

УДК 621.73

**В.В. Свирич, К.Н. Соломонов, Л.О. Мокрецова**

**ВОЗМОЖНОСТИ РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ СРЕДСТВАМИ САД-СИСТЕМ НА БАЗЕ  
PLM-ПРИЛОЖЕНИЙ**

*Проектирование заготовки и штампа на основе поверхностей одинакового ската позволяет управлять процессом и анализировать формообразование, тем самым в значительной мере сокращая временные и материальные затраты. Проблема проектирования деталей, получаемых в кузнечно-штамповочном производстве, состоит в быстром анализе возможности получения поковки, решение которой с помощью анализа кинематической схемы течения металла рассматривается в настоящей статье.*

*Системы автоматизированного проектирования; ковка; штамповка.*

**V.V. Svirin, K.N. Solomonov, L.O. Mokrecova**

**POSSIBLE SOLUTIONS METAL FORMING BY MEANS OF CAD-SYSTEMS  
BASED ON PLM-APPLICATIONS**

*Design and preparation of the stamp on the surfaces of the same slope can manage and analyze the forming, thereby greatly reducing the time and material costs. Problems of design details, resulting in the forging and stamping production space, is the rapid analysis of opportunities for forging, a solution to the Torah, through an analysis of the kinematic scheme of material flow, is considered in this article. Computer-aided design and product lifecycle management; forging; stamping.*

*Computer-aided design; forging; stamping.*

В настоящее время использование средств информационно-коммуникационных технологий призвано усилить инженерную подготовку в предметных областях, опирающуюся на знание и понимание фундаментальных физических принципов и функционирование технических объектов и процессов. В ряде случаев автоматизация технических процессов создает предпосылки для более глубокого изучения свойств технических объектов на математических моделях путем параметрических исследований и оптимизации.

Так, например, развитие метода конечных элементов, разработка на его основе универсальных программных комплексов, постепенно переходящих в разряд стандартных сертифицированных программных средств, позволяет изменить содержание, методы и формы известных классических инженерных работ, таких как проектирование, анализ, возможность изготовления, расчет и т.д. Вместе с тем, использование различных систем автоматизированного проектирования (САПР или САД) является не только «решателем» задач, но и интеллектуальным своеобразным тренажером, способствующим ускоренному накоплению профессионального опыта. В связи с этим рассматриваемая модернизированная концепция интеграции САД-систем, являющихся в первую очередь программами, относящимися к проектированию, в области обработки металлов давлением, в которых также необходим проектный подход, ставит основной целью усовершенствование механизма взаимодействия между технологическими и проектными подразделениями.

В вопросах обработки металлов давлением существует такое понятие, как закон наименьшего сопротивления, по которому при осадке металлической заготовки на контактной поверхности в горизонтальной плоскости создаётся сопротивление течению металла, разное по величине в различных направлениях, при этом частицы металла всегда перемещаются по кратчайшим путям. Поэтому сопротив-

ление течению частиц будет наименьшим в направлении кратчайшей нормали к периметру сечения (рис. 1).

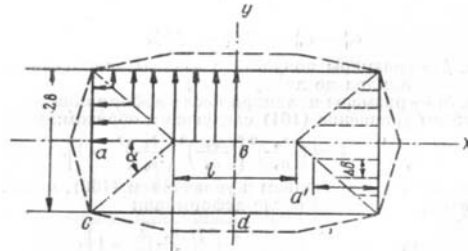


Рис. 1. Кинематическая схема течения металла, в соответствии с законом наименьшего сопротивления

Таким образом, этот закон используется в промышленности при производстве деталей штамповкой или ковкой [1]. Естественным образом возникает вопрос о моделировании этого закона и, как следствие, кинематической схемы течения металла. Обзор способов реализации и моделирования закона наименьшего сопротивления приводит нас к некоторой классификации (рис. 2).



