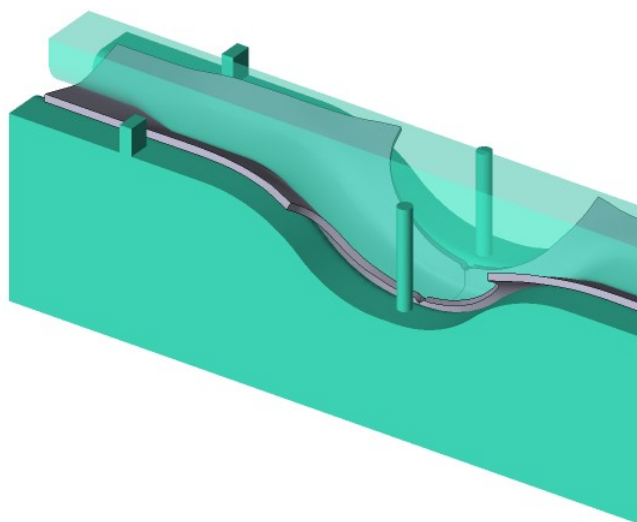
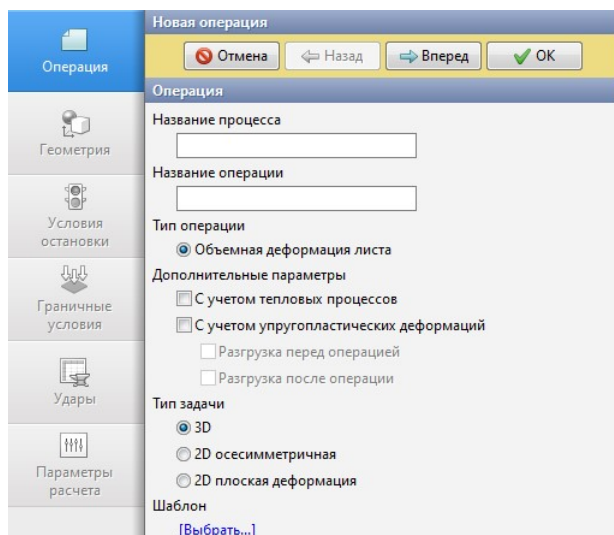
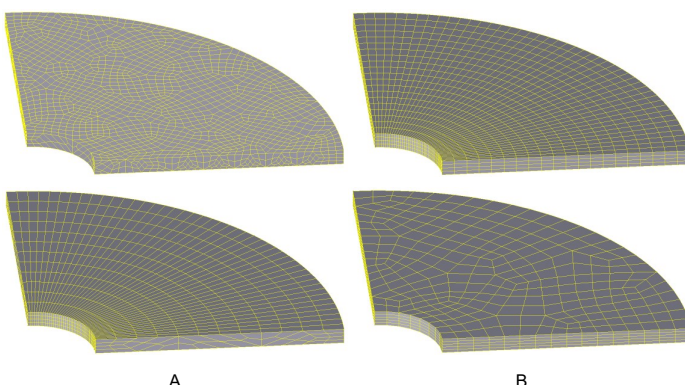


Для моделирования операций листовой штамповки в **QForm Stamping** был создан специализированный модуль, так как 3D-моделирование этих операций в базовом модуле программы, соответствующем типу операции *Деформация*, с применением сеточной модели заготовки из тетраэдров, непродуктивно и в общем случае требует много времени для выполнения расчета из-за особенностей листовых деталей, у которых, как правило, толщина значительно меньше габаритных размеров. Чтобы воспользоваться этим модулем, необходимо во вкладке **Операция** при задании исходных данных выбрать тип операции *Объемная деформация листа*:



В этом модуле реализован специальный подход, основанный на особенностях процессов листовой штамповки. Для его правильной и предопределенной работы необходимо использовать тип задачи *3D* совместно со структурированной и слоистой по толщине сеточной моделью заготовки, состоящей из объемных элементов в виде гексаэдров.



Примеры неструктурированных (А) и структурированных, слоистых по толщине (В) гексаэдральных сеточных моделей

Способы её построения описаны в разделе документации [Создание гексаэдральной сетки](#).

Функциональность этого модуля аналогична базовому модулю программы: моделирование с учетом тепловых процессов и упругих деформаций заготовки, использование подпружиненного инструмента и т.д. Дополнительно для расширения его возможностей были созданы две стандартные постпроцессорные подпрограммы для определения диаграммы предельного формоизменения и толщины получаемой детали. Задание исходных данных в модуле моделирования операций листовой штамповки идентично базовому модулю, каких-то дополнительных вкладок и параметров в панели задания исходных данных при его использовании не появляется.

В случае применения модуля моделирования операций листовой штамповки при подготовке исходных данных расчёта необходимо учитывать следующие особенности:

1. В операциях листовой штамповки с изгибом заготовки при формоизменении, на участках изгиба слои материала с одной стороны растягиваются, а с другой сжимаются. Между ними расположен нейтральный слой. Моделируя такие операции, для точного определения и учёта влияния изменения напряженно-деформированного состояния вдоль толщины заготовки, необходимо использовать сеточные модели заготовки с числом элементов по толщине не менее трех-пяти.
2. Так как анизотропия металла играет существенную роль в процессах пластического формоизменения, при моделировании листовой штамповки заготовки из ортотропного материала с изотропным упрочнением рекомендуется использовать в расчёте материал заготовки, в свойствах которого применено условие пластичности Хилла-Мизеса. Например, в случае моделирования обработки листовой заготовки, вырезанной из термически необработанного прокатного листа.

**Важно**

При подготовке исходных данных для моделирования обработки прокатанной листовой заготовки с использованием условия пластичности Хилла-Мизеса, необходимо соблюдать следующие требования к ориентации заготовки в пространстве: направление прокатки в заготовке должно быть коллинеарно оси X глобальной системы координат в **QForm Stamping**, направление перпендикулярное направлению прокатки - оси Y, а толщина - оси Z.

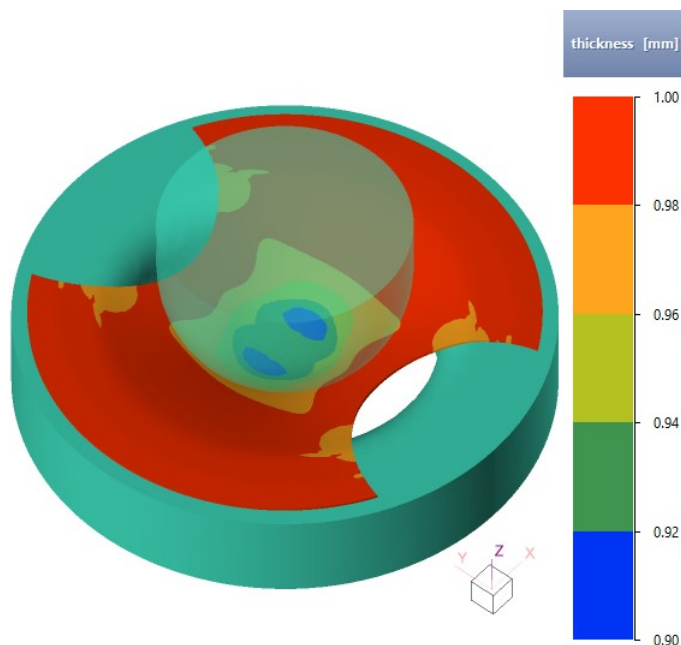
3. Для гексаэдральной сеточной модели заготовки в программе реализован механизм автоматического в случае необходимости дробления начальных элементов сетки в местах контакта с поверхностью инструмента. Необходимость измельчения и количество элементов, на которое производится деление исходного элемента, определяются кривизной контактной поверхности инструмента. Так, если в процессе формоизменения элемент сетки заготовки начинает контактировать с участком поверхности инструмента, для точного описания кривизны которого размер исходного элемента велик, элемент делится на необходимое число элементов. Если при последующем формоизменении измельченные элементы начинают контактировать с другим участком поверхности инструмента, кривизна которого меньше и не требует столь мелких элементов для точного описания, элементы стремятся объединиться до начального элемента сетки. Это позволяет уменьшить время расчета за счет применения в моделировании более грубой исходной сетки заготовки. Автоматическое деление исходных элементов сетки работает только при активированной опции *Переразбиение в процессе расчета* сетки заготовки во вкладке *Параметры расчета* панели исходных данных. При делении элемента, делится не только элемент приповерхностного слоя сетки, но и элементы всех слоев вдоль толщины в случае использования типа операции *Объемная деформация листа*, либо элементы только двух приповерхностных слоёв при использовании других типов операции. Количеством элементов, на которое делятся исходные элементы, можно управлять используя параметр *Множитель адаптации* для сетки заготовки во вкладке *Параметры расчета*. Так число элементов изменяется прямо пропорционально величине множителя с коэффициентом пропорциональности - 1.

