

УДК 621.7.044.001.573

Черныш А. А.
Прудников Г. В.
Черкащенко В. Ю.
Драгобецкий В. В.

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РИФТА

Технологические процессы листовой штамповки являются постоянным источником теоретических и экспериментальных задач требующих своего решения. Одной из наиболее распространенных операций листовой штамповки является формовка ребер и элементов жесткости, которая находит широкое применение в автостроении, самолетостроении, вагоностроении, радиотехнике, приборостроении, судостроении и т. д.

Уменьшение трудоемкости при сохранении требуемых параметров качества получаемых деталей является одной из актуальных проблем листовой штамповки. Решение данной проблемы должно обеспечивать, при заданных допусках на геометрические размеры детали, требований к состоянию поверхности, прочностные и эксплуатационные характеристики изделия. Необходимым условием для реализации поставленной цели является отсутствие признаков технологического брака, в частности образование волн, гофр, связок в областях детали на сжатых и сжато-растянутых участках заготовок.

С этой точки зрения разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов листовой штамповки – это проблема предсказания возможности появления технологического брака и оценки предельных возможностей процесса.

Данный вид брака часто является устранимым. Для этого в штамповой оснастке предусматриваются разнообразные по конструкции прижимы или складкодержатели, применение которых устраняет условия данного вида потери устойчивости. Если такие условия создать затруднительно, то иногда удается устранить гофр путем создания избыточного давления на окончательной стадии образования складок или гофров.

В автостроении, вагоностроении, приборостроении, самолетостроении и др. в большинстве случаев в машиностроении штамповка ребер жесткости производится металлическими штампами. В авиа- и ракетостроении формовка выполняется на гидравлических прессах давлением эластичных сред и жидкости, а также применяются методы импульсной металлообработки.

Штамповка ребер жесткости и выдавок относится к процессам рельефной формовки. Считается, что рельефная формовка является частным случаем неглубокой местной вытяжки, при которой материал подвергается главным образом растяжению [1]. При местной вытяжке процесс состоит из последовательности стадий пластической деформации свободного участка, который находится между началами радиусов закруглений пуансона и матрицы: деформации дна выпуклости элемента жесткости и стадии пластической деформации смежного с ребром матрицы плоского участка заготовки.

Детальные исследования по формовке прямолинейных рифтов проведены Е. И. Исаченковым [2]. Потребное давление при формовке находится из совместного решения уравнения Лапласа с условием пластичности для одноосного напряженного состояния. Параметры потребного давления сопоставлены с экспериментальными данными по формовке рифтов из стали X18H10T, 20 и алюминиевых сплавов. Приведены значения предельных давлений разрушения в зависимости от относительной глубины рифта и относительного радиуса рифта. В работе Е. И. Исаченкова отмечен неправильный подход, установившихся в практике машиностроения, к определению оптимальной геометрии законцовок прямолинейных рифтов. И если с момента выхода монографии Е. И. Исаченкова в 1967 г. в практике

машиностроения его рекомендации нашли отражение, то в вагоностроении, установившиеся бюрократические традиции технологам преодолеть не удастся. При изготовлении крышек люков грузовых вагонов до сих пор применяют так называемые веретенообразные плоские законцовки. Такая форма законцовок приводит к потере устойчивости зоны сопряжения законцовки с плоскостью остальной части детали (рис. 1).



Рис. 1. Отштампованная крышка люка грузового вагона

Это связано с тем, что различные участки рифта имеют неодинаковые условия деформирования. Конструктивно решить проблему устойчивого формообразования рифтов сложно. Для этого необходимо в конструкциях применять рифты с геометрическими параметрами, которые соответствуют рифтам «равного сопротивления деформированию». В настоящее время в вагоностроении нет возможности преодолеть этот консерватизм и вопросы потери устойчивости при штамповке такого класса деталей необходимо решать технологам.

Таким образом, основной проблемой при рельефной формовке прямолинейных рифтов является потеря устойчивости (гофрообразование) при малых упругопластических деформациях. Применительно к процессам формообразования листового материала явление потери устойчивости освящено достаточно глубоко и полно в работах Головлева В. Д., Яковлева С. С., Деля Г. Д. и др. [3–5].

Явление же потери устойчивости при формообразовании прямолинейных рифтов с веретенообразными и плоскими законцовками практически не рассматривалось. Решение подобных задач, как правило, производится методами численного математического моделирования с использованием принципа возможных изменений деформированного состояния [5–8].

В общем случае устранение нежелательных гофров и складок является нетривиальной задачей и требует дополнительных исследований при проектировании новых и совершенствованию действующих технологических процессов листовой штамповки.