Рис. 2. Способы моделирования закона наименьшего сопротивления в процессах обработки металлов давлением

Причем зачастую трудно отделить один вид моделирования от другого. Так, аналоговое моделирование можно считать разновидностью физического моделирования, а компьютерное моделирование базируется на математических моделях процессов или объектов. В то же время геометрическое моделирование является, строго говоря, частью математического моделирования, но вместе с тем может рассматриваться как самостоятельный вид, поскольку использует мощный аппарат аналитической, дифференциальной и графической (т.е. начертательной) геометрий. Такое разделение геометрий весьма условно и сложилось исторически, в ходе развития математики, и приложений ее к решению практических задач.

Как уже отмечалось, тенденции современного научно-технического прогресса требуют интеграции отдельных наук, в частности, объединения геометрии в единую область знаний, что приводит к необходимости учета этого требования в учебных программах технических вузов.

В последнее время действенным средством решения множества прикладных задач становится графическое компьютерное моделирование, что связано с совершенствованием CAD/CAE-систем, а также повышением возможностей цифровых технологий.

Некоторые из них допускают использование «поверхностных» аналогий, когда распределение какого-либо параметра по площади (или объему) тела представляется в виде поверхности некоторой пространственной эпюры. При моделировании реальных процессов такие поверхности представляют собой весьма сложные геометрические объекты, и изображение их на плоскости встречает существенные затруднения. Вместе с тем, нередко задача состоит не только в том, чтобы показать контуры такой поверхности, но, что гораздо важнее, построить линию пересечения ее отдельных участков.

В процессах обработки давлением тонкого слоя металла пространственную эпюру контактных давлений можно моделировать предельной песчаной насыпью, образованной на пластине, сходной по форме с контуром заготовки. Очевидно, что такая насыпь является поверхностью одинакового ската. Поскольку любой многосвязный контур с достаточной степенью точности можно аппроксимировать отрезками прямых и дугами окружностей, можно считать, что указанная поверхность состоит из плоских и конических участков. Линии их пересечения образуют ребра (так называемые гребни).

Проекция этих ребер на плоскость контакта инструмента и заготовки дают возможность решать некоторые задачи пластического формоизменения материала, а именно: а) фронтальная и профильная проекции позволяют определять объем эпюры контактных давлений, а следовательно, и силы, необходимые для деформирования слоя металла; б) горизонтальная проекция представляет собой линию раздела течения металла (ЛРТМ), которая характеризует распределение потоков металла на контактной поверхности. Очевидно, что ЛРТМ представляет собой эквидистанту, т.е. геометрическое место точек, равноудаленных от контура заготовки [2].

Следовательно, решая графическими методами задачу о построении линии пересечения поверхностей многогранников и тел вращения, можно определить некоторые параметры процессов обработки металлов давлением.

Тогда вернемся к вопросу моделирования кинематической схемы течения металла. Итак, рассматривая методы и способы моделирования, приходим к выводу, что наиболее приемлемым в современных условиях является компьютерное моделирование, причем выявление схемы течения металла на стадии проектирования заготовки весьма облегчило бы временные затраты на исследование формообразования поковки в физическом или виртуальном, на базе CAE, эксперименте. В связи с этим уделим более подробное внимание вопросу моделирования с помощью цифровых технологий.

Использование метода конечных элементов (МКЭ) приводит к вычислению определенных интегралов на отрезках прямых, дуг кривых или в некоторых областях. При интегрировании по области можно использовать интегрирование по каждому ее элементу, тогда для интегралов, упомянутых выше, необходимо использовать эффективные и точные методы численного интегрирования [3].

