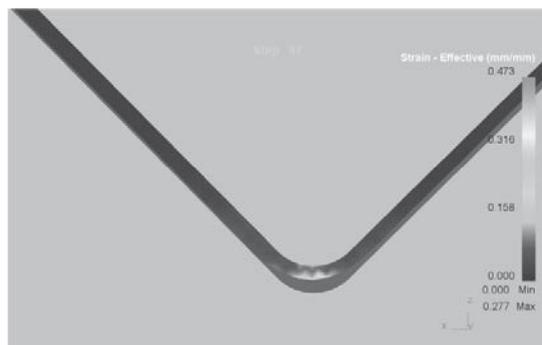


в

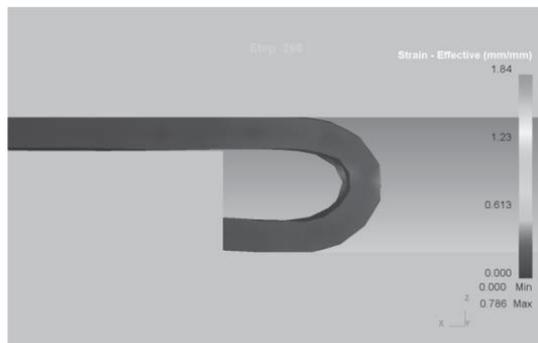
Рис. 10. Модель изгиба до углов 90° (*a*), 120° (*б*) и 180° (*в*) при $r=s$



a

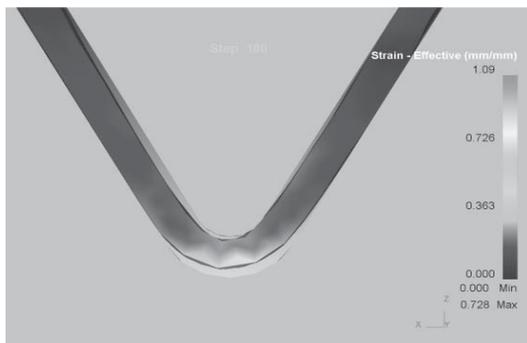


б



в

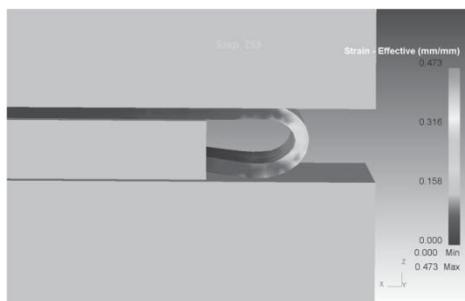
Рис. 11. Модель изгиба до углов 90° (*a*), 120° (*б*) и 180° (*в*) при $r=s$



а



б



в

Рис. 12. Модель изгиба до углов 90° (а), 120° (б) и 180° (в) при $r=s$

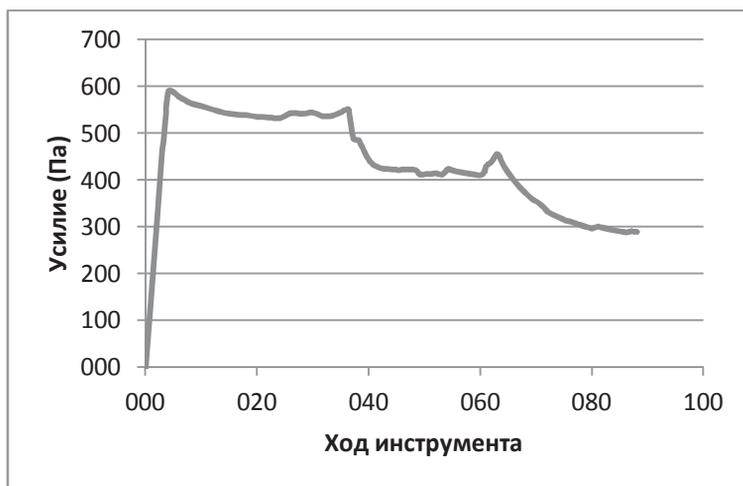


Рис. 13. График зависимости усилия на инструменте от хода инструмента

Таблица 2. Результаты сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования по максимальному значению утонения изогнутых на 180° образцов

Радиус подгибки	Толщина образца, мм	Deform 3D, мм/мм	Экспериментальное значение, мм/мм	Величина расхождения	
				абсолютная, мм	относительная, %
1s	1	0,365	0,334	0,011	9,2
2s		0,290	0,271	0,009	7,01
3s		0,253	0,244	0,009	3,7

Исследование асимметрии очага деформации

Полученные образцы выявляют наличие асимметрии в форме очага деформации, появление которой вызвано протеканием процесса подгибки на заключительном этапе (рис. 14). Данные условия характеризуются наличием несимметричной схемы деформирования, когда воздействие на заготовку оказывается с одной стороны (в данном случае сверху), а не с обеих, как на предыдущих этапах деформирования.