В данном разделе приведены результаты экспериментальных исследований по определению технологических возможностей процесса формовки – вытяжки элементов рельефа пологих крупногабаритных деталей с использованием технологических элементов управления напряженно-деформированным состоянием заготовки, а также проверки достоверности теоретического анализа различных стадий процесса изготовления изделия и оценки технологических параметров.

В данной работе для исследования напряженно-деформированного состояния фланца заготовки в технологических процессах формовки – вытяжки с применением управляющих элементов был применен метод делительных сеток.

Целью работы является изучение тензорных полей напряжений и деформаций физической модели, деформированной на экспериментальной оснастке, и оценка ошибки определения напряжений и деформаций; определение предельных параметров напряженно-деформированного состояния и параметров технологического процесса, соответствующих этому предельному состоянию, гарантирующих отсутствие браковочных признаков на готовом изделии.

Управляемое деформирование заготовки реализовывалось путем создания на ней областей, ограничивающих течение металла по определенным направлениям.

Поэтому, изучение поля перемещений материальных точек плоских элементов заготовки, представляет значительный интерес для исследования, так как на его основе определяются параметры напряженно-деформированного состояния и параметры технологического процесса.

Исходя из целей экспериментального исследования, была спроектирована и изготовлена технологическая оснастка, показанная на рис. 2, 3.



Рис. 2. Комплект экспериментальной оснастки



Рис. 3. Пуансон с вкладышем и деформированная заготовка

Матрицы в центральной части имели сквозную проточку и разные радиусы перетяжного ребра, которые варьировались от 1 до 6 мм. Вставные цилиндрические валики (пуансоны) были изготовлены разной длины для изучения влияния законцовок рифта на характер течения металла. Это позволило оценить возможность самопроизвольного формоизменения законцовки рифта укороченным пуансоном, т. е. для исключения гофрообразования очаг деформации ограничивался и не находился в зоне законцовки рифта.

В качестве материала для заготовки – пластины использовалась сталь Ст3 толщиной 1 мм.

Делительные сетки наносились на плоскость образца специальным приспособлением, состоящим из резца, жесткой планки и основания. Семейство координатных линий образовывало на поверхности заготовки координатную сетку с квадратными ячейками. Размеры квадратных ячеек варьировались от 2×2 до 5×5 мм. Заготовка с нанесенной на неё координатной сеткой показана на рис. 4.

Деформирование осуществляли на прессе УНМ-100 до момента потери устойчивости фланца образца. Оснастка в сборе, установленная на прессе, показана на рис. 5.



Рис. 4. Фрагмент детали с координатной сеткой



Рис. 5. Оснастка в собранном виде, установленная на прессе

Учитывая сложность решаемой задачи, при обработке результатов эксперимента были приняты упрощающие предположения:

- процесс деформирования заготовки является квазистатическим, близким к монотонному и, следовательно, имеют место соотношения деформационной теории пластичности. Кривая упрочнения считается единой. Зависимость между девиаторами тензора напряжений и тензора деформации прямо пропорциональны;
- исследуемые области заготовки находятся в условиях плоского напряженного состояния;
- материал заготовки считается однородным и изотропным и несжимаемым.

В данном исследовании при обработке результатов применялась симплексная конечно-элементная аппроксимация. На каждом симплексе (плоском треугольнике) поле перемещений локально аппроксимировалось линейными функциями относительно координат.

При аппроксимации результатов экспериментов использовалась конечно-элементная модель заготовки и линейная аппроксимация поля перемещения. Это позволило приблизить тензорные поля деформаций и напряжений локально постоянными функциями, что соответствует осреднению исследуемых величин по площади конечного элемента.

Как правило, симплексная аппроксимация поля перемещения применяется для исследуемых областей со сложными границами. В этом случае можно проще достигнуть требуемой точности представления границы контура прямолинейного рифта, уменьшая размеры конечного элемента.

Для получения непрерывного поля исследуемой величины применяются интерполяционные многочлены Эрмита [8], заданные на прямоугольной сетке (рис. 6). Аппроксимация Эрмита обеспечивает непрерывность не только самой функции, но и её первых производных во всей области.

