

## Разработка многокритериальной модели штамповки коробчатых деталей из листа эластичной среды

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Процесс превращения плоской листовой заготовки в полую деталь коробчатой формы (прямоугольную, криволинейную, несимметричную) давлением эластичной среды является сложным и недостаточно изученным. Существуют две основные схемы приложения деформирующих сил к заготовке - когда носителем формы детали является жесткий пуансон, а деформирующее усилие передается со стороны эластичной матрицы; когда носителем формы детали является жесткая матрица, а деформирующее усилие передается со стороны эластичного пуансона. Для получения возможности влияния на уменьшение объемов производственного брака и определения рациональных режимов деформирования заготовки, необходимо наличие количественной оценки технологического процесса по предварительно выбранным технологическим критериям, к которым относят: количество переходов, величины коэффициентов вытяжки, усилия вытяжки, размеры и форму заготовки.

Одними из основных видов производственного брака коробчатых деталей, помимо нарушения сплошности материала, являются отклонения по размерам стенок, фланца и дна детали вследствие неоднородности напряженно-деформированного состояния (НДС) различных ее участков. Повышения точности изготовления можно достичь изменением конструкции детали (в основном применением ребер жесткости и увеличением радиусов закругления), конструкции штампа либо параметров технологического процесса [1]. Последние два аспекта являются наиболее значимыми, поскольку изменение конструкции изделия не всегда возможно. Имея в распоряжении численную модель процесса создания детали с предварительно оговоренной геометрией, способную с достаточной степенью точности прогнозировать поведение заготовки в процессе ее деформирования, можно определить оптимальную с точки зрения качества получаемой детали конструкцию инструмента, а также оптимальные параметры технологического процесса без постановки реального физического эксперимента.

Для достижения *определенной* степени соответствия модельного процесса реальному при прогнозировании поведения деформируемой заготовки (определении НДС в обозначенный момент времени), необходимо на основе априорной информации выделить и адекватно учесть *наиболее значимые* технологические параметры, влияющие на процесс формообразования исходной заготовки (*при необходимости* возможно введение дополнительных параметров, влияние которых на рассматриваемые процессы до этого учитывалось частично, либо не учитывалось вообще), и, далее, провести анализ разрабатываемой модели на качественное и количественное соответствие физической реакции при изменении величин выбранных параметров опытным данным. Такими параметрами могут быть механические свойства материала входящих в систему элементов, силы трения (и вызываемые ими тепловые явления), условия нагружения и др.

Разрабатываемая конечно-элементная (КЭ) модель процесса вытяжки (по одной из вышеприведенных схем деформирования) коробчатой детали из

листовой заготовки эластичной средой будет представлять собой технологическую систему следующего вида: *жесткий носитель формы детали* (в моделируемом процессе жесткий носитель формы фактически представляется лишь в виде геометрического граничного условия, однако, при соответствующем изменении, возможно его полное включение в процесс) – *упругопластическая листовая заготовка – упругий элемент, передающий деформирующее усилие* с соответствующим описанием геометрических границ. Задача решается в трехмерной постановке. Описанные геометрические зоны дискретизированы соответствующими конечными элементами (позволяющими смоделировать утонение и разрыв), плотность которых определяется при верификации задачи. Узлы жесткого носителя формы детали лишены всех степеней свободы. Упругопластическая листовая заготовка свободно оперта на жесткий элемент. Узлы элементных сторон упругого элемента, описывающих боковую поверхность и сторону, противоположную поверхности, контактирующей с заготовкой, лишены возможности периферийного перемещения (моделирование внутренней поверхности контейнера, содержащего передающую среду). Свойства конечных элементов, отражающих физику материала заготовки, эластичной среды, условия контакта и нагружения, описываются на основании априорных технологических параметров, представленных ниже.

*Распределение нормального давления, передаваемого эластичной средой на заготовку.* При проектировании формообразующих операций листовой штамповки эластичными средам обычно принимают допущение о равномерности давления, прилагаемого к заготовке со стороны деформирующей среды [2]. Однако, это допущение приемлемо лишь при штамповке относительно неглубоких деталей при высоких давлениях эластичной среды. В остальных случаях использование этого допущения требует дополнительного экспериментального обоснования. Предложенная в работе [4] экспериментально-расчетная методика определения давления со стороны эластичной среды на поверхность заготовки, основанная на экспериментально установленном распределении деформаций, позволяет определить закон распределения нормального давления непосредственно в процессе формообразования заготовки. В настоящей работе предлагается давление эластичной среды, действующее на заготовку, прикладывать не в виде определенных зависимостей, а непосредственно через соответствующее во времени перемещение (задача решается в квазистатической постановке) узлов конечных элементов эластичного блока, описывающих сторону, противоположную зоне контакта. Для качественного описания поведения эластичного блока на границах раздела сред «эластичный блок» - «контейнер» в качестве граничного условия вводится сила трения, тормозящая радиальное и осевое перемещение материала среды эластичного блока. Учет этих параметров позволит качественно описать двумерную функцию давления, зависящую от времени, и изменение жесткости передающей среды в процессе деформирования.