Для описания очага деформации использовался программный комплекс Farseer, разработанный на кафедре ОМД НТУ «ХПИ». Были описаны в виде последовательности точек обе стороны очага деформации и получены зависимости, описывающие эти последовательности методом регрессионной аппроксимации. Точки, использованные в ходе аппроксимации, приведены на рис. 15.

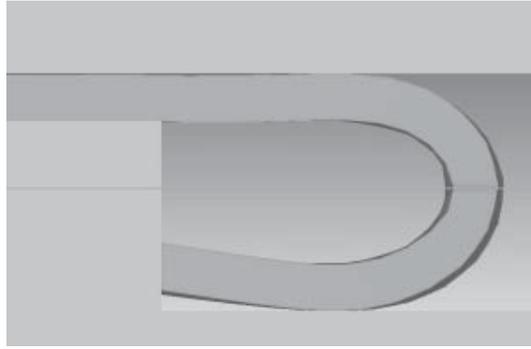
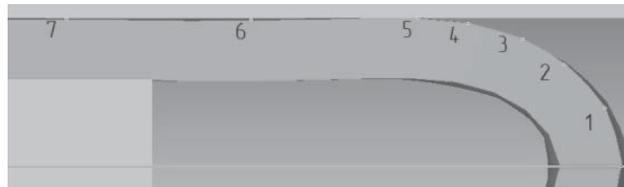
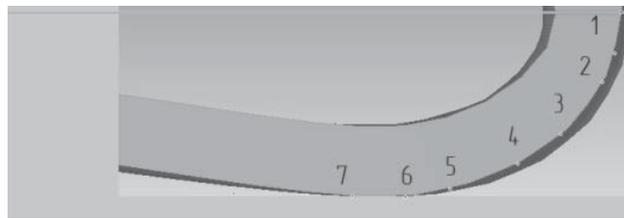


Рис. 14. Асимметрия в очаге деформации



а



б

Рис. 15. Точки, используемые в анализе асимметрии очага деформации: а – верхняя часть очага деформации; б – нижняя часть очага деформации

Зависимость для верхней части:

$$y = \frac{1}{0,003 + 6,3 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-x}} \quad (22)$$

Зависимость для нижней части:

$$y = \frac{1}{0,003 - 7,3 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-x}} \quad (23)$$

Фактическое отклонение симметрии составило приблизительно 0,5 мм.

Обобщение зависимостей (22) и (23) (а также прочих аналогичных зависимостей, полученных в ходе моделирования процесса гибки с другими параметрами) позволяет сформулировать общую эмпирическую зависимость, описывающую форму очага деформации в месте изгиба при данной схеме деформирования:

$$y = \frac{1}{0,003 + k \cdot 10^{-6} \cdot e^{-x}}$$

где k – коэффициент, определяющий форму стороны очага деформации.

Экспериментальные исследования процесса валковой формовки специальных профилей с местами изгиба на 180°

Для исследования пластического формоизменения металла в работе использовали один из геометрических методов – метод измерения утонений и поверхностных деформаций.

Отбор проб, заготовок и образцов от исходных материалов для проведения экспериментальных исследований осуществляли в соответствии с ГОСТ 7563. Моделирование изгиба в валках осуществляли посредством испытаний на изгиб по ГОСТ 14019. Образцы испытывались на универсальной испытательной машине УИМ-50 М (рис. 16). Для исследования деформаций по толщине выполнялись замеры исходных и деформированных образцов с помощью инструментального микроскопа БМИ при 30-ти кратном увеличении (рис. 17). Толщину металла измеряли по дуге места изгиба на 180°. Те же замеры осуществлялись на ПК по сканированным изображениям (разрешение 1200x1200 dpi.) с использованием разработанного программного комплекса «Farseer».