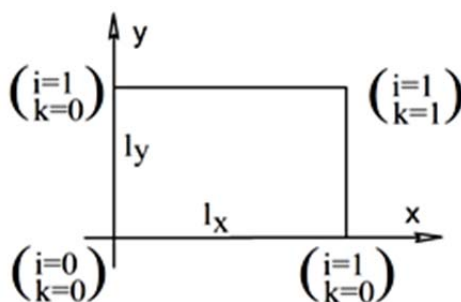


Рис. 6. Прямоугольный конечный элемент и нумерация узлов

Производная исследуемой функции в эксперименте не измеряется и поэтому ее следует оценить с использованием аппроксимации, для которой не требуется знания производной в узлах интерполяции. Наиболее подходящей для этой цели является аппроксимация с использованием полиномов Лагранжа [8] второго порядка на сетке, показанной на рис. 6.

Координаты узлов делительной сетки до и после деформации определяют аппроксимацию поля перемещения и характеристики напряженно-деформированного состояния.

Таким образом, мы получаем возможность отказаться от измерений численных значений размеров сетки непосредственно на образце и перейти к анализу цифрового снимка исследуемой области, что с практической точки зрения значительно проще.

Фотографии стальной заготовки с координатной сеткой, искаженной в процессе формовки, приведены на рис 7. Сопоставление результатов экспериментального исследования и моделирования проводилось по кинематике течения металла, которая полностью определялась координатами узловых точек координатной сетки.

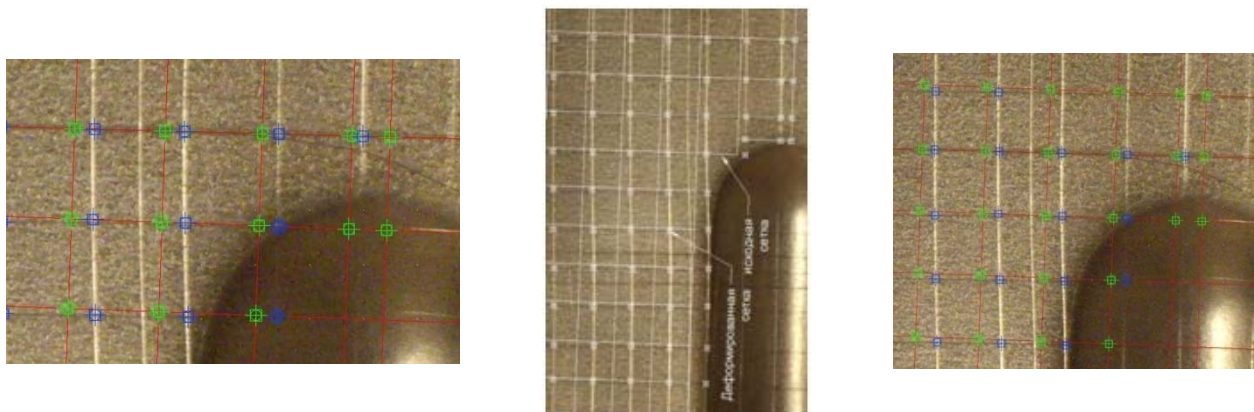


Рис. 7. Координатная сетка в исходной и деформированной конфигурации

Измерение координат узлов сетки осуществляли в приложении Autocad после фотографирования сетки. Autocad позволяет проводить измерения с точностью до восьмого знака после запятой, но реально удалось использовать точность до третьего знака из-за расплывчатости растрового изображения при большем увеличении.

На рис. 8, 9 показаны поле перемещения и конечно-элементная аппроксимация фланца заготовки в деформированном состоянии.

Область 1 и область 2, показанные на рис. 9, – характерные области начала потери устойчивости фланца в условиях эксперимента (см. рис. 10, 11).

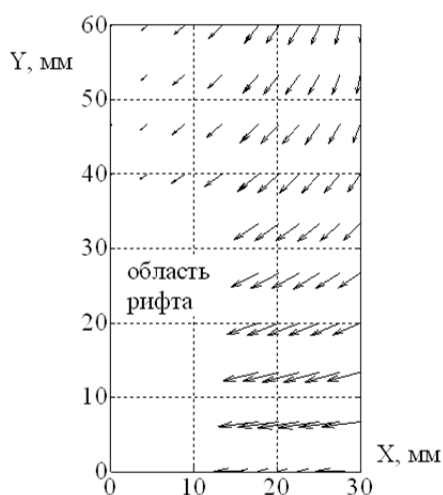
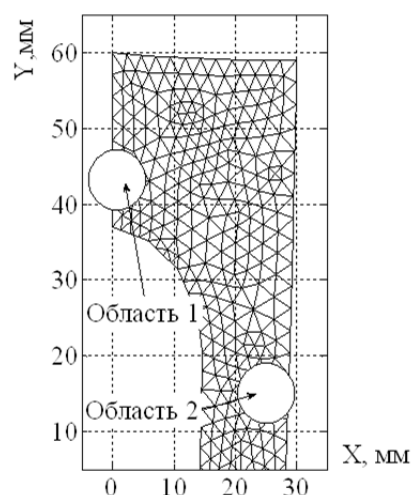
Рис. 8. Поле перемещения. Заготовка со свободным фланцем размером $120 \times 60 \times 1$ мм, из стали Ст3, перетяжное ребро $R = 6$ мм

