

УДК 621.73.011:658.512.24

Е. Н. ЧУМАЧЕНКО, академик РАЕН, д-р техн. наук, В. Н. КОРЗО,
Л. П. СТЕПАНЕНКОВА, канд. физ.-мат. наук (МИЭМ НИУ ВШЭ),
e-mail: mmlaf@miem.ru

Экспресс-расчет основных параметров штамповки длинномерных поковок¹

Рассматривается компьютерное моделирование процесса штамповки тонкостенных изделий с гравюрой и ребрами жесткости на основе метода песчаной аналогии.

Ключевые слова: штамповка, моделирование, тонкостенное изделие, технологические параметры.

The computer simulation of forging process of thin-walled products with engraving and webbing on the base of sand analogue method is considered.

Keywords: forging, simulation, thin-walled product, technological parameters.

Современные требования к качеству изделий из металлов и энергоёмкости их производства заставляют постоянно совершенствовать методы проектирования технологий производства, создавать алгоритмы и компьютерные системы, прогнозирующие течение металла при обработке давлением. Поиск оптимальных решений, обеспечивающих заданное качество конечного изделия, идет по двум направлениям.

Во-первых, получение максимально достоверного прогноза с применением всех современных средств механики, прикладной математики, компьютерных технологий и вычислительной техники [1, 2]. В настоящее время здесь достигнуты заметные результаты. При проектировании практически всех уникальных изделий в авиакосмической промышленности используют для моделирования 3D-системы, работа с которыми достаточно сложна и требует специальной подготовки пользователя и мощного компьютерного ресурса.

Во-вторых, для принятия оперативных решений о производстве изделия в условиях рынка с учетом технических возможностей производителя требуется оперативный экспресс-прогноз особенностей технологического процесса и способов его реализации. Для этого необходимо разработать так называемые быстрые алгоритмы расчетов, позволяющие с допустимой достоверностью перебрать большое число вариантов технологий и определить методологию производства качественных изделий.

В настоящее время от 50 до 95 % деталей изготавливают давлением на кузнечно-прессовых машинах. От научно-технического уровня и совершенства кузнечно-штамповочного производства зависят качество и эксплуатационные характеристики всех объектов машиностроения, включая самые ответственные — космические, авиационные, энергетические, оборонные, транспортные и др.

Рассмотрим задачи моделирования формоизменения и расчета энергосиловых параметров процессов кузнечно-штамповочного производства при изготовлении длинномерных поковок.

Особенности решения

Рассмотрим сжатие тонкого слоя металла между двумя параллельными жесткими плитами, сближающимися по нормали с постоянной скоростью. Предполагается, что в нижней плите выполнены определенной глубины полости под ребра жесткости.

Решения основаны на гипотезах теории течения тонкого пластического слоя А. А. Ильюшина [3, 4]:

1) на условии полной пластичности $\sigma_{12} = 0$, $\sigma_1 = \sigma_2 = -q$, $\sigma_4 = p = q + \sigma_s$, где σ_s — предел текучести; p — контактное удельное давление слоя на инструмент; q — боковое давление в слое;

2) на кинематическом условии, которое заключается в том, что поперечные скорости течения частиц среды постоянны по толщине слоя. Контактное давление на участке границы полостей определяем по формуле

$$p_s = k\sigma_s \quad (1)$$

Здесь $k = k_0 + k_H$ — коэффициент сопротивления истечению металла в полость на данном участке, где k_0 и $k_H = \frac{f}{2\text{tg}\alpha} \ln \frac{b}{b - 2H\text{tg}\alpha}$ — коэффициенты, характеризующие сопротивление затеканию слоя металла, расположенного над полостью штампа, и металла, затекшего в полость штампа.

Для центральных ребер жесткости $k_0 = 2 + \frac{h}{2b}$; для контурных ребер жесткости $k_0 = 2 + \frac{h_3}{2b} + \frac{f + 1 - 2\text{tg}\alpha}{4\text{tg}\alpha} \ln \frac{b}{b + (h_3 - h)\text{tg}\alpha}$, где α — штамповочный уклон полостей; f — коэффициент трения; H —

¹ Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

глубина затекания металла в данную полость; b — ширина полости под ребро жесткости; h_3 — высота порога заусенечной канавки.