В качестве прикладного пакета, основанного на МКЭ, американской компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC) разработан специализированный инженерный программный комплекс DEFORM, предназначенный для анализа процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки. DEFORM позволяет проверить, отработать и оптимизировать технологические процессы непосредственно за компьютером, а не в ходе экспериментов на производстве методом проб и ошибок. DEFORM применяется по всему миру как на промышленных предприятиях, так и в научно-исследовательских институтах и технических университетах, является самым распространенным программным комплексом для моделирования процессов обработки металлов давлением, что

позволяет «доверять» данным, полученным в результате использования этого продукта. Кроме того, применительно к ОМД разработана программа QForm 2D/3D, являющаяся инструментом для разработки и оптимизации технологий штамповки. Она позволяет свести к минимуму или полностью исключить пробные штамповки. Прежде всего, программа дает возможность провести детальный анализ течения металла в штампах любой формы и выявить возможные дефекты, связанные с незаполнением гравюры, образованием складок и прострелов.

Помимо DEFORM используются также и иные продукты для решения задач прочности конструкций, термодинамики, механики жидкостей и газов, электромагнетизма и т.д. В качестве примера таких программ можно предложить ANSYS, LS-DYNA, Nastran, Abaqus, T-Flex CAE – программные пакеты конечно-элементного анализа, решающие задачи в различных областях инженерной деятельности, включая связанные междисциплинарные задачи (термопрочность, магнитоупругость и т.п.). Поскольку пакеты конечно-элементного моделирования имеют относительно слабые возможности твердотельного моделирования, необходимо выбрать CAD-систему, совместимую с возможностями CAE-систем. В качестве таких CAD-систем можно рассмотреть T-Flex CAD, КОМПАС, Autodesk AutoCAD Inventor, SolidWorks, pro/ENGINEER и т.д.

Достоинства МКЭ сопровождаются и рядом недостатков. При исследовании той или иной задачи стоит очень внимательно относиться к заданию начальных и граничных условий. Ошибочное или некорректное задание условий не отменит решения задачи, а лишь даст некорректный результат. Построение сетки конечных элементов (СКЭ) требует особого внимания, ввиду того что точность и рациональность СКЭ в значительной мере влияет на точность и достоверность решения, а также время расчета задачи. И в дополнение к выше перечисленному к недостаткам программ, основанных на МКЭ, относится обязательное наличие высокоскоростного компьютера, дорогостоящего программного обеспечения и навыков работы с МКЭ.

Таким образом, анализируя достоинства и недостатки CAE-систем, приходим к выводу, что на стадии проектирования и предварительного анализа заготовки и штампа, зная кинематическую схему течения металла, появляется возможность избежать затрат на достаточно длительный анализ в CAE. Следовательно, возвращаясь к обзору методов моделирования, рассмотрим возможности CAD-систем применимо к моделированию поверхностей одинакового ската.

Как уже отмечалось, альтернативой аналогового моделирования является моделирование в САПР, которое также связано с рядом сложностей. Например, получение поверхности одинакового ската в САПР КОМПАС в некоторых случаях невозможно из-за пересечения направляющих (рис. 3,а).

Однако не все САПР сталкиваются с такой проблемой. Получение поверхности одинакового ската в SolidWorks значительно легче, так как конфликт с пересечением направляющих решен (рис. 3,б,в).

Можно также добавить, что получение проекции линий раздела на плоскость также не представляет затруднений. Таким образом, моделирование поверхностей одинакового ската и, как следствие, получение эпюры контактных давлений в SolidWorks достаточно удобно. Отметим также, что система SolidWorks обладает свойствами экспорта данных в CAE-системы для последующего более детального исследования. В некоторых случаях, особенно на стадии проектирования и предварительного анализа, возможности получения поковки можно расширить и сократить временные затраты средствами моделирования поверхности одинакового ската, которые составляют несколько минут и не предполагают наличия навыков владения CAE-системами.

