



# Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением

О.Г. Оспенникова  
*кандидат технических наук*

М.В. Бубнов

Д.В. Капитаненко

Июнь 2012

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более, чем в 30-ти научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4-х филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках Международных салонов в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат Государственных премий СССР и РФ, академик РАН Е.Н.Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в юбилейном научно-техническом сборнике «80 лет. Авиационные материалы и технологии» (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»).

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

## **Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением**

О.Г. Оспенникова, М.В. Бубнов, Д.В. Капитаненко

*Всероссийский институт авиационных материалов.*

Моделированием, как правило, называется представление объекта в некоторой форме, отличной от его реальных параметров. Применение моделирования позволяет понять, как устроен реальный объект, какова его структура, основные свойства, законы развития и взаимодействия с окружающим миром, научиться управлять объектом (или процессом), определять оптимальные способы управления им при заданных целях и критериях, а также прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации заданных способов и форм воздействия на объект.

В процессе моделирования модель может быть представлена как копия объекта, выполненная из другого материала, в другом масштабе или с отсутствием некоторых деталей, а также выражена в абстрактной форме (математическая модель). Математическая модель выражает существенные черты объекта или процесса языком уравнений и других математических средств.

Для математического моделирования процесса штамповки изделий сложной формы необходимо учитывать его основные особенности:

- нестационарность поля скоростей течения металла на протяжении всего процесса (от начала деформирования исходной заготовки до получения готового изделия);

- нестационарность температурного поля;

- переменный характер кинематических, силовых и температурных граничных условий для краевых задач определения соответствующих величин.

Необходимо также учитывать максимально полный перечень факторов, определяющих получение регламентированной структуры и точность прогнозирования неразрушаемости заготовки в заданных деформационных условиях.

Успехи в развитии численных методов и наличие современной вычислительной техники дают возможность строить математические модели, которые позволяют на основе оптимально выбранной совокупности экспериментальных данных достаточно полно описать процессы формоизменения, протекающие при штамповке.

Процесс формоизменения при штамповке разбивается на ряд последовательных во времени стадий. В первом приближении можно считать продолжительность стадий одинаковой и проводить «разбивку» процесса, исходя из заполнения на каждой стадии определенной полости штампа. При этом окончательным критерием является наименьшее изменение поля скоростей деформации внутри стадии.

Величины, характеризующие процесс, рассчитываются постадийно, с учетом совокупности условий, переходящих от стадии к стадии. Каждая из них характеризуется совокупностью своих кинематических, динамических и температурных граничных условий. Конечные значения ряда величин (например: температуры, накопленной степени деформации сдвига), полученные на каждой стадии, используются как начальные при расчете процесса на следующей стадии.

Методика расчета процессов внутри каждой стадии, согласно работе [1], включает:

- отображение области течения на каноническую область с использованием аппарата теории аналитических функций;
- решение температурной задачи, построение полей скоростей и скоростей деформаций, вычисление распределения накопленной степени деформации в канонической области;
- перенос и фиксирование результатов решения в исходной области.

Математическая модель процессов штамповки включает:

- построение конформного отображения области течения на каноническую область (прямоугольник);
- нахождение полей скоростей, скоростей деформации и напряжений;
- определение температурных полей;
- расчет накопленной степени деформации и оценки степени использования ресурса пластичности материала.

Для определения конфигурации области пластического течения на разных стадиях процесса предложена достаточно простая экспериментальная методика. Разработанные в настоящее время математические модели включают конформное отображение области формоизменения, которое осуществляется с помощью метода конечных элементов [2]. Температурная задача решается локально-одномерной схемой с возможностью точечного задания типа граничного условия. Модули построения поля скоростей в канонической области реализованы на базе метода конечных элементов и обеспечивают возможность работы как со сжимаемыми, так и несжимаемыми средами. Предусмотрен обширный набор модулей, облегчающих подготовку исходных данных и обеспечивающих удобство и наглядность представления выходных данных расчета по модели.

Объемная штамповка при массовом производстве обеспечивает высокое качество изделий и экономию металла. Однако с усложнением формы поковок значительно увеличиваются затраты и время, необходимые для разработки технологии и проектирования штампового инструмента. Это связано с тем, что течение металла в штампах сложной конфигурации является нелинейным процессом, который не поддается описанию простыми формулами расчета требуемых усилий, характера течения металла, напряжений и деформации как в заготовке, так и в штампах. Неизбежные технологические ошибки (незаполнение штампов, складки, возможное разрушение штампов) до недавнего времени устранялись в ходе «доводки» технологии непосредственно в процессе производства на серийном

оборудовании, что приводило к большим материальным затратам и потере времени. Применение программы моделирования [3] позволяет проводить оптимизацию технологии объемной штамповки на компьютере. Однако нелинейность задачи требует применения сложного математического аппарата. В настоящее время для моделирования различных процессов обработки давлением широко применяются математические модели, основанные на методах конечных и граничных элементов, в которых учитываются нелинейности (нелинейные свойства материала и граничные условия).

