

ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТРОЙНИКОВ ШТАМПОСВАРНЫХ

К.С. Торгонин, Г.С. Баталов, В.В. Широков, Л.В. Радионова

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Существует несколько основных технологий изготовления тройников. Данные технологии различаются по способу выполнения формоизменяющих операций и применяемому оборудованию. Выбор параметров для каждой технологической операции напрямую определяет качество готовой продукции. При этом расчёт технологических параметров инженерными методами представляется затруднительным. Поэтому целесообразным является применение современных программ для моделирования технологических операций. В работе рассматривается моделирование технологических операций обработки металлов давлением, выполняемых при производстве тройников, в программных комплексах DEFORM-3D и MSC Marc Mentat. Заготовка и инструмент для моделирования технологических операций были созданы в программе SolidWorks. В программных комплексах DEFORM-3D и MSC Marc Mentat были последовательно промоделированы операции частичного охлаждения нагретой заготовки, набора металла в зону отбортовки и операция отбортовки. По результатам моделирования были определены технологические параметры, по которым в дальнейшем была произведена опытная штамповка деталей «тройник». По результатам работы было выполнено сравнение результатов, полученных в программных комплексах и при опытной штамповке. Результаты моделирования в двух программных комплексах DEFORM-3D и Marc Mentat имеют сходимость 99,9 %. Замер параметров готовых изделий показал, что результаты расчета оказались очень близки к результатам опытной штамповки. Сходимость результатов моделирования и опытной штамповки составила 96,5 %. Определены основные факторы, влияющие на сходимость результатов моделирования и опытной штамповки. Полученные тройники признаны годными, полностью удовлетворяющими требованиям технических условий. Таким образом, показано, что применение программных комплексов DEFORM-3D и Marc Mentat на предприятиях, производящих штамповочные детали трубопровода, целесообразно.

Ключевые слова: моделирование, метод конечных элементов, штамповочные детали трубопровода, штамповка, DEFORM, MSC Marc Mentat.

Введение

Применение моделирования методом конечных элементов в металлургии является очень важным и зачастую необходимым этапом подготовки производства, поскольку позволяет прогнозировать возможные трудности при выполнении технологических операций, учитывать влияние множества факторов [1]. Оно способствует экономии денег, требуемых на производство оснастки, пробных партий, и времени, которое было бы потрачено на освоение технологии [2].

Особенно эффективно применение моделирования методом конечных элементов может быть на предприятиях, имеющих широкую номенклатуру выпускаемых деталей, в особенности если эти детали имеют достаточно крупные размеры, вследствие чего достаточно дорого и долго производить опытные партии и

подбирать параметры технологических операций непосредственно в условиях производства.

Моделирование технологических процессов проводилось в программных комплексах DEFORM-3D и MSC Marc Mentat. DEFORM-3D уже хорошо зарекомендовал себя при моделировании процессов обработки металлов давлением, применяемых при производстве тройников штамповочных [3–9, 10].

Целью данной работы является исследование сходимости результатов и возможности использования программных комплексов моделирования методом конечных элементов DEFORM-3D и MSC Marc Mentat в производстве ИСДТ [11, 12] на примере тройников, изготавливаемых по технологии радиального обжима.

В ходе выполнения работы необходимо было решить следующие задачи:

- получение требуемой геометрии в программном комплексе DEFORM-3D и MSC Marc Mentat;

- определение необходимых параметров технологических операций с помощью программного комплекса DEFORM-3D;

- проведение опытной штамповки тройника в соответствии с подобранными параметрами на базе предприятия по производству штампосварных деталей трубопровода ООО «Этерно»;

- сравнение результатов, полученных в результате моделирования в двух программных комплексах и опытной штамповки, оценка достоверности расчетов и возможности применения данных программных комплексов при производстве ШСДТ.

Тройники штампосварные применяются в трубопроводах различного назначения для присоединения к магистральному трубопроводу боковых ответвлений.

Существует множество известных способов изготовления тройников штампосварных. К ним относятся:

- 1) технология отбортовки ответвления из круглой обечайки с помощью специальных приспособлений – штамповка «на брусе»;

- 2) технология отбортовки ответвления с помощью тянущего устройства – штока;

- 3) технология радиального обжима заготовки с последующей отбортовкой ответвления с помощью тянущего устройства – штока;

- 4) технология радиального обжима заготовки с последующей отбортовкой ответвления с неполным циклом;

- 5) технология гидроштамповки.

В данной статье рассмотрена технология радиального обжима заготовки с последующей отбортовкой ответвления с помощью тянущего устройства.

1. Метод

В исследовании были применены современные инженерные программы, основанные на методе конечных элементов. Метод конечных элементов (МКЭ) – это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики, электродинамики и топологической оптимизации. Данный метод, реализуемый в программе DEFORM-3D, доказал свою эффективность при производстве тройников штампосварных.

Технологический процесс изготовления тройников по технологии радиального обжима подробно описан в статье «Моделирование операций обработки давлением при производстве тройников штампосварных» [10].

Данная работа выполнялась применительно к тройнику переходному 720×530 18×12 .

Для моделирования процесса штамповки были созданы 3D-модели штамповой оснастки и инструмента, применяемых в процессе. Для этого был использован программный комплекс САПР SolidWorks 2017 [13]. Модели комплекта матриц и пуансона представлены на рис. 1.