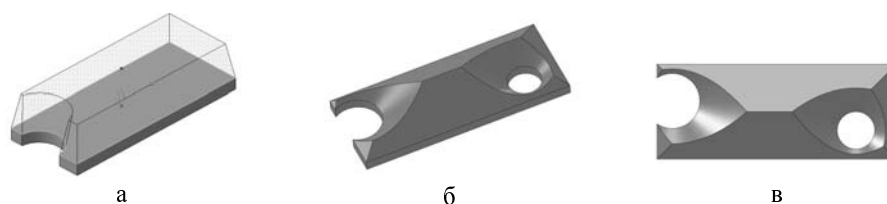


Рис. 3. моделирование поверхности одинакового ската: а – АСКОН КОМПАС; б, в – Solid Works

К преимуществам моделирования кинематической схемы течения металла в САПР можно отнести возможность создания параметрических заготовок. При таком подходе появляется возможность создания пользовательских библиотек заготовок, возможность управления геометрией из внешнего файла, например EXCEL, и управление изменением линий раздела течения металла средствами дополнительных геометрических элементов, например технологических углублений.

Управление формообразованием с помощью дополнительной обработки заготовки, а именно введением технологических углублений, является весьма удобным способом устранения некоторых дефектов, связанных с течением металла. Непосредственно сами возможности управления формообразованием в этой статье не рассматриваются, отметим лишь возможность влияния на схему течения в процессе проектирования (рис. 4).

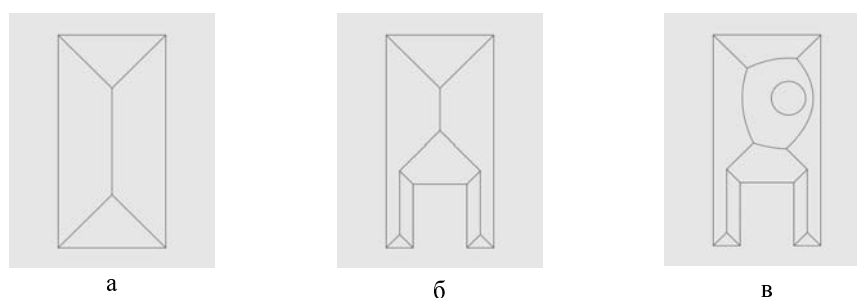


Рис. 4. Линии раздела течения металла для прямоугольной пластины:  
а – пластина без выреза; б – пластина с одним технологическим вырезом;  
в – пластина с двумя технологическими вырезами

Управление формообразованием на основе технологических углублений представляет собой смещение или изменение линий раздела. Тогда различные предварительные вырезы в значительной мере видоизменяют линии раздела и, следовательно, линии тока, являющиеся направляющими для течения частиц металла (рис. 4,в).

Таким образом, возможность управления кинематической схемой на основе технологических углублений на стадии проектирования является весьма удобной и быстрой. Получение параметрических библиотек поверхностей в значительной мере сокращает время на анализ заготовок в отношении проектирования технологической цепочки производства поковок и, как следствие, сокращаются материальные и временные затраты. Выбор конкретного вида САПР для проектирования или анализа в значительной мере зависит от возможностей предприятия, но с учетом современной тенденции развития САПРов есть возможность их заменяемости и экспорта или импорта с учетом применимости к различной геометрии исследуемых поверхностей.

Вообще говоря, вопросам геометрического моделирования на основе САПР уделяется достаточно много внимания и, следовательно, геометрия как наука во всех ее проявлениях стремится к интеграции в различные области прикладных наук, в том числе и металлургии. В последнее время появляется много систем различного анализа геометрии какой-либо детали на стадии проектирования, причем в большей степени основанных на методе конечных элементов, который получил весьма широкое распространение и успел завоевать доверие. Метод конечных элементов не является идеальным и нуждается в совершенствовании. Одним из его недостатков является сложность овладения тонкостями и нюансами предварительного задания условий какого-либо процесса, в то время как знание основных принципов и свойств геометрических объектов, например поверхностей одинакового ската, устраняет необходимость усложнения процесса проектирования и, как следствие, ведет к повышению производительности труда.

В заключение отметим возможность интеграции проектных подразделений и технологических, в частности кузнечно-штамповочного производства. В этой связи целесообразно использовать PLM (Product Lifecycle Management)-приложение – технология управления жизненным циклом изделий (рис. 5) – или аналогичные системы управления базами данных (СУБД).