**Информация**

При применении гексаэдральной сеточной модели, в отличие от случаев расчета с сеткой заготовки, состоящей из тетраэдров, из всех параметров сетки заготовки во вкладке *Параметры расчёта* панели исходных данных только параметр *Множитель адаптации* оказывает влияние на конечно-элементную модель заготовки как описано выше. Остальные параметры на гексаэдральную сеточную модель заготовки никак не влияют!

4. В текущей версии программы для гексаэдральной сеточной модели заготовки доступно применение поверхности обрезки только в виде прямого кругового цилиндра, либо прямоугольного параллелепипеда, созданных с использованием команды *Параметрическая геометрия* во вкладке *Геометрия* панели задания исходных данных.

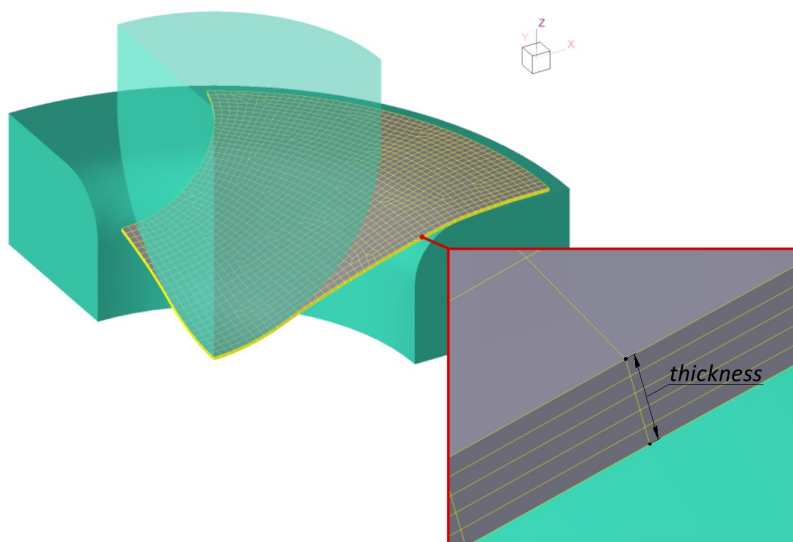
В операциях листовой штамповки толщина заготовки, как правило, изменяется. Для определения её изменения при моделировании в специализированном модуле с типом операции *Объемная деформация листа* и структурированной, слоистой по толщине, гексаэдральной сеткой заготовки можно использовать стандартную постпроцессорную подпрограмму *Толщина*. Эта подпрограмма имеет одно выходное поле *thickness*, соответствующее текущей толщине заготовки в процессе обработки.



Пример с результатами определения конечной толщины заготовки

Для получения более подробной информации о стандартных постпроцессорных подпрограммах, и их расчёте, обратитесь к разделу документации [Подпрограммы](#).

Толщина в этой подпрограмме определяется как расстояние между двумя узлами гексаэдральной сеточной модели заготовки, лежащими на противоположных поверхностях заготовки, которые в исходной заготовке находились на одной прямой, параллельной направлению толщины:



Поэтому, если в процессе обработки в заготовке появляются участки со значительными сдвиговыми деформациями, при которых соседние слои сетки заготовки смещаются друг относительно друга, а стороны гексаэдров, изначально параллельные толщине, поворачиваются и отклоняются от нормали к поверхности, толщина заготовки, определённая с помощью рассматриваемой подпрограммы, в этих местах будет иметь неверные значения, и ими следует пренебречь. В остальном объёме заготовки определённые значения толщины будут корректными.



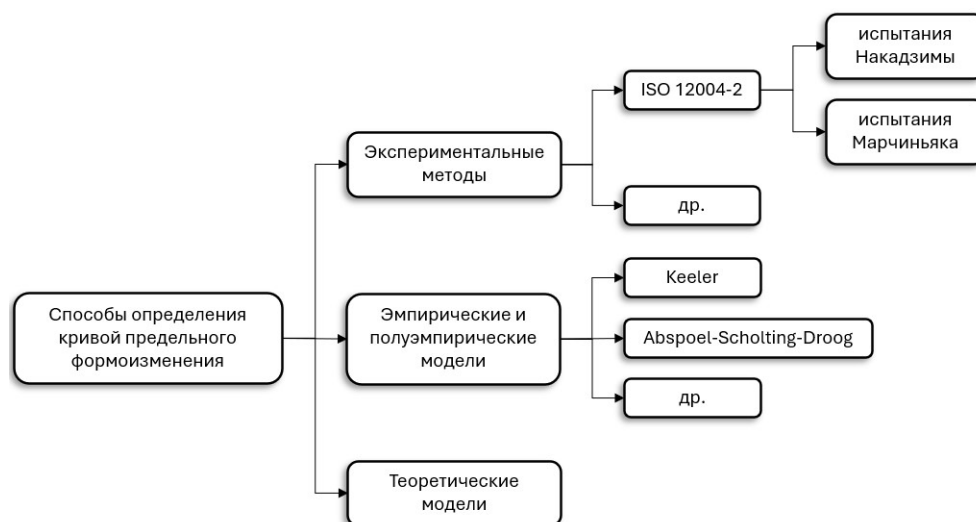
Информация

Направление толщины для гексаэдральной сетки заготовки определяется только при использовании специализированного модуля моделирования операций листовой штамповки с типом операции *Объёмная деформация листа*. В расчётах с другими типами операций, направление толщины не определяется и рассчитываемое стандартной подпрограммой *Толщина* выходное поле *thickness* будет иметь нулевое значение.

Одной из основных целей использования моделирования при разработке технологического процесса является определение оптимальных технологических режимов обработки, обеспечивающих минимальное число переходов для получения требуемой детали из исходной заготовки, в том числе на основе прогнозирования возникновения технологических дефектов заготовки в процессе обработки. Для определения появления дефектов заготовки в процессах листовой штамповки широкое распространение получили диаграммы предельного формоизменения.

Диаграммы предельного формоизменения строятся на координатной плоскости, у которой вдоль оси абсцисс откладывается меньшая главная деформация в поверхности листовой заготовки ($\epsilon_{\min}$), а вдоль оси ординат - большая ($\epsilon_{\max}$). Под деформацией здесь и далее подразумевается истинная деформация. Информацию о существующих видах деформации можно посмотреть в разделе документации [Перемещения, деформации и скорости деформации](#).

Область положительных $\epsilon_{\min}$ диаграммы предельных деформаций соответствует двухосному растяжению, а отрицательная - одноосному. В случае когда значение $\epsilon_{\min}$ равно нулю, реализуется плоское деформированное состояние. На координатную плоскость наносится кривая предельного формоизменения, отражающая предельные значения $\epsilon_{\max}$, при которых на заготовке образуется трещина, в зависимости от величины $\epsilon_{\min}$. Таким образом, выше кривой предельного формоизменения находятся точки всевозможных сочетаний $\epsilon_{\min}$ и $\epsilon_{\max}$, соответствующих разрушенной заготовки (область разрушения диаграммы предельных деформаций). Кривые предельного формоизменения впервые рассматривались в работах [1, 2]. Кривая предельного формоизменения уникальна для каждого листового материала и зависит в том числе от его толщины. Известны различные экспериментальные, эмпирические, полуэмпирические и теоретические методы построения кривой предельного формоизменения [3]. Теоретические, эмпирические и полуэмпирические методы либо требуют проведения небольшого числа простых испытаний, либо не требуют вовсе, но они не всегда позволяют получить достоверный результат. Наиболее точными являются экспериментальные методы, как правило, сопряженные с необходимостью проведения большого количества экспериментов с использованием специализированного оборудования и оснастки. В настоящее время предложено много различных экспериментальных методов построения кривых предельного формоизменения [3]. В том числе разработан стандарт ISO 12004, вторая часть которого посвящена определению кривой предельного формоизменения металлических заготовок толщиной от 0.3 мм до 4 мм (для стальных заготовок стандартом рекомендовано ограничить максимальную толщину значением в 2.5 мм) при комнатной температуре из испытаний с постоянной величиной отношения $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min}$ в процессе нагружения.