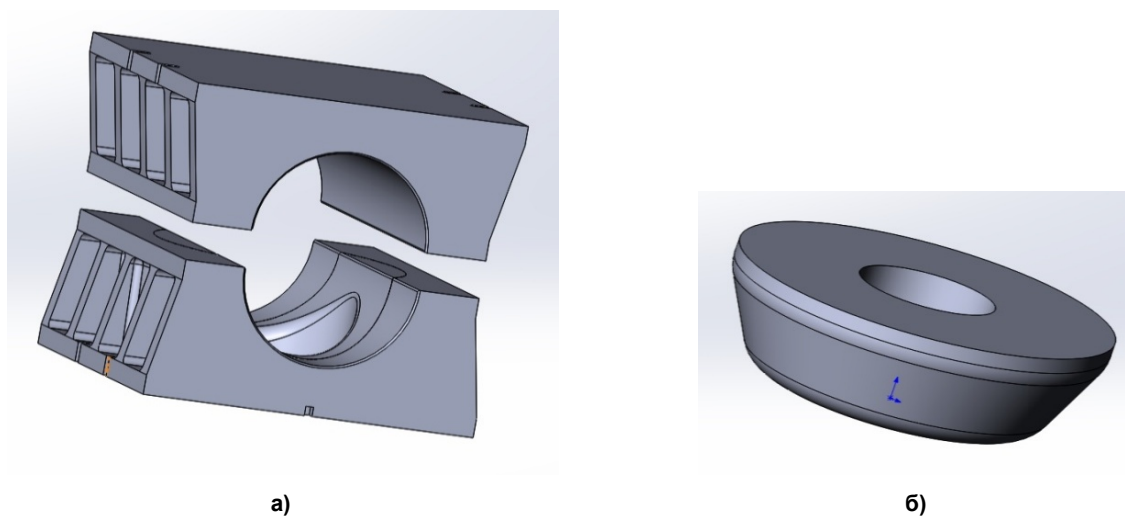


Рис. 1. Модели комплекта матриц (а), пуансона (б)

1.1. Моделирование процесса в программе DEFORM

В первую очередь моделирование осуществлялось в программе DEFORM-3D v.11, решатель – Conjugate gradient, Direct iteration.

Операции вальцовки круглой обечайки являются достаточно простыми. Расчет параметров данных операций представлен в статье «Моделирование операций обработки давлением при производстве штампованных деталей трубопровода» [14].

Для сокращения времени моделирования в качестве исходной была использована заготовка «пластическое тело» в форме овала из стали AISI 1015 [15], толщина стенки заготовки 18 мм. При опытном производстве использовалась заготовка из стали 10Г2ФБЮ. Количество элементов в заготовке – 95 000. Размер элемента 9, коэффициент вариации 1, в зоне заужения размер элемента 5. Трение на контакте с инструментом задавалось как Type: Shear, коэффициент трения 0,3 (для горячей штамповки со смазкой).

Первая операция, моделирование которой было выполнено, – операция частичного охлаждения заготовки.

Заготовку, согласно технологии предприятия, нагревают в печи до температуры 1000 °С. Затем часть нагретой заготовки охлаждают. Это охлаждение способствует лучшему затеканию металла в зону отбортовки. Поскольку транспортировка заготовки из печи до ванны может занять некоторое время, то, чтобы это учесть, при моделировании начальная температура заготовки принималась равной 850 °С. Как правило, высота охлаждения примерно равна 2/3 высоты овализиро-

ванной заготовки. Охлаждение осуществляется путем опускания заготовки в специальную ванну на необходимое расстояние и выдержки в течение определенного времени. При охлаждении параметры теплопередачи задавались следующим образом: коэффициент теплопередачи – 2 [16], температура среды 50 °С. Глубина охлаждения определялась в ходе моделирования и равна 530 мм.

По принятой на предприятии методике ориентировочное время охлаждения рассчитывается как 1 с на 1 мм толщины стенки, поэтому для данной модели с толщиной стенки 18 мм был установлен шаг итерации в 1 с и задано 18 шагов. При выполнении опытной штамповки время охлаждения длилось также 18 с.

Распределение температуры металла по заготовке до и после охлаждения представлено на рис. 2.

Далее следует операция набора металла в зону отбортовки. Данная операция предназначена для набора необходимого объема металла в зону отбортовки для получения необходимой высоты и толщины стенки ответвления после операции отбортовки.

При моделировании скорость движения верхней матрицы задавали равной 10 мм/с, что соответствует средней скорости движения верхней траверсы прессы при рабочем ходе. Устанавливали шаг итерации равным 3 мм, а условием остановки – зазор между матрицами, равный 15 мм.

Так как данная деталь имеет две плоскости симметрии, то для сокращения времени расчёта и уменьшения количества конечных элементов на заготовке моделирование проводилось для четверти детали с условием симметричности.

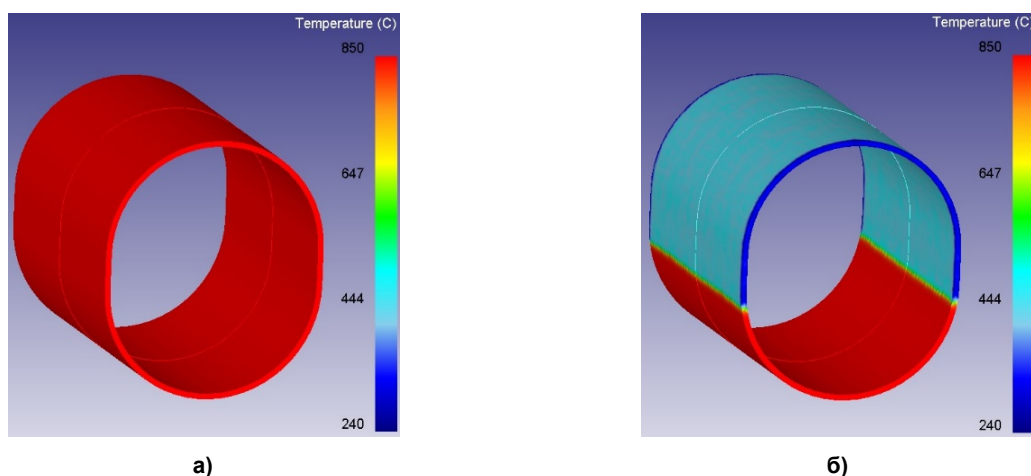


Рис. 2. Операции частичного охлаждения заготовки: а – модель горячей заготовки; б – модель частично охлажденной заготовки

Моделирование операции набора металла в зону отбортовки представлено на рис. 3.