Основы математического моделирования методом конечных элементов процессов обработки металлов давлением с использованием теории течения были заложены профессором Г.Я. Гуном и его сотрудниками в работах, выполненных в 70-80 годах в МИСиС. Эти работы стали основой для разработки компьютерных программ моделирования.

За последние десять лет программы для моделирования претерпели качественные изменения. В середине 90-х годов точность результатов, получаемых конечно-элементным моделированием процессов течения металла при холодной и горячей объемной штамповке, достигла уровня, приемлемого для начала их промышленного применения. В настоящее время конечно-элементные программы моделирования процессов объемной штамповки стали повседневным инструментом для оптимизации серийных и разработки новых технологий [4].

Основные требования, предъявляемые к современным программам моделирования процессов объемной штамповки, которые обеспечивают повышение выхода годного при штамповке и коэффициента использования материала, экономию электроэнергии и времени на разработку и оптимизацию технологии, можно сформулировать следующим образом:

-максимальная автоматизация процессов моделирования для оперативного решения технологических проблем, возникающих в производстве;

-графический интерфейс программы должен быть доступен и понятен пользователю любого уровня компетенции;

-минимальное влияние человеческого фактора на точность получаемых результатов;

-самые сложные конфигурации технологических инструментов должны легко импортироваться из большинства САД систем.

Компьютерное моделирование позволяет проводить анализ технологического процесса штамповки на этапе ее разработки и вносить необходимые корректировки для достижения требуемого качества заготовок. Моделирование помогает определить оптимальную предварительную форму поковки при многопереходной технологии с целью минимизации усилий и повышения стойкости штампов, оптимизировать количество переходов.

Адаптация программ компьютерного моделирования процессов обработки давлением к серийному производству позволяет посредством предварительного моделирования технологической цепочки определить, на каком оборудовании необходимо изготавливать заготовку, ее оптимальную форму и массу, количество переходов по всем операциям технологического процесса - для достоверной оценки трудоемкости и стоимости изготовления заготовки. Программа также позволяет оценить производительность процесса и стойкость инструмента, что обеспечивает обоснованную оценку себестоимости производства.

С 2004 года в ВИАМ применяется программа QForm-2D, а впоследствии и QForm-3D - для компьютерного моделирования процессов обработки давлением. Применение программы обеспечило успешное проведение исследований по оптимизации методом компьютерного моделирования процесса осадки и штамповки с расчетом полей физических величин по программе QForm-2D [5]. В результате проведенных исследований разработана технология изготовления штамповки из труднодеформируемого высокожаропрочного сплава ЭП975-ИД и показано соответствие результатов компьютерного моделирования реальному процессу штамповки [6]. Также



оптимизированы и разработаны новые технологические процессы изготовления штамповок дисков из серийных сплавов ЭП742, ЭК151, ЭП975 и разработанного сплава ВЖ175 на изотермических прессах в условиях ВИАМ. Для предприятий авиационной промышленности, например ОАО «СМК», разработана и оптимизирована методом компьютерного моделирования по программе QForm-3D технология изготовления методом прямой осадки в промышленных условиях штамповок дисков  $\varnothing 320$  мм из слитков ВДП сплава ВЖ175. Параметрами оптимизации являлись температура нагрева штампов, скорость деформирования, изменение температуры заготовки в процессе подстывания при заданной температуре нагрева и деформации в оптимальном температурном интервале, усилие деформации. Программа QForm позволяет моделировать весь технологический процесс получения изделий, включая подготовительные и промежуточные операции: нагрев, охлаждение, обрезку облоя, пробивку отверстий и собственно деформацию в несколько переходов.

В случае выявления в процессе моделирования каких-либо дефектов, например незаполнения штампа, можно внести изменения в форму заготовки и повторить расчет, создав в рамках проекта новый вариант. При этом нет необходимости задавать все исходные данные заново  $\square$  они автоматически переносятся из исходного варианта, за исключением тех, что претерпели изменения. Такая организация базы данных значительно ускоряет работу. Полностью автоматизированный конечно-элементный генератор, применяемый QForm, обеспечивает точное моделирование складок на поверхности заготовки, возникающих в момент формирования зажимов. Положение складок идентифицируется специальной поверхностью. Моделирование деформации заготовки не прекращается после образования складки, а продолжается до конца формоизменения. Заготовка со складкой может быть передана в следующий переход. На конечной стадии деформирования размер и положение складок, полученных при моделировании, полностью соответствуют их фактическому положению в