Анализ напряжений, возникающих в зонах, находящихся на периферии упругого элемента рассматриваемой системы, позволит определить закон распределения и максимальную величину давления, действующего со стороны эластичной среды на контейнер, что в свою очередь позволит сформулировать требования к прочности для этого элемента оснастки.

Верификацию модели, отражающей передачу давления на деформируемую заготовку через промежуточный элемент, предлагается провести на основе

результатов моделирования процесса штамповки тестовой детали, для которой имеются значения передаваемых эластичным элементом давлений.

*Механические свойства материала заготовки* описываются посредством задания кривой течения металла в виде степенного закона упрочнения. Анизотропия механических свойств материала заготовки существенно влияет на технологические режимы вытяжки. Вытяжка коробчатых деталей из анизотропного проката сопровождается образованием фестонов, разнотолщинности стенок изделия, при этом характерна зависимость силовых и деформационных параметров, предельных степеней вытяжки от положения заготовки относительно рабочего контура носителя формы. В силу этих причин при расчете технологических процессов вытяжки коробчатых изделий необходимо учитывать анизотропию исходного листа для определения оптимальных геометрических параметров заготовки и ее ориентации относительно направления осей анизотропии, обеспечивающих получение детали с ровными краями, уменьшающих технологические усилия и увеличивающих степени вытяжки [9]. Верификацию численной модели предлагается провести на вытяжке из анизотропного листа цилиндрического стакана, для которого имеются опытные данные; верификационным критерием будет являться соответствие с заданной допустимой величиной отклонения смоделированных деформаций действительным.

*Учет сил трения.* Возможности использования способности листового материала к пластическим деформациям при формообразовании деталей из листа, качество штампуемых деталей, стойкость инструмента, а также производительность в значительной степени определяются внешним трением между обрабатываемым материалом и инструментом. В зависимости от качества смазки и скорости штамповки (последняя в модели описывается особо) силы трения могут составлять значительную часть величины усилия полезного объемно-пластического деформирования. Поэтому, от качественного описания закона трения (и его параметров) в разрабатываемой модели в значительной мере зависит надежность проектирования всей операции. В расчетах операций холодной листовой штамповки обычно пользуются средним коэффициентом трения в очаге деформации, определяемым как отношение интенсивности сил контактного трения к величине нормального давления. В разрабатываемой модели будет использован закон трения Амонтона - Кулона, уточненный при помощи поправочного коэффициента, величина которого будет определена исходя из анализа теплового эффекта, вызываемого трением.

Тепловые явления, возникающие в процессе соприкосновения элементов рассматриваемой системы, являются следствием влияния скорости на сопротивление деформированию. Температура заготовки, развивающаяся в процессе деформирования, не настолько высока, чтобы привести к устранению возникающего в заготовке упрочнения. Однако она может резко изменить условия работы смазочного слоя, поскольку с изменением температуры изменяется его оптимальная вязкость [2].

Верификация тепловой реакции модели может быть произведена по распределению поля температур полученной детали (имеются опытные данные) исходя из установленной (рассматривается ниже) работы деформирования и известной начальной температуры входящих в систему элементов.

Окончательную верификацию кинематики деформирования предполагается проводить на основе рекомендаций работ [3, 5, 6, 7], где изложены

экспериментально полученные данные по вытяжке из листовых заготовок деталей коробчатой и цилиндрической формы эластичными и жесткими средами.

На базе разрабатываемой численной модели возможно проведение количественной оценки процесса по нижеприведенным технологическим критериям.

*Определение размеров и формы заготовки.* После того, как математическая модель процесса пройдет процесс верификации, можно будет с достаточной степенью точности прогнозировать геометрические и механические изменения, происходящие в деформируемой заготовке. Зная, как именно должна выглядеть окончательная «идеальная» деталь, которая в первом приближении будет получена из листа фактически произвольных (заведомо больших) размеров, можно будет построить траектории движения отдельных точек произвольной заготовки, взятых, однако, с контура «идеальной» детали. Таким образом, имея в распоряжении траектории движения всех (с учетом принятой дискретизации) точек контура детали, можно построить контур заготовки, но уже не с произвольными, а конкретными размерами. Далее, поскольку при переходе от произвольной заготовки к заготовке строго описанной, жесткость системы все же будет нарушена и полного соответствия между «идеальной» деталью и заготовкой, полученной при динамическом разворачивании, не будет, методом последовательных приближений можно будет установить окончательную геометрию заготовки. Полученную таким образом конечную геометрию необходимо будет согласовать с геометрией, рассчитанной по принятым в производственной и научной практике зависимостям [5].