▼ Модель Keeler

В модели используются эмпирические уравнения, выведенные в результате анализа экспериментальных данных, полученных в основном для низкоуглеродистых сталей. Эти уравнения позволяют определить кривую предельного формоизменения материала в зависимости от значения показателя его деформационного упрочнения (n), взятого в виде степенного показателя аппроксимирующего кривую упрочнения уравнения Людвига-Холломоуна, и начальной толщины листа (t).

В 1975 году Килер и Брейзер впервые предложили использовать эмпирическое уравнение для определения величины предельной деформации в условиях плоского деформированного состояния (ϵ_{10}) [4]:

$$\epsilon_{10} = \ln \left(1 + (23.3 + 14.13 \cdot t) \frac{n}{0.21} \right)$$

При этом предполагалось, что форма кривой предельного формоизменения остаётся неизменной, и для получения кривой, соответствующей другому значению ϵ_{10} , достаточно сместить её вдоль вертикальной оси.

В дальнейшем приведенное уравнение уточнялось и дополнялось в различных работах. В настоящее время модель Keeler, в оригинальном или модифицированном виде, является одной из наиболее широко распространённых моделей для прогнозирования кривой предельного формоизменения материала, поскольку она проста и не требует проведения сложных экспериментов.

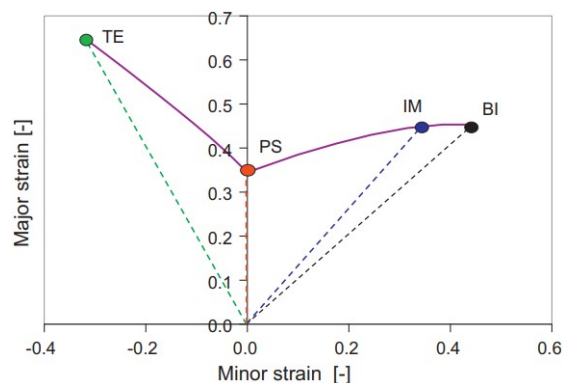


Важно

Уравнения, применяемые в модели Keeler, были получены в результате обработки результатов испытаний низкоуглеродистых сталей и являются точными для них. Их использование для материалов других типов может привести к некорректным результатам.

▼ Модель Abspoel-Scholting-Droog

В работе [5] Абспозель, Шолтинг и Дрог (Tata Steel) провели анализ взаимосвязи кривой предельного формоизменения с другими механическими свойствами материала. На основе полученных данных были предложены уравнения для расчёта предельных деформаций в определённых точках кривой. Так в ходе обзора работ, выполненных в данной области ранее, авторы выделили четыре точки на кривой предельного формоизменения:



где

TE - точка предельного состояния при нагружении по траектории, соответствующей одноосному растяжению;

PS - точка предельного состояния при нагружении по траектории, соответствующей плоскому деформированному состоянию;

IM - точка предельного состояния при нагружении по траектории, соответствующей двухосному растяжению, при котором отношение деформаций равно 0.75;

BI - точка предельного состояния при нагружении по траектории, соответствующей равноосному плоскому растяжению.

Затем провели исследование по установлению взаимосвязи между экспериментально полученными значениями кривой предельного формоизменения в этих точках и различными механическими свойствами материала, определенными в ходе испытаний на одноосное растяжение плоских образцов для широкого спектра современных сталей. В результате были установлены зависимости, подходящие практически для всех рассмотренных материалов и позволяющие определить величину предельных деформаций в рассматриваемых точках с помощью следующих параметров:

- *A80* - определённое по ISO 6892-1 на расчётной длине 80 мм относительное удлинение в момент разрыва плоского образца, продольная ось которого совпадает с направлением, для которого определяется кривая предельного формоизменения;
- *A80min* - наименьшее из значений параметра *A80*, определенных для трёх видов образцов: с продольной осью, совпадающей с направлением прокатки, перпендикулярной ему и расположенной к нему под углом 45°;
- *r* - определенный по ISO 10113 коэффициент пластической анизотропии плоского образца, продольная ось которого совпадает с направлением, для которого определяется кривая предельного формоизменения;
- *t* - начальная толщина листа.

Кривая предельного формоизменения получается соединением этих точек. Полученные уравнения были проверены на пятидесяти различных марках стали.

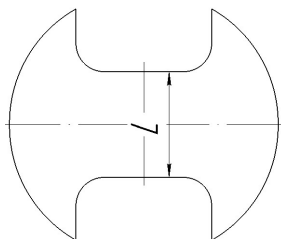


Важно

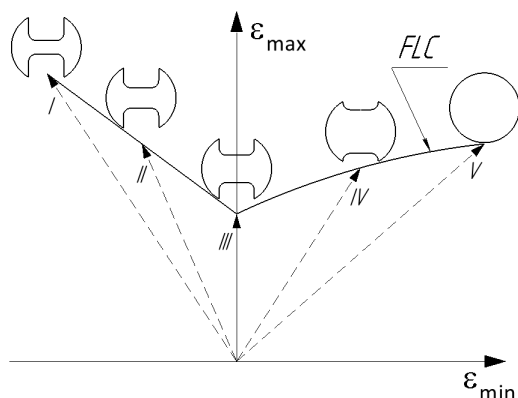
1. Уравнения, применяемые в модели Abspoel-Scholting-Droog, были проверены для различных современных сталей с пределом прочности при растяжении от 280 до 1200 МПа, относительным удлинением от 5 до 50%, коэффициентом пластической анизотропии от 0.6 до 2.7 и начальной толщиной листа от 0.2 до 3.1 мм. Их использование для материалов других типов или с характеристиками, отличными от указанных, может привести к некорректным результатам.
2. При использовании модели Abspoel-Scholting-Droog для трип-сталей значения предельных деформаций в области положительных значений меньшей главной деформации диаграммы предельного формоизменения получаются завышенными.

▼ Определение кривой предельного формоизменения по ISO 12004-2

Образец используемый в испытаниях по этому стандарту имеет форму напоминающую собачью кость (в некоторых случаях также допускается применение плоских образцов различной ширины и образцов, отличающихся от показанного ниже тем, что боковые вырезы у них выполнены по дуге окружности):



Ширина перемычки *L* центральной части образцов, используемых в различных испытаниях, варьируется. За счёт этого достигается изменение величины отношения $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min}$ и удаётся получить различные точки кривой предельного формоизменения (испытания проводятся до момента появления трещины на образце). Так при достаточно тонкой перемычке в образце реализуется состояние одноосного растяжения, а при использовании образца без боковых вырезов (в виде диска) - реализуется равноосное плоское растяжение. Варьирование ширины перемычки между двумя этими крайними значениями позволяет получить различные промежуточные состояния и точки кривой предельного формоизменения. При этом минимально необходимое число различных путей нагружения согласно стандарту - 5. Рекомендуется, чтобы они были равномерно распределены по кривой предельного формоизменения. Затем, соединив полученные точки, получается кривая предельного формоизменения исследуемого материала:



где

I, II, III, IV, V - траектории изменения деформированного состояния образцов, в испытаниях с различными величинами отношения $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min}$, в конце которых схематично отражены соответствующие им образцы:

I - траектория, соответствующая одноосному растяжению с $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min} = (-R_m - 1)/R_m$ (здесь R_m - среднее значение коэффициента Лэнкфорда);

III - траектория, соответствующая плоскому деформированному состоянию с $\epsilon_{\min} = 0$;

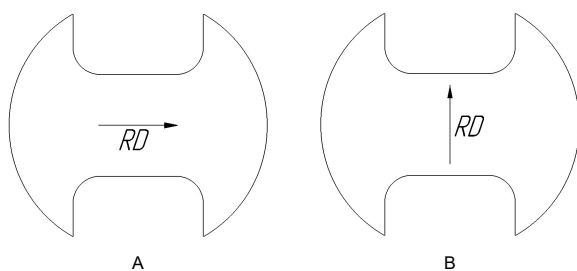
V - траектория, соответствующая равноосному плоскому растяжению с $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min} = 1$;

II, IV - промежуточные между рассмотренными выше траектории;

FLC - кривая предельного формоизменения.