поковке. Помимо складок, зажимов, утяжин, программа помогает идентифицировать такой тип дефектов при штамповке, как прострел. Прострел формируется в заготовке при продавливании металла мимо полости (например фланца) после ее заполнения. Прострел внешне выглядит как зажим, но свидетельствует о неправильном течении металла или внутреннем сдвиге, который может достаточно глубоко распространиться в заготовку. Поскольку при простреле отсутствует схлопывание поверхности, программа не может обозначить прострел поверхностью. Для идентификации этого дефекта в программе предусмотрен специальный инструментарий - поверхностные линии. При моделировании трехмерного течения металла зажим может быть идентифицирован при проверке спроектированной технологии. Моделирование при помощи программы QForm позволяет определить не только наличие дефектов течения металла, но и их протяженность, и глубину проникновения.

Программа QForm обеспечивает также расчет напряженно-деформированного состояния инструмента, состоящего из блоков, вставок, контейнеров и бандажей. Моделирование производится для всех составляющих сложного инструмента, которые могут сопрягаться как с зазором, так и с натягом. Пользователь может определить эффективность замены цельного инструмента составным, спроектировать его оптимальную конструкцию, а также, задавая различные материалы для конструктивных элементов составного инструмента или меняя значения натягов и зазоров, установить их оптимальное сочетание.

При проектировании инструмента для штамповки, помимо оптимизации процессов течения металла и конструкции составного инструмента, решается задача определения влияния упругой деформации поверхности инструмента на отклонения геометрических размеров готовой заготовки. В случае значительной упругой деформации могут быть превышены допуски на размеры готовых заготовок.

Применение моделирования на стадии проектирования инструмента позволяет решать следующие технические задачи:

- повышение стойкости инструмента путем оптимизации конструкции составного инструмента, подбора материала для вставок и установления оптимальных натягов и зазоров;
- создание профилированного инструмента для компенсации упругой деформации инструмента в процессе штамповки.

Моделирование может применяться для прогнозирования структуры и свойств заготовок, а также оценки возможного разрушения заготовок в процессе штамповки. По окончании моделирования можно просмотреть распределение различных расчетных полей (температуры, накопленной деформации, сопротивления деформации, среднего напряжения и др.) (рис. 1). Можно также проследить течение металла с помощью лагранжевых линий (рис. 2).

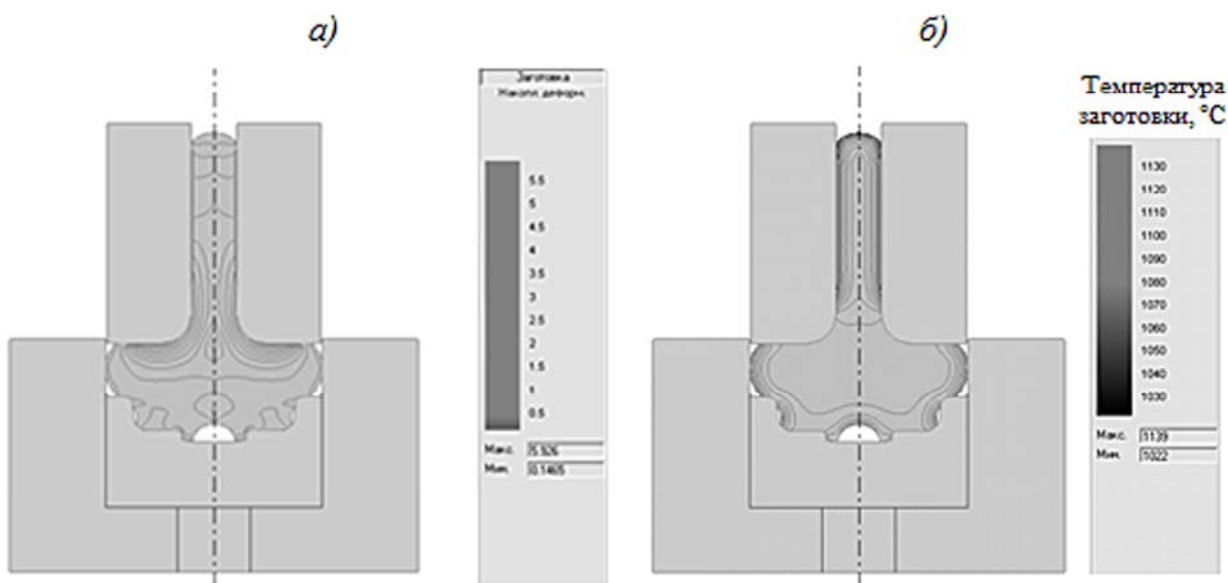


Рисунок 1. Распределение накопленной деформации (а) и температуры (б) в виде изолиний