Изготовим пластину такой же формы, как и у нижнего штампа. Полости ограничим вертикальными бортами, высота которых пропорциональна величине граничного давления. Сверху через сито насыпем сухой однородный песок, коэффициент трения которого $\nu = 1$. Через некоторое время образуется предельная песчаная насыпь. Контактное давление выразим через ординату насыпи в виде линейной однородной функции. В этом случае полное усилие P , необходимое для сжатия слоя металла, пропорционально объему V песчаной насыпи $P = \iint p dx dy = \frac{2\tau_s}{h} V$. След ребра, являющийся проекцией ребра насыпи на плоскость XU , совпадает с линией раздела течения металла. На границе полостей для каждой точки следа ребра существуют, по крайней мере, две разные точки, для которых $r_1 + b_1 = r_2 + b_2 = R$, где r_1, r_2 — расстояния от рассматриваемой точки следа ребра до точек на границе; b_1, b_2 — высоты бортов в соответствующих точках границы. Причем величины R минимальны для всех точек границы.

Линии течения металла будут совпадать с проекциями линий ската в песчаной насыпи. Скорость течения металла в произвольной точке A области течения (рис. 1): $v_A = \frac{\nu}{2h} MA$. Контактное давление в точке A : $p_A = \frac{2\tau_s}{h}(AN + b_N)$, b_N — высота борта в точке N .

Таким образом, поставленная задача течения тонкого слоя металла полностью решается на основании применения метода песчаной аналогии.

Таким образом, поставленная задача течения тонкого слоя металла полностью решается на основании применения метода песчаной аналогии.

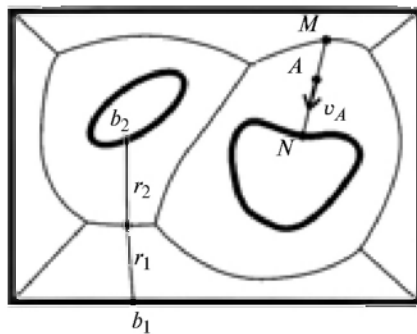


Рис. 1. Расчетная схема условного штампа

В соответствии с изложенным написана компьютерная программа, позволяющая построить картину течения слоя металла для произвольных поковок и проанализировать процесс формообразования ребер жесткости.

Алгоритм программы:

1. Граница области течения разбивается на участки. Каждый участок аппроксимируется отрезком, длина которого не превышает некоторого параметра d разбиения.

2. Для концов всех отрезков разбиения границы определяются граничные давления по формуле (1) с учетом коэффициентов k_0 и k_H . В качестве параметра b берется средняя ширина полости — среднее арифметическое ширины во всех точках разбиения границы этой полости.

3. Набор точек (рис. 2) выбирают так, чтобы в окрестности

каждой из них проходила линия ϵ раздела течения, причем величину приближения точек к линии ϵ раздела можно регулировать, а линия раздела должна полностью лежать в окрестностях выбранных точек. Сначала область течения разбивается на небольшое число квадратных ячеек (порядка $100 \div 200$). Для каждой ячейки определяется, проходит ли линия раздела через окружность, описанную вокруг данной квадратной ячейки. Определяется это перебором по всем отрезкам из границы значений $(r^* + b^*)$, где r^* — расстояние от центра рассматриваемой квадратной ячейки до перебираемого отрезка границы; b^* — высота борта в одной из точек перебираемого отрезка границы. Линия раздела будет проходить через описанную вокруг квадратной ячейки окружность, если существуют хотя бы два отрезка, для которых значение $(r^* + b^*)$ лежит в $D\sqrt{2}$ -окрестности от минимального значения $(r^* + b^*)$, где D — длина стороны квадратной ячейки. Каждая ячейка, удовлетворяющая данному условию, делится двумя перпендикулярными линиями на четыре равные части и для каждой полученной четверти проводится аналогичная процедура. Деление квадратов продолжается до тех пор, пока длина стороны квадра-

