

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.73

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-37-44>

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОСАДКЕ

Тищук Л.И.<sup>1</sup>, Соломонов К.Н.<sup>1</sup>, Мазур И.П.<sup>2</sup>, Кнапински М.<sup>3</sup>, Федоринин Н.И.<sup>1</sup><sup>1</sup> Московский государственный университет путей сообщения (Воронежский филиал), Воронеж, Россия<sup>2</sup> Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия<sup>3</sup> Ченстоховский технологический университет, Ченстохова, Польша

### Аннотация

Производство поковок с ребрами жесткости из алюминиевых сплавов, получаемых объемной штамповкой на гидравлических прессах большой мощности, нередко сопровождается образованием дефектов (прострел, утяжина и т.п.), которые вызваны, в том числе, неравномерностью формоизменения поковок. Для предотвращения дефектов в производственной практике используются технологические и конструкционные приемы, позволяющие управлять потоками металла по зеркалу гравюры штампа. Опыт конструкторов и технологов не всегда дает возможность правильно спроектировать поковку, инструмент и технологию производства таких деталей, что диктует необходимость проведения экспериментов. Натурные лабораторные и промышленные дорогостоящие эксперименты на сегодня утратили свое значение, благодаря развитию компьютерных и программных средств, позволяющих выполнять виртуальные эксперименты и компьютерное моделирование. Для компьютерного моделирования пластического формоизменения материалов на большинстве металлургических и машиностроительных, как отечественных, так и зарубежных, предприятиях используются, в основном, программные комплексы, базирующиеся на методе конечных элементов, которым присущи характерные особенности: большой объем памяти и быстрое действие компьютера пользователя, значительное время расчетов, громоздкость файла входных данных. Целью наших разработок является создание простого в освоении и оперативного в обращении программного комплекса для моделирования процессов пластического формоизменения металлов в процессах объемной штамповки иковки. Разработанный программный комплекс EQUI служит (пока) для компьютерного моделирования картины течения металла, которая содержит следующие изображения: контур заготовки, линии раздела течения металла и линии тока. С его помощью выполнено компьютерное моделирование формообразования профилированных заготовок при осадке. Проведены физические эксперименты по осадке заготовок той же формы. Сравнение результатов компьютерного и физического моделирования подтверждает выдвинутые гипотезы.

**Ключевые слова:** линия раздела течения металла, линия тока, картина течения металла, заготовка, осадка, эквидистанта, компьютерное моделирование, программный комплекс.

### Введение

В производстве поковок с ребрами жесткости из плоских заготовок существенную роль играет неравномерность течения металла по контактной поверхности. В этих процессах решающее значение имеют закономерности, которым подчиняется процесс осадки полотна поковки.

Неравномерность формоизменения поковок, в значительной степени зависящая от неоднородности граничных контактных давлений, в ряде случаев приводит к образованию дефектов (прострел, плохая завязка волокон и т.п.). В производственной практике используются технологические и конструкционные приемы, дающие возможность предотвратить образование дефектов без нарушения конструкции детали. Экспериментальные дорогостоящие методы на сегодня утратили свое значение, в основном благодаря резкому скачку в развитии компьютерных и программных средств.

© Тищук Л.И., Соломонов К.Н., Мазур И.П., Кнапински М., Федоринин Н.И., 2017

Поэтому создание программных комплексов (ПК), предназначенных для моделирования формообразования заготовок в процессах пластической деформации [1], позволяющих указать места возможного образования дефектов, в настоящее время играет первостепенную роль.

Для компьютерного моделирования пластического формоизменения материалов на большинстве металлургических и машиностроительных предприятий в различных странах мира сегодня используются, в основном, программные комплексы, базирующиеся на методе конечных элементов. Наиболее известные из них DEFORM, ANSYS, FORGE и др. [2].

