

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**Моделирование процессов штамповки деталей  
в программном комплексе FormingSuite**

Электронные методические указания

САМАРА

2011

УДК СГАУ: 621.771.001.1

Составители: **Ерисов Ярослав Александрович,**  
**Шляпугин Алексей Геннадьевич,**  
**Хардин Михаил Викторович**

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.Д. Проничев

**Моделирование процессов штамповки деталей в программном комплексе FormingSuite** [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. Я.А. Ерисов, А.Г. Шляпугин, М.В. Хардин. - Электрон. текстовые и граф. дан. (4,81 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM). - Систем. требования: ПК Pentium; Windows 98 или выше.

Приведены общие сведения о программном обеспечении FormingSuite и описаны процедуры, связанные с подготовкой геометрической модели, заданием свойств материалов, выбором параметров расчёта задачи. Показаны инструменты, позволяющие оценить эффективность видов раскроя, провести анализ пружинения и полученных результатов расчета. Приведены примеры использования программного обеспечения для расчета технологических процессов.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся в бакалавриате и магистратуре по направлению подготовки 150400 «Металлургия».

Методические указания разработаны на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ <i>FORMINGSUITE</i> .	7
1.1 Модули <i>FormingSuite</i> .....	7
1.2 Интерфейс программы .....	11
2 ПОДГОТОВКА ЗАДАЧИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТА (ПРЕПРОЦЕССИНГ) И РАСЧЕТ .....	17
2.1 Подготовка геометрии .....	17
2.1.1 Импорт твердотельной модели .....	17
2.1.2 Импорт поверхностной модели .....	20
2.1.3 Редактирование геометрии .....	21
2.2 Задание материала .....	26
2.2.1 Описание свойств материала .....	26
2.2.2 Выбор материала .....	29
2.2.3 Создание и редактирование материалов .....	30
2.3 Задание граничных условий процесса .....	34
2.3.1 Задание условий трения .....	34
2.3.2 Задание движения инструмента .....	35
2.3.3 Взаимодействие инструмента с заготовкой .....	37
2.4 Построение сетки конечных элементов .....	39
2.4.1 Генерирование сетки конечных элементов .....	40
2.4.2 Редактирование сетки конечных элементов .....	42
2.5 Задание дополнительных граничных условий .....	43
2.5.1 Усилие прижима .....	43
2.5.2 Перетяжные пороги и ребра .....	47
2.5.3 Наложение ограничений .....	49
2.6 Запуск вычислений .....	53
3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА (ПОСТПРОЦЕССИНГ) .....	54
3.1 Диаграмма предельных деформаций (FLD) .....	60
3.2 Оценка запаса прочности .....	65
3.3 Определение силовых характеристик процесса .....	65
4 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ В СРЕДЕ <i>FORMINGSUITE</i> .....	67
4.1 Оценка различных вариантов раскроя .....	67
4.2 Параметры раскроя .....	68
4.2.1 Предварительная оценка стоимости вырубного штампа .....	71
4.3 Анализ пружинения .....	74
5 ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ <i>FORMINGSUITE</i> .....	75
5.1 Моделирование гибки. Оценка вариантов раскроя .....	75
5.1.1 Геометрия изделия .....	76
5.1.2 Параметры процесса .....	78
5.1.3 Просмотр результатов моделирования .....	83
5.1.4 Расчет гибки в штампе .....	85
5.1.5 Расчет вариантов раскроя .....	88
5.2 Расчет пружинения после гибки .....	90

5.2.1	Геометрия изделия.....	90
5.2.2	Параметры процесса.....	97
5.2.3	Просмотр результатов моделирования .....	102
5.2.4	Анализ пружинения.....	104
5.3	Моделирование вытяжки коробчатого изделия .....	107
5.3.1	Геометрия изделия.....	109
5.3.2	Параметры процесса.....	115
5.3.3	Просмотр результатов моделирования .....	121
5.3.4	Расчет проекта с альтернативными параметрами .....	125

## ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение программного обеспечения моделирующего физические и социальные явления характерно для любой области хозяйственной деятельности от финансового прогнозирования и складской логистики до конструкторских расчетов и проработки технологических вопросов обеспечения качества при производстве.

Активно используется программное обеспечение и для моделирования процессов обработки металлов давлением, а такие программы как *Autoform*, *SuperForge*, *Pam-Stam*, *FormingSuite*, *Ls-Dyna* позволяют описать листовую штамповку. Перечисленные программы не только позволяют выполнить «симуляцию» процесса и всесторонне рассмотреть его особенности, но также обладают дополнительным набором инструментов позволяющим выполнить предварительный анализ вероятности образования брака, оценить коэффициент использования материала при различных вариантах раскроя, внести изменения в геометрическую модель, учесть пружинение.

Особо следует отметить учет большого количества свойств материала: анизотропии, различный характер упрочнения, пружинение, влияние скорости деформаций и температуры, кристаллической структуры. Все свойства обычно закрепляются за материалом в библиотеке материалов и пользователь каждый раз не вводит их в программу, что позволяет избежать значительного количества ошибок.

При этом программное обеспечение создается разработчиками таким образом, что пользователь как правило и не знает о всей сложной математике которая позволяет выполнить расчет. При работе инженер оперирует известными ему величинами и понятиями: геометрическими размерами изделия, механическими характеристиками инструмента и заготовки, техническими данными оборудования.

Изучение студентами программного обеспечения для моделирования процессов листовой штамповки в ходе обучения позволяет более детально самостоятельно разбирать специфику формоизменения и разрабатывать творческие предложения по улучшению технологии.

Данное пособие ориентировано на студентов 4-5 курсов выполняющих работу над курсовым проектом по листовой штамповки и предназначено для самостоятельного освоения программного обеспечения *FormingSuite*.

Программа *FormingSuite* является разработкой канадской фирмы *Forming Technologies Incorporated (FTI)*, которая является мировым лидером в области создания инженерного программного обеспечения для проектирования процессов листовой штамповки.

В первой главе работы приведены общие сведения о программном обеспечении *FormingSuite*, во второй главе описаны процедуры связанные с подготовкой геометрической модели, заданием свойств материалов, выбором параметров расчета задачи. В третьей главе показаны инструменты позволяющие оценить полученные результаты расчета. Оценка эффективности видов раскроя и анализ пружинения приведены в главе 4. В главе 5 приведены примеры использования программного обеспечения для расчета технологических процессов.

# 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ

## *FORMINGSUITE*

Программное обеспечение *FormingSuite* разрабатывается канадской фирмой *Forming Technologies Incorporated (FTI)*, которая была основана в 1989 году. Специализированный программный комплекс *FormingSuite* позволяет выполнять анализ штампуемости изделия, построение развертки, определение оптимального раскроя, расчет стоимости изделия, моделирование процесса штамповки, и предназначен в первую очередь для конструкторов, технологов, нормировщиков и менеджеров по закупкам материалов. *FormingSuite* предоставляет возможность проверить, отработать и оптимизировать конструкцию изделия непосредственно на стадии его конструкторской разработки. Благодаря этому существенно сокращаются сроки выпуска продукции, повышается ее качество и снижается себестоимость.

Программа *FormingSuite* применяется в различных отраслях промышленности: автомобилестроение, авиация/космонавтика, электроника/электрика, машиностроение, приборостроение и т.д. Так как гибкая модульная структура *FormingSuite* позволяет пользователю выбрать оптимальный набор модулей под номенклатуру решаемых задач.

### 1.1 Модули *FormingSuite*

Программное обеспечение *FormingSuite* может быть составлено из различных модулей: *FastBlank*, *BlankNest*, *ProgNest* и т.д. Остановимся подробнее на каждом из них.

Модуль *FastBlank* предназначен для быстрого и точного расчета оптимальной формы заготовки с учетом деформации и утонения материала. Разработан специально для нужд нормировщиков, конструкторов деталей и штампов, менеджеров по закупкам материалов.

Основные возможности модуля *FastBlank*:

- Простой и логический пользовательский интерфейс. Построен на знакомой среде Microsoft Windows, для новичков создана on-line справка.

- База данных материалов. Хранящиеся в базе данных материалы содержат в себе всю информацию, необходимую для запуска расчета. Структура базы данных позволяет добавлять, удалять или редактировать любой материал из базы данных.

- Геометрические инструменты. Обширный набор простых в использовании инструментов, которые позволяют изменить или исправить импортированную геометрию.

- Автоматическое или ручное позиционирование заготовки относительно направления вытяжки. Отображение элементов с поднутрением.

- Быстрый решатель. Большинство деталей может быть рассчитано в период от 30 секунд до 5 минут.

- Экспорт. Заготовка может быть экспортирована в формате *IGES* или *DXF* для последующего использования в любой *CAD* системе.

- Отчет. Итоговый *HTML* отчет отображает результаты и может быть сохранен или распечатан в дальнейшем.

Модуль *BlankNest* предназначен для раскроя заготовок в рулоне. Автоматически вычисляет наилучший вариант раскроя, проводя оптимизацию на основе ширины рулона и величины перемычек.

Основные возможности модуля *BlankNest*:

- Несколько форматов импорта геометрии *IGES* и *DXF* (только линии и дуги).

- Гибкая настройка – возможность применять дополнительные ограничения на величину шага, ширину рулона, угол поворота заготовки, которые накладывают параметры оборудования и требования к изделию.

- Несколько шаблонов раскроя – создание оптимизированного одинарного или парного раскроя.

- Составной раскрой. Возможен раскрой двух различных или зеркальных деталей, которые будут производиться совместно.

- Расчет стоимости. Точный расчет стоимости заготовки на основе введенных данных и коэффициента использования материала.

- Интерактивные результаты. Сортировка результатов в интерактивной таблице по таким параметрам как коэффициент использования материала, ширина рулона, шаг, угол поворота и сдвиг заготовки. При нажатии мышкой по какому-либо результату можно увидеть альтернативные варианты раскроя.

- Экспорт. Текущий вариант раскроя может быть экспортирован в формате *IGES* и *DXF* для последующего использования в других приложениях.

- Отчет. Подробный отчет показывает раскрой и рассчитанные результаты. В дальнейшем данный отчет может быть распечатан.

Модуль *ProgNest* используется для оптимизации схем раскроя заготовки на ленте, обрабатываемых в штампах последовательного действия. Позволяет автоматически найти лучшее расположение заготовок на ленте, учитывая различные схемы раскроя.

Особенности модуля *ProgNest*:

- Полная автоматизация расположения заготовок и перемычек для максимального использования материала (применение различных схем раскроя).

- Возможность определения пользователем расположения и размера перемычек.

- Учитывает ширину ленты, шаг штамповки, угол поворота заготовки, возможности оборудования на производстве.



- Резкое сокращение рисков, связанных с неточным вычислением стоимости материала; уменьшает погрешность между рассчитанными и фактическими расходами с 25% до 1-2%.
- Более точная оценка отходов материала.
- Вычисляет точную стоимость заготовки, учитывая различные схемы раскроя, а так же толщину и ширину рулона и коэффициент использования материала.
- Подробный отчет полученных результатов в *HTML*-формате.

Модуль *FastForm* предоставляет конструкторам изделий и штамповой оснастки инструмент для быстрой оценки и проверки штампуемости изделий. Проверочные расчеты производятся на основе только геометрии, для ранней стадии проектирования, или на основе всего формообразующего инструмента с учетом прижима, перетяжных ребер для большей точности.

Особые возможности модуля *FastForm*:

- Рассчитывает точную форму заготовки для повышения коэффициента использования материала.
- Позволяет проверить штампуемость на ранних стадиях разработки изделия.
- Результаты являются ориентирами для выбора материала, размера и формы заготовки, прижима и перетяжных ребер.
- Наглядное отображение результатов расчетов в графическом окне в виде величин утонения, зон разрывов и гофрообразования.
- Пополняемая база данных материалов позволяет задать любой материал для расчета.
- *HTML* отчет содержит итоговую информацию о разрабатываемом изделии и процессе.
- Простой и интуитивный интерфейс программы очень удобен для пользователей.

Модуль *FastForm MultiStage* предназначен для анализа и проверки штампуемости изделий, получаемых за несколько штамповочных операций. Использует гибридную технологию расчетов, которая сочетает возможность быстро определить форму заготовки и рассчитать напряженно-деформированное состояние с помощью пошагового решателя, учитывающего деформации, полученные на предыдущей операции, при переходе к следующему этапу штамповки.

Основные возможности модуля *FastForm MultiStage*:

- Удобный и простой в освоении интерфейс пользователя делает работу с программой очень удобной.
- Учитывает формы изделия и условия штамповки на отдельных операциях.

- Расчет точной линии обрезки и формы заготовки для многооперационной штамповки.
- Результаты расчета являются рекомендуемыми для выбора схем раскроя, материала, размера заготовки, расположения линии обрезки, выбора прижима и усилия прижима.
- Упрощает интерпретацию результатов, отображает штампуемость изделия: разрывы, складкообразование и степень утонения.

- Подробный отчет полученных результатов в *HTML* и *XLS* форматах.

Модуль *FastForm Advanced* предназначен для определения результатов штампуемости при разработке конструкции сложных вытяжных штампов. Моделирование проводится с учетом таких технологических параметров как трение, усилие прижима, наличие демпферов, перетяжных ребер и сварных заготовок.

Основные возможности модуля *FastForm Advanced*:

- Настраиваемая база данных материалов с возможностью добавления собственных материалов.
- Автоматический генератор сетки делает легким процесс построения конечно-элементной сетки. Возможно зашивка отверстий и отображение поднутрений.
- Возможность создания поверхностей при импортировании твердотельного объекта.
- Содержит инструменты, позволяющие учитывать воздействие прижима, перетяжных ребер, установочных отверстий и других ограничений.
- Создание или импорт криволинейной поверхности прижима для обеспечения устойчивого процесса вытяжки.
- Определение окончательной формы детали с учетом пружинения и обрезки.
- Использование сборных или сварных деталей. Позволяет назначать различные марки материалов для различных областей детали.
- Доступны 5 видов стандартных контуров обрезного инструмента
- Предопределение размеров заготовки пользователем на основе на штампуемости изделия.

Модуль *CostOptimizer (Advanced)* использует модуль *FastBlank (FastForm Advanced)* для быстрого и точного получения формы заготовки и модуль *BlankNest* для разработки различных схем раскроя в определении величины отходов при заготовительных операциях.

Особые возможности модуля *CostOptimizer (Advanced)*:

- Определение штампуемости и опасных зон в изделии.
- Расчет стоимости изделия с учетом цены и коэффициента использования материала.

- Мгновенный анализ различных схем раскроя с автоматической оптимизацией расположения заготовки.

- Возможность применять дополнительные ограничения на величину шага, ширину ленты, угол поворота заготовки, которые накладывают параметры оборудования и требования к изделию.

Модуль *FastIncremental* используется для подробного конечно-элементного анализа процесса штамповки с применением решателя *LS-Dyna*. Предназначен для пользователей с ограниченными знаниями метода конечных элементов, так как управление анализом, пре- и постобработка происходит через графический интерфейс *FormingSuite*.

Основные возможности модуля *FastIncremental*:

- Автоматическое определение размера, формы и расположения заготовки.

- Расчет фланцев и перемычек на основе технологии инверсии.

- Автоматическое построение геометрии инструмента на базе первоначальной формы изделия.

## 1.2 Интерфейс программы

После запуска программы появляется главное окно *FormingSuite* (рис. 1), состоящее из главного меню, панели инструментов, дерева проекта и помощника. Остановимся подробнее на каждом из них.

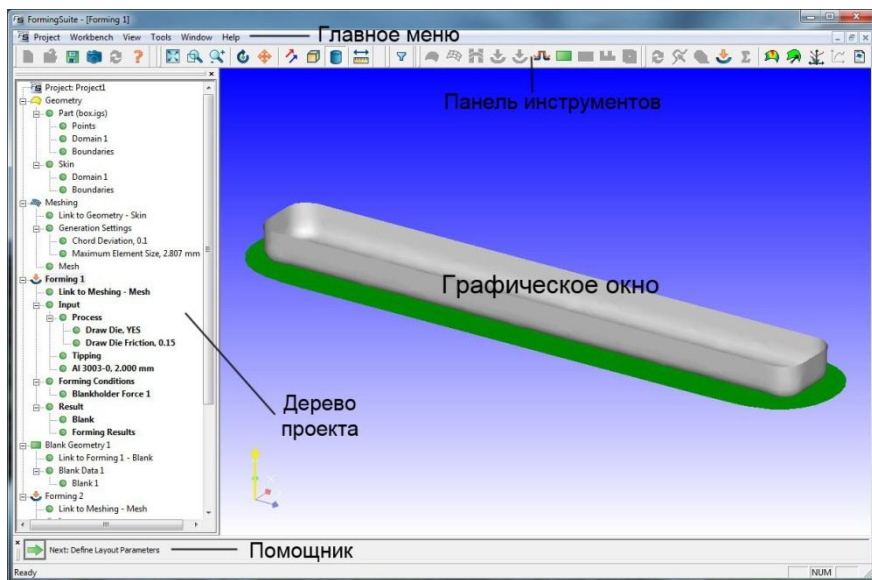


Рис. 1. Главное окно *FormingSuite*

Главное меню в зависимости от того какой из модулей *FormingSuite* запущен в данный момент может состоять из следующих меню: **Project** – открытие, создание и сохранение проектов (рис. 2, а); **Workbench** – задание параметров моделируемого процесса (геометрия, конечно-элементная сетка, наложение ограничений и т.п.) (рис. 2, б); **View** – управление и настройка графического окна (рис. 2, в); **Tools** – доступ к базе материалов, управление лицензией, установки фильтров и изменение настроек программы (рис. 2, г); **Window** – настройка и переход по окнам программы и **Help** – вызов справки (рис. 2, д). Практически все элементы главного меню также доступны через панель инструментов.

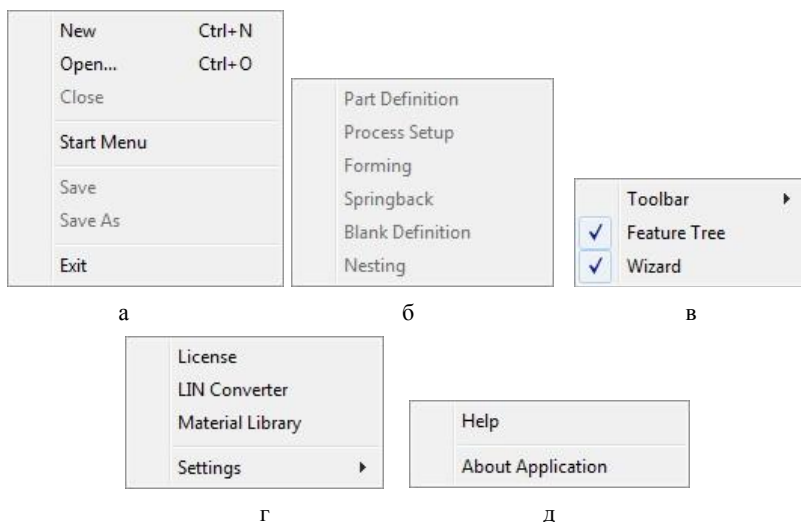


Рис. 2. Главное меню *FormingSuite*

Через панель инструментов осуществляется доступ и редактирование практически всех параметров моделируемого процесса формообразования, при этом на различных этапах описания задачи содержимое панели изменяется. Описание основных элементов панели инструментов приведено в табл. 1.

Табл. 1. Панель инструментов *FormingSuite*




Иконка	Название	Описание
Кнопки управления проектом		
	<i>New Project</i>	Создает новый проект
	<i>Open</i>	Позволяет открыть ранее сохраненные проекты
	<i>Save</i>	Сохраняет текущий проект





Табл. 1. Продолжение

	<i>Capture Screen</i>	Захватывает содержимое графического окна и сохраняет его в файл
	<i>Regenerate</i>	Заново генерирует проект после внесения в него изменений
	<i>Help</i>	Открывает справку по программе
Кнопки управления изображением на экране		
	<i>Fit</i>	Вписывает все объекты в графическое окно
	<i>Zoom Window</i>	Увеличивает часть графического окна: щелкните левой клавишей мыши и, не отпуская ее, растяните рамку на всю увеличиваемую область
	<i>Zoom</i>	Позволяет динамически масштабировать графическое окно, при удержании левой кнопки мыши и перемещении мыши вверх или вниз
	<i>Rotate</i>	Позволяет вращать геометрический объект в графическом окне, при удержании левой кнопки мыши и перемещении мыши
	<i>Pan</i>	Позволяет динамически перемещать объекты в графическом окне, с помощью перемещения мыши при удерживании левой кнопки мыши
	<i>Synchronize Views</i>	Синхронизирует изображение во всех графических окнах одного проекта
	<i>View</i>	Открывает доступ к меню, которое позволяет изменить ориентацию объекта в графическом окне
	<i>Shading</i>	Включает или отключает полутоновое изображение объектов в графическом окне
	<i>Measure</i>	Позволяет осуществлять замер расстояния между любыми двумя точками
	<i>Selection Filter</i>	Открывает доступ к меню, управляющего настройками фильтра выбора объектов в графическом окне
Кнопки запуска модулей программы		
	<i>Geometry</i>	Запускает интерфейс для работы с геометрией
	<i>Process Setup</i>	Запускает интерфейс для задания параметров процесса формообразования
	<i>Springback</i>	Запускает интерфейс для анализа пружинения
	<i>Blank Geometry</i>	Запускает интерфейс для расчета и создания заготовки
	<i>Nesting</i>	Запускает интерфейс для расчета вариантов раскроя

Табл. 1. Продолжение

Кнопки для работы с геометрией		
	<i>Import Geometry</i>	Открывает окно для импорта геометрии объекта
	<i>Create Domain on Part/Skin</i>	Объединяет связанные и/или касательные поверхности в общую группу
	<i>Create Skin</i>	Создает поверхности, по которым будут выполняться расчеты
	<i>Operations on Lines</i>	Открывает доступ к меню, которое позволяет производить различные действия над линиями
	<i>Create Point</i>	Создает точки на геометрии
	<i>Fill Holes</i>	Удаляет ненужные отверстия, имеющиеся на геометрии объекта
	<i>Fill Notches</i>	Удаляет ненужные вырезы, имеющиеся на геометрии объекта
	<i>Split Surface</i>	Позволяет разделить поверхность по линии
Кнопки для работы с сеткой конечных элементов		
	<i>Generate Mesh</i>	Генерирует сетку конечных элементов
	<i>Edit Mesh</i>	Позволяет редактировать параметры уже сгенерированной сетки конечных элементов
	<i>Import Mesh</i>	Открывает окно для импорта предварительно созданной сетки конечных элементов
Кнопки настройки параметров процесса		
	<i>Material</i>	Задаёт материал заготовки
	<i>Punch Direction</i>	Определяет направление движения пуансона в процессе формообразования
	<i>Forming Conditions</i>	Открывает доступ к меню, через которое задаются различные параметры процесса формообразования (усилие прижима, ограничения и т.п.)
	<i>Solve</i>	Запускает вычисление процесса формообразования
Кнопки для работы с заготовкой		
	<i>Import Blank</i>	Открывает окно для импорта геометрии заготовки
	<i>Create Addendum</i>	Равномерно увеличивает контур заготовки на заданную величину
	<i>Smoothing</i>	Упрощает контур заготовки линиями, дугами и сплайнами
	<i>User Defined Blank</i>	Создание геометрии заготовки вручную

Табл. 1. Окончание

Кнопки расчета раскроя		
	<i>Blank Die Cost</i>	Определение программы выпуска и стоимости заготовительных штампов
	<i>Layout Parameters</i>	Задание параметров раскроя (ширина перемычек)
	<i>Layout Constrain</i>	Открывает доступ к меню, через которое можно задать ограничения для раскроя (шаг и угол раскроя, ширина полосы)
	<i>Solve</i>	Запускает расчет вариантов раскроя

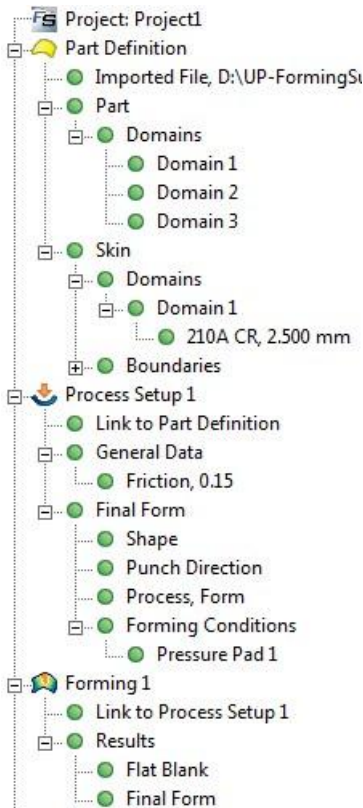



Рис. 3. Дерево проекта

В дереве проекта (рис. 3) отображаются все действия, произведенные при моделировании, поэтому через него наиболее удобно редактировать, удалять или добавлять параметры процесса. Для этого необходимо или двойным

щелчком левой кнопки мыши по интересующему элементу открыть окно для его редактирования, или щелчком правой кнопки мыши вызвать контекстное меню, содержащее все доступные действия над выбранным элементом дерева проекта.

На начальном этапе работы с *FormingSuite* рекомендуется пользоваться помощником, который подскажет, в какой последовательности необходимо вводить исходные данные, и проведет по всем основным этапам моделирова-

ния. Для работы с помощником нажимайте кнопку , расположенную в нижней части главного окна, при этом будут открываться окна для задания параметров процесса. Помощник позволяет определить все основные параметры необходимые для выполнения вычислений, однако большинство параметров требуется вводить, используя главное меню или панель инструментов.



## 2 ПОДГОТОВКА ЗАДАЧИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТА (ПРЕПРОЦЕССИНГ) И РАСЧЕТ



### 2.1 Подготовка геометрии

*FormingSuite* оснащен набором базовых инструментов для редактирования, упрощения и исправления импортированной геометрии. Данный инструментарий предназначен только для выполнения элементарных задач, например, для удаления и создания объектов или деления поверхностей. Более сложные операции по редактированию геометрии, например, создание поверхностей, изменение размеров и т.д., невозможно выполнить средствами *FormingSuite*, поэтому все изменения необходимо произвести в любой CAD системе, например, *Unigraphics NX7*, перед передачей геометрии в *FormingSuite*.

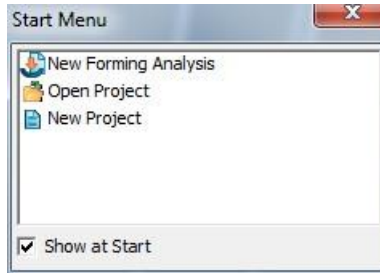
#### 2.1.1 Импорт твердотельной модели

Перед импортированием в *FormingSuite* геометрию, подготовленную средствами любой CAD системы, необходимо сохранить в одном из следующих графических форматов: *IGES*, *STEP* или *VDA*. Подготовленная модель должна быть создана или в твердотельном виде, или в виде набора поверхностей. Не допускается использование каркасных моделей, т.к. они не содержат достаточно данных для выполнения анализа.

Для импортирования геометрии необходимо указать *New Forming Analysis* в стартовом окне *Start Menu* (рис. 4), после этого автоматически откроется стандартное окно проводника для выбора файла (рис. 4, б). В выпадающем меню **Тип файлов** укажите один из доступных форматов файла (*IGES*, *STEP* или *VDA*), а затем введите путь к открываемому файлу и нажмите кнопку **Открыть**.

Кроме того импортировать геометрию можно нажав на значок *New Project*  на панели инструментов, а затем на кнопку *Next: Import Geometry*  на панели помощника. После этого автоматически откроется окно выбора файла (рис. 4, б).

Анализ формоизменения листового металла в *FormingSuite* осуществляется с использованием поверхностей, построенных по наружной, срединной или внутренней поверхности изделия. При этом в процессе импорта *FormingSuite* определяет точки (*point*), линии (*line*), области (*domain*) и границы (*boundary*), содержащиеся в геометрии. Под «областью» понимается группа связанных и касательных друг к другу поверхностей. Таким образом, при импортировании твердотельной геометрии модель будет содержать три области, т.е. области, состоящие из наружных, внутренних и боковых поверхностей (рис. 5).



а



б

Рис. 4. Импорт геометрии в *FormingSuite*

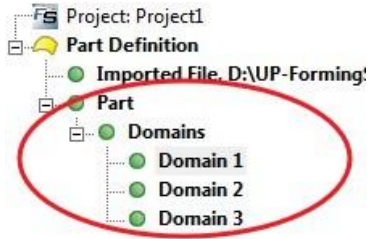




Рис. 5. Дерево проекта после импорта твердотельной геометрии

После того как *FormingSuite* произвел разделение твердотельной геометрии на области, необходимо указать поверхности, по которым будут выполняться расчеты. Для этого в помощнике нажмите  **Next: Generate Skin** или на панели инструментов – иконку  **Create Skin**. В появившемся окне **Part Definition – Skin** будет указана автоматически выбранная область (рис. 6), при необходимости её можно изменить, выбрав нужную в дереве проекта (рис. 5). Нажмите **OK**.

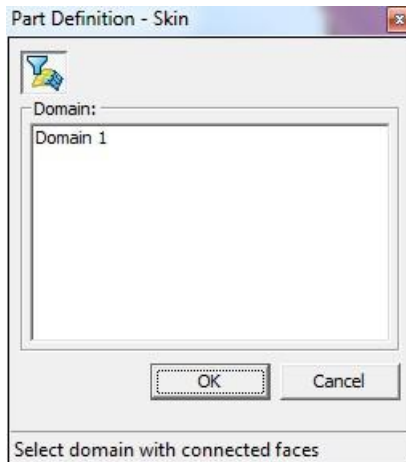


Рис. 6. Выбор расчетной поверхности для твердотельной модели

После указания расчетной поверхности в дереве проекта появится новый элемент **Skin**, состоящий из выбранных областей (рис. 7).

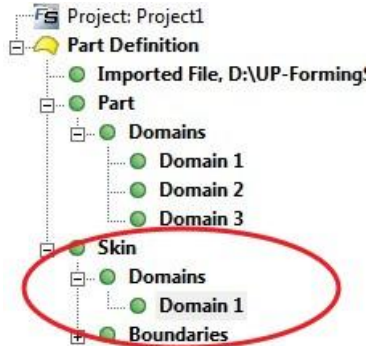
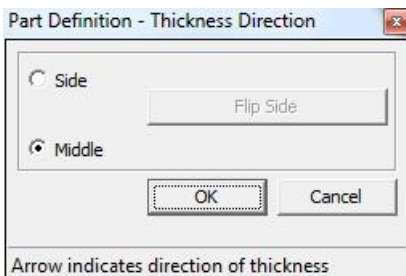


Рис. 7. Дерево проекта после выбора расчетной поверхности

### 2.1.2 Импорт поверхностной модели

Импортирование геометрии, созданной в виде набора поверхностей, аналогично передаче твердотельной геометрии в *FormingSuite* (рис. 4). Единственное отличие состоит в том, что при импорте необходимо определить направление по толщине, т.е. указать по какой поверхности (наружной, средней или внутренней) построена геометрия.

Поверхностная модель также разбивается на отдельные области, а затем указывается расчетный набор поверхностей (рис. 6). После этого автоматически появляется окно *Part Definition – Thickness Direction*, в котором по умолчанию выбрана срединная поверхность *Middle* (рис. 8, а). Если необходимо указать наружную или внутреннюю поверхность, выберите пункт *Side* (рис. 8, б), при этом смена направления, в котором откладывается толщина, осуществляется нажатием кнопки *Flip Side*, что отображается сменой направления стрелки в графическом окне. Нажмите *OK*.



а



б

Рис. 8. Выбор направления по толщине

При необходимости вызвать диалоговое окно смены направления по толщине можно щелчком правой кнопки мыши по элементу *Skin* в дереве

проекта (рис. 7) и в появившемся контекстном меню указать *Material Location* (рис. 9).




Рис. 9. Контекстное меню



При использовании твердотельных моделей направление по толщине определяется программой автоматически на основании имеющихся геометрических данных.

