

# Решение контактных задач в ANSYS 6.1

**CADFEM**

Москва  
2003

## Содержание

	Содержание	1
1.	Обзор контактных проблем	3
1.1.	Средства для расчета явного динамического контакта	3
2.	Общая классификация контактов	3
3.	Возможности программы ANSYS при расчете контактных задач	4
3.1.	Контактные элементы "поверхность-поверхность"	6
3.2.	Контактные элементы "узел-поверхность"	7
3.3.	Контактные элементы "узел-узел"	8
4.	Выполнение контактного анализа "поверхность-поверхность"	8
4.1.	Использование контактных элементов "поверхность-поверхность"	8
4.2.	Шаги при выполнении контактного анализа	9
4.3.	Создание модели и сеточное разбиение	9
4.4.	Определение контактных пар	9
4.5.	Назначение целевой и контактной поверхностей	10
4.6.	Асимметричный и симметричный контакт	11
4.7.	Задание целевой поверхности	12
4.8.	Задание деформируемой контактной поверхности	19
4.9.	Задание реальных постоянных и ключевых опций элементов	23
4.10.	Управление движением жесткой целевой поверхности	41
4.11.	Моделирование теплового контакта	43
4.12.	Приложение граничных условий к деформируемым элементам	47
4.13.	Задание опций решения и шагов нагружения	47
4.14.	Решение задачи	49
4.15.	Просмотр результатов	50
5.	Выполнение контактного анализа "узел-поверхность"	54
5.1.	Использование контактных элементов "узел-поверхность"	54
5.2.	Шаги при выполнении контактного анализа "узел-поверхность"	55
6.	Выполнение контактного анализа "узел-узел"	75
6.1.	Создание геометрии и сеточное разбиение	76
6.2.	Создание контактных элементов	76
6.3.	Задание контактной нормали	78
6.4.	Задание начального перекрытия или зазора	79
6.5.	Выбор контактного алгоритма	79
6.6.	Приложение граничных условий	80
6.7.	Задание опций решения	81

6.8.	Решение задачи	82
6.9.	Просмотр результатов	83
7.	Описание контактных и целевых элементов	86
7.1.	Описание контактного элемента CONTAC 49	87
7.2.	Описание контактного элемента CONTAC 52	95
7.3.	Описание целевого элемента TARGE 169	103
7.4.	Описание контактного элемента CONTA 171	109
7.5.	Описание контактного элемента CONTA 178	127

## 1. Обзор контактных проблем

Контактные задачи являются существенно нелинейными и требуют значительных ресурсов компьютера для решения. При этом важно, чтобы Вы понимали физику проблемы и тщательно выбрали модель для Вашей задачи, чтобы действовать так эффективно, как это возможно.

Контактные проблемы представляют две значительные трудности. Во-первых, Вы обычно не знаете области контакта до тех пор, пока решение не началось. Зависающие от нагрузок, материала, граничных условий и других факторов, поверхности могут вступать или выходить из контакта внезапно и совершенно непредсказуемо. Во-вторых, в большинстве контактных задач необходимо принимать в расчет трение. Имеется несколько законов и моделей трения, и все они нелинейны. Эффекты, связанные с трением, могут быть хаотическими и приводить к плохо сходящимся решениям.

*Замечание – Если Вы не нуждаетесь в учете трения в Вашей модели, и тела взаимодействуют между собой без проскальзывания, Вы можете использовать уравнения связей или "парные" степени свободы взамен контакта. Уравнения связей можно использовать только в задачах с малыми деформациями (NLGEOM,OFF). Для более детальной информации смотрите главу 12 ANSYS Modeling and Meshing Guide.*

В дополнение к этим двум трудностям, многие контактные задачи должны также учитывать сопутствующие эффекты, такие как теплообмен и электрические токи в области контакта.

### 1.1. Средства для расчета явного динамического контакта

В дополнение к средствам для расчета неявного контакта, обсуждаемого в этой главе, ANSYS позволяет также моделировать явный динамический контакт с помощью пакета ANSYS/LS-DYNA. Это идеально подходит для моделирования быстропотекающих контактно-ударных процессов. Для более подробной информации об ANSYS/LS-DYNA и ее возможностях в области контактных задач, смотрите *ANSYS/LS-DYNA User's Guide*.

## 2. Общая классификация контактов

Контактные задачи делятся в два основных класса: жестко-податливый (rigid-to-flexible) и податливо-податливый (flexible-to-flexible) контакт. В жестко-податливых контактных задачах одна или несколько контактирующих поверхностей трактуются как жесткие (то есть ее жесткость много больше жесткости контактирующего с ней деформируемого тела). Вообще при любых случаях контактного взаимодействия мягкого и твердого материалов, задача может рассматриваться как жестко-податливая. Многие проблемы формирования металла включаются в эту категорию. Другой класс, податливо-податливого контакта, встречается более часто. В этом случае оба (или все) контактирующие тела деформируются (то есть, имеют сравнимую жесткость). Пример податливо-податливого контакта – зажатые болтами фланцы.

### 3. Возможности программы ANSYS при расчете контактных задач

ANSYS поддерживает три модели контакта: "узел-узел", "узел-поверхность" и "поверхность-поверхность". Каждый тип модели использует различный набор контактных элементов ANSYS и предназначается для различных типов задач.

Таблица 1. Контактные возможности ANSYS

	Точка - точка			Точка - поверхность			Поверхность - поверхность	
	CONTAC 12	CONTAC 52	CONTA 178	CONTAC 26	CONTAC 48	CONTAC 49	CONTA 171, 172 TARGE 169	CONTA 173, 174 TARGE 170
"Узел-узел"	Да	Да	Да					
"Узел-поверхность"				Да	Да	Да		
"Поверхность-поверхность"				Да	Да	Да	Да	Да
2-D	Да			Да	Да		Да	
3-D		Да				Да		Да
Проскальзывание	Малое	Малое		Большое	Большое	Большое	Большое	Большое
Криволинейные поверхности							Да	Да
Цилиндрический зазор			Да					
Чистый метод множителей Лагранжа			Да				Да	Да

Контактная жесткость	Определяется пользователем	Определена пользователем	Полуавтоматически	Определена пользователем	Определена пользователем	Полуавтоматически	Полуавтоматически
Средство автоматического построения сетки	EINTF	EINTF	EINTF	Нет	GCGEN	GCGEN	ESURF
Низкого порядка	Да	Да		Да	Да	Да	Да
Высокого порядка				Да			Да
Жестко-податливый	Да	Да		Да	Да	Да	Да
Податливо-податливый	Да	Да		Да	Да	Да	Да
Тепловой контакт					Да	Да	Да

Для того, чтобы смоделировать контактную задачу, во-первых, необходимо идентифицировать части, которые нужно проанализировать на предмет возможного их взаимодействия. Если взаимодействие происходит в точке, то соответствующая компонента модели – узел. Если взаимодействие происходит на поверхности, то соответствующая компонента модели – элемент: или балка, или оболочка, или твердотельный элемент. Конечно-элементная модель распознает пары возможных контактов при присутствии специфических контактных элементов. Этими контактными элементами покрываются части модели, наличие или отсутствие взаимодействия которых будет анализироваться программой. Различные контактные элементы, которые использует ANSYS, описываются ниже в этой главе.

Обзор контактных элементов ANSYS и их возможностей следует ниже. Для более детальной информации по любому из этих элементов обращайтесь к *ANSYS Elements Reference* и *ANSYS Theory Reference*.

### 3.1. Контактные элементы "поверхность-поверхность"

ANSYS поддерживает и жестко-податливые и податливо-податливые контактные элементы "поверхность-поверхность". Эти контактные элементы используют "целевую поверхность" (target) и "контактную поверхность" (contact) для формирования контактной пары.

- Целевая поверхность моделируется при помощи TARGE169 или TARGE170 (для 2-D и 3-D, соответственно).
- Контактная поверхность моделируется элементами CONTA171, CONTA172, CONTA173 и CONTA174.

Чтобы создать контактную пару, задайте один и тот же набор реальных постоянных для целевых и контактных элементов. Более подробное задание этих элементов и наборов их реальных постоянных описано ниже в Разделе 4, "Выполнение контактного анализа "поверхность-поверхность".

Эти элементы "поверхность-поверхность" прекрасно подходят для таких приложений, как посадочный или начальный контакт, ковка, проблемы глубокого прессования (волочения). Элементы "поверхность-поверхность" имеют некоторые преимущества перед элементами "узел-поверхность". Эти элементы:

- Поддерживают элементы низкого и высокого порядка на поверхности (то есть, элементы со срединными и угловыми узлами).
- Поддерживают большие деформации, со значительным скольжением и трением. Рассчитывается согласованная матрица жесткости, и элементы включают опции несимметричной матрицы жесткости.
- Позволяют лучше рассчитывать такие необходимые для обычных инженерных расчетов параметры, как нормальное давление и напряжение трения.
- Нет ограничений на форму целевой поверхности. Разрывы поверхности могут быть физическими (таким как круговой обтюратор с острыми краями) или обусловлены дискретизацией сетки.
- Требуется меньше контактных элементов, чем контактных элементов "узел-поверхность", что уменьшает необходимое дисковое пространство и время выполнения, а также увеличивает скорости визуализации в постпроцессоре.
- Допускаются многочисленные способы управления моделированием, такие как:
  - Связанный контакт, отсутствие разделения (грубое взаимодействие контактной пары).
  - Линейно меняющееся начальное проникание (Ramping initial penetration).

- Автоматическое начальное размещение целевой поверхности таким образом, чтобы она находилась в контакте.
- Смещение контактной поверхности (чтобы принять в расчет толщину балочного или оболочечного элемента) и определяемое пользователем контактное смещение.
- Поддержка опции "смерть и рождение".
- Поддержка совместного термомеханического анализа.

Используя эти элементы, можно моделировать прямолинейные и криволинейные 2-D и 3-D поверхности, зачастую используя простые геометрические формы, такие как круги, параболы, сферы, конусы и цилиндры. Более сложные формы жестких поверхностей могут моделироваться, используя специальные методы (смотрите "Выполнение контактного анализа "поверхность-поверхность", Шаг 3, ниже в этой главе).

Контактные элементы "поверхность-поверхность" плохо подходят для моделирования контактов "узел-узел" или "узел-поверхность", такой как конец трубы или защелкивающаяся сборка (snap-fit assemblies). В этих случаях следует использовать элементы "узел-узел" или "узел-поверхность". Вы также можете использовать контактные элементы для большинства контактных областей и незначительное число контактных элементов "узел-узел" в зоне контактных углов.

Остальная часть этой главы посвящена обсуждению процедур различных типов контактного анализа с помощью ANSYS.

### 3.2. Контактные элементы "узел-поверхность"

Контактные элементы "узел-поверхность" обычно используются для моделирования приложений с точечным контактом, таких как две балки, контактирующие друг с другом (в кончике балки или узле острого угла), или углы в "защелкивающейся" сборке.

Можно также использовать элементы "узел-поверхность" для моделирования контакта "поверхность-поверхность", если контактирующая поверхность определяется группой узлов, и генерируются многочисленные элементы. Поверхности могут быть жесткими и деформируемыми. Примером этого типа контактной проблемы является провод, вставленный в щель.

Вы можете заранее не знать точное место контактной области, контактирующие объекты не нуждаются в жестко совместимой сетке. Допускаются большие деформации и большое относительное проскальзывание, в то же самое время остается способность моделировать малое проскальзывание.

Элементы **CONTAC48** и **CONTAC49** являются контактными элементами "узел-поверхность". Они поддерживают большое скольжение, большие деформации и различные сетки между контактирующими объектами. Можно использовать эти элементы для выполнения совместного термомеханического анализа, где важна тепловая передача через контактирующие тела.

Элемент **CONTAC26** используется для моделирования контакта "податливый узел-жесткая поверхность". **CONTAC26** не рекомендуется для задач с прерывистой жесткой поверхностью, так как может иметь место потеря контакта. Для этих условий представляется более удобным применение элемента **CONTAC48** с использованием псевдо-элементных алгоритмов (смотрите *ANSYS Theory Reference*, раздел 14.48). Тем не менее, это также может приводить к неудаче, если заданная поверхность сильно прерывиста.

### 3.3. Контактные элементы "узел-узел"

Элементы контакта "узел-узел" обычно используются для моделирования приложений контактов точка-точка. Чтобы использовать контактные элементы "узел-узел", Вам необходимо знать заранее место приложения контакта. Эти типы контактных задач обычно включают относительно малое скольжение между контактирующими поверхностями (даже в случае геометрических нелинейностей). Примером приложения контакта "узел-узел" есть традиционная модель кончика трубы, где точка контакта всегда находится между кончиком трубы и ограничителем.

Элементы контакта "узел-узел" также могут использоваться для решения задач "поверхность-поверхность", если узлы двух поверхностей выстраиваются в линию, деформация относительного проскальзывания не принимается в расчет (незначительна) и отклонения (повороты) двух поверхностей остаются малыми. Проблема с взаимоналоженными (пригнанными) узлами есть пример "поверхность-поверхность" задачи, где использование контакта "узел-узел" может быть достаточным.

Элементы ANSYS **CONTA12** и **CONTA52** есть элементы контакта "узел-узел" и соответствуют бесконечно-малому скольжению и Кулоновскому закону трения.

## 4. Выполнение контактного анализа "поверхность-поверхность"

Вы можете использовать контактные элементы "поверхность-поверхность", чтобы моделировать или жестко-податливый или податливо-податливый контакт между поверхностями. *Contact Wizard* (контактный мастер), доступный через путь-меню **Preprocessor > Create > Contact Pair > Contact Wizard**, обеспечивает простой путь для конструирования контактной пары для большинства контактных задач. *Contact Wizard* будет направлять Вас в течение всего процесса создания контактной пары. Помощь, доступная в каждом диалоговом окне через соответствующую кнопку "help", приводит к описанию текущих действий.

Контактный мастер остается недоступным, если Вы не разбили сеткой одну из частей Вашей модели. Если Вы желаете создать жестко-податливую модель, то перед запуском контактного мастера постройте сеточную модель только той части модели, которая будет использоваться как податливая контактная поверхность, не разбивая сеткой жесткие целевые поверхности. Если Вы хотите создать податливо-податливую контактную модель, перед запуском контактного мастера произведите сеточное разбиение всех частей модели, которые будут включать как контактные поверхности, так и целевые поверхности.

Следующие разделы рассматривают вопросы создания контактных и целевых поверхностей без использования "мастера".

### 4.1. Использование контактных элементов "поверхность-поверхность"

В задаче, включающей контакт между двумя границами, одна из них условно принимается "целевой" поверхностью (target), а другая – "контактной" поверхностью (contact). Для жестко-податливого контакта, целевая поверхность есть всегда жесткая поверхность, а контактная поверхность – деформируемая поверхность. Для податливо-податливого контакта и контактная и целевая поверхности подразумевают деформацию обоих тел. Эти две поверхности вместе составляют "контактную пару". Для задания 2-D контактной пары используются элементы **TARGE169** или с **CONTA171** или **CONTA172**. Для 3-D

контактной пары используются элементы **TARGE170** или с **CONTA173** или **CONTA174**.

используются элементы TARGE170 или с CONTA173 или с CONTA174. Каждая контактная пара идентифицируется через одно и то же значение реальных постоянных.

## 4.2. Шаги при выполнении контактного анализа

Ниже в этом разделе приведены базовые шаги для выполнения обычного контактного анализа типа "поверхность-поверхность". Каждый шаг затем объясняется в деталях на последующих страницах.

1. Создание геометрической и сеточной модели.
2. Установление контактной пары.
3. Назначение целевой и контактной поверхностей.
4. Задание целевой поверхности.
5. Задание контактной поверхности.
6. Установление ключевых опций элементов и реальных постоянных.
7. Определение / управление движением жесткой целевой поверхности (только для жестко-податливой модели).
8. Приложение необходимых граничных условий.
9. Задание опций решения и нагружений.
10. Решение контактной задачи.
11. Обзор результатов.

## 4.3. Создание модели и сеточное разбиение

Сначала создайте твердотельные объекты, которые представляют геометрию контактирующих тел. Выберите типы элементов, реальные постоянные, свойства материалов, так же, как в любом виде анализа программы ANSYS. Произведите сеточное разбиение контактирующих тел выбранными Вами типами объемных или поверхностных элементов. Для более подробной информации смотрите раздел *ANSYS Modeling and Meshing Guide*.

Command(s): AMESH  
VMESH

GUI: Main Menu> Preprocessor> Mesh

## 4.4. Определение контактных пар

Вы должны указать, где контактные пары могут встречаться во время деформирования модели. Однажды указав потенциально контактные поверхности, Вы затем определяете их через целевые и контактные элементы, которые потом будут отслеживать кинематику процесса деформирования. Целевые и контактные элементы, составляющие контактную пару, связываются друг с другом через набор реальных постоянных.

Зона контакта может быть произвольной; тем не менее, для большей эффективности решения (главным образом в CPU времени), Вы можете задать небольшие зоны локализованных контактов, но при этом необходимо позаботиться, чтобы эти зоны отражали все особенности

контактного взаимодействия. Различные контактные пары должны определяться при различных наборах реальных постоянных, даже если они совпадают. Допускается неограниченное число поверхностей.

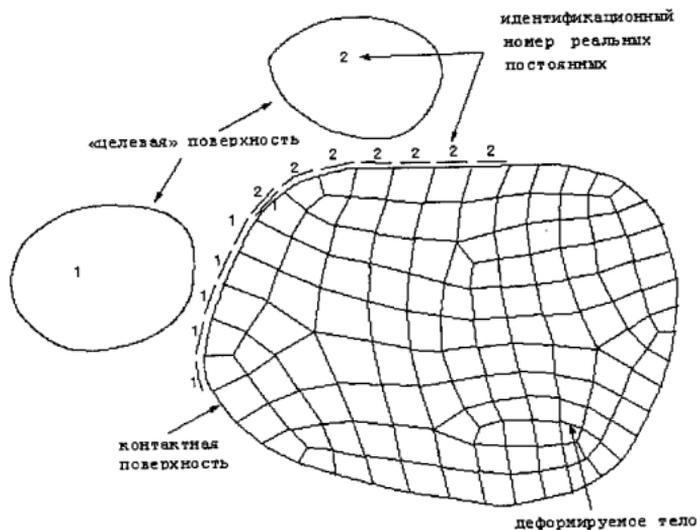


Рис. 1. Локализация зон контактов

В зависимости от геометрии модели (и потенциальной деформации), многие целевые поверхности могут взаимодействовать с тождественной зоной контактной поверхности. В каждом случае, Вы должны определить многочисленные контактные пары (используя множество, перекрывающихся контактных элементов), каждый со своим набором реальных постоянных (смотрите рисунок 1).