В результате выполнения моделирования операции была получена выпуклость высотой 85 мм.

Перед заключительной операцией ОМД – отбортовкой – необходимо вырезать отверстие в получившейся выпуклости.

Для определения необходимых размеров отверстия при моделировании операции отбортовки ответвления были использованы модели с различными отверстиями, после чего измерялись параметры полученных ответвлений и выбирались наилучшие параметры отверстия.

Перед операцией отбортовки заготовка нагревается в газовой печи до температуры

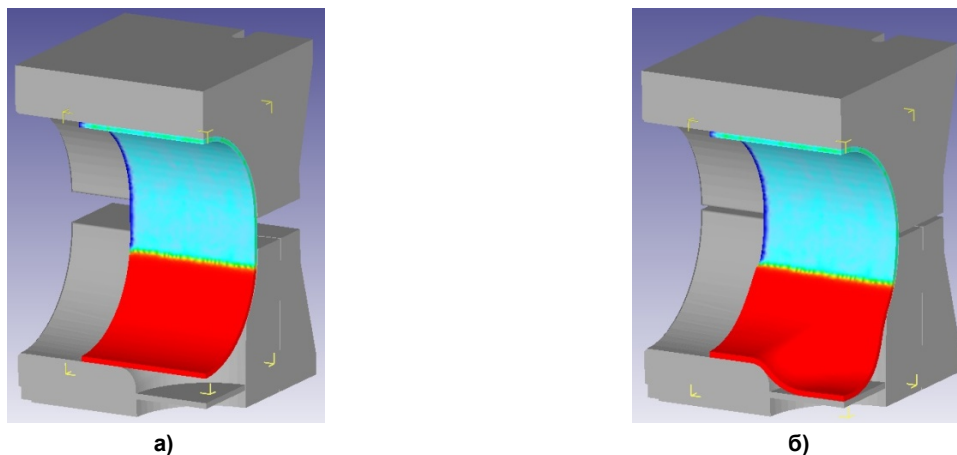


Рис. 3. Операция набора металла в зону отбортовки: а – начальное положение при моделировании операции; б – результат моделирования операции

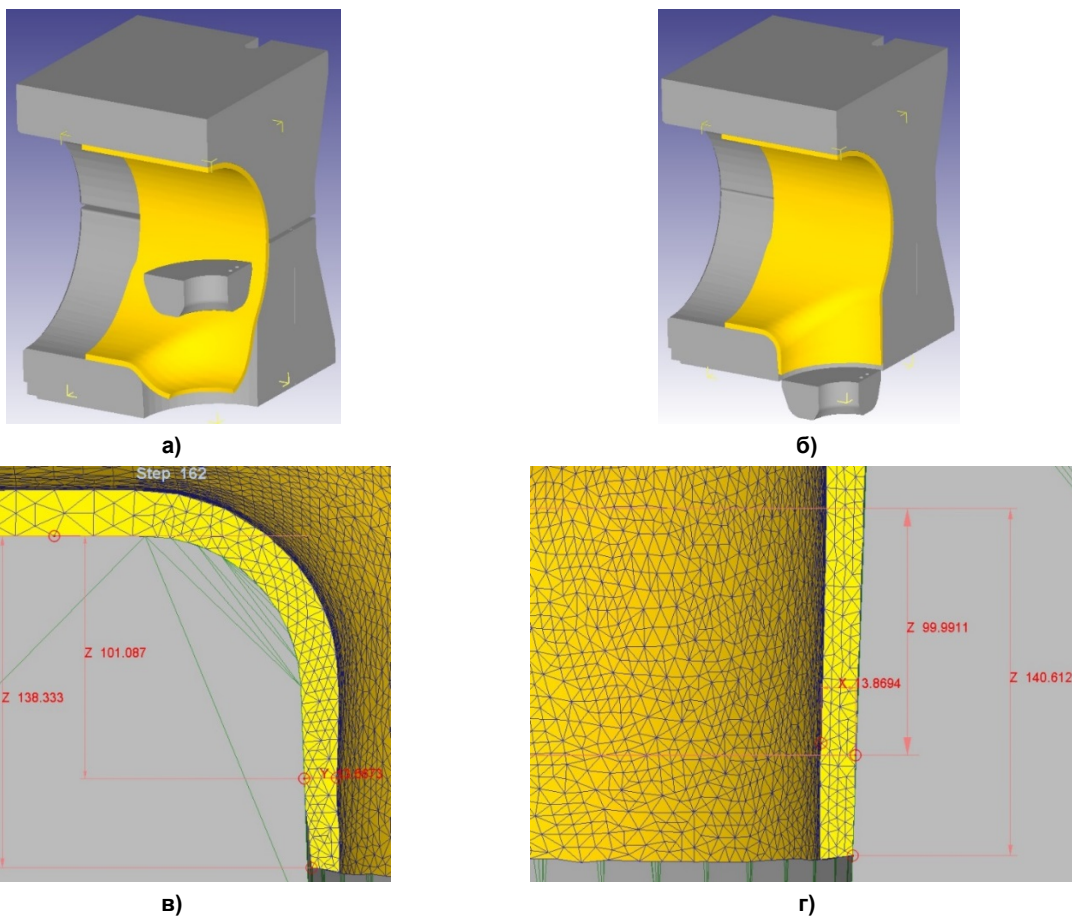


Рис. 4. Моделирование операции отбортовки: а – начало операции; б – окончание операции; в – результат отбортовки – продольное сечение; г – результат отбортовки – поперечное сечение

1000° для повышения пластичности металла. При моделировании заготовкам назначалась начальная температура, равная 850 °С. Скорости движения инструмента составляли 10 мм/с. Для получения более точного результата по толщине стенки отвления в зоне отбортовки было произведено загущение сетки конечных элементов. Этапы моделирования представлены на рис. 4.