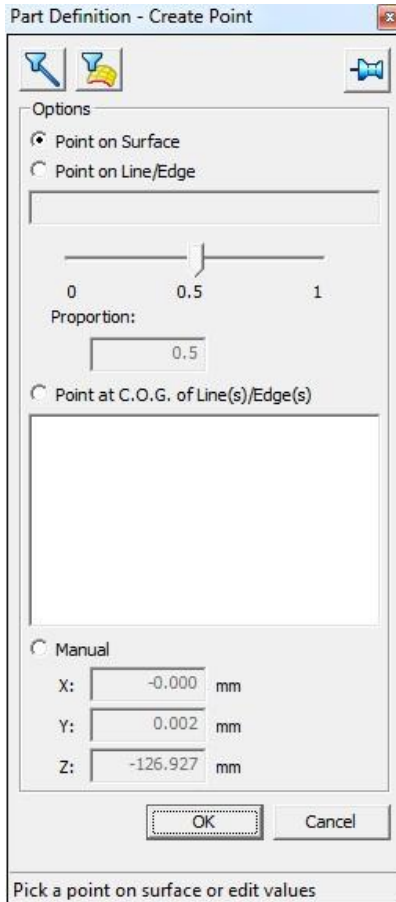
### 2.1.3 Редактирование геометрии

Для редактирования геометрической модели в *FormingSuite* предусмотрено: создание точек и линий, зашивка отверстий и т.п.

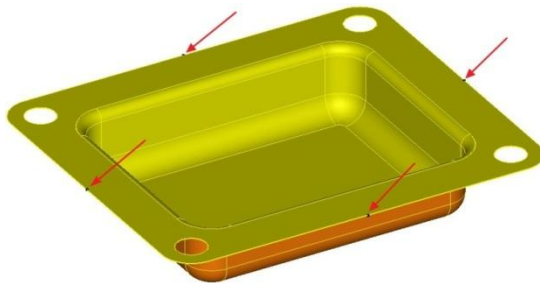
Построение дополнительных точек и линий необходимо для выполнения расчетов и просмотра результатов анализа, например, для наложения ограничений на перемещение точек заготовки или построения графика распределения какого-либо параметра по заданной линии.

Точки создаются либо по имеющейся геометрии (линии, ребра, поверхности), либо по координатам. Для создания точки нажмите кнопку  **Create Point** на панели инструментов, автоматически появится диалоговое окно **Part Definition – Create Point** (рис. 10, а). Укажите один из способов построения точки: на поверхности (**Point on Surface**), на линии/ребре (**Point on Line/Edge**), в центре тяжести линий/ребер (**Point at C.O.G. of Line(s)/Edge(s)**), по координатам (**Manual**).

При выборе опции **Point on Line/Edge** или **Point at C.O.G. of Line(s)/Edge(s)** в зависимости от того на линии или ребре строится точка необходимо сначала установить фильтр  или  соответственно (рис. 10, а). Затем, перемещая ползунок, определите положение точки на линии или ребре и нажмите **OK**.




a



б

Рис. 10. Создание точки

При нажатии кнопки  **Operations on Lines** на панели управления появляется контекстное меню (рис. 11), позволяющее создавать линии на поверхности (**Create on Surface**), по границе (**Create on Boundary**) и делить линии (**Split Line**).

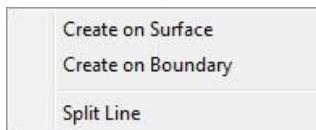





Рис. 11. Контекстное меню кнопки *Operations on Lines*

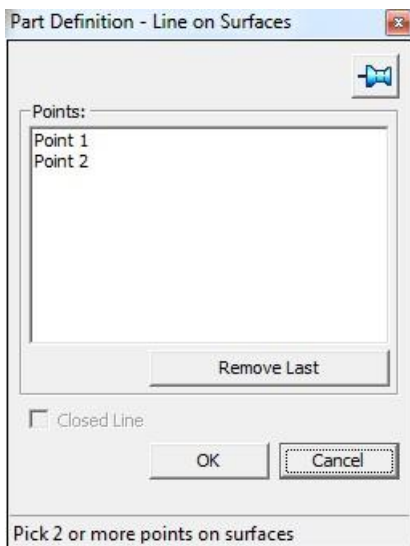
При создании линии по поверхности (рис. 12, а-б) или по границе (рис. 12, в-г) необходимо щелчком левой кнопки мыши в графическом окне указать точки начала и конца линии, лежащие на поверхности или границе соответственно, а затем нажать кнопку **OK**.

После создания новых точек и линий в дереве проекта появляются элементы **Points** и **Lines**, которые можно удалить, вызвав контекстное меню щелчком правой кнопки мыши по удаляемому элементу в дереве проекта и выбрав **Delete**.

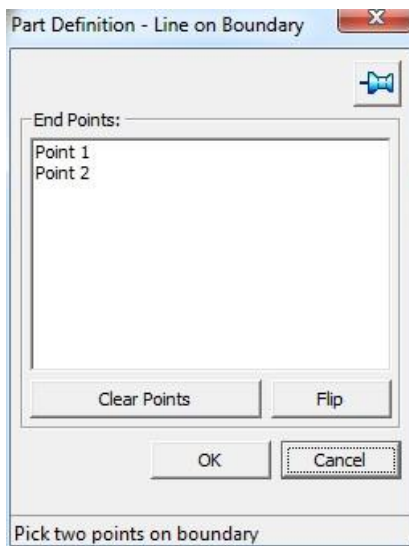
При выполнении анализа штампуемости часто возникает необходимость удаления отверстий и пазов, имеющихся в готовом изделии. *FormingSuite* позволяет производить зашивку указанных отверстий и вырезов в процессе генерации сетки конечных элементов.

Для зашивки отверстий любой формы с замкнутым контуром нажмите иконку  **Fill Holes** на панели управления, автоматически появится окно **Part Definition – Mark Holes to Fill** (рис. 13, а). Щелчком левой кнопки мыши выберите зашиваемые отверстия (можно указать сразу несколько отверстий, удерживая нажатой клавишу **Ctrl** на клавиатуре), а затем нажмите **OK**. При этом зашиваемые отверстия будут выделены цветом, а удаление отверстий произойдет при генерировании сетки (рис. 14).

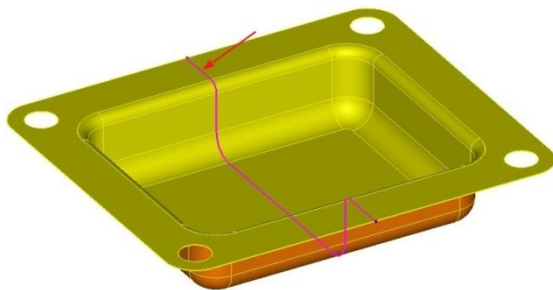
Перед зашивкой пазов (вырезов с разомкнутым контуром) необходимо вначале построить линию по границе заполняемого паза (кнопка  **Operations on Lines** на панели управления, опция **Create on Boundary**). Затем нажать иконку  **Fill Notch(es)** на панели управления, выбрать построенную линию и нажать кнопку **OK** в окне **Part Definition – Mark Notch to Fill** (рис. 13, б). При этом зашиваемый вырез будет выделен цветом, а его удаление произойдет при генерировании сетки.



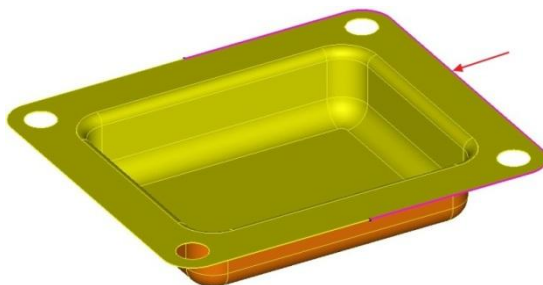
а



б



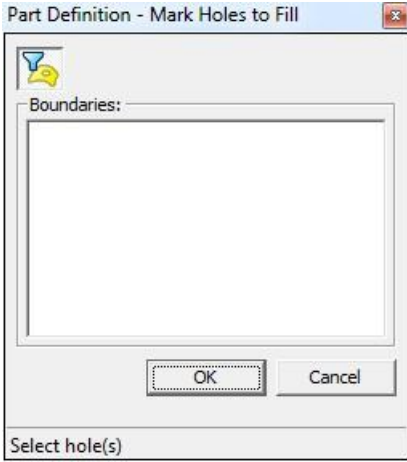
б



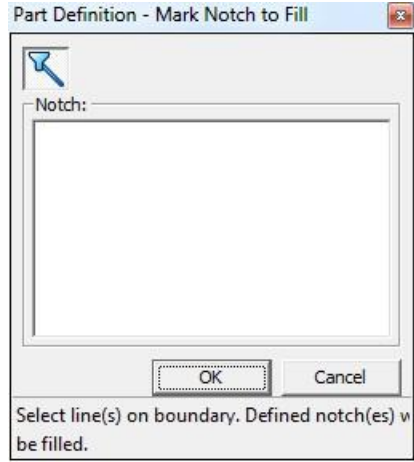
г

Рис. 12. Окна создания линии по поверхности (а) и границе (б)



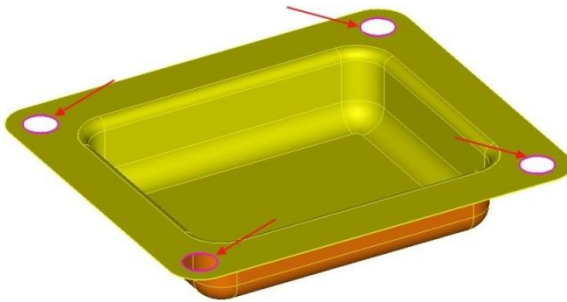


а

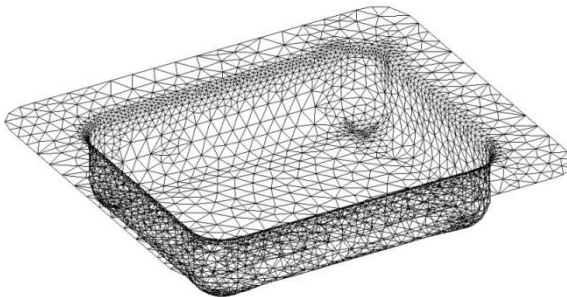


б

Рис. 13. Окна зашивки отверстий (а) и вырезов (б)



а



б

Рис. 14. Зашиваемые отверстия до (а) и после (б) генерации сетки

Удаление геометрии в *FormingSuite* выполняется двумя способами. Во-первых, необходимо выделить удаляемый объект (точку, линию, поверхность) в графическом окне щелчком левой кнопки мыши, а затем указать пункт *Delete* в контекстном меню, вызываемом щелчком правой кнопки мыши, или нажать клавишу *Delete* на клавиатуре. Кроме того можно выделить удаляемый объект в дереве проекта, и удалить его или через контекстное меню, или клавишей *Delete*.

## 2.2 Задание материала

### 2.2.1 Описание свойств материала

Наиболее широко для описания свойств листовых материалов при моделировании холодной листовой штамповки используются аппроксимированные кривые упрочнения, диаграммы предельных деформаций и коэффициенты анизотропии.

Кривые упрочнения дают зависимость величины напряжения, действующего в пластически деформируемом теле при линейном напряженном состоянии, от величины деформации. Параметры кривых упрочнения — критерии оценки штампуемости металла. Для определения этих параметров используют различные аппроксимации диаграмм истинных напряжений, например, в *FormingSuite* используется степенная функция, предложенная А. Надаи:

где  $\sigma$  и  $\epsilon$  — интенсивность напряжений и деформаций;  $n$  — коэффициент и показатель деформационного упрочнения, определяемые по результатам механических испытаний металла.

Диаграммы предельных деформаций (*Forming Limit Diagram, FLD*) используются для оценки штампуемости и устанавливают связь между компонентами главных деформаций  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  в момент потери устойчивости от разрушения. Такого рода диаграммы (рис. 15) были предложены в 60-х годах С.П. Келером и Г.М. Гудвиным (США), с их помощью устанавливают границы предельных деформаций, действующих в плоскости листа. Зона критических деформаций разделяет диаграмму на две области, ниже этой зоны находится область безопасных условий штамповки и выше — область разрушения. По оси ординат диаграммы отложена наибольшая главная деформация в плоскости заготовки  $\epsilon_1$ , а по оси абсцисс — наименьшая главная деформация  $\epsilon_2$ . Зона положительных значений  $\epsilon_2$  соответствует двухосному растяжению, при  $\epsilon_2 = 0$  наблюдается плоское деформированное состояние, в зоне отрицательных значений  $\epsilon_2$  — сжатие с растяжением.

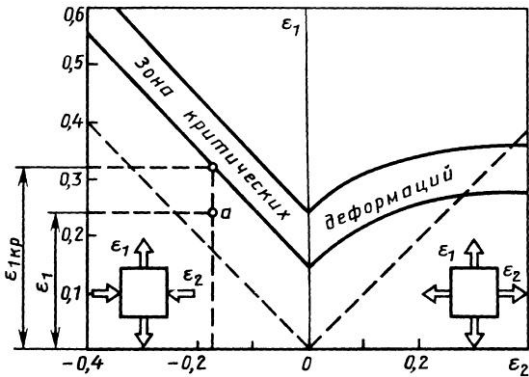


Рис. 15. Диаграмма предельных деформаций

Диаграммы предельных деформаций строят экспериментально для каждой марки и толщины металла по различным методикам. Испытания на растяжение образцов с вырезами и растяжение полос, вырезанных вдоль и поперек стакана, полученного вытяжкой, предназначены для построения левой части диаграммы, формовка квадратных образцов полусферическим пуансоном — правой. Формовка полос различной ширины (круглых образцов с боковыми вырезами) полусферическим (плоским) пуансоном применяется для построения как левой, так и правой части диаграммы. Образцы с предварительно нанесенной сеткой в виде окружностей диаметром 2-4 мм подвергаются растяжению на испытательной машине или в штампе-приборе, на котором проводят также формовку и вытяжку до момента разрушения или потери устойчивости.

Для оценки штампуемости листового металла, применяемого для штамповки сложных по форме и глубоких деталей, кроме характеристик механических свойств, предусмотренных техническими условиями ( $\sigma_s$ ,  $\sigma_m$ ,  $\delta$  и пр.), допускается определение коэффициента нормальной пластической анизотропии  $r$ .

Под анизотропией понимают различие механических свойств листового металла в различных направлениях прокатки, которое имеет текстурную и кристаллографическую природу.

Коэффициент нормальной анизотропии  $r$  определяют по результатам испытаний на растяжение. Он представляет собой отношение логарифмической деформации по ширине  $\epsilon_b$  к деформации по толщине образца  $\epsilon_s$  на участке равномерной деформации ( $\delta_p = 15-20\%$ ) в выбранном направлении прокатки:

При равенстве деформаций по ширине и толщине  $r = 1$  металл изотропен. Различают нормальную анизотропию, при которой коэффициент анизотропии практически одинаков в различных направлениях относительно направления прокатки листа, но отличен от единицы, и плоскостную анизотропию, при которой коэффициент анизотропии изменяется в плоскости листа в различных направлениях прокатки. Изменение коэффициента нормальной анизотропии  $r$  в различных направлениях относительно направления прокатки листа показано на рис. 16.

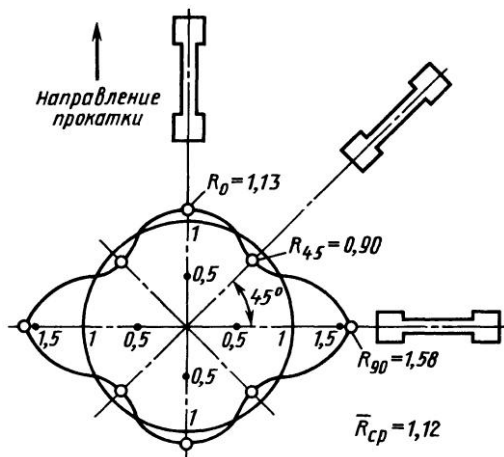


Рис. 16. Кривая изменения коэффициента нормальной анизотропии в различных направлениях относительно направления прокатки


При оценке влияния анизотропии на штампуемость металла часто пользуются средним коэффициентом анизотропии  $r_{cp}$ , определяемым из значений коэффициентов анизотропии, полученных при испытании образцов на растяжение, вырезанных из листа, в различных направлениях — вдоль прокатки, поперек и под углом  $45^\circ$ :

Если в зоне пластической деформации возникает деформированное состояние, характеризующееся сжато-растянутой схемой (например, при вытяжке), штампуемость металла сильно зависит от  $r$ . При  $r > 1$  листовой металл хорошо сопротивляется утонению в опасной зоне и это позволяет вести вытяжку с высокой степенью деформации. Вместе с тем с увеличением  $r$  нарушается осевая симметрия деформирования, возникает окружная разнотолщинность стенок вытягиваемой детали и волнистость ее кромки, что вызыва-

ет необходимость увеличения припуска на обрезку неровного края и, следовательно, увеличивает расход металла.

Если в зоне пластической деформации преобладают деформации одноосного или двухосного растяжения (например, при формовке), штампуемость металла больше зависит от  $n$ , так как интенсивность деформационного упрочнения металла может превалять над интенсивностью его утонения.

### 2.2.2 Выбор материала

Одним из этапов подготовки модели для анализа является определение марки материала и его толщины, которые задаются после выбора расчетной поверхности. Для этого в помощнике нажмите  **Next: Define Material** или

на панели инструментов – иконку  **Material**. В появившемся окне **Part Definition – Property** в выпадающем меню **Material Type** выберите марку из библиотеки материалов, при необходимости можно просмотреть или отредактировать свойства выбранного сплава, нажав кнопку **Properties** (рис. 17). В строку **Material Thickness** введите толщину полуфабриката, при этом если импортировалась твердотельная модель, то данное поле будет заполнено автоматически на основании геометрии. Нажмите **OK**.

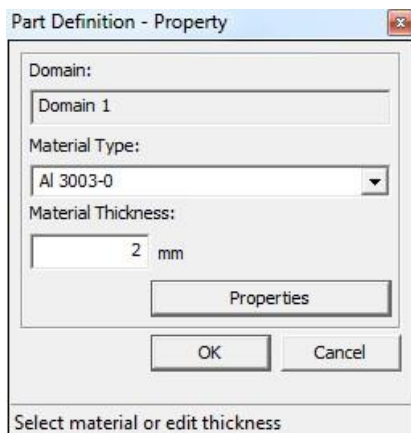


Рис. 17. Окно **Part Definition – Property**

После назначения марки материала в дереве проекта появляется элемент, соответствующий выбранному сплаву (рис. 18). При необходимости изменить марку материала можно двойным щелчком левой кнопки мыши по данному элементу, при этом появляется окно **Part Definition – Property** (рис. 17).

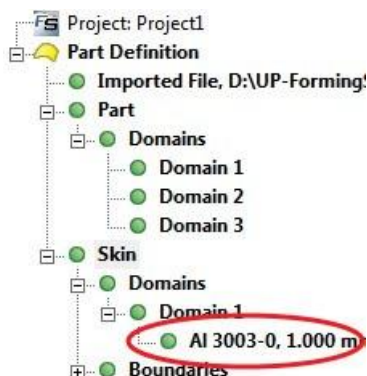


Рис. 18. Дерево проекта после задания марки материала

### 2.2.3 Создание и редактирование материалов

Создание, редактирование и удаление материалов осуществляется с помощью библиотеки материалов *FormingSuite*, которая содержит базу данных о свойствах стандартных промышленных материалов, используемых при холодной листовой штамповке на зарубежных предприятия. Сокращения, применяемые при наименовании стандартных материалов из базы данных *FormingSuite*, приведены в табл. 2.

Табл. 2. Сокращения применяемые в *FormingSuite*

Сокращение	Полное обозначение	
	Английский язык	Русский язык
<i>CR</i>	<i>Cold Rolled</i>	Холоднокатаный
<i>HR</i>	<i>Hot Rolled</i>	Горячекатаный
<i>CQ</i>	<i>Commercial Quality</i>	Промышленное качество
<i>DQ</i>	<i>Drawing Quality</i>	Для вытяжки
<i>DDQ</i>	<i>Deep Drawing Quality</i>	Для глубокой вытяжки
<i>EDDQ</i>	<i>Extra Deep Drawing Quality</i>	Для особо глубокой вытяжки
<i>CS</i>	<i>Commercial Steel</i>	Сталь промышленного качества
<i>DS</i>	<i>Draw Steel</i>	Сталь для вытяжки
<i>DDS</i>	<i>Deep Draw Steel</i>	Сталь для глубокой вытяжки
<i>EDDS</i>	<i>Extra Deep Draw Steel</i>	Сталь для особо глубокой вытяжки
<i>HSLA</i>	<i>High Strength Low Alloy</i>	Высокопрочный низколегированный сплав
<i>HSS</i>	<i>High Strength Steel</i>	Высокопрочная сталь
<i>Al</i>	<i>Aluminum</i>	Алюминий
<i>EG</i>	<i>Galvanized</i>	Оцинкованный
<i>GA</i>	<i>Galvannealed</i>	Отожжённый и оцинкованный

Табл. 2. Окончание

<i>HD</i>	<i>Hot Dipped</i>	Горячее цинкование
<i>IF</i>	<i>Interstitial Free</i>	Сплав внедрения
<i>BH</i>	<i>Bake Hardened</i>	Закаленный
<i>DP</i>	<i>Dual Phase</i>	Двух фазовый сплав
<i>Mart</i>	<i>Martensitic</i>	Мартенситная сталь
<i>TRIP</i>	<i>Transformation Induced Plasticity</i>	ТРИП-сталь
<i>RA</i>	<i>Recovery Annealed</i>	Восстановительный отжиг
<i>A</i>	<i>Annealed</i>	Отожженный

Доступ к библиотеке материалов осуществляется через диалоговое окно *Material Database* (рис. 19), для вызова которого необходимо в главном меню выбрать *Tools -> Material Library*.

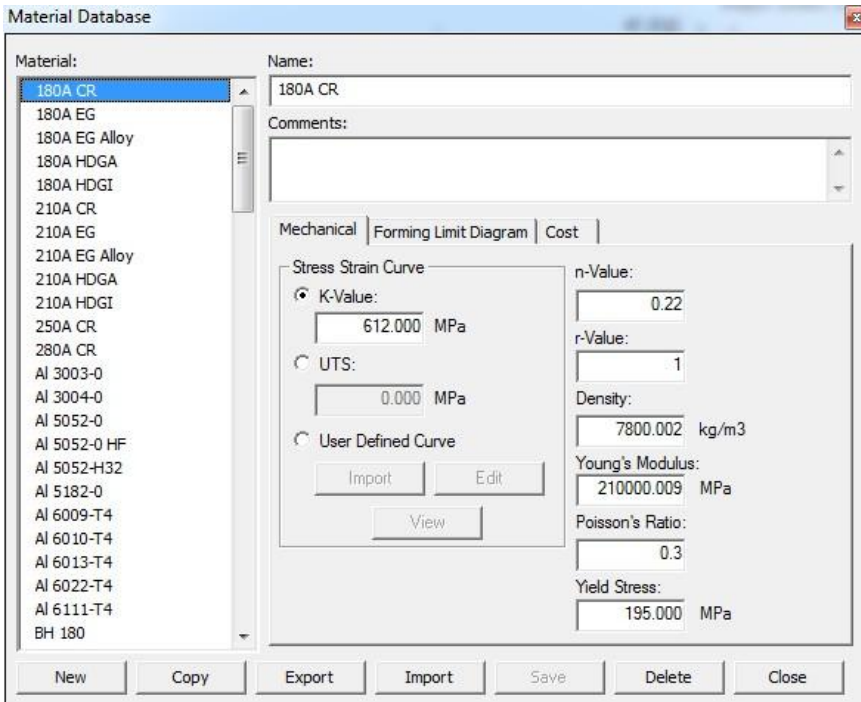


Рис. 19. Окно *Material Database*

Для создания нового материала нажмите кнопку *New* в окне *Material Database* (рис. 19) и введите название и требуемые параметры сплава. Кнопки *Copy*, *Export*, *Import*, *Save* и *Delete* используются для копирования, экспорта, импорта, сохранения и удаления материала соответственно.

Mechanical | Forming Limit Diagram | Cost

Stress Strain Curve

K-Value:  
 MPa

UTS:  
 MPa

User Defined Curve

n-Value:

r-Value:

Density:  
 kg/m3

Young's Modulus:  
 MPa

Poisson's Ratio:

Yield Stress:  
 MPa

a

Mechanical | Forming Limit Diagram | Cost

Forming Limit Curve

FLD0 Based on Thickness

Fixed FLD0:  
 Eng. (%)

User Defined Curve

FLD Thinning Limit:  
 Eng. (%)

FLD Shear Limit:  
 Eng. (%)

б

Mechanical | Forming Limit Diagram | Cost

Base Cost

Fixed:  
 US\$/kg

Table

Scrap Value:  
 US\$/kg

Extra Material Cost:  
 US\$/kg

Consumables:  
 US\$/blank

в

Рис. 20. Вкладки окна *Material Database*



В *FormingSuite* параметры материала подразделены на три группы: механические свойства, предельные параметры и себестоимость. Остановимся подробнее на каждой из них.

Редактирование механических свойств осуществляется на вкладке **Mechanical** окна **Material Database** (рис. 20, а). Характеристики, используемые для описания свойств, приведены в **Ошибка! Неверная ссылка закладки..** Для задания кривой упрочнения по точкам необходимо установить флажок **User Defined Curve** и нажать кнопку **Import** для загрузки файла с данными.

Табл. 3. Вкладка **Mechanical** окна **Material Database**

Параметр	Ед. изм.	Описание
<i>K-Value</i>	МПа	Коэффициент упрочнения – описывает форму пластического участка кривой упрочнения
<i>UTS</i>	МПа	Предел прочности при растяжении – максимальное напряжение, которое материал выдерживает без разрушения
<i>n-Value</i>	-	Показатель упрочнения – характеризует скорость упрочнения материала и его способность к растяжению
<i>r-Value</i>	-	Коэффициент анизотропии (Лэнкфорда) – показывает различие свойств по толщине и в плоскости листа, а также характеризует штампуемость материала
<i>Density</i>	кг/м <sup>3</sup>	Плотность
<i>Young's Modulus</i>	МПа	Модуль Юнга (необходим только для инкрементального решателя или при анализе пружинения)
<i>Poisson's Ratio</i>	-	Коэффициент Пуассона (необходим только для инкрементального решателя или при анализе пружинения)
<i>Yeild Stress</i>	МПа	Предел текучести при растяжении – напряжение начала пластической деформации

Ввод предельных параметров осуществляется на вкладке **Forming Limit Diagram** окна **Material Database** (рис. 20, б). Потеря устойчивости пластического течения и образование локального утонения описывается диаграммой предельных деформаций, основные характеристики которой приведены в табл. 4. Для построения диаграммы по точкам необходимо установить флажок **User Defined Curve** и нажать кнопку **Import** для загрузки файла с данными.

На вкладке **Cost** окна **Material Database** (рис. 20, в) находятся параметры необходимые для расчета себестоимости производства изделия (табл. 5). Можно установить как фиксированную (флажок **Fixed**), так и плавающую (флажок **Table**) стоимость листовых полуфабрикатов в зависимости от толщины и ширины рулона.

Табл. 4. Вкладка *Forming Limit Diagram* окна *Material Database*

Параметр	Ед. изм.	Описание
<i>FLD<sub>0</sub></i>	%	Точка пересечения кривой диаграммы оси максимальных деформаций – показывает максимально допустимую степень деформации при одноосном растяжении
<i>Thinning Limit</i>	%	Предельное утонение – максимальная степень деформации по толщине, при которой начинается разрушение
<i>Shear Limit</i>	%	Предел на сдвиг – характеризует величину усилия, которая может быть приложена к материалу без потери устойчивости (гофрообразования)

Табл. 5. Вкладка *Cost* окна *Material Database*

Параметр	Ед. изм.	Описание
<i>Base Cost</i>	руб./кг	Стоимость сырья (рулона, ленты, листов)
<i>Scrap Value</i>	руб./кг	Стоимость отходов производства (просечка, обрезка)
<i>Extra Material Cost</i>	руб./кг	Стоимость дополнительных материалов необходимых для производства
<i>Consumables</i>	руб./шт.	Расходные материалы (электроэнергия, заработная плата)

## 2.3 Задание граничных условий процесса

Для выполнения расчета в *FormingSuite* необходимо определить условия трения, направление движения инструмента.

### 2.3.1 Задание условий трения

Трение в *FormingSuite* учитывается при расчете напряжений и деформаций, возникающих в металле при перетягивании через сгругления матрицы и пуансона, а также под воздействием прижима.

После генерации сетки конечных элементов автоматически появляется окно *Process Setup 1 - Friction*, в котором по умолчанию установлен коэффициент трения равный 0,15 (рис. 21). При необходимости введите требуемое значение коэффициента трения в строку *Friction* и нажмите **OK**.

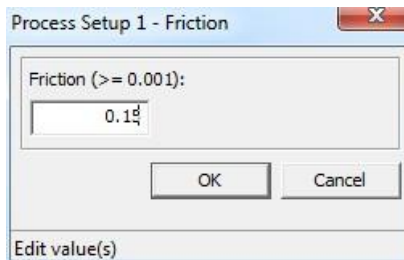


Рис. 21. Окно *Process Setup 1 – Friction*

Для того чтобы отредактировать заданные условия трения, в дереве проекта найдите и разверните элемент **General Data**, щелкнув на значок «+» рядом с ним (рис. 22). После этого вызовите окно **Process Setup 1 - Friction** (рис. 21) двойным щелчком левой кнопки мыши по элементу **Friction**. Введите требуемые значения и нажмите **OK**.

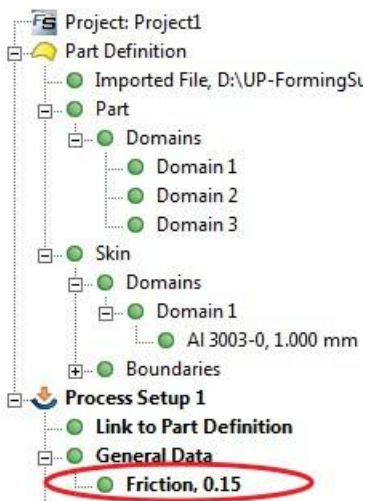




Рис. 22. Дерево проекта после задания условий трения

### 2.3.2 Задание движения инструмента

Для определения направления движения пуансона нажмите в помощнике кнопку  **Next: Define Punch Direction** или на панели инструментов – иконку  **Punch Direction**, при этом появится окно **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 23).

В окне **Process Setup 1 – Punch Direction** укажите один из способов задания направления (рис. 23):

1. Выберите пункт **Auto** для автоматического определения оптимальной ориентации изделия в штампе.
2. Используйте предварительно построенную линию. Для этого отметьте пункт **Line** и выберите линию, определяющую направление движения пуансона.
3. Для задания направления движения по нормали к поверхности отметьте пункт **Normal** и выберите поверхность в графическом окне.

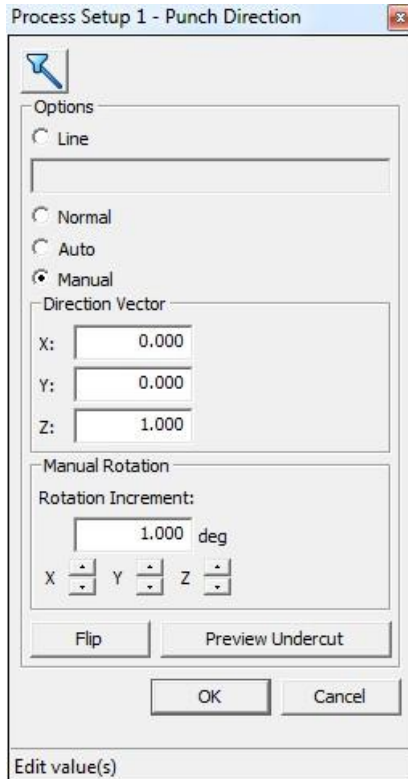


Рис. 23. Окно *Process Setup 1 – Punch Direction*

4. Установите ручной режим – пункт **Manual**, а затем введите компоненты вектора (строки **X**, **Y** и **Z**), определяющего направление пуансона относительно координатной системы *FormingSuite*. Также данный режим позволяет повернуть направление движения пуансона на заданный угол вокруг одной из осей, для этого введите угол в строку **Rotation Increment** и нажимайте кнопки  $x$   $y$   $z$  для вращения вокруг соответствующей оси.