#### 4.5. Назначение целевой и контактной поверхностей

Контактные элементы располагаются против проникающей целевой поверхности. Тем не менее, целевые элементы могут проникать через контактную поверхность. Для жестко-податливого контакта выбор очевиден: целевая поверхность всегда является жесткой поверхностью, а контактная поверхность – всегда податливой. Для податливо-податливого контакта выбор, какая из поверхностей объявлена контактной, а какая целевой, может быть причиной различного результата проникновения и таким образом влиять на точность решения. При выборе целевой поверхности следует принять во внимание следующее:

- Если выпуклую поверхность предполагается сделать контактирующей с плоской или вогнутой поверхностью, плоская/вогнутая поверхность должны быть целевой поверхностью.
- Если одна поверхность имеет более мелкое сеточное разбиение по сравнению с дру-

гой, то первая должна быть контактной поверхностью, а с более грубой сеткой – целевой поверхностью.

- Если одна поверхность жестче, чем другая, то более мягкая поверхность должна быть контактной, а жесткая поверхность – целевой.
- Если высокопорядковые элементы лежат под одной внешней поверхностью, а низкопорядковые элементы под другой, то поверхность, под которой находятся высокопорядковые элементы, должна быть контактной, а другая – целевой.
- Если одна поверхность заметно больше другой, как например, когда поверхность охватывает другую, то большая поверхность должна быть целевой.

Эти наставления справедливы для асимметричного контакта, тем не менее, асимметричный контакт может не удовлетворять Вашей модели. Следующий подраздел детализирует различие между асимметричным и симметричным контактом и некоторые общие черты ситуаций, которые требуют симметричного контакта.

#### 4.6. Асимметричный и симметричный контакт

Асимметричный контакт определяется, как контакт, имеющий все контактные элементы на одной поверхности, а все целевые элементы на другой поверхности. Это прежде называлось однопроходный контакт ("one-pass contact"). Это обычно наиболее эффективный путь для моделирования контакта "поверхность-поверхность". Тем не менее, при некоторых условиях асимметричный контакт выполняется неудовлетворительно. В таких случаях Вы можете каждую поверхность назначить как целевой, так и контактной. Вы можете в таком случае сгенерировать два набора контактных пар между контактирующими поверхностями (или просто одну контактную пару, например, случай самоконтакта (self-contact case)). Это известно, как симметричный контакт (или двухпроходный контакт ("two-pass contact")). Очевидно, что симметричный контакт менее эффективен, чем асимметричный контакт. Тем не менее, многие случаи анализа требуют его использования (обычно, чтобы ослабить проникновение). Специфические ситуации, которые требуют включения модели симметричного контакта:

- Различие между целевой и контактной поверхностями не ясны.
- Обе поверхности имеют очень грубую сетку. Алгоритм симметричного контакта накладывает большие ограничения на контактные поверхности, чем алгоритм асимметричного контакта.

Если сетки на обеих поверхностях идентичны и достаточно подробны, алгоритм симметричного контакта не может значительно улучшить выполнения, но может быть более дорогостоящим в смысле затрат времени. При таких обстоятельствах, просто назначьте одну поверхность целевой, а другую – контактной.

В любой контактной модели Вы можете смешать различные типы контактных пар: жестко-податливый или податливо-податливый контакт; симметричный или несимметричный паре. Но в любом случае только один тип контакта может существовать в контактной паре.

## 4.7. Задание целевой поверхности

Целевые поверхности могут быть как дву- и трехмерными, так жесткими или податливыми. Для создания целевых элементов на деформируемой поверхности обычно используют команду **ESURF**, согласно принятой схеме создания поверхностных элементов (при использовании контактного мастера, создание элементов контактной пары и задание их реальной постоянной производится в рамках последовательных действий). Тот же метод применяется и для генерации контактных элементов на деформируемой поверхности (смотрите Раздел 4.8). Вы не должны использовать следующие жесткие целевые сегменты для деформируемых целевых сегментов: **ARC**, **CARC**, **CIRC**, **CYLI**, **CONE**, **SPHE**, или **PLO**. Для жестких целевых поверхностей это обеспечивается принципами, заложенными в программе.

В двумерном случае форма целевой поверхности описывается, как последовательность прямых линий, дуг окружностей и парабол, которые могут быть представлены целевыми элементами **TARGE169**. Вы можете также использовать любую комбинацию для задания сложной геометрии целевой поверхности. В трехмерном случае, форма целевой поверхности описывается, как последовательность треугольников, четырехугольников, цилиндров, конусов и сфер, которые представляются элементом **TARGE170**. Вы можете использовать любую комбинацию низко- и высокопорядковых треугольников и четырехугольников для моделирования целевой поверхности сложной произвольной геометрии.

### 4.7.1. Ведущие (Pilot) узлы

Жесткая целевая поверхность может быть связана с некоторым узлом, называемым "ведущим узлом" ("pilot node"), который является одним из узлов этого элемента и несет на себе функции по заданию движения поверхности. Силы и моменты вращения, прилагаемые к целевой поверхности, прикладываются именно к "ведущему" узлу. "Ведущий" узел может быть либо одним из узлов целевого элемента, либо отдельно расположенным узлом в произвольном месте. Место положение ведущего узла важно только тогда, когда задаются вращательные или моментные нагрузки. Если Вы определили ведущий узел, ANSYS проверяет граничные условия только в ведущем узле и игнорирует все ограничения на других узлах.

*Примечание* – "Контактный мастер" не поддерживает в настоящий момент создание ведущих узлов. Вы можете определить ведущий узел вне контактного мастера.

### 4.7.2. Примитивы

Вы можете использовать круг, цилиндр, конус и сферу, как примитив для моделирования целевой поверхности (которая требует реальных постоянных, чтобы задать радиус). Вы можете скомбинировать сегменты примитивов с главными сегментами (такими как линии, параболы, треугольники и четырехугольники) для задания целевой поверхности.

### 4.7.3. Типы элементов и реальные постоянные

Перед генерацией целевых элементов определите тип элемента (**TARGE169** для 2-D или **TARGE170** для 3-D):

Command(s): **ET**

GUI: **Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete**

Затем установите количество реальных постоянных для целевых элементов:

Command(s): **REAL**

GUI: **Main Menu> Preprocessor> Real Constants**

Для **TARGE169** и **TARGE170**, Вам необходимо установить только реальные постоянные R1 и R2 (если требуется). Полное описание целевых элементов, их форм, набора реальных постоянных, приведено в описании элементов **TARGE169** и **TARGE170** в главе 4 *ANSYS Elements Reference*.



Задание реальных постоянных (R1, R2) вручную необходимо только, если Вы используете прямую генерацию при создании Ваших целевых элементов. Вы можете также использовать инструменты сеточного разбиения ANSYS для создания элементов. Оба этих метода объясняются ниже.

#### 4.7.4. Использование прямой генерации для создания жесткой целевой поверхности

Чтобы напрямую сгенерировать целевые элементы, используйте следующую команду или путь-меню:

Command(s): **TSHAP**

GUI: **Main Menu> Preprocessor> -Modeling- Create> Elements> Elem Attributes**

Затем Вы указываете форму элемента. Возможные формы:

- Прямая линия (2-D)
- Парабола (2-D)
- Дуга по часовой стрелке (2-D)
- Дуга против часовой стрелки (2-D)
- Окружность (2-D)
- Трехузловая треугольная грань (3-D)
- Шестиузловая треугольная грань (3-D)
- Четырехузловая четырехугольная грань (3-D)
- Восьмиузловая четырехугольная грань (3-D)
- Цилиндр (3-D)
- Конус (3-D)
- Сфера (3-D)
- Ведущий узел (2-D и 3-D)

Поскольку после указания формы целевого элемента все последующие целевые элементы будут иметь такую же форму, то при изменении формы необходимо повторить указанную выше операцию с выбором новой формы. Вы не можете применять 2-D и 3-D элементы на одной целевой поверхности.

Затем Вы генерируете узлы и элементы, используя технику прямой генерации программы ANSYS. Относительно последней, более подробная информация содержится в главе 9 Руководства *ANSYS Modeling and Meshing Guide*.

Command(s): **N, E**

GUI: **Main Menu> Preprocessor> -Modeling- Create> Nodes**  
**Main Menu> Preprocessor> -Modeling- Create> Elements**

Вы можете затем проверить форму Ваших элементов при помощи вывода списка элементов.

Command(s): ELIST

GUI: Utility Menu> List> Elements> Nodes + Attributes

#### 4.7.5. Использование “Meshing Tools” для создания жестких целевых элементов

Вы также можете генерировать элементы автоматически, используя стандартные возможности сеточного разбиения программы ANSYS. Программа будет назначать надлежащую форму целевых элементов, базируясь на свойствах твердотельной модели, и игнорируя установки TSHAP.

Для создания ведущего узел, используйте следующую команду или путь-меню:

Command(s): KMESH

GUI: Main Menu> Preprocessor> -Meshing- Mesh> Keypoints

Примечание – KMESH всегда создает ведущий узел.

Для генерации 2-D элементов, используются соответствующие команды или путь-меню. Программа ANSYS создает простую линию на каждой линии, параболический сегмент на B-сплайне и круговой сегмент на каждой окружности и линии скругления (смотрите рисунок 2). Если все круговые сегменты формируют замкнутую окружность, программа создает единый круговой сегмент (смотрите рисунок 3).

Command(s): LMESS

GUI: Main Menu> Preprocessor> -Meshing- Mesh> Lines

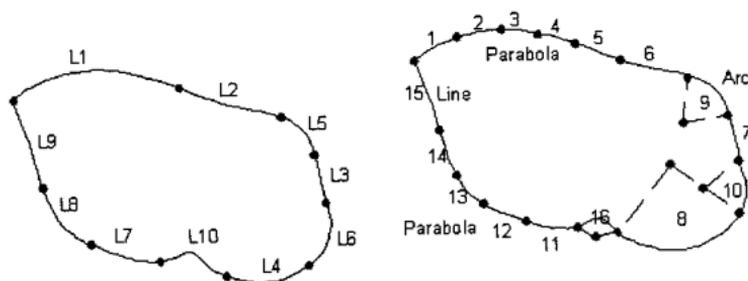


Рис. 2. Геометрические объекты и соответствующие им жесткие целевые элементы

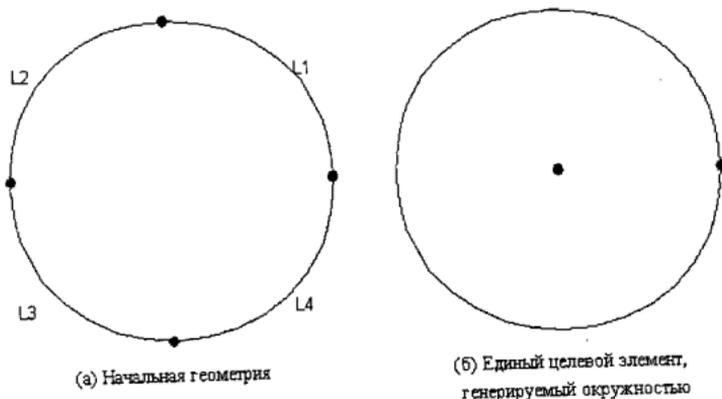


Рис. 3. Единый круговой целевой сегмент, созданный из дуговых сегментов

Чтобы сгенерировать 3-D жесткий целевой элемент, воспользуйтесь соответствующей командой или путь-меню.

Command(s): AMESH

GUI: Main Menu> Preprocessor> -Meshing- Mesh> -Areas

Если поверхностные сегменты на твердотельной модели формируют полную сферу, цилиндр или конус, тогда ANSYS автоматически генерирует 3-D целевой элемент в виде единого примитива с помощью команды AMESH. При создании нескольких элементов анализ проводится вычислительно более эффективно. Для произвольной поверхности Вы должны использовать команду AMESH для генерации целевых элементов. В этих случаях качество сеточной формы не важно. Более важно, чтобы целевые элементы хорошо представляли геометрию жесткой поверхности.

Рекомендуется использование "распланированного" сеточного разбиения во всех возможных областях. Если имеются не криволинейные ребра на поверхности, установите одно деление на такое ребро. По умолчанию форма целевого элемента – четырехугольная. Если Вы желаете установить треугольную форму элементов, используйте команду MSHAP,1. На рисунке 4 приведен пример сеточного разбиения для произвольных целевых поверхностей. Следующая команда или путь-меню будут генерировать распланированное сеточное разбиение, где это возможно (с другой стороны, если это не возможно, будет генерироваться свободное сеточное разбиение).

Command(s): MSHKEY,2

GUI: Main Menu> Preprocessor> -Meshing- Mesh> -Areas- Target Surf

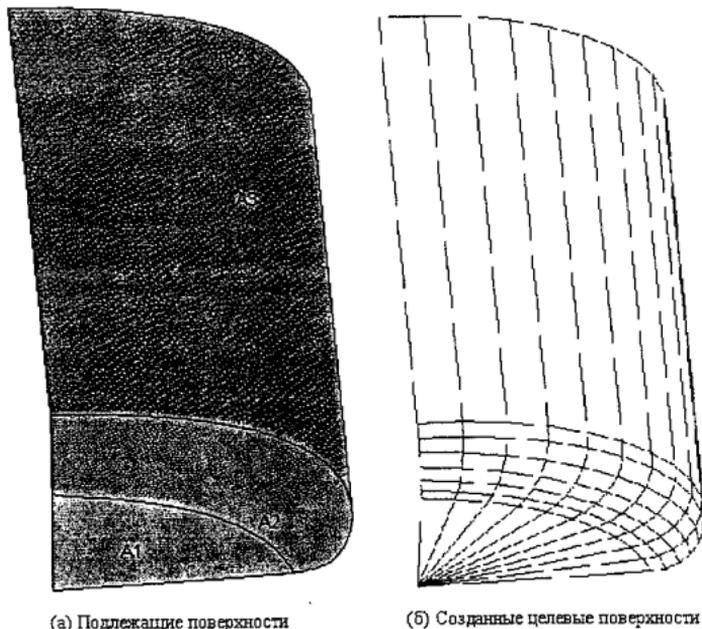
Если целевая поверхность является плоскостью (или близка к ней), Вы можете выбрать низкопорядковые элементы (треугольные или четырехугольные). Если целевая поверхность криволинейна, то Вы должны выбрать высокопорядковые элементы (шестиугольные или восьмиугольные).

элементы). Поступая таким образом, установите KEYOPT(1)=1 при определении целевого элемента.



При использовании низкопорядковых целевых элементов затрачивается меньше времени CPU для вычисления проникновения и зазора; однако сеточное разбиение может быть недостаточно "гладким". Высокопорядковые целевые элементы являются более "дорогостоящими" с точки зрения затрат времени процессора, но зато их нужно существенно меньше для дискретизации криволинейной поверхности.

Если целевые элементы создаются средствами программы (через команды KMESH, LMESH или ESURF), то команда TSHAP игнорируется и ANSYS автоматически выбирает корректную форму.



(а) Подлежащие поверхности

(б) Созданные целевые поверхности

Рис. 4. "Родительское" сеточное разбиение для произвольной целевой поверхности

### Некоторые особенности моделирования и сеточного разбиения

Целевая поверхность может быть скомпонована из двух и более несвязанных областей. Где это возможно, Вы должны локализовать зону контакта путем определения множества целевых поверхностей (каждая с собственными реальными постоянными). При этом не имеется ограничений на форму жестких поверхностей и сглаживание не требуется. Тем не менее Вы должны понимать, что дискретизация криволинейной поверхности целевыми поверхностями должна быть адекватной. Чрезмерно грубая дискретизация может привести к проблемам в численной сходимости. Это также может вызвать затруднения при получении сходящегося решения при моделировании больших скольжений, особенно если целевая по-

верхность имеет острые внешние углы. Чтобы избежать таких проблем, произведите скругления линий и поверхностей твердотельной модели снаружи острых углов и уточнение сеточного разбиения в области резкого изменений кривых, или используйте высокопорядковые элементы в областях резкого изменения кривизны (смотрите рисунок 5).



Рис. 5. Сглаживание угловых вершин

### Проверка порядка узловой нумерации (направления контакта) целевой поверхности

Порядок узлов элементов целевой поверхности критичен для задачи, поскольку он определяет направление контакта. Для двумерного контакта, деформируемые контактные элементы должны располагаться справа от целевой поверхности, когда Вы двигаетесь от первого узла ко второму вдоль линии целевой поверхности (смотрите рисунок 6).

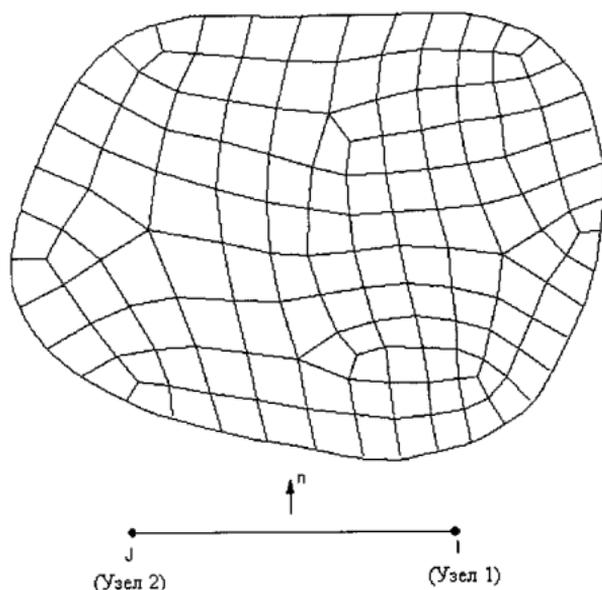


Рис. 6. Правильный порядок узлов

Для 3-D контакта, нумерация треугольных элементов целевой поверхности должна быть такой, чтобы внешняя нормаль жесткой поверхности указывала на контактную поверхность. Внешняя нормаль определяется правилом правой руки.

Чтобы визуально проконтролировать направления нормалей, выделите отображение в графическом окне только контактных элементов и включите визуализацию системы координат элементов.

Command(s): /PSYMB,ESYS,1

GUI: Utility Menu> PlotCtrls> Symbols

Если нормали элементов не направлены на контактную поверхность, выделите эти элементы и реверсируйте направление их нормалей.

Command(s): ESURF, ,REVE

GUI: Main Menu> Preprocessor> Create> Elements> Surf to Surf

Или переориентируйте направление нормалей:

Command(s): ENORM

GUI: Main Menu> Preprocessor> Create> Move/Modify> Shell Normals

Примечание – Контакт примитивов целевой поверхности (таких как полный круг, цилиндр, конус или сфера), может иметь место только на внешней поверхности таких тел.

## 4.8. Задание деформируемой контактной поверхности

Для создания деформируемой контактной поверхности, Вы должны задать на поверхности контактные элементы **CONTA171** или **CONTA172** (для двумерной задачи), или **CONTA173** или **CONTA174** (для трехмерной задачи).

Контактная поверхность определяется набором контактных элементов, который охватывает поверхность деформируемого тела. Эти контактные элементы имеют одинаковые геометрические характеристики, как и деформируемые твердотельные элементы, лежащие в их основании. Элементы контактной поверхности должны быть одного порядка с элементами, лежащими в их основании (низкого или высокого порядка), с совместными узлами вдоль ребер. Лежащие в основании элементы могут быть твердотельными, оболочечными или двумерными балочными, а также суперэлементами. Контактные элементы могут быть на любой стороне оболочечного или балочного элемента.