К достоинствам этих ПК можно отнести: широту охвата решаемых задач; достаточно высокую точность получаемых результатов, которая обеспечивается, в основном, благодаря учету многих факторов – температуры, реологии [3], материала и т.п. В качестве недостатков можно отметить следующие: весьма высокие требования к параметрам компьютерной техники; зна-

чительное время расчета и моделирования одного варианта; сравнительно высокую сложность и низкую скорость создания файла входных данных; затратность обучения пользователей.

Конечной целью наших разработок является создание простого в освоении и оперативного в обращении ПК для моделирования процессов пластического формоизменения металлов в процессах объемной штамповки иковки, способного служить интеллектуальным помощником конструктора и технолога.

Математические модели, описывающие пластическое течение металла в процессах ОМД, весьма громоздки, поскольку содержат дифференциальные уравнения, характеризующие множество параметров (температуру, время, реологию, напряжения, деформации, плотность и т.д.), что позволяет максимально приблизить модель процесса к реальным условиям. Следствием этого является усложнение программной реализации алгоритмов, базирующихся на таких моделях.

Другой принципиально отличный подход заключается в упрощении математической модели еще на стадии ее разработки, а следовательно, и облегчении системы дифференциальных уравнений и сведения ее, по возможности, к аналитическим зависимостям [4]. 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.

Тогда для процессов ОМД, характеризующихся осадкой полотна заготовки, которая имеет ярко выраженные «плоскостные участки», основным можно считать вопрос о построении картины течения металла по плоскости контакта инструмента и деформируемой заготовки.

### 1. Принципы формообразования плоских заготовок

В качестве одного из способов решения задачи моделирования картины течения металла по плоскости контакта в процессахковки и штамповки мы предлагаем так называемую «эквидистантную теорию», основанную на трех «минимизационных» [5] принципах:

1) **Принцип наименьшего сопротивления**, выдвинутый применительно к пластической деформации Г. Треска (1895 г.), сформулирован С.И. Губкиным [6] 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 [7], заключающемуся в том, что перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной к действию внешней силы, происходит по кратчайшей нормали к периметру сечения. 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, будет 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.) [8], 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 нормальным 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 [9].

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.

Заметим, между прочим, 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, тем не менее, детали с признаком «плоскостности» составляют обширный класс, охватывающий, например, ракетно- и самолетостроение, да и в целом машиностроение.

В соответствии с этими принципами можно сделать выводы:

– существует некая линия, вдоль которой скорости перемещения частиц металла равны нулю, называемая линией раздела течения металла;

– линия раздела течения металла является геометрическим местом точек, равноудаленных от контура детали (поковки) или границы контура вдоль ребер жесткости;

– линии тока направлены под некоторым углом к контуру заготовки, который зависит от условий трения. Во всяком случае, можно считать, что кинематическая схема течения металла – радиальная, т.к. всегда можно построить некоторый «условный контур», по отношению к которому линии тока будут ортогональны.

Таким образом, для изучения формообразования поковки с ребрами жесткости, полотно которой деформируется в процессе осадки, необходимо исследование картины течения металла, которая включает следующие изображения: контур поковки, линии раздела течения металла и линии тока.

Тогда задача сводится к чисто геометрической, а именно нахождению эквидистанты некоторой замкнутой плоской гладкой (или кусочно-гладкой) линии (контура). Несмотря на кажущуюся простоту постановки указанной задачи, попытки ее решения натолкнулись на трудности, связанные с разработкой алгоритма построения эквидистанты и его программной реализацией. Оказалось, что для сложных многосвязных контуров решение находится достаточно точно и быстро, в то время как для простых вызывает элементарные ошибки.

## 2. Методика построения картины течения металла

Контур поковки с достаточной точностью можно аппроксимировать фрагментами прямых и дуг окружностей [10]. При необходимости возможна аппроксимация фрагментов контура любыми кривыми. Допустимое количество фрагментов задается при инициализации ПК EQUI.

В текстовом файле содержатся исходные данные:

а) Точность расчетов, которая может быть задана в нормализованном виде. Чем меньше заданное число, тем выше точность расчетов и больше время работы программы.

