



УДК 621.73

К.Н. Соломонов, Н.И. Федоринин, Л.И. Тищук
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
университет путей сообщения
(Воронежский филиал)»
г. Воронеж, Россия
E-mail: konssol@list.ru
Дата поступления 09.05.2016

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЛИНИИ РАЗДЕЛА ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ДЛЯ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОГО КОНТУРА

Аннотация

Приведены принципы, положенные в основу описания картины течения металла по плоским поверхностям. Представлена постановка задачи об определении типа линии раздела течения металла в общем виде и частные решения. Дан алгоритм построения эквидистанты замкнутого кусочно-линейного контура. Показано экспериментальное подтверждение разработанных методик.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, картина течения металла, линия раздела течения металла, линия тока, пространственная эпюра контактных давлений, эквидистанта.

Введение

В процессахковки и объемной штамповки плоских заготовок существенное влияние на качество получаемых изделий оказывает распределение потоков металла по плоскости контакта заготовки и зеркала гравюры штампа. Обычно такие процессы проходят при температуре деформируемого металла, близкой к температуре рекристаллизации. Поэтому упрочнением металла можно пренебречь. В таком случае пластическое течение металла по плоскости контакта подчиняется основным законам теории обработки металлов давлением. Тогда картина течения металла по плоскости контакта определяется положением линии раздела течения металла и направлением линий тока. При значительном трении линии тока направлены ортогонально контуру заготовки, вдоль которого граничные контактные давления меняются скачкообразно. Границей может служить либо край заготовки (при свободной осадке), либо полость штампа под какое-либо конструктивное углубление (ребро жесткости, бобышка, рассекатель), что характерно для открытой штамповки, либо стенка пуансона (при закрытой штамповке). В соответ-

ствии с этим видоизменяются линии раздела течения металла. Следовательно, формирование плоской заготовки при пластическом деформировании в значительной степени зависит от расположения линий раздела течения металла. Тогда при моделировании процессов изготовления поковок ключевую роль играет определение формы и положения линии раздела течения металла.

1. Основы описания картины течения металла

Одним из способов описания картины течения металла служит так называемая «эквидистантная теория», основанная на трех известных [1] принципах:

1. *Принцип наименьшего сопротивления*, выдвинутый применительно к пластической деформации Г. Треска (1895 г.), сформулирован С. И. Губкиным [2] следующим образом. «В случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях, каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления». Прямым следствием закона наименьшего сопротивления является, например, образование заусенца при штамповке в открытых штампах. Металл в

начальный период штамповки начинает вытекать в стороны за пределы фигуры штампа в зазор между верхним и нижним штампами. Заполнение же элементов полости штампа возможно, если сопротивление течению металла в заусенец становится больше сопротивления течению в те или иные участки полости. Сопротивление течению металла в заусенец увеличивается по мере уменьшения его толщины в процессе движения верхнего штампа, что и обеспечивает в конечном итоге заполнение всех элементов полости. Для практического применения закона наименьшего сопротивления необходимо знать направление траектории, по которой для точек, на ней расположенных, сопротивление течению будет наименьшим.

Принцип наименьшего сопротивления следует учитывать при теоретических исследованиях и при решении практических задач. Так, например, штамповка осадкой круглой в плане поковки во многих случаях может быть осуществлена из заготовки с квадратным поперечным сечением.

2. Для случая осадки (сжатия) призматических и цилиндрических тел между параллельными плитами (бойками) при наличии трения по плоскостям контакта эти траектории определяются по *принципу кратчайшей нормали*, сформулированному А. Ф. Головиным [3], заключающемуся в том, что перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной к действию внешней силы, происходит по кратчайшей нормали к периметру сечения. Аналогичный принцип выдвинут Э. Зибелем [4]. Следует добавить, что максимальную конечную деформацию тело получит в тех направлениях, по которым будет передвигаться наибольшее количество точек. Пусть, например, осаживается призма с прямоугольным основанием. Согласно принципу перемещения точек по кратчайшей нормали к периметру сечения прямоугольник можно разделить на два треугольника и две трапеции линиями, представляющими собой граничные линии или линии раздела течения, поскольку длина нормалей к периметру сечения по обе стороны из каждой точки, лежащей на этих линиях, бу-