После измерения отвления были определены размеры отверстия для отбортовки. Наилучшим оказалось отверстие 330 × 235 мм.

1.2. Моделирование процесса в программе MSC Marc Mentat

Marc – это универсальное решение для нелинейного анализа методом конечных элементов, позволяющее точно моделировать поведение системы в статических, динамических и мультифизических сценариях нагружения. Универсальность пакета в моделировании нелинейного поведения материалов и переходных условий окружающей среды делает его оптимальным для решения сложных задач проектирования.

MSC Marc Mentat может моделировать все виды нелинейностей, а именно геометрическую нелинейность, нелинейность материала и граничных условий, включая контакт.

Благодаря встроенному в программный комплекс большому количеству различных моделей материалов (линейно-упругий, вязкопластический, эластомер и т. д.), наличию около 200 конечных элементов различных типов (по структуре: балочные, оболочечные, несжимаемые и т. д.; по форме: квадратные, треугольные, гексоганальные, тетраэдральные и т. д.) возможно решать следующие задачи:

- прочностной анализ (расчет прочности рабочего инструмента);
- тепловой анализ (термообработка, сварка);
- анализ технологических операций ОМД (НДС, прогнозирование течения металла, возможных дефектов, расчет энергосиловых параметров, конструирование новой оснастки);
- электромагнитный анализ;
- магнитостатический анализ.

В данной работе была реализована совместная температурная и структурная задача, связанная с большой деформацией и течением металла. Для данного типа задачи Marc использует метод Лагранжа. Равновесие системы выражается как принцип виртуальной работы.

Для моделирования производства тройников штампованных, в котором присутствует нагрев заготовки, была использована диаграмма напряжения/деформация для различных температур (рис. 5).

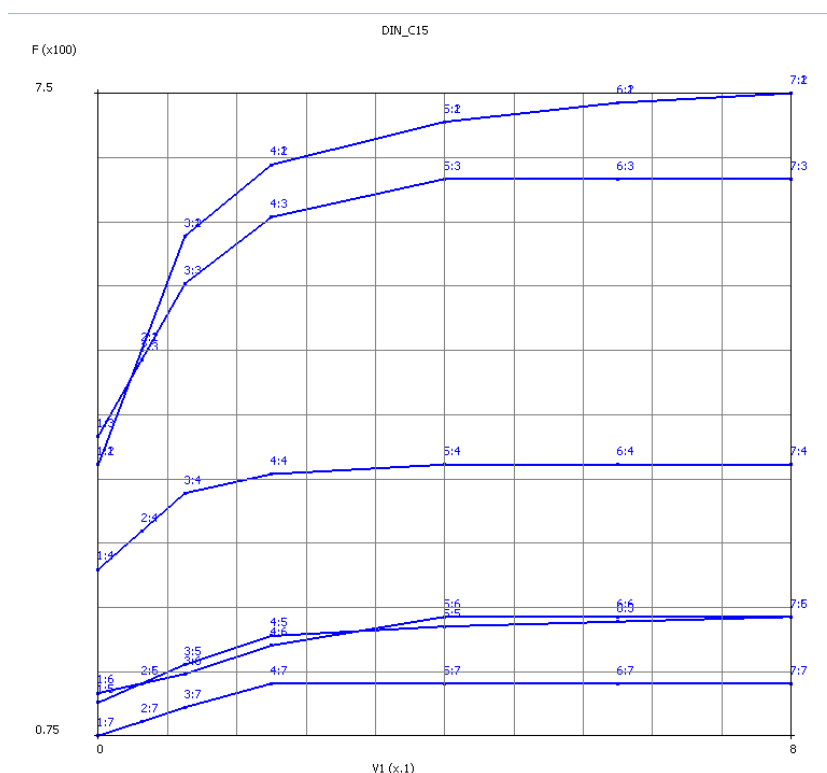


Рис. 5. Диаграмма напряжения/деформация от температуры для стали AISI 1015

Задача нагрева была решена через начальные условия, в которых были указаны конкретные температуры для узлов сетки. Таким образом, процесс нагрева и зонного охлаждения заготовки был пропущен. Операция набора металла в зону отбортовки задавалась в препроцессоре Mentat. На рис. 6 представлена CAE модель данного процесса.

Перемещение верхней матрицы задавалось с ранее выбранной скоростью (п. 1.1). Величина несмыкания матриц устанавливалась равной 15 мм. Для данного процесса была выбрана модель трения сдвига (Shear Friction). Значения коэффициента трения 0,3.

Для последующей операции температура задавалась посредством начальных условий.