Для точного измерения величин деформаций на образец наносится специальная сетка из элементов точных размеров, либо применяется метод DIC.

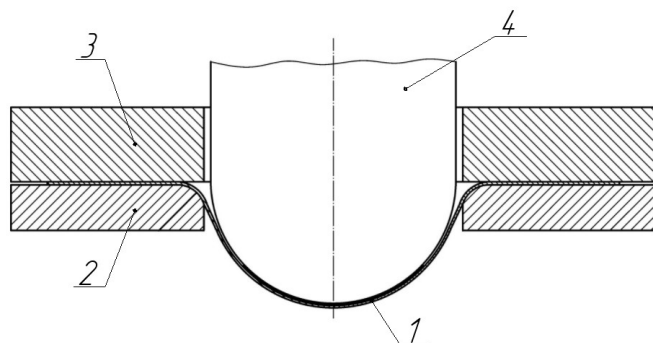
При определении кривой предельного формоизменения анизотропного материала вырезаемые из исследуемого листового металла испытательные образцы ориентируют таким образом, чтобы их продольная ось совпадала с направлением листа, вдоль которого величина $\epsilon_{\max}$ минимальна. Так для стальных листовых материалов это направление, как правило, перпендикулярно направлению проката (RD), а для алюминиевых сплавов - параллельно:



Ориентация образцов, используемых для определения кривой предельного формоизменения алюминиевых сплавов (А) и сталей (В)

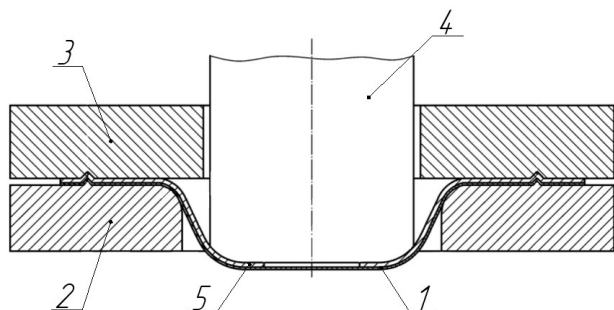
Согласно стандарту испытания могут быть выполнены либо по методу Накадзимы, либо - Марчиньяка. При этом для точного определения кривой предельного формоизменения требуется применение различных мер минимизации влияния на разрушение образца трения между ним и инструментами.

При проведении испытаний по методу Накадзимы образец 1, фланцевая часть которого жестко закреплена между матрицей 2 и прижимом 3, формируется до разрушения полусферическим пуансоном 4:



Используемая в испытаниях по этому методу смазка должна обеспечивать разрушение образца на расстояние менее 15% диаметра пуансона от его вершины. Только в этом случае результаты испытания считаются действительным. Так в стандарте предложено применение различных смазочных систем, зависящих от исследуемого материала.

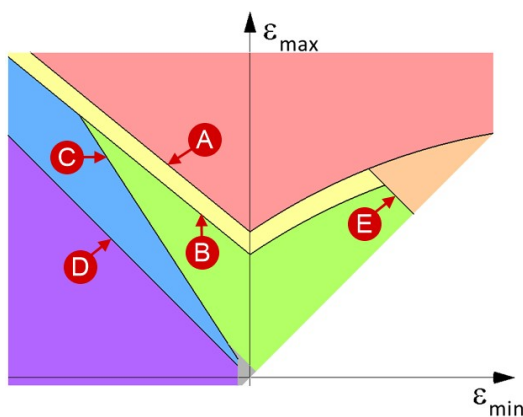
При проведении испытаний по методике Марчинька образец 1 с жестко защемленным между матрицей 2 и прижимом 3 фланцем формируется до разрушения цилиндрическим пуансоном 4 с плоской донной частью:



В этом случае для минимизации влияния трения на разрушение и возникновения трещины в центральной части образца между образцом и пуансоном укладывается дополнительная заготовка 5 из более мягкого материала с отверстием в центре.

Для получения информации о методике обработки результатов испытаний, требованиях к оборудованию и др., рекомендуем ознакомиться со стандартом.

Помимо нанесения кривой предельного формоизменения, выше которой расположена зона разрушения, на координатной плоскости диаграммы предельного формоизменения также размечают другие зоны штампуемости. В результате она выглядит следующим образом:



Используемые линии:

- A** - кривая предельного формоизменения;
- B** - кривая, полученная смещением на заданную величину вдоль оси ординат кривой предельного формоизменения;
- C** - прямая $\epsilon_{\max} = (-R_m - 1)/R_m \epsilon_{\min}$ (здесь R_m - среднее значение коэффициента Лэнкфорда);
- D** - прямая $\epsilon_{\max} = -\epsilon_{\min}$;
- E** - прямая $\epsilon_{\max} = -\epsilon_{\min} + \epsilon_{ET}$ (здесь ϵ_{ET} - максимально допустимое утонение).

Области диаграммы предельного формоизменения (зоны штампуемости):

- - зона разрушения;
- - зона риска возникновения трещин;
- - зона чрезмерного утонения;
- - бездефектная зона;
- - зона склонности к складкообразованию;
- - зона утолщения;
- - зона недостаточных деформаций.



Важно

Диаграммы предельного формоизменения в **QForm Stamping** в общем случае следует применять для анализа операций холодной листовой штамповки с плоским напряженным состоянием в деформируемой заготовке и постоянным отношением $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\min}$.

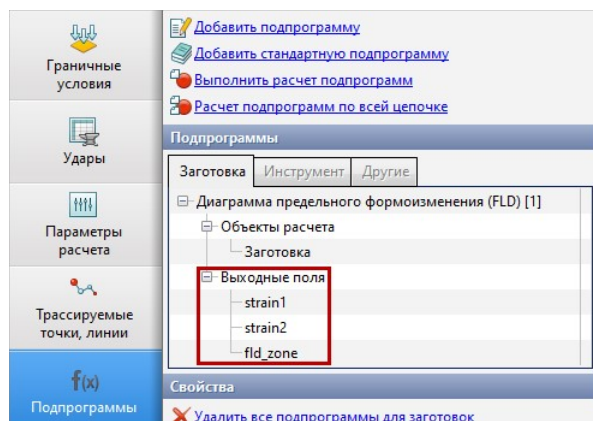
Диаграмма предельного формоизменения в **QForm Stamping** рассчитывается с помощью одноименной стандартной постпроцессорной подпрограммы. Информацию о доступных стандартных подпрограммах и их использовании можно посмотреть в разделе документации [Подпрограммы](#).