При необходимости можно изменить направление движения пуансона на противоположное нажатием кнопки **Flip** в окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 23). Кроме того *FormingSuite* позволяет просмотреть проблемные зоны – поднутрения, возникающие при заданном направлении пуансона. Для этого нажмите кнопку **Preview Undercut** в окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 23) и программа автоматически подсветит в графическом окне все поднутрения, возникающие при штамповке.

Определив направление движения пуансона с помощью предлагаемого инструментария, нажмите **OK** в окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 23). При этом в дереве проекта автоматически появится новый элемент **Punch Direction** (рис. 24), двойной щелчок левой кнопки мыши по нему вызывает окно **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 23) для редактирования заданного направления движения пуансона.

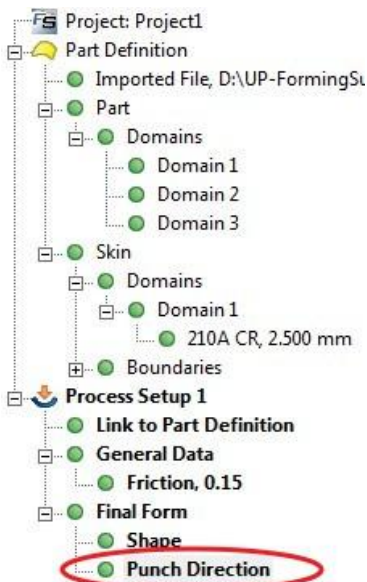



Рис. 24. Дерево проекта после задания направления движения

### 2.3.3 Взаимодействие инструмента с заготовкой

При задании параметров расчета необходимо определить характер взаимодействия инструмента с заготовкой в процессе формоизменения. Для этого нажмите в помощнике кнопку  **Next: Define Forming Process**, при этом появится окно **Process Setup 1 – Process** (рис. 25).

В процессе вытяжки при протягивании фланца заготовки по скруглению матрицы под влиянием сил трения, действующих между заготовкой и инструментом, а также при сгибе фланца, возникают дополнительные деформации и напряжения (рис. 26, а). Однако также возможны процессы формообразования (например, гибка), в которых заготовка не протягивается по радиальному участку матрицы, а просто сгибается по нему, и как следствие дополнительные деформации и напряжения отсутствуют (рис. 26, б). Для учета влияния трения и сгиба необходимо в окне **Process Setup 1 – Process** отметить

пункт **Draw** (рис. 25), при этом *FormingSuite* автоматически определяет изгибы, при переходе через которые добавляются дополнительные напряжения. Если используются формующие штампы, то отметь пункт **Form** (рис. 25), при этом дополнительные деформации, возникающие под действием сил трения, не будут учитываться.

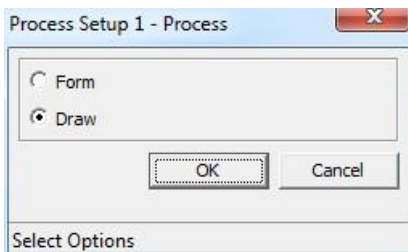


Рис. 25. Окно *Process Setup 1 – Process*

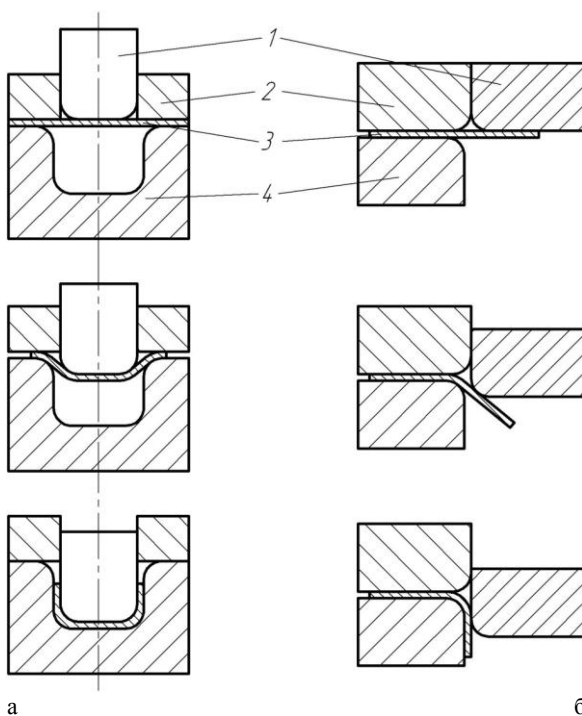


Рис. 26. Формообразование в вытяжном (а) и формующем (б) штампах:  
1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – заготовка; 4 – матрица

Задав характер формообразования, нажмите **OK** в окне **Process Setup 1 – Process** (рис. 25), при этом в дереве проекта автоматически появится новый элемент **Process, Form/Draw** (рис. 27). При необходимости можно вызвать окно **Process Setup 1 – Process** (рис. 25) для редактирования, кликнув левой кнопки мыши по данному элементу два раза.

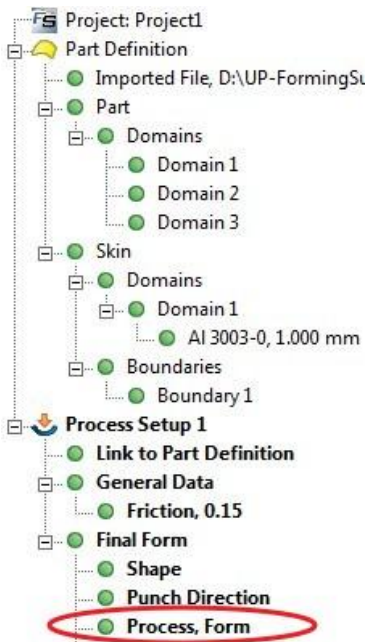


Рис. 27. Дерево проекта после задания вида процесса

## 2.4 Построение сетки конечных элементов

Метод конечных элементов основывается на том, что любое непрерывное распределение физической переменной в расчетной области, например деформацию, можно аппроксимировать набором кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей – конечных элементов (рис. 28). В каждом таком элементе неизвестная функция аппроксимируется полиномом, степень которого меняется в зависимости от задачи, но остается обычно невысокой (от 1 до 6).

В зависимости от геометрии и размерности задачи используются различные виды конечных элементов: одномерные, двухмерные, трехмерные. С уменьшением размеров конечных элементов увеличивается их количество, а значит, увеличивается точность, с которой они описывают реальную геометрию. Однако большее количество элементов также приводит к увеличению

времени расчетов. Таким образом, очень важно сгенерировать сетку таких размеров, чтобы она описывала геометрию настолько точно, как того требуют цели анализа. При анализе процессов формообразования сетка конечных элементов должна максимально точно повторять всё имеющиеся сгругления, так как это оказывает огромное влияние на штампуемость.

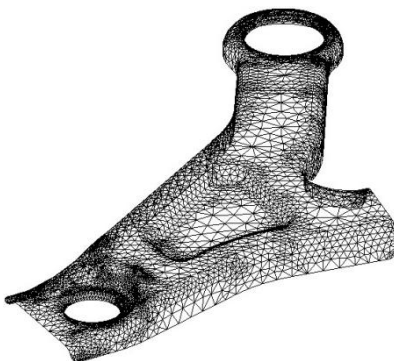


Рис. 28. Сетка конечных элементов

К достоинствам метода конечных элементов, благодаря которым он находит широкое применение, относят гибкость и разнообразие сеток, четко формализованные алгоритмы построения дискретных задач для произвольных областей, простоту учета естественных краевых условий. Кроме того, этот метод применим к широкому классу исходных задач, а оценки погрешностей приближенных решений, как правило, получаются при менее жестких ограничениях, чем в методе конечных разностей.


#### 2.4.1 Генерирование сетки конечных элементов

Для создания сетки конечных элементов нажмите в помощнике кнопку



**Next: Generate Mesh** или на панели инструментов – иконку



 **Generate Mesh**. В появившемся окне **Process Setup 1 – Meshing Settings** уже установлены оптимальные параметры сетки, определенные программой автоматически (рис. 29). Нажмите **OK**, при этом в дереве проекта появится новый пункт **Process Setup 1**, а в нем новый элемент **Final Form** (рис. 30).

Генерация сетки конечных элементов в *FormingSuite* производится с учетом максимальной длины ребра конечного элемента, вводимого в строку **Maximum Element Size** окна **Process Setup 1 – Meshing Settings** (рис. 29), и отношения отклонения от скругления к длине ребра конечного элемента (рис. 31) в строку **Chord Deviation**.



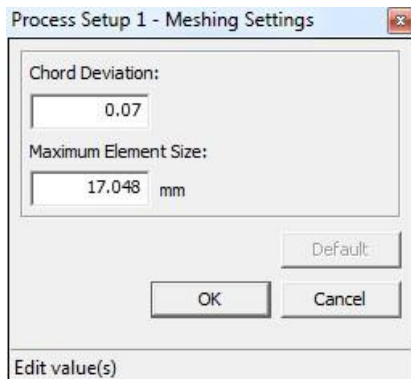


Рис. 29. Окно *Process Setup 1 – Meshing Settings*

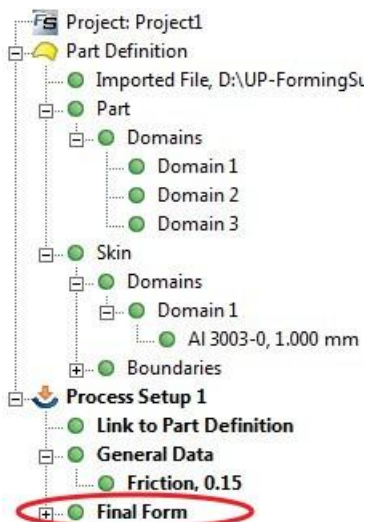


Рис. 30. Дерево проекта после генерирования сетки

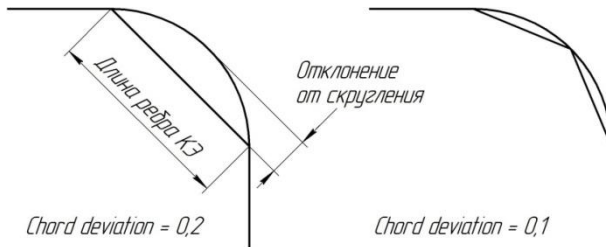





Рис. 31. Построение сетки конечных элементов на скруглении

*FormingSuite* предоставляет возможность использовать сетку конечных элементов, созданную в специализированном редакторе и сохраненную в файле с расширением *NAS*. В этом случае не требуется импортировать и обрабатывать геометрическую модель. Для импорта сетки нажмите иконку 

*Meshing* на панели инструментов, а затем кнопку  **Import Mesh**. После этого автоматически откроется окно выбора файлов, укажите нужный файл и нажмите **Открыть**.

#### 2.4.2 Редактирование сетки конечных элементов

Вначале всегда рекомендуется сгенерировать сетку по предлагаемым программой параметрам. Для проверки качества построенной сетки необходимо отобразить её в графическом окне, для этого отключите затенение кнопкой  **Shading**, расположенной на панели инструментов.

При необходимости можно отредактировать параметры сгенерированной сетки. Для этого в дереве проекта найдите и разверните элемент **Final Form**, щелкнув на значок «+» рядом с ним (рис. 30). Затем кликните правой кнопкой мыши по элементу **Shape** (рис. 32, а). В появившемся контекстном меню выберите пункт **Show Details** (рис. 33), при этом в дереве проекта появятся два новых элемента **Generation Settings** и **Mesh** (рис. 32, а). Разверните элемент **Generation Settings**, после этого вызовите окно **Process Setup 1 – Meshing Settings** (рис. 29) двойным щелчком левой кнопки мыши по элементу **Chord Deviation** или **Maximum Element Size** (рис. 32, а). Введите требуемые значения и нажмите **OK**.

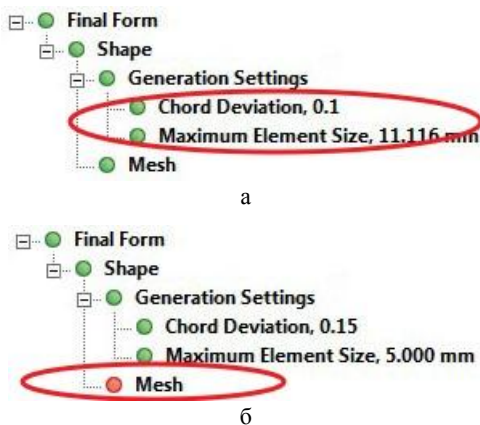


Рис. 32. Пункт **Shape** дерева проекта до (а) и после (б) редактирования сетки

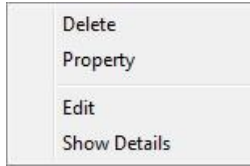





Рис. 33. Контекстное меню

После того как параметры сетки были изменены, зеленая точка перед элементом **Mesh** в дереве проекта станет красной (рис. 32, б), что указывает на необходимость повторной генерации сетки. Для этого нажмите в помощнике кнопку  **Next: Regenerate** или на панели инструментов иконку  **Regenerate**. Регенерация сетки произойдет автоматически.

## 2.5 Задание дополнительных граничных условий

### 2.5.1 Усилие прижима

*FormingSuite* позволяет учитывать влияние усилия прижима на процесс формообразования. При этом моделируется не реальное усилие, приложенное к прижиму, а эквивалентное равномерное натяжение по краю заготовки.

Для определения параметров прижима нажмите иконку  **Forming Conditions** на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку **Blankholder Force** (рис. 34). Откроется окно **Process Setup 1 – Blankholder Force** (рис. 35), при этом *FormingSuite* автоматически выберет и подсветит наружные края заготовки, к которым будет приложено усилие. После этого введите значение усилия прижима в строку **Total Blankholder Force** и нажмите **OK**.

Blankholder Force	Усилие прижима
Edge Tension	Натяжение по краю заготовки
Draw Bead	Перетяжные ребра
Pressure Pad	Давление
Pilot Hole	Направляющее отверстие
Pilot Slot	Направляющий паз
Forming Constraints	Ограничения
Bend Line	Линия сгиба
Constrained Surface	Стесненная поверхность
Constrained Edge	Стесненное ребро

Рис. 34. Меню **Forming Conditions**

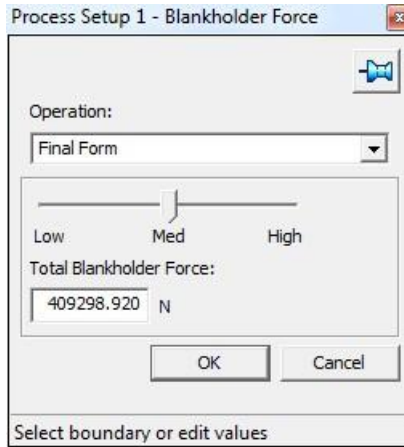


Рис. 35. Окно *Process Setup 1 – Blankholder Force*

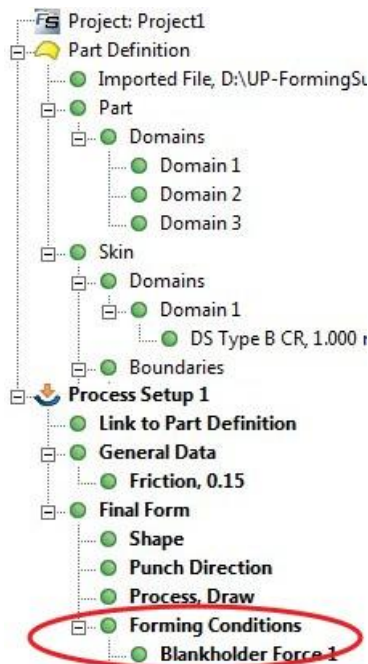


Рис. 36. Дерево проекта после задания условий прижима

После задания усилия прижима в ветви *Forming Conditions* дерева проекта появится новый элемент *Blankholder Force 1* (рис. 36). Двойной щелчок

левой кнопки мыши по нему вызовет окно **Process Setup 1 – Blankholder Force** (рис. 35), в котором можно отредактировать условия прижима.

Удалить заданное усилие прижима, как и любой другой параметр процесса, можно одним из двух способов. Необходимо выделить удаляемый элемент в дереве проекта щелчком левой кнопки мыши, а затем нажать клавишу **Delete** на клавиатуре. Или щелкнуть правой кнопкой мыши по удаляемому элементу в дереве проекта и в появившемся контекстном меню выбрать пункт **Delete**.

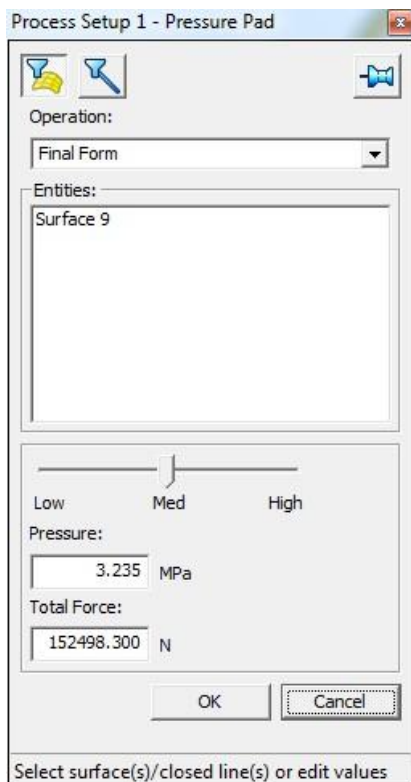


Рис. 37. Окно **Process Setup 1 – Pressure Pad**

Иногда необходимо учесть непосредственное влияние давления (прижима), приложенного к определенной области заготовки, например, для управления перемещением материала в локальной зоне. Для этого нажмите иконку



**Forming Conditions** на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку **Pressure Pad** (рис. 34). Откроется окно **Process Setup 1 – Pressure**

**Pad** (рис. 37), в которое введете значение прилагаемого давления или усилия в строку **Pressure** или **Total Force** соответственно. Затем в графическом окне укажите поверхности, на которые действует давление, и нажмите **OK**.

После задания давления в ветви **Forming Conditions** дерева проекта появится новый элемент **Pressure Pad 1**. Двойной щелчок левой кнопки мыши по нему вызовет окно **Process Setup 1 – Pressure Pad** (рис. 37), в которое можно внести требуемые изменения.

Кроме того в **FormingSuite** имеется возможность непосредственно моделировать влияние натяжения, т.е. усилия растяжения приложенного к краям заготовки. Это также, как и применение прижима, приводит к появлению дополнительных напряжений растяжения и снижает вероятность гофрообразования.

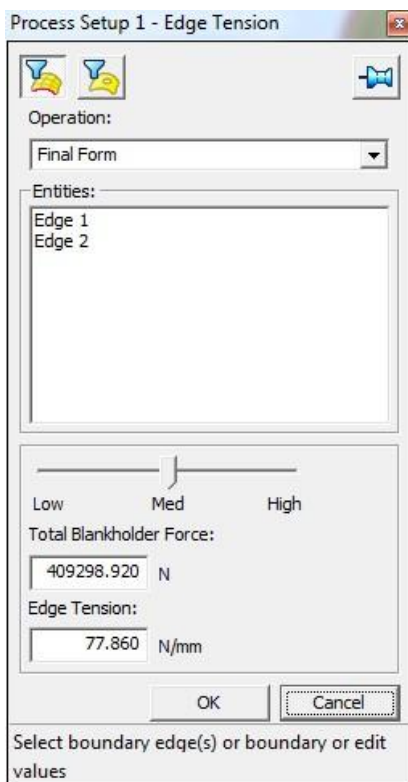





Рис. 38. Окно **Process Setup 1 – Edge Tension**

Для этого нажмите иконку  **Forming Conditions** на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку **Edge Tension** (рис. 34). Откроется окно **Process Setup 1 – Edge Tension** (рис. 38), в котором щелкните по кнопке  **Select Boundary** для задания равномерно распределенного усилия по наружным краям заготовки или

 **Select Edge** для приложения усилия к отдельным ребрам заготовки. Затем введите значение полного или погонного усилия в строку **Total Blankholder Force** или **Edge Tension** соответственно. После этого в графическом окне укажите края или ребра заготовки, к которым прилагается усилие растяжения, и нажмите **OK**.

После задания натяжения в ветви **Forming Conditions** дерева проекта появится новый элемент **Edge Tension**. Двойной щелчок левой кнопки мыши по нему вызовет окно **Process Setup 1 – Edge Tension** (рис. 38), в котором можно отредактировать условия натяжения.

### 2.5.2 Перетяжные пороги и ребра

В тех случаях, когда при вытяжке деталей типа коробок или других всевозможных форм в различных зонах наблюдается резкая разница в напряжениях и когда необходимо искусственно увеличить сопротивление перемещению материала между матрицей и прижимом, применяют перетяжные пороги (выступающие части или отдельные элементы матрицы штампа, рис. 39, а) или перетяжные ребра (отдельные детали штампа, рис. 39, б). Необходимость в последних возникает при наличии у деталей хотя бы одного из следующих признаков: боковые стенки детали расположены под некоторым углом или со ступеньками; радиус закругления или фаска в дне детали более 15-20 толщин металла; деталь имеет фланец неравномерной ширины и различные закругления в плане; деталь имеет выступы.

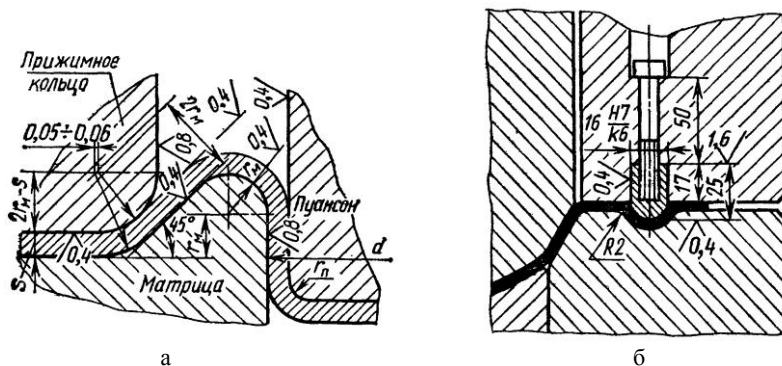


Рис. 39. Перетяжные пороги (а) и ребра (б)

Так как фланец детали менее устойчив при формообразовании тонких металлов (толщиной до 1,2 мм), чем толстых, то при расчете соответствующих заготовок и построении переходов следует иметь в виду, что при формообразовании тонких металлов необходимость в применении искусственного торможения возникает в большей степени, чем при формообразовании толстого металла.


Применение перетяжных порогов или ребер в детали зависит от относительной толщины заготовки. Следовательно, при различной толщине металла в равных прочих условиях в одном, случае требуется искусственное торможение, а в другом нет.

Перетяжные ребра или пороги можно располагать по всему периметру вытяжки или на отдельных участках. В деталях, имеющих в плане углы с малым закруглением, вызывающие высокую степень деформации металла, перетяжные ребра располагают только на прямолинейных участках или участках с малой кривизной. При невысокой степени деформации в углах детали торможение металла осуществляется по всему периметру.

Высота ребер и порогов может колебаться в значительных пределах в зависимости от размеров детали, толщины и рода металла. В некоторых случаях, когда требуется малая степень торможения, высота их может быть до 3 мм, а при значительной степени торможения до 10-12 мм и более.

В деталях с большим фланцем перетяжные ребра выносят за его пределы. Если применяют пороги, то их ширина должна быть больше ширины фланца штампуемой детали. У детали, не имеющей фланца, при необходимости создают его искусственно, заведомо планируя технологический припуск. При этом с целью уменьшения отходов целесообразно применять перетяжной порог.

Перед заданием перетяжных ребер в *FormingSuite* необходимо предварительно, используя описанный выше инструментарий, построить или импортировать линии, соответствующие перетяжным ребрам.

Затем нажмите иконку  **Forming Conditions** на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку **Draw Bead** (рис. 34). Откроется окно **Process Setup 1 – Draw Bead** (рис. 40), в которое введите величину деформации, испытываемой материалом при прохождении через перетяжное ребро, или значение растяжения в строку **Strain** или **Tension** соответственно. Затем в графическом окне укажите заранее построенные линии – перетяжные ребра, и нажмите **OK**.

После определения перетяжных ребер в ветви **Forming Conditions** дерева проекта появится новый элемент **Draw Bead 1**. Двойной щелчок левой кнопки мыши по нему вызовет окно **Process Setup 1 – Draw Bead** (рис. 40), в которое можно внести требуемые изменения.



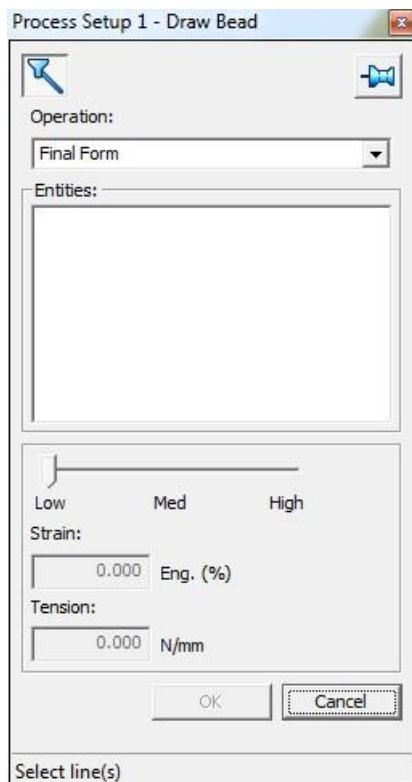

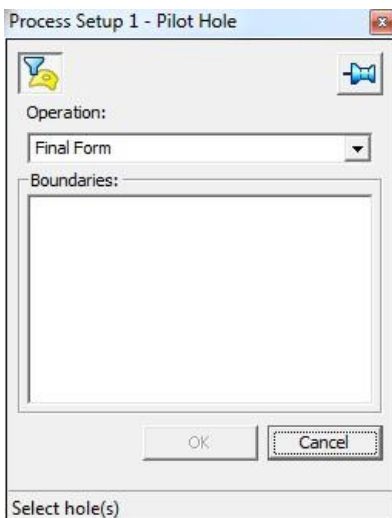


Рис. 40. Окно *Process Setup 1 – Draw Bead*

### 2.5.3 Наложение ограничений

*FormingSuite* позволяет фиксировать перемещение отверстий, пазов, поверхностей и ребер в процессе формообразования. Для задания ограничения

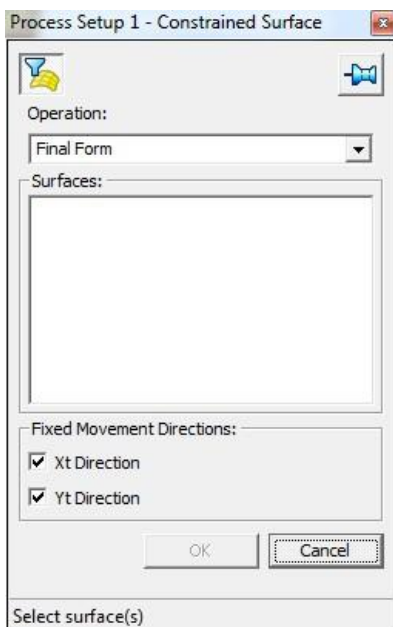
нажмите иконку  **Forming Conditions** на панели инструментов и в появившемся меню (рис. 34) выберите строку **Pilot Hole** для фиксирования отверстий, **Pilot Slot** для ограничения перемещения материала в направлении перпендикулярном осевой линии паза, **Constrained Surface** или **Constrained Edge** для фиксирования перемещения элементов поверхности или ребер. При этом появится окно *Process Setup 1 – Pilot Hole* (рис. 41, а), *Process Setup 1 – Pilot Slot* (рис. 41, б), *Process Setup 1 – Constrained Surface* (рис. 41, в) или *Process Setup 1 – Constrained Edge* (рис. 41, г) соответственно. Укажите в графическом окне элемент геометрии, на который накладывается ограничение, и нажмите **OK**.



а



б



в



г

Рис. 41. Окна *Process Setup 1 – Pilot Hole* (а), *Pilot Slot* (б), *Constrained Surface* (в) и *Constrained Edge* (г)

Кроме того в *FormingSuite* можно накладывать ограничения на узлы сетки конечных элементов, т.е. задавать количество степеней свободы: перемещение вдоль осей *X*, *Y* или *Z* и вращение вокруг них. Это необходимо, например, при определении условий симметрии.

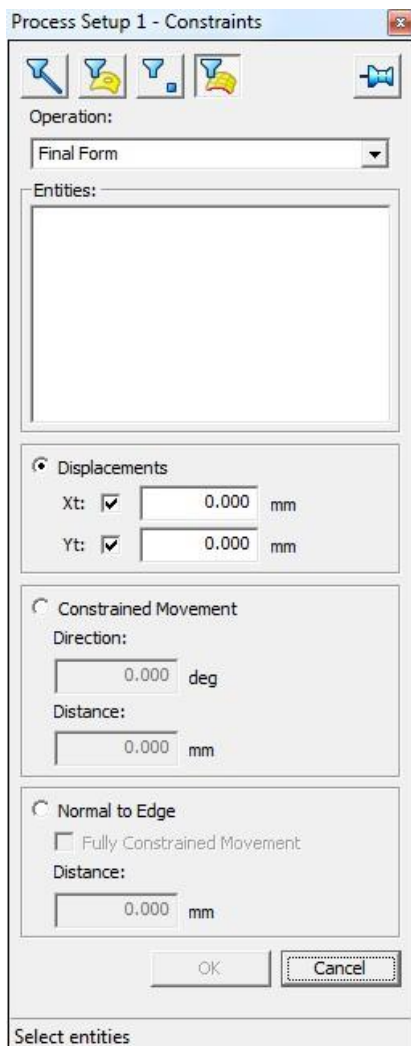


Рис. 42. Окно *Process Setup 1 – Constraints*

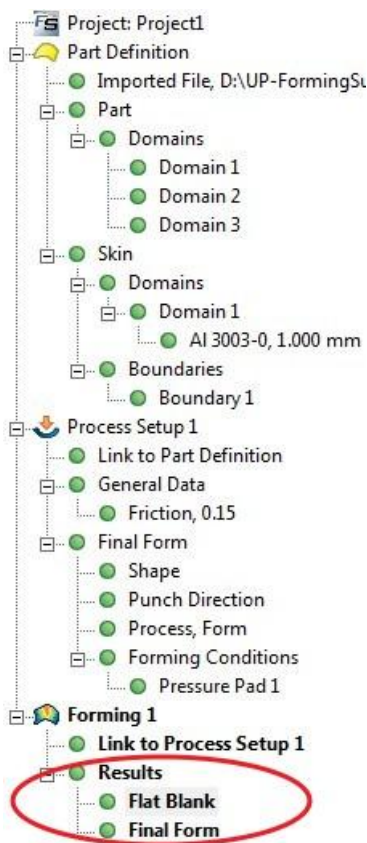








Рис. 43. Ветвь **Forming** дерева проекта

Также как и в предыдущем случае нажмите иконку  **Forming Conditions** на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку **Forming Constraints** (рис. 34). Затем в открывшемся окне **Process Setup 1 – Constraints** (рис. 42) укажите тип объекта, на узлы которого накладывается ограничение, нажав кнопку  **Select Line**,  **Select Boundary**,  **Select Point** или  **Select Edge** для выбора линий, границ, точек или ребер соответственно. После этого установите один из способов наложения ограничения: выберите пункт **Displacements** для управления перемещением узлов вдоль осей *X*, *Y* или *Z*; **Constrained Movement** для ограничения движения по другим направлениям; **Normal to Edge** для ограничения перемещения узлов в

направлении перпендикулярном ребру. Введите требуемые значения перемещений или оставьте нулевые значения для полной фиксации движения узлов. Укажите в графическом окне элементы геометрии, на которые накладываются ограничения, и нажмите **OK**.

