

УДК 621.7.043

ОЦЕНКА ВЫПОЛНЕНИЯ ГИПОТЕЗЫ КИРХГОФА ДЛЯ ОПЕРАЦИИ ГИБКИ НА РЕБРО

Иван Анатольевич Назаренко

*Магистр 1 года,
кафедра «Технологии обработки давлением»
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана*

*Научный руководитель: В.А. Демин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением»*

Ключевые слова: гибка (bending), гибка на ребро (in-plane bending).

Аннотация: В данной работе рассмотрено выполнение гипотезы плоских сечений Кирхгофа для операции гибки на ребро. Как известно, при формулировании гипотезы плоских сечений строго оговаривается область применения данной гипотезы в зависимости от соотношения толщины исходного материала и радиуса получаемой кривизны поверхности. Было проведено математическое моделирование процесса с использованием программного комплекса QForm. Математическое моделирование позволило оценить отклонение гипотезы Кирхгофа от реальных условий протекания данного процесса.

При постановке и решении задач листовой штамповки накладывается ряд ограничений. При этом, основное ограничение, это кинематическое. Предполагается, что прямые элементы, нормальные к срединной поверхности до деформации, остаются прямыми и нормальными к той же поверхности и после деформации, и их длины не изменяются [1]. Эта гипотеза носит название – гипотеза прямых нормалей или гипотеза Кирхгофа.

С позиции математической формулировки задачи это означает, что толщина заготовки не изменяется, и все силы относятся к срединной поверхности, и в направлении толщины напряжения усредняются. Дополнительно допускается, что напряженное состояние плоское.

Эта гипотеза принимается в специализированных программах расчета задач листовой штамповки, таких как AutoForm и Pam-Stamp. Однако в работе [2] отмечается, что такие предположения приемлемы для тонкостенных оболочек, когда отношение $S/R \ll 1$ (S – толщина заготовки, R – наименьший из радиусов главных кривизн), поскольку погрешность, вносимая этим предположением, есть величина малая (порядка S/R) сравнительно с единицей [2].

Однако в условиях операции гибки на ребро толщина листового материала и радиус кривизны – величины одного порядка. В этом случае использование гипотезы прямых нормалей может существенно снизить точность получаемых решений.

Методом проверки гипотезы Кирхгофа для операции гибки на ребро будет служить математическое моделирование в программном комплексе QForm v8.

На рис.1 представлена схема операции гибки на ребро. Заготовку поз.2 укладывают на матрицу поз.3, затем с помощью пуансона поз.1 происходит пластическое деформирование заготовки.

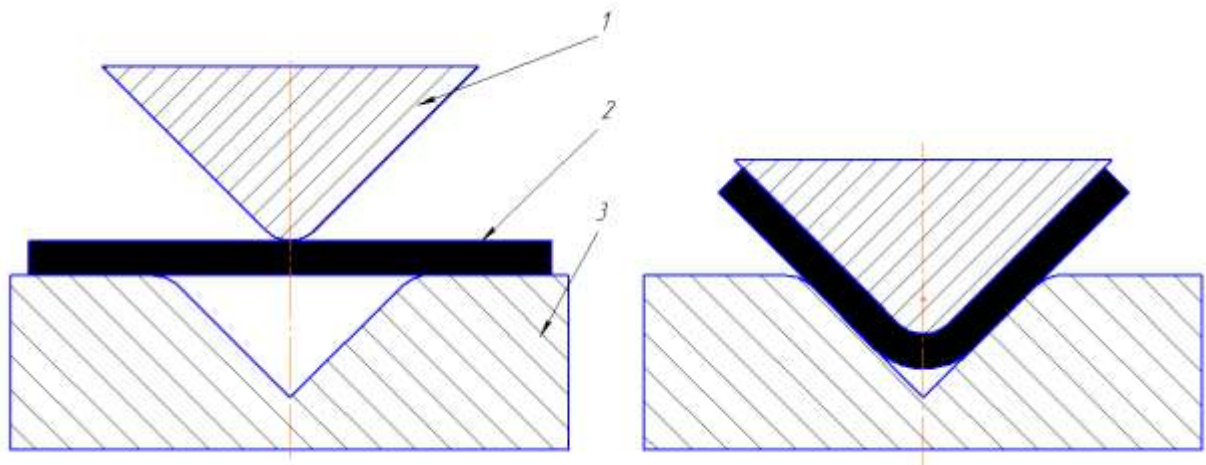


Рис. 1. Схема операции гибки на ребро

Рассмотрим операцию гибки на ребро с точки зрения гипотезы плоских сечений:

1. Толщина материала после деформирования не должна измениться.
2. Нормали к нейтральной линии должны остаться нормальными.