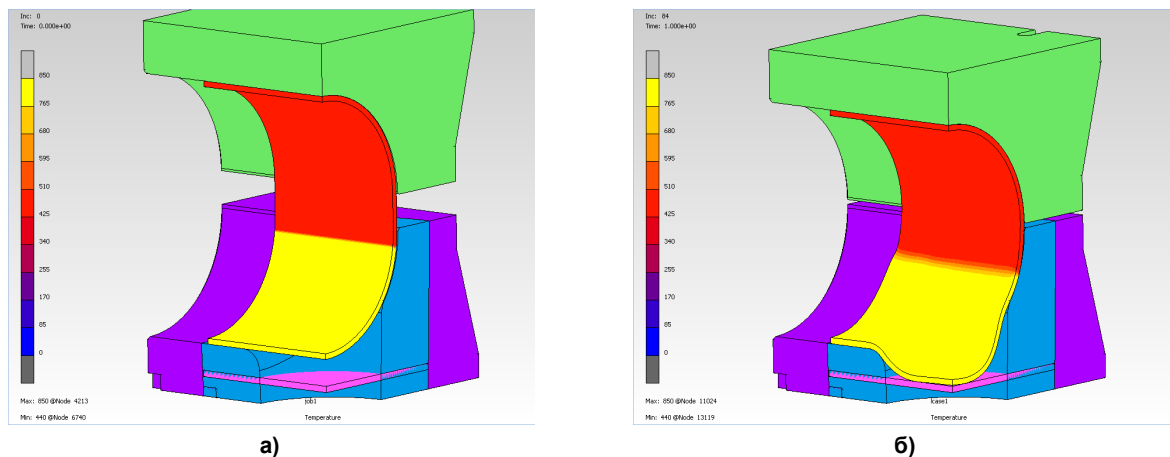


Рис. 6. Модель процесса набора металла в зону отбортовки: а – начальное положение при моделировании операции; б – результат моделирования операции

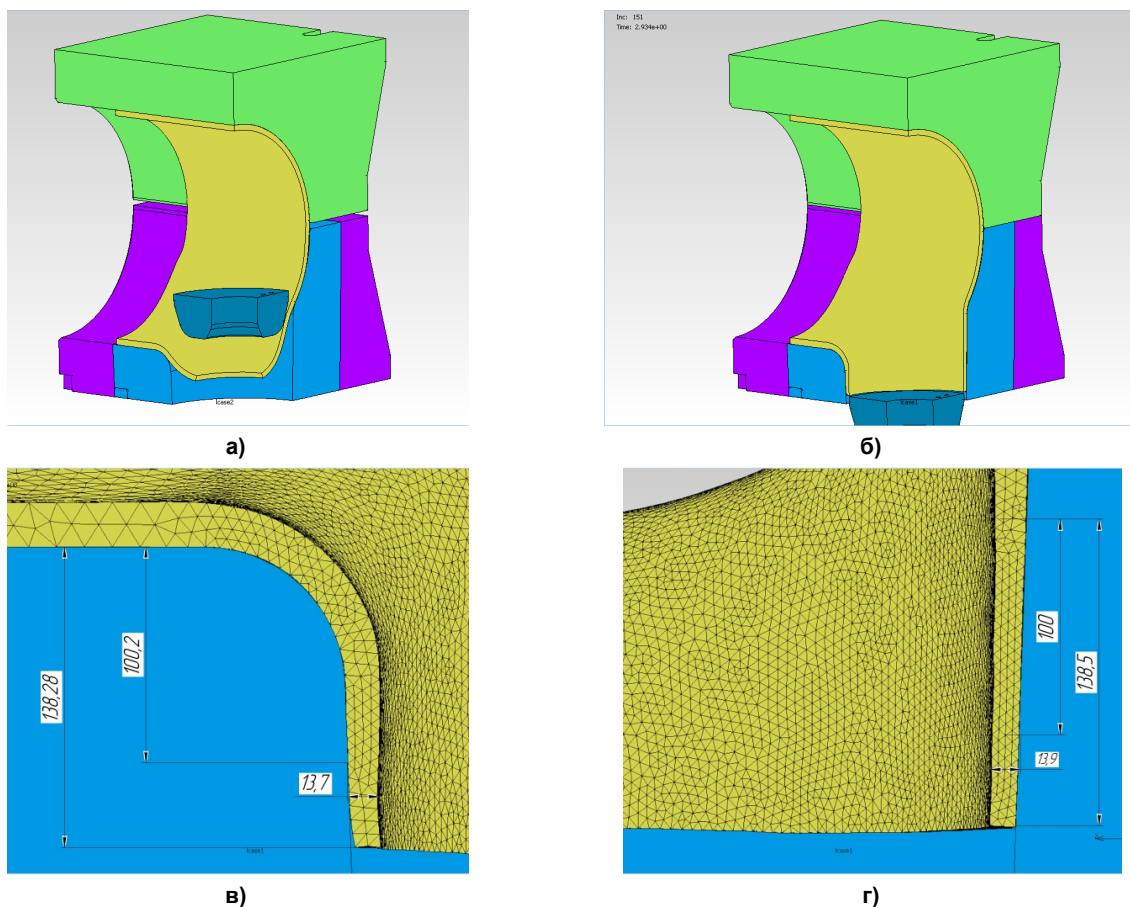


Рис. 7. Моделирование операции отбортовки: а – начало операции; б – окончание операции; в – результат отбортовки – продольное сечение; г – результат отбортовки – поперечное сечение

Обработка металлов давлением...

Таким образом, тепловая задача нагрева заготовки до температуры 850 °С была опущена. Размеры вырезаемого отверстия были взяты из п. 1.1. Вырез отверстия под операцию отбортовки выполнялся с помощью встроенного модуля «trim». Для операции отбортовки была использована геометрия заготовки из предыдущего расчета. На рис. 7 представлены этапы моделирования процесса отбортовки.

Значения высоты ответвления тройника в продольном и поперечном сечении и толщина стенки соответствуют расчетным значениям, полученным в программном комплексе DEFORM-3D. Это говорит о том, что форма выпуклости в двух программных комплексах получилась одинаковой.

2. Производство штамповарного тройника на площадке ООО «Этерно»

Следующим этапом данной работы было производство опытной партии тройников

штампосварных на базе предприятия ООО «Этерно». Все технологические операции выполнялись в соответствии с параметрами, определенными на этапе моделирования в программном комплексе DEFORM-3D. К таким параметрам относятся: коэффициент обжима, глубина охлаждения, высота ограничителя при операции набора металла в зону отбортовки, размер отверстия для отбортовки.