Важно

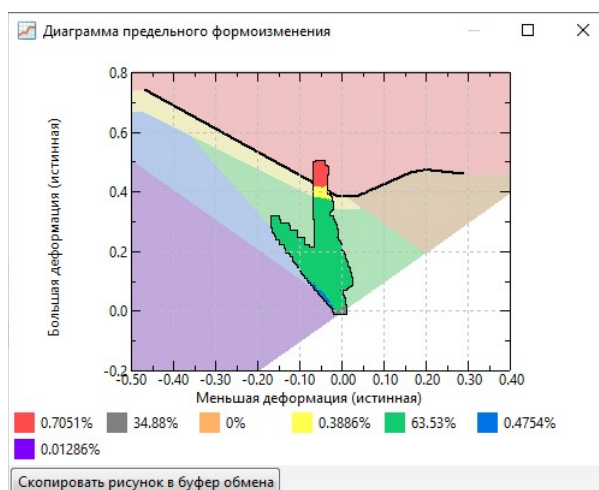
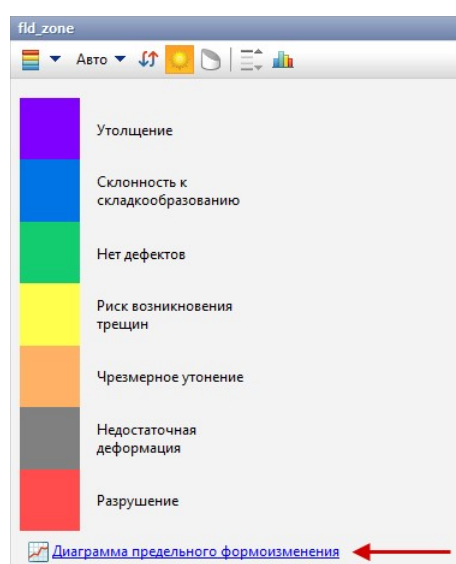


Расчёт подпрограммы *Диаграмма предельного формоизменения* доступен в моделированиях с гексадральной сеточной моделью заготовки, либо с тетраэдральной сеткой и отключенной опцией её переразбиения в процессе расчёта. В последнем случае выходные поля подпрограммы рассчитываются только для элементов приповерхностного слоя сетки.

В ходе моделирования на каждом шаге расчёта для элементов сеточной модели заготовки определяются компоненты тензора деформированного состояния, на основе которых и рассчитываются выходные поля подпрограммы *Диаграмма предельного формоизменения* (далее - подпрограмма). Подпрограмма имеет три выходных поля:



Первое поле *strain1* выводит значения $\epsilon_{\max}$, второе *strain2* - значения $\epsilon_{\min}$, а третье *fld_zone* окрашивает элементы сетки заготовки в цвета зон штампуемости, соответствующих значениям $\epsilon_{\min}$ и $\epsilon_{\max}$ в них. При выборе поля *fld_zone* под шкалой результатов появляется кнопка *Диаграмма предельного формоизменения*, нажатием на которую выводится одноименное окно с диаграммой предельного формоизменения для активного шага расчёта:



Точки на диаграмму нанесены по значениям $\epsilon_{\min}$ и $\epsilon_{\max}$ в элементах сетки заготовки. Если на какой-либо элемент сетки заготовки навести курсор мыши, соответствующая ему точка на диаграмме предельного формоизменения выделится черной рамкой.

В нижней части окна *Диаграмма предельного формоизменения* в процентах представлены значения, показывающие какая доля от общего объема материала заготовки находится в зоне штампуемости соответствующего цвета.

Для корректного расчёта подпрограммы необходимо в базе данных *Деформируемые материалы* для материала заготовки, используемого в моделировании, активировать *Модели исчерпания ресурса пластичности* в разделе *Дополнительные свойства*, после чего нажать на *Редактировать* ниже этого свойства:

Деформируемые материалы

Назначить | Создать | Создать папку | Сохранить | Сохранить как... | Удалить | Экспортировать | Импортировать | Стандарт: Имя файла

Файл проекта
База данных
Сетевая база данных
Стандартные

Тип материала
☒ Однородный ☐ Смесь

Химический состав
[Редактировать](#)

Основные свойства

☒ Сопротивление деформации
Табличная функция [Редактировать](#)

Условие пластичности
[Редактировать](#)

☒ Плотность
Постоянная величина 7851 кг/м³

☐ Теплопроводность
Постоянная величина 63 Вт/мК

☐ Теплоемкость
Постоянная величина 486 Дж/кгК

☒ Модуль Юнга
Постоянная величина 203000 МПа

☒ Козф. Пуассона
Постоянная величина 0.3

☐ Температурный коэф. линейного расширения
Постоянная величина [Редактировать](#)

Дополнительные свойства

☐ Изменение размера зерен
[Редактировать](#)

☒ Модели истощения ресурса пластичности [Редактировать](#)

☐ Диффузия [Редактировать](#)

☐ Электромагнитные свойства
[Редактировать](#)

Комментарий

Свойства

- Сопротивление деформации
- Условие пластичности
- Плотность
- Модуль Юнга
- Козф. Пуассона
- Химический состав
- Модели истощения ресурса пластичности

Из возникшего в результате перечня доступных моделей требуется выбрать модель *Диаграмма предельного формоизменения* и затем нажать *Редактировать* рядом с ней:

Деформируемые материалы

Назначить | Создать | Создать папку | Сохранить | Сохранить как... | Удалить | Экспортировать | Импортировать | Стандарт: Имя файла

Файл проекта
База данных
Сетевая база данных
Стандартные

Модель Колмогорова [Редактировать](#)

Модель Cockcroft & Latham [Редактировать](#)

Модифицированная модель Cockcroft & Latham [Редактировать](#)

Модель Oyane [Редактировать](#)

Модифицированная модель Oyane [Редактировать](#)

Модель Ayada [Редактировать](#)

Модель Brozzo [Редактировать](#)

Модифицированная модель GTN [Редактировать](#)

Модель Johnson & Cook [Редактировать](#)

☒ Диаграмма предельного формоизменения [Редактировать](#)

Свойства

- Сопротивление деформации
- Условие пластичности
- Плотность
- Модуль Юнга
- Козф. Пуассона
- Химический состав
- Модели истощения ресурса пластичности
- Диаграмма предельного формоизменения

В появившемся окне необходимо задать кривую предельного формоизменения. Сейчас в **QForm Stamping** доступны три способа задания:

Кривая предельного формоизменения

Способ задания: Таблица

Тип параметра: Таблица

Меньшая дефо

Выбрать параметр

Модель Abspoel-Scholting-Droog

Модифицированная модель Keeler

файл

При использовании способа задания *Таблица* кривая предельного формоизменения получается путем соединения ломаной линией точек, координаты которых определяются значениями, указанными в ячейках таблицы. В этом случае требуется задать количество вводимых точек кривой предельного формоизменения (1) и соответствующие им значения деформаций $\epsilon_{\min}$ и $\epsilon_{\max}$ (2):

Кривая предельного формоизменения

Способ задания: Таблица

Тип параметра: Меншая деформация (истинная) Количество: 4

[Выбрать параметры](#) [Загрузить данные из файла](#) [Экспортировать в файл](#)

Большая деформация (истинная)

-0.4	0.63
0	0.39
0.3	0.46
0.46	0.46

Меншая деформация (истинная)

С помощью кнопок *Загрузить данные из файла* и *Экспортировать в файл* можно загружать точки кривой предельного формоизменения из *.csv, *.xls или *.xlsx файла, либо экспортировать их в эти файлы. При необходимости, нажав кнопку *Выбрать параметры* (1), в качестве второго аргумента табличной функции, от которого зависит величина $\epsilon_{\max}$ точек кривой предельного формоизменения, можно активировать толщину исходного листового материала (2):

Кривая предельного формоизменения

Способ задания: Таблица

Тип параметра: Меншая деформация (истинная) Количество: 4

[Выбрать параметры](#) [Загрузить данные из файла](#) [Экспортировать в файл](#)

Большая деформация (истинная)

-0.4	0.63
0	0.39
0.3	0.46
0.46	0.46

Меншая деформация (истинная)

Выберите параметры

☒ Меншая деформация (истинная)

☒ Толщина

OK Отмена

Здесь также потребуется указать количество значений толщин, для которых задаётся кривая предельного формоизменения (1), их значения (2) и для каждого из указанных значений величину $\epsilon_{\max}$ при выбранных значениях $\epsilon_{\min}$ (3):

Кривая предельного формоизменения

Способ задания: Таблица

Тип параметра: Меншая деформация (истинная) Количество: 4

Толщина [мм] 3

[Выбрать параметры](#) [Загрузить данные из файла](#) [Экспортировать в файл](#)

Большая деформация (истинная)

-0.4	0.63
0	0.39
0.3	0.46
0.46	0.46

Меншая деформация (истинная)

Толщина [мм]	1	2	4
--------------	---	---	---

При использовании способа задания кривой предельного формоизменения *Модель Abspoel-Scholting-Droog* необходимо задать величины параметров A_{80} , A_{80min} и r (описание принятых обозначений параметров приведено ранее в разделе с информацией о данной модели):

Кривая предельного формоизменения

Способ задания: Модель Abspoel-Scholting-Droog

A_{80} [%] 41.5 A_{80min} [%] 41.5

r 1.9

При использовании способа задания кривой предельного формоизменения *Модифицированная модель Keeler* необходимо задать величину показателя деформационного упрочнения материала n :

Кривая предельного формоизменения	
Способ задания	Модифицированная модель Keeler ▼
n [0,007...0,999]	0.25

Значение толщины исходного листа, используемое в модели Abspoel-Scholting-Droog и модифицированной модели Keeler при определении кривой предельного формоизменения материала, принимается равным толщине используемой в моделировании заготовки.