Редактирование и удаление созданных ограничений производится через ветвь **Forming Conditions** дерева проекта указанными выше способами.

## 2.6 Запуск вычислений

После того как все параметры процесса формообразования заданы необходимо произвести расчет созданного проекта. Для этого нажмите кнопку 

*Next: Solve* в помощнике или иконку  **Solve** на панели инструментов.


После этого *FormingSuite* автоматически выполнит расчет процесса формообразования с учетом заданных параметров, а в дереве проекта будет создана новая ветвь **Forming**, содержащая результаты моделирования (рис. 43).

### 3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА (ПОСТПРОЦЕССИНГ)

После завершения моделирования необходимо провести анализ процесса формообразования, что наиболее удобно выполнить, представив результаты расчетов в графическом виде. При этом каждая характеристика процесса отображается в отдельном окне, которое имеет собственную панель инструментов для настройки параметров отображения. Основные иконки данной панели приведены в табл. 6.

Табл. 6. Иконки панели настройки отображения результатов

Иконка	Название	Описание
	<i>Pick Info</i>	Отображает все характеристики процесса формообразования (рис. 44) в точке, указанной пользователем
	<i>Display Surface</i>	Отображает результаты расчета по средней  <i>Middle</i> , наружной  <i>Side A</i> или внутренней  <i>Side B</i> поверхности изделия
	<i>Range Settings</i>	Выводит окно (рис. 45) для редактирования числовой шкалы отображаемых графических данных
	<i>Display Mode</i>	Изменяет способ отображения в графическом окне на непрерывное <i>Smooth</i> или мозаичное <i>Patch</i>
	<i>Show/Hide Mesh</i>	Скрывает или отображает сетку конечных элементов
	<i>Magnify</i>	Выводит окно (рис. 46) для управления масштабом отображения степени упругой деформации при пружинении
	<i>Show/Hide Part</i>	Скрывает или отображает исходное изделие до упругой разгрузки (пружинения)

Если требуется узнать точное значение характеристик в какой-либо точке на изделии после его формообразования, то нажмите иконку  *Pick Info* на панели инструментов, при этом откроется окно *Forming 1 – Pick Info* (рис. 44). Затем левой кнопки мыши укажите в графическом окне точку, информацию о которой необходимо получить. Можно сохранить данные, нажав кнопку *Save*. При закрытии окна кнопкой *Close* все данные и выбранные точки автоматически будут удалены.

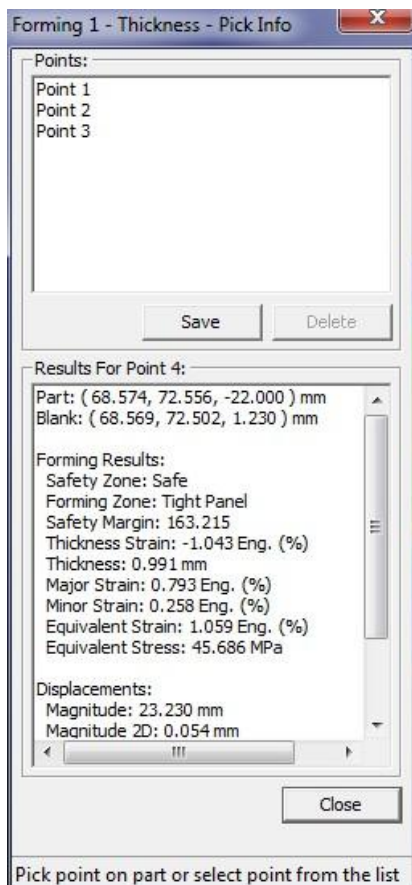



Рис. 44. Окно *Forming 1 – Pick Info*

Управление масштабом числовой шкалы, расположенной в правой части графического окна, осуществляется в окне *Forming 1 – Display Range* (рис.

45), для вызова которого нажмите иконку  *Range Settings* на панели инструментов. Доступны три способа задания диапазона значений числовой шкалы: **Default** – минимальное и максимальное значение, установленные в настройках программы; **Calculated** – минимум и максимум, отображающие полный диапазон значений характеристики; **User Defined** – ввод пределов диапазона пользователем. После ввода способа и границ шкалы нажмите **OK**.

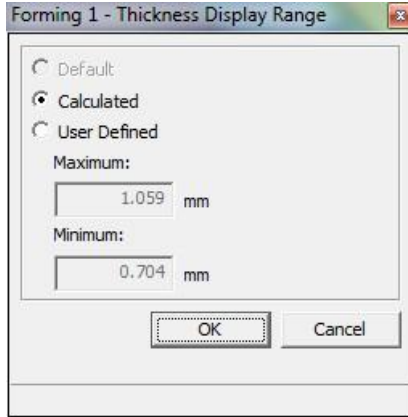





Рис. 45. Окно *Forming 1 – Display Range*

Результаты моделирования пружинения, возникающего после пластического деформирования, наиболее удобно анализировать путем сравнения геометрии изделия до и после упругой разгрузки. Для отображения исходного изделия сначала нажмите иконку  **Shape** на панели инструментов, при этом появится дополнительная панель инструментов, а затем иконку  **Show/Hide Part** на этой панели. В случае необходимости, увеличьте масштаб отображения упругого последствия, передвигая ползунок в окне *Springback 1 – Magnification* (рис. 46), которое открывается нажатием на иконку  **Magnify** на панели инструментов. Нажмите **OK**.

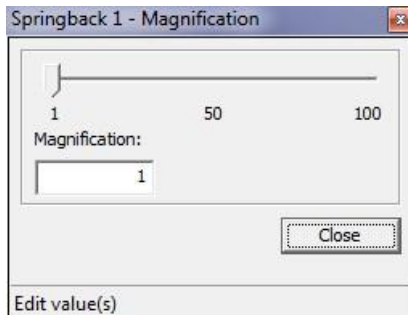


Рис. 46. Окно *Springback 1 – Magnification*



Для отображения результатов моделирования в графическом окне на панели инструментов нажмите иконку  **Formability** для анализа напряженно-деформированного состояния или иконку  **Displacement** для анализа перемещений в процессе деформирования. При этом появится соответствующее выпадающее меню (рис. 47), элементы которого описаны в табл. 7.

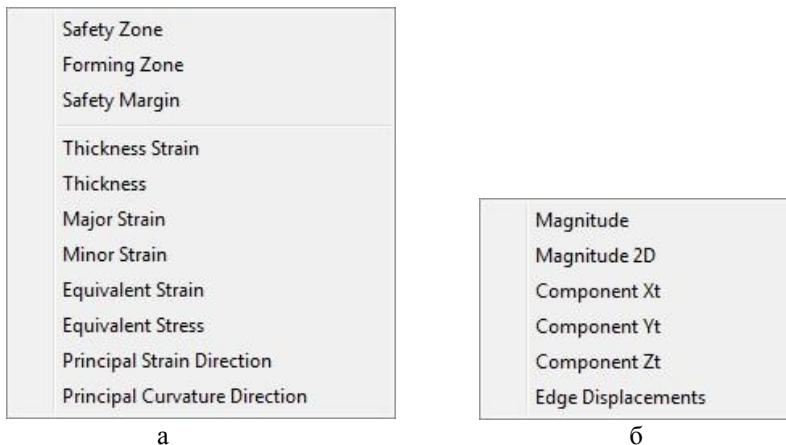


Рис. 47. Меню **Formability** (а) и **Displacement** (б)

Табл. 7. Панель анализа результатов моделирования

Иконка панели инструментов	Пункт выпадающего меню	Описание
 <b>Formability</b>	<i>Safety Zone</i>	Качественное отображение способности различных областей изделия к формообразованию (рис. 53)
	<i>Forming Zone</i>	Качественное отображение вида деформированного состояния в различных областях изделия (рис. 54)
	<i>Safety Margin</i>	Распределение относительной разности между предельно допустимой и максимальной главной деформацией в каждом узле конечно-элементной сетки (рис. 55)
	<i>Thickness Strain</i>	Степень деформации по толщине $\epsilon_3$ – относительное изменение толщины заготовки после формообразования
	<i>Thickness</i>	Распределение толщин материала в готовом изделии

Табл. 7. Продолжение





	<i>Major Strain</i>	Максимальная главная деформация $\varepsilon_1$ – наибольшая деформация растяжения в плоскости заготовки (высокое значение показателя характеризует возможность разрушения)
	<i>Minor Strain</i>	Минимальная главная деформация $\varepsilon_2$ в плоскости заготовки в направлении, перпендикулярном к направлению максимальной главной деформации (большое отрицательное значение показателя характеризует склонность к гофрообразованию)
	<i>Equivalent Strain</i>	Интенсивность деформаций: — _____ —
	<i>Equivalent Stress</i>	Интенсивность напряжений: — _____ —
	<i>Principal Strain Direction</i>	Векторное отображение направления главных деформаций растяжения и сжатия (характеризует течение материала при формообразовании)
	<i>Principal Curvature Direction</i>	Векторное отображение направления главных деформаций только на закруглениях изделия
 <i>Displacement</i>	<i>Magnitude</i>	Суммарное перемещение узлов сетки конечных элементов в процессе формообразования: _____ где $dX, dY, dZ$ – перемещение узлов вдоль оси $X, Y$ и $Z$ соответственно
	<i>Magnitude 2D</i>	Перемещение узлов сетки конечных элементов в плоскости $XY$ : _____
	<i>Component Xt</i>	Перемещение узлов сетки конечных элементов в направлении оси $X/Y/Z$
	<i>Component Yt</i>	
	<i>Component Zt</i>	
<i>Edge Displacements</i>	Отображает расстояние между краем заготовки и изделия в виде векторов	
 <i>Forming Limit Diagram</i>	-	Отображает степень деформации каждого узла сетки конечных элементов изделия на диаграмме предельных деформаций (рис. 51)
 <i>Result Graphing Along Lines</i>	-	Строит график изменения вышеперечисленных характеристик по сечению изделия

Табл. 7. Окончание

 <i>Report</i>	-	Автоматически генерирует отчет, содержащий наиболее важные исходные данные и результаты моделирования
--	---	---

Кроме того получить доступ к элементам перечисленным в табл. 7 можно через дерево проекта. Для этого щелчком правой кнопки мыши по элементу **Final Form** в ветви **Forming** (рис. 43) вызовите контекстное меню (рис. 48), в котором выберите необходимый элемент **Formability**, **Displacements**, **Forming Limit Diagram** или **Result Graphing**.

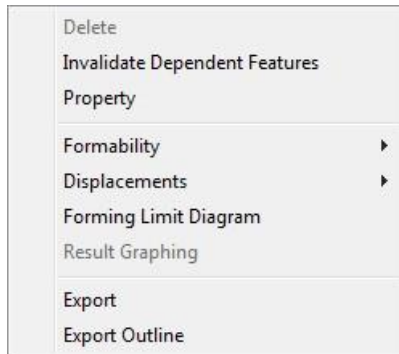


Рис. 48. Контекстное меню

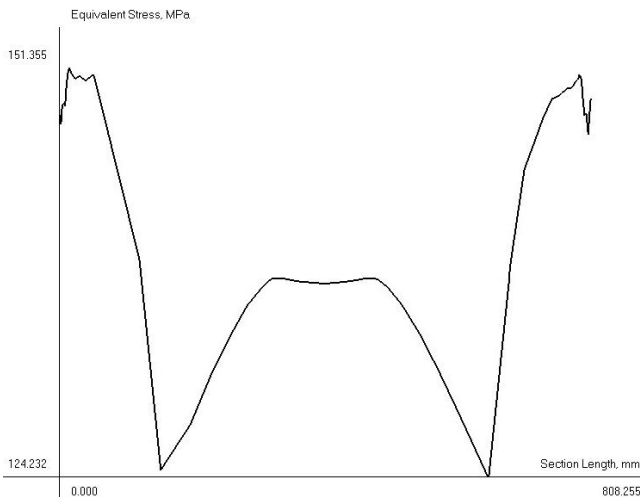


Рис. 49. График изменения интенсивности напряжений по образующей полусферы, полученной вытяжкой



*FormingSuite* строит графики изменения результатов моделирования только вдоль предварительно построенных линий (рис. 49). Таким образом, при импорте геометрии необходимо заранее создать линии на изделии, распределение характеристик вдоль которых необходимо будет узнать. При этом, после задания остальных параметров процесса и окончания вычислений, на панели инструментов становится доступной иконка  **Result Graphing Along Lines**. При нажатии на нее в графическом окне отображается график и появляется дополнительная панель (рис. 50), позволяющая выбрать линию, по которой строится график (ось абсцисс), и изменить отображаемую характеристику (ось ординат).




Рис. 50. Панель настройки отображения графиков


### 3.1 Диаграмма предельных деформаций (FLD)

Если необходимо проанализировать процесс формообразования изделия, то удобно отобразить на диаграмме предельных деформаций степень деформации каждого узла сетки конечных элементов изделия (рис. 51), нажав

иконку  **Forming Limit Diagram** на панели инструментов. При этом точки, соответствующие узлам, подсвечиваются различными цветами, в зависимости от того в какую область диаграммы попадают.

Внешний вид диаграммы и расположение предельных кривых на ней можно отредактировать, для этого сначала отобразите график в графическом

окне (иконка  **Forming Limit Diagram** на панели инструментов). Затем нажмите на кнопку **Margins** на панели инструментов, при этом откроется окно **Margins** (рис. 52), основные элементы которого описаны в табл. 8. После редактирования параметров нажмите **OK**.

Для качественного отображение способности различных областей изделия к формообразованию нажмите иконку  **Formability** на панели инструментов и в появившемся выпадающем меню выберите пункт **Safety Zone** (рис. 47, а). При этом в графическом окне отобразится изделие, области которого будут подсвечены различными цветами в зависимости от напряженно-деформированного состояния. Соответствие данных областей зонам диаграммы предельных деформаций и их характеристика приведены на рис. 53 и в табл. 9 соответственно.

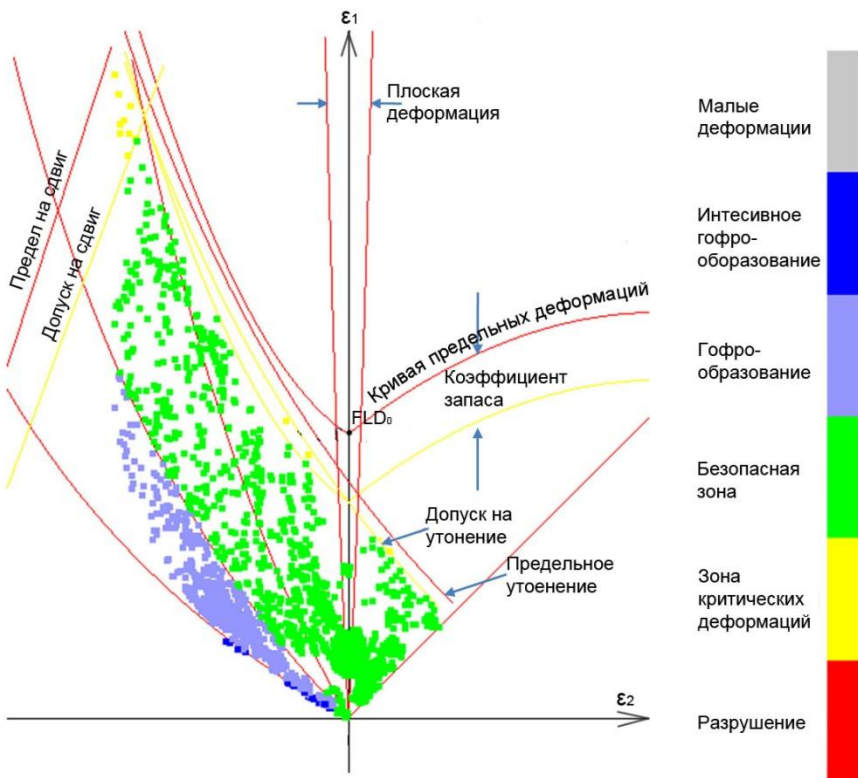


Рис. 51. Диаграмма предельных деформаций

Табл. 8. Параметры диаграммы предельных деформаций

Параметр	Описание
<i>Safety Margin</i> Коэффициент запаса	Определяет ширину зоны критических деформаций, расположенную между кривой предельных деформаций и её смещением на величину коэффициента запаса (рис. 52)
<i>Plane Strain Margin</i> Границы плоско-деформированного состояния	Задаёт ширину зоны плоско-деформированного состояния, т.е. величину минимальной главной деформации $\epsilon_2$ в процентах от максимальной $\epsilon_1$
<i>Shear Margin</i> Допуск на сдвиг	Представляют собой величину смещения предела на сдвиг и предельного утонения соответственно, т.е. также характеризуют ширину зоны критических деформаций
<i>Thinning Margin</i> Допуск на утонение	
<i>Low Strain Margin</i> Границы малых деформаций	Круглая область с центром в начале координат диаграммы

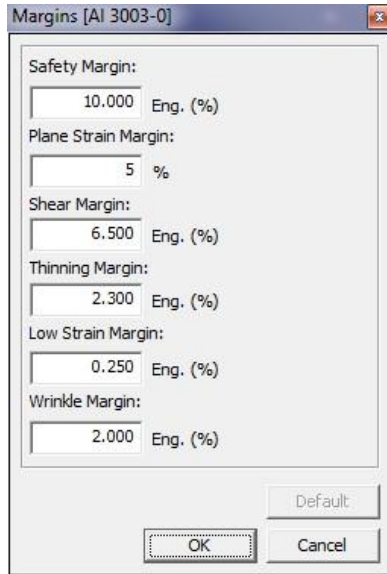


Рис. 52. Окно *Margins*

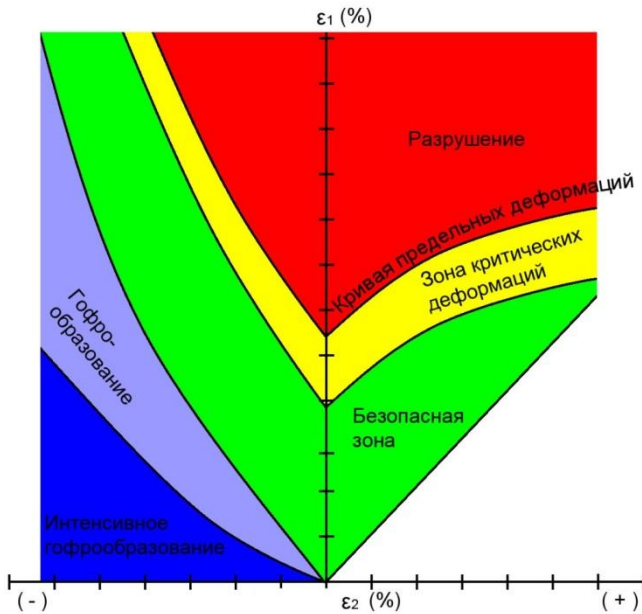


Рис. 53. Диаграмма зон по способности к формоизменению

Табл. 9. Зоны по способности к формоизменению

Цвет	Зона	Описание
	<i>Low Strain</i> Малые деформации	Низкие значения главных деформаций, расположенные близко к пересечению осей $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2$
	<i>Strong Wrinkling Tendency</i> Интенсивное гофрообразование	Большие сжимающие усилия, значительно увеличивающие вероятность интенсивного гофрообразования (особенно у материалов небольшой толщины)
	<i>Wrinkling Tendency</i> Гофрообразование	Силы сжатия достаточные для начала потери устойчивости и складкообразования
	<i>Safe</i> Безопасная зона	Область под кривой предельных деформаций, смещенной на величину коэффициента запаса, ограниченная слева пределом на сдвиг и справа предельным утонением. Материал в данной зоне не испытывает разрушения в процессе формообразования
	<i>Marginal</i> Зона критических деформаций	Область между безопасной зоной и зоной разрушения – коэффициент запаса, учитывающий непостоянство параметров процесса и свойств материала (обычно задают 10% для сталей и 6-8% для алюминиевых сплавов)
	<i>Fail</i> Разрушение	Область слева от предела на сдвиг, над кривой предельных деформаций и справа от предельного утонения. Материал в данной области испытывает локальное утонение, образование шейки или разрушение (растрескивание)

Для качественного отображение вида деформированного состояния в различных областях изделия нажмите иконку  **Formability** на панели инструментов и в появившемся выпадающем меню выберите пункт **Forming Zone** (рис. 47, а). При этом в графическом окне отобразится изделие, области которого будут подсвечены различными цветами в зависимости от вида деформированного состояния. Соответствие данных областей зонам диаграммы предельных деформаций и их характеристика приведены на рис. 54 и в табл. 10 соответственно.

Табл. 10. Зоны диаграммы деформированного состояния

Цвет	Зона	Описание
	<i>Low Strain</i> Малые деформации	Низкие значения главных деформаций, расположенные близко к пересечению осей $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2$
	<i>Strong Wrinkling Tendency</i> Интенсивное гофрообразование	Большие сжимающие усилия, значительно увеличивающие вероятность интенсивного гофрообразования (особенно у материалов небольшой толщины)

Табл. 10. Окончание

	<i>Wrinkling Tendency</i> Гофрообразование	Силы сжатия достаточные для начала потери устойчивости и гофрообразования
	<i>Loose Material</i> Свободный материал	Преобладание деформаций сжатия $\varepsilon_1$ над деформациями растяжения $\varepsilon_2$ приводит к малой жесткости материала в данной области и, как следствие, к незначительному складкообразованию и волнистости
	<i>Semi-Tight Panel</i> Сдвиг	Значительные максимальные главные деформации растяжения $\varepsilon_1$ и отрицательные деформации сжатия $\varepsilon_2$
	<i>Plane Strain</i> Плоская деформация (линейное растяжение)	Длинная узкая полоса вокруг оси максимальных главных деформаций $\varepsilon_1$ характеризуется деформацией растяжения $\varepsilon_1$ и отсутствием деформации $\varepsilon_2$
	<i>Tight Panel</i> Двухосное растяжение	Растяжение в двух направлениях $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2$ увеличивает прочность и твердость материала

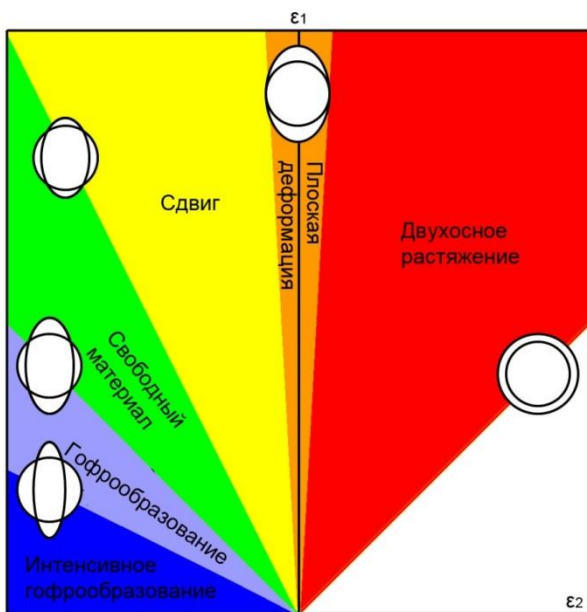


Рис. 54. Диаграмма деформированного состояния



### 3.2 Оценка запаса прочности

При интенсификации процессов формоизменения важную роль играют предельные характеристики, которые наиболее удобно анализировать, построив распределение запаса прочности  $S$  (рис. 55):

где  $\epsilon_1$  – предельно допустимая максимальная главная деформация по диаграмме предельных деформаций;  $\epsilon_2$  – максимальная главная деформация в узле конечно-элементной сетки.

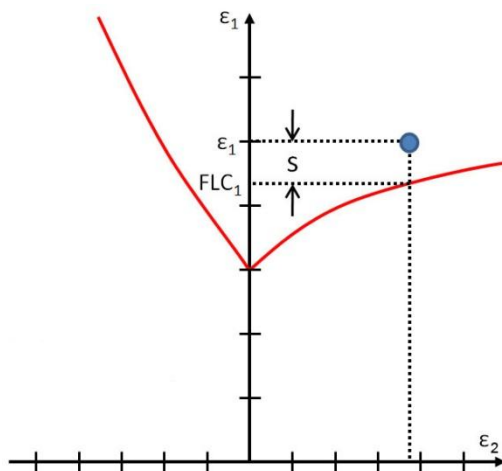



Рис. 55. Запас прочности

Для отображения распределения запаса прочности по изделию нажмите иконку  **Formability** на панели инструментов и в появившемся выпадающем меню выберите пункт **Safety Margin** (рис. 47, а).

### 3.3 Определение силовых характеристик процесса

Одним из наиболее важных параметров процесса холодной листовой штамповки является усилие на пуансоне, т.е. минимальное усилие необходимое для формоизменения заготовки. Для того чтобы определить усилие, щелчком правой кнопки мыши по элементу **Results** в ветви **Forming** дерева проекта (рис. 43) вызовите контекстное меню, в котором выберите пункт **Info** (рис. 56). При этом появится окно с информацией об усилии и времени вычислений (рис. 57), чтобы его закрыть, нажмите **OK**.

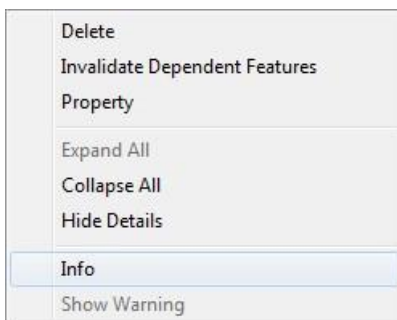


Рис. 56. Контекстное меню

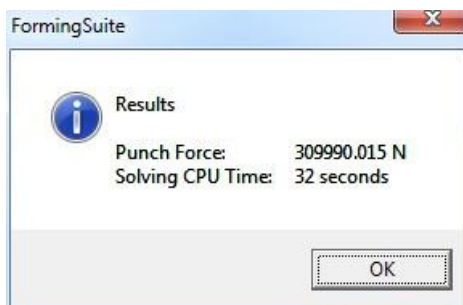


Рис. 57. Усилие операции

## 4 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ В СРЕДЕ FORMINGSUITE

### 4.1 Оценка различных вариантов раскроя

При выполнении анализа вариантов раскроя требуется геометрия заготовки, которая может быть создана непосредственно в *FormingSuite* или импортирована из любой *CAD* системы.

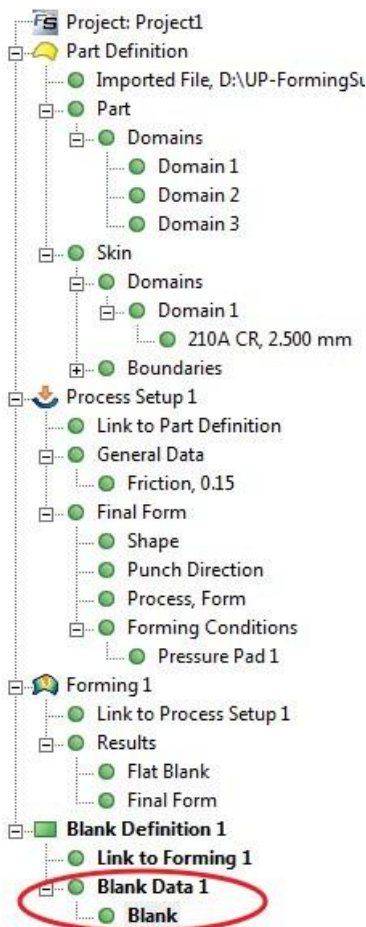








Рис. 58. Ветвь *Blank Definition* дерева проекта

Для задания заготовки, сразу после завершения расчета формообразования, нажмите кнопку  **Next: Create Blank** в помощнике или иконку 

**Blank Geometry** на панели инструментов. При этом *FormingSuite* автоматически рассчитает и построит оптимальную заготовку, которую в случае необходимости можно отредактировать или заменить, импортировав собственную геометрию.

Для импорта геометрии заготовки, предварительно созданной в любой CAD системе, нажмите кнопку  **Import Blank** на панели инструментов. Сразу откроется окно выбора файла (рис. 4), в котором укажите путь к файлу с геометрией заготовки и нажмите **OK**.

Кроме того пользователь имеет возможность создать собственную заготовку непосредственно в *FormingSuite* при помощи прямых линий. Для этого на панели инструментов нажмите кнопку  **User Defined Blank** и в графическом окне постройте ломаную линию, соответствующую контуру заготовки. Нажмите **OK**.



При необходимости *FormingSuite* позволяет внести изменения в автоматически сгенерированную геометрию заготовки, например, равномерно увеличить контур заготовки на заданную величину (кнопка  **Create Addendum** на панели инструментов) или произвести упрощение контура заготовки линиями, дугами и сплайнами (кнопка  **Smoothing** на панели инструментов).

После создания заготовки в дереве проекта появится новая ветвь **Blank Definition**, содержащая информацию о геометрии заготовки (рис. 58). Щелчком правой кнопки мыши по элементу **Blank** в дереве проекта можно вызвать контекстное меню (рис. 59), пункты **Plot** и **Export** которого позволяют вывести на печать и сохранить геометрию заготовки соответственно.



Рис. 59. Контекстное меню

## 4.2 Параметры раскроя

После создания или импортирования геометрии заготовки необходимо определить параметры раскроя. Нажмите кнопку  **Next: Define Layout Parameters** в помощнике или иконку  **Nesting** на панели инструментов, при этом появится окно **Nesting 1 – Layout Parameters** (рис. 60). В строки

*Distance Between Blanks* и *Blank to Coil Edge Distance* введите размер пере-  
мычек между заготовками и расстояния до кромки полосы соответственно,  
нажмите **OK**.

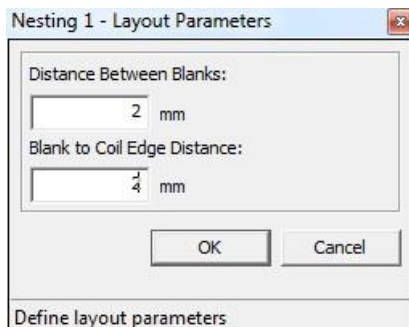


Рис. 60. Окно *Nesting 1 – Layout Parameters*


Задать максимальный шаг подачи можно, нажав на кнопку  **Layout Constraints** на панели инструментов, а затем в появившемся меню выбрав строку *Pitch* (рис. 61). Появится окно *Nesting 1 – Pitch* (рис. 62), в которое необходимо ввести максимальный шаг раскроя.



Рис. 61. Меню *Layout Constraints*

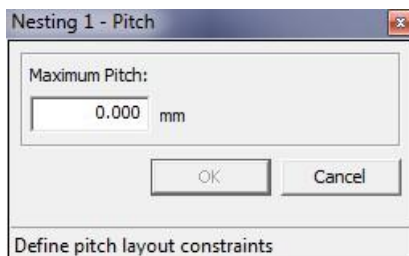



Рис. 62. Окно *Nesting 1 – Pitch*

Аналогичным образом задается угол раскроя – поворот заготовки отно-  
сительно полосы. Нажмите на кнопку  **Layout Constraints** на панели ин-  
струментов и в появившемся меню выберите строку *Blank Angle* (рис. 61), а  
затем или пункт *Layout Angle* – угол поворота заготовки, или *Relative Angle* –

угол между заготовками при двухрядном и зеркальном раскрое (углы отсчитываются против часовой стрелки). Откроется окно *Nesting 1 – Layout/Relative Angle* (рис. 63), в котором установите способ задания угла: переменный (*Variable Angle*) или фиксированный угол (*Fixed Angle*). Если был выбран постоянный угол, то *FormingSuite* при оптимизации раскроя не сможет его изменять. В случае переменного угла *FormingSuite* выполнит расчет раскроя в пределах установленного диапазона (*Minimum Angle* и *Maximum Angle*) и с заданным шагом (*Angle Increment*). После ввода всех параметров нажмите **OK**.