Рис. 9. Конечно-элементная аппроксимация фланца заготовки в деформированном состоянии

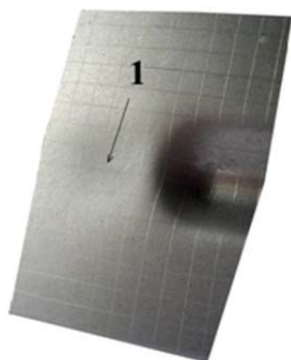


Рис. 10. Первая характерная область начала потери устойчивости фланца

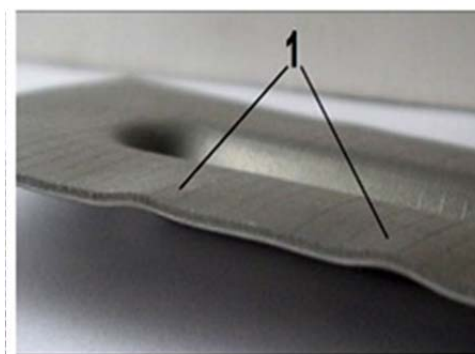


Рис. 11. Вторая характерная область начала потери устойчивости фланца

ВЫВОДЫ

С помощью экспериментально-аналитического метода координатных делительных сеток определены компоненты тензора деформаций и напряжений, компоненты девиатора напряжений при формовке прямолинейного рифта.

Анализ НДС показал, что картина распределения напряжений соответствует распределению деформаций.

Максимальные сдвиговые напряжения сосредотачиваются в зоне законцовки рифта, а максимальные радиальные напряжения у середины рифта стенки в зоне нижнего торца фланца. Зона максимальных радиальных напряжений сосредотачивается по периметру рифта. Максимальные окружные напряжения сосредотачиваются в центральной зоне рифта.

Отсутствие признаков брака на отштампованной заготовке достигалось при давлении прижима, составляющем 32–36 % от деформирующего усилия при применении пуансонов, длина которых соответствовала длине прямолинейного рифта без законцовки. Свободно-деформированный участок законцовки прямолинейного рифта при штамповке укороченным пуансоном по своей геометрии соответствовал чертежу детали в пределах допусков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке* / В. П. Романовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение : Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
2. Исаченков Е. И. *Штамповка резиной и жидкостью* / Е. И. Исаченков. – М. : Машиностроение, 1967. – 366 с.
3. Головлев В. Д. *Расчеты процессов листовой штамповки (Устойчивость формообразования тонколистового металла)* / В. Д. Головлев. – М. : Машиностроение, 1974. – 136 с.
4. Яковлев С. С. *Ротационная вытяжка с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала* / С. С. Яковлев, В. И. Трегубов, К. С. Ремнев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением : научно-технический и производственный журнал.* – М., 2011. – № 11. – С. 10–16.
5. Дель Г. Д. *Определение напряжений в пластической области по распределению твердости* / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
6. Кухарь В. Д. *Влияние технологических параметров на устойчивость процесса вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных заготовок* / В. Д. Кухарь, С. С. Яковлев, К. С. Ремнев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением : научно-технический и производственный журнал.* – М., 2011. – № 11. – С. 3–9.
7. Каргин С. Б. *Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния слитка при ковке на трехлепестковую заготовку* / С. Б. Каргин, О. Е. Марков, В. В. Кухарь // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 17–21.
8. Пасько А. Н. *Математическое моделирование процессов гидравлической и гидромеханической формовки* / А. Н. Пасько, Д. А. Алексеев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением : научно-технический и производственный журнал.* – М., 2011. – № 11. – С. 45–47.

Черныш А. А. – ст. преп. КрНУ им. М. Остроградского;

Прудников Г. В. – дир. ХКЭПОП;

Черкащенко В. Ю. – аспирант КрНУ им. М. Остроградского;

Драгобецкий В. В. – д-р техн. наук, проф. КрНУ им. М. Остроградского.

КрНУ им. М. Остроградского – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

ХКЭПОП – Харьковское казенное экспериментальное протезно-ортопедическое предприятие, г. Харьков.

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 04.03.2013 г.