Коэффициент обжима задавался с помощью длины исходной заготовки. После чего листовая заготовка вальцевалась в круглую обечайку, а затем овализировалась. Далее заготовку нагревали и выполняли частичное ее охлаждение. Глубина охлаждения при опытной штамповке контролировалась путем разметки линии охлаждения термостойким маркером. Процесс выполнения данных операций представлен на рис. 8.

Далее заготовка кантуется горячей частью вниз и выполняется операция набора



Рис. 8. Операции частичного охлаждения заготовки: а – разметка зоны охлаждения; б – нагретая заготовка; в – охлаждение заготовки в специализированной ванне; г – частично охлажденная заготовка

металла в зону отбортовки путем радиального обжима заготовки до неполного смыкания матриц. В отверстие матрицы был установлен ограничитель, который соответствует высоте выпуклости 85 мм. Процесс выполнения операции представлен на рис. 9.

В результате выполнения операции была получена выпуклость высотой 87 мм.

После выполнения этой операции заготовка охлаждается на воздухе, после чего в полученной выпуклости вырезалось отверстие для отбортовки. Выполняется данная операция на роботизированном комплексе газокислородной резки. Соответствие размеров вырезанного отверстия размерам, определенным

на основе моделирования, было проконтролировано. Как видно на рис. 10, размеры отверстия равны 330×235 мм, что полностью соответствует требуемым размерам.

Затем заготовка нагревалась в печи и выполнялась отбортовка ответвления. Отбортовка осуществляется в том же комплекте матриц, что и операция набора металла. При этом сначала происходит дообжатие заготовки в матрицах, а затем пуансоном, помещенным внутрь тройника, с помощью тянущего устройства, находящегося в нижней части прессы, осуществляется отбортовка ответвления. Процесс выполнения операции отбортовки представлен на рис. 11.



а)



б)



в)

Рис. 9. Операция набора металла в зону отбортовки: а – установка заготовки в матрице; б – смыкание матриц при операции; в – результат выполнения операции



а)



б)

Рис. 10. Замер отверстия под отбортовку: а – размер «А»; б – размер «В»

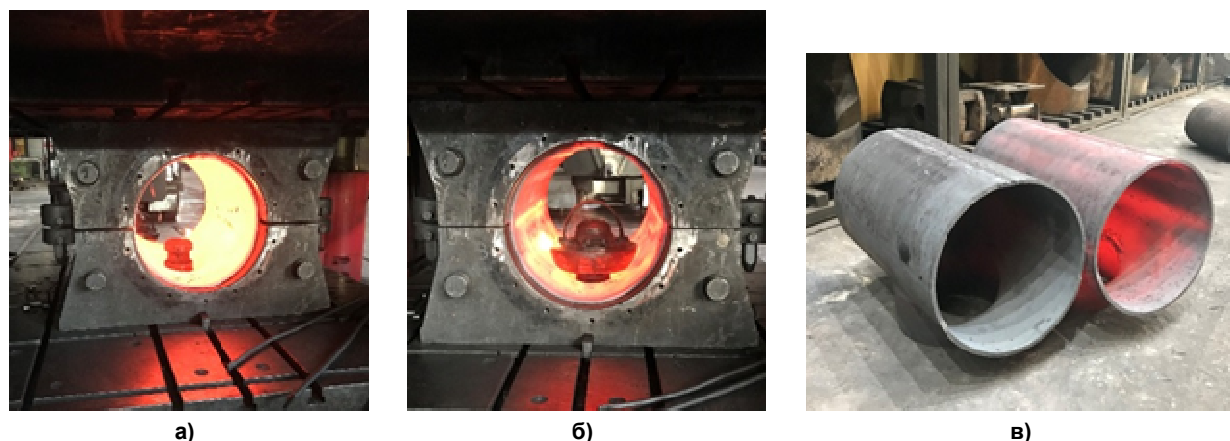


Рис. 11. Операция отбортовки: а – обжатие заготовки; б – отбортовка ответвления; в – отбортованные детали

3. Результаты исследования

Завершающим этапом данной работы было сравнение результатов, полученных в результате моделирования в двух программных комплексах и опытной штамповки. Для оценки результатов измерялись высота ответвления и толщина стенки ответвления на минимальной высоте отбортовки. В таблице представлено сравнение результатов моделирования и опытной штамповки.

Полученные модели тройников и результаты замеров готового изделия представлены на рис. 12.

Результаты моделирования в двух программных комплексах оказались абсолютно идентичными. Толщина стенки отличается на 0,1 мм, высота ответвления в DEFORM-3D в

поперечном сечении оказалась на 2 мм больше. Данная погрешность возникла в результате разного построения сетки конечных элементов. И погрешность составила 1/3 размера элемента, что при количестве элементов 100 000–150 000 является незначительным.

При опытной штамповке тройник имел толщину стенки, идентичную полученной при моделировании, а высота ответвления на 5 мм больше расчетной. Данная погрешность могла возникнуть из-за того, что на производстве сложно соблюдать некоторые факторы. Например, глубина охлаждения выполняется с погрешность ± 20 мм, а этот параметр напрямую способствует получению высоты горловины. Поэтому заготовку тройника моделировали с припуском на механическую обработку.