дет одинаковой. Учитывая количество точек тела, расположенных на направлениях течения в данном сечении, можно предположить, что после некоторой осадки сечение примет вид многоугольника. Нетрудно представить, что при увеличении степени осадки тела, рассматриваемого в нашем примере, периметры его поперечных сечений стремятся к эллипсам, а эллипсы в дальнейшем преобразуются в круги, после чего движение точек происходит по радиусам.

3. Такая закономерность изменения формы поперечных сечений тела при осадке была замечена еще К. Зоббе (1908 г.) [5], который предложил *принцип наименьшего периметра*. Этот принцип можно сформулировать так: любая форма поперечного сечения призматического или цилиндрического тела при осадке его в пластическом состоянии с наличием контактного трения стремится принять форму, имеющую при данной площади наименьший периметр, т. е. в пределе стремится к кругу.

Принцип наименьшего периметра справедлив при перемещении точек деформируемого тела по кратчайшим нормальям к периметрам сечений, перпендикулярных к направлению действующей силы. В дальнейшем было установлено, что кратчайшая нормаль не всегда является направлением наименьшего сопротивления, а лишь при условиях: если трение на поверхностях контакта металла с инструментом изотропно, т. е. одинаково по всем направлениям; если величина контактного трения значительна.

При осадке, например, прямоугольного параллелепипеда между плоскими бойками без контактного трения схема перемещения точек отличается от описанной выше, когда прямоугольник превращается в многоугольник, а затем эллипс и круг. Движение частиц в плоскостях, нормальных к направлению внешней силы, носит радиальный характер, и поперечные сечения в процессе деформации будут оставаться подобными исходным. В. Г. Березкин [6] это показал весьма тонкими экспериментами по осадке прямоугольных свинцовых и алюминиевых образцов, при которых трение было практически исключено.

В соответствии с этими принципами можно считать, что:

- существует некая линия, вдоль которой скорости перемещения частиц металла равны нулю – так называемая, линия раздела течения металла;
- линия раздела течения металла является геометрическим местом точек, равноудаленных от контура заготовки или границы контура вдоль ребер жесткости;
- линии тока направлены ортогонально контуру заготовки при коэффициенте трения, близком к единице, и – радиально при минимальном трении.

Зная положение линии раздела течения металла, можно прогнозировать распределение потоков металла по плоскости контакта в условиях пластической деформации.

Следует отметить, что рассмотренные выше принципы действительны для деталей, имеющих ярко выраженное полотно (т.е. плоскостные участки). Несмотря на кажущуюся ограниченность области применения данной теории из-за вышеприведенной оговорки, детали с признаком «плоскостности» составляют довольно обширный класс, охватывающий различные отрасли машиностроения.

2. Постановка задачи

Решение полной системы дифференциальных уравнений, описывающей поведение нагретого металла при пластическом деформировании, аналитическими методами весьма затруднительно. Примером численного решения служит метод конечных элементов, реализованный практически во всех современных вычислительных системах, предназначенных для моделирования пластического формоизменения металла.

Другой принципиально отличный подход заключается в упрощении математической модели еще на стадии ее разработки, а, следовательно, и облегчении решения системы дифференциальных уравнений и сведении ее в ряде вариантов к аналитическим зависимостям. В таких случаях приходится отказываться от всеобщности

математической модели и ограничиваться описанием всего нескольких процессов ОМД, пренебрегая зачастую температурными и реологическими параметрами. Некоторые процессы ОМД (например, те из них, которые проходят при температуре рекристаллизации, благодаря чему упрочнением металла можно пренебречь) позволяют это делать без больших погрешностей.