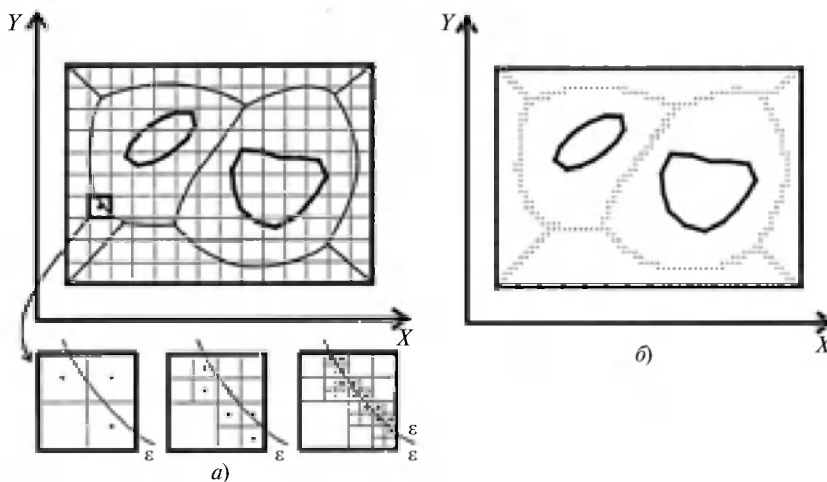


Рис. 2. Схемы определения линий раздела течения металла действительные (а) и рассчитанные компьютером на одном из приближений (б)

та превышает величину $\varepsilon\sqrt{2}$. Центры окончательных квадратов и будут искомым набором точек.

4. Для определения скорости течения слоя в произвольной точке ищем такую линию течения, расстояние до которой от точки минимально (рис. 3). Например, ближайшая к точке O линия течения — отрезок MK (M — точка, в ε -окрестности которой проходит линия раздела, K — точка на границе полости). Спроецируем точку O на этот отрезок и получим точку O_1 ,

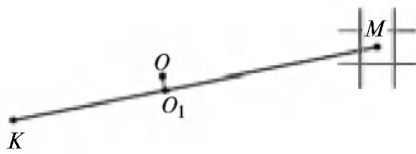


Рис. 3. Схема определения скорости течения металла

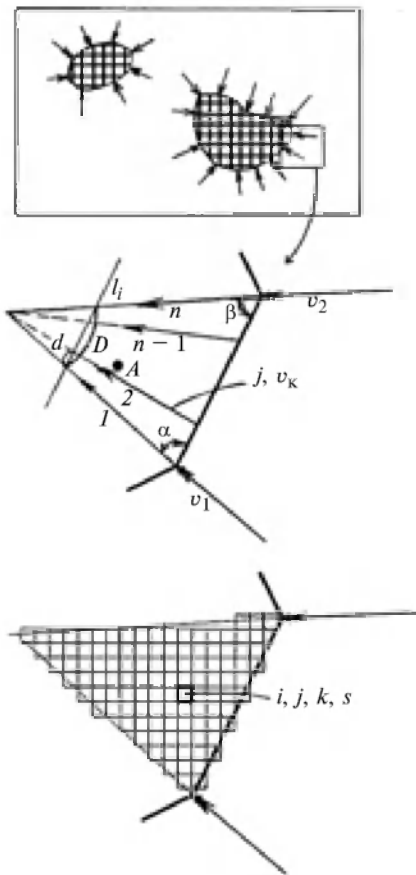


Рис. 4. Схемы заполнения и разбиения сектора полости (вид в плане)

скорость течения в которой $v_{O_1} = \frac{v}{2h} MO_1$. Скорость течения в точке O можно считать приближенно равной скорости течения в точке O_1 .

5. Каждому сегменту границы области течения сопоставляется сектор полости, в которую через данный сегмент вытечет металл. Сектор ограничен сегментами границы полости и биссектрисами углов между рассматриваемым сегментом и соседними сегментами границы полости.