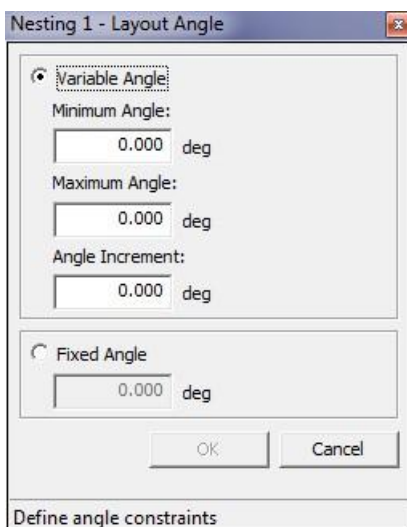



Рис. 63. Окно *Nesting 1 – Layout/Relative Angle*

Одним из важных параметров при вычислении раскроя является ширина полосы, для задания которой нажмите кнопку  *Layout Constraints* на панели инструментов, а затем в появившемся меню укажите строку *Width* (рис. 61). Появится окно *Nesting 1 – Width* (рис. 64), в котором установите способ задания ширины: переменная (*Variable Width*) или фиксированная ширина (*Fixed Width*). В результате после выполнения расчета будут показаны только те варианты раскроя, которые удовлетворяют заданной фиксированной ширине (*Fixed Width*) или лежат в установленном диапазоне (*Minimum* и *Maximum*). После ввода всех параметров нажмите **OK**.

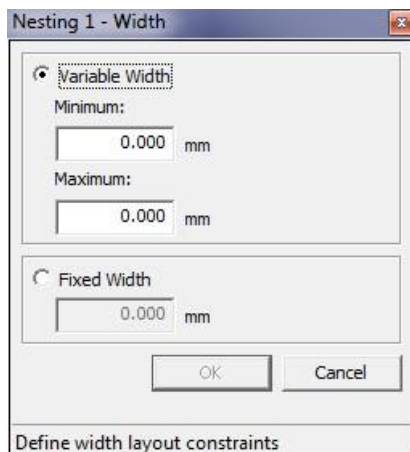



Рис. 64. Окно *Nesting 1 – Width*

#### 4.2.1 Предварительная оценка стоимости вырубного штампа

Оптимальный вариант раскроя рассчитывается в *FormingSuite* с учетом не только расположения заготовок на полосе, но и на основании количества изготавливаемых изделий и стоимости штампов. При этом для правильного вычислений экономических показателей (себестоимость изготовления заготовки, полная себестоимость изготовления заготовки с учетом стоимости штампов и т.д.) необходимо, чтобы в свойствах материала была заранее определена его стоимость.

Нажмите кнопку  **Blank Die Cost** на панели инструментов, и в появившемся окне *Nesting 1 – Blank Die Cost* (рис. 65) в строку **Total Product Volume** введите количество штампуемых заготовок. Затем укажите способ задания стоимости вырубного штампа: **Blank Die Cost** – стоимость штампа за единицу длины периметра заготовки или **Total Die Cost** – полная стоимость одного штампа. После этого необходимо ввести стоимость штампа при однорядном и двухрядном/зеркальном раскрое в строки **One Up** и **Two Up, Mirror, Two Blanks** соответственно. Нажмите **OK**.

Все параметры раскроя (угол, шаг, ширина полосы, стоимость штампов и т.д.) сохраняются в дереве проекта в ветви **Nesting** (рис. 66). При необходимости можно изменить любое ограничение, выбрав нужный элемент в дереве проекта и щелкнув по нему левой кнопкой мыши два раза. При этом откроется одно из окон, представленных на рис. 60-рис. 65.

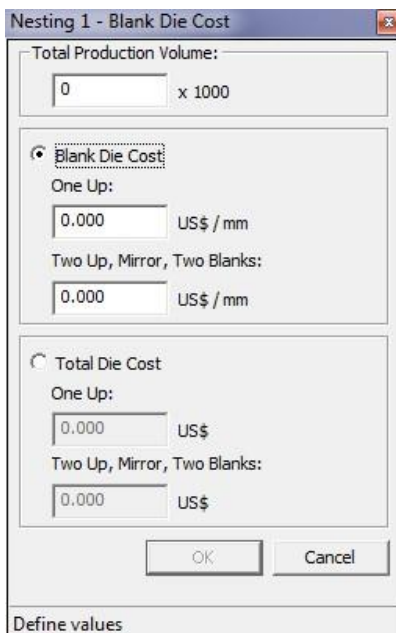


Рис. 65. Окно *Nesting 1 – Blank Die Cost*

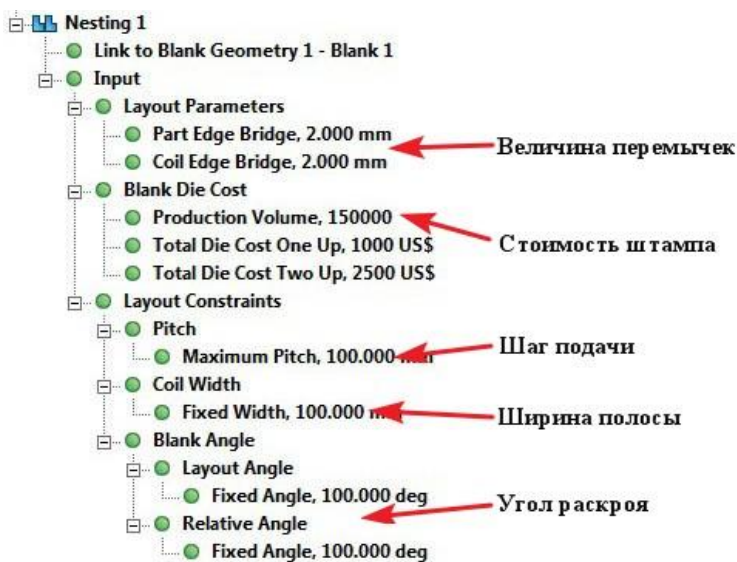


Рис. 66. Ветвь *Nesting* дерева проекта после ввода параметров





После того как все параметры раскроя заданы запустите расчет, для этого нажмите кнопку  **Next: Nesting Cut Off Dies** в помощнике, что приведет к расчету параметров стандартных геометрических форм (прямоугольник, параллелограмм, трапеция, шеврон), в которые можно вписать заготовку. Если необходимо выполнить расчет однорядного, двухрядного, зеркального или всех типов раскроя сразу нажмите кнопку  **Solve** на панели инструментов и в появившемся меню выберите пункт **One Up, Two Up, Mirror** или **Solve All** соответственно (рис. 67).



Рис. 67. Меню *Solve*

По окончании анализа раскроя все результаты расчетов автоматически сохраняются в дереве проекта (рис. 68). Полученные данные в табличном и графическом виде вызываются двойным щелчком левой кнопки мыши по одному из элементов (**One Up, Two Up, Mirror** или **Cut Off Dies**).

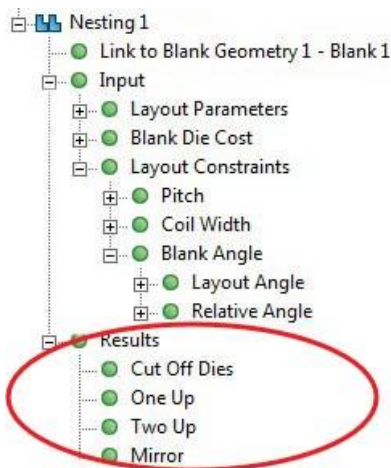


Рис. 68. Ветвь *Nesting* дерева проекта после окончания расчета

Кроме того можно построить график зависимости коэффициента использования материала/себестоимость заготовки от шага и угла раскроя. Для этого вызовите контекстное меню (рис. 69) щелчком правой кнопки мыши по интересующему элементу (*One Up*, *Two Up*, *Mirror* или *Cut Off Dies*) и выберите пункт *Show Chart*. Сразу же произойдет автоматическая генерация графика, при необходимости можно изменить данные отображаемые по осям.

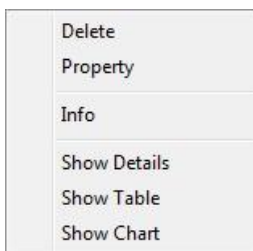





Рис. 69. Контекстное меню

### 4.3 Анализ пружинения

Анализ пружинения в *FormingSuite* выполняется после моделирования процесса формообразования. Для входа в режим расчета упругих деформаций нажмите иконку  *Springback* на панели инструментов или выберите в главном меню *Workbench* -> *Springback*. Затем произведите запуск вычислений, нажав кнопку  *Next: Solve Springback* в помощнике или иконку  *Solve* на панели инструментов.

После этого *FormingSuite* автоматически выполнит расчет пружинения, возникающего после операции формообразования, а в дереве проекта будет создана новая ветвь *Springback*, содержащая входные параметры и результаты вычислений (рис. 70).

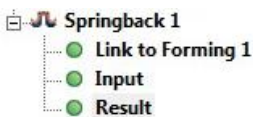


Рис. 70. Ветвь *Springback* дерева проекта после анализа пружинения

## 5 ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ *FORMINGSUITE*

Ниже приведены подробные примеры использования программного продукта *FormingSuite* для анализа процессов холодной листовой штамповки.

### 5.1 Моделирование гибки. Оценка вариантов раскроя

На рис. 71 изображен чертеж детали, изготовленной из стали 210A CR. С точки зрения формообразования наиболее проблемными зонами данной детали являются участки цилиндрической поверхности с радиусом 3 мм, так как это значение наиболее близко к минимально возможному радиусугиба. Полки детали имеют размеры достаточные для осуществления штамповки. Отверстия  $\varnothing 5$  мм расположены на достаточном удалении от края заготовки, в связи с чем можно ожидать, что искажения их формы в ходе процесса наблюдаться не будет. Поэтому изготовление заготовки можно осуществлять вырубкой-пробивкой.

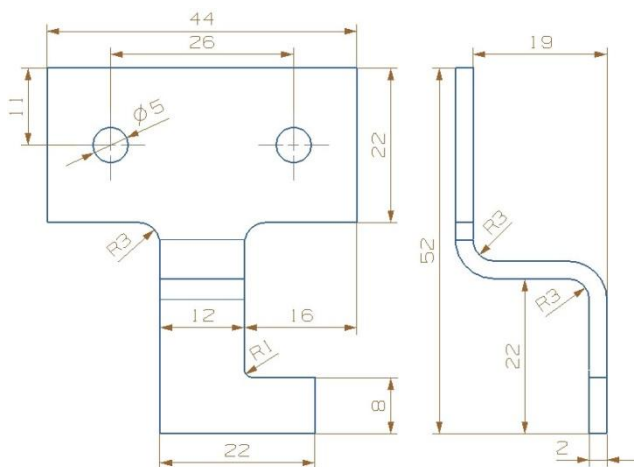


Рис. 71. Деталь «Угольник»

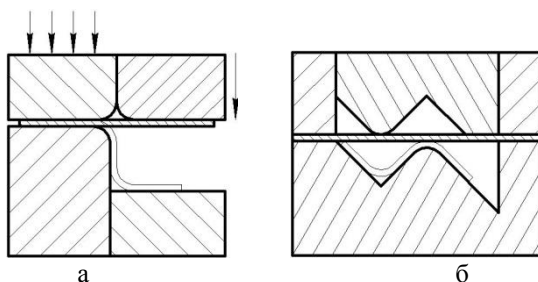
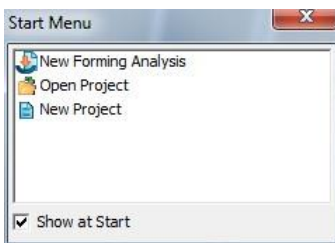


Рис. 72. Гибка на универсальном инструменте (а) и в штампах (б)

Штамповка данной детали возможна по следующим схемам нагружения (рис. 72). Рассчитаем оба варианта.

### 5.1.1 Геометрия изделия

Запустите *FormingSuite*, при этом будет вызвано главное окно и окно быстрого запуска *Start Menu* (рис. 73, а). В данном окне укажите тип моделируемой задачи *New Forming Analysis*, после этого автоматически откроется окно выбора файла для импортирования геометрии объекта (рис. 73, б). Твёрдотельная модель угольника заранее создана средствами *CAD* системы *Unigraphics NX7* и сохранена в формате *IGES*. Укажите путь к файлу *ugolnik.igs* и нажмите кнопку *Открыть*.




а



б

Рис. 73. Импортирование геометрии в *FormingSuite*

Определим поверхности, по которым будут выполняться расчеты, для этого нажмите в помощнике  **Next: Generate Skin**. При этом расчетная область выделиться в графическом окне сиреневым цветом (рис. 74, а) и будет указана в появившемся окне **Part Definition – Skin** (рис. 75). Нажмите **OK**.

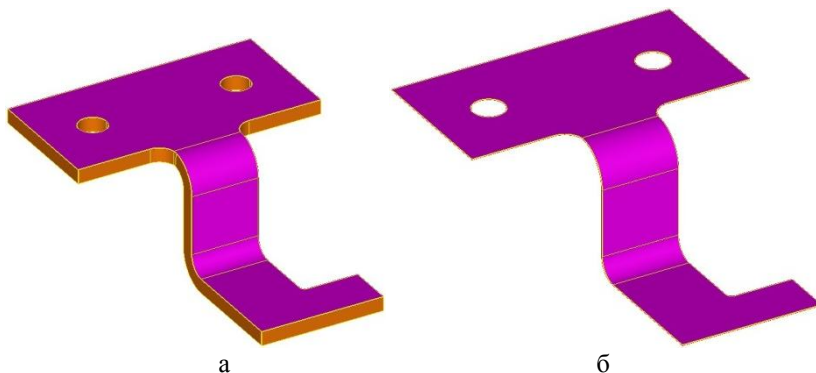


Рис. 74. Геометрия объекта (а) и расчетная поверхность (б)

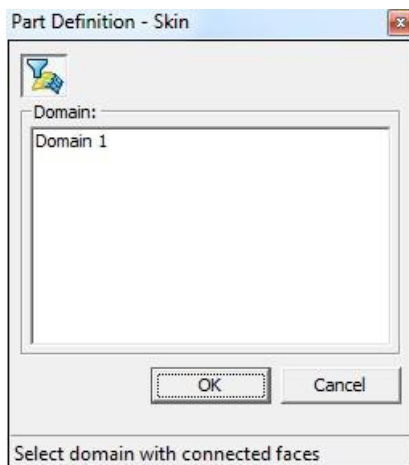



Рис. 75. Выбор расчетной поверхности для твердотельной модели

Далее необходимо задать марку материала и его толщину, нажмите в помощнике  **Next: Define Material**. В появившемся окне **Part Definition – Property** в выпадающем меню **Material Type** выберите холоднокатаный стальной лист **210A CR** (рис. 76). Так как импортировалась твердотельная

модель, то поле **Material Thickness** заполнено автоматически на основании геометрических данных. Нажмите **OK**.

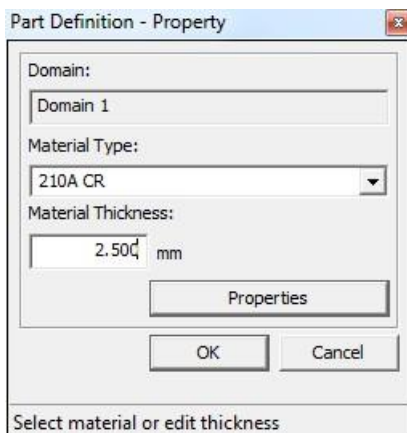



Рис. 76. Окно **Part Definition – Property**

Вид дерева проекта после импорта геометрии, назначения расчетных поверхностей и марки материала приведен на рис. 77.



Рис. 77. Ветвь **Part Definition** дерева проекта

### 5.1.2 Параметры процесса

Для создания сетки конечных элементов нажмите в помощнике кнопку  **Next: Generate Mesh**. При этом в появившемся окне **Process Setup 1 – Meshing Settings** будут автоматически определены оптимальные параметры сетки (рис. 78). Нажмите **OK**.

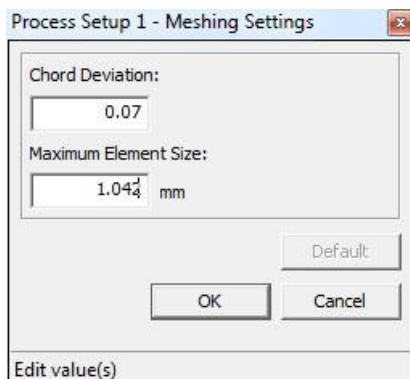


Рис. 78. Окно *Process Setup 1 – Meshing Settings*

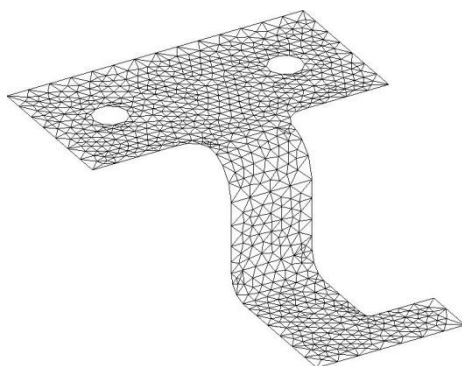


Рис. 79. Сетка конечных элементов

После генерации сетки конечных элементов автоматически появляется окно *Process Setup 1 - Friction* (рис. 80). Оставим без изменений коэффициент трения, установленный по умолчанию. Нажмите **OK**.

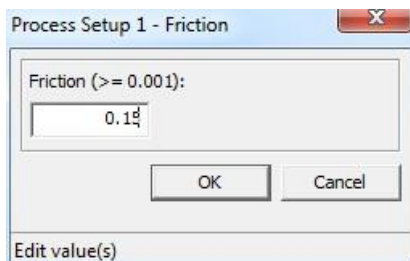



Рис. 80. Окно *Process Setup 1 – Friction*

Затем необходимо задать направление движения пуансона, для этого нажмите в помощнике кнопку  **Next: Define Punch Direction**. Вначале рассмотрим процесс гибки на универсальном инструменте, поэтому в открывшемся окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 81) укажите способ задания направления по нормали – **Normal**, а затем в графическом окне левой кнопкой мыши щелкните по поверхности с отверстиями.

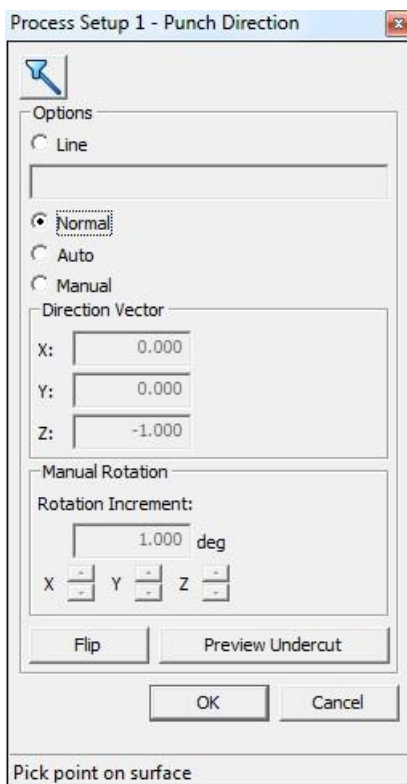



Рис. 81. Окно **Process Setup 1 – Punch Direction**

Проанализируйте проблемные зоны – поднутрения, возникающие при заданном направлении пуансона. Для этого нажмите кнопку **Preview Undercut** в окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 81) и программа автоматически отобразит их в графическом окне (рис. 82). Нажмите **OK**.





Рис. 82. Отображение вероятных поднутрений

Нажмите в помощнике кнопку  **Next: Define Forming Process** для определения характера взаимодействия инструмента с заготовкой в процессе формоизменения. Так как в данном случае рассматривается операция гибки (рис. 26, б), то в окне **Process Setup 1 – Process** укажите пункт **Form** (рис. 83) и нажмите **OK**.

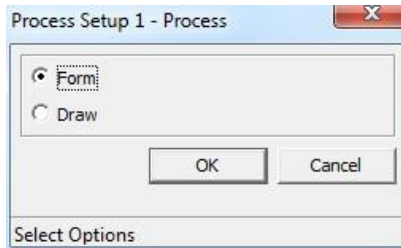


Рис. 83. Окно **Process Setup 1 – Process**

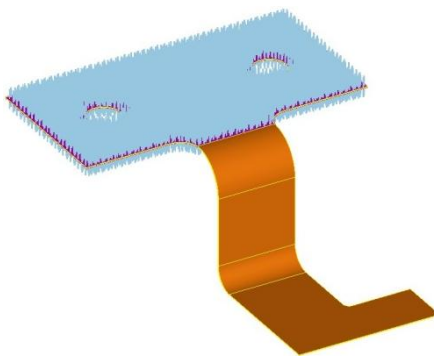



Рис. 84. Область действия давления на изделие

Для фиксации заготовки в процессе гибки, приложим давление к верхней части угольника. Нажмите иконку  **Forming Conditions** на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку **Pressure Pad** (рис. 34). В графическом окне левой кнопкой мыши щелкните по поверхности с отверстиями, при этом она подсветится (рис. 84), а в окне **Process Setup 1 – Pressure Pad** автоматически определится рекомендуемое значение давления (рис. 85). Согласимся с предлагаемой величиной давления и нажмем **OK**.

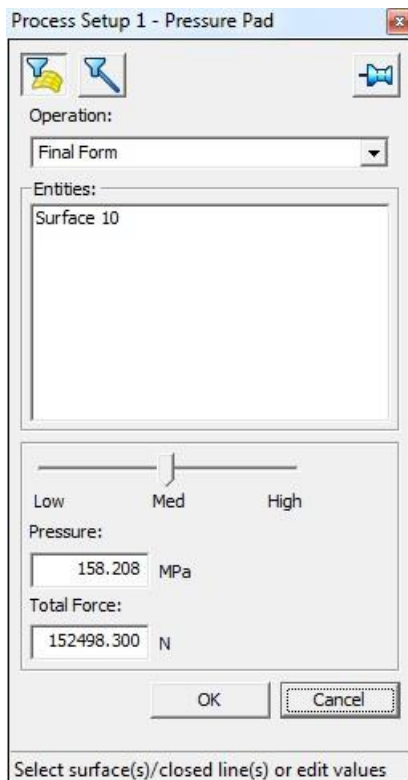



Рис. 85. Окно **Process Setup 1 – Pressure Pad**

Все параметры процесса, определенные пользователем, сохраняются в ветви **Process Setup** дерева проекта (рис. 86).



Рис. 86. Ветвь *Process Setup* дерева проекта

### 5.1.3 Просмотр результатов моделирования

После того как все параметры процесса формообразования заданы необходимо произвести расчет созданного проекта. Нажмите кнопку  **Next: Solve** в помощнике. После окончания вычислений все результаты моделирования сохраняются в ветви **Forming** дерева проекта (рис. 87), а в графическом окне отобразится рассчитанная геометрия заготовки и изделие (рис. 88).

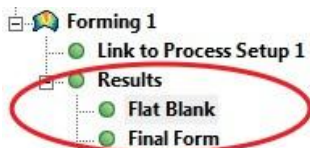


Рис. 87. Ветвь *Forming* дерева проекта

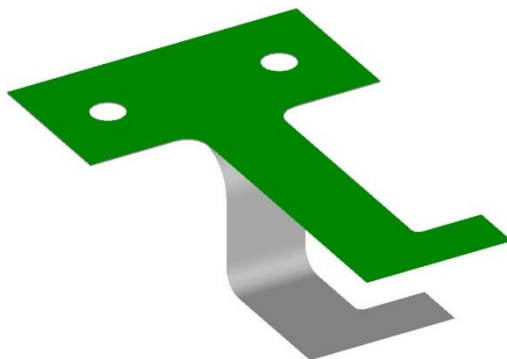

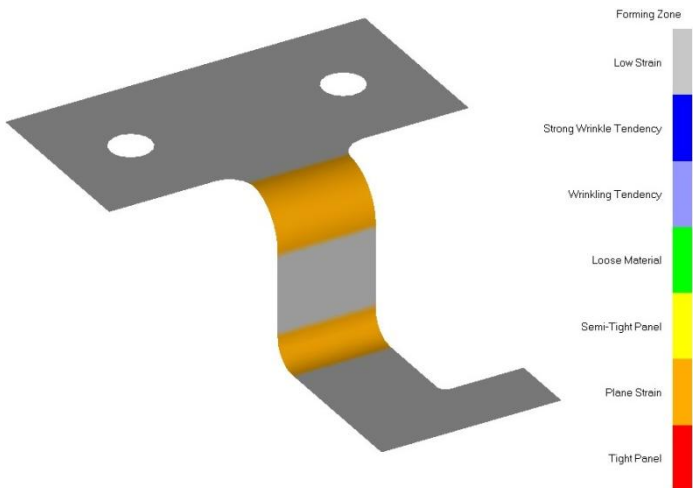


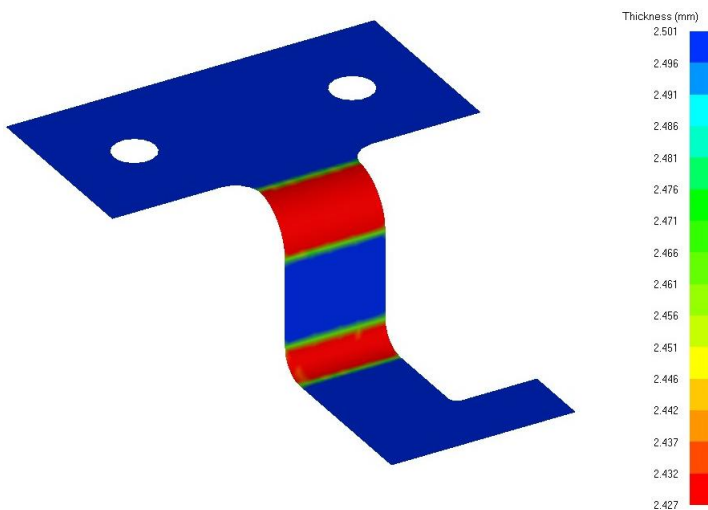
Рис. 88. Изделие и заготовки

Проанализируем деформированное состояние и изменение толщины изделия после формообразования. Нажмите иконку  **Formability** на панели

инструментов и в появившемся выпадающем меню выберите пункт **Forming Zone**, а затем **Thickness** (рис. 47, а). При этом в графическом окне отобразится изделие, области которого будут подсвечены различными цветами в зависимости от вида деформированного состояния (рис. 89, а), а затем от толщины материала (рис. 89, б).



а



б

Рис. 89. Деформированное состояние (а) и толщина изделия (б) после формообразования

Для того чтобы определить усилие, щелчком правой кнопки мыши по элементу **Results** в ветви **Forming** дерева проекта (рис. 87) вызовите контекстное меню, в котором выберите пункт **Info** (рис. 56). При этом появится окно с информацией об усилии (рис. 90). Нажмите **OK**.

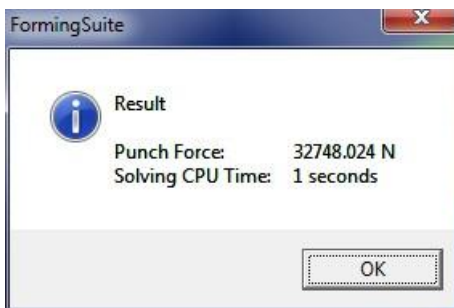


Рис. 90. Усилие гибки

#### 5.1.4 Расчет гибки в штампе

Промоделируем процесс гибки детали в штампе. Скопируем ветвь **Process Setup 1** дерева проекта. Для этого щелчком правой кнопкой мыши по элементу **Process Setup 1** вызовите контекстное меню (рис. 91), в котором выберите пункт **Copy**. При этом *FormingSuite* спросит нужно ли также копировать зависимые элементы данной ветви дерева. В нашем случае это ветвь **Forming 1**, которая в дальнейшем не потребуется, поэтому нажмите кнопку **Нem** (рис. 92).

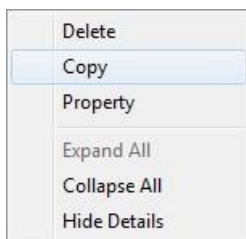


Рис. 91. Контекстное меню

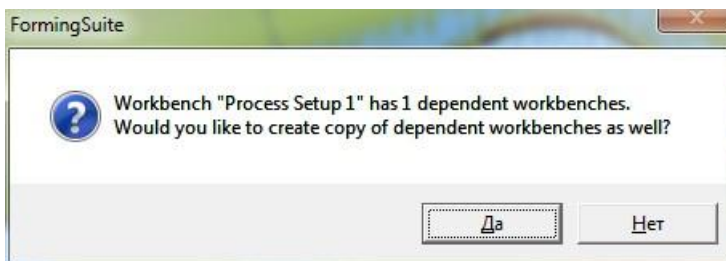


Рис. 92. Окно-предупреждение

После копирования в дереве проекта появится новая ветвь **Process Setup 2**, содержащая все параметры процесса, определенные пользователем ранее. Двойным щелчком левой кнопки мыши раскройте данную ветвь, а затем ее элемент **Final Form** (рис. 93).

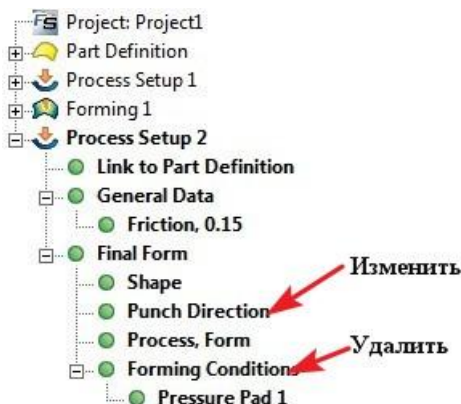


Рис. 93. Ветвь **Process Setup** дерева проекта

Двойным щелчком левой кнопки мыши по элементу **Punch Direction** вызовет окно **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 94), в котором укажите ручной способ задания направления – **Manual**. После этого выполним поворот вектора направления пуансона на 45° вокруг оси *X*: введите угол поворота в строку **Rotation Increment** и нажмите кнопку «вниз» рядом с буквой «X».

Проанализируйте проблемные зоны – поднутрения, возникающие при заданном направлении пуансона. Для этого нажмите кнопку **Preview Undercut** в окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 94) и программа автоматически отобразит их в графическом окне (при данном направлении поднутрения отсутствуют). Нажмите **OK**.

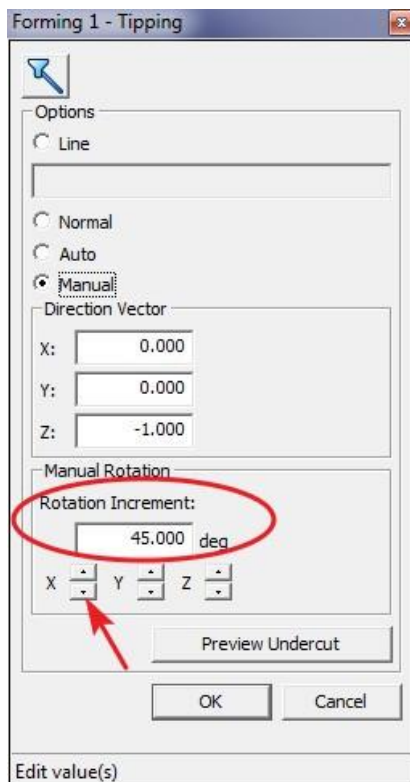


Рис. 94. Окно *Process Setup 1 – Punch Direction*

В данном случае гибка осуществляется без прижима, поэтому удалим наложенное ранее граничное условие. Щелчком правой кнопкой мыши по элементу **Forming Conditions** в дереве проекта вызовите контекстное меню (рис. 95), в котором выберите пункт **Delete**. При этом *FormingSuite* предупредит, что удаление приведет к изменению зависимых элементов. Нажмите кнопку **Да** (рис. 96).