В процессах ОМД значительную долю составляют плоские поковки, при формообразовании которых пространственная эпюра контактных давлений (ПЭКД) представляет собой поверхность одинакового ската [7]. В механике сплошных сред такое описание процесса формоизменения материала известно, как «песчаная аналогия» [8]. В этом случае ПЭКД представляет собой поверхность одинакового ската, все образующие которой наклонены к плоскости контакта под одинаковым углом [9].

Проецируя ПЭКД на плоскость контакта инструмента и заготовки, получаем картину течения металла (КТМ), которая состоит из линий раздела течения металла (ЛРТМ) и линий тока (ЛТ). При этом ЛРТМ – проекция гребней ПЭКД, а ЛТ – проекции образующих поверхности ПЭКД. Эти понятия, характеризующие пластическое течение металла по плоскости, имеют физический смысл:

Рассмотрим постановку задачи в скалярной форме. Пусть контур состоит из двух участков, заданных произвольными гладкими функциями $y_1(x_1)$ и $y_2(x_2)$. Требуется найти геометрическое место точек, равноудаленных от этих кривых (рис. 1). Эти точки лежат на кривой $y(x)$.

Положение линии раздела течения металла определяется двумя условиями:

1) равноудаленности: $L_{T1} = L_{T2}$;

2) нормальности: $L_{T1} \perp y_1(x_1)$,
 $L_{T2} \perp y_2(x_2)$.

Из совместного рассмотрения этих условий, получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно x , y , x_2 :

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2, \\ \frac{dy_1}{dx_1} = -\frac{x-x_1}{y-y_1}, \\ \frac{dy_2}{dx_2} = -\frac{x-x_2}{y-y_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где (x_1, y_1) — координаты точки, выбранной на кривой $y_1(x_1)$.

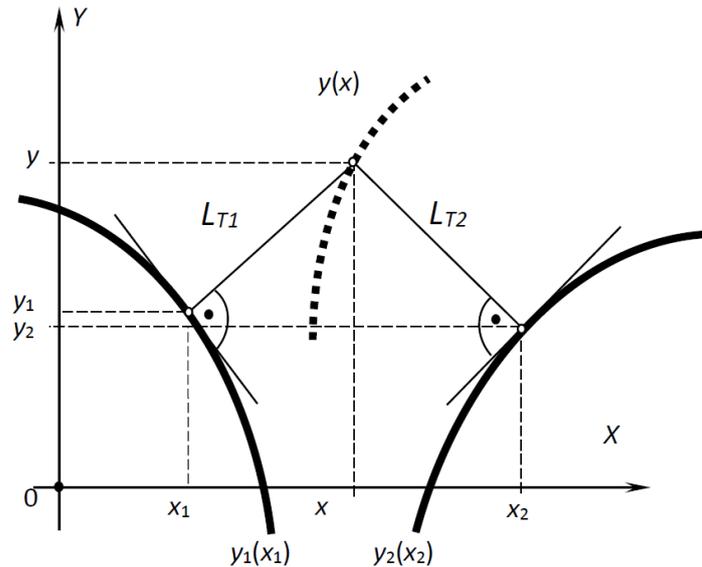


Рисунок 1. Эквидистанта двух гладких кривых

В общем виде аналитическое решение этой системы представляет большие трудности, не оправданные их практической полезностью, т.к. любую гладкую кривую можно аппроксимировать дугами кривых второго порядка (окружности, гиперболы, параболы, в вырожденном виде – и прямой), что упрощает решение и сводит его к частным случаям.

3. Аналитическое решение

Рассмотрим практическую задачу о сжатии прямоугольной пластины с двумя круглыми вырезами (рисунок 2).

Иследуем последовательно форму ЛРТМ на трех характерных участках:

1 – прямая-прямая; 2 – окружность-окружность; 3 – прямая-окружность.