б) Шаг разбивки контура, позволяющий весь контур разбить на точки так, что расстояние между любыми соседними точками будет не больше заданной величины. Чем меньше заданное число, тем выше точность расчетов и больше время работы программы.

в) Параметры формы контура, записанные для каждого фрагмента в отдельную строку. Первые два поля строки должны содержать координаты начала фрагмента. Следующее поле определяет тип линии фрагмента и должно содержать служебные слова «прямая» или «окружность». На этом строка должна закончиться. Конечной точкой текущего фрагмента является начальная точка следующего фрагмента. Конечной точкой последнего фрагмента является начальная точка самого первого фрагмента. Начинать можно с любого фрагмента, но необходимо делать это последовательно, обходя контур против часовой стрелки. Количество строк с информацией о фрагментах контура определяет фактическое количество фрагментов контура, которое должно быть меньше допустимого.

Пример текстового файла:

1e-6 { точность расчетов }  
 0.005 { шаг разбивки контура }  
 0 0 прямая { координаты начала 1-го участка }  
 4 0 окружность { 2-й участок }  
 6 0 2 1  
 8 0 окружность  
 4 0 4 -1

Если пользователь не желает, чтобы на рисунке с построенными эквидистантами присутствовали номера узловых точек контура, соответствующий флажок на панели управления нужно убрать. После выбора файла и нажатия кнопки «Начать» получаем результат (рис. 1).

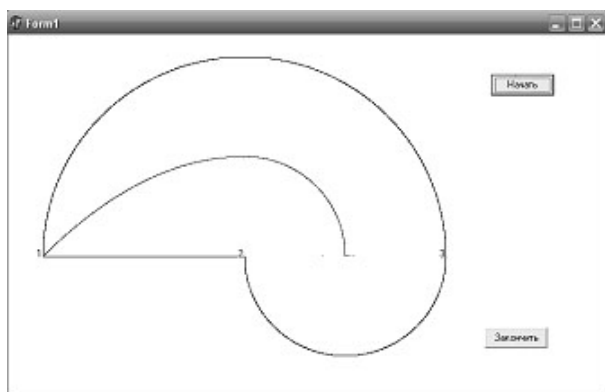


Рис. 1. Результат компьютерного моделирования

Размеры окна, в котором осуществляется построение, фиксированы, а показываемый контур всегда масштабируется так, чтобы занимать максимально полно все пространство окна.

Одновременно с построением на экране программа создает в той же папке, где находится, текстовый файл, файл выходных данных, содержащий координаты найденных точек эквидистанты, а также координаты ближайших к ним точек контура, что позволяет строить линии тока. Нажав на кнопку «Начать», можно инициировать построение для другого контура. Завершается работа программы нажатием на кнопку «Закончить».

Алгоритм действия ПК EQUI подробно представлен в [11]. Рассмотрим основные эпизоды его формализации.

После чтения исходных данных проверяется необходимость их коррекции. Если в какой-либо точке контура производная стремится к бесконечности, то происходит переполнение ячейки, и процессор аварийно прекращает выполнение программы. Чтобы избежать этого, программа предварительно корректирует исходные данные: если фрагмент контура – вертикальная прямая, то начальная точка этого фрагмента смещается по линии предыдущего фрагмента, руководствуясь следующим.

Если предыдущий фрагмент тоже прямая ли-

ния, то новые координаты узловой точки  $(x; y)$  будут определены так:

$$x = x_0 - \text{sign}(x_0 - x_p) \cdot \delta;$$

$$y = \gamma(x_0 - x_p) + y_p,$$

где  $\gamma = \frac{y_0 - y_p}{x_0 - x_p}$  – тангенс угла наклона преды-

дущего фрагмента;  $x_0, y_0$  – заданные координаты начала модифицируемого фрагмента;  $x_p, y_p$  – координаты начала предыдущего фрагмента;  $\delta$  – заданная точность вычислений;

$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0 \\ -1, & \text{если } x < 0 \end{cases}$  – единичная функция.