Как и в случае целевых элементов, Вы должны задать тип контактного элемента, затем подобрать число корректных реальных постоянных (их значения должны быть такими же, как на используемой целевой поверхности для каждой пары контактов), и окончательно сгенерировать элементы.

### 4.8.1. Тип элемента

Ниже приведено краткое описание четырех типов контактных элементов. Для более полной информации о них следует обратиться к главе 4 *ANSYS Elements Reference*.

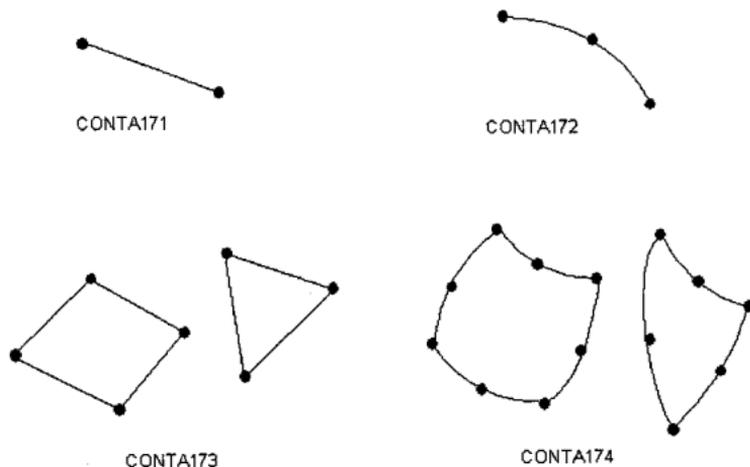


Рис. 7. Типы контактных элементов

- CONTA171**: Это двумерный тип элемента, двухузловой, линейный низкопорядковый, он может располагаться на поверхности элемента двумерного твердого тела, оболочки или балки (таких как **BEAM3**, **PLANE42** или **SHELL51**; **PLANE182**, **HYPER56**, **VISCO106**, **SHELL51**, **BEAM23** или **MATRIX50**; смотрите описание элемента).

- **CONTA172:** Это двумерный тип элемента, трехузловой, высокопорядковый параболический, который может быть расположен на поверхности двумерных твердотельных или балочных элементов со средними узлами (таких как **PLANE82** или **VISCO88**; **PLANE2**, **HYPER74**, **HYPER84**, **VISCO108** или **MATRIX50**).
- **CONTA173:** Это трехмерный тип элемента, четырехузловой, низкопорядковый четырехугольный, который может быть расположен на поверхности трехмерных твердотельных или оболочечных элементов (таких как **SOLID45** или **SHELL181**; **SOLID46**, **SOLID64**, **SOLID65**, **SOLID72**, **SOLID73**, **SOLID185**, **HYPER58**, **HYPER86**, **VISCO107**, **SHELL28**, **SHELL41**, **SHELL43**, **SHELL63**, **SHELL181** и **MATRIX50**). Элемент может быть вырожденным трехузловым треугольным элементом.
- **CONTA174:** Это трехмерный тип элемента, восьмиузловой, высокопорядковый четырехугольный, который может быть расположен на поверхности трехмерных твердотельных или оболочечных элементов со средними узлами (таких как **SOLID92**, **SOLID95** или **SHELL93**). Он может быть сгенерирован как шестиузловой треугольный элемент.

Command(s): ET

GUI: Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete

#### 4.8.2. Реальные постоянные и свойства материала

После определения типа элемента, Вам необходимо корректно выбрать набор реальных постоянных. Набор реальных констант для каждой контактной поверхности должен быть таким же, какой используется для соответствующей "целевой" поверхности в каждой контактной паре. Каждая контактная пара должна быть снабжена своим собственным номером реальных постоянных.

ANSYS использует свойства материалов элементов, лежащих под контактными поверхностями, для расчета присущей контактной (или штрафной) жесткости. В случаях, когда подлежащие элементы имеют пластические свойства материала (независимо, активизированы они или нет), контактная жесткость будет уменьшена в 100 раз. Программа ANSYS автоматически определяет величину для тангенциальной контактной жесткости, которая пропорциональна MU и нормальной жесткости.

Если подстилающие элементы являются суперэлементами, набор свойств материала для контактного элемента должен быть таким же, какой у исходных структурных элементов, используемых в ходе создания суперэлемента.

#### 4.8.3. Генерирование контактных элементов

Вы можете создать контактные элементы или путем прямой генерации, или автоматической генерацией на поверхности внешних граней подстилающих элементов. Мы рекомендуем, чтобы Вы использовали автоматическую генерацию; этот подход обеспечивает большую простоту и надежность.

Чтобы автоматически сгенерировать контактные элементы, выполните следующие действия:

1. Выделите узлы на поверхности деформируемого тела. Для каждой поверхности визуально просмотрите набор узлов. Если Вы уверены, что некоторые узлы никогда не будут участвовать в контакте, то Вы можете деселектировать эти узлы при создании контакта, что сократит время расчета. Однако всегда следует расширить область контакта, включив несколько больше узлов, чем Вы думаете, что Вам понадобится.

Command(s): NSEL

GUI: Utility Menu> Select> Entities

2. Сгенерируйте контактные элементы.

Command(s): ESURF

GUI: Main Menu> Preprocessor> Create> Elements> Surf to Surf

Если контактная поверхность принадлежит областям или объемам, которые разбиты сеткой с твердотельными элементами, ANSYS автоматически определяет внешнюю нормаль, необходимую для контактных расчетов. Если подстилающие элементы – балочные или оболочечные элементы, то необходимо прямо указать, какая поверхность (верхняя или нижняя) является контактирующей поверхностью.

Command(s): ESURF, ,TOP или BOTTOM

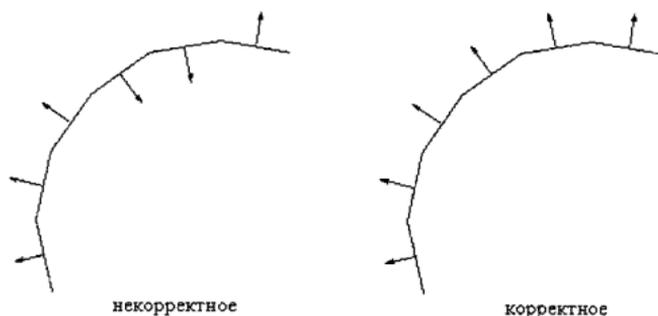
GUI: Main Menu> Preprocessor> Create> Elements> Surf to Surf

Используйте установку TOP (по умолчанию) при генерации контактных элементов, если их внешние нормали должны совпадать с нормальными балочных и оболочечных элементов. И наоборот, используйте установку BOTTOM при генерации контактных элементов с их внешними нормальными, противоположными нормальными балочных и оболочечных элементов. Вы должны убедиться, что все элементы на наборе балочных и оболочечных элементов имеют нормали соответствующей ориентации. Если подстилающие элементы являются твердотельными, тогда установка TOP или BOTTOM не имеет значения.

3. Проверьте направление внешних нормалей для контактных элементов. Направление внешней нормали контактной поверхности критично для выявления правильности контакта. При определении их внешней нормали 3-D элементов нумерация узлов должна соответствовать правилу правой руки. Внешняя нормаль контактной поверхности должна быть расположена по направлению к "целевой" поверхности. В противном случае, программа может не установить контактирующих поверхностей в начале анализа и не найти начальное решение. В большинстве таких случаев анализ будет неудачен. Рисунок 8 иллюстрирует и правильное и неправильное задание внешней нормали контактной поверхности.

Command(s): /PSYMB,ESYS

GUI: Utility Menu> PlotCtrls> Symbols



**Рис. 8. Указание внешней нормали контактной поверхности**

Если поверхностные нормали заданы не корректно, Вы должны изменить их путем реверсирования порядка узловой нумерации селектированных элементов.

Command(s): **ESURF, ,REVE**

GUI: **Main Menu> Preprocessor> Create> Elements> Surf to Surf**

Или переориентировать нормали элементов.

Command(s): **ENORM**

GUI: **Main Menu> Preprocessor> Create> Move/Modify> Shell Normals**

## 4.9. Задание реальных постоянных и ключевых опций элементов

ANSYS использует набор из 11 реальных постоянных и некоторое количество ключевых опций элементов при управлении контактного поведения, использующего эти контактные элементы "поверхность-поверхность". Для более подробной информации, в дополнение к представленной здесь, мы отправляем к описанию отдельных контактных элементов в главе 4 *ANSYS Elements Reference*.

### 4.9.1. Реальные постоянные

Из 11 реальных постоянных, две (R1 и R2) используются для определения геометрии элементов "целевой" поверхности. Остальные девять используются для элементов контактных поверхностей.

- R1 и R2 определяют геометрию "целевых" элементов.
- FKN определяет коэффициент нормальной контактной жесткости.
- FTOLN – это множитель, базирующийся на толщине элемента, который используется для расчета допустимого проникновения (предел максимального проникновения).
- ICONT определяет фактор начальной замкнутости (то есть величину зазора, при которой контакт считается замкнутым).
- PINB определяет радиус области поиска контактной пары ("pinball region").
- PMIN и PMAX определяют допустимый уровень проникновения при начальном проникновении.
- TAUMAX задает максимальное контактное трение.
- CNOF указывает положительную или отрицательную величину сдвига, применяемую к контактной поверхности.
- FKOP указывает коэффициент жесткости, применяемый, когда контакт открыт.
- FKT устанавливает тангенциальную контактную жесткость.
- COHE устанавливает величину усилия трения покоя (the cohesion sliding resistance).
- TCC устанавливает коэффициент контактной теплопроводности (thermal contact conductance coefficient).
- FHTG устанавливает долю диссипируемой энергии преодоления трения, преобразующейся в тепло.
- SBCT устанавливает постоянную Стефана-Больцмана.
- RDVF определяет коэффициент радиационного поля зрения (Radiation view factor).
- FWGT определяет долю тепла, выделяющегося на контактной поверхности.

Command(s): R

GUI: Main Menu> Preprocessor> Real Constants

Для реальных постоянных FKN, FTOLN, ICONT, PINB, PMAX, PMIN, FKOP и FKT Вы можете задать или положительное или отрицательное значение. ANSYS интерпретирует положительное значение как масштабный фактор, а отрицательное как абсолютную величину. ANSYS использует глубину подстилающего элемента как справочную величину, которая используется для определения абсолютных значений FTOLN, ICONT, PINB, PMAX и PMIN. Например, положительное значение 0.1 величины ICONT указывает начальный коэффициент перекрытия равным 0.1 глубины лежащего под ним элемента. В то время как отрицательное значение 0.1 указывает, что текущая установка компоненты – 0.1 (физических единиц). Если подстилающий элемент есть суперэлемент, глубина есть наименьшая длина контактного элемента. Рисунок 9 показывает глубину подстилающего элемента.

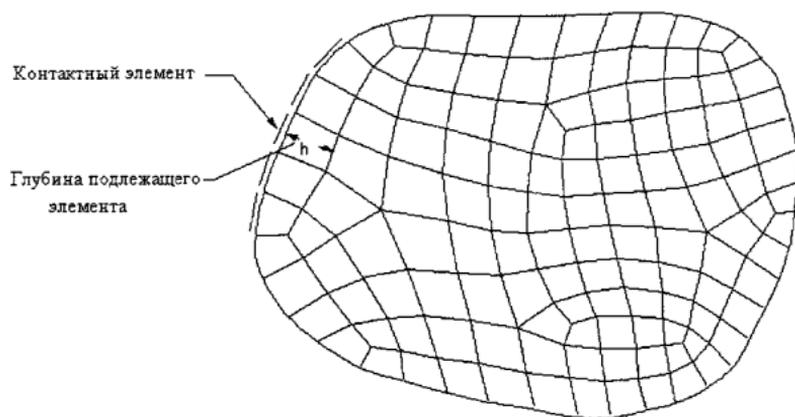


Рис. 9. Глубина подлежащего элемента

#### 4.9.2. Ключевые опции элемента

Каждый контактный элемент содержит несколько ключевых опций. Мы рекомендуем использовать установки по умолчанию, которые являются подходящими для большинства контактных задач. Для некоторых специфических приложений Вы можете установить значения опций, отличные от устанавливаемых по умолчанию. Опции элементных ключей (KEYOPTS) допускают следующие управления их свойствами:

- Степени свободы (KEYOPT(1))
- Контактный алгоритм (штрафной + Лагранжевый или штрафной) (KEYOPT(2))
- (Только для двумерного.) Напряженное состояние, когда присутствуют суперэлементы (KEYOPT(3))
- (Только для низкорядковых контактных элементов.) Локализация точки обнаружения контакта (KEYOPT(4))

- CNOF – автоматическое смыкание контактных поверхностей (KEYOPT(5))
- Управление временным шагом (KEYOPT(7))
- Предупреждение установления ложного контакта (KEYOPT(8))
- Влияние начального проникновения (KEYOPT(9))
- Управление методом обновления нормальной и касательной контактных жесткостей (KEYOPT(10))
- Учет эффекта толщины оболочки/балки (KEYOPT(11))
- Поведение контактной поверхности (шероховатая, удерживающая и т.д.) (KEYOPT(12))

Command(s): **KEYOPT**  
**ET**

GUI: **Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete**

### 4.9.3. Выбор алгоритма контакта

Для контактных элементов "поверхность-поверхность" ANSYS использует или модифицированный метод Лагранжа (по умолчанию) или метод "штрафов". Используйте ключевую опцию KEYOPT(2) для задания метода.

Модифицированный метод Лагранжа есть итеративный ряд штрафных корректировок при поиске точных множителей (коэффициентов) Лагранжа (то есть контактных сил сцепления (traction)). По сравнению с методом "штрафов", метод приращений Лагранжа обычно приводит к лучшим результатам и менее чувствителен к величине коэффициента контактной жесткости. Тем не менее, в некоторых случаях метод Лагранжевых приращений может потребовать дополнительных итераций, особенно, если деформированная сетка слишком сильно искажается.

Используйте реальную постоянную FTOLN в сочетании с методом Лагранжевых приращений. FTOLN есть множитель, базирующийся на толщине элемента, который указывает допустимое максимальное проникновение. Если программа определяет большее проникновение, чем это допускается, то глобальное решение считается несомедшимся, даже если остающиеся приращения сил и перемещений удовлетворяют критерию сходимости. По умолчанию FTOLN равен 0.1. Вы можете изменить эту величину, но знайте, что задание слишком маленькой величины точности может привести к чрезмерному числу итераций или расхождению.

### 4.9.4. Задание контактной жесткости

Все контактные задачи требуют задание жесткости между двумя контактными поверхностями. Итог взаимного проникновения двух поверхностей зависит от этой жесткости. Очень высокое значение жесткости может привести к плохому состоянию матрицы жесткости и к трудностям сходимости. Как идеал, Вам хотелось бы, с одной стороны, иметь достаточно высокую жесткость, чтобы контактное проникновение было приемлемо мало, а с другой стороны, достаточно низкой, чтобы не было проблем со сходимостью или плохим состоянием матрицы. ANSYS по умолчанию вычисляет контактную жесткость, базируясь на свойствах материалов подстилающих элементов. ANSYS по умолчанию оценивает величину

ну контактной жесткости, базируясь на свойствах материала подлежащих деформируемых элементов. Вы можете использовать реальную постоянную FKN, чтобы задать или скалярный коэффициент или абсолютное значение контактной жесткости. Скалярный коэффициент обычно находится в интервале от 0.01 до 10; значение 1 (по умолчанию) часто бывает хорошей стартовой величиной для задач объемного деформирования, а 0.01 – 0.1 – для задач с преобладанием изгиба. Вы всегда должны проверять свой выбор в порядке минимального проникновения, чтобы избежать чрезмерного количества итераций.



Как FTOLN, так и FKN могут быть модифицированы на каждом шаге нагрузки. Они также могут устанавливаться при запуске рестарта. В этом случае Вы должны установить опцию контактного элемента KEYOPT(10) = 1,2.

Определение хорошего значения жесткости может потребовать некоторых экспериментов с Вашей стороны. Чтобы достигнуть хорошей величины жесткости, Вы можете попробовать такую процедуру как "trial run" (пробный запуск).

1. Используйте низкое значение для старта. Вообще, лучше несколько недооценить эту величину, чем переоценить. Проблемы внедрения, вытекающие из низкой жесткости, легче решаются, чем трудности сходимости, которые вытекают из высокой твердости.
2. Выполните анализ до некоторой доли нагрузки (чтобы получить хороший контакт).
3. Проверьте внедрение и число равновесных итераций, использованных в каждом подшаге. Если трудности глобального схождения вызываются слишком большим внедрением (скорее, чем остаточными усилиями и приращениями перемещений), FKN возможно было недооценено или FTOLN было слишком мало. Если глобальная сходимость требует большого числа равновесных итераций для достижения допусков схождения остаточных сил и приращений перемещений лучше (правильнее), чем проникновение, FKN может быть переоценена.
4. Установите FKN или FTOLN как необходимо, и запустите полный анализ.

*Примечание* – Если управление проникновением становится доминирующим в общем количестве глобальных равновесных итераций (если большее количество итераций используется, чтобы обеспечить сходимость проблемы в пределах допустимого проникновения, чем для схождения разности сил), Вы можете увеличить FTOLN, чтобы позволить большее проникновение или увеличить FKN.

#### 4.9.5. Выбор модели трения

В базовой модели Кулонова трения, две контактирующие поверхности могут содержать сдвиговые напряжения некоторой величины, из-за их взаимодействия перед фазой скольжения одной относительно другой. Это состояние известно как сцепление (sticking). Модель Кулонова трения определяет эквивалентное сдвигающее напряжение  $\tau$ , в котором скольжение по поверхности вначале представляет часть контактного давления  $P$  ( $\tau = \mu \cdot P + COHE$ , где  $\mu$  – коэффициент трения (MU) и задается, как свойство материала, и COHE определяющий сопротивление трения покоя). Как только предельное сдвигающее напряжение превышает, две контактирующие поверхности будут скользить одна относительно другой. Это состояние известно как скольжение. Расчеты по алгоритму сцепление/скольжение определяют, когда точка переходит из состояния сцепления в скольжение и наоборот. Коэффициент трения должен быть любой неотрицательной величиной. По умолчанию, ANSYS полагает бесфрикционный контакт между поверхностями. Для шершавого/грубого (rough) и связанного (скрепленного) контакта (KEYOPT(12) = 1, 3, 5 или 6), ANSYS предполагает бесконечное фрикционное сопротивление, несмотря на задаваемую величину MU.