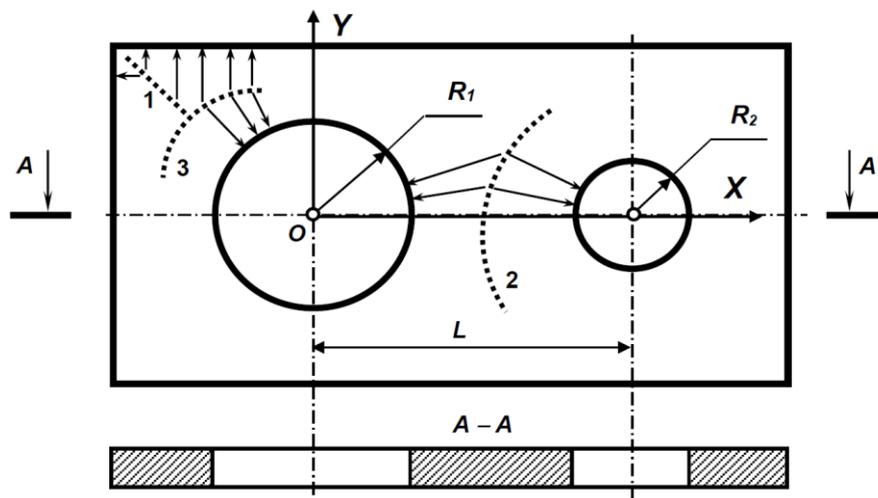


Рисунок 2. Линия раздела течения металла на прямоугольной пластине с двумя круглыми вырезами

На участке 1, очевидно ЛРТМ представляет собой биссектрису прямого угла.

На участке 2, как показано в [7], ЛРТМ может быть описана уравнением кривой второго порядка в каноническом виде:

$$\frac{(x - L/2)^2}{\left(\frac{R_1 - R_2}{2}\right)^2} - \frac{y^2}{L^2 - (R_1 - R_2)^2} = 1. \quad (2)$$

Тип кривой зависит от знака разности: $D = L^2 - (R_1 - R_2)^2$.

А. Если $D > 0$, соотношение (2) представляет собой уравнение гиперболы. В этом случае $L > \pm (R_1 - R_2)$.

Б. Если $D < 0$, соотношение (2) описывает уравнение эллипса. Тогда получаем неравенство $L < \pm (R_1 - R_2)$.

Этому соответствует практическая задача (не показанная на рисунке) построения ЛРТМ при осадке круглой пластины с круглым вырезом. Очевидно, в том случае, когда центр окружности, ограничивающей вырез, совпадает с центром пластины, расстояние между ними $L = 0$, и тогда эллипс превращается в окружность, что следует также из преобразований уравнения (2).

Таким образом, уравнение (2) охватывает все основные варианты взаимного расположения круглых многосвязных контуров поковки, каждый из которых представляет собой либо внешний контур, либо технологический вырез.

Исследования типа кривой на участке 3 показывают, что ЛРТМ представляет собой параболу [7].

Можно сказать, что все частные случаи решения системы (1) этим и исчерпываются, поскольку контур поковки можно аппроксимировать дугами окружности и отрезками прямой. При указанных допущениях ЛРТМ представляет собой кривую второго порядка.

4. Численное решение

Большинство деталей, применяемых в машиностроении, ввиду требований к технологичности конструкции, состоят из поверхностей вращения и многогранников. Поэтому в практике кузнечно-штамповочного производства немало деталей, получаемых из плоских заготовок, имеют элементы плоскостного характера. В рамках данной статьи ограничимся наиболее простым случаем: рассмотрим задачу построения эквидистанты для контура, представляющего собой кусочно-линейную замкнутую линию, т.е. многоугольник (рисунок 3).

Эквидистантой двух прямых является биссектриса этого угла. Поэтому самой первой эквидистантной линией контура является биссектриса самого малого угла в вершине D. Далее проводим биссектрисы двух соседних углов (C и E) до пересечения с биссектрисой самого малого угла (это точки G и H). Заканчиваются первые эквидистантные линии в ближайшей точке G пересечения с биссектрисами соседних углов.

Далее убираем из рассмотрения сторону контура DE, биссектрисы прилежащих углов к которой образовали эквидистантные линии. Продолжаем до пересечения стороны контура FE и CD, соседние с отброшенной линией.