В секторе определяются n линий течения ($n \geq 2$), которые внутри полости направлены так, чтобы для каждой линии уровня l_i сохранялось соотношение $d/D = 1/(n-1)$ (рис. 4).

В узлах рассматриваемого сегмента границы полости определяются скоростями v_1 и v_2 течения металла. В основании k -й линии течения скорость $v_k = v_1 + \frac{k-1}{n-1}(v_2 - v_1)$. Кроме скорости v_k для k -й линии течения учитывается номер j сектора (сегмента, на который сектор опирается), так как в процессе пошаговой осадки скорости течения изменяются. Считаем, что произвольная точка A сектора лежит на определенной линии течения, если расстояние до этой линии минимально. Тогда данную точку можно спроецировать на линию течения.

Вся область течения разбивается на маленькие квадратные элементы. Элементам, центры которых лежат внутри сектора, сопоставляются линии течения в нем. Каждому такому элементу (см. рис. 4) соответствуют номер i полости, номер j сектора, номер k линии течения и расстояние s от проекции центра элемента на соответствующую линию течения до ее основания.

На каждом шаге осадки рассчитываются приращения высоты ребра $\Delta h_{\Sigma} = \Delta h + \Delta h_v$, где Δh —

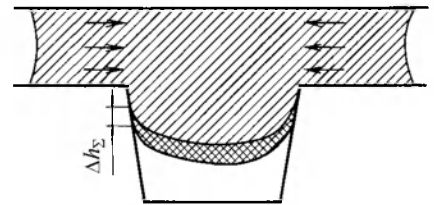


Рис. 5. Схема заполнения полости штампа металлом

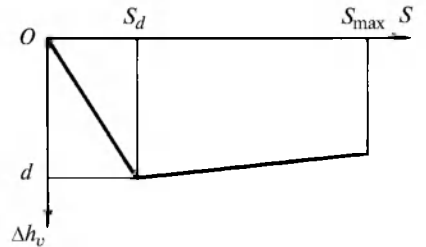


Рис. 6. Диаграмма распределения металла в полости штампа при осадке

шаг осадки; Δh_v — приращение высоты ребра жесткости вследствие поперечного течения слоя металла в полость. Величины Δh_{Σ} прибавляются к высоте ребра жесткости на всех элементах рассматриваемой линии течения (рис. 5). Величины Δh_v вычисляются вдоль линий течения согласно рис. 6, где S_{\max} — расстояние от начала до конца рассматриваемой линии течения. Конец линии лежит или на границе соответствующего сектора, или на пересечении с линией течения другого сектора, если рассчитанная величина Δh_v для точки пересечения на другой линии течения больше величины Δh_v , рассчитанной для рассматриваемой линии течения.

Координаты этой точки $d = \frac{2v_k \Delta t h}{D} a$ и $s_d = D - \frac{d v_k}{2v}$, где D — диаметр полости вдоль рассматриваемой линии течения; Δt — время шага осадки, $a = \frac{2l + v_k \Delta t (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \beta)}{2l - D(\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \beta)}$; l — длина сегмента, на который опирается рассматриваемый сектор; α и β — углы (см. рис. 4).

Приращение высоты ребра составляет $\Delta h_v(s) = d - \frac{v}{v_k}(s - s_d)$ при $s > s_d$.

Далее металл вдоль линий течения перераспределяется таким образом, чтобы разность Δh_v на соседних элементах не превышала расстояния между ними. В точках пересечения разных линий течения образуются разновысотные ребра жесткости. Разность высот сглаживается, и на всех элементах разбиения полости от точки пересечения линий течения к их основаниям происходит перераспределение металла.

Объем металла, распределенный в полости, необходимо скорректировать в соответствии с отношением $\Sigma s_e \Delta h_v / (S \Delta h)$, в числителе которого дается сумма произведений площади квадратных элементов разбиения на приращение высоты ребра в результате поперечного течения, в знаменателе — произведение площади S области вокруг полости, образованной векторами $v_i \Delta t$, где v_i — скорости течения в узлах границы полости; Δt — время шага осадки. После этого все приращения Δh_v на элементах разби-

ния делятся на найденное отношение.