Рис. 16. Изгиб образцов на УИМ 50М (по ГОСТ 14019)

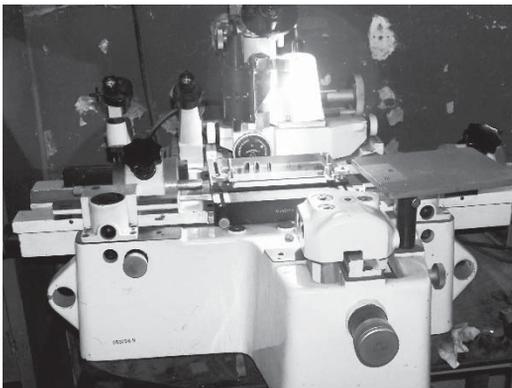


Рис. 17. Замеры образцов с помощью инструментального микроскопа БМИ

Схема экспериментальной оснастки, примененной в экспериментальных исследованиях, приведена на рис. 18.

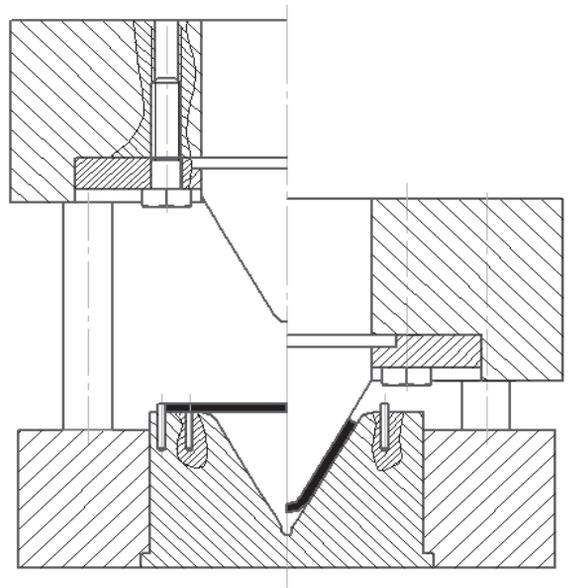


Рис. 18. Схема штампа для гибки

В ходе процесса подгибки проводилось последовательное формоизменение образца двумя способами: 1) симметричная подгибка; 2) асимметричная подгибка.

В обоих случаях образец последовательно подгибался до 90°, 120° и 180°, и на каждом этапе снимались показатели деформации.

Развитие цифровых компьютерных технологий и техники (ПК, сканеров с большим разрешением и т.п.) позволяют продолжить совершенствование геометрических методов исследования при создании новых технологических процессов по двум направлениям.

1. Оцифровка опубликованных экспериментальных данных, представляющих интерес для научных исследований и представленных в виде таблиц или графиков в различных источниках научно-технической информации.

2. Использование цифровых методов для визуализации и анализа результатов современных экспериментальных исследований с широким использованием возможностей ПК.

Программный комплекс «Farseer», разработанный авторами, обеспечивает пользователя возможностью обрабатывать точки на графиках в соответствии с их масштабом, измерять длины и углы, строить графики функций на основании табличных данных, экспортировать данные в MS Excel. В число прочих возможностей входят: создание текстовых комментариев, вспомогательных графических элементов, построение графиков. Точность измерительной системы программного комплекса «Farseer» оценивалась по результатам сопоставления замеров толщины (S) концевых мер ($S=1$ мм,

$S=1,5$ мм, $S=2,5$ мм) посредством инструментально-го микроскопа БМИ, микрометра и программного комплекса «Farseer» (использовались два источника изображения – сканер и фотоаппарат). Анализ полученных результатов показал, что максимальные расхождения по сравнению с результатами замеров на БМИ составили: 0,012 мм (1,01%) – для микрометра; 0,044 мм (2,52%) – для сканера; 0,038 мм (3,88%) – для фотоаппарата.

Поскольку количественные результаты, полученные при проведении экспериментальных исследований, содержат погрешность, включающую ошибки измерений и используемой аппаратуры, в работе проводилась проверка точности полученных экспериментальных данных. Точность и приемлемость полученных в работе экспериментальных данных определяли по методикам, приведенным в работах [12–24]. Отбор проб, заготовок и образцов от исходных материалов для проведения экспериментальных исследований осуществляли в соответствии с ГОСТ 7563. Моделирование изгиба в валках осуществляли посредством испытаний на изгиб по ГОСТ 14019. Образцы испытывались на универсальной испытательной машине УИМ-50 М. Полученные экспериментальные данные для симметричных образцов после статистической обработки были аппроксимированы функцией вида:

$$e(\varphi) = f \cos^4(0,8\varphi),$$

где f – коэффициент, определяющий форму расчетно-экспериментальных графиков; φ – текущий угол места изгиба.