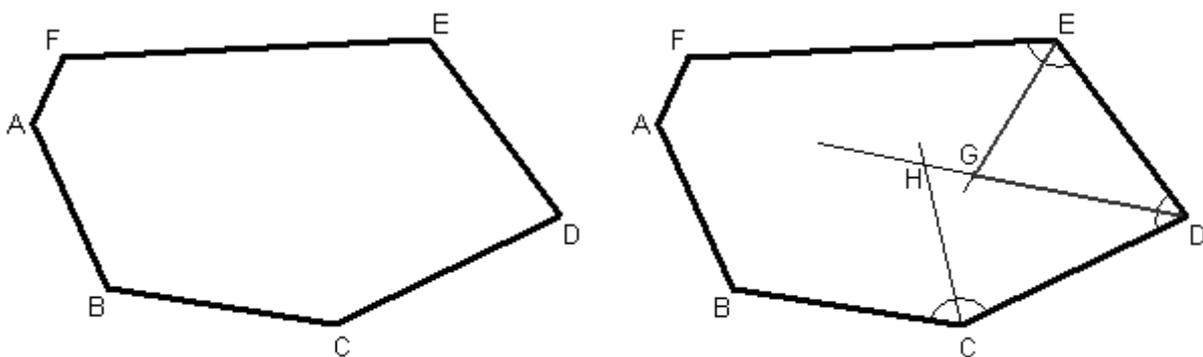


Рисунок 3. Алгоритм построения эквидистанты

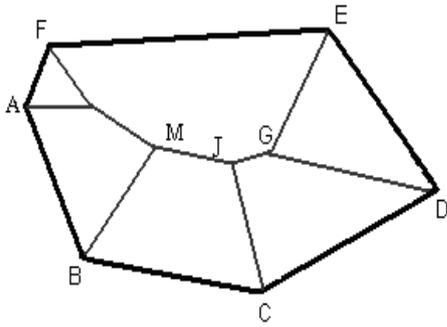


Рисунок 4. Эквидистанта многоугольника

Размерность контура уменьшилась на единицу: вместо шестиугольника теперь будет рассматриваться пятиугольник. Очевидно, что теперь наименьшим углом в многоугольнике контура будет вновь полученный угол. Процедура повторяется, только новая эквидистантная линия строится не от угла контура, а из точки окончания последней эквидистантной линии – точки G. Далее вновь ищем наименьший угол контура среди оставшихся (это угол при вершине F) и повторяем вышеописанный алгоритм действий, пока многоугольник не будет сведен фактически к треугольнику. Как известно из геометрии, в треугольнике биссектрисы всегда пересекаются в одной точке, поэтому для заверше-

ния построения эквидистантных линий достаточно соединить точки, в которых происходила остановка последовательных действий. Построение завершено (результат показан на рисунок 4).

Аналогичным образом можно построить эквидистанту любого многоугольника. В настоящее время алгоритм реализован в среде визуального программирования DELPHI.

5. Экспериментальное подтверждение

Исследования закономерностей течения металла при осадке плоских заготовок из стали и алюминиевых сплавов дают схожее (рис. 5) изображение картины течения металла, полученное в ходе натурального [10] и виртуального экспериментов [11].

Виртуальный эксперимент по осадке прямоугольных пластин разной толщины и размеров в плане при изменяющихся значениях коэффициента трения проводился с помощью известного и хорошо себя зарекомендовавшего вычислительного комплекса DEFORM. Преимущество компьютерного эксперимента (кроме экономии средств) заключалось еще и в том, что можно было отследить весь процесс постадийной осадки.