Если предыдущий фрагмент – окружность, то координаты  $(x; y)$  точки этой окружности, отстоящей на расстояние  $\delta$  от другой точки этой же окружности с координатами  $(x_0; y_0)$ , можно определить так. Имеем два уравнения:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R_c^2;$$

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \delta^2,$$

где  $x_c, y_c$  – координаты центра окружности;  $R_c$  – радиус окружности.

После несложных преобразований получим квадратное уравнение

$$(1 + k^2)x^2 - 2(x_c - k(\lambda - y_c))x + x_c^2 + (\lambda - y_c)^2 - R_c^2 = 0,$$

корни которого вычисляются из соотношения

$$x_{1,2} = x_c - k(\lambda - y_c) \pm \sqrt{D}.$$

Если  $x_0 > x_c$ , то используется корень  $x_2 = x_c - k(\lambda - y_c) - \sqrt{D}$ , а если  $x_0 < x_c$ , то корень  $x_1 = x_c - k(\lambda - y_c) + \sqrt{D}$ .

Если фрагмент контура – полуокружность на участке от  $x_n$  до  $x_k$ , в крайних точках производная стремится к бесконечности. Поэтому заменяем данную окружность другой, у которой радиус будет больше на величину  $\delta$ . Соответственно координата центра окружности будет смещена по оси ординат на величину

$$\Delta y = \mp \sqrt{\left(\frac{x_k - x_n}{2} + \delta\right)^2 - \left(\frac{x_k - x_n}{2}\right)^2} = \mp \sqrt{\delta(x_k - x_n + \delta)}.$$

Далее EQUI приступает к разбивке контура с наблюдением заданного максимального шага с использованием простого итерационного процес-



са: начиная с начальной точки контура делается шаг по оси абсцисс, равный величине максимального шага, определяется значение по оси ординат, вычисляется расстояние от полученной точки до предыдущей. Если это расстояние больше величины максимального шага, процедура повторяется, только с шагом, уменьшенным вдвое. Координаты полученной точки сохраняются вместе со значениями производной в этой точке контура. Производная вычисляется соответственно:

$$\text{для прямой } y' = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}},$$

$$\text{для окружности } y' = -\frac{x - x_C}{y - y_C},$$

где  $x, y$  – координаты текущей точки контура;  $x_{i-1}, y_{i-1}$  – координаты начальной точки текущего фрагмента контура;  $x_i, y_i$  – координаты конечной точки текущего фрагмента контура;  $x_C, y_C$  – координаты центра кривизны текущего фрагмента контура.

При разбивке контура учитываются особенности его формы. В узловых точках контура проверяется условие его выпуклости

$$(y_{i+1} - y_{i-1}) \cos \beta - (x_{i+1} - x_{i-1}) \sin \beta > 0,$$

где  $x_{i-1}, y_{i-1}$  – координаты любой точки, находящейся на луче, выходящем из рассматриваемого узла контура и имеющем направление, совпадающее с касательной к фрагменту, заканчивающемуся в этом узле;  $x_{i+1}, y_{i+1}$  – координаты любой точки, находящейся на луче, выходящем из рассматриваемого узла контура и имеющем направление, совпадающее с касательной к фрагменту, начинающемуся в этом узле;  $\beta = \arctg \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$  – угол по-

ложения рассматриваемой вершины контура относительно  $i-1$ -й точки ( $\beta \in [0; 2\pi)$ );  $x_i, y_i$  – координаты рассматриваемой вершины контура.

Если внутренний угол контура более  $180^\circ$  (контур не выпуклый), то возникает ситуация, когда линии тока с определенной части внутренней поверхности рассматриваемой заготовки будут сходиться именно в вершине этого угла. Поэтому при разбивке контура программа считает, что в таких узловых точках сосредоточено множество бесконечно малых отрезков прямых, последовательно осуществляющих поворот от направления угла наклона предыдущего фрагмента к последующему на величину избыточного угла. Другими словами, программа генерирует последовательность точек (псевдоточек), имеющих одни и те же координаты, но имеющих производные, отличающиеся на определенную величину. Величина шага угла наклона опреде-

ляется соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{2h}{x_i - x_{i-1}},$$

где  $h$  – величина заданного максимального шага разбивки.