Рис. 95. Контекстное меню

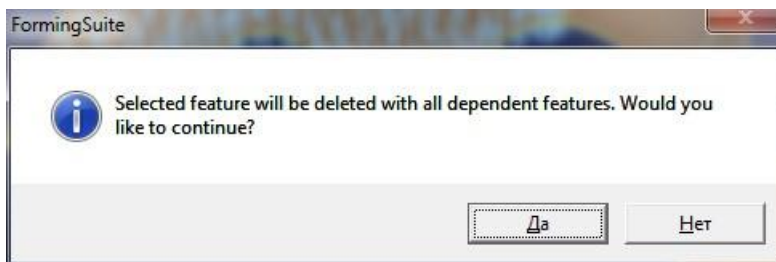




Рис. 96. Окно-предупреждение


После изменения параметров процесса запустите расчет: нажмите кнопку  **Next: Solve** в помощнике. После окончания вычислений все результаты моделирования сохраняются в ветви **Forming 2** дерева проекта.


Как и в предыдущем случае выполните анализ напряженно-деформированного состояния и убедитесь, что схема нагружения не оказывает значительного влияния на распределение напряжений и деформаций. Наблюдается только увеличение усилия гибки до 35 822,292 Н.

### 5.1.5 Расчет вариантов раскроя

Выполним расчет различных вариантов раскроя заготовок для первой схемы гибки. В дереве проекта левой кнопкой мыши щелкните по элементу **Forming 1**.

Воспользуемся геометрией заготовки, вычисленной в процессе моделирования. Нажмите кнопку  **Next: Create Blank** в помощнике, при этом геометрия заготовки отобразится в графическом окне (рис. 97) и сохранится в ветви **Blank Definition** дерева проекта (рис. 98).

Зададим параметры раскроя, для этого нажмите кнопку  **Next: Define Layout Parameters** в помощнике. В окне **Nesting 1 – Layout Parameters** в строки **Distance Between Blanks** и **Blank to Coil Edge Distance** введите размер перемычек между заготовками 3,5 мм и расстояния до кромки полосы 3,5 мм соответственно (рис. 99). Нажмите **OK**.

После того как все параметры раскроя заданы запустите расчет, для этого нажмите кнопку  **Solve** на панели инструментов и в появившемся меню выберите пункт **Solve All** (рис. 67). По окончании вычислений все результаты сохраняются в ветви **Nesting** дерева проекта (рис. 100).



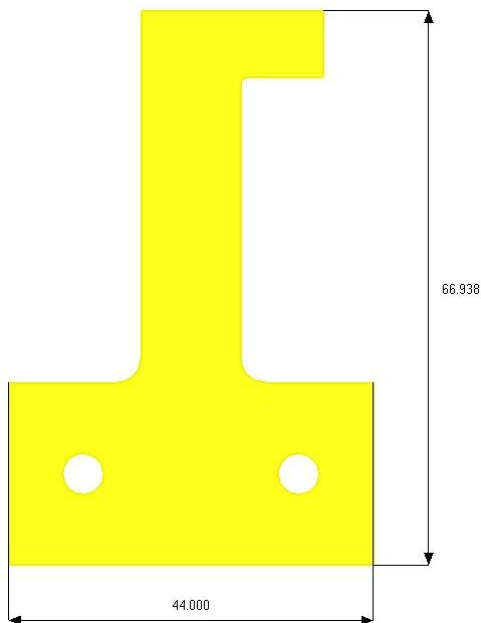


Рис. 97. Геометрия заготовки

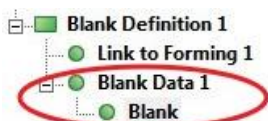


Рис. 98. Ветвь *Blank Definition* дерева проекта

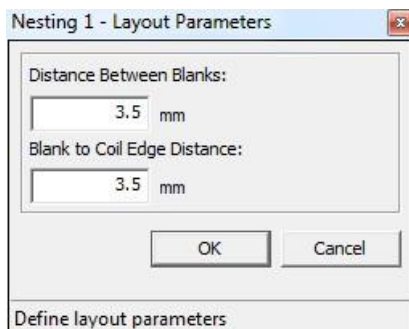


Рис. 99. Окно *Nesting 1 – Layout Parameters*

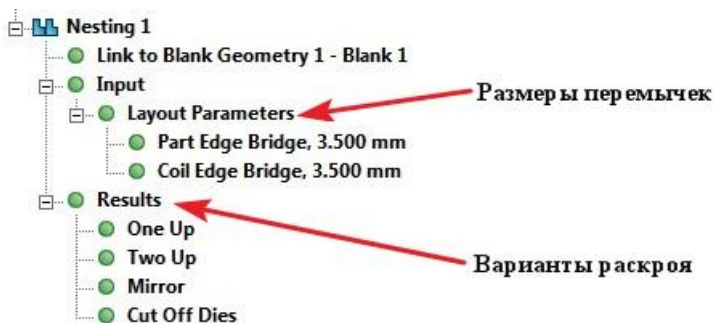



Рис. 100. Ветвь *Nesting* дерева проекта после окончания расчета

Полученные данные в табличном и графическом виде вызываются двойным щелчком левой кнопки мыши по одному из элементов (*One Up*, *Two Up*, *Mirror* или *Cut Off Dies*) в дереве проекта (рис. 100). При этом в таблице для каждого варианта раскроя выбранного типа приведены коэффициенты использования материала, параметры раскроя и т.п., а в графическом окне отображается схема раскроя (рис. 101-рис. 104).

После завершения всех вычислений сохраните созданный проект, нажав на кнопку  на панели инструментов.

## 5.2 Расчет пружинения после гибки

Выполним анализ упругого пружинения после формообразования изделия, изображенного на рис. 105.

### 5.2.1 Геометрия изделия

Запустите *FormingSuite*, при этом будет вызвано главное окно и окно быстрого запуска *Start Menu* (рис. 106, а). В данном окне укажите тип моделируемой задачи *New Forming Analysis*, после этого автоматически откроется окно выбора файла для импортирования геометрии объекта (рис. 106, б). Твердотельная модель скобы заранее создана средствами CAD системы *Unigraphics NX7* и сохранена в формате *IGES*. Введите путь к файлу *skoba.igs* и нажмите кнопку *Открыть*.

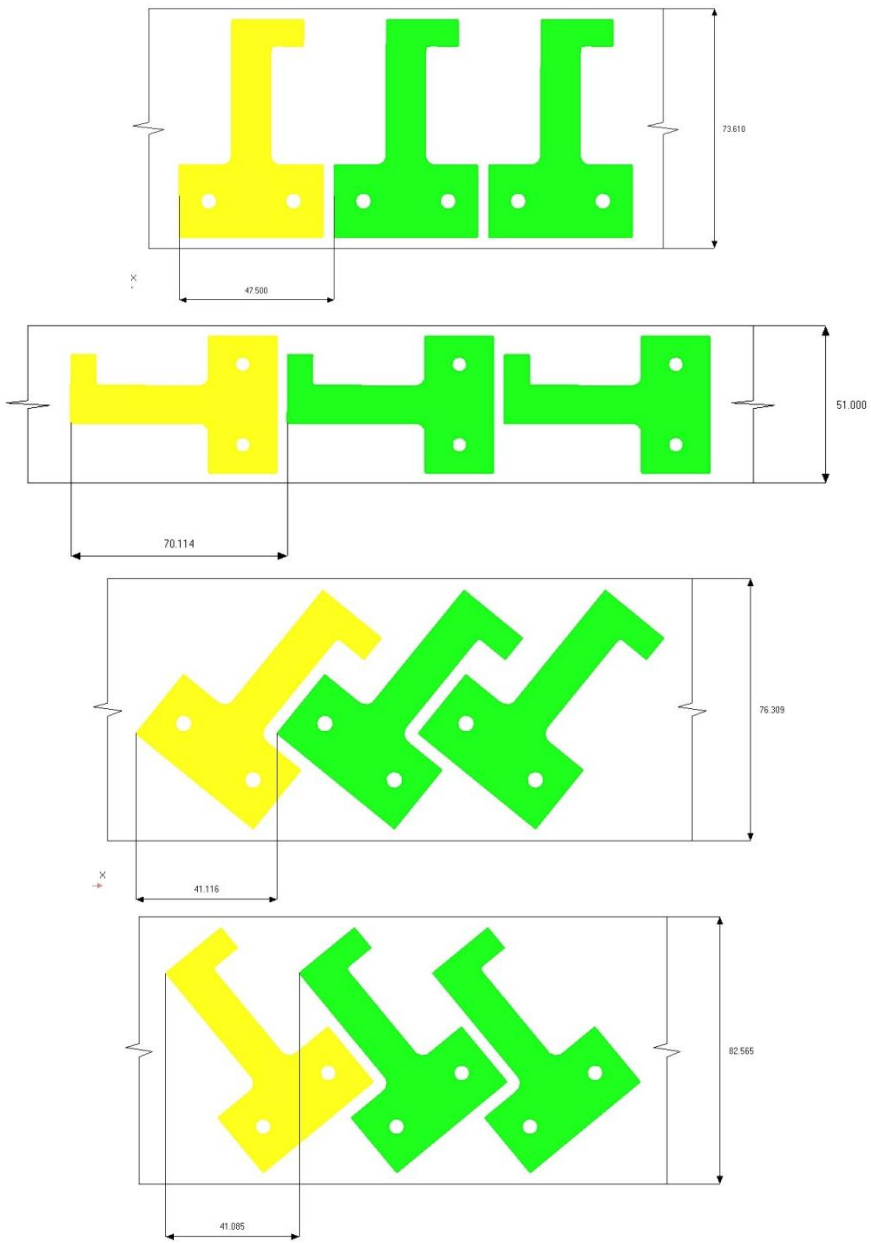


Рис. 101. Варианты однорядного раскроя

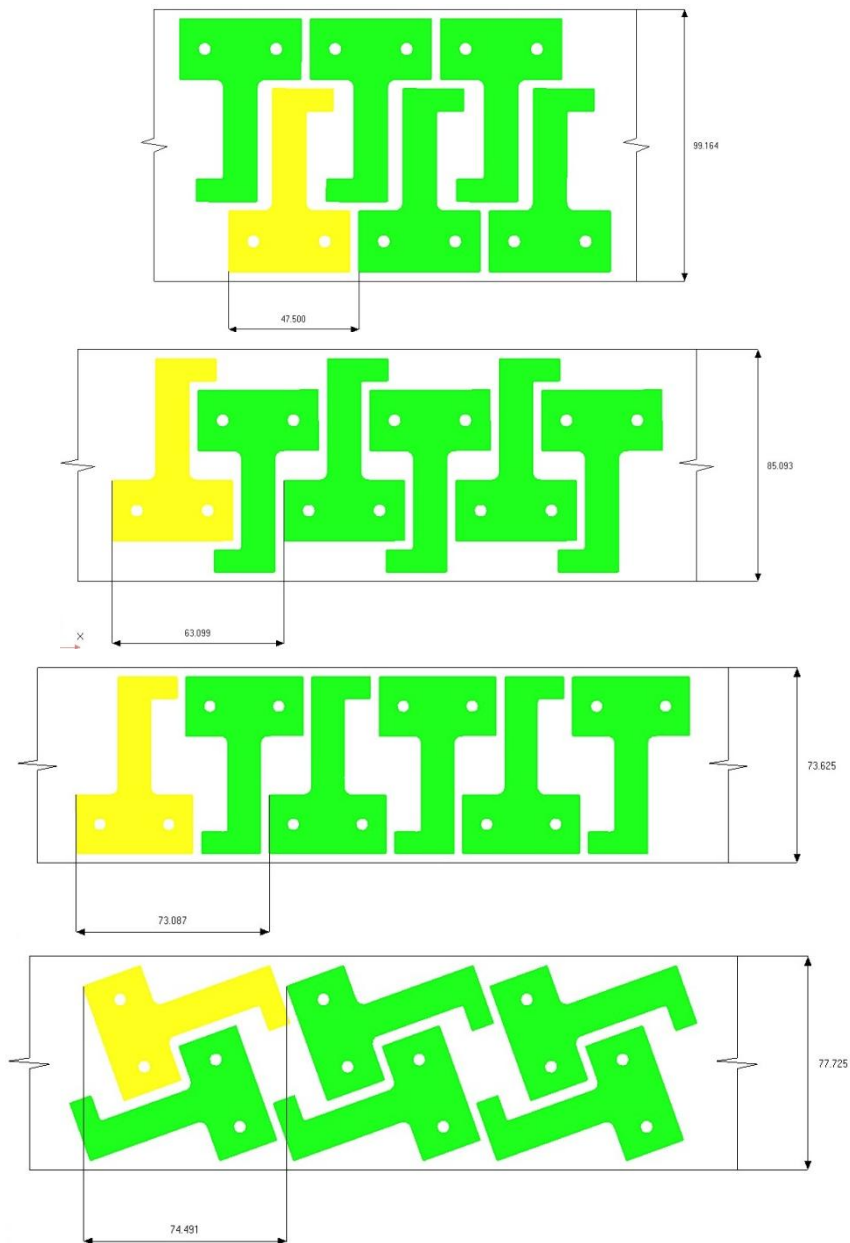


Рис. 102. Варианты двухрядного раскроя

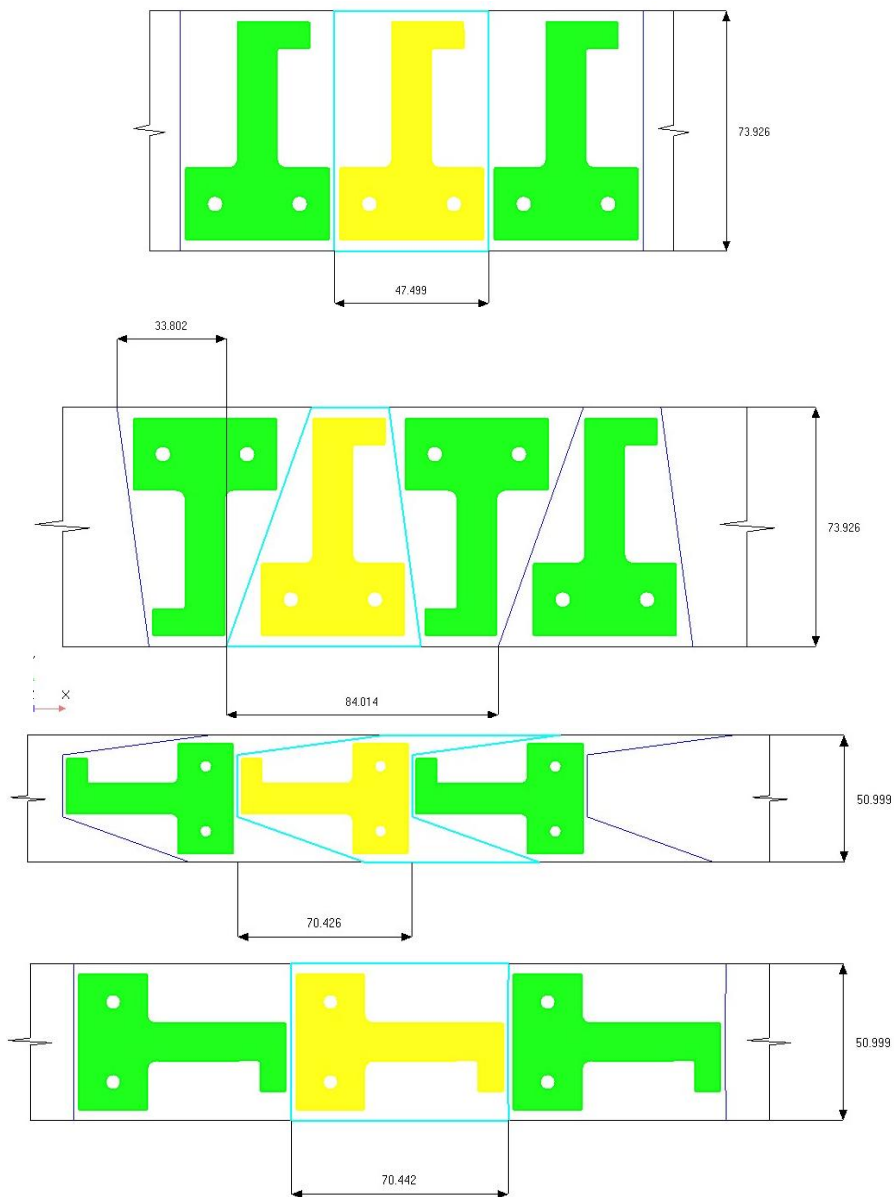


Рис. 103. Стандартные геометрические формы заготовок

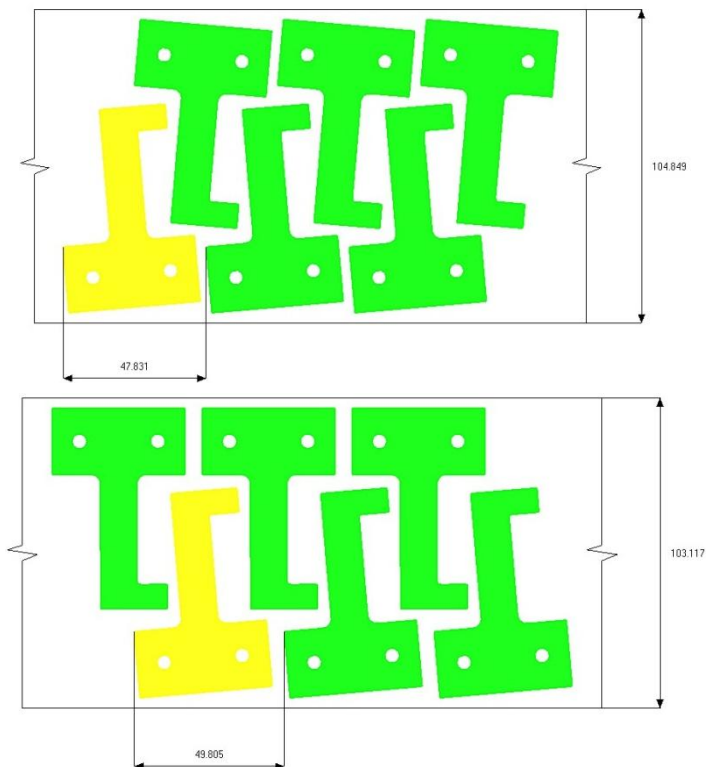


Рис. 104. Варианты зеркального раскроя

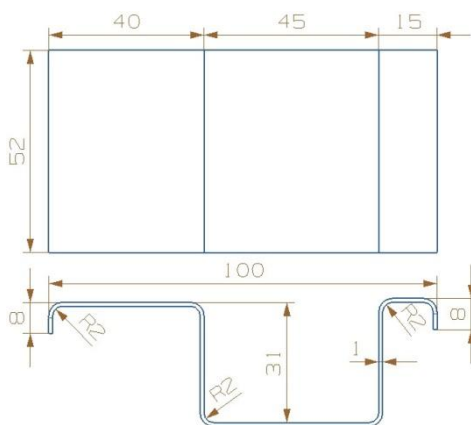
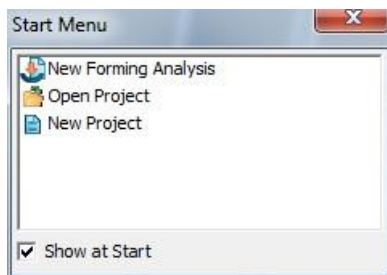


Рис. 105. Деталь «Скоба»




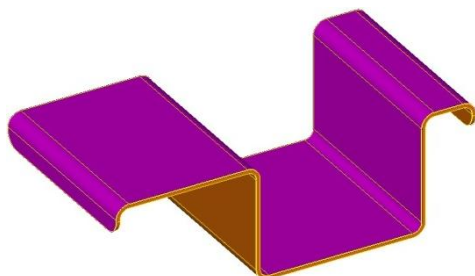
а



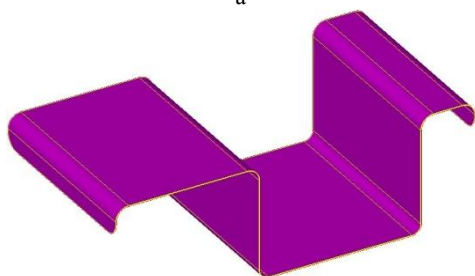
б

Рис. 106. Импорт геометрии в *FormingSuite*

Определим поверхности, по которым будут выполняться расчеты, для этого нажмите в помощнике  **Next: Generate Skin**. При этом расчетная область выделится в графическом окне сиреневым цветом (рис. 107, а) и будет указана в появившемся окне **Part Definition – Skin** (рис. 108). Нажмите **OK**.



а



б

Рис. 107. Геометрия объекта (а) и расчетная поверхность (б)

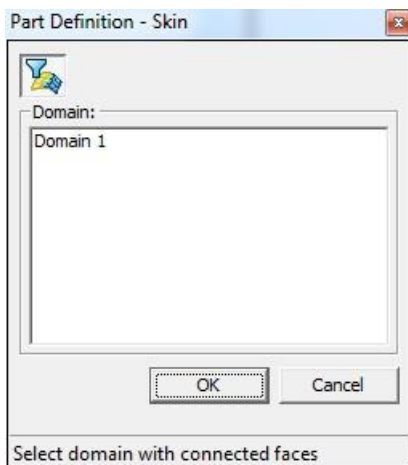



Рис. 108. Выбор расчетной поверхности для твердотельной модели

Далее необходимо задать марку материала и его толщину, нажмите в помощнике  **Next: Define Material**. В появившемся окне *Part Definition* –



**Property** в выпадающем меню **Material Type** выберите алюминиевый сплав *Al 3003-O* (рис. 109). Так как импортировалась твердотельная модель, то поле **Material Thickness** заполнено автоматически на основании геометрических данных. Нажмите **OK**.

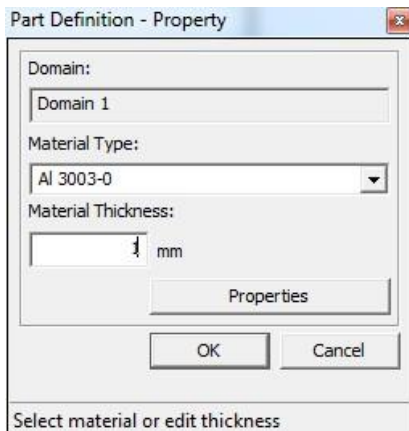


Рис. 109. Окно **Part Definition – Property**

Вид дерева проекта после импорта геометрии, назначения расчетных поверхностей и марки материала приведен на рис. 110.

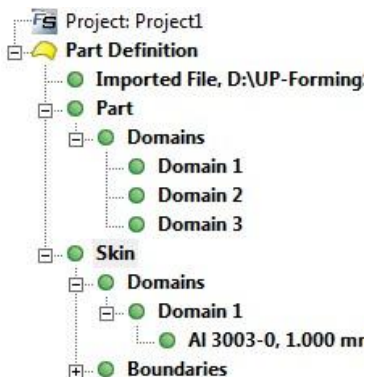


Рис. 110. Ветвь **Part Definition** дерева проекта

### 5.2.2 Параметры процесса

Для создания сетки конечных элементов нажмите в помощнике кнопку



**Next: Generate Mesh**. При этом в появившемся окне **Process Setup 1 –**

**Meshing Settings** будут автоматически определены оптимальные параметры сетки (рис. 111). Нажмите **OK**.

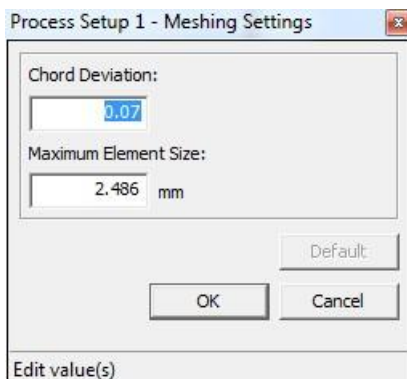


Рис. 111. Окно **Process Setup 1 – Meshing Settings**

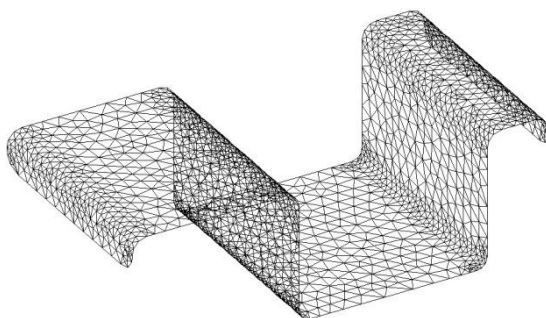


Рис. 112. Сетка конечных элементов

После генерации сетки конечных элементов автоматически появляется окно **Process Setup 1 - Friction** (рис. 113). Оставим без изменений коэффициент трения, установленный по умолчанию. Нажмите **OK**.

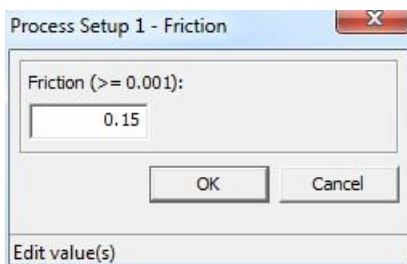



Рис. 113. Окно **Process Setup 1 – Friction**

Затем необходимо задать направление движения пуансона, для этого нажмите в помощнике кнопку  **Next: Define Punch Direction**. В открывшемся окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 114) укажите способ задания направления по нормали – **Normal**, а затем в графическом окне левой кнопкой мыши щелкните по одной из полок скобы.

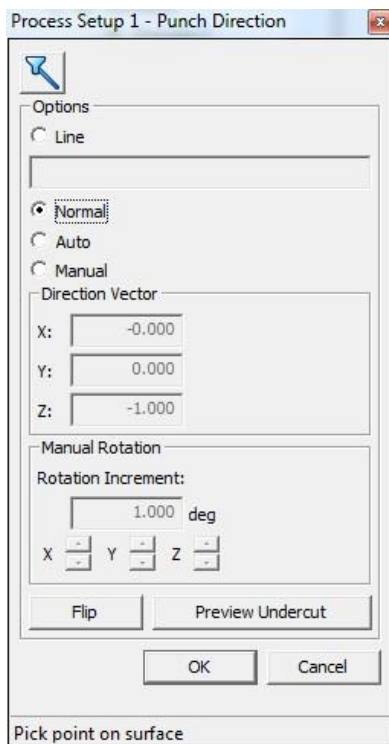



Рис. 114. Окно **Process Setup 1 – Punch Direction**

Проанализируйте проблемные зоны – поднутрения, возникающие при заданном направлении пуансона. Для этого нажмите кнопку **Preview Undercut** в окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 114) и программа автоматически отобразит их в графическом окне (рис. 115). Нажмите **OK**.

Нажмите в помощнике кнопку  **Next: Define Forming Process** для определения способа взаимодействия инструмента с заготовкой в процессе формоизменения. Так как в данном случае рассматривается операция гибки (рис. 26, б), то в окне **Process Setup 1 – Process** укажите пункт **Form** (рис. 116) и нажмите **OK**.

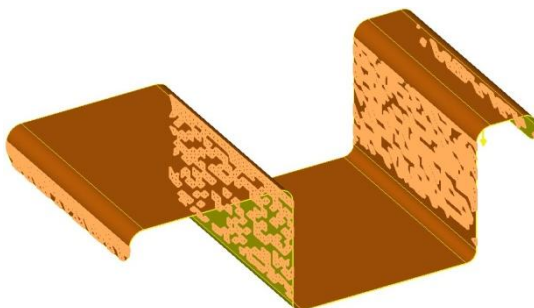


Рис. 115. Отображение вероятных поднутрений

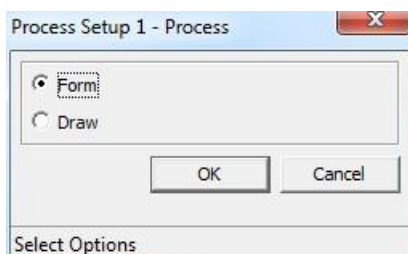



Рис. 116. Окно *Process Setup 1 – Process*

Для фиксации заготовки в процессе гибки, приложим давление к средней части скобы. Нажмите иконку  *Forming Conditions* на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку *Pressure Pad* (рис. 34). В графическом окне левой кнопкой мыши щелкните по выступу скобы, при этом он подсветится (рис. 117), а в окне *Process Setup 1 – Pressure Pad* автоматически определится рекомендуемое значение давления (рис. 118). Согласимся с предлагаемой величиной давления и нажмем *OK*.

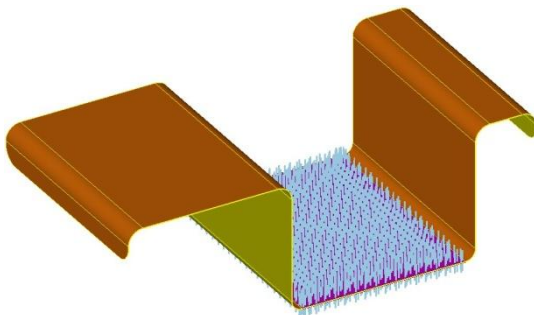


Рис. 117. Область действия давления на изделие

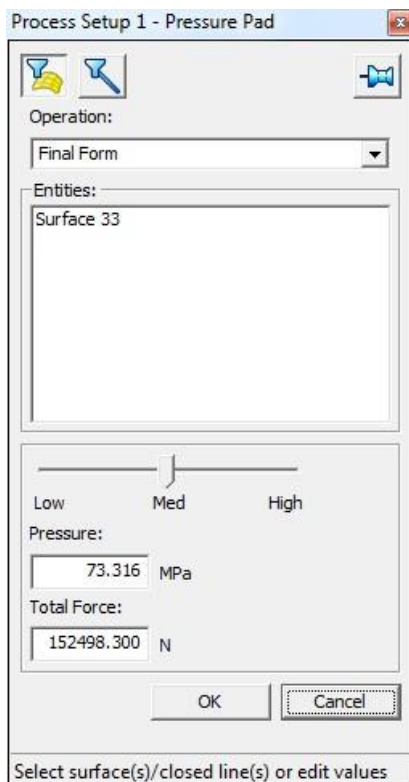


Рис. 118. Окно *Process Setup 1 – Pressure Pad*

Все параметры процесса, определенные пользователем, сохраняются в ветви *Process Setup* дерева проекта (рис. 119).

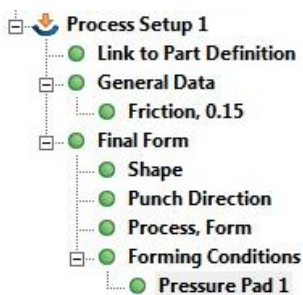



Рис. 119. Ветвь *Process Setup* дерева проекта

### 5.2.3 Просмотр результатов моделирования

После того как все параметры процесса формообразования заданы необходимо произвести расчет созданного проекта. Нажмите кнопку  **Next: Solve** в помощнике. После окончания вычислений все результаты моделирования сохраняются в ветви **Forming** дерева проекта (рис. 120), а в графическом окне отобразится рассчитанная геометрия заготовки и изделие (рис. 121).