Значения коэффициента f в зависимости от толщины (S) и расстояния между параллельными слоями металла (h) при изгибе на 180° приведены в табл. 3.

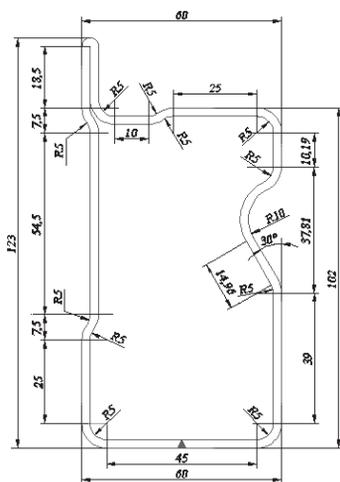
Таблица 3. Значения коэффициента f

h	h=S	h=2S	h=3S
f	0,22	0,16	0,11

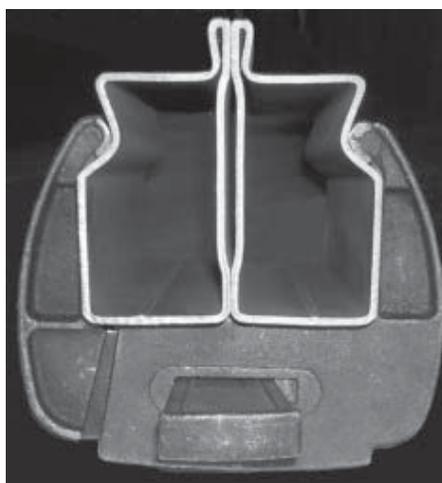
Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 4%, что позволяет рекомендовать результаты теоретических исследований для использования в инженерной практике.

Разработка практических рекомендаций по технологии производства специальных профилей с местами на 180°

При разработке нового специального гнутого профиля для опалубки (рис. 19) учтены технические и технологические требования, обеспечивающие возможность его изготовления профилированием на проектируемом профилегибочном агрегате с порулонным процессом профилирования.



а



б

Рис. 19. Специальный гнутый профиль для опалубки: а – схема; б – практическое применение

После выбора формы гнутого профиля, которая определяется требованиями проектируемой конструкции, определялась ширина исходной заготовки [25, 26]. Она рассчитывалась аналитическим методом с учетом смещения нейтральной оси деформации в местах изгиба в сторону внутреннего радиуса, а также результатов тео-

ретического анализа и экспериментальных исследований. Ширина исходной заготовки специального гнутого профиля опалубки составила $352^{-0,5}$ мм.

Вторым важным технологическим параметром, определяющим режим профилирования, является радиус закругления переходных форм.

Применение переменных радиусов при формовке позволяет получить более точную геометрию готового профиля. Переменные радиусы дуг в местах изгиба определялись с учетом рекомендаций по зависимости

$$R = \frac{180^{\circ} l_j}{\pi \alpha_j} - kS.$$

Задача устранения скручивания была сведена к определению одного из углов подгибки (β) в зависимости от другого угла (α):

$$\beta = \sqrt{\frac{l_2}{l_1} \cos \alpha}.$$

Привод модулей ПГА должен обеспечивать определенные энергосиловые параметры каждой клетки (табл. 4 и 5).

Таблица 4. Допустимые усилия профилирования и допустимые крутящие моменты в клетке

Усилие на опоре валков, кН			Крутящий момент, кНм		
со стороны привода	со стороны обслуживания	суммарное	на верхнем валке	на нижнем валке	суммарный
75,0	75,0	150	2,4	2,4	4,8

Таблица 5. Техническая характеристика и состав оборудования модульного профилегибочного агрегата 1...4x50...400

№ п/п	Наименование параметра	Величина параметра
1	Ширина заготовки, мм:	
	- минимальная	50
	- максимальная	400
2	Толщина заготовки, мм:	
	- минимальная	1,0
	- максимальная	4,0
3	Количество модулей, шт	5
	Количество типов модулей, шт*	2
	Количество клеток в модуле, шт	5
	Общее количество клеток ПГА, шт	25
4	Высота формовки, мм	125
5	Катающий диаметр, мм:	
	- верхнего валка	400
	- нижнего валка	160
6	Диаметр рабочего вала	110
7	Скорость профилирования, м/с:	
	- минимальная	0,5
	- максимальная	2,5
8	Максимально допустимое усилие формовки в клетке, кН	150
9	Максимально допустимый крутящий момент на рабочем валу, кНм	2,4
10	Количество электродвигателей в модуле, шт	1
	Количество электродвигателей в ПГА, шт	5