Далее начинается главное – поиск эквидистантных точек, т.е. точек, которые образуют эквидистанту. Схематично последовательность действий такова. Последовательно в каждой  $i$ -й точке контура восстанавливается перпендикуляр к касательной, а затем по очереди перпендикуляры к касательным во всех остальных  $j$ -х точках контура до пересечения с первым перпендикуляром. Первым делом проверяется – находится ли полученная точка пересечения внутри контура. Если нет – переходим к следующей  $j+1$ -й точке. Если да, то сравниваем расстояния от точки пересечения перпендикуляров до  $i$ -й и  $j$ -й точек. Если эти расстояния оказываются близки друг к другу, то координаты такой точки запоминаются. Когда все  $j$ -е точки будут пройдены, то из всех запомненных точек выбирается одна, у которой расстояние до  $i$ -й точки минимально. Это и есть эквидистантная точка. Далее можно переходить к следующей  $j+1$ -й точке.

Проверка нахождения точки внутри контура основана на следующем принципе. Подсчитываем количество точек контура, имеющих такую же абсциссу и расположенных выше рассматриваемой точки. Если это количество нечетно – точка внутри контура, если четно – вне его.

Определение координат точки, равноотстоящей от точек с номерами  $i$  и  $j$  соответственно, организовано следующим образом. Как только соответствующая точка пересечения перпендикуляров к касательным для  $i$ -й и  $j$ -й пары точек контура оказывается внутри контура, определяется знак величины  $d_i - d_j$  ( $d_i$  – расстояние от найденной точки пересечения перпендикуляров до  $i$ -й точки контура;  $d_j$  – расстояние до  $j$ -й точки). Затем процедура повторяется для пары  $i$ -й и  $j+1$ -й точек. Если точка пересечения оказалась вне контура, то процесс прекращается, т.е. кандидата на эквидистантную точку пока нет. Если точка осталась внутри контура, сравниваем знак выражения  $d_i - d_{j+1}$  со знаком  $d_i - d_j$ . Если знак не изменился, берем следующую  $j+2$ -ю точку и т.д. до тех пор, пока не найдем такую  $j+k$ -ю точку, чтобы знаки выражений  $d_i - d_{j+k}$  и  $d_i - d_{j+k+1}$  были различны. Линейной аппроксимацией находим координату по оси абсцисс промежуточной точки

$$x = x_{j+k} + \mu(x_{j+k+1} - x_{j+k}),$$

где  $x_{j+k}, x_{j+k+1}$  – координаты  $j+k$ -й и  $j+k+1$ -й точек контура;

$$\mu = \left| \frac{d_i - d_{j+k}}{d_{j+k+1} - d_{j+k}} \right| - \text{коэффициент.}$$

Далее определяется координата по оси ординат промежуточной точки, строится перпендикуляр к касательной в этой точке и точка пересечения этого перпендикуляра с перпендикуляром к касательной в  $i$ -й точке регистрируется в качестве, так называемой, «псевдоточки», т.е. точки, которая может лежать на эквидистанте.

Если  $i$ -я или  $j+k$ -я точки окажутся псевдоточками, тогда аппроксимируется не координата по оси абсцисс, а производная в этой точке. Например, для  $j+k$ -й псевдоточки

$$y' = y'_{j+k} + \mu(y'_{j+k+1} - y'_{j+k}),$$

где  $y'_{j+k}, y'_{j+k+1}$  – производные в  $j+k$ -й и  $j+k+1$ -й точках контура.

И в качестве искомой точки берется точка пересечения перпендикуляра к касательной в  $i$ -й точке и прямой, проведенной через  $j+k$ -ю псевдоточку с тангенсом угла наклона  $y'$ .