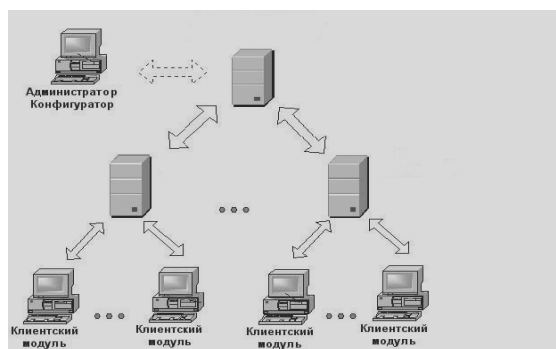


Рис. 5. Структура управления документооборотом на базе PLM

Таким образом, механизм проектирования изделия становится более технологичным. Проектирование заготовки и штампа на основе поверхностей одинакового ската позволяет управлять процессом и анализировать формообразование, тем самым в значительной мере сокращая временные и материальные затраты. Обмен данными с помощью PLM-приложения, между проектным и технологическим отделами позволяет учесть некоторые особенности процессов ОМД, а также отслеживать изменения, вносимые в уже действующие проекты. Говоря о современных тенденциях развития цифровых технологий, использование структуры обмена данными на основе PLM дает возможность перейти на безбумажные технологии и реализовать такие немаловажные аспекты, как цифровая подпись, история создания проекта и электронная библиотека. Причем, важно отметить, что такой подход весьма удобен не только на вполне конкретных больших и малых предприятиях, но и в рамках университета. В этой связи обмен данными осуществляется между соответствующими кафедрами, а проекты, выполняемые студентами на кафедре инженерной графики, могут быть проанализированы на кафедрах сопротивления материалов, обработки металлов, материаловедения и т.д. Тем самым инженерная подготовка студентов будет более соответствовать реальным производствам и повысит квалификацию и конкурентоспособность студентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Губкин С.И.* Пластическая деформация металлов. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 375 с.
2. *Соломонов К.Н., Костарев И.В., Абашкин В.П.* Моделирование процессов объёмной штамповки иковки плоских заготовок. – М.: Издательский дом МИСиС, 2008. – 128 с.
3. *Чумаченко Е.Н., Полякова Т.В., Аксенов С.А., Бобер С.А., Логашина И.В., Корзо В.Н., Ерохина О.С.* Математическое моделирование в нелинейной механике (обзор программных комплексов для решения задач моделирования сложных систем). – М.: ИКИ РАН, 2009. – 42 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.Н. Морозов.

**Свирин Виктор Витальевич**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

E-mail: svirinv@misis.ru.

119049, г. Москва, Ленинский пр., 4.

Тел.: +79163392594.

Старший преподаватель.

**Мокрецова Людмила Олеговна**

E-mail: mok@misis.ru.

Тел.: +79165065359.

К.т.н.; доцент.

**Соломонов Константин Николаевич**

Московский государственный университет путей сообщения (Воронежский филиал).

E-mail: konssol@list.ru.

394026, г. Воронеж, ул. Урицкого, 75А.

Тел.: 84732705089.

Д.т.н.; профессор.

**Svirin Viktor Vital'evich**

National University of Science and Technology «MISIS».

E-mail: svirinv@misis.ru.

4, Leninsky Prospect, Moscow, 119049, Russia.

Phone: +79163392594.

Senior Lecturer.

**Mokrecova Lyudmila Olegovna**

E-mail: mok@misis.ru.

Тел.: +79165065359.

Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

**Solomonov Konstantin Nikolaevich**

The Moscow State University of Means of Communication (the Voronezh branch).

E-mail: konssol@list.ru.

75A, Uritskogo Street, Voronezh, 394026, Russia.

Phone: +74732705089.

Dr. of Eng. Sc.; Professor.