

Поперечный изгиб заготовки прямоугольного сечения при больших пластических деформациях

© Б.В. Букеткин, Н.А. Жуков, А.А. Ширшов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 1005005, Россия

Технологическая операция гибки широко применяется при изготовлении различных деталей — как стержневых, например пружин различного вида, так и оболочечных, например обечайки и днища нефтехимических аппаратов, корпуса судов, автомобилей и др. При этом возникают максимальные пластические деформации, величина которых варьирует в широком диапазоне и может значительно превосходить упругие деформации. Независимо от уровня максимальных деформаций, в изделии возникают остаточные напряжения, влияющие на его работоспособность. Представлено исследование свободного трехточечного изгиба заготовки прямоугольного поперечного сечения, проведенное при различных отношениях радиуса контактирующей цилиндрической поверхности пуансона к высоте заготовки, а также при различных отношениях ширины заготовки к ее высоте. В качестве материала заготовки выбрана низкоуглеродистая сталь с реальной (не аппроксимированной) диаграммой деформирования. Методом конечных элементов проведено численное исследование напряженного состояния остаточных напряжений и изменения формы поперечного сечения.

Ключевые слова: поперечный изгиб, пластические деформации, остаточные напряжения, диаграмма деформирования

Введение. При изготовлении различных деталей, в частности стержневых, например пружин различного вида, и оболочечных, например обечаек и днищ нефтехимических аппаратов, корпусов судов, автомобилей и др., широко применяют технологическую операцию гибки. При этом возникают максимальные пластические деформации, варьирующиеся в широких пределах и значительно превосходящие упругие деформации. В тех случаях когда максимальные пластические деформации соизмеримы с упругими деформациями, материал рассматривают как упругопластический. Так, для частных случаев упругопластический изгиб стержня (плоское деформированное состояние) и листа (плоское деформированное состояние) с аппроксимированным упрочнением были получены аналитические и полуаналитические решения задачи [1–7].

Если максимальные пластические деформации более чем на порядок превышают упругие деформации, то материал рассматривают как жесткопластическое тело и не учитывают упругие деформации [5]. Более общие решения получены численным способом, например методом конечных элементов с аппроксимацией диаграммы деформирования линейной, степенной или кусочно-линейной

функцией, которая более точно отражает реальную диаграмму деформирования [1, 8–10]. Независимо от уровня максимальных пластических деформаций в изделии возникают остаточные напряжения, которые могут оказывать существенное влияние на его работоспособность, поэтому расчетные методы их определения, дающие достаточно достоверные сведения, имеют большое значение [11–16].

Цель данной работы — проведение исследований напряженного состояния, изменения формы поперечного сечения и остаточных напряжений на примере свободного трехточечного изгиба заготовки с прямоугольным поперечным сечением из материала с реальной (не аппроксимированной) диаграммой деформирования при больших (выше 20 %) пластических деформациях. Исследования проведены численно с использованием метода конечных элементов (МКЭ) пакета прикладных программ ANSYS R17.0 Academic [17] при различных отношениях радиуса контактирующей цилиндрической поверхности пуансона R к высоте заготовки H и отношениях ширины B заготовки к ее высоте H .

Расчетная модель. Такая модель свободного изгиба заготовки (стержня) показана в аксонометрической проекции на рис. 1. Плоскостями симметрии XU и YZ вырезана четвертая часть стержня и пуансона. Начало координат помещено в плоскости симметрии XU на линии контакта стержня и опоры. На нижней поверхности опоры запрещены вертикальные перемещения, а в плоскостях симметрии XU и YZ использованы симметричные граничные условия. Поскольку интерес представляет зона стержня под пуансоном, то была использована неравномерная сетка со сгущением в зонах контакта пуансон — стержень и опора — стержень и более крупная сетка — в центральной части, которая на рис. 1 отделена тонкими линиями от контактных зон. Такой подход позволил использовать достаточно мелкую сетку, которая обеспечила требуемую точность результатов при малом времени счета одного варианта. При расчете использованы тетраэдральные квадратичные элементы SOLID186 и учтены большие перемещения. Нагружение осуществлялось заданием вертикального перемещения U_y верхней плоскости пуансона (кинематическое нагружение).

В качестве материала заготовки выбрана низкоуглеродистая сталь типа стали 20 с упрочнением. Материал опор и пуансона — высокопрочная сталь. Диаграмма деформирования заготовки с начальным участком в увеличенном масштабе по оси деформаций показана на рис. 2.

Расчеты проведены для трех значений отношения ширины заготовки к ее высоте ($B/H = 1; 2; 4$) при постоянной длине заготовки, равной $10H$. Для исследования изменений остаточных напряжений и контактного давления проведены расчеты при различных значениях

перемещения пуансона U_y — от $-0,1H$ до $-1,2H$. Во всех вариантах расчетов форма и размеры элементов в плоскости XY заготовки оставались без изменений. При увеличении отношения B/H в 2 и 4 раза число элементов вдоль оси Z также увеличивали. При изменении отношения R/H размеры элементов вдоль цилиндрической поверхности пуансона изменяли таким образом, чтобы контактирующие узлы имели, если возможно, одинаковые координаты x_n . Были рассмотрены три отношения R/H , равные 0,5; 1; 1,5.

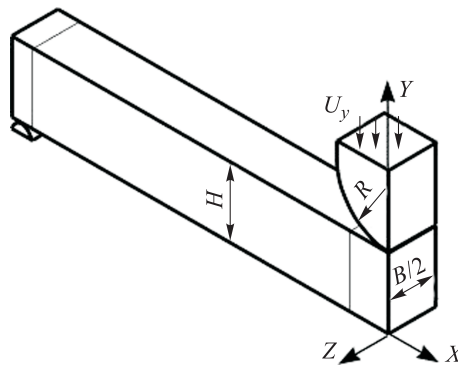


Рис. 1. Схема расчетной модели трехточечного изгиба

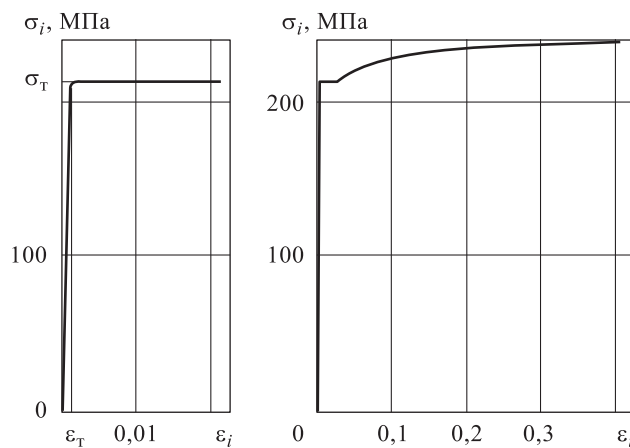


Рис. 2. Диаграмма деформирования с начальным участком в увеличенном масштабе (слева), использованная при расчетах

Результаты расчетов. Наибольший интерес представляет срединная область заготовки — зона контакта, т. е. зона максимальных деформаций. На рис. 3–6 на примере изгиба заготовки с отношением $B/H = 1$ при максимальных растягивающих деформациях $\epsilon_x = 0,18$ показаны поля напряжений в плоскостях симметрии.

Распределение напряжений σ_x в плоскости XY представлено на рис. 3. На удалении от плоскости симметрии YZ примерно на половину