В частном случае, когда  $i$ -я точка является псевдоточкой, а  $j$ -я точка находится на дуге окружности, координаты центра которой совпадают (точнее, находятся вблизи) с координатами  $i$ -й псевдоточки (или наоборот), возникает коллизия, когда вышеописанный алгоритм практически не работает, потому что приходится искать точку пересечения почти параллельных прямых. Но выход очевиден: точка, претендующая на звание эквиточки, находится на середине отрезка, соединяющего  $i$ -ю и  $j$ -ю точки.

Описанный алгоритм позволяет построить картину течения металла для кусочно-нелинейного контура.

### 3. Компьютерное моделирование картины течения металла

На основании представленного алгоритма разработан ПК EQUI, позволяющий моделировать картину течения металла по плоскости контакта инструмента и заготовки в процессахковки и объемной штамповки, в которых наблюдается деформационная схема осадки.

С целью апробации разработанного ПК EQUI было проведено моделирование картины течения металла при осадке плоских заготовок, имеющих форму «звезда» и «четырёхлистник». При этом в качестве кинематической схемы течения металла выбрана нормальная схема течения металла, обеспечивающая направление линий тока ортогонально контуру заготовки. Такое допущение возможно в первом приближении для общей оценки распределения потоков металла по контактной

плоскости. В дальнейшем предполагается введение в расчетный алгоритм поправочных коэффициентов, учитывающих трение и сопротивление истечению металла в различные полости.

Анализ картины течения металла (рис. 2) для заготовок в форме «звезда» и «четырёхлистник» показывает, что наиболее интенсивного течения металла следует ожидать во внутренних угловых точках, что объясняется большим притоком металла в эти точки, т.к. в них сходится пучок линий тока, в то время как вдоль контура с гладкими участками линии тока распределены равномерно, и никаких «всплесков» в распределении потоков металла по зеркалу гравюры штампа не прогнозируется. Тогда можно предположить, что заготовки в ходе деформации сначала превращаются в выпуклые многоугольники (для звезды), а затем должны по форме приближаться к кругу.

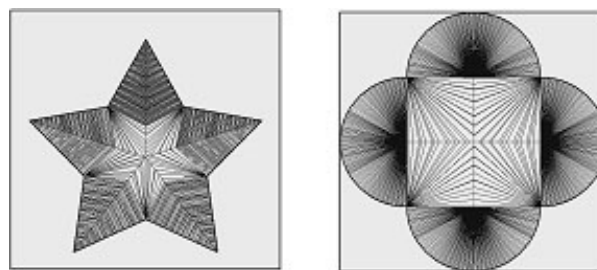


Рис. 2. Картина течения металла для односвязных контуров

ПК EQUI дает возможность моделировать картину течения металла и для многосвязных контуров, что расширяет область ее применения. Картина течения металла, полученная с помощью ПК EQUI, для трехсвязного контура, изображенного на рис. 3, может быть применена для анализа формообразования плоской заготовки в форме круга с двумя круглыми нецентральными вырезами.

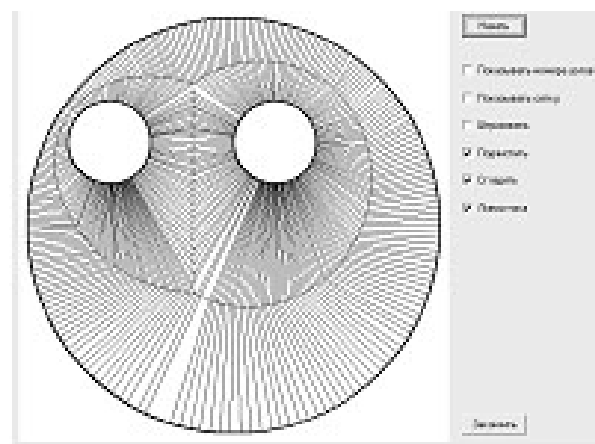


Рис. 3. Картина течения металла для многосвязного контура

#### 4. Физическое моделирование осадки профилированных заготовок

С целью проверки обоснованности выдвинутых гипотез и предположений и подтверждения работоспособности ПК EQUI был проведен натурный эксперимент по осадке пластилиновых плоских заготовок в форме «звезда» и «четырёхлистник».