На основании вышеперечисленного разработана калибровка валков для производства профиля для опалубки, включающая 25 технологических переходов, разбитых на 5 групп (модулей):

- в первых двух модулях (10 клетях), имеющих катающие диаметры верхнего и нижнего валков равными 160мм (передаточное отношение $i=1$), осуществляется форма образование специальных углублений и подгибка крайних элементов профиля;

- в 11-15 клетях предусмотрена формовка специального гнутого профиля для опалубки по режимам не равноположного уголка с переменным радиусом места изгиба;

- клетки 16-20 обеспечивают формоизменение одной из полок профиля, а также формообразование элемента двойной толщины;

- в клетях 21-24 производится дальнейшее формообразование элемента двойной толщины, подгибка полок до угла 90° , недеформованных в клетях 5-10, а также калибровка замкнутого квадратного сечения профиля;

- клеть 25 – четырех валковая, универсальная предназначена для правки возможного скручивания профиля вокруг продольной оси.

Клетки 11-25 должны быть разбиты на 3 группы (модуля) по 5 клеток в каждом. Передаточное

отношение привода в каждом модуле должно быть обеспечено равным 2 ($i=2$), катающие диаметры – 160мм и 400мм, соответственно нижнего и верхнего валков.

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа научно-технической литературы установлено, что:

- специальные гнутые профили с местами изгиба на 180° находят широкое применение в современном строительстве и автомобилестроении;

- наибольшее количество разработок, выполненных ранее, направлено на реализацию технологий производства специальных гнутых профилей с элементами двойной толщины из заготовки 3мм и более;

- импортируемые профили, помимо элементов двойной толщины (то есть участков с соприкосновением полос металла), имеют также места изгиба на 180° , обеспечивающие зазор между полосами металла, равный 2-3 толщинам и производятся из заготовки толщиной 0,5...1,5 мм.

2. В качестве основного материала при изготовлении специальных профилей с местами изгиба на 180° применяют сталь Ст3, сталь 08кп с защитно-декоративными покрытиями (поливинилхлоридная пленка; лакокрасочное покрытие; цинк, алюминий или их сплавы).

3. В работе для анализа напряженно-деформированного состояния металла при валковой формовке профилей с местами изгиба на 180° и определения параметров, характеризующих процесс формоизменения, использован метод механики сплошных сред с описанием очага деформации полем скоростей перемещений.

4. На основании исследования распределения утонения в местах изгиба полосы при ее формоизменении получено поле скоростей движения частиц металла и определены компоненты скоростей деформации, что позволило установить степени влияния утонения на величину нормальных и касательных напряжений и деформаций в местах изгиба.

5. При выполнении экспериментальных исследований использован геометрический метод. От-

бор проб, заготовок и образцов от исходных материалов для проведения экспериментальных исследований осуществляли в соответствии с ГОСТ 7563. Моделирование изгиба в валках осуществляли на универсальной испытательной машине УИМ-50 М посредством стандартных испытаний листового металла на изгиб по ГОСТ 14019.

6. Получена общая эмпирическая зависимость, описывающая форму очага деформации в месте изгиба при асимметричной схеме деформирования:

$$y = \frac{1}{0,003 + k \cdot 10^{-6} \cdot e^{-x}}.$$

7. Относительная погрешность замеров, полученных на БМИ, при сканировании и фотографировании образцов (расхождение не превышает 4%), позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью использовать полученные цифровым способом экспериментальные данные (с использованием программного комплекса «*Farseer*»), как для качественной, так и для количественной оценки деформированного состояния металла в местах изгиба.

8. Полученные экспериментальные данные после статистической обработки были аппроксимированы посредством функцией вида

$$e(\varphi) = f \cos^4(0,8\varphi).$$

9. Разработан чертеж специального гнутого профиля для опалубки, технические и технологические требования для его производства на проектируемом профилегибочном агрегате с поруллонным процессом профилирования.

10. Разработана схема формовки профиля опалубки, в основу которой положена методика формообразования металла переменными радиусами закруглений по переходам с постоянными расстояниями между центрами дуг изгиба, позволяющая получить наиболее точную геометрию готовых профилей.

11. Разработана калибровка валков для производства профиля для опалубки, включающая 25 технологических переходов, разбитых на 5 групп (модулей).