На рис.2 представлена схема расположения сетки нормалей в очаге пластической деформации до и после деформирования заготовки с учетом гипотезы плоских сечений.

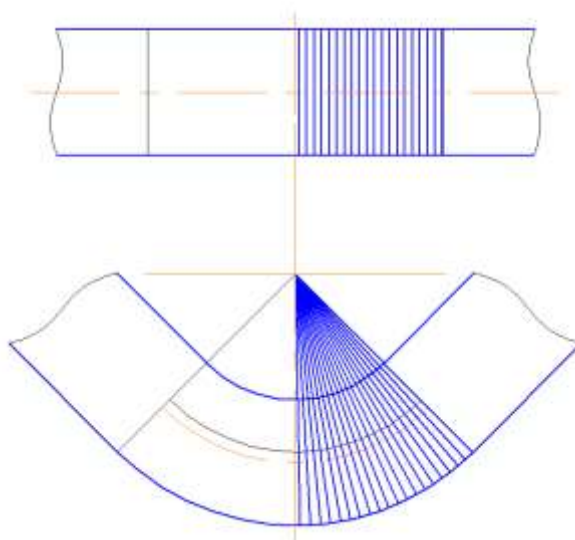


Рис. 2. Расположение нормалей к нейтральной линии до и после деформирования

Было проведено математическое моделирование данного технологического процесса с использованием программного комплекса QForm v8.

При моделировании были приняты исходные данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Параметр	Характеристики и значения
Технологическое оборудование	Механический пресс 16т
Температура формообразования, °С	20
Тип смазки	Без использования смазки
Моделируемый материал	Сталь 08кп
Ширина полосы, мм	10
Радиус скругления пуансона, мм	10;5

Для обработки результатов моделирования были выбраны четыре (для $S/R = 1$) и три (для $S/R = 2$) линии с начальными координатами $x = 0,37; 1,12; 4,87$ и $6,37$ мм соответственно.

Схема расположения линий для варианта $S/R = 1$ до и после пластического деформирования представлена на рис. 3

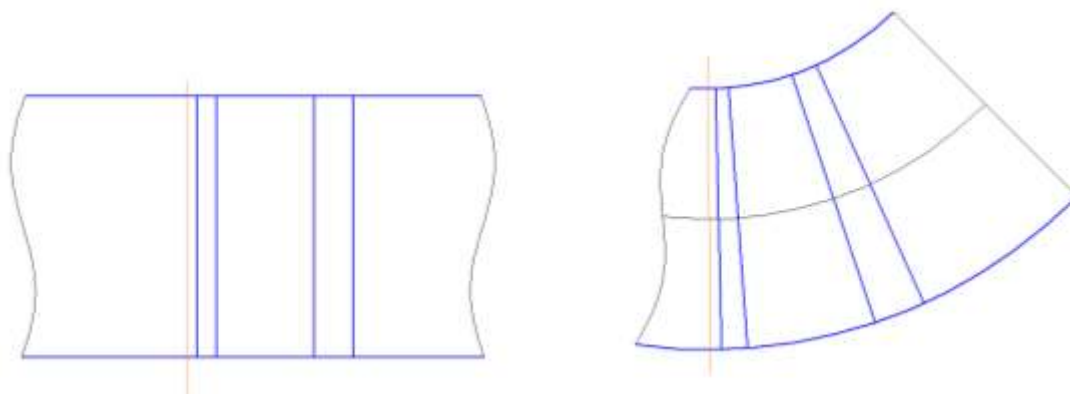


Рис. 3. Расположение нормалей к нейтральной линии по Кирхгофу.

Математическим моделированием процесса было установлено, что не выполняется основные предположения гипотезы Кирхгофа. Так, наблюдается отклонение линии нормали при математическом моделировании от линии нормали предсказанной теорией Кирхгофа (рис. 4).