Образцы осаживались постадийно до степени деформации: 0,33, 0,54, 0,75 и 0,83 (рис. 4). Начальная толщина заготовки равнялась 24 мм, конечная – 4 мм. Линейные размеры образцов колебались в пределах 50×50 мм. Образцы деформировались между жесткими гладкими плоскими поверхностями. Смазка не применялась, однако для предотвращения прилипания пластилина к рабочим поверхностям инструмента использовалась в качестве прокладки целлофановая пленка. Осадка образцов производилась на ручном прессе мощностью одна человеческая сила.

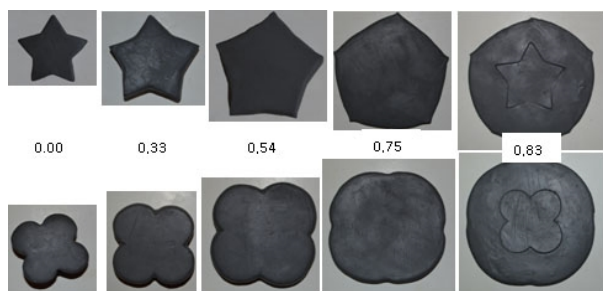


Рис. 4. Постадийная осадка пластилиновых образцов

Как видим, внутренние угловые зоны заготовки формируются наиболее интенсивно, и с увеличением степени деформации каждая из заготовок постепенно превращается в круг, что вполне соответствует рассмотренным принципам и анализу картины течения металла, выполненному на основании компьютерного моделирования с помощью ПК EQUI.

#### Результаты и выводы

1. Предложен новый подход для описания картины течения металла при деформировании плоских заготовок, базирующийся на «минимизационных» принципах.

2. На основе нового подхода разработаны алгоритм и программный комплекс EQUI, который может служить инструментом для исследования формообразования плоских заготовок.

3. Анализ результатов компьютерного моделирования и лабораторного эксперимента по осадке плоских образцов подтверждает эффективность разработанной методики и обоснованность выдвинутых гипотез и предположений.

#### Список литературы

1. Solomonov, K., 2012, Application of CAD/CAM Systems for Computer Simulation of Metal Forming Processes, Materials Science Forum, 704–705, 434–439.
2. Тищук Л.И., Соломонов К.Н. Анализ рынка программных продуктов, предназначенных для моделирования технологических процессов // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета. 2013. №2. С. 50–55.
3. Мазур И.П., Борисов С.С., Кавалек А. Исследование упрочнения труднодеформируемой стали типа HSLA при холодной прокатке // Производство проката. 2012. №7. С. 8–13.
4. Solomonov, K., 2014, Development of software for simulation of forming forgings, Procedia Engineering, 8, 437–443.
5. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971.
6. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. М.: Metallurgizdat, 1947.
7. Головин А.Ф. Прокатка. М.: Metallurgizdat, 1933.
8. Sobbe, C., 1908, Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens, Werkstattstechnik, 9, 457–471.
9. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. Деформации и усилия при обработке металлов давлением. М.: Машгиз, 1959.
10. Константин Соломонов. Моделирование формообразования поковок: исследования, гипотезы, разработки. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2011.
11. Соломонов К.Н., Федоринин Н.И., Тищук Л.И. Методика построения линии раздела течения металла в процессах осадки плоских заготовок // Вестник научно-технического развития. 2016. № 2. С. 36–55.

Поступила 27.03.17.

Принята в печать 07.06.17.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-37-44>

#### STUDY OF METAL FLOW PATTERN DURING UPSETTING

Liudmila I. Tishchuk – Head of Laboratory

Moscow State University of Railway Engineering (Voronezh Branch), Voronezh, Russia. E-mail: liudmila.tishchuk@mail.ru

**Konstantin N. Solomonov** – D.Sc. (Eng.), Professor

Moscow State University of Railway Engineering (Voronezh Branch), Voronezh, Russia. E-mail: konssol@list.ru

**Igor P. Mazur** – D.Sc. (Eng.), Professor

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mazur\_ip@mail.ru

**Marcin Knapinski** – D.Sc. (Eng.), Dean

Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland.