В окне задания диаграммы предельного формоизменения также задаются параметры зон штампуемости:

Параметры зон	
Rm	1.01 Редактировать
Максимально допустимое утонение	0.4
Граница безопасной области [%]	10
Требуемое утонение	0.01
Допустимое утолщение	0.01

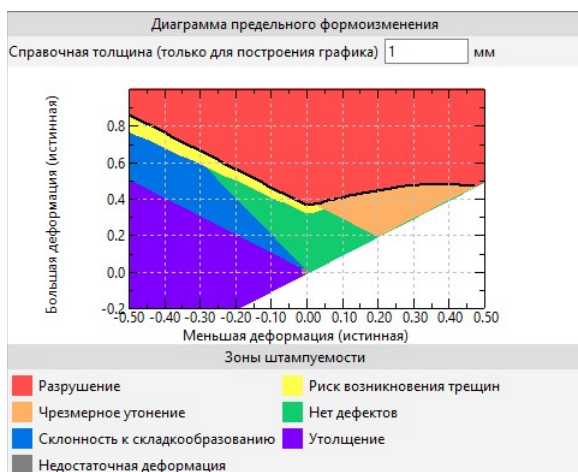
По большей части величина этих параметров определяется требованиями к получаемому изделию. Величина параметра *Граница безопасной области [%]* задаёт величину смещения кривой предельного формоизменения при определении положения зоны *Риск возникновения трещин* и, как правило, принимается равной 10%.



Важно

Большая и меньшая деформации, определяющие точки кривой предельного формоизменения, и параметры зон штампуемости задаются в величинах истинных деформаций.

Ниже зон штампуемости в этом окне отображается координатная плоскость диаграммы передельных деформаций, построенная по введённым данным. При использовании модели Abspoel-Scholting-Droog и модифицированной модели Keeler в поле *Справочная толщина* требуется указать исходную толщину листа, которая будет использоваться только в данном разделе для визуализации положения кривой предельного формоизменения на диаграмме:



Важно

При определении положения зоны разрушения на диаграмме предельного формоизменения в случаях, если величина $\epsilon_{\min}$ или начальная толщина заготовки выходят за пределы области определения кривой предельного формоизменения, заданной в модели материала, предельное значение $\epsilon_{\max}$ не экстраполируется, а принимается равным значению, соответствующему ближайшему из области определения значению $\epsilon_{\min}$ или начальной толщины.

▼ Используемые источники

1. Keeler, S. P.: Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA 1961.
2. Goodwin, G. M.: Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, Society of Automotive Engineers (1968), No. 680093, 380-387.
3. Formability of Metallic Materials : plastic anisotropy, formability testing, forming limits / D. Banabic... Ed. by D. Banabic - Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hong Kong ; London ; Milan ; Paris ; Singapore ; Tokyo : Springer, 2000.
4. D. Banabic (ed.), Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming, ESAFORM Bookseries on Metal Forming, DOI 10.1007/978-3-319-44070-5, 2016.
5. M. Abspoel et al. A new method for predicting Forming Limit Curves from mechanical properties / Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 759-769

Анизотропными называются такие материалы, у которых свойства в разных направлениях отличаются. Металлы состоят из большого числа микроскопических кристаллов, связанных в зерна. Кристалл анизотропен, но поскольку кристаллы в зернах и сами зерна ориентированы друг относительно друга самым различным образом, индивидуальные особенности анизотропии каждого кристалла нивелируются, и часто

поликристаллические металлы можно рассматривать как изотропный материал. Однако в результате пластического деформирования (например, прокатки) при появлении текстуры (системы закономерно ориентированных кристаллитов) поликристаллические металлы становятся анизотропными с различающимися в зависимости от направления механическими свойствами.

Для моделирования пластической обработки заготовок из анизотропных материалов в **QForm Stamping** доступно условие пластичности ортотропного материала, не учитывающее деформационную анизотропию (изотропное упрочнение), предложенное Хиллом [1]. Дополнительную информацию о том, что такое условие пластичности и для чего оно используется можно посмотреть в разделе документации [Критерий пластичности](#).

Для описания поведения анизотропного материала в общем случае Мизесом было предложено следующее условие начала пластичности [2]:

$$A_{1111}\sigma_{xx}^2 + A_{2222}\sigma_{yy}^2 + A_{3333}\sigma_{zz}^2 + 4A_{1212}\sigma_{xy}^2 + 4A_{2323}\sigma_{yz}^2 + 4A_{3131}\sigma_{zx}^2 + 2A_{1122}\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \\ + 2A_{2233}\sigma_{yy}\sigma_{zz} + 2A_{3311}\sigma_{zz}\sigma_{xx} + 4A_{1112}\sigma_{xx}\sigma_{xy} + 4A_{1123}\sigma_{xx}\sigma_{yz} + 4A_{1131}\sigma_{xx}\sigma_{zx} + \\ + 4A_{2212}\sigma_{yy}\sigma_{xy} + 4A_{2223}\sigma_{yy}\sigma_{yz} + 4A_{2231}\sigma_{yy}\sigma_{zx} + 4A_{3312}\sigma_{zz}\sigma_{xy} + 4A_{3323}\sigma_{zz}\sigma_{yz} + \\ + 4A_{3331}\sigma_{zz}\sigma_{zx} + 8A_{1223}\sigma_{xy}\sigma_{yz} + 8A_{2331}\sigma_{yz}\sigma_{zx} + 8A_{3112}\sigma_{zx}\sigma_{xy} = 1,$$

где

σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{zx} - напряжения, первый и второй индексы у которых указывают направления соответственно нормали к площадке с этим напряжением и оси, вдоль которой оно действует;

A_{1111} , ..., A_{3112} - постоянные, общее число которых в этом уравнении равно 21.

У листовых материалов, как правило, наблюдается частный случай анизотропии, называемый ортотропией. Ортотропные тела обладают тремя взаимно перпендикулярными плоскостями симметрии по отношению к механическим свойствам. Если оси x , y и z совместить с осями симметрии ортотропного тела (для листового материала это будут направления прокатки и два направления перпендикулярных к нему), в уравнении выше из соображений симметрии следует отбросить слагаемые, содержащие касательные напряжения в первой степени и произведения различных касательных напряжений. В результате, с учётом ограничений, накладываемых на используемые постоянные, условием отсутствия пластической деформации при всестороннем равном растяжении или сжатии, уравнение Мизеса для общего случая анизотропного тела преобразуется к виду, описывающему начало пластичности ортотропного тела, предложенному Хиллом [2]:

$$H_0(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + F_0(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G_0(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 2N_0\sigma_{xy}^2 + 2L_0\sigma_{yz}^2 + 2M_0\sigma_{zx}^2 = 1,$$