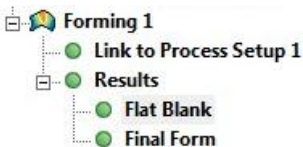


Рис. 120. Ветвь **Forming** дерева проекта

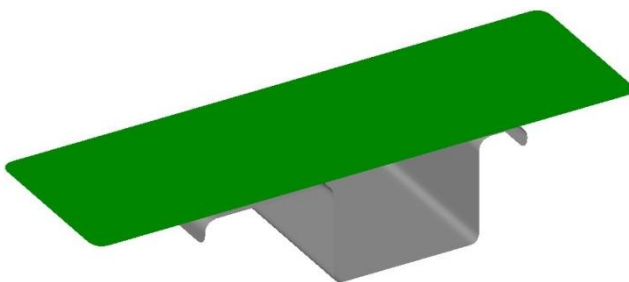

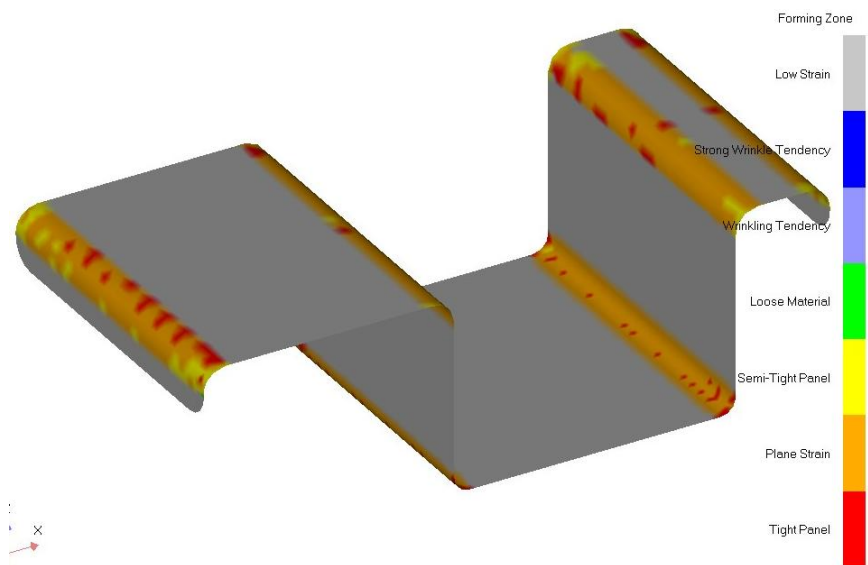


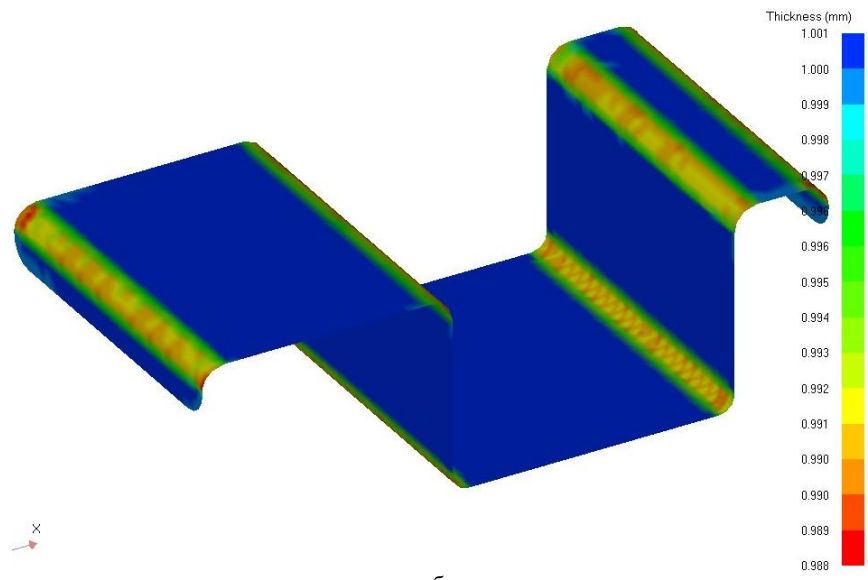
Рис. 121. Изделие и заготовки

Проанализируем деформированное состояние и изменение толщины изделия после формообразования. Нажмите иконку  **Formability** на панели инструментов и в появившемся выпадающем меню выберите пункт **Forming Zone**, а затем **Thickness** (рис. 47, а). При этом в графическом окне отобразится изделие, области которого будут подсвечены различными цветами в зависимости от вида деформированного состояния (рис. 122, а), а затем от толщины материала (рис. 122, б).

Для того чтобы определить усилие, щелчком правой кнопки мыши по элементу **Results** в ветви **Forming** дерева проекта (рис. 120) вызовите контекстное меню, в котором выберите пункт **Info** (рис. 56). При этом появится окно с информацией об усилении (рис. 123). Нажмите **OK**.



а



б

Рис. 122. Деформированное состояние (а) и толщина изделия (б) после деформирования

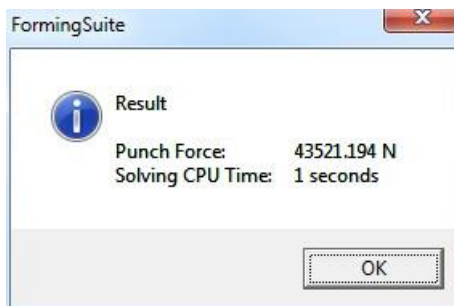




Рис. 123. Усилие гибки

#### 5.2.4 Анализ пружинения

Для входа в режим расчета упругих деформаций нажмите иконку  *Springback* на панели инструментов. Затем произведите запуск вычислений, нажав кнопку  *Next: Solve Springback* в помощнике. После окончания вычислений все результаты моделирования сохраняются в ветви *Springback* дерева проекта (рис. 124), а в графическом окне отобразится рассчитанная геометрия изделия после пружинения (рис. 125).

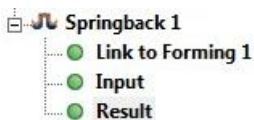


Рис. 124. Ветвь *Springback* дерева проекта после анализа пружинения

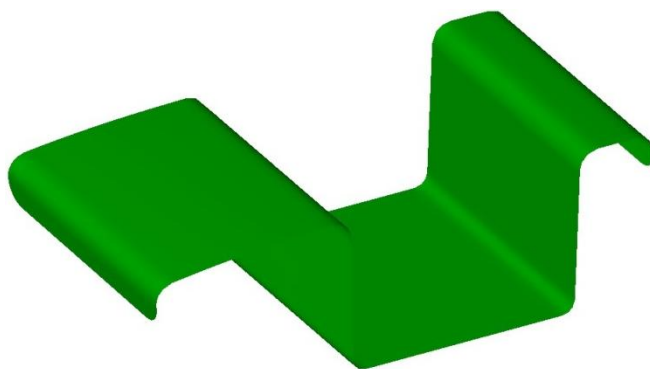





Рис. 125. Геометрия скобы после пружинения



Отообразим геометрию исходного изделия в графическом окне (рис. 126, а), для этого сначала нажмите иконку  **Shape** на панели инструментов, при этом появится дополнительная панель инструментов, а затем иконку  **Show/Hide Part** на этой панели. Увеличим масштаб отображения упругого последействия в 4 раза (рис. 126, б), введите 4 в строку **Magnification** окна **Springback 1 – Magnification** (рис. 127), которое открывается нажатием на иконку  **Magnify** на панели инструментов. Нажмите **OK**.

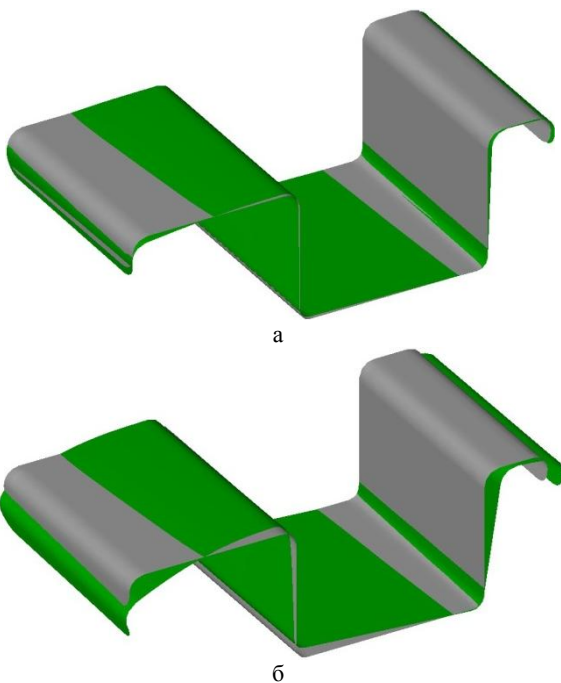



Рис. 126. Отображение упругих деформаций с различным масштабом: 1:1 (а) и 4:1 (б)

Проанализируем величину упругих деформаций изделия после формообразования. Нажмите иконку  **Displacements** на панели инструментов и в появившемся выпадающем меню выберите пункт **Magnitude**, а затем **Deflection**. При этом в графическом окне отобразится изделие, области которого будут подсвечены различными цветами в зависимости от величины суммарного перемещения, вызванного пружинением (рис. 128, а), а затем от величины отклонения от первоначальной формы (рис. 128, б).

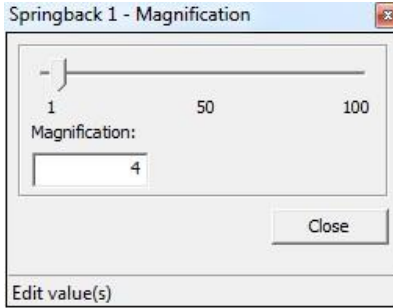


Рис. 127. Окно *Springback 1 – Magnification*

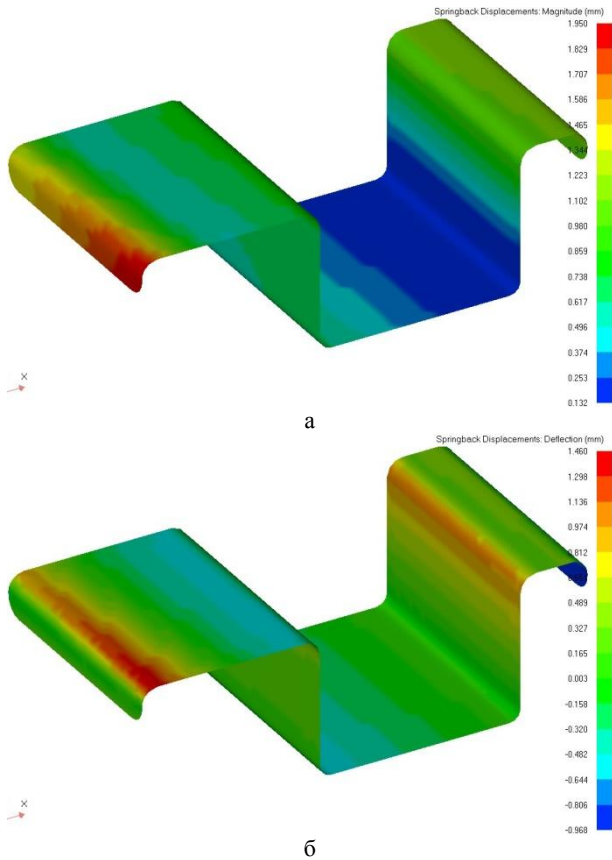



Рис. 128. Перемещение (а) и отклонение (б) исходной формы изделия после пружинения

После завершения всех вычислений сохраните созданный проект, нажав на кнопку  на панели инструментов.

### 5.3 Моделирование вытяжки коробчатого изделия

Выполним моделирование вытяжки изделия сложной коробчатой формы, изображенного на рис. 129.

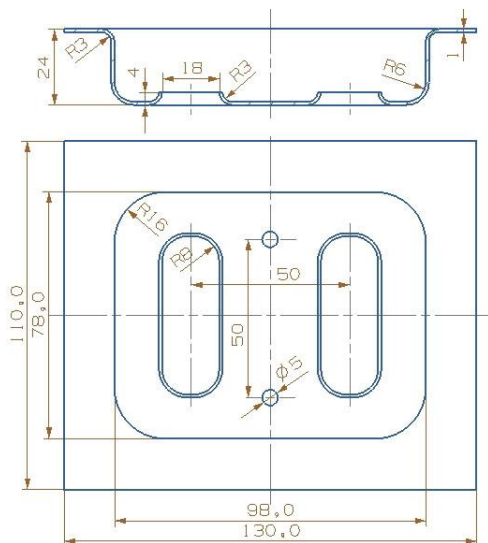


Рис. 129. Деталь «Короб»

Деталь «Короб» является элементом конструкции топливной системы летательного аппарата. В ходе эксплуатации испытывает значительные вибрации и нагрузки, находится под воздействием агрессивных сред. К детали предъявляются повышенные требования по прочности и герметичности (наличие мелких трещин возникающих при значительном пластическом деформировании).

Изготовление детали возможно с помощью трех альтернативных вариантов технологии:

1. За счет последовательного осуществления операций вырубки, пробивки двух центральных овальных и круглого отверстий и отбортовки овальных отверстий.
2. За счет осуществления последовательно вырубки совмещенной с пробивкой отверстий, отбортовкой отверстий и дальнейшей вытяжкой с фиксацией заготовки в донной части изделия в области отверстий.

3. За счет осуществления двух совмещенных процессов вырубki-пробивки и вытяжки-отбортовки.

В третьем случае требуется четкий учет перемещения материала в ходе деформирования с тем, чтобы избежать дополнительных операций механической обработки обеспечивающих требуемые размеры и геометрическую форму детали. Неравномерное течение металла в ходе вытяжки приведет к образованию у отверстий в дне борта имеющего разную высоту по периметру. В таких случаях назначается технологический припуск в сторону увеличения высоты борта, который в дальнейшем удаляется. С учетом конфигурации детали удаление технологического припуска после штамповки возможно осуществить только механической обработкой с использованием специально приспособления обеспечивающего фиксацию заготовки на столе фрезерного станка (рис. 130).

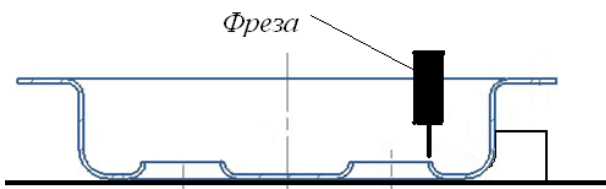


Рис. 130. Схема размещения заготовки на столе фрезерного станка

Так как движение инструмента в ходе механической обработки перпендикулярно плоскости тонкой стенки обрабатываемой заготовки наличие данной операции в технологическом процессе крайне нежелательно.

За счет того что отбортованные участки дна фиксируются в ходе вытяжки второй вариант технологического процесса позволяет после вытяжки получить борт с высотой равной той что была получена при отбортовке. Оценка размеров отбортовываемых участков на основании [1-3] позволяет сделать вывод о том, что данная операция будет технологична и легко осуществима.

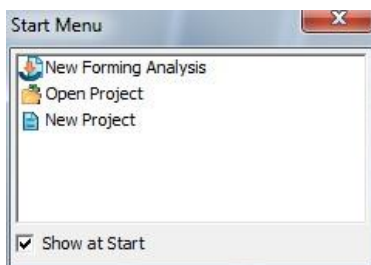
Фиксация донного участка при реализации второго варианта технологии может внести изменения в напряженно-деформированное состояние в заготовке в начальный момент деформирования. Кроме того для реализации данного процесса необходимо использовать оборудование снабженное дополнительным приводом инструмента (пресса двойного действия) или сложную технологическую оснастку.

Таким образом, реализация второго и третьего вариантов технологии требует осуществления экспериментальных исследований, которые на авиационном производстве всегда стремятся избегать в связи с малой серийностью выпуска и соответствующим повышением себестоимости деталей.

Использование программного обеспечения позволит избежать дополнительных затрат на разработку новых вариантов технологий.

### 5.3.1 Геометрия изделия

Запустите *FormingSuite*, при этом будет вызвано главное окно и окно быстрого запуска *Start Menu* (рис. 131, а). В данном окне укажите тип моделируемой задачи *New Forming Analysis*, после этого автоматически откроется окно выбора файла для импортирования геометрии объекта (рис. 131, б). Твёрдотельная модель короба заранее создана средствами *CAD* системы *Unigraphics NX7* и сохранена в формате *IGES*. Введите путь к файлу *korob.igs* и нажмите кнопку *Открыть*.




а



б

Рис. 131. Импорт геометрии в *FormingSuite*

Определим поверхности, по которым будут выполняться расчеты, для этого нажмите в помощнике  **Next: Generate Skin**. При этом расчетная область выделится в графическом окне сиреневым цветом (рис. 132, а) и будет указана в появившемся окне **Part Definition – Skin** (рис. 133). Нажмите **OK**.

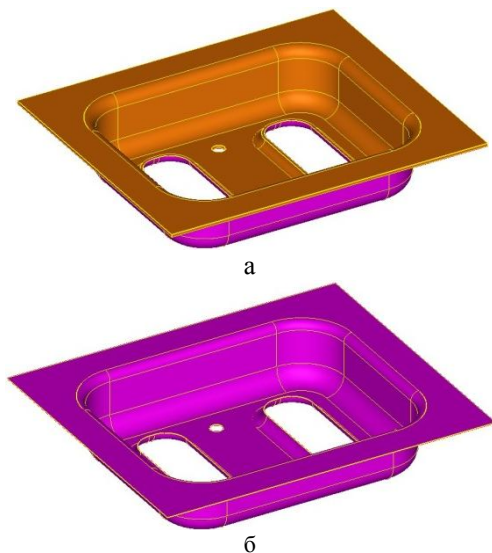


Рис. 132. Геометрия объекта (а) и расчетная поверхность (б)

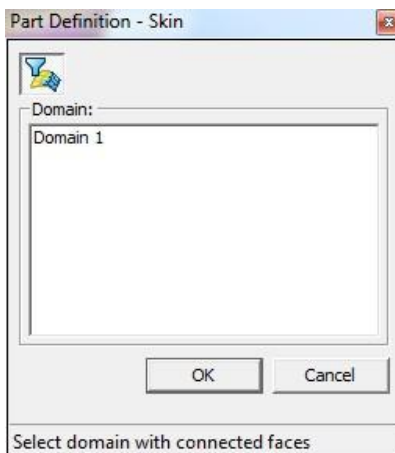



Рис. 133. Выбор расчетной поверхности для твердотельной модели

Далее необходимо задать марку материала и его толщину, нажмите в мощнике  **Next: Define Material**. В появившемся окне **Part Definition – Property** в выпадающем меню **Material Type** выберите холоднокатаную сталь для вытяжки **DS Type B CR** (рис. 134). Так как импортировалась твердотельная модель, то поле **Material Thickness** заполнено автоматически на основании геометрических данных. Нажмите **OK**.

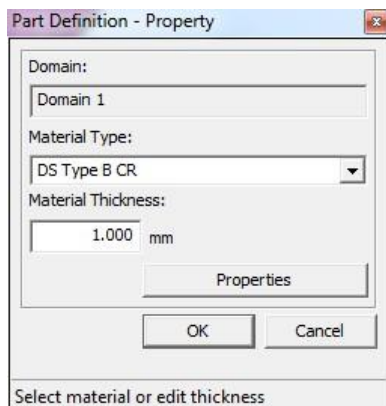



Рис. 134. Окно **Part Definition – Property**

Выполним операцию зашивки отверстий: нажмите иконку  **Fill Holes** на панели управления. После этого щелчком левой кнопки мыши выберите одно из круглых отверстий, а затем, удерживая нажатой клавишу **Ctrl** на клавиатуре, щелкните по второму отверстию. При этом выбранные объекты подсвечиваются сиреневым цветом (рис. 135) и будут указаны в окне **Part Definition – Mark Holes to Fill** (рис. 136). Нажмите **OK**. Удаление отверстий произойдет при генерировании сетки.

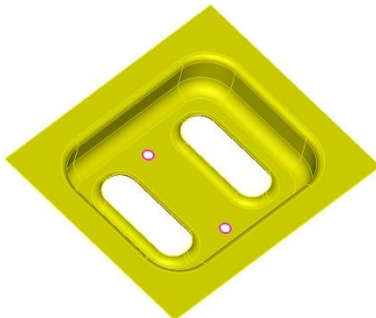




Рис. 135. Зашиваемые отверстия




Рис. 136. Окно *Part Definition – Mark Holes to Fill*


С целью построения графика изменения толщины по сечению изделия при анализе результатов моделирования, создадим вспомогательную линию.

Сначала построим две опорные точки, для этого нажмите кнопку  **Create Point** на панели инструментов. Затем в открывшемся окне *Part Definition – Create Point* отметьте способ построения – **Point on Line/Edge**, установите

фильтр  **Select Edge** для выбора ребер, а в строку **Proportion** введите 0,5 для создания точки ровно посередине ребра (рис. 137). После этого в графическом окне щелкните левой кнопкой мыши по ребру, расположенному по длинной стороне короба (рис. 138, а). Нажмите **OK**. Действуя аналогичным образом, постройте вторую точку на середине противоположного ребра (рис. 138, б).

Так как направление проекции строящейся линии на поверхность изделия совпадает с направлением вида, то есть с ориентацией объекта в графическом окне, то изменим изометрический вид (рис. 139, а) на вид сверху (рис. 139, б).

Нажмите иконку  **View** на панели управления и в появившемся меню выберите строку **Top**.

Для построения линии, соединяющей точки, нажмите кнопку  **Operations on Lines** на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку **Create on Surface** (рис. 11). После этого щелчком левой кнопки мыши в графическом окне укажите построенные точки и нажмите **OK** для создания линии (рис. 140, а), а затем **Cancel** для закрытия окна *Part Definition – Line on Surface* (рис. 141).



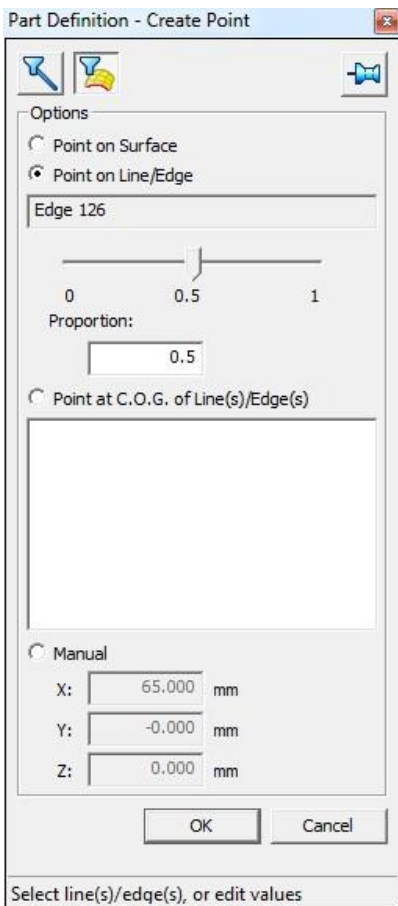


Рис. 137. Окно *Part Definition – Create Point*

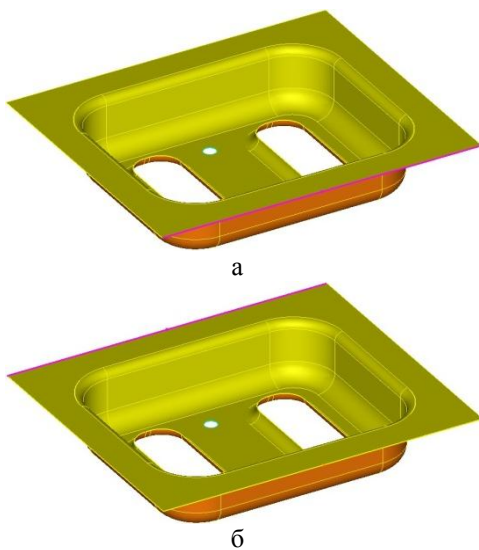
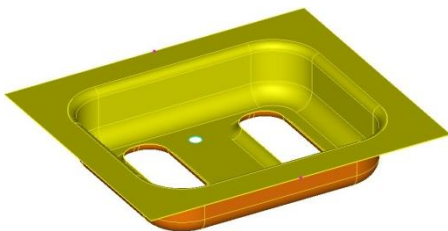
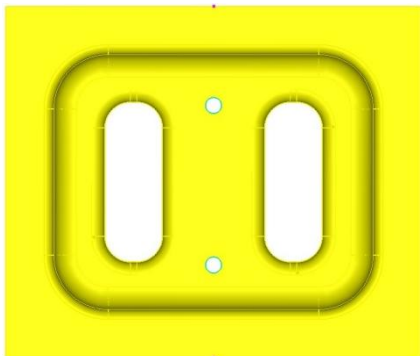


Рис. 138. Ребра для построения точек

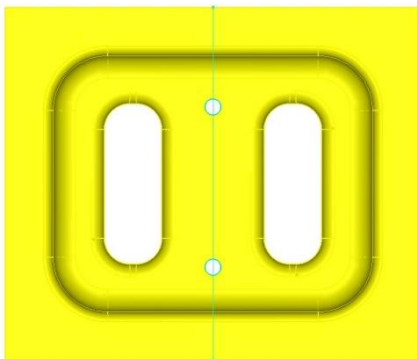


а

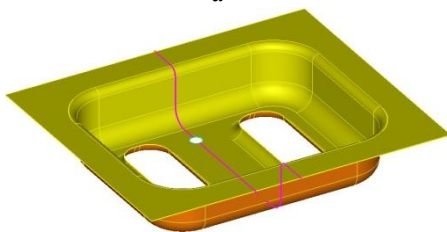


б

Рис. 139. Изометрия (а) и вид сверху (б)  
на точки



а



б

Рис. 140. Вид сверху (а) и изометрия (б)  
на линию

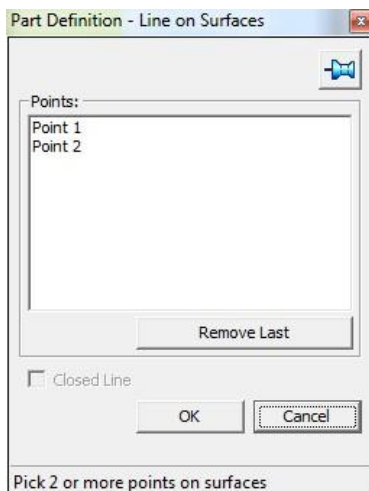



Рис. 141. Окно *Part Definition – Line on Surface*

Чтобы вернуть изометрический вид (рис. 140, б), нажмите иконку  **View** на панели управления и в появившемся меню выберите строку **Isometric**. Как видно из рис. 140, б *Forming Suite* создал три линии, что связано с наличием отверстий на пути построения линии.

Вид дерева проекта после импорта геометрии, назначения расчетных поверхностей, марки материала и построения вспомогательных линий приведен на рис. 142.

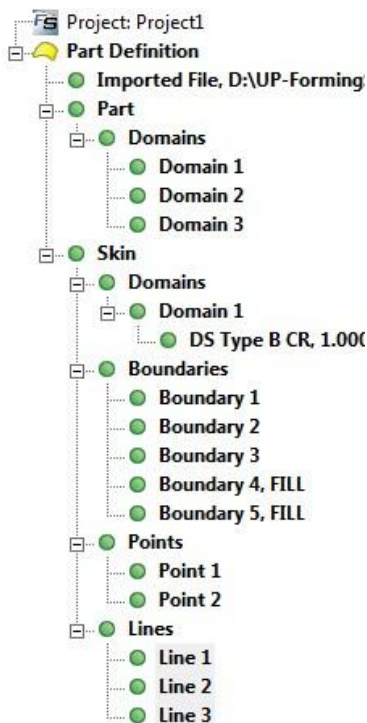



Рис. 142. Ветвь **Part Definition** дерева проекта

### 5.3.2 Параметры процесса

Для создания сетки конечных элементов нажмите в помощнике кнопку  **Next: Generate Mesh**. При этом в появившемся окне **Process Setup 1 – Meshing Settings** будут автоматически определены оптимальные параметры сетки (рис. 143). Нажмите **OK**.

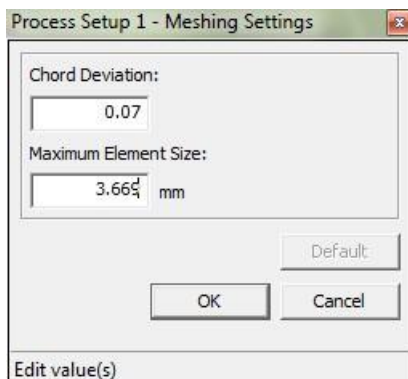


Рис. 143. Окно *Process Setup 1 – Meshing Settings*

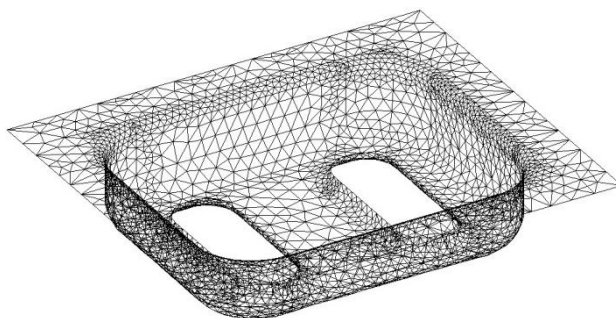


Рис. 144. Сетка конечных элементов

После генерации сетки конечных элементов автоматически появляется окно *Process Setup 1 - Friction* (рис. 145). Оставим без изменений коэффициент трения, установленный по умолчанию. Нажмите **OK**.

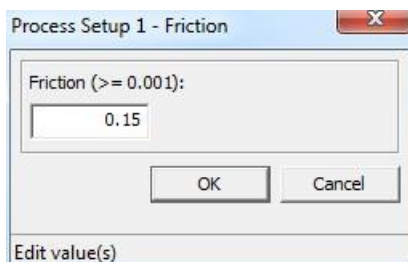



Рис. 145. Окно *Process Setup 1 – Friction*

Затем необходимо задать направление движения пуансона, для этого нажмите в помощнике кнопку  **Next: Define Punch Direction**. В открывшемся окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 146) укажите способ задания направления по нормали – **Normal**, а затем в графическом окне левой кнопкой мыши щелкните по дну короба.

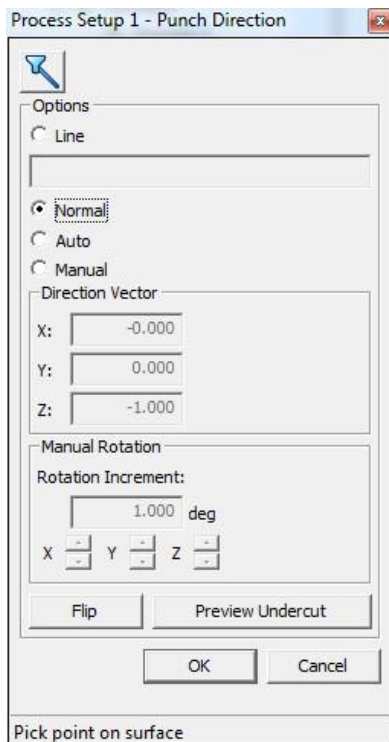



Рис. 146. Окно **Process Setup 1 – Punch Direction**

Проанализируйте проблемные зоны – поднутрения, возникающие при заданном направлении пуансона. Для этого нажмите кнопку **Preview Undercut** в окне **Process Setup 1 – Punch Direction** (рис. 146) и программа автоматически отобразит их в графическом окне (рис. 147). Нажмите **OK**.

Нажмите в помощнике кнопку  **Next: Define Forming Process** для определения способа взаимодействия инструмента с заготовкой в процессе формоизменения. Так как в данном случае рассматривается операция вытяжки (рис. 26, а), то в окне **Process Setup 1 – Process** укажите пункт **Draw** (рис. 148) и нажмите **OK**.

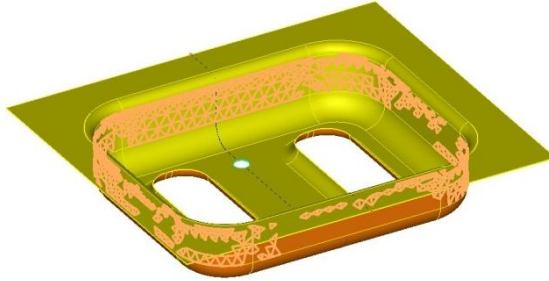


Рис. 147. Отображение вероятных поднутрений

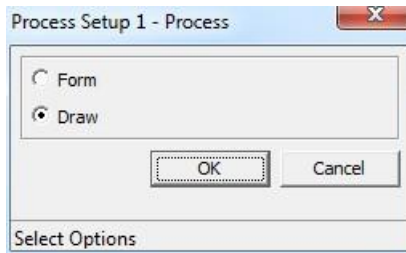



Рис. 148. Окно *Process Setup 1 – Process*

При вытяжке на фланец заготовки действует прижим, поэтому зададим усилие прижима для данного процесса. Нажмите иконку  **Forming Conditions** на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку **Blankholder Force** (рис. 34). В графическом окне левой кнопкой мыши щелкните по краю фланца, при этом он подсветится (рис. 151), а в окне *Process Setup 1 – Blankholder Force* автоматически определится рекомендуемое значение усилия (рис. 152). Согласимся с предлагаемой величиной и нажмем **OK**.