6. Этапы 2—6 повторяются до тех пор, пока не будет достигнута заданная (конечная) толщина h_k слоя.

Оценка методики

Результаты работы программы представлены на рис. 7: промежуточные этапы формообразования двух центральных ребер (см. рис. 7, а) и верхнего контурного ребра, которое заполняется по длине неравномерно (см. рис. 7, б). Если некоторые полости под ребрами жесткости заполнятся раньше остальных, то при дальнейшем сжатии металл будет протекать над уже заполненными полостями. В этом случае возможно образование дефектов типа "прострел", для устранения которых используют специальные дополнительные выступы или полости, способствующие более равномерному формообразованию ребер жесткости.

Разработанная компьютерная система позволяет рассчитать необходимое усилие штамповки, анализировать процесс формообразования рельефа поковки и ее

ребер жесткости, прогнозировать возможное образование дефектов и оптимизировать гравюру штампов для бездефектного ее заполнения.

Для качественной экспериментальной проверки системы были выполнены расчеты и проведено сравнение с реальной штамповкой изделия, формоизменение которого приведено в работе [5]. Расчеты показали, что при экспериментальной штамповке центральный выступ и контурные ребра недооформились из-за нехватки материала.

Перспективы экспресс-системы

Компьютерная методика позволила провести расчеты значительно быстрее, чем при использовании программ, основанных, например, на конечно-элементных методах. Хотя результаты, полученные с помощью данной программы, являются приближенными, их можно использовать для экспресс-оценок параметров исследуемого процесса и выявления возможных дефектов, вызванных неравномерным заполнением полостей штампа, а также способов их устранения. На точность результата оказывают влияние неравномерное распределение металла внутри полости, погрешности, вызванные принятыми гипотезами, и интенсивный теплообмен между слоем и инструментом.

Штамповка тонкостенных изделий характеризуется большими контактными давлениями, следовательно, для повышения точности расчетов следует учитывать упругие деформации инструмента. Эти и другие вопросы, связанные с моделированием течения тонкого слоя, рассмотрены, например, в работах [6—8].

Для реализации точной штамповки актуальна задача нахождения такой исходной формы инструмента, которая позволяла бы

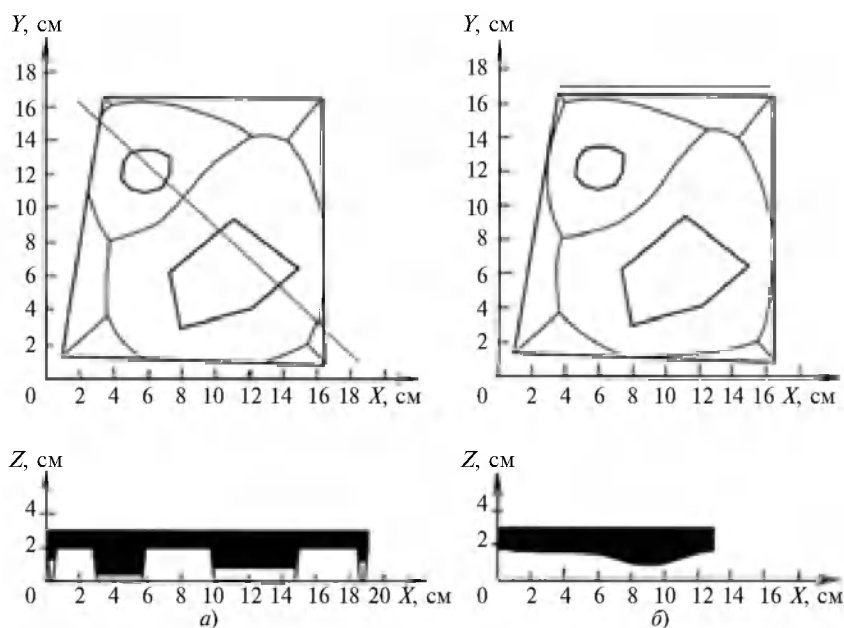


Рис. 7. Этапы формообразования ребер

получать изделия заданной формы с наименьшей погрешностью. При подобных расчетах противогнуща на гравюре штампов следует учитывать изменение эпюры давлений вследствие неравномерности толщины деформируемого слоя.