ANSYS предоставляет опцию для задания максимального эквивалентного сдвигающего напряжения, так что несмотря на величину контактного давления, скольжение будет иметь место, если величина эквивалентного сдвигающего напряжения превысит этот предел. Смотрите рисунок 10. Чтобы задать максимально допустимое эквивалентное сдвигающее напряжение в месте контакта, определите реальную постоянную TAUMAX (по умолчанию = 1.0E20). Этот предел напряжения сдвига обычно используется в случае, когда напряжение контактного давления становится очень большим (как происходит в некоторых производственных процессах), ставя в теории Кулона условие критического сдвигового напряжения в зоне контакта, которое превышает предел текучести в материале под поверхностью. Приемлемая оценка сверху для TAUMAX есть  $\sigma_y/\sqrt{3}$ , где  $\sigma_y$  есть предел текучести по Мизесу в материале смежном с поверхностью. Часто источником TAUMAX являются эмпирические данные.

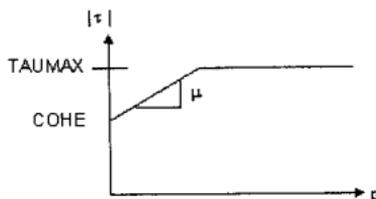


Рис. 10. Модель трения

Для бесфрикционного, грубого (шероховатого) и связанного (жесткого) контакта, матрицы жесткости контактных элементов являются симметричными. Контактные задачи, включающие трение, порождают несимметричную жесткость. Использование несимметричного решателя вычислительно более дорого, чем симметричного решателя на каждой итерации. Поэтому, ANSYS использует алгоритм симметризации, при помощи которого многие задачи с контактным трением могут быть решены с использованием решателей для симметричных систем. Если напряжения трения оказывают значительное влияние на поле полных перемещений и величина напряжений трения сильно зависит от решения, то всякая симметричная аппроксимация матрицы жесткости может привести к низкой скорости сходимости. В таких случаях следует выбрать опцию несимметричного решения (NROPT, UNSYM) для улучшения сходимости.

#### 4.9.5.1. Статический и динамический коэффициенты трения

Коэффициент трения может зависеть от относительной скорости находящихся в контакте поверхностей. Обычно статический коэффициент трения выше, чем динамический коэффициент трения.

В программе ANSYS заложена экспоненциальная зависимость трения от скорости:

$$\mu = MU \times \left( 1 + (\text{FACT} - 1) \exp(-DC \times V_{\text{rel}}) \right)$$

где  $\mu$  есть коэффициент трения.

Величина MU является динамическим коэффициентом трения, вводимым командой MP.

Величина FACT – это отношение статического коэффициента трения к динамическому. По умолчанию она равна своему минимальному значению 1.0.

DC – экспоненциальный коэффициент снижения. По умолчанию он равен 0.0 и имеет размерность Время/Длина.

Величина  $V_{rel}$  – скорость относительного скольжения, вычисляемая программой.

Экспоненциальный характер изменения коэффициента трения приведен на рисунке 11.

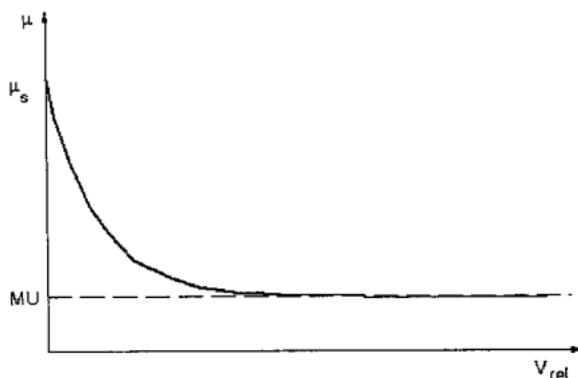


Рис. 11. Экспоненциальный характер изменения коэффициента трения

Вы можете определить коэффициент экспоненциального затухания, если вам известны статический и динамический коэффициенты трения, и хотя бы одна точка зависимости  $\mu_1(V_{rel})$ . Выражения для экспоненциального коэффициента имеет вид:

$$DC = -\frac{1}{V_{rel}} \times \ln \left( \frac{\mu_1 - MU}{(FACT - 1) \times MU} \right)$$

Если Вами не задан экспоненциальный коэффициент и величина FACT больше 1.0, то коэффициент трения будет изменяться скачком от статического значения к динамическому, как только контакт достигнет состояния скольжения. Это поведение подобно модели динамического трения, используемого контактными элементами **CONTAC48** и **CONTAC49**. Такая ситуация не рекомендуется, поскольку такая разрывность может приводить к трудностям сходимости.

#### 4.9.6. Выбор места задания контакта

Точки проявления контакта локализуются в интеграционных точках контактных элементов, расположенных на внешней поверхности элементов. Контактный элемент располагается со стороны проникновения на целевой поверхности в ее интеграционных точках. Однако целевая поверхность может проникнуть через контактную поверхность (то есть, так как собственно контактное взаимодействие происходит в конкретных точках, определяемых численным интегрированием по методу Гаусса, то формально между этими точками тела взаимно проникают друг в друга, образуя некоторую общую область, тем самым проникая через контактные поверхности). Смотрите рисунок 12.

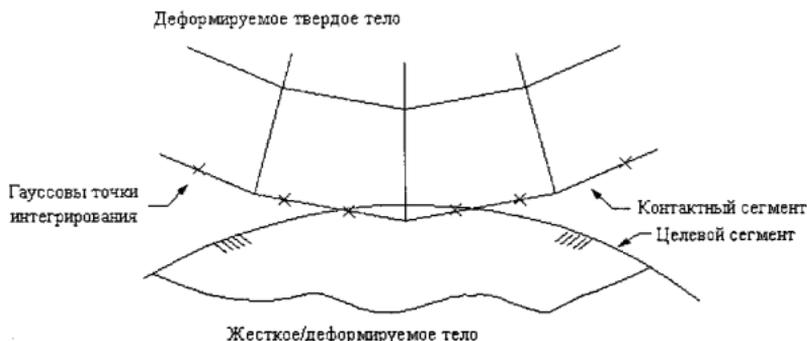


Рис. 12. Местоположение точки определения контакта по гауссовой точке

Контактные элементы "поверхность-поверхность" используют точки численного интегрирования по методу Гаусса (по умолчанию), которые обеспечивают более точные результаты, чем узловая схема интегрирования Newton-Cotes/Lobatto, которая использует свои собственные узлы как точки интегрирования. Используйте KEYOPT(4) для выбора метода, который Вы хотите применить. Эта опция действует только для низкопорядковых контактных элементов (CONTA171 и CONTA173). Тем не менее, использование собственных узлов, как точек интегрирования, должно применяться только для задач углового контакта (смотрите рисунок 13).

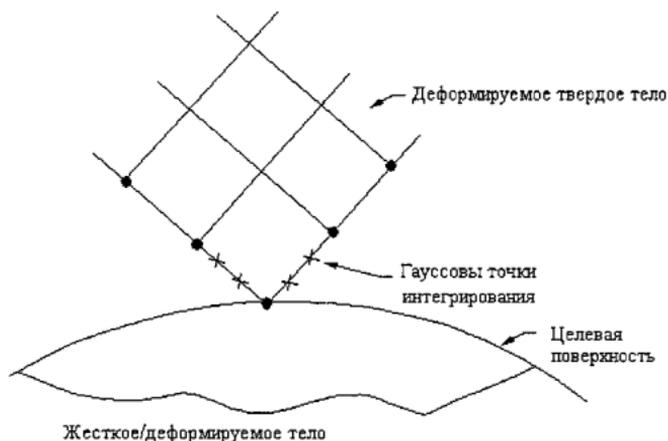


Рис. 13. Местоположение точки определения контакта по узловой точке

Помните, тем не менее, что использование узлов, как точек проявления контакта, может привести к другим трудностям схождения, таким как "проскальзывание" (slippage), когда узел соскальзывает с угла контактной поверхности. Смотрите рисунок 14. Для большинства контактных проблем "узел-поверхность", мы рекомендуем использование контактных элементов "узел-поверхность", таких как CONTAC26, CONTAC48 и CONTAC49 (смотри-

те раздел "Выполнение анализа "узел-поверхность" в этой главе).

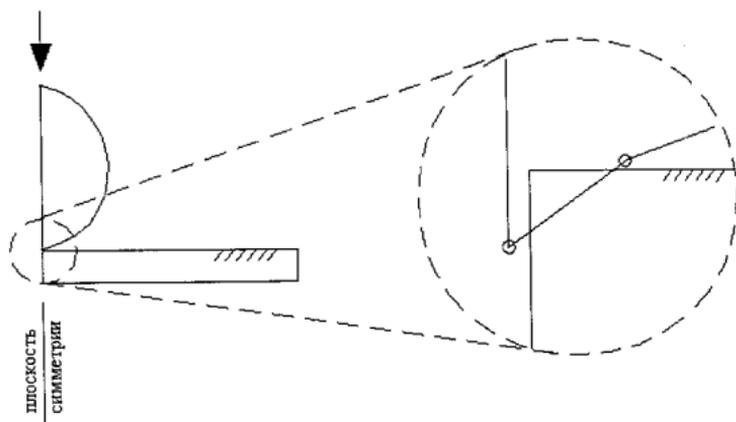


Рис. 14. Узловое "соскальзывание", при использовании опции узлового интегрирования KEYOPT(4)=1

#### 4.9.7. Установка (регулирование) начальных условий контакта

Движение жесткого твердого тела обычно не проблема в динамических анализах. Однако, в статическом анализе движение имеет место, когда твердое тело недостаточно зафиксировано. Сообщение "Zero or negative pivot" с предупреждением о "вычислительной сингулярности" и непригодности, чрезмерно большие перемещения указывают на неограниченное движение в статическом анализе.

В ситуации, когда движения твердого тела ограничиваются только присутствием контакта, Вы должны обеспечить, чтобы в начальной геометрии контактная пара находилась во взаимодействии. Другими словами, Вы должны построить Вашу модель так, чтобы контактные пары имели "точное соприкосновение". Тем не менее, Вы можете столкнуться с различными проблемами в случаях:

- Контуры твердого тела часто усложняются, делая их сложными для определения, где должна находиться первая точка контакта.
- Маленькие зазоры между сетками элементов на обеих сторонах пары могут приводить к численным округлениям, даже если модель твердого тела построена в изначально контактирующем состоянии.
- Маленькие зазоры могут существовать между интеграционными точками контактных элементов и элементами целевой поверхности.

По некоторым причинам, может происходить слишком большое проникновение между контактной поверхностью и целевой поверхностью. В этих случаях, контактные элементы могут переоценить (оценить слишком высоко) контактные силы, что выразится в несходимости или нарушении непрерывности компонент в контакте.

Определение начального контакта есть возможно наиболее важный аспект построения модели контактного анализа. Поэтому ANSYS предлагает несколько путей установления ус-

ловий начального контакта в контактной паре.



Следующие технические приемы могут выполняться независимо или в комбинациях в начале анализа. Они предназначаются для устранения малых зазоров или прониканий, вызванных численными округлениями, производимыми генерацией сетки. Они не предназначаются для коррекции больших ошибок ни в сеточном разбиении, ни в геометрических данных.

1. Используйте реальную постоянную ICONT для смыкания малых начальных контактов. Это есть глубина "установочной зоны" вдоль целевой поверхности. Если не указано, ANSYS назначает малое значение для ICONT соответствующее геометрическим размерам (то есть ориентируясь на геометрические размеры), и *выводит предупредительное сообщение, извещающее, какое значение было назначено*. Положительное значение ICONT указывает масштабный фактор по отношению к глубине подстилающих элементов. Отрицательное значение указывает абсолютное величину контактного смыкания. Любые точки индикации контакта, которые попадают вовнутрь этой установочной зоны, передаются целевой поверхности (смотрите рисунок 15(a)). Предлагается только очень маленькая поправка, иначе может произойти жесткий разрыв (смотрите рисунок 9-15(б)).

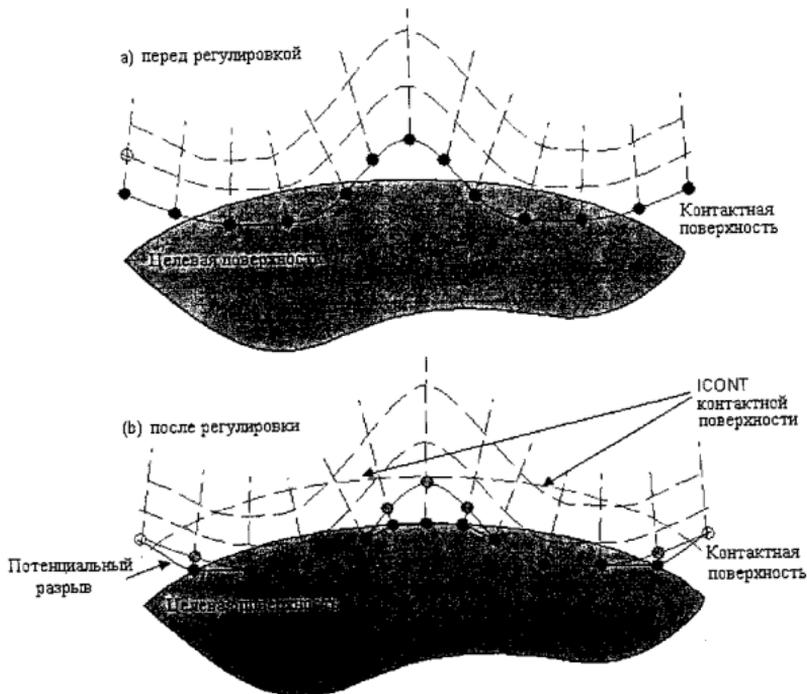


Рис. 15. Регулирование поверхностного контакта с помощью ICONT

- Используйте реальные постоянные PMIN и PMAX для задания начального допустимого уровня проникновения. Когда задается или PMIN или PMAX, ANSYS приводит целевую поверхность в состояние начального контакта в начало анализа (смотрите рисунок 16). Если начальное проникновение больше, чем PMAX, ANSYS устанавливает целевую поверхность с уменьшенным проникновением. Если начальное проникновение меньше, чем PMIN (и в пределах "pinball region"), ANSYS регулирует целевую поверхность, чтобы гарантировать начальный контакт. Начальное установление контактного состояния выполняется только в переходных формах.

Такое начальное регулирование состояния начального контакта будет выполняться для жесткой целевой поверхности, которая имеет или нагрузки или предписанные перемещения. Подобным образом, целевая поверхность, которая не имеет указанных граничных условий, может быть также отрегулирована для начального контакта.

Когда узлы целевой поверхности имеют предписанное значение равное нулю (то есть однородное граничное ограничение), начальная подгонка, использующая PMAX и PMIN, не будет выполняться.

Заметим, что ANSYS трактует применяемые степени свободы для узлов целевой поверхности независимыми. Например, если вы задали степень свободы UX равной нулю, то начальная подгонка вдоль оси X невозможна. Однако, опции PMAX и PMIN тем не менее активизируются в направлениях Y и Z.

Подгонка начального состояния – это итеративный процесс. ANSYS допускает максимум 20 итераций. Если поверхность не может быть приведена в приемлемый диапазон проникновения (то есть, диапазон PMAX, PMIN), анализ происходит с начальной геометрией. ANSYS в таких обстоятельствах выдает сообщение, и Вам необходимо произвести Вашу подгонку начальной геометрии вручную.

Рисунок 17 иллюстрирует проблему, в которой подгонка начального контакта будет неудачной. Степень свободы UY для целевой поверхности уже ограничили. Поэтому возможна только регулировка начального контакта в направлении X. Тем не менее, в этой проблеме, перемещение жесткой целевой поверхности в направлении X не будет устанавливать начального контакта.

Для податливо-податливого контакта, эта техника управляет не только целой целевой поверхностью, но так же управляет в целом деформируемым телом, которое связано с целевой поверхностью. Убедитесь, что нет другой контактной или целевой поверхности, связанной с деформируемым телом.

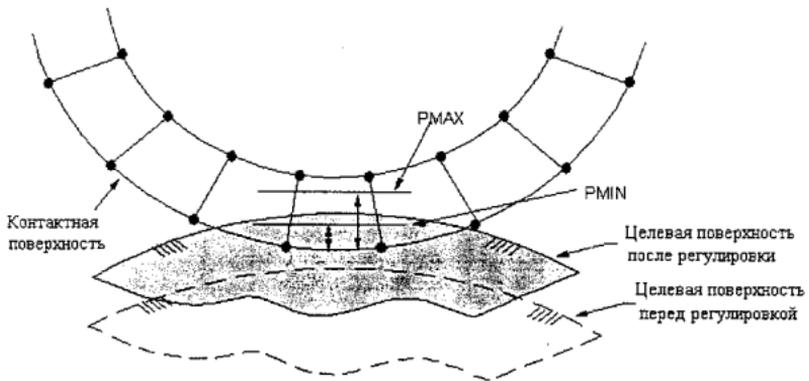


Рис. 16. Регулировка начального контакта с помощью (PMIN, PMAX)

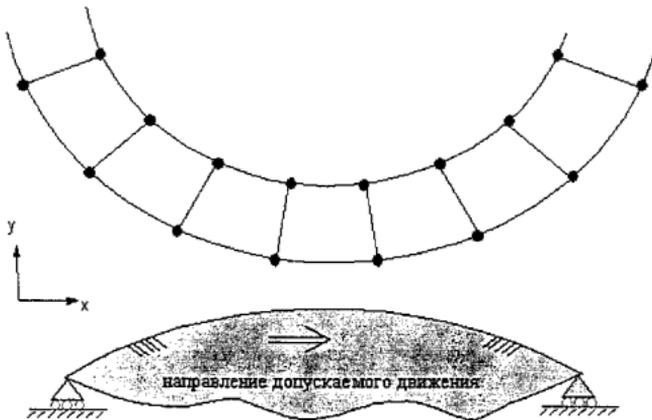


Рис. 17. Сценарий, в котором начальное регулирование неудачно

3. Используйте реальную постоянную CNOF для задания сдвига контактной поверхности.

Задание положительной величины CNOF соответствует сдвигу всей контактной поверхности по направлению к целевой поверхности. Отрицательное значение CNOF отодвигает контактную поверхность от целевой.

Различие между CNOF и ICONT в том, что первый сдвигает в целом контактную поверхность на расстояние CNOF, а последний перемещает все точки начального открытого контакта, которые в пределах регулировочной компоненты, на целевую поверхность.

4. Установите KEYOPT(9) для регулировки начального проникновения, смотрите рисунок 17.

Действительное начальное проникновение включает две части:

- Проникновение благодаря геометрии.
- Проникновение благодаря установленному пользователем сдвигу контактной поверхности (CNOF).

KEYOPT(9) обеспечивает следующие возможности:

- Чтобы включить начальное проникновение и из геометрии, и из сдвига контактной поверхности, установите KEYOPT(9)=0. Это производится по умолчанию.
- Для игнорирования начального проникновения от обоих эффектов, установите KEYOPT(9)=1.
- Чтобы включить задаваемый сдвиг контактной поверхности (CNOF), но игнорировать начальное проникновение благодаря геометрии, установите KEYOPT(9)=3.