Сравнение результатов моделирования и опытной штамповки

| Параметр | Моделирование | | Опытная штамповка |
|--|---------------|-------------|-------------------|
| | DEFORM-3D | Marc Mentat | |
| Высота ответвления, мм | 138...140 | 138 | 143...145 |
| Толщина стенок ответвления на минимальной высоте отбортовки (100 мм), мм | 13,6...13,8 | 13,6...13,9 | 13,7...13,9 |

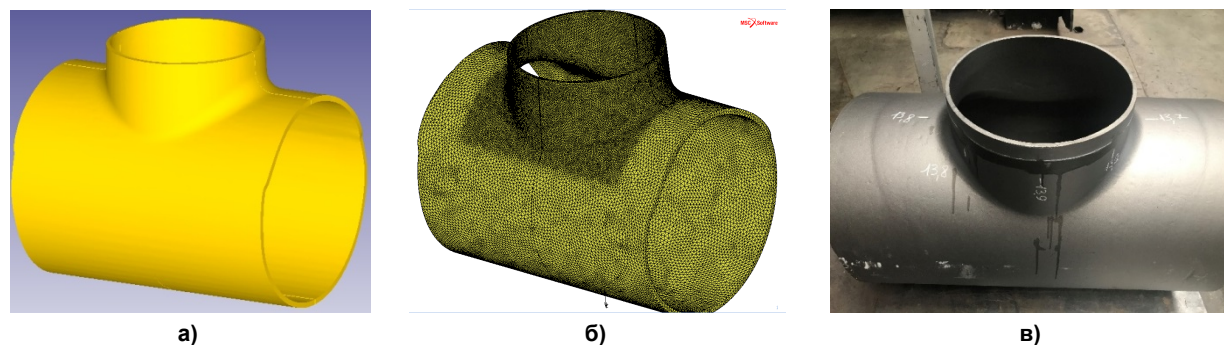


Рис. 12. Результат: а – моделирования DEFORM-3D; б – моделирования Marc Mentat; в – опытной штамповки

По итогам штамповки был получен годный тройник, полностью удовлетворяющий требованиям технических условий.

Заключение

Результаты моделирования операций обработки металлов давлением, выполняемых при производстве тройников штампосварных, в двух программных комплексах DEFORM-3D и Marc Mentat имеют сходимость 99,9%. Данный результат получен при использовании единых параметров технологических операций.

Замер параметров готовых изделий показал, что результаты расчета оказались очень близки к результатам опытной штамповки.

Разница высоты ответвления при расчете и при опытной штамповке составила 5 мм (96,5%).

По итогам работы можно сделать выводы о том, что применение программных комплексов DEFORM-3D и MSC Marc Mentat на предприятиях, производящих штампосварные детали трубопровода, возможно. DEFORM-3D более предпочтителен для таких задач, так как постановка задачи выполняется быстрее и проще. В то же время стоит отметить, что MSC Marc Mentat с данной задачей справился аналогично, но его более рационально будет использовать для более сложных исследовательских задач.

Литература

1. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Горбунов, М.В. Штамповка деталей из трубчатых заготовок / М.В. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1960. – 189 с.
3. Басаев, Э.П. Экспериментальные исследования процесса обжима с утонением / Э.П. Басаев, А.А. Гольшиев, Е.С. Дамберг // Известия ТулГУ. Сер. Механика деформированного твёрдого тела и обработка металлов давлением. – 2004. – Вып. 2. – С. 168–178.
4. Михайлов, Ю.О. Моделирование процесса получения трубчатых заготовок с внутренними рифлями в программной среде DEFORM / Ю.О. Михайлов, Д.Г. Дресвянников, С.Н. Князев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1 (21). – С. 78–80.
5. Харитонов, В.А. Расчет параметров преформации на основе моделирования в программном комплексе DEFORM 3D / В.А. Харитонов, Э.Р. Ямтеева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 56 (10). – С. 47–48. DOI: 10.17073/0368-0797-2013-10-47-48
6. Замотаев, К.С. Моделирование штамповки и термической обработки в программе DEFORM / К.С. Замотаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 220–224.
7. Гречников, Ф.В. Исследование процесса обжима-раздачи трубной заготовки в программе DEFORM-2D / Ф.В. Гречников, А.Г. Шляпугин, С.С. Савин // 63-я молодёжная научно-техническая конференции. – 2013. – С. 89–91
8. Звонов, С.Ю. Особенности процесса формообразования полых конических деталей из кольцевой заготовки / С.Ю. Звонов, И.П. Попов, А.Г. Шляпугин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2010. – № 3. – С. 75–76.
9. Шляпугин, А.Г. Моделирование процесса обжима в программе DEFORM-2D / А.Г. Шляпугин, О.Ю. Блинова; ВИНТИ РАН. – М., 2012. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ Рос. акад. наук 17.01.12, № 8, В2012.
10. Торгонин, К.С. Моделирование операций обработки давлением при производстве тройников штампосварных / К.С. Торгонин, В.В. Широков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 80–92. DOI: 10.14529/met200208
11. Виттенберг, А.С. Прогрессивные методы изготовления деталей трубопроводов / А.С. Виттенберг, Р.И. Тавастийерн; под ред. А.Г. Камерштейна. – М., 1959. – 181 с.
12. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учеб. пособие / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.
13. <http://www.solidworks.ru/>
14. Моделирование операций обработки давлением при производстве штампосварных деталей трубопровода / К.С. Торгонин, В.В. Широков, Б.А. Чаплыгин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 109–120. DOI: 10.14529/met180412

15. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6579>

16. Кутателадзе, С.С. *Основы теории теплообмена.* / С.С. Кутателадзе. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979 – 416 с.

Торгонин Кирилл Сергеевич, аспирант, кафедра процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Torges9.torgonin@mail.ru.

Баталов Герман Сергеевич, аспирант, кафедра процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; batalov-german@mail.ru.

Широков Вячеслав Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shirokovvv@susu.ru, ORCID ID: 0000-0003-1663-9362.

Радионова Людмила Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; radionovalv@susu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9587-2925.