В настоящее время проводится усовершенствование экспертной системы, основанной на вышеизложенных положениях, что позволит сделать экспресс-прогноз формоизменения длинномерных изделий и оптимизации технологии их изготовления вследствие улучшения геометрических и энергосиловых параметров штамповки. Основные преимущества этой системы — скорость работы, универсальность (подходит для любого числа и любых форм полостей), наглядный интерфейс.

Таким образом, реализован алгоритм построения линий раздела течения металла при разных граничных условиях. Алгоритм

разработан на основе рекурсивного разбиения очага деформации на части с последующим уточнением координат линии раздела течения.

Рассмотрен кинематический случай, когда вытекающий через контур металл изменяет граничные условия и, следовательно, линию раздела течения.

Разработанная методика позволяет прогнозировать образование дефектов и обоснованно выбирать размеры и форму технологических конструктивных элементов, предотвращающих их появление.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Чумаченко Е. Н., Смирнов О. М., Цепин М. А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 320 с.
2. Чумаченко Е. Н., Логашина И. В. Математическое моделирование и оптимизация процессов деформирования материалов при обработке давлением, М.: ЭКОМЕТ, 2008. 400 с.

3. Ильющин А. А. Вопросы теории течения пластического вещества по поверхностям // Прикладная математика и механика. 1954. Т. XVIII. Вып. 3. С. 265—288.

4. Ильющин А. А. Полная пластичность в процессах течения между жесткими поверхностями, аналогия с песчаной насыпью и некоторые приложения // Прикладная математика и механика. 1955. Т. XIX. Вып. 6. С. 693—713.

5. Соломонов К. Н., Свирин В. В., Фролов А. И. Использование САПР для решения прикладных задач // САПР и графика. 2011. № 2. С. 88—90.

6. Кийко И. А. Течение тонкого слоя пластического материала по упруго-деформируемым поверхностям / Инженерный журнал. 1965. Т. 5. Вып. 2. С. 372—375.

7. Кийко И. А. Течение между параллельными плоскостями пластически анизотропного слоя в области, имеющей сток // Вестник московского университета. Сер. 1. Математика и механика. 2013. № 3. С. 35—38.

8. Кийко И. А. О форме пластического слоя, сжимаемого параллельными плоскостями // Прикладная математика и механика. 2011. Т. 75. № 1. С. 15—26.

Вниманию авторов

Не допускается предлагать к публикации уже опубликованные или намеченные к публикации в других журналах материалы.

Статьи в редакцию можно присылать на e-mail: vestmash@mashin.ru. В случае пересылки статьи почтой, кроме текста, напечатанного на белой бумаге формата А4 на одной стороне листа через 1,5—2 интервала 14-м кеглем, необходимо прикладывать электронную версию (шрифт Times New Roman в Microsoft Word, 14-й кегль, расстояние между строк 1,5).

К статье прилагаются:

1) акт экспертной комиссии, подтверждающий, что статья не содержит материалов, входящих в перечень сведений, отнесенных к государственной тайне Указом Президента РФ № 1203 от 30.11.1995, и может быть опубликована в открытой печати;

2) аннотация (1—3 предложения) и ключевые слова;

3) сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, адрес, e-mail, телефон).

Объем статьи не должен превышать 20 страниц (с рисунками и таблицами). Все страницы должны быть пронумерованы. Рисунки и таблицы давать после текста.

Представляя статью в редакцию для публикации, авторы выражают согласие с тем, что:

1) статья может быть переведена и опубликована на английском языке;

2) после публикации в журнале материал может быть размещен в Интернете;

3) авторский гонорар за публикацию статьи не выплачивается.

Редакция оставляет за собой право сообщать автору о результатах рецензирования без предоставления рецензии.

Представленные в редакцию материалы обратно не высылаются.

Минимальный срок публикации — 4 месяца со дня предоставления рукописи в редакцию при соблюдении всех изложенных выше требований (обусловлен технологическим процессом).