Для проблем, таких как прессовая посадка, сверхпроникание предполагается. Эти проблемы часто имеют сложности со сходимостью, если начальное проникновение прикладывается разом на первом шаге нагрузки. Вы можете преодолеть сложности сходимости при линейно нарастающем (ramped) начальном проникновении на первом шаге нагрузки, смотрите рисунок 18. Следующие установки опции KEYOPT(9) обеспечивают эти возможности:

- Чтобы линейно нарастить (ramp) общее начальное проникание (CNOF + сдвиг благодаря геометрии), установите KEYOPT(9)=2.
- Чтобы линейно нарастить (to ramp) задаваемое проникновение контактной поверхности, но игнорировать проникновение за счет геометрии, установите KEYOPT(9)=4.

Для обеих установок KEYOPT(9) Вы также должны установить **KBC,0**, и не задавать никаких внешних нагрузок на первом шаге. Также обязательно, чтобы область поиска контакта (pinball region) была достаточно велика, чтобы охватить начальное перекрытие.

Вы можете использовать упомянутую выше технику в сочетании с любой другой. Например, можете пожелать установить более точное начальное проникновение или зазор, но начальные координаты конечно-элементных узлов не могут быть в состоянии обеспечить желаемую точность. Чтобы достигнуть этого, Вы должны:

1. Использовать ICONT для перемещения точек начального открытого контакта (в определенном диапазоне) к целевой поверхности.
2. Использовать CNOF для задания проникновения (положительная величина) или зазора (отрицательная величина).
3. Использовать KEYOPT(9)=3, чтобы разрешить (to resolve) начальное проникновение на первом подшаге, или KEYOPT(9)=4 для разрешения постепенного начального проникновения).

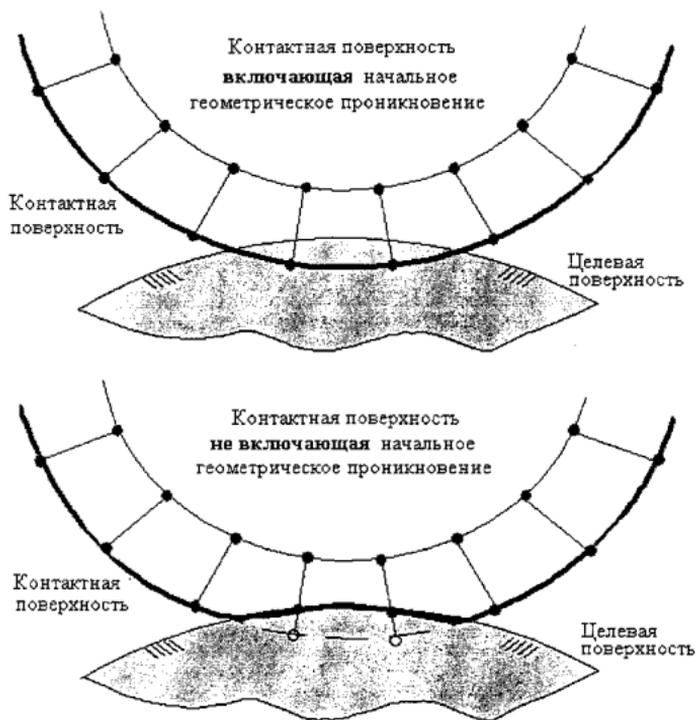


Рис. 18. Игнорирование начального проникновения, KEYOPT(9)=1

ANSYS обеспечивает вывод (в графическом окне или в файл) состояние начального контакта моделей для каждой целевой поверхности в начале анализа. Эта информация полезна для определения начального максимального проникновения или минимального зазора для каждой целевой поверхности.

Если контакт не обнаруживается для указанной целевой поверхности, то или целевая поверхность далека от контакта, то есть вне области поиска контакта, или контактные/целевые элементы были уничтожены.

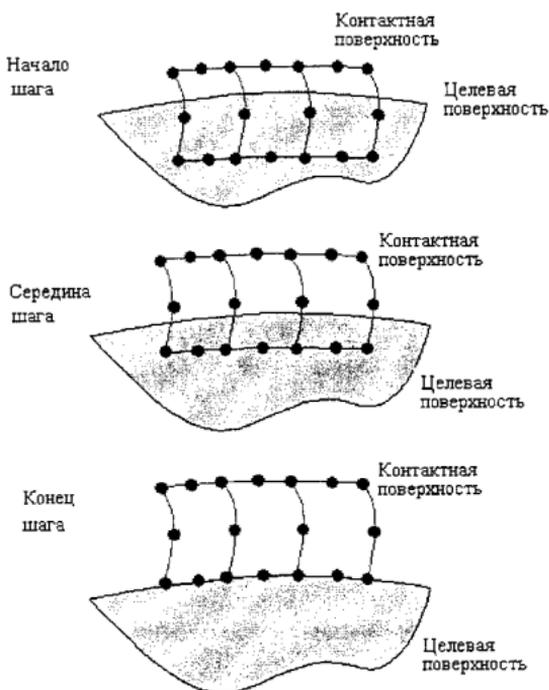


Рис. 19. Поэтапное начальное проникновение (Ramping initial interference)

#### 4.9.8. Определение контактного статуса и области поиска контакта (Pinball Region)

Положение и движение контактных элементов относительно соответствующих им целевых элементов определяет статус контактных элементов. ANSYS отслеживает каждый контактный элемент и устанавливает его статус:

- STAT = 0      Открытый дальний контакт
- STAT = 1      Открытый ближний контакт
- STAT = 2      Скользящий контакт
- STAT = 3      Жесткий (связанный) контакт

Контактный элемент считается в контакте ближнего поля, когда его контактные элементы входят в pinball region – область поиска контакта, который имеет центр в интеграционной точке контактного элемента. Используйте реальную постоянную PINB для задания масштабного фактора (положительное значение PINB) или абсолютной величины (отрицательное значение PINB) для pinball region. По умолчанию, ANSYS определяет pinball region, как окружность для 2-D или сферу для 3-D радиусом равным четырехкратной (для жестко-податливого) или двукратной (для податливо-податливого) глубине подстилающего

элемента.

Следует заметить, что расход времени поиска контакта зависит от размера pinball region. Вычисления контактных элементов дальнего поля просто и требует мало вычислительных сил. Расчеты ближнего поля (для контактных элементов, которые близки или участвуют в контакте) медленны и большой сложности. Наибольшие сложные вычисления возникают, когда элементы находятся в действующем контакте.

Установка правильного размера области поиска контакта (pinball region) полезна для преодоления определения ложного контакта, если жесткая поверхность имеет несколько выпуклых областей. Однако, установка по умолчанию подходит для большинства контактных проблем.

#### 4.9.9. Проблема ложного контакта при симметричном контакте

В некоторых случаях симметричного контакта, включающих самоконтакт (то есть, контакт двух поверхностей одного и того же твердого тела) (*self-contact*), ANSYS может ложно воспринимать контакт между контактной и целевой поверхностью, которые имеют очень ограниченное геометрическое положение. Это обычно происходит в углах в задачах с самоконтактом. Это может произойти при начальном геометрическом положении элементов или при деформации в ходе анализа. Это происходит, когда две поверхности находятся в пределах зоны автоматического приведения к взаимодействию (pinball region) и угол между ними меньше, чем 90 градусов. При этих обстоятельствах ANSYS считает, что происходит очень большое проникновение. Рисунок 20 иллюстрирует такое состояние.

Вы можете предупредить ANSYS от учитывания такого ложного контакта установкой опции KEYOPT(8)=1 для элементов CONTA171 ... CONTA174. Когда эта опция KEYOPT используется, ANSYS будет игнорировать контакт "вне зоны проникания", который происходит в случаях:

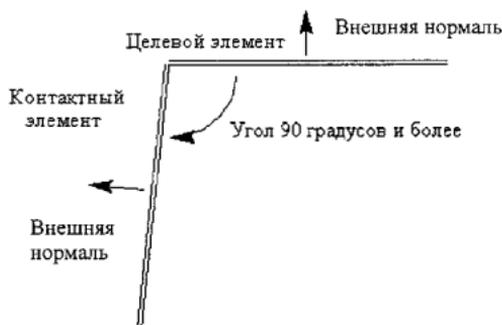
- Изначально заданное проникновение на 20% превышает допустимую контактную величину (FTOLN). Это изображается на рисунке 20a.
- Контактный статус внезапно изменяет состояние из далекого от контакта, смотрите рисунок 20a, в ситуацию перепроникания, показанную на рисунке 20b.

Если KEYOPT(8) активизирован, ANSYS будет Вас предупреждать, когда установит ложный контакт на каждом шаге нагрузки. Если ANSYS встретит такой контакт на первом шаге нагрузки, Вы увидите следующее сообщение об ошибке:

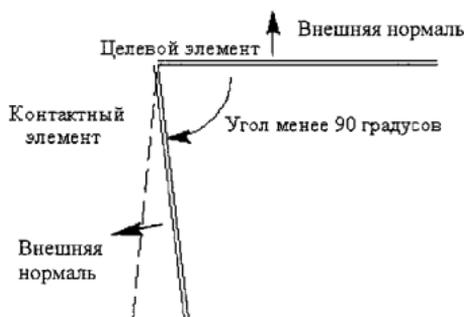
*"Contact element x has too much penetration related to target element y. We assume it (may be more elements) is spurious contact."*

Если ANSYS встретит внезапное изменение в контакте, которое он классифицировал как ложный контакт, Вы увидите следующее сообщение:

*"Contact element x status changed abruptly with target element y. We assume it (may be more elements) is spurious contact."*



а) Контакт не установлен



б) Контакт ошибочно установлен. Это может быть и благодаря начальному геометрическому положению, или деформации в ходе анализа. Если KEYOPT(8)=1, то такой контакт игнорируется.

Рис. 20. Определение ложного контакта

ANSYS выдает такое сообщение только один раз на шаг нагружения. Он не извещает Вас о дополнительных случаях ложных контактов, которые игнорируются в течение шага нагружки.

*Примечание* – Полезно проверить Вашу модель перед использованием опции KEYOPT(8)=1. ANSYS будет игнорировать реальный контакт, который удовлетворяет критерию гарантированного перепроникание (overpenetration). Этот технический прием должен быть использован только, когда изменение величины PINB (pinball region) не может предотвратить ложного контакта.

#### 4.9.10. Задание моделей (свойств) поверхностного взаимодействия

Контактные элементы "поверхность-поверхность" поддерживают обычные модели односторонних контактов, так же, как другие механические модели взаимодействия поверхностей. Используйте KEYOPT(12) для моделирования различных контактных свойств по-

верности.

- KEYOPT(12)=0 моделирует стандартный контакт; то есть нормальное давление равно нулю, если поверхности разделены.
- KEYOPT(12)=1 моделирует достаточно грубый фрикционный контакт, где отсутствует скольжение, как только произошел контакт. Этот случай соответствует бесконечному коэффициенту трения и игнорирует свойство материала MU.
- KEYOPT(12)=2 моделирует неразделяемый контакт ("no separation"), в котором целевая и контактная поверхности "сцепляются" (хотя проскальзывание допускается) для последующего анализа, как только контакт установлен, то есть после первого взаимодействия поверхности не могут разойтись.
- KEYOPT(12)=3 моделирует сковывающий контакт ("bonded"), в котором целевая и контактная поверхности "сцепляются" по всем направлениям для последующего анализа, как только контакт установлен.
- KEYOPT(12)=4 моделирует неразделяемый контакт, в котором контактные интеграционные точки или изначально находятся внутри pinball region, или, будучи активизированы в контакте, всегда прикрепляют контактную поверхность к целевой поверхности вдоль нормали к контактной поверхности, с тем, чтобы допустить скольжение. При подобранном FKOP (смотрите ниже), "weak spring" может использоваться для связывания областей вместе.
- KEYOPT(12)=5 моделирует сковывающий контакт, в котором контактные интеграционные точки, которые или изначально находятся внутри pinball region, или, будучи активизированы в контакте, всегда прикрепляют контактную поверхность к целевой поверхности вдоль нормали и в тангенциальных направлениях к контактной поверхности, с тем, чтобы допустить скольжение.
- KEYOPT(12)=6 моделирует сковывающий контакт, в котором контактные интеграционные точки, которые изначально находятся в контакте, будут оставаться принадлежащими целевой поверхности, и что контактные интеграционные точки, которые в начальный момент не были в состоянии контакта (open state), будут оставаться в этом состоянии в течении всего анализа. Эта опция работает почти подобно использованию SEINTF на областях, изначально находящихся в контакте.

Для моделирования или неразделяемого или сковывающего контакта, Вам необходимо установить величину реальной постоянной FKOP. Это обеспечивает приложение усилия, когда контакт открыт. Если FKOP есть положительная величина, то истинное усилие (жесткость) открытия контакта равно FKOP умноженной на контактную жесткость, когда контакт закрыт (то есть, для предотвращения открытия контакта, прикладывается усилие равное FKOP умноженное на усилие при закрытом контакте). Если FKOP есть отрицательная величина, то прикладывается абсолютное усилие (жесткость) открытия контакта. По умолчанию величина FKOP равна 1.

Неразделяемый и сковывающий контакты генерирует силу "pull back" ("оттаскивания", "отдергивания"), когда происходит раскрытие контакта, и эта сила не может полностью предотвратить разделения контактных поверхностей. Чтобы уменьшить разделение, задайте большое значение FKOP. Также в некоторых случаях разделение предполагается, в то время как соединение между контактирующими поверхностями требуется для предупреждения движения, как твердого тела. В таких ситуациях, Вы можете задать маленькое значение FKOP, чтобы сохранить связь между контактирующими поверхностями (это и есть эф-

факт "weak spring").

#### 4.9.11. Моделирование контакта с суперэлементом

Контактные элементы "поверхность-поверхность" могут моделировать контактирование жесткого тела (или одного линейно-упругого тела) с еще одним линейно-упругим телом, испытывающая малые движения. Эти упругие тела могут моделироваться с использованием суперэлементов, которые значительно уменьшают число степеней свободы, включаемые в контактную итерацию. Помните, что любой из контактных или целевых узлов должен быть одновременно мастер-узлом суперэлемента.

Так как суперэлемент состоит только из группы оставшихся узловых степеней свободы, он не имеет геометрии поверхности, на которой бы программа ANSYS могла определить контактную и целевую поверхность. Поэтому контактная и целевая поверхность должна быть определена на поверхности исходных элементов, прежде чем они будут объединены в суперэлемент. Информация, забираемая из суперэлемента, включает в себя узловые связи и скомпонованную жесткость, но не свойства материала или напряженное состояние (осесимметричное плосконапряженное или плоскодеформированное). Одно ограничение состоит в том, что набор свойств материалов, используемых для контактных элементов, должен быть одним из таких же, какой используется для исходных элементов, перед тем как они были включены в суперэлементы.

Используйте KEYOPT(3) для ввода этой информации в контактный анализ. Для 2-D элементов (CONTA171, CONTA172), имеются следующие ключевые опции:

- Суперэлементы не используются (KEYOPT(3)=0).
- Осесимметричный (KEYOPT(3)=1).
- Плоскодеформированный или плосконапряженный с единичной толщиной (KEYOPT(3)=2).
- Плосконапряженный с вводимой толщиной (KEYOPT(3)=3). Отметим, что в этом случае используют реальную константу R2 для задания толщины.

Для трехмерных элементов CONTA173 и CONTA174 опция KEYOPT(3) игнорируется. ANSYS будет автоматически устанавливать, какой подлежащий элемент является суперэлементом.

#### 4.9.12. Учет эффекта толщины

Вы можете учесть толщину оболочек (2-D и 3-D) и балок (2-D), используя KEYOPT(11). Для жестко-податливого контакта ANSYS будет автоматически изменять контактную поверхность на верхнюю или нижнюю поверхность оболочки (балки). Для податливо-податливого контакта ANSYS будет автоматически изменять или контактную или целевую поверхности, которые принадлежат элементам оболочки (балки). По умолчанию, программа ANSYS не принимает в расчет толщину элемента, балки и оболочки дискретизируются в их срединной поверхности, и дистанция проникновения рассчитывается для срединной поверхности. Когда Вы вводите KEYOPT(11)=1 для учета толщины балки или оболочки, дистанция контакта рассчитывается или от верхней или от нижней поверхности, как указывалось ранее в разделе 4.2. "Шаги в контактном анализе". Во время построения Вашей геометрической модели, если Вы собираетесь принимать в расчет толщину, помните сдвиги, которые производятся от контактной или целевой поверхностей, или от обеих. Когда Вы задаете контактный сдвиг (CNOF) вместе с установкой KEYOPT(11)=1, он относится к верху или низу оболочки (балки), но не к ее середине. При использовании элемента

SHHELL181 изменение толщины в ходе деформации также принимается в расчет.

Когда Вы строите Вашу геометрическую модель, Вы должны принять в расчет ее толщину, помня о сдвиге, который должен производиться или от контактной, или от целевой поверхности, или от обоих.

#### 4.9.13. Использование управлением шага по времени

Управление шагом по времени – это автоматическое средство контроля за этим шагом, которое определяет, когда статус контактного элемента изменяется, и соответственно изменяет текущий шаг. Используйте KEYOPT(7) для того, чтобы активизировать одну из четырех опций выбора шага, где KEYOPT(7)=0 отключает управление, а KEYOPT(7)=3 обеспечивает наибольший контроль.

- ◆ KEYOPT(7)=0: нет управления. Не производится предсказания размера шага по времени. Эта установка соответствует большинству анализируемых задач, когда автоматический выбор шага активизирован и допускается маленький размер шага по времени. (Грубо говоря, просто задается маленький шаг.)
- ◆ KEYOPT(7)=1: размер шага делится пополам, если слишком большое проникновение происходит во время итерации, или драматически изменяется контактный статус.
- ◆ KEYOPT(7)=2: Предсказывается приемлемое приращение для следующего подшага.
- ◆ KEYOPT(7)=3: Прогнозируется минимальное приращение для следующего подшага.

#### 4.9.14. Использование опции смерти и рождения

Элементы контакта "поверхность-поверхность" и целевые элементы допускают смерть и рождение, а также соответствующий статус смерти и рождения подстилающих их элементов. Элементы могут быть удалены для части анализа и затем восстановлены на последующей стадии. Это свойство полезно при моделировании процессов металлоштамповки, где многочисленные жесткие целевые поверхности вступают во взаимодействие с контактной поверхностью на различных стадиях анализа. Моделирование отпружинивания часто требует удаления жесткого инструмента в конце процесса. Эта опция не может использоваться с "неразделяемым" или сковывающим контактом.

### 4.10. Управление движением жесткой целевой поверхности (только для жестко-податливого контакта)

Жесткая целевая поверхность определяется своей начальной конфигурацией, и движение поверхности затем определяется связанным с ней "пилотным" узлом (или различными узлами, если "пилотный" узел не определен).

Вы должны использовать "пилотный" узел в любой из следующих ситуаций, чтобы управлять граничными условиями (и движением) целевой поверхности:

- Целевая поверхность подвергается действию прикладываемых сил.
- Целевая поверхность подвергается действию вращения.
- Целевая поверхность соединяется с другими элементами (то есть, элементом массы)

### MASS21).

- Движение целевой поверхности регулируется некоторым выражением (уравнением) (equilibrium condition).