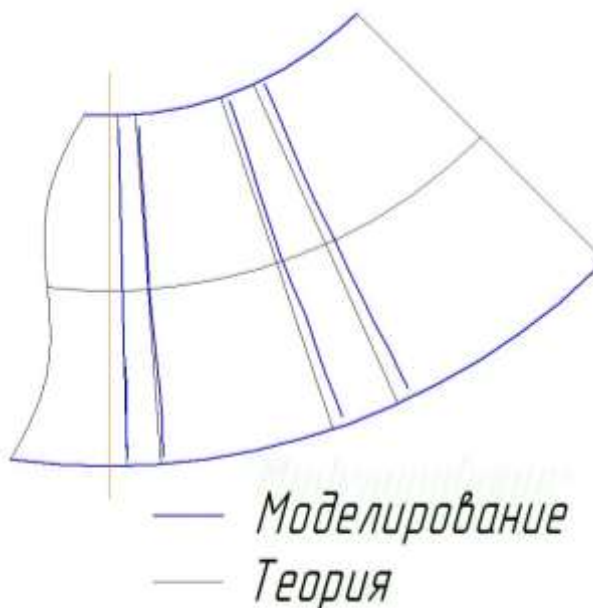


Рис. 4. Расположение нормалей к нейтральной линии.

Приведем таблицы относительного отклонения нормали от предсказанной теорией в соотношении:

$$A = \frac{\delta}{\rho} \times 10^3,$$

где δ — разница между теоретической и смоделированной линиями и ρ — текущий радиус от центра кривизны заготовки.

В табл.2 показаны относительные отклонения нормали от теоретической для радиуса скругления пуансона в 5 мм.

Таблица 2. Относительное отклонение нормали для R = 5 мм.

R, мм	Линия №1	Линия №2	Линия №3
6	10,00	10,00	66,67
7	10,00	11,43	57,14
8	10,00	11,25	48,75
9	11,11	11,11	44,44
10	9,00	13,00	45,00
11	13,64	16,36	50,00
12	13,33	16,67	50,83
13	13,85	20,00	46,15
14	20,00	20,71	45,71
Ср. знач.	12,33	14,50	50,52
Max	20,00	20,71	66,67

В табл.3 показаны относительные отклонения нормали от теоретической для радиуса скругления пуансона в 10 мм.

Таблица 3. Относительное отклонение нормали для R = 10 мм.

R, мм	Линия №1	Линия №2	Линия №3	Линия №4
11	1,82	4,55	18,18	25,45
12	1,67	4,17	15,83	20,83
13	0,77	3,08	13,08	16,92
14	1,43	2,86	11,43	17,14
15	0,00	2,00	12,00	18,00
16	0,00	2,50	15,63	18,13
17	1,18	5,29	18,24	19,41
18	2,78	6,67	16,67	20,56
19	1,58	5,26	17,89	21,58
Ср. знач.	1,25	4,04	15,44	19,78
Max	2,78	6,67	18,24	25,45

Так же моделирование выявило наличие зоны утонения заготовки в очаге пластической деформации. Так для моделирования процесса гибки на ребро пуансоном 5 мм получена максимальная величина утонения заготовки равная 9,2% исходной толщины. В случае же гибки на ребро при применении пуансона с радиусом скругления равным 10 мм наблюдается утонение в 6,8%.

Выводы:

1. Гипотеза Кирхгофа дает значительные ошибки при расчёте операции гибки на ребро в следствие того, что не выполняются основные ее предположения. ε_{zz} не равно нулю, более того по результатам моделирования ε_{zz} сравнима с величинами двух других главных деформаций.
2. Ошибка при вычислении толщины листового материала после деформирования при применении гипотезы Кирхгофа для соотношения $S/R = 1$ составила 6,8%, а для соотношения $S/R = 2$ составила 9,2%.

3. Исходя из предложенной методики вычисления относительного отклонения нормалей от теоретически предсказанных можно сказать что максимальное отклонение наблюдается при большей величине отношения S/R .

Литература

1. *Демин В.А.* Проектирование процессов толстолистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов. – М.: Машиностроение-1, 2002. – 186 с. ISBN 5-94275-035-1
2. *Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.