*Определение количества переходов и коэффициентов вытяжки.* Мощным инструментом оценки возможности бездефектного изготовления изделий является использование диаграмм предельной формоустойчивости (ДПФ), отражающих предельные сочетания двух главных логарифмических деформаций, действующих в заготовке. ДПФ для большинства формообразующих операций, реализуемых с применением эластичных сред, представляется в виде диаграммы предельных деформаций (ДПД), определяющей начало локализации пластической деформации. Применение ДПД (в сравнении с коэффициентами вытяжки) позволяет существенно повысить точность прогнозирования появления дефектов, значительно сокращает число отладочных экспериментов. Рассчитав величины критических деформаций в опасном сечении детали и нанеся поле «параметр вида деформированного состояния» - «деформация» на ДПФ, можно оценить возможность реализации проектируемой операции за один переход. Если поле деформаций заготовки располагается ниже ДПФ, то опасность появления брака отсутствует, и процесс может быть осуществлен за один переход. В случае расположения отдельных точек этого поля на предельной кривой, возможно начало локализации пластической деформации. Если фронт деформаций пересекает ДПФ, то при реализации операции возможно появление признаков брака [8].

Имеющиеся для построения ДПФ данные позволят проверить соответствие возможности формообразования детали за один переход для тестового случая. В общем же случае при помощи ДПФ можно будет уточнить технологические зоны первого перехода рассматриваемой операции, получить предельные коэффициенты вытяжки за один переход, определить количество переходов.

*Определение усилия и работы вытяжки.* Усилие вытяжки является величиной переменной во времени. Точное аналитическое количественное и

качественное описание кривой «усилие» - «ход инструмента» сопряжено с трудностями, вызываемыми при определении НДС заготовки на различных временных отрезках. Поскольку усилие напрямую зависит от величины напряжений, действующих в заготовке, для количественной оценки процесса и качественной оценки модели его определение предлагается проводить напрямую по модельным данным. Получив модельную кривую «усилие» - «ход инструмента» можно определить действительную работу вытяжки. Управление величинами усилия и работы вытяжки осуществляется посредством изменения НДС *соответствующих* зон рассматриваемой технологической системы (изменение НДС осуществляется варьированием технологических параметров, начальных и граничных условий *рассматриваемой* зоны).

Разрабатываемая численная модель процесса в рамках оговоренных выше условий позволит осуществить следующее:

*с научной точки зрения* при помощи регрессионного анализа возможно получение строгих зависимостей (а, как следствие, и оптимизации) между геометрическими и технологическими параметрами рассматриваемой технологической системы, взаимное влияние на процесс которых ранее рассматривалось недостаточно, либо не рассматривалось вообще;

*с практической точки зрения* при помощи полученной модели можно будет сформулировать строгие рекомендации к оборудованию, оснастке, технологическим режимам и условиям для рассматриваемого технологического процесса в удобном для производства виде.

### Список литературы

1. Жарков В.А. Повышение точности коробчатых деталей, изготавливаемых вытяжкой листовых материалов // КШП. ОМД. 1991. №7. С.7–11.
2. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машгиз, 1962. – 328 с.
3. Нестеренко А.В., Томилов М.Ф. Расчет кинематики деформирования при вытяжке коробчатых деталей из листа // КШП. ОМД. 1997. №3. С.9–10.
4. Попов С.П., Томилов М.Ф., Шагунов А.В. Определение коэффициента трения и распределения давления при листовой штамповке эластичными средами // КШП. ОМД. 1999. №3. С.13–16.
5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971. – 782 с.
6. Томилов М.Ф., Попов С.П., Томилов Ф.Х. Математическое моделирование операции вытяжки эластичной средой коробчатых деталей из листа // КШП. ОМД. 2002. №7. С.34–38.
7. Томилов М.Ф., Попов С.П., Томилов Ф.Х., Шагунов А.В. Кинематика деформирования и технологические отказы при вытяжке эластичной средой коробчатых деталей // КШП. ОМД. 2001. №5. С.9–11.
8. Томилов М.Ф., Попов С.П., Шагунов А.В., Томилов Ф.Х. Прогнозирование технологических отказов при формообразовании эластичными средами деталей из листа // КШП. ОМД. 2000. №11. С.3–7.
9. Чудин В.Н., Яковлев Б.С. Влияние плоскостной анизотропии на процесс вытяжки коробчатых изделий // КШП. ОМД. 2003. №5. С.8–11.