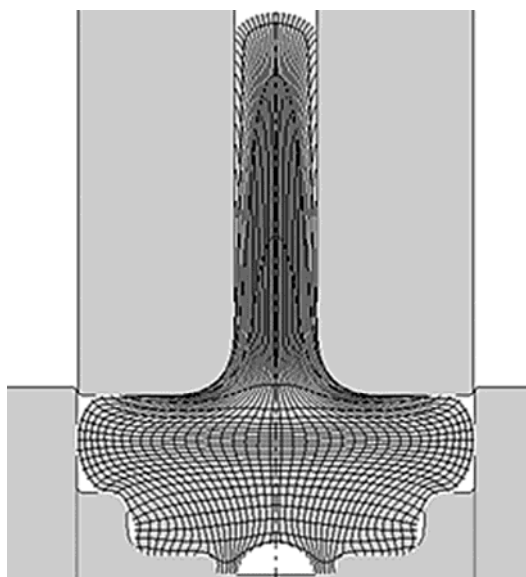


Рисунок 2. Распределение лагранжевых линий в заготовке

В ВИАМ разработана и в совокупности с программой QForm успешно применяется компьютерная программа «Расчет параметров структуры и фазового состава жаропрочных никелевых сплавов для дисков», состоящая из пакета прикладных программ расчета многопараметрических аналитических регрессионных уравнений (моделей) для расчета температуры полного растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, ее количества, температуры солидус и плотности по химическому составу.

Аналитические регрессионные уравнения определены исходя из анализа экспериментальных данных, которые включают более 150 композиций никелевых многокомпонентных гетерофазных сплавов системы Ni-Al-Cr-Mo-W-Co-Nb-Ti-V-C и соответствующих им параметров, определенных эмпирическим путем.

Расчет включает получение значений максимального количества  $\gamma'$ -фазы, температуры начала и полного ее растворения, температуры солидус. Заключительным этапом является определение величин изменений количества  $\gamma'$ -фазы от начала до конца ее полного растворения в графической или табличной форме. Применение расчетных методов позволяет смоделировать и проанализировать процессы обработки металлов давлением, выбрать оптимальные параметры, обеспечивающие проработку структуры

материала при многопереходной технологии для формирования регламентированной структуры и обеспечения требуемых характеристик.

Для практической реализации разработанных технологий в ВИАМ создано опытно-промышленное производство штамповок дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок. Проведена модернизация технологического оборудования, позволяющая осуществлять в автоматическом режиме процессы нагрева и формоизменения заготовки по разработанной компьютерной программе с точным исполнением оптимальных термомеханических параметров деформации.

Изготовление штамповок осуществляется на изотермических прессах усилием 630 и 1600 тс с индукционным нагревом штампов в автоматическом режиме процессов нагрева и формоизменения заготовок по разработанной компьютерной программе с точным исполнением оптимальных термомеханических параметров деформации.

В перспективе планируется в сотрудничестве с РАН и ведущими вузами проведение работ по усовершенствованию методов компьютерного моделирования технологических процессов изготовления заготовок из титановых, жаропрочных никелевых и интерметаллидных, композиционных и естественно-композиционных сплавов с применением нейронных сетей, прогнозирования структуры, комплекса механических и эксплуатационных характеристик деформированных полуфабрикатов.

## Список литературы

1. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия. 1980. 456 с.
2. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука. 1973. 416 с.
3. Стебунов С.А., Биба Н.В. QForm – программа, созданная для технологов //Кузнечно-штамповочное производство. 2004. №9. С. 38-43.
4. Биба Н.В., Лишний А.И., Стебунов С.А. Эффективность применения моделирования для разработки технологии штамповки //Кузнечно-штамповочное производство. 2001. №5. С. 39-44.
5. Бубнов М.В., Скляренко В.Г., Арбина В.П. Разработка усовершенствованной технологии изготовления крупногабаритной штамповки диска ГТУ из сплава ЭИ698-ВД методом компьютерного моделирования по программе QForm-2D /Материалы и технологии для авиационно-космической техники -2005: Тезисы докл. науч.-технич. конф. молодых специалистов и аспирантов отрасли. М.: ВИАМ. 2005. С. 19-20.
6. Некрасов Б.Р., Бубнов М.В., Скляренко В.Г., Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Арбина В.П. Разработка и оптимизация технологии изготовления штамповки диска из сплава ЭП975-ИД с применением компьютерного моделирования /Молодежь в авиационном материаловедении: Тезисы докл. молодежной науч.-технич. конф. М.: ВИАМ. 2008. С. 25.