Степени свободы, описывающие движение целевой поверхности, включают два направления перемещения и одну степень вращения для двумерного случая, и три перемещения и три вращения для трехмерного. Вы можете приложить граничные условия (перемещения, начальную скорость), нагрузки, вращения и так далее к "пилотному" узлу. Чтобы снабдить массой твердое тело, задайте массовый элемент (MASS21) в "пилотном" узле.

Помните о следующих ограничениях для целевой поверхности, когда используете "пилотный" узел:

- Каждая целевая поверхность может иметь только один ведущий узел.
- Программа ANSYS игнорирует все граничные условия на других узлах, кроме ведущего.
- Только ведущий узел может устанавливать связь с другими элементами. Если Вам необходимо присоединить жесткую поверхность к другому элементу, Вы должны использовать для этого ведущий узел.
- Вы не можете использовать ограничивающие уравнения (CE) или узловое связывание (node coupling) (CP) для управления степенью свободы целевой поверхности, когда ведущий узел определен. Если вы хотите приложить некоторую нагрузку или ограничения на жесткую целевую поверхность, Вы должны определить ведущий узел и приложить нагрузки к этому узлу. Если Вы не используете ведущий узел, то Вы можете иметь только движение как твердого тела.



Пилотный узел может быть одним из узлов, принадлежащих целевому элементу, или произвольно расположенным узлом. Тем не менее, он не должен быть узлом, принадлежащим контактному элементу. Местоположение пилотного узла важно только тогда, когда прикладывается вращательная или моментная нагрузка. Для каждого пилотного узла, ANSYS

будет автоматически определять внутренний узел (internal node) и внутреннее уравнение связи. Вращательная степень свободы пилотного узла связывается с поступательной степенью свободы внутреннего узла путем внутреннего уравнения связи.

По умолчанию, KEYOPT(2)=0 для целевого элемента, ANSYS проверяет граничные условия для каждой целевой поверхности. Если все соответствующие условия удовлетворяются, тогда ANSYS трактует соответствующие степени свободы целевых узлов, как фиксированные:

- Имеются неявные граничные условия или предписанные силы для узлов целевой поверхности.
- Узлы целевой поверхности не соединяются с другими элементами.
- Ни ограничивающие уравнения, ни узловые связи не используются для ограничения таких узлов.

В конце каждого шага нагрузки, программа ANSYS снимает (освобождает) ограничивающие условия, которые ставятся внутренними.

Ограничивающие условия, сохраняемые в файле результатов (Jobname.RST) и файле базы данных (Jobname.DB), могут быть модернизированы благодаря этой переменной. Вы должны внимательно проверить, какие текущие условия-ограничения полагаются перед рестартом анализа или новым решением проблемы в интерактивном режиме.

Если Вы хотите, Вы можете управлять ограничивающими условиями для целевых узлов, установите KEYOPT(2)=1 при определении целевых элементов.

#### 4.11. Моделирование теплового контакта

Вы можете использовать контактные элементы "поверхность-поверхность" в комбинации с термостойкими твердотельными элементами совместного анализа для моделирования процесса переноса тепла, которое происходит на контактной поверхности. Чтобы активировать и прочностные и тепловые степени свободы, установите опцию KEYOPT(1)=1. Программа поддерживает следующие тепловые контактные свойства:

- Теплопроводность между двумя контактирующими поверхностями.
- Тепловая конвекция "свободной поверхности" (поверхности открытого контакта) или между двумя поверхностями открытого контакта с маленьким зазором (конвекция "ближнего поля").
- Тепловой радиационный обмен "свободной поверхности" (поверхности открытого контакта) или между двумя поверхностями открытого контакта с маленьким зазором (радиация "ближнего поля").
- Генерация тепла благодаря трению.
- Внешний тепловой поток.

#### Поведение теплового контакта в зависимости от контактного статуса

Каждая контактная пара может содержать одно или несколько черт теплового контактного поведения. Каждое из них активизируется в зависимости от контактного состояния:

**Закрытый контакт:** контактная теплопроводность передает тепло между двумя контактирующими поверхностями.

**Трение скольжения:** энергия диссипации трения генерируется и на контактной и на целевой поверхностях.

**Контакт ближнего поля:** конвективный и радиационный тепловой обмен между контактной и целевой поверхностями. Внешний тепловой поток воздействует на контактную поверхность.

**Свободная контактная поверхность:** конвективный и радиационный тепловой обмен между контактной поверхностью и внешней средой. Внешний тепловой поток воздействует и на контактную, и на целевую поверхности.

## Свободная тепловая поверхность

Если Вы желаете моделировать конвективный или радиационный теплообмен на свободной поверхности, или поверхность с заданным не ней тепловым потоком, то Вы можете установить опцию свободной тепловой поверхности. Свободная тепловая поверхность может быть контактной поверхностью, не связанной с целевой поверхностью (то есть контактной паре недостает целевых элементов). Вы также можете установить опцию KEYOPT(3)=1 целевого элемента для определения тепловой свободной поверхности. Когда установлена эта опция KEYOPT, конвекция и радиация свободной поверхности принимаются во внимание, пока контакт находится в открытом состоянии. Следует помнить, что в этом случае не происходит ни конвективного, ни радиационного теплообмена между контактной и целевой поверхностями.

## Температура целевой поверхности

Для проведения анализа с учетом теплопроводности в контакте, конвективного и радиационного теплообмена "ближнего поля" требуется определение температуры контактной и целевой поверхности. Температура в точке пересечения целевой поверхности и нормали к точке установленного контакта представляет целевую температуру (или температуру целевой поверхности, смотрите рисунок 21). Если у жесткой целевой поверхности существует "пилотный" узел, то задание температуры этого узла воспринимается программой, как температура всей поверхности.

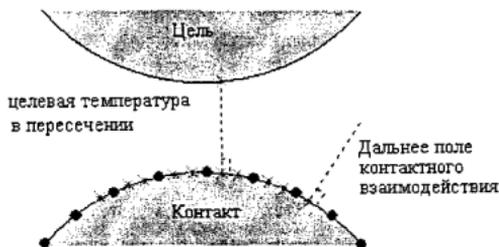


Рисунок 21. Температура целевой поверхности

## Моделирование теплопроводности

Чтобы включить механизм теплопроводности между контактной и целевой поверхностями, Вам необходимо задать коэффициент контактной теплопроводности TSS через таблицу реальных постоянных. Вы можете использовать табличный способ задания TSS, как функции контактного давления, температуры в точке контакта, времени и местоположения точки контакта (X, Y и Z, как табличных величин). Чтобы моделировать контактную теплопроводность между двумя поверхностями при имеющемся малом зазоре, используйте установку опции KEYOPT(12)=4 или 5 для задания скрывающего или неразделяемого контакта.

## Моделирование конвекции

Чтобы смоделировать конвективный теплообмен, Вы должны задать коэффициент конвекции CONV, используя команду SFE. CONV может быть постоянной величиной (допускается только единая величина) или табличной, как функция температуры, времени или местоположения. Для конвекции со свободной поверхности Вы должны указать температуру внешней среды (bulk temperature), используя команду SFE. Это же Вы можете выполнить, используя соответствующий путь-меню:

**Main Menu> Preprocessor> Loads> Apply> Convection> Uniform**

**Main Menu> Solution> Apply> Convection> Uniform**

## Моделирование радиационного теплообмена

Чтобы смоделировать радиационный перенос тепла, Вам необходимо задать следующие величины:

- В свойствах материала – степень черноты EMIS.
- В таблице реальных постоянных – постоянную Стефана-Больцмана SBCT. Если она не определена, то радиационный эффект исключается из рассмотрения.
- Сдвиг нуля используемой температурной шкалы (например, Фаренгейта или Цельсия) TOFFST относительно абсолютной. Это Вы можете выполнить, используя команду TOFFST или соответствующий путь-меню:

**Main Menu> Preprocessor> Loads> Analysis Options**

**Main Menu> Preprocessor> Material Props**

- Коэффициент радиационного поля зрения (Radiation view factor) RDVF, определяемый через реальную постоянную, используется только для ближнего поля радиационного теплообмена и по умолчанию равен 1. Он также может быть задан как функция температуры, величины зазора, времени и местоположения, используя табличную форму ввода данных. Для дальнего поля радиации, величина RDVF программой задается равной 1.0 и все пользовательские установки игнорируются. Для условий свободной поверхности признаются пользовательские установки RDVF.
- Температура окружающей среды. Она используется только для радиационного теплообмена свободной поверхности и задается командой SFE с полями KVAL=2 и CONV (это то же самое, что и температура внешней среды при моделировании конвекции со свободной поверхности).

## Моделирование выделения тепла вследствие контактного трения

Для того чтобы моделировать выделение тепла вследствие контактного трения, Вы должны выполнить совместный динамический термопрочностной анализ. Если Вы хотите, то Вы можете выключить динамический эффект для прочностных степеней свободы, используя команду TIMINT.STRUC,OFF. Однако, Вы должны включить переходный эффект для те-

пловой степени свободы. При этом требуется задание двух реальных постоянных:

- FHTG есть доля энергии диссипации вследствие контактного трения, превращающаяся в тепло (по умолчанию равна 1.0).
- FWGT есть доля тепла, выделяющегося на контактной поверхности (по умолчанию равна 0.5).

### Моделирование внешнего теплового потока

Вы можете приложить к контактным элементам нагрузку в виде теплового потока, используя команду SFE. Программа допускает приложение только одинакового теплового потока. Нагрузка в виде теплового потока не может быть приложена к целевым элементам. Однако, для поля ближнего контакта, внешний тепловой поток, падающий на контактные элементы, будет воздействовать и на целевые.

Для свободной тепловой поверхности, если опция KEYOPT(3) целевого элемента равна 1, нагрузка внешним тепловым потоком прикладывается к контактной стороне. Следует отметить, что к контактному элементу может быть приложен один из видов нагрузки, или CONV или HFLUX, но не оба вместе. Тем не менее, Вы можете определить две различных контактных пары: одна будет моделировать конвекцию, а вторая – тепловой поток.

## 4.12. Приложение граничных условий к деформируемым элементам

Теперь Вы можете приложить любые необходимые граничные условия, как Вы это делаете в любом другом анализе ANSYS. Более подробную информацию о приложении граничных условий, смотрите в соответствующем описании в начальных главах этого руководства.

## 4.13. Задание опций решения и шагов нагружения

Поведение сходимости контактной задачи сильно зависит от индивидуальной проблемы. Ниже приведены типичные рекомендуемые опции для большинства анализируемых контактов "поверхность-поверхность". Смотрите *ANSYS Commands Reference* для уточнения деталей.

Размер "временного" шага должен быть достаточно маленьким, чтобы захватить истинную контактную зону. Плавный перенос контактных сил претерпевает разрывы, если временной шаг слишком большой. Временной шаг задается числом подшагов или собственным своим размером. Следующие команды управляют этими параметрами:

Command(s): NSUBST

GUI:           Main Menu> Preprocessor> Loads> Time/Frequenc> Freq and Substps  
                   Main Menu> Preprocessor> Loads> Time/Frequenc> Time and Substps  
                   Main Menu> Solution> Sol'n Control: Basic Tab  
                   Main Menu> Solution> Unabridged Menu> Time/Frequenc> Freq and Substps  
                   Main Menu> Solution> Unabridged Menu> Time/Frequenc> Time and Substps

Command(s): DELTIM

GUI:           Main Menu> Preprocessor> Loads> Time/Frequenc> Time - Time Step  
                   Main Menu> Solution> Sol'n Control: Basic Tab  
                   Main Menu> Solution> Unabridged Menu> Time - Time Step

*Примечание* – Надежным путем, чтобы установить точный размер временного шага, является включение автоматического определения его размера.

Следующие опции вызываются автоматически, но могут быть заблокированы, если это необходимо.

Command(s): AUTOTS,ON

GUI:           Main Menu> Solution> Sol'n Control: Basic Tab  
                   Main Menu> Solution> Unabridged Menu> -Load Step Opts-  
                   Time/Frequenc> Time & Time Step/ Time & Substeps

Если статус контакта изменяется в ходе итерационного процесса, может иметь место разрыв. Чтобы избежать слабой сходимости и использовать уточненную матрицу жесткости, установите опцию Ньютона-Рафсона на FULL.

Command(s): NROPT,FULL,,OFF

GUI: **Main Menu> Solution> Analysis Options**

Также не используйте метод адаптивного понижения. Адаптивное понижение обычно не оказывает помощи в приложениях с контактными проблемами "поверхность-поверхность", и мы рекомендуем выключить его.

В случаях, когда доминирует скольжение с трением, установите опцию несимметричного решателя (**NROPT,UNSYM,,OFF**), чтобы избежать медленной сходимости или расхождения.

Установите соответствующее число равновесных итераций для приемлемого размера шага по времени. По умолчанию программа выбирает от 15 до 26 итераций.

Command(s): **NEQIT**

GUI: **Main Menu> Solution> Sol'n Control: Nonlinear Tab**  
**Main Menu> Solution> Unabridged Menu> -Load Step Opts- Nonlinear>**  
**Equilibrium Iter**

Так как итерации имеют тенденцию становиться нестабильными для больших приращений, используйте опцию линейного поиска для стабилизации расчетов.

Command(s): **LNSRCH**

GUI: **Main Menu> Solution> Sol'n Control: Nonlinear Tab**  
**Main Menu> Solution> Unabridged Menu> -Load Step Opts- Nonlinear>**  
**Line Search**

Включите опцию предсказатель-корректор (predictor-corrector), за исключением случаев больших поворотов или динамического анализа.

Command(s): **PRED**

GUI: **Main Menu> Solution> Sol'n Control: Nonlinear Tab**  
**Main Menu> Solution> Unabridged Menu> -Load Step Opts- Nonlinear>**  
**Predictor**

Многие неудачи в сходимости в контактном анализе являются результатом использования слишком большой величины контактной жесткости (реальная постоянная FKN). Непременно следуйте рекомендациям данным ранее в этой главе для оценки жесткости контакта.



Для большинства задач с малыми деформациями, малыми перемещениями, малым скольжением можно установить **NLGEOM,OFF**. Эта установка увеличит скорость времени поиска решения; тем не менее, если контактная задача вызывает большие скольжения, установите **NLGEOM,ON**.

## 4.14. Решение задачи

Вы можете сейчас приступить к анализу так же, как делали это в нелинейном анализе, но при этом помните несколько наставлений, которые позволят Вам избежать некоторых проблем:

- Всегда проверяйте наборы реальных постоянных, которые относятся к контактному параметру, и проверяйте ограничивающие условия на целевых поверхностях. Любой предварительный "испытательный" запуск ("trial runs") может изменить установки.
- Всегда проверяйте статус целевой поверхности в начале анализа. Если Вы установили неожиданный зазор (или отсутствие контакта) или переоценили проникновение, прервите анализ и затем проверьте Вашу геометрическую модель.
- Всегда внимательно проверяйте Ваши результаты, используя стандартные инженерные методы.

Следуйте этим шагам для решения Вашего контактного анализа:

1. Сохраните резервную копию базы данных в именном файле.

Command(s): **SAVE**

GUI: **Utility Menu> File> Save As**

2. Запустите процесс решения.

Command(s): **SOLVE**

GUI: **Main Menu> Solution> -Solve- Current LS**

3. Если необходимо, определите многошаговую нагрузку. Для более подробной информации смотрите главу 8 *Nonlinear Structural Analysis*, ранее в этом руководстве. Так как база данных контакта и условия ограничения изменяются в ходе стадии решения, Вы должны сохранить резервную копию измененной базы данных после каждого шага нагрузки. Этот шаг необходим, если Вы предполагаете произвести рестарт.

4. Выйдите из решателя SOLUTION.

Command(s): **FINISH**

GUI: **Close the Solution menu**

Если Вы производите повторный старт контактной задачи, то следуйте обычной процедуре рестарта, как описано в главе 3 *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide*. Тем не менее, имейте в виду, что ограничивающие условия для целевой поверхности могут быть установлены внутренне. Внимательно проверьте ограничения перед рестартом анализа. К тому же, только реальные постоянные FKN, FTOLN, PINB и FKOP могут быть изменены в ходе фазы рестарта.

## 4.15. Просмотр результатов

Результаты контактного анализа содержат главным образом перемещения, напряжения, деформации, силы реакции и контактную информацию (то есть, контактное давление, скольжение и так далее). Вы можете просмотреть эти результаты в POST1, основном пост-процессоре, или в POST26, временном постпроцессоре. Для результатов, относящихся к контакту, Вы можете выбрать CONT, как визуализируемый или рассчитываемый объект. Смотрите раздел "Выходные данные" в описаниях элементов (глава 4 *ANSYS Elements Reference*) об имеющихся выходных компонентах.

Напомним, что в POST1 можно просматривать результаты в определенные моменты времени, которые были записаны в файл *Jobname.RST* (с помощью команды **OUTRES** Вы можете задать подшаги, в которых сохраняются результаты в *Jobname.RST*.), в остальные моменты времени программа предоставляет линейную интерполяцию результатов. Обычная последовательность действий в постпроцессоре POST1 приведена ниже.

### 4.15.1. Некоторые напоминания

- Чтобы просмотреть результаты в POST1, база данных должна содержать ту же самую модель, для которой были рассчитаны результаты.
- Должен иметь место файл результатов (*Jobname.RST*).

### 4.15.2. Просмотр результатов в POST1

1. Проверьте в вашем выходном файле (*Jobname.OUT*), сошелся ли анализ на всех шагах нагрузки.
  - ◆ Если нет, то Вы, вероятно, не захотите входить в постпроцессор иначе затем, чтобы определить, почему решение разошлось.
  - ◆ Если Ваше решение сошлось, то продолжите просмотр.
2. Войдите в POST1. Если ваша модель в настоящий момент не находится в базе данных, загрузите ее, используя **RESUME**.

Command(s): **/POST1**

GUI: **Main Menu> General Postproc**

3. Прочитайте результаты из желаемого шага или подшага нагрузки, который Вы можете идентифицировать по номеру или времени.

Command(s): **SET**

GUI: **Main Menu> General Postproc> -Read Results- load step**

4. Визуализируйте результаты, используя одну из следующих опций:

Графическое отображение формы деформации:

Command(s): **PLDISP**

GUI: **Main Menu> General Postproc> Plot Results> Deformed Shape**

### 4.15.3. Графическое отображение результатов с цветовой заливкой

Command(s): **PLNSOL, PLESOL**

GUI: **Main Menu> General Postproc> Plot Results> -Contour Plot- Nodal Solu**  
или **Element Solu**

Используйте эти опции для отображения контуров напряжений, деформаций или любых других интересующих объектов. Если Вы имеете соседствующие элементы с различным поведением материалов (такое как присутствие пластических или мультилинейных упругих свойств материалов, различные типы материалов, или соседствующие деактивированные и активные элементы), Вы должны позаботиться, чтобы избежать ошибок осреднения узловых напряжений в Ваших результатах. Селектируйте логику (описывается в *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide*), обеспечивающую способ избегания таких ошибок.