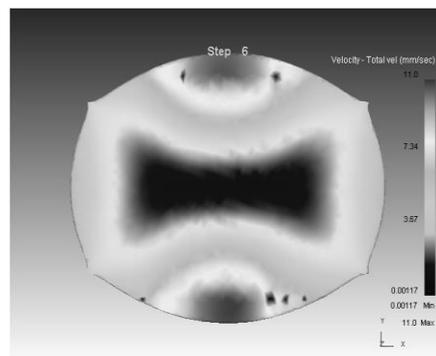
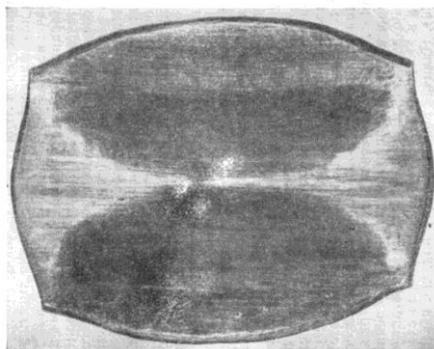


Рисунок 5. Результаты осадки плоских заготовок в ходе экспериментов: слева – натурального, справа – виртуального

Заключение

1. Аппроксимация контура поковки отрезками прямой и дугами окружности позволяет ограничить все многообразие эквидистантных линий кривыми второго порядка.

2. Предложенный алгоритм построения эквидистантных линий дает возможность автоматизировать методику решения поставленной задачи.

3. Экспериментальные данные косвенно подтверждают правильный выбор расчетных схем для отображения картины течения металла.

Библиографический список

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1971. 423 с.
2. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. – М.: Metallurgizdat, 1947. 532 с.
3. Головин А.Ф. Прокатка. – М.: Metallurgizdat, 1933. 236 с.
4. Зибель Э. Обработка металлов в пластическом состоянии. – М.: ОНТИ, 1934.
5. Sobbe C. Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens // Werkstattstechnik, 1908, No 9, s. 457-471.
6. Березкин В.Г. Кузнечная вытяжка под плоскими бойками // Сборник «Машины и технологии обработки металлов давлением». – М.: Машгиз, 1955.
7. Соломонов К.Н., Костарев И.В., Абашкин В.П. Моделирование процессов объемной штамповки иковки плоских заготовок. – М.: Издательский дом МИСиС, 2008.
8. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Иностранная литература, 1954. 647 с.
9. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
10. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. Деформации и усилия при обработке металлов давлением. – М.: Машгиз, 1959.
11. Соломонов К.Н., Свирин В.В. Анализ кинематических схем течения металла с помощью виртуального эксперимента // Технология легких сплавов, 2010, № 3, С. 58-64.



УДК 658.52.011.56

А.К. Иванюк, Ю.П. Сердобинцев
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»
г. Волгоград, Россия
E-mail: ivanyuk_aleksei@mail.ru
Дата поступления 14.05.2016

В авторской редакции

РАСЧЕТ И КОРРЕКТИРОВКА КОЭФФИЦИЕНТА ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА ТРУБ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ ВНЕШНЕЕ СЖАТИЕ

Аннотация

Произведен расчет и оценка полученных значений минимальной толщины стен труб, испытывающих внешнее сжатие. В ходе исследования выявлены расхождения значений из-за неполной исследованности влияния геометрии трубы на коэффициент продольного изгиба. Рассчитаны и проанализированы погрешности, с помощью современных САД систем получены критические значения для дальнейшей корректировки данного коэффициента. Разработаны две программы для автоматизированного расчета и произведена корректировка исследуемого коэффициента. В результате получены уменьшенные значения погрешности расчетов, что в дальнейшем способствует более точному расчету труб, испытывающих внешнее сжатие.

Ключевые слова: коэффициент продольного изгиба труб, автоматизированный расчет деформаций, Autodesk Inventor, критическое давление.

Введение

В данной статье рассматривается вопрос о повышении точности расчета минимальной толщины стенок, испытывающих заданное внешнее давление. Решение достигается анализом и корректировкой коэффициента продольного изгиба труб. Так

как определение толщины стенок трубы является важным вопросом в разных отраслях, то авторам видится целесообразным повышением точности в расчетах труб.

Исследования проводились для труб, используемых для создания подводных технических средств, т.е. небольшого размера,