Поступила в редакцию 27 февраля 2021 г.

DOI: 10.14529/met210206

STUDY OF THE SIMULATION RESULTS CONVERGENCE IN VARIOUS SOFTWARE COMPLEXES IN THE PRODUCTION OF STAMP WELDED TEE

K.S. Torgonin, Torges9.torgonin@mail.ru,

G.S. Batalov, batalov-german@mail.ru,

V.V. Shirokov, shirokovvv@susu.ru, ORCID ID: 0000-0003-1663-9362,

L.V. Radionova, radionovalv@susu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9587-2925

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

There are several basic technologies for making tees. These technologies differ in the way the shaping operations are performed and the equipment used. The choice of parameters for each technological operation directly determines the quality of the finished product. At the same time, the calculation of technological parameters by engineering methods seems to be difficult. Therefore, it is advisable to use modern programs for modeling technological operations. The paper considers the modeling of technological operations of metal forming by pressure, performed during the production of tees, in the software complexes DEFORM-3D and MSC Marc Mentat. The blank and the tool for modeling technological operations were created in the SolidWorks software. In the software complexes DEFORM-3D and MSC Marc Mentat, the operations of partial cooling of the heated billet, the collection of metal into the flanging zone and the flanging operation were sequentially simulated. Based on the simulation results, technological parameters were determined, according to which the experimental stamping of the “tee” parts was carried out later. Based on the results of the work, a comparison was made between the results obtained in software systems and during experimental stamping. Simulation results in two software systems DEFORM-3D and Marc Mentat have a convergence of 99.9%. Measurement of the parameters of the finished products showed that the calculation results were very close to the results of the experimental stamping. The convergence of simulation results and experimental stamping was 96.5%. The main factors influencing the convergence of the results of modeling and experimental stamping have been determined. The resulting tees were found to be suitable, fully satisfying the requirements of the technical specifications. Thus, it has been shown that the use of the DEFORM-3D and Marc Mentat software systems at the enterprises producing stamped-welded parts of the pipeline is expedient.

Keywords: modeling, finite element method, stamped-welded pipeline parts, stamping, DEFORM, MSC Marc Mentat.

References

1. Popov E.A. *Osnovy teorii listovoy shtampovki* [Fundamentals of the theory of sheet stamping]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1977. 278 p.
2. Gorbunov M.V. *Shtampovka detaley iz trubchatykh zagotovok* [Stamping of parts from tubular blanks]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1960. 189 p.
3. Basaev E.P., Golyshv A.A., Damberg E.S. [Experimental studies of the crimping process with thinning]. *Bulletin of TulsU. Mechanics of deformed solids and metal forming*, 2004, iss. 2, pp. 168–178. (in Russ.)
4. Mikhailov Yu.O., Dresvyannikov D.G., Knyazev S.N. [Modeling the process of obtaining tubular billets with internal grooves in the DEFORM software environment]. *Intelligent systems in production*, 2013, no. 1 (21), pp. 78–80. (in Russ.)
5. Kharitonov V.A., Yamteeva E.R. [Calculation of preformation parameters based on modeling in the DEFORM 3D software package]. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2013, no. 56 (10), pp. 47–48. (in Russ.) DOI: 10.17073 / 0368-0797-2013-10-47-48
6. Zamotaev K.S. [Modeling of stamping and heat treatment in the DEFORM program]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 220–224. (in Russ.)
7. Grechnikov F.V., Shlyapugin A.G., Savin S.S. [Investigation of the process of crimping-expanding a pipe billet in the DEFORM-2D program]. *63rd Youth Scientific and Technical Conference*, 2013, pp. 89–91. (in Russ.)
8. Zvonov S.Yu., Popov I.P., Shlyapugin A.G. [Features of the process of forming hollow conical parts from a ring blank]. *News of higher educational institutions. Aviation technology*, 2010, no. 3, pp. 75–76. (in Russ.)
9. Shlyapugin A.G., Blinova O.Yu. *Modelirovaniye protsessa obzhima v programme DEFORM-2D* [Simulation of the crimping process in the DEFORM-2D program]. VINITI RAS. Moscow, 2012. 12 p. Dep. in VINITI Ros. Acad. Sciences 17.01.12, no. 8, B2012.
10. Torgonin K.S., Shirokov V.V. Simulation of Pressure Processing Operations in the Production of Stamp-welded Pipe Joints. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 80–92. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200208
11. Wittenberg A.S., Tavastshern R.I. *Progressivnyye metody izgotovleniya detaley truboprovodov* [Progressive methods of manufacturing pipeline parts]. Moscow, 1959. 181 p.
12. Parshin B.C., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Pugin A.I., Fedulov A.A. *Prakticheskoye rukovodstvo k programnomu kompleksu DEFORM-3D* [A practical guide to the DEFORM-3D software package]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2010. 266 p.
13. Available at: <http://www.solidworks.ru/>
14. Torgonin K.S., Shirokov V.V., Chaplygin B.A., Chernobrovin V.P., Plastinin B.G., Kozlov A.V., Dukmasov V.G. Modeling of Pressure Shaping during Manufacturing of Stamp-Welded Pipe Joints. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 109–120. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180412
15. Available at: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6579>
16. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the Theory of Heat Transfer]. 5th ed. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 416 p.

Received 27 February 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Исследование сходимости результатов моделирования в различных программных комплексах при производстве тройников штампованных / К.С. Торгонин, Г.С. Баталов, В.В. Широков, Л.В. Радионова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 58–69. DOI: 10.14529/met210206

FOR CITATION

Torgonin K.S., Batalov G.S., Shirokov V.V., Radionova L.V. Study of the Simulation Results Convergence in Various Software Complexes in the Production of Stamp Welded Tee. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 58–69. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210206