Следующая таблица показывает различные опции CONT для команд **PLNSOL** и **PLESOL**.

CONT	STAT	Контактный статус. 3 – закрытый и сцепленный, 2 – закрытый и скользящий, 1 – открытый, но "близкий" контакт, 0 – открытый, но не "близкий" контакт
"	PENE	Контактное проникновение
"	PRES	Контактное давление
"	SFRIC	Напряжение контактного трения
"	STOT	Общее контактное напряжение (давление плюс трение)
"	SLIDE	Дистанция контактного скольжения (contact sliding distance)
"	GAP	Дистанция контактного зазора
"	FLUX	Поток тепла через контактную поверхность



Вы можете установить эти опции, используя путь-меню: **Main Menu> General Postproc> Plot Results> -Contour Plot- Nodal Solu** или **Element Solu**. Выберите Contact для Item, Comp и Вы увидите подробный список опций.

Для жестко-податливого контакта или асимметричного податливо-податливого контакта, контактные элементы обеспечивают истинные давления и напряжения трения. Тем не менее, для симметричного податливо-податливого контакта истинное давление и напряжение трения есть осреднение давлений и напряжений трения по обеим сторонам контактных элементов.

Относительно графического вывода специфической контактной информации (CONT) следует иметь в виду следующее. Для 2-D контактного анализа, модель будет изображаться серым цветом, а требуемые величины будут графически выводиться, как эпюры вдоль ребра модели, где располагаются контактные элементы. Используйте FACT для масштабирования размера размаха эпюр. Для 3-D контактного анализа, модель будет изображаться серым цветом, а требуемые величины будут графически выводиться в виде контурной заливки по автоматически или пользовательски установленным диапазонам значений, как 2-D поверхности, только там, где *контактные* элементы покрывают поверхность модели.

Вы можете также графически отобразить результаты, используя возможности, доступные через элементные данные (смотрите команду **ETABLE** и описания элементов):

Command(s): **PLETAB**  
**PLLS**

GUI: **Main Menu> General Postproc> Element Table> Plot Element Table**  
**Main Menu> General Postproc> Plot Results> -Contour Plot- Line Elem Res**

Используйте команду **PLETAB** для графического представления результатов по элементам (со сглаживанием и без него) и **PLLS** для представления результатов по линейным элементам.

#### 4.15.4. Табличный вывод результатов

Command(s):

**PRNSOL** (узловые результаты)  
**PRESOL** (поэлементный вывод результатов)  
**PRRSOL** (реакции)  
**PRETAB**  
**PRINTER** (substep summary data), etc.  
**NSORT**  
**ESORT**

GUI:

**Main Menu> General Postproc> List Results> Nodal Solution**  
**Main Menu> General Postproc> List Results> Element Solution**  
**Main Menu> General Postproc> List Results> Reaction Solution**

Используйте команды **NSORT** и **ESORT** для сортировки данных перед их листингом.

Вы можете также получить список контактной информации при использовании метки **CONT** и его аргументов с командами **PRNSOL** или **PRESOL** или через соответствующие меню.

#### 4.15.5. Анимация

Вы можете также создать анимационную картину контактных результатов по времени:

Command(s): **ANTIME**

GUI: **Utility Menu> PlotCtrls> Animate> Over Time**

#### 4.15.6. Другие возможности

В постпроцессоре **POST1** имеется много других возможностей. Смотрите главу 5 *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide* для дополнительной информации. Комбинации вариантов нагрузок обычно неприменима для нелинейного анализа.

#### 4.15.7. Просмотр результатов в POST26

Вы можете также посмотреть во времени реакцию на нагрузку в нелинейном анализе, используя временной постпроцессор POST26. Используйте POST26, чтобы сравнить одну переменную ANSYS с другой. Например, Вы можете вывести график перемещений в узлах, соответствующих уровню приложенной нагрузки, или Вы можете распечатать пластические деформации в узле в соответствующее время. Обычная последовательность действий в POST26 представляет следующие шаги:

1. Проверьте в выходном файле (*Jobname.OUT*), получена ли сходимость решения во всех требуемых шагах. Вы не можете базироваться на не сошедшихся результатах.
2. Если Ваше решение сошло, войдите в POST26. Если Ваша модель не находится в настоящий момент в базе данных, загрузите ее командой **RESUME**.

Command(s): **/POST26**

GUI: **Main Menu> TimeHist Postpro**

3. Определите переменные, которые Вы собираетесь использовать в постпроцессоре. Команда **SOLU** будет заставлять записывать различные итерационные параметры и параметры сходимости в базу данных, откуда Вы сможете использовать их в постпроцессоре.

Command(s): **NSOL**  
**ESOL**  
**RFORCE**

GUI: **Main Menu> TimeHist Postpro> Define Variables**

4. Графическое отображение или печать переменных производится через команды:

Command(s): **PLVAR** (Графическое отображение переменных)  
**PRVAR**  
**EXTREM** (печать переменных)

GUI: **Main Menu> TimeHist Postpro> Graph Variables**  
**Main Menu> TimeHist Postpro> List Variables**  
**Main Menu> TimeHist Postpro> List Extremes**

#### 4.15.8. Другие возможности

В постпроцессоре POST26 имеется еще много других функций. Смотрите главу 6 *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide* для дополнительной информации.

## 5. Выполнение контактного анализа "узел-поверхность"

Вы можете использовать контактные элементы "узел-поверхность" для моделирования податливо-податливого или жестко-податливого контакта между поверхностью и узлом. Дополнительно, Вы можете использовать эти элементы для представления контакта между двумя поверхностями, моделируя одну поверхность, как группу узлов.

Контактные элементы "узел-поверхность" допускают следующие нелинейности:

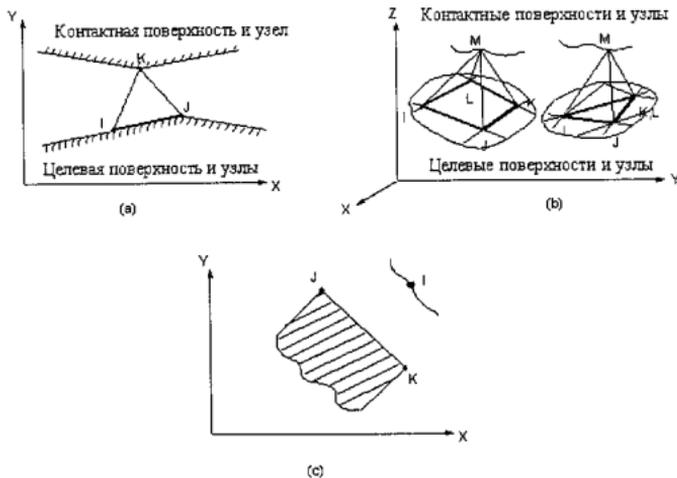
- Контактный анализ "поверхность-поверхность" с большими деформациями.
- Контакт и разделение.
- Скольжение с Кулоновым трением.
- Теплопередачу.

Контакт "узел-поверхность" есть явление, которое имеет место в большинстве инженерных приложений: крепеж (гайки, болты, заклепки, шпильки), металлоштамповка (metal forming), операции прокатки (rolling operations), схлестывание труб (dynamic pipe whip), и так далее. Инженеров интересуют напряжения, перемещения, силы и температурные изменения, которые происходят благодаря контактному взаимодействию.

### 5.1. Использование контактных элементов "узел-поверхность"

Контакт "узел-поверхность" представляются в программе ANSYS отслеживанием положения точек на одной поверхности (контактная поверхность) по отношению к линии или области другой поверхности (целевая поверхность). Программа использует контактные элементы, чтобы проследить относительное положение двух поверхностей. Контактные элементы могут быть треугольными, тетраэдральными или пирамидальными, где основание опирается на узлы целевой поверхности, а вершина в узле контактной поверхности.

Контактные поверхностные элементы – двумерный (CONTAC48, плоский и осесимметричный) и трехмерный (CONTAC49) – изображены на рисунке 22.



- (a) Двумерный контактный поверхностный элемент - CONTAC48
- (b) Трехмерный контактный поверхностный элемент - CONTAC49
- (c) Двумерный контактный поверхностный элемент - CONTAC26

Рисунок 22.

Эти контактные элементы есть конечные элементы, которые используют технику псевдоэлементов (*pseudo element*) для установления контакта "поверхность-поверхность". Они прикладывают соответствующие силы к узлам на обеих поверхностях с тем, чтобы учесть контакт и трение. Когда Вы активизируете их тепловую степень свободы, эти элементы могут также моделировать теплопередачу между контактирующими поверхностями. Множество обычных правил для конечных элементов здесь не применимо. Например, несколько контактных элементов могут располагаться в одном и том же месте (пространства); понятия соотношения размеров теряет смысл для контактных элементов.

Заметим, что если целевая поверхность является жесткой и задача двумерная, то Вы можете использовать CONTAC26, который детально описывается в конце этого раздела.

## 5.2. Шаги при выполнении контактного анализа "узел-поверхность"

Основные шаги для выполнения обычного контактного анализа "узел-поверхность" приведены ниже. Подробнее каждый шаг описан на следующих страницах.

1. Создание геометрической модели и выполнение сеточного разбиения.
2. Установление контактной пары.
3. Создание контактных элементов.
4. Установление ключевых опций элементов и реальных постоянных.
5. Приложение необходимых граничных условий.

6. Задание опций решения.
7. Решение.
8. Просмотр результатов.

### 5.2.1. Создание геометрической модели и сеточное разбиение

На этом шаге Вы создаете твердотельные объекты, которые представляют геометрию контактирующих тел. Задаете типы элементов, реальные постоянные, свойства материалов, как в любом виде анализа программы ANSYS. Производите сеточное разбиение областей и объемов соответствующими типами элементов, которые Вы выбрали ранее. Для более подробной информации смотрите *ANSYS Modeling and Meshing Guide*.

Command(s): AMESH  
VMESH

GUI: Main Menu> Preprocessor> Mesh> Mapped> 3 or 4 sided  
Main Menu> Preprocessor> Mesh> Mapped> 4 to 6 sided

Вы должны избегать элементов со срединными узлами, особенно трехмерных, так как эффективная жесткость ("effective stiffness") в узлах поверхности этих элементов очень неоднородна. Например, у 20-ти узлового твердотельного элемента **SOLID95**, угловые узлы имеют отрицательную жесткость, связанную с ним (the corner nodes have a negative stiffness associated with them). Несмотря на это, алгоритмы контакта "узел-поверхность" предполагают, что жесткость одинаково распределена по все поверхности, где происходит контакт. Это условие может приводить к сложностям сходимости, когда такие элементы используются в контакте.

Вы можете использовать срединные узлы на контактной поверхности только в двумерном анализе, используя **CONTAC48**, но не можете использовать их на целевой поверхности. Срединные узлы на целевой поверхности будут игнорироваться при генерации элементов **CONTAC48**, имея следствием неуравновешенный перенос сил на целевую поверхность.

### 5.2.2. Идентификация контактных пар

Вы должны установить, где контакт может происходить в ходе деформирования Вашей модели. Одновременно Вы должны определить потенциальные поверхности контакта, и снабдить их контактными элементами. Для более эффективного решения, с точки зрения затрат времени (CPU time), Вы должны стремиться максимально локализовать зону контактов, но, разумеется, Ваши зоны должны соответствовать всем возможным контактам.

В зависимости от геометрии модели (и потенциальной деформации), многочисленные целевые поверхности будут взаимодействовать с одной и той же контактной поверхностью. В этих случаях, Вы должны определить множество контактных пар.

Для каждой поверхности Вы создаете множество поверхностных узлов, имеющих свое название и именуемое компонентой (component).

Command(s): CM

GUI: Utility Menu> Select> Comp/Assembly> Create Component

Как описано в *ANSYS Modeling and Meshing Guide*, Вы можете затем использовать эти списки поверхностных узлов для генерации всех возможных контактных конфигураций между контактирующими поверхностями. Если Вы абсолютно уверены, что отдельные поверхно-

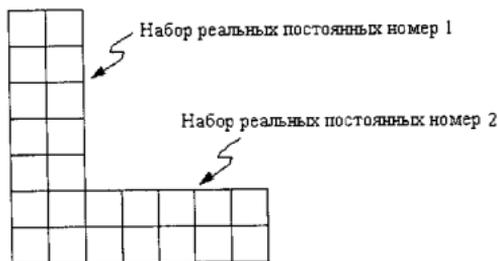
сти никогда не войдут в контакт, то Вы должны исключить их узлы из списка поверхностных узлов, но обычно более разумнее включить несколько больше узлов, чем Вы реально предполагаете необходимо.

### 5.2.3. Создание контактных элементов

Чтобы сгенерировать контактные элементы, Вы, во-первых, должны определить типы этих элементов. Для контакта "узел-поверхность" используйте **CONTAC48 (2-D)** и **CONTAC49 (3-D)**.

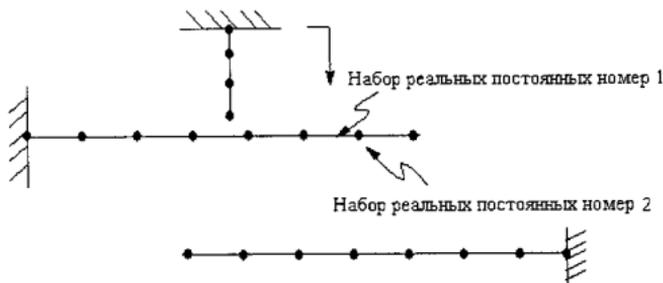
Command(s): ET

GUI: **Main Menu>Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete**



**Рисунок 23. Использование собственных наборов реальных постоянных REAL в угловом контакте**

После этого Вы должны определить реальные постоянные для этих контактных элементов. Каждая отдельная контактная область должна ссылаться на свой номер из таблицы реальных постоянных, даже если различные контактные области имеют одинаковые величины реальных постоянных. При использовании различных по номеру наборов реальных постоянных, Вы даете возможность программе сделать различие между верхним и нижним оболочечным контактом, или между другими особыми областями. Например, в угловом контакте каждая сторона должна иметь свои собственные реальные постоянные, как показано на рисунке 23. Другим типичным применением является двусторонний балочный контакт, как иллюстрируется на рисунке 24.



**Рисунок 24. Используйте собственные наборы реальных постоянных REAL в двусторонних балочных контактах**

Command(s): R  
RMODIF

GUI: Main Menu > Preprocessor > Real Constants

Следующим шагом Вы должны сгенерировать контактные элементы между соответствующими парами.

Command(s): GCGEN

GUI: Main Menu > Preprocessor > Create > Elements > Node to Surf

Ниже приводятся некоторые правила, которыми следует руководствоваться при создании контактных элементов "узел-поверхность":

- Число контактных элементов не должно превышать минимально необходимое для решения задачи их количество более чем в два-три раза. Используйте опции предельного радиуса ("limiting radius" – RADC) или числа генерируемых элементов ("number of elements to generate" – NUMC) для ограничения числа генерируемых контактных элементов. Увеличение в 10 или 100 раз числа элементов может увеличить на 100 и более процентов затрат времени, так же как и значительное увеличение требуемого дискового пространства.
- Контактные возможности "узел-поверхность" программы ANSYS распространяются на элементы без срединных узлов. Мы рекомендуем Вам не использовать для этих поверхностей элементы со срединными узлами.
- Для балочных и оболочечных элементов Вы должны указать, какая сторона элемента должна быть целевой поверхностью, используя опцию "target surface" (Tlab).
- Для искривленных (непланарных) сторон целевых элементов используйте опцию "Base shape" (Shape) (CONTAC49, для задания базовой формы, которая должна быть треугольной). Эта опция прекрасно создает целевую поверхность.
- Каждым шагом Вы генерируете контактные элементы между новой парой контактных поверхностей, определяя новый номер набора реальных постоянных, даже если значения контактных реальных постоянных не изменяются.

## Генерирование симметричных и несимметричных контактных элементов

Вы имеете опцию определения асимметричной или симметричной контактной модели. Определяя пару контактирующих поверхностей единственной командой **GCGEN**, Вы создаете асимметричную модель контакта. В этом случае, одна из поверхностей является контактной, а другая – целевой. В противном случае, Вы должны использовать две команды **GCGEN**, чтобы задать каждую поверхность и контактную, и целевую. Этот второй случай относится к моделированию симметричного контакта.

Например, рассмотрим две поверхности А и В. Поверхность А должна быть контактной поверхностью, а поверхность В целевой поверхностью – в одной команде **GCGEN**, с другой стороны контактная поверхность В и целевая поверхность А определяются во второй команде **GCGEN** (то есть, для случая симметричного контакта контактная пара строится в два "прохода": сначала создается обычная асимметричная пара – цель-контакт, а затем на ее базе обратная пара).

Ниже приведен пример ввода (фрагмент лог-файла) в препроцессоре создания контактных элементов:

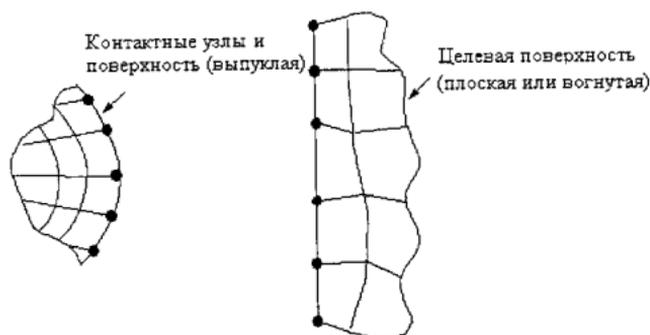
```

NSEL, S, NODE, . . .           ! Выделение набора узлов на контактной
                               ! поверхности
CM, CONTACT, NODE             ! Выделенные узлы формируют компоненту с
                               ! именем CONTACT
NSEL, S, NODE, . . .           ! Выделение набора узлов на целевой
                               ! поверхности
CM, TARGET, NODE              ! Выделенные узлы формируют компоненту
                               ! с именем TARGET
NSEL, ALL
GCGEN, CONTACT, TARGET        ! Генерируются контактные элементы
                               ! между контактной и целевой
                               ! поверхностями (асимметричный контакт)
GCGEN, TARGET, CONTACT        ! Заметим, что поверхности
                               ! переопределяются – эта вторая
                               ! команда GCGEN создает условия
                               ! симметричного контакта

```

В основном, моделирование симметричного контакта является привилегированным подходом, потому что он не требует специального предупреждения, какая поверхность является контактной, а какая – целевой. В противоположность, моделирование асимметричного контакта требует, чтобы Вы соблюдали следующие правила в различиях между двумя поверхностями:

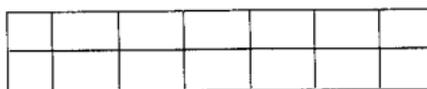
- Если область контакта одной поверхности является плоской или вогнутой, а другая поверхность является острым ребром или выпуклостью, то плоско/вогнутая поверхность должна быть целевой.