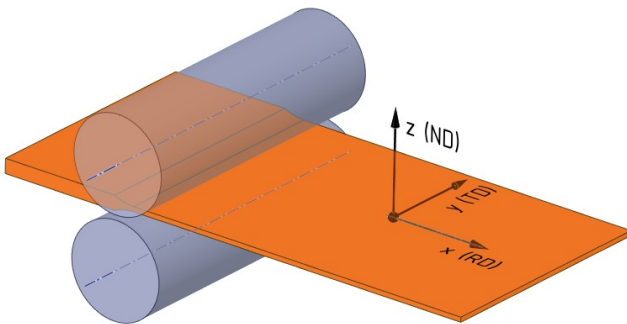
где

H_0 , F_0 , G_0 , N_0 , L_0 , M_0 - константы, производные из постоянных условия пластичности анизотропного материала в общем случае, которые определяются величиной пределов текучести σ_{xxT} , σ_{yyT} , σ_{zzT} , σ_{xyT} , σ_{yzT} , σ_{zxT} для случаев одноосного растяжения в направлении осей x , y , z и сдвигов между ними:

$$H_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{xxT}^2} + \frac{1}{\sigma_{yyT}^2} - \frac{1}{\sigma_{zzT}^2} \right) = \frac{1}{2} (A_{1111} + A_{2222} - A_{3333}), \\ F_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{yyT}^2} + \frac{1}{\sigma_{zzT}^2} - \frac{1}{\sigma_{xxT}^2} \right) = \frac{1}{2} (A_{2222} + A_{3333} - A_{1111}), \\ G_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{zzT}^2} + \frac{1}{\sigma_{xxT}^2} - \frac{1}{\sigma_{yyT}^2} \right) = \frac{1}{2} (A_{3333} + A_{1111} - A_{2222}), \\ N_0 = \frac{1}{2\sigma_{xyT}^2} = 2A_{1212}, \quad L_0 = \frac{1}{2\sigma_{yzT}^2} = 2A_{2323}, \quad M_0 = \frac{1}{2\sigma_{zxT}^2} = 2A_{3131};$$

x , y , z - главные оси анизотропии.

В прокатанной листовой заготовке главная ось анизотропии x коллинеарна направлению прокатки (RD), ось y перпендикулярна (TD), а ось z совпадает с вектором нормали к поверхности листовой заготовки (ND):



Учитывая, что материал в процессе деформирования упрочняется, условие пластичности ортотропного материала без учета деформационной анизотропии, предложенное Хиллом, в общем случае имеет следующий вид:

$$H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 2N\sigma_{xy}^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 = 1,$$

где

H, F, G, N, L, M - параметры, характеризующие текущее состояние анизотропии и отличающиеся от постоянных, используемых в уравнении начала пластичности ортотропного тела, рассмотренного выше, тем, что для их определения используются не пределы текучести, а текущие сопротивления деформации $\sigma_{xxS}, \sigma_{yyS}, \sigma_{zzS}, \sigma_{xyS}, \sigma_{yzS}, \sigma_{zxS}$ для случаев одноосного растяжения в направлении осей x, y, z и сдвигов между ними:

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{xxS}^2} + \frac{1}{\sigma_{yyS}^2} - \frac{1}{\sigma_{zzS}^2} \right),$$

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{yyS}^2} + \frac{1}{\sigma_{zzS}^2} - \frac{1}{\sigma_{xxS}^2} \right),$$

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{zzS}^2} + \frac{1}{\sigma_{xxS}^2} - \frac{1}{\sigma_{yyS}^2} \right),$$

$$N = \frac{1}{2\sigma_{xyS}^2}, \quad L = \frac{1}{2\sigma_{yzS}^2}, \quad M = \frac{1}{2\sigma_{zxS}^2}.$$

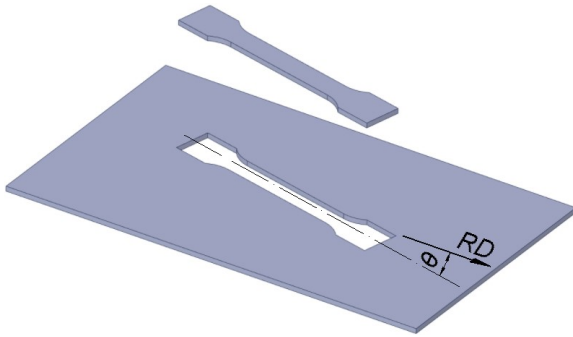
При определении анизотропии листового материала зачастую используются коэффициенты пластической анизотропии R_θ (также называемый коэффициентами Лэнкфорда и R -коэффициентами), определяемые из испытаний на одноосное растяжение плоских образцов по ISO 10113 как:

$$R_\theta = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t},$$

где

ϵ_w и ϵ_t - истинная пластическая деформация испытуемого образца по ширине и толщине соответственно,

θ - числовой индекс, отражающий ориентацию расположения образца в исследуемом листовом материале и равный углу между продольной осью образца и направления проката листа RD :



Параметры F, G, H и N связаны с коэффициентами пластической анизотропии листового материала R_0, R_{45} и R_{90} следующими зависимостями [3]:

$$F = \frac{1}{\sigma_{xxS}^2} \frac{R_0}{R_{90}(1+R_0)}, \quad G = \frac{1}{\sigma_{xxS}^2} \frac{1}{R_0+1}, \quad H = \frac{1}{\sigma_{xxS}^2} \frac{R_0}{R_0+1},$$

$$N = \frac{1}{\sigma_{xxS}^2} \frac{(2R_{45}+1)(R_0+R_{90})}{2R_{90}(1+R_0)};$$

где

R_0, R_{45} и R_{90} - коэффициенты пластической анизотропии, определенные из испытаний образцов, вырезанных вдоль направления проката и под углом 45° и 90° к направлению проката.

Параметры L и M для листового материала определить невозможно и, как правило, их принимают равными параметру N .

► Сравнение уравнений начала пластичности изотропного и ортотропного материалов для операций листовой штамповки с плоским напряженным состоянием

Для операций листовой штамповки с плоским напряженным состоянием в деформируемой заготовке ($\sigma_{zz}=\sigma_{xz}=\sigma_{yz}=0, \sigma_{xx} \neq 0, \sigma_{yy} \neq 0, \sigma_{xy} \neq 0$) уравнение начала пластичности ортотропного тела преобразуется к виду:

$$(H_0 + G_0)\sigma_{xx}^2 - 2H_0\sigma_{xx}\sigma_{yy} + (H_0 + F_0)\sigma_{yy}^2 + 2N_0\sigma_{xy}^2 = 1.$$

В пространстве главных напряжений это уравнение принимает вид:

$$(H_0 + G_0)\sigma_I^2 - 2H_0\sigma_I\sigma_{II} + (H_0 + F_0)\sigma_{II}^2 = 1 \Leftrightarrow \sigma_I^2 - \frac{2R_0}{R_0+1}\sigma_I\sigma_{II} + \frac{R_0(1+R_{90})}{R_{90}(1+R_0)}\sigma_{II}^2 = \sigma_{xxT}^2,$$

где

σ_I, σ_{II} - соответственно большее и меньшее главное напряжение в поверхности листовой заготовки.

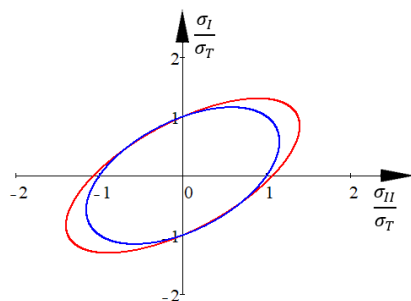
Условие начала пластичности Мизеса для изотропного материала, в случае с плоским напряженным состоянием в операциях листовой штамповки имеет вид [1]:

$$\sigma_I^2 - \sigma_I\sigma_{II} + \sigma_{II}^2 = \sigma_T^2,$$

где

σ_T - предел текучести материала.

Ниже представлено графики, соответствующие рассмотренным выше уравнениям начала пластичности в случае изотропного и ортотропного тела для одного материала из стандартной базы данных **QForm Stamping**, у которого коэффициенты R_0 и R_{90} равны 1.5 и 2.2.



где

- график, соответствующий условию Хилла,
- график, соответствующий условию Мизеса.