**Nikolai I. Fedorinin** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Moscow State University of Railway Engineering (Voronezh Branch), Voronezh, Russia.

### Abstract

Production of forgings with stiffeners, which are made from aluminium alloys on a heavy-duty hydraulic die forging machine, can often lead to defects such as bursts, shrinkage holes and so on, which can also occur due to uneven deformation. To prevent such defects, certain process- and design-related techniques are used in actual production that help control the flow of metal across the die impression. The experience of designers and process engineers is not always sufficient for them to properly design the forging, the tool and the process, which makes experiments necessary. Due to advances in computers and software, which now enable to carry out virtual experiments and computer simulation, costly laboratory and field experiments are not relevant any more. For computer simulation of forming processes, most of steel and machine producers, both in Russia and abroad, rely on FEM software packages, which have the following features: a large amount of memory and a high speed of the user computer, long calculation times, a big size of the input file. The aim of this research is to create a simple and user-friendly simulation software package for modelling metal forging processes. The developed software package EQUI is used (so far) for computer simulation of the metal flow pattern and contains the following images: the workpiece contour, the metal flow boundary and the flow line. Using this software, the upsetting process was simulated. Physical experiments were carried out in which workpieces of the same shape were produced by upsetting. A comparison of the results of the computer and physical simulation confirms the suppositions suggested.

**Keywords:** Metal flow boundary, flow line, metal flow pattern, workpiece, upsetting, equidistant curve, computer simulation, software package.

### References

1. Solomonov, K., 2012, Application of CAD/CAM Systems for Computer Simulation of Metal Forming Processes, Materials Science Forum, 704–705, 434–439.
2. Tishchuk L.I., Solomonov K.N. Market analysis for the process simulation software market. *Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta* [Bulletin of the Karaganda State Industrial University], 2013, no. 2, pp. 50–55. (In Russ.)
3. Mazur I.P., Borisov S.S., Kavalek A. Studying the hardening behaviour of HSLA steel during cold rolling. *Proizvodstvo prokata* [Rolling], 2012, no. 7, pp. 8–13. (In Russ.)
4. Solomonov, K., 2014, Development of software for simulation of forming forgings, *Procedia Engineering*, 8, 437–443.
5. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal forming]. Moscow: Mashinostroenie, 1971. (In Russ.)
6. Gubkin S.I. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgizdat, 1947. (In Russ.)
7. Golovin A.F. *Prokatka* [Rolling]. Moscow: Metallurgizdat, 1933. (In Russ.)
8. Sobbe, C., 1908, Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens, *Werkstattstechnik*, 9, 457–471.
9. Tamovskiy I.Ya., Pozdeev A.A., Ganago O.A. *Deformatsii i usiliya pri obrabotke metallov davleniyem* [Deformation and forces in metal forming]. Moscow: Mashgiz, 1959. (In Russ.)
10. Solomonov K. *Modelirovaniye formobrazovaniya pokovok: issledovaniya, gipotezy, razrabotki* [Simulation of the forging process: Research, hypotheses, developments]. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2011. (In Russ.)
11. Solomonov K.N., Fedorinin N.I., Tishchuk L.I. A method of designing a metal flow boundary when upsetting flat workpieces. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of scientific and technical development], 2016, no. 2, pp. 36–55. (In Russ.)

Received 27/03/17

Accepted 07/06/17

### Образец для цитирования

Исследование картины течения металла при осадке / Тишчук Л.И., Соломонов К.Н., Мазур И.П., Кнапински М., Федоринин Н.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 37–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-37-44>

### For citation

Tishchuk L.I., Solomonov K.N., Mazur I.P., Knapinski M., Fedorinin N.I. Study of metal flow pattern during upsetting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 37–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-37-44>