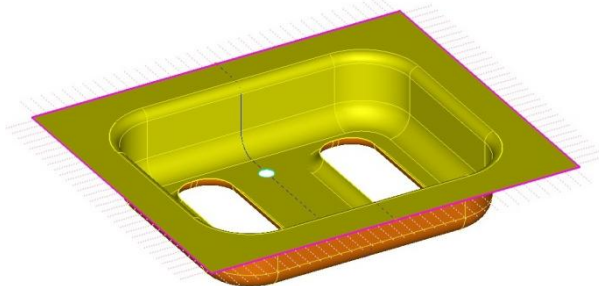


Рис. 149. Усилие прижима

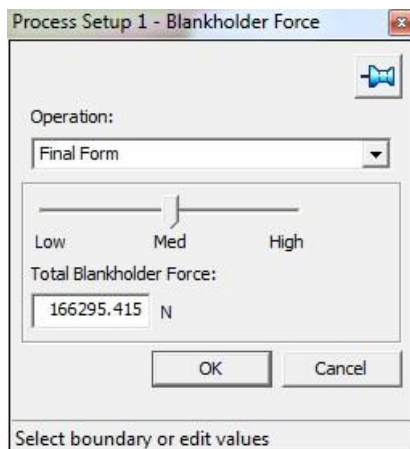



Рис. 150. Окно *Process Setup 1 – Blankholder Force*

Для фиксации заготовки в процессе вытяжки, приложим давление ко дну короба. Нажмите иконку  *Forming Conditions* на панели инструментов и в появившемся меню выберите строку *Pressure Pad* (рис. 34). В графическом окне левой кнопкой мыши щелкните по дну короба, при этом он подсветиться (рис. 151), а в окне *Process Setup 1 – Pressure Pad* автоматически определится рекомендуемое значение давления (рис. 152). Согласимся с предлагаемой величиной давления и нажмем *OK*.

Все параметры процесса, определенные пользователем, сохраняются в ветви *Process Setup* дерева проекта (рис. 153).

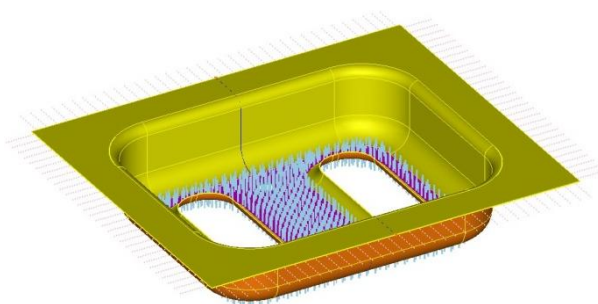


Рис. 151. Область действия давления на изделие

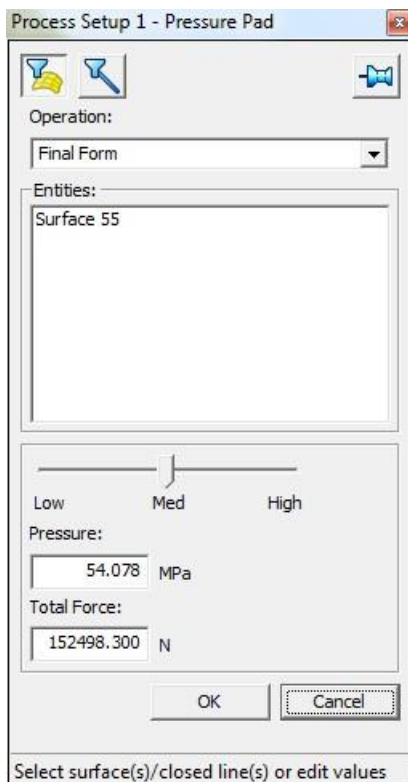


Рис. 152. Окно *Process Setup 1 – Pressure Pad*

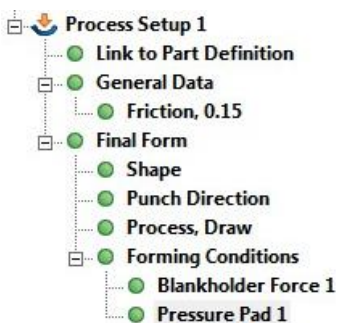



Рис. 153. Ветвь *Process Setup* дерева проекта



### 5.3.3 Просмотр результатов моделирования

После того как все параметры процесса формообразования заданы необходимо произвести расчет созданного проекта. Нажмите кнопку  **Next: Solve** в помощнике. После окончания вычислений все результаты моделирования сохраняться в ветви **Forming** дерева проекта (рис. 154), а в графическом окне отобразиться рассчитанная геометрия заготовки и изделие (рис. 155).

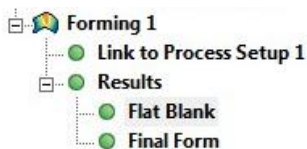


Рис. 154. Ветвь **Forming** дерева проекта

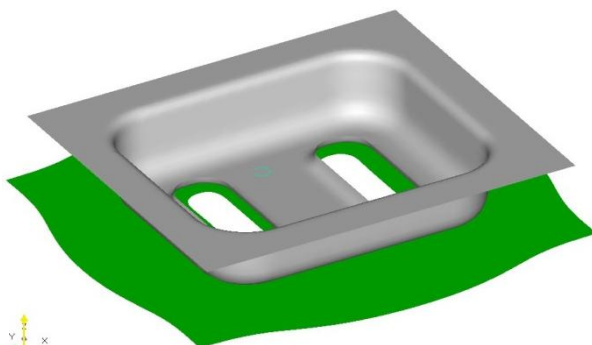

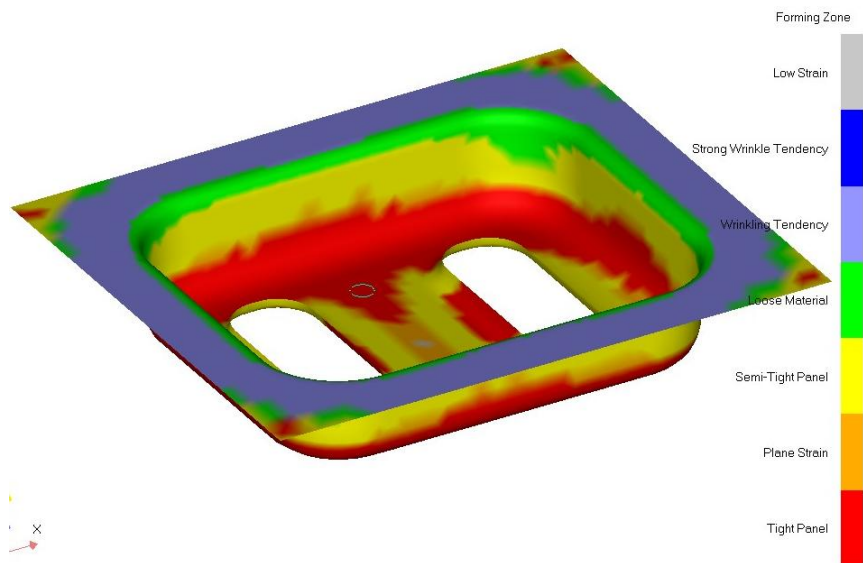
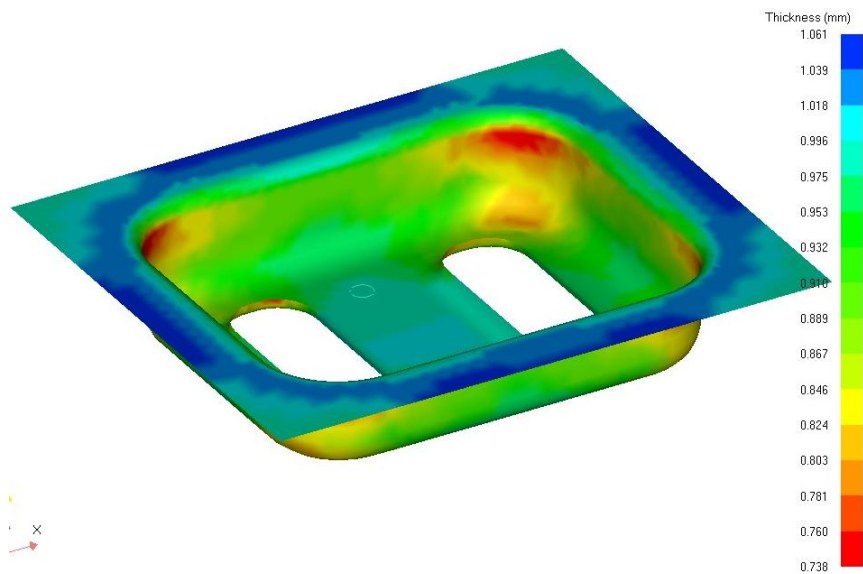


Рис. 155. Изделие и заготовки

Проанализируем напряженно-деформированное состояние изделия после формообразования. Нажмите иконку  **Formability** на панели инструментов и в появившемся выпадающем меню выберите последовательно пункты **Forming Zone**, **Thickness**, **Equivalent Strain** и **Equivalent Stress** (рис. 47, а). При этом в графическом окне отобразится изделие, области которого будут подсвечены различными цветами в зависимости от вида деформированного состояния (рис. 156, а), толщины материала (рис. 156, б), интенсивности деформаций (рис. 157, а) и напряжений (рис. 157, б) соответственно.

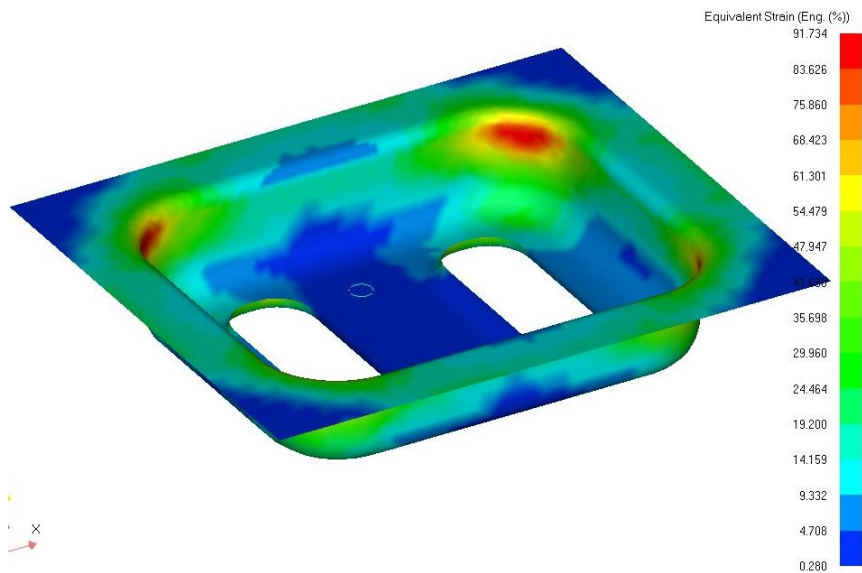


а

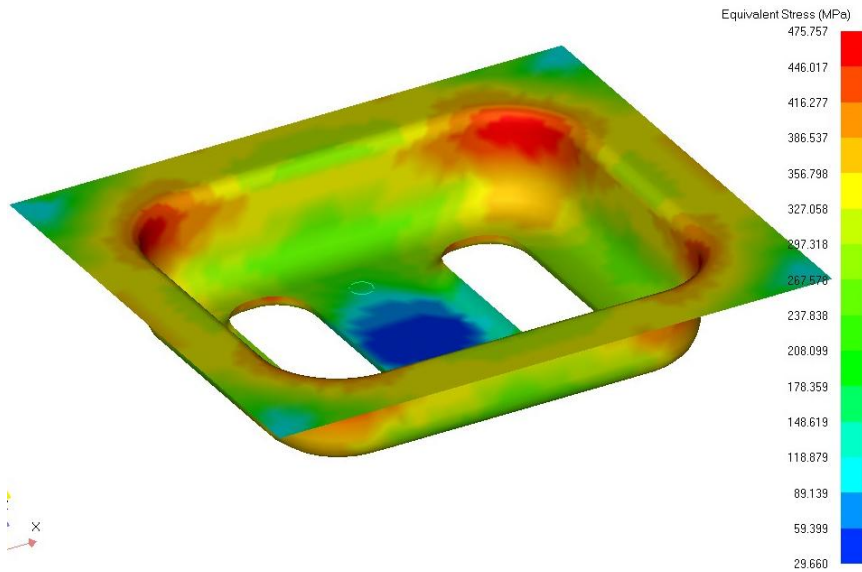


б

Рис. 156. Деформированное состояние короба



а



б

Рис. 157. Напряженное состояние короба

Отообразим на диаграмме предельных деформаций степень деформации каждого узла сетки конечных элементов изделия (рис. 158), нажав иконку



**Forming Limit Diagram** на панели инструментов.

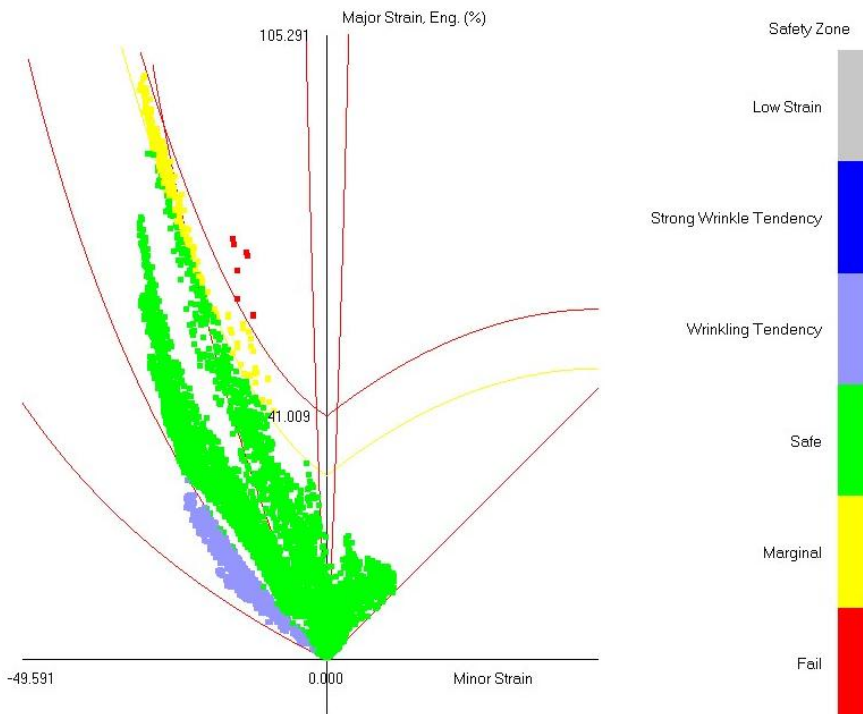


Рис. 158. Диаграмма предельных деформаций


Для построения графика нажмите иконку  **Result Graphing Along Lines** на панели инструментов. Затем в появившейся дополнительной панели (рис. 159) выберите базовую линию – **Line 1** (борт короба) и смените характеристику, отображаемую по оси ординат, на толщину – **Thickness**. График изменения толщины материала по борту короба изображен на рис. 160



Рис. 159. Панель настройки отображения графиков

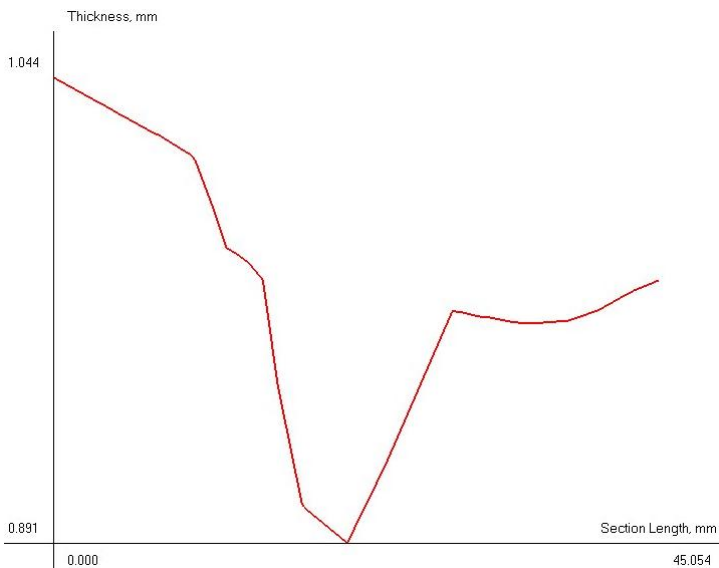


Рис. 160. График изменения толщины

Для того чтобы определить усилие вытяжки, щелчком правой кнопки мыши по элементу **Results** в ветви **Forming** дерева проекта (рис. 154) вызовите контекстное меню, в котором выберите пункт **Info** (рис. 56). При этом появится окно с информацией об усилии (рис. 161). Нажмите **OK**.

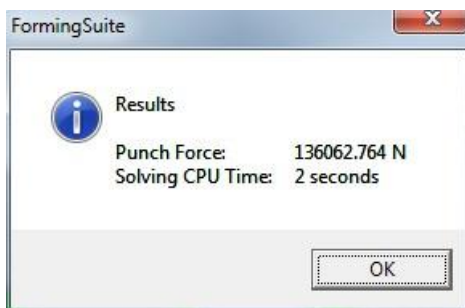


Рис. 161. Усилие вытяжки

### 5.3.4 Расчет проекта с альтернативными параметрами

Промоделируем вытяжку короба, но с другими параметрами процесса: увеличим усилие прижима и величину давления на дно короба в процессе вытяжки. Сделать это можно несколькими способами: например, создать заново новый проект или внести изменений в уже существующий проект. Од-

нако, наиболее удобно и наглядно выполнить оба расчета в пределах одного проекта.

Скопируем ветвь **Process Setup 1** дерева проекта. Для этого щелчком правой кнопкой мыши по элементу **Process Setup 1** вызовите контекстное меню (рис. 162), в котором выберите пункт **Copy**. При этом *FormingSuite* спросит нужно ли также копировать зависимые элементы данной ветви дерева. В нашем случае это ветвь **Forming 1**, которая в дальнейшем не потребуется, поэтому нажмите кнопку **Нет** (рис. 163).

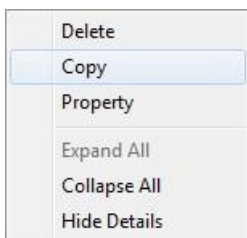


Рис. 162. Контекстное меню

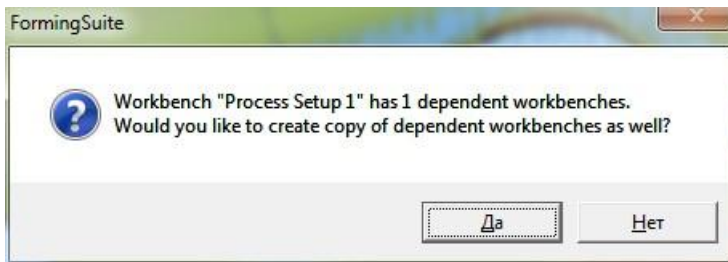


Рис. 163. Окно-предупреждение

После копирования в дереве проекта появится новая ветвь **Process Setup 2**, содержащая все параметры процесса, определенные пользователем ранее. Двойным щелчком левой кнопки мыши раскройте данную ветвь, а затем ее элементы **Final Form** и **Forming Conditions** (рис. 164).

Двойным щелчком левой кнопки мыши по элементу **Blankholder Force / Pressure Pad** вызовет окно **Process Setup 1 – Blankholder Force / Pressure Pad** (рис. 165 / рис. 166), в котором установите максимальное значение усилия прижима / величины давления.

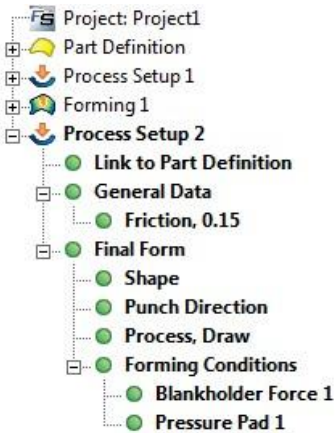


Рис. 164. Ветвь **Process Setup** дерева проекта

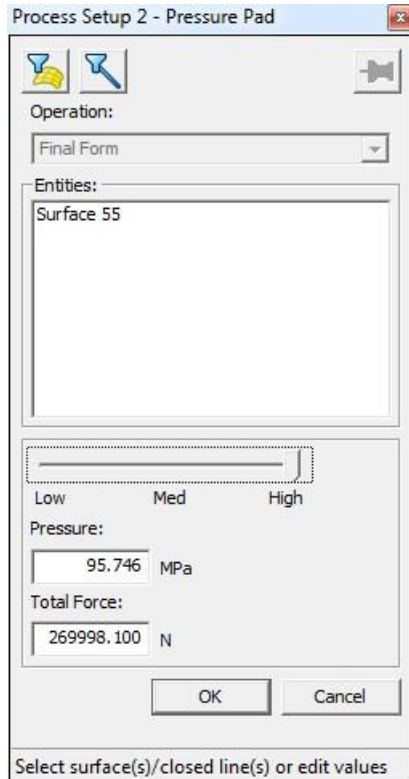


Рис. 166. Окно **Process Setup 1** – **Pressure Pad**

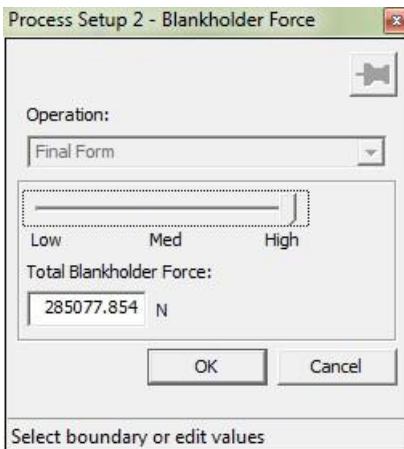

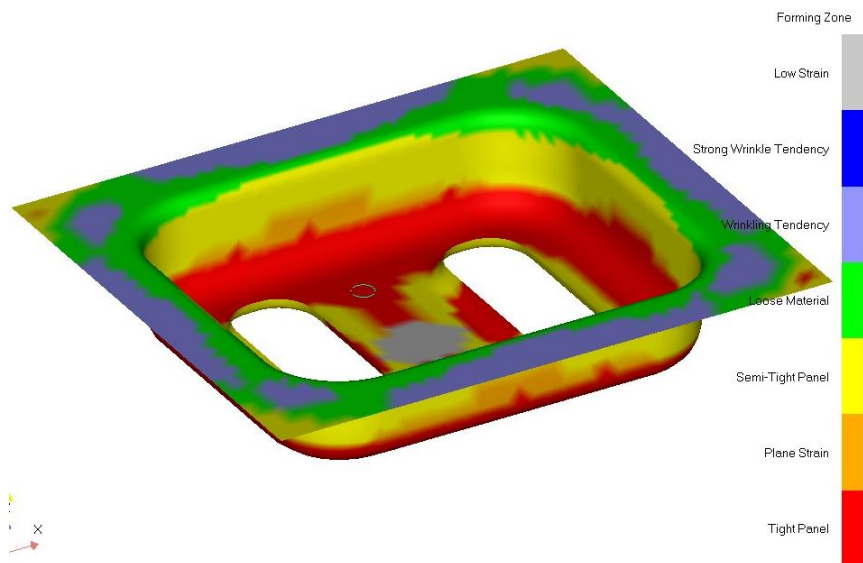


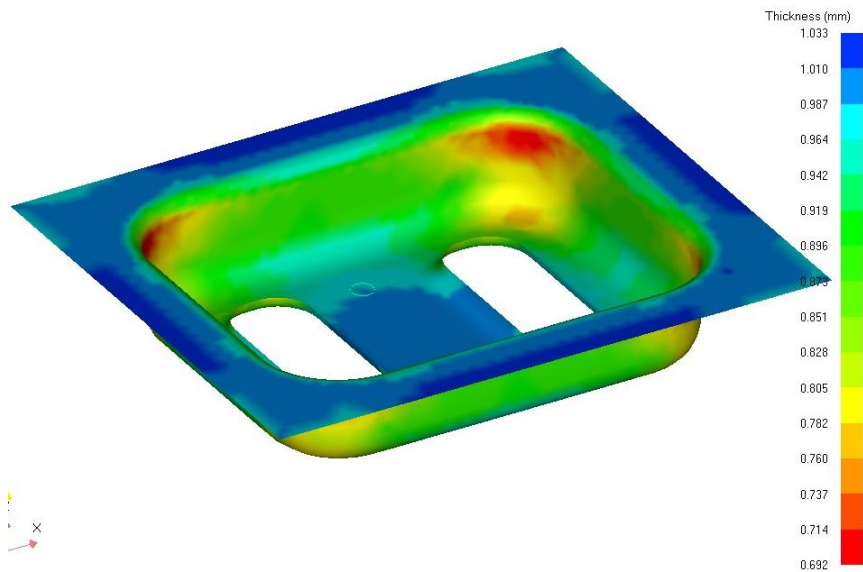
Рис. 165. Окно **Process Setup 1** – **Blankholder Force**

После изменения параметров процесса запустите расчет: нажмите кнопку  **Next: Solve** в помощнике. После окончания вычислений все результаты моделирования сохраняются в ветви **Forming 2** дерева проекта.

Проанализируйте влияние увеличения усилия прижима и величины давления на напряженно-деформированное состояние (рис. 167-рис. 170) и усилие вытяжки (рис. 171).



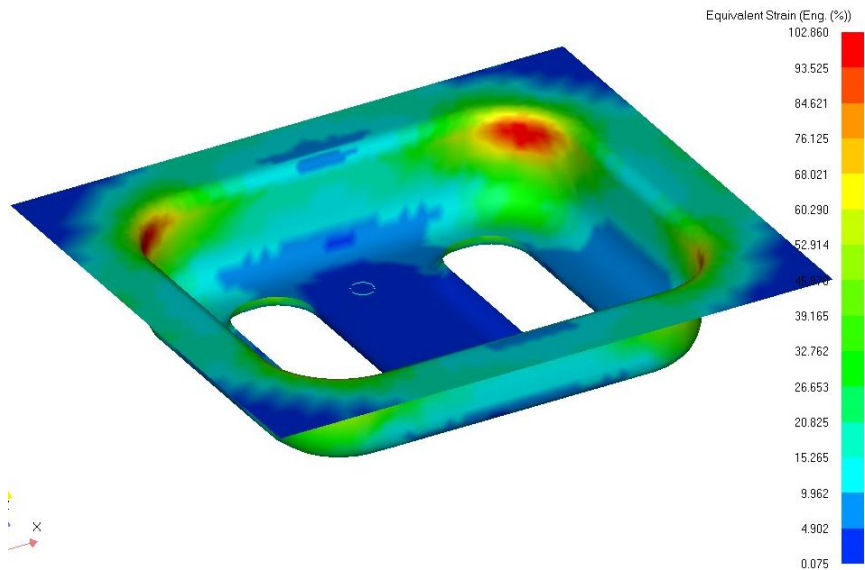
а



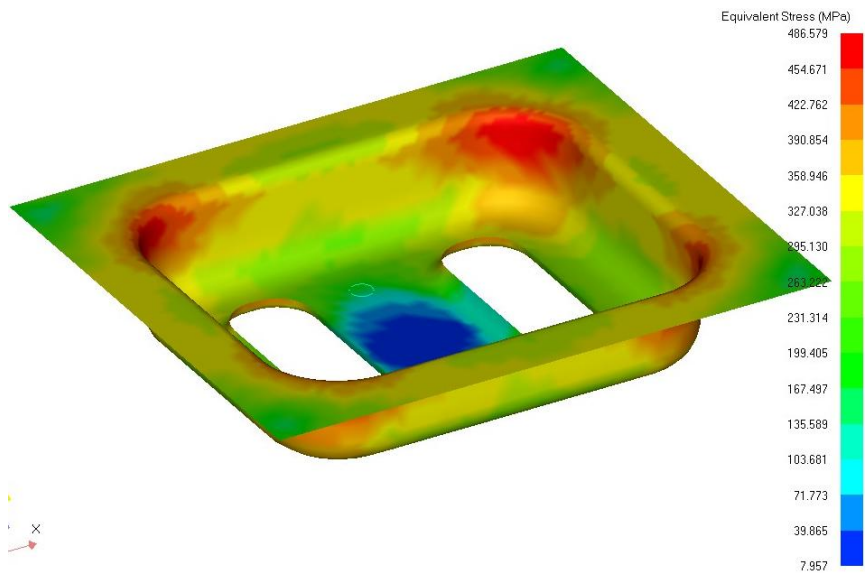
б

Рис. 167. Деформированное состояние короба





а



б

Рис. 168. Напряженно-деформированное состояние короба

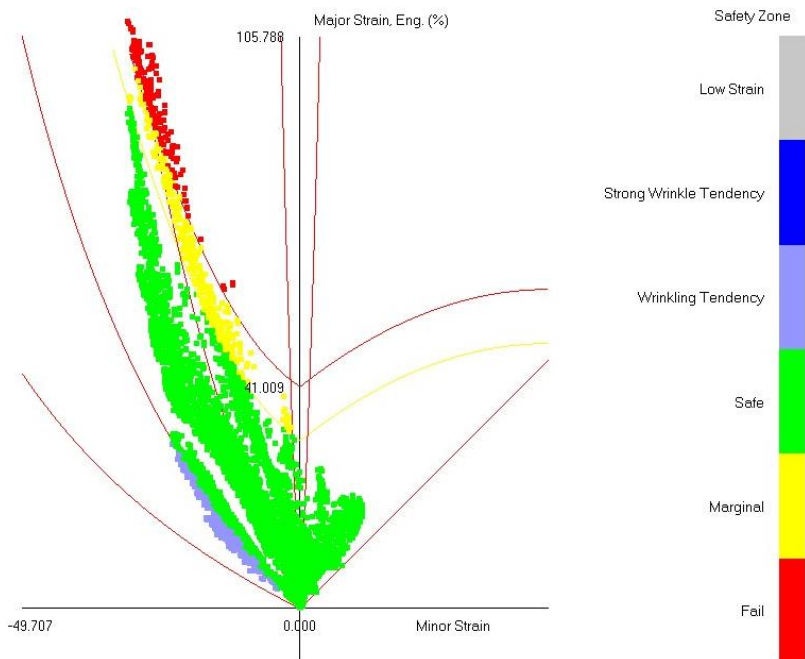


Рис. 169. Диаграмма предельных деформаций

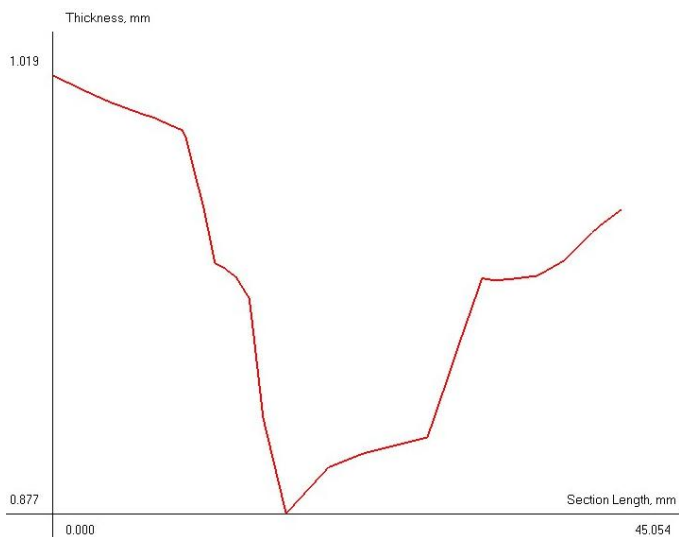


Рис. 170. График изменения толщины

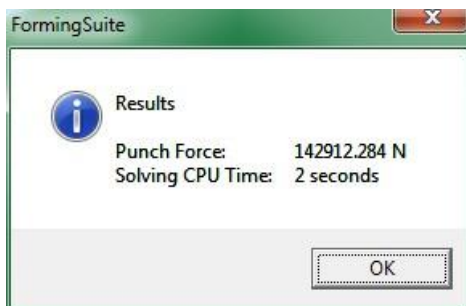



Рис. 171. Усилие вытяжки

После завершения всех вычислений сохраните созданный проект, нажав на кнопку  на панели инструментов.