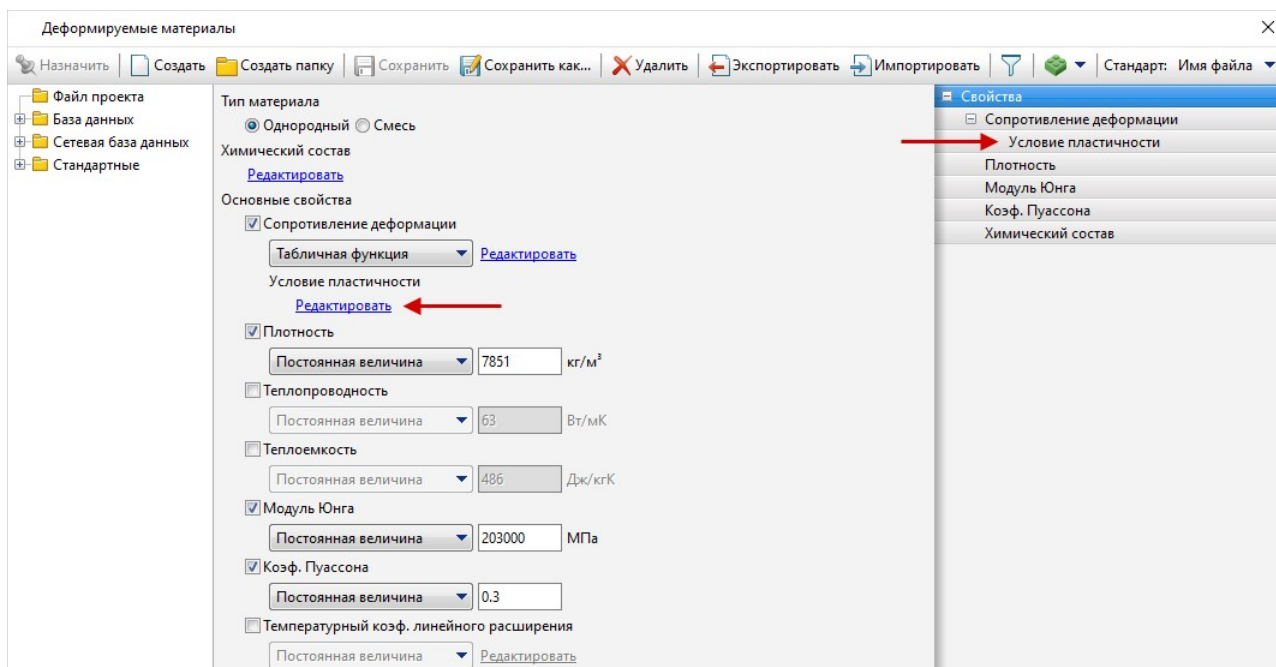
Для учёта при моделировании в QForm Stamping анизотропии свойств листовой заготовки, необходимо в расчёте использовать материал заготовки, у которого в качестве условия пластичности применено условие Хилла-Мизеса.



Важно

При подготовке исходных данных для моделирования обработки анизотропной листовой заготовки с использованием условия пластичности Хилла-Мизеса, необходимо соблюдать следующие требования к ориентации заготовки в пространстве: направление прокатки в заготовке должно быть коллинеарно оси X системы координат в **QForm Stamping**, направление перпендикулярное направлению прокатки - оси Y, а толщина - оси Z.

Чтобы выбрать условие пластичности Хилла-Мизеса, необходимо в базе данных *Деформируемые материалы* для используемого материала заготовки зайти в раздел *Условие пластичности*, нажав на кнопку *Редактировать* под этим параметром в разделе *Основные свойства*, либо выбрав пункт *Условие пластичности* в списке задаваемых свойств в правой части окна *Деформируемые материалы*:



Затем нужно выбрать условие пластичности Хилла-Мизеса и задать его коэффициенты. При этом условие пластичности Хилла-Мизеса может быть задано одним из двух доступных способов: либо шестью постоянными уравнения Хилла начала пластичности ортотропного тела H_0 , F_0 , G_0 , N_0 , L_0 , M_0 :

Деформируемые материалы

Назначить Создать Создать папку Сохранить Сохранить как... Удалить Экспортировать Импортировать Стандарт: Имя файла

Файл проекта База данных Сетевая база данных Стандартные

☐ Мизес (изотропное упрочнение)
☐ Мизес (кинематическое упрочнение)
☒ Хилла-Мизеса (FGHLMN коэффициенты) (изотропное упрочнение)
☐ Хилла-Мизеса (R коэффициенты) (изотропное упрочнение)
☐ Gurson-Tvergaard-Needleman

Постоянная величина МПа

H F G
N L M

R0 R45 R90 Rm

Редактировать

Свойства
 Соппротивление деформации
 Условие пластичности
 Плотность
 Модуль Юнга
 Коэф. Пуассона
 Химический состав

либо тремя коэффициентами пластической анизотропии R_0 , R_{45} и R_{90} :

Деформируемые материалы

Назначить Создать Создать папку Сохранить Сохранить как... Удалить Экспортировать Импортировать Стандарт: Имя файла

Файл проекта База данных Сетевая база данных Стандартные

☐ Мизес (изотропное упрочнение)
☐ Мизес (кинематическое упрочнение)
☒ Хилла-Мизеса (FGHLMN коэффициенты) (изотропное упрочнение)
☐ Хилла-Мизеса (R коэффициенты) (изотропное упрочнение)
☐ Gurson-Tvergaard-Needleman

Постоянная величина МПа

H F G
N L M

R0 R45 R90 Rm

Редактировать

Свойства
 Соппротивление деформации
 Условие пластичности
 Плотность
 Модуль Юнга
 Коэф. Пуассона
 Химический состав



Важно

При подготовке модели анизотропного материала с условием пластичности Хилла-Мизеса и определении зависимостей сопротивления деформации, необходимо учитывать, что эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ и деформации $\epsilon_{\text{экв}}$ не равны нормальному напряжению и деформации вдоль оси плоского образца, возникающим при его испытании на одноосное растяжение.

Так, в случае одноосного растяжения образца вдоль его продольной оси, совпадающей с направлением проката ($\sigma_{xx} \neq 0$, $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$), из уравнений для эквивалентных напряжений и приращения деформаций вдоль оси x в общем случае получаем следующее [1]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \left\{ \frac{3}{2(H_0 + F_0 + G_0)} \left[H_0(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + F_0(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G_0(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 2N_0\sigma_{xy}^2 + 2L_0\sigma_{yz}^2 + 2M_0\sigma_{zx}^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma_{\text{экв}} = \sigma_{xx} \left\{ \frac{3(H_0 + G_0)}{2(H_0 + F_0 + G_0)} \right\}^{\frac{1}{2}} = \sigma_{xx} \left\{ \frac{3(R_0 + 1)}{2(R_0 + R_0/R_{90} + 1)} \right\}^{\frac{1}{2}};$$

$$d\epsilon_{xx}^p = \frac{3}{2(H_0 + F_0 + G_0)} \frac{d\epsilon_{xx}^p}{\sigma_{\text{экв}}} [H_0(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) + G_0(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})] = d\epsilon_{xx}^p \left\{ \frac{3(R_0 + 1)}{2(R_0 + R_0/R_{90} + 1)} \right\}^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d\epsilon_{\text{экв}}^p = \frac{d\epsilon_{xx}^p}{\left\{ \frac{3(R_0 + 1)}{2(R_0 + R_0/R_{90} + 1)} \right\}^{\frac{1}{2}}}.$$

Аналогично получаются уравнения для случая одноосного растяжения образца вдоль его продольной оси, направленной перпендикулярно направлению проката ($\sigma_{yy} \neq 0$, $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$):

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{yy} \left\{ \frac{3(R_{90} + 1)}{2(1 + R_0/R_{90} + R_{90})} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$d\epsilon_{\text{экв}}^p = \frac{d\epsilon_{yy}^p}{\left\{ \frac{3(R_{90} + 1)}{2(1 + R_0/R_{90} + R_{90})} \right\}^{\frac{1}{2}}}.$$

Используемые источники

1. Hill, R., A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, *Proceedings of the Royal Society of London Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(A), 1948, 281-297.
2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1975, 400 с. с ил.
3. Formability of Metallic Materials : plastic anisotropy, formability testing, forming limits / D. Banabic... Ed. by D. Banabic - Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hong Kong ; London ; Milan ; Paris ; Singapore ; Tokyo : Springer, 2000.