- Если обе контактирующие области плоские, то Ваш выбор произволен.



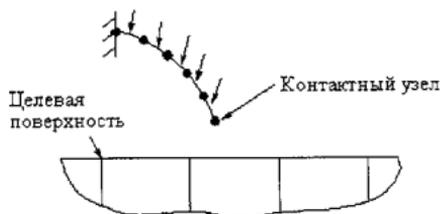
Произвольный выбор контактной и целевой поверхности



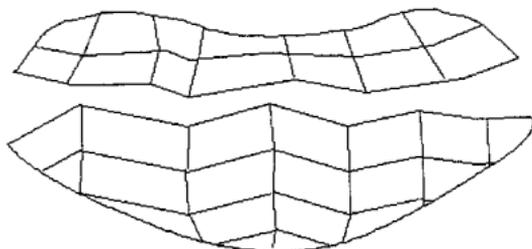
- Если обе контактирующих области выпуклые (но не имеют острых граней), то целевая поверхность должна быть более плоской.



- Если контактная область имеет острое ребро, а другая не имеет, то первая должна быть контактной поверхностью.



- Если обе контактных области имеют острые ребра, или если поверхности являются рифлеными (волнообразными, с противоположными выпуклостями и вогнутостями), то выбор целевой поверхности зависит от конфигурации поверхности после контакта. В таких случаях моделирование симметричного контакта обычно будет предпочтительней.



### Просмотр контактных элементов

После создания контактных элементов, они представляются как звездочки в узлах контактной поверхности, или как линии (2-D) или области (3-D) на узлах целевой поверхности на отображаемых элементах. Что не всегда удобно при дальнейшей работе.

Чтобы уничтожить эти символы на Вашем графическом изображении, Вы должны деселектировать контактные элементы из активного набора (но не забудьте обратно активизировать перед запуском на решение).

Command(s): **ESEL**

GUI: **Utility Menu> Select> Entities**

Вы можете "усушить" ("shrink"), как "шагреновую кожу", линии (области) целевых поверхностей, чтобы они разделились для большей наглядности.

Command(s): **/SHRINK**

GUI: **Utility Menu> PlotCtrls> Style> Size and Shape**

Чтобы визуализировать графически, какие контактные узлы связаны с какой целевой по-

верхностью, выделите ограниченный поднабор контактирующих узлов и затем перестройте изображение. Если Вы хотите увидеть "в реальности" контактные элементы, временно измените тип контактного элемента (TYPE) на геометрически совместимый стандартный элемент (такой как PLANE2) только для целей красивого графического изображения.

Command(s): **E PLOT**

GUI: **Utility Menu> Plot> Elements**

### Проблемы начального контактного взаимодействия с перекрытием

Вы можете моделировать применение начального контакта (такого как анализ горячей посадки) путем геометрического перекрытия частей несколькими различными путями:

- Вы можете моделировать реальную историю нагревания элементов, которые остаются "притертыми" при температурном сжатии, можно, приведя их в исходное (до нагревания) состояние, и потом постепенно заставляя их сжиматься, увеличивая температуру по шагам и решая каждый раз задачу о статическом нагружении.
- Вы можете генерировать модель с частями, уже находящимися в контакте. То есть, Вы генерируете все части в их начальной недеформированной геометрии, так что элементы действительно перекрывают друг друга. При таком подходе, Вы анализируете прочность, используя единственный шаг нагрузки, с включением схемы линейного поиска. Для многих случаев анализа взаимодействия, считается, что эта опция требуется для сходимости.

Command(s): **LNSRCH,ON**

GUI: **Main Menu> Preprocessor> Loads> Nonlinear> Line Search**

- Вы можете создать модель с уже находящимися в контакте частями, используя незначительную начальную величину для нормальной контактной жесткости (реальная постоянная KN). Вы затем постепенно увеличиваете величину KN, чтобы достигнуть подходящего уровня, используя новые команды **R** в последующих шагах нагрузки. (Вы можете также явно определить наклон кривой жесткости, однако помните предыдущие предупреждения.)
- Если начальное перекрытие (interference) больше, чем длина обычного элемента целевой поверхности, Вам необходимо указать реальную постоянную PINB, чтобы она была несколько больше, чем проникание. Это будет гарантировать, что это начальное проникновение установится.

### 5.2.4. Задание опций элементных ключей и реальных постоянных

ANSYS использует набор из четырех ключевых опций и основных реальных постоянных для управления контактного поведения, при употреблении контактных элементов "узел-поверхность". Дополнительную информацию можно почерпнуть в индивидуальном описании элементов в главе 4 *ANSYS Elements Reference*.

#### Опции элементных ключей

CONTAC48 и CONTAC49 используют следующие ключевые опции:

- KEYOPT(1): Выберите правильный набор степеней свободы (с температурой TEMP,

или без нее).

- KEYOPT(2): Выберите или метод штрафов или штраф плюс метод Лагранжа.
- KEYOPT(3): Выберите модель трения: без трения, упругое Кулоново или жесткое Кулоново трение.
- KEYOPT(7): Выберите управление предсказания шага.

В соответствующих разделах назначение этих опций обсуждается более детально. Для дополнительной информации смотрите главу 4 *ANSYS Elements Reference*.

Command(s): **KEYOPT**  
**ET**

GUI: **Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete**

### Модели трения

Вам необходимо выбрать модель трения для Вашего анализа. Эти элементы поддерживают упругое и жесткое Кулоново трение. Упругое трение допускает или состояние сцепления или состояние скольжения. Зона сцепления трактуется как упругая зона с жесткостью КТ. Эта модель трения хороша для анализа, когда части контактирующих областей сцеплены и не скользят в ходе деформации. Жесткое Кулоново поведение допускает только трение скольжения; области контактов не могут сцепляться. Эта модель трения удовлетворительна только для анализа, когда две поверхности скользят соответственно одна по другой. Если движение останавливается или реверсируется, то Вы будете иметь сходящуюся задачу.

### Выбор метода контроля (метод штрафов, комбинация метода штрафов с методом множителей Лагранжа)

Выбор соответствующего метода контроля обеспечивает отсутствие проникания одной поверхности через другую более установленной величины. Это может быть выполнено при помощи метода штрафов, или метода штрафов в комбинации с методом множителей Лагранжа. В этом методе сила прикладывается к контактирующему узлу до тех пор пока его проникновение меньше, чем величина реальной постоянной TOLN.

### Термопрочностной контакт

Если два тела имеют два различных температурных состояния, то тепло будет перетекать между ними. Вы можете использовать эти контактные элементы "узел-поверхность" в комбинации с твердотельными элементами термопрочностного действия, для моделирования теплопроводного теплообмена, который происходит в этой ситуации. (Для анализа, в котором напряжения не важны, Вы можете моделировать неподвижные части Вашей системы стандартными тепловыми элементами.) При установках KEYOPT(1), как показано в таблице 2, и прочностные и тепловые степени свободы будут активизированы для этих элементов. (Вы должны также определить величину реальной постоянной COND, контактной проводимости, чтобы смоделировать тепловой перенос через контактную поверхность.)

Таблица 2. Типы элементов и установки опций KEYOPT для термopрочностного контакта

Размерность	Установка опции термopрочностного анализа контактного элемента	Установка опции совместного термopрочностного анализа твердотельных элементов
2-D	CONTAC48; KEYOPT(1)=1	PLANE13; KEYOPT(1)=4
3-D	CONTAC49; KEYOPT(1)=1	SOLID5; KEYOPT(1)=0 SOLID98; KEYOPT(1)=0

1. Для SOLID98 элементов, срединные узлы должны быть удалены с контактной поверхности.

### Предсказания контакта

CONTAC48 и CONTAC49 предполагают три опции для управления предсказаниями контакта:

- Не предсказывается: Полезен для большинства статических анализов, когда активирован автоматический шаг по времени и допускается маленький временной шаг. Бисекция автоматического выбора шага по времени будет уменьшать размер шага по времени до необходимой величины, если допускается достаточно малый шаг. Бисекция, тем не менее, не является эффективным путем случаев управления, когда необходимо предсказание. Предсказание временного шага может быть необходимо для проблем, которые имеют эпизодически контактирующие области в ходе процесса нагружения.
- Приемлемый временной шаг: Изменение в контактных предсказаниях делается, чтобы поддержать приемлемое приращение время/нагрузка. Эта опция полезна для статического анализа, где предсказатель шага по времени работает хорошо или динамического контакта с последовательным контактом (роллинговый контакт). Это линейное предсказание шага, может быть не эффективным, если положение точки контакта нелинейно зависит от времени. Часто, однако, из-за иных нелинейностей сохраняется низкое значение шага, так что линейная интерполяция через предыдущую точку будет обеспечивать хорошее предсказание.
- Предсказание: Предсказание производится, чтобы получить минимальное приращение время/нагрузка, всякий раз как происходит изменение состояния (статуса) контакта. Эта опция полезна для динамического контакта с ударом или перемежающихся контактов, или в случаях, когда вторая опция не срабатывает по причине линейного предсказателя. Для большей эффективности используйте предсказатель шага только для той группы контактных элементов, которые будут включаться в *начальный* контакт.

### Реальные постоянные

CONTAC48 и CONTAC49 используют следующие реальные постоянные:

- KN определяет нормальную контактную жесткость.
- KT определяет контактную жесткость сцепления.

- TOLN определяет максимальное допустимое проникновение.
- FACT определяет отношение статического и динамического трения.
- TOLS определяет малый допуск, который увеличивает (внутри алгоритма расчета) длину целевого объекта.
- COND определяет контактную проводимость.
- PINB определяет радиус зоны поиска контакта.

Эти опции обсуждаются более детально в следующих разделах, а также в описаниях элементов в *ANSYS Elements Reference*.

Command(s): R

GUI: Main Menu> Preprocessor> Real Constants

### Нормальная жесткость

Вам необходимо определить величину контактной жесткости, KN. (Это не производится по умолчанию.) KN должен быть достаточно большим, чтобы приемлемо ограничивать величину проникания, однако он не должен быть таким большим, чтобы не быть причиной неприятностей. Для большинства контактных задач Вы можете оценить величину KN как:

$$KN = f * E * h$$

где:

- f -- Коэффициент, назначаемый пользователем в зависимости от материалов, характера деформации и ряда других факторов. Этот множитель обычно лежит в интервале между 0.01 и 100; используя  $f = 1$ , Вы получаете хорошее стартовое значение.
- E -- Модуль Юнга (если Вы имеете контакт между различными материалами, соответственно используйте наименьшее значение E).
- h -- Характерная контактная "длина". Значение зависит от частной геометрии Вашей задачи:

В 3-D случае,  $h$  должно быть равно типовой длине целевого контакта (то есть, корню квадратному из площади целевой области) или обычному размеру элемента. Для большинства податливо-податливых проблем, Вы должны добиваться, чтобы средний размер элемента в зоне контакта был примерно равен средней длине целевого элемента. В ситуации, в которой последние значительно отличаются от типичного размера элемента, Вы должны использовать обычный размер элемента вместо  $h$ .

Для 2-D плоскодеформированного и плосконапряженного состояния без учета толщины положите  $h = 1$ , и  $h =$  "толщине" – для плосконапряженного с учетом толщины.

Для 2-D осесимметричного случая, положите  $h$  равным среднему радиусу места, где Вы ожидаете контакт.

Когда производится оценка очень податливой конструкции (обычно балочной или оболочечной модели), Вы должны вычислить местную контактную жесткость путем выполнения

расчета на обоих контактирующих телах, как показано на рисунке 25.

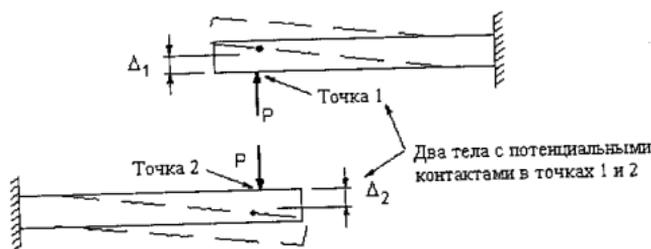


Рисунок 25. Расчет податливой жесткости для очень податливых структур

$$KN = P / (|\Delta_1| + |\Delta_2|)$$

где:

$P$  – точечная нагрузка в месте контакта (точки 1 и 2).

$\Delta_1, \Delta_2$  – узловые перемещения в точках 1 и 2.

В оценке  $KN$  используются действующие граничные условия (то есть,  $KN$  не является контактной жесткостью Герца; она принимает в расчет податливость полной структуры).

#### Жесткость сцепления (Sticking Stiffness)

Размер упругой зоны зависит от величины, которую Вы используете для жесткости сцепления (КТ). Как в случае с нормальной контактной жесткостью  $KN$ , Вы в идеале хотели бы использовать высокую жесткость сцепления, но не такую высокую, чтобы негативно действовать на сходимость. В общем считается, что жесткость сцепления КТ должна быть на 1, 2 или 3 порядка по величине меньше, чем нормальная жесткость  $KN$ .

Если Вы моделируете упругое Кулоново трение, программа будет использовать значение КТ, модуля жесткости сцепления. По умолчанию используется величина КТ ( $KT = KN/100$ ). Однако, как в случае с  $KN$ , если КТ слишком велико, Вас может постигнуть разочарование. Поэтому значение КТ по умолчанию не может удовлетворять во всех ситуациях.

#### Допуск проникания

Абсолютный допуск TOLN, применяемый в направлении нормали к поверхности, используется для определения: удовлетворяется ли допускаемое проникание, когда используется метод штрафных функций плюс метод множителей Лагранжа (KEYOPT(2)=1). Контактная совместимость принимается удовлетворительной, если контактирующие узлы в пределах зазора TOLN с той или другой стороны от целевой линии. Величина TOLN должна быть положительной и иметь размерность единицы длины.

TOLN обычно должно быть около 1% размера элемента на Вашей контактной поверхности. Если вы выбрали TOLN слишком маленьким, Вы затратите слишком много времени на сходимость решения. (Фактически, Ваше решение не сойдется практически никогда.)

## Отношение статического и динамического трения

Если  $KEYOPT(3)=0$ , трение между поверхностями не рассматривается и реальные постоянные  $KT$  и  $FACT$  не нужны. Коэффициент трения  $MU$  необходим, когда  $KEYOPT(3) = 1$  или 2. Он может быть задан, как функция температуры. Динамический коэффициент трения прямо использует  $MU$ , в то время как статический коэффициент есть  $FACT * MU$ .

## Целевая длина

Если Ваши контактные поверхности стремятся к линии узел-узел (line up node-to-node), или Ваша модель включает контакт, соседствующий с граничной симметрией, Ваше решение может иметь тенденцию к осцилляции, так как контактирующий узел перемещается туда-сюда между соседними элементами на целевой поверхности. Когда это происходит, время Вашего счета будет значительно увеличено. Чтобы избежать этих проблем, Вы можете задать величину реальной постоянной  $TOLS$ , которая создаст "буферную зону" на границе между двумя соседними элементами на контактной поверхности.  $TOLS$  вводится как процент от характерной длины контакта ( $h$ ). То есть, величина  $TOLS = 0.5$  будет создавать буферную зону с шириной 0.5% (0.005) контактной длины.

## Теплопроводность

Для случаев термического контакта, Вам необходимо определить величину контактной проводимости (реальная постоянная  $COND$ , имеющая размерность [Энергия/(Время\*Температура)], чтобы охарактеризовать проводимость через контактирующие части. Теплопроводность через контактирующие части обычно меньше, чем собственная теплопроводность контактирующих тел. Это уменьшение происходит вследствие микронеровности контактирующих поверхностей, которые допускают только малый процент контактной площади к истинному контакту тело-тело. Остальное контактное взаимодействие включает микроскопические пустоты, которые обычно проводят тепло намного хуже, чем тела.

Такая теплопроводность зоны контакта обычно не может характеризоваться теплопроводностью контактирующих тел. Для совершенного теплового контакта (не температурное падение через контактирующие части) Вы должны использовать большую величину  $COND$ : возможно порядка  $100kA/L$ , где  $k$  есть теплопроводность твердого тела, а  $A$  и  $L$  обычно есть площадь и длина элементов в контакте. Практически, Вы должны ввести очень маленькую величину  $COND$ , чтобы рассмотреть (принять в расчет) несовершенный тепловой контакт. (Консультируйтесь в надежных учебниках по стандартным значениям величин.) При использовании программы  $ANSYS$ , Вы должны отрегулировать величину  $COND$  вверх или вниз, как Вы делаете грубое – точное сеточное разбиение.

## Радиус области поиска контакта

Реальная постоянная  $PINB$  указывает радиус области поиска контакта ("pinball region"), который используется для определения, находится ли контактный узел вблизи контакта. По умолчанию, программа рассчитывает радиус области поиска ("pinball radius"), базируясь на размерах цели. Вы можете задать свой собственный радиус области, если начальное перекрытие в Вашей модели больше, чем целевая длина (иначе, это начальное перекрытие не будет обнаружено, так как оно находится вне зоны поиска). Вам так же необходимо указать его, если контактирующий узел переходит через целевую поверхность на расстояние большее, чем длина целевого элемента. Заметим, что слишком большой радиус будет увеличивать время контактного поиска.

### 5.2.5. Приложение необходимых граничных условий

Вы можете сейчас приложить любые необходимые граничные условия, как Вы это делаете в любом другом виде анализа ANSYS. Для дополнительной информации о прикладываемых граничных условиях смотрите описания соответствующих типов анализа в более ранних главах этого руководства.

Вы должны понимать, что если два тела теряют контакт в ходе анализа, то матрица жесткости становится сингулярной и неразрешимой (в статическом анализе). Эта ситуация происходит потому, что конечные элементы требуют по крайней мере некоторой жесткости соединения элементов друг с другом, чтобы предотвратить движение как твердого тела и ограничить перемещения. Если матрица жесткости становится сингулярной, то программа ANSYS будет выдавать предупреждения "*pivot ratio*". Она будет продолжать решать проблему, при этом Вы получите или сообщение о "*negative pivot*" (отрицательной главной диагонали) или сообщение о превышении предела степени свободы.

Попробуйте один из приведенных ниже предложений, чтобы преодолеть эти трудности:

- Постройте вашу модель в положении точного соприкосновения.
- Используйте вынужденные перемещения для переноса в эту позицию.
- Используйте слабые пружинки для соединения тел.
- Решите динамически проблему.

### 5.2.6. Задание опций решения

Поведение сходимости для контактных проблем прямо зависит от ее особенностей. Опции, перечисленные ниже, или типичны или рекомендуются для многих случаев контакта "узел-поверхность".

- Установите подходящий размер шага по времени, используя KEYOPT(7). Для дополнительной информации смотрите Раздел 5.2.4 "Предсказания контакта".
- Размер шага по времени должен быть достаточно маленьким, чтобы отобразить зону контакта. Плавный перенос контактных сил разрывается, если размер шага по времени слишком велик. Надежным путем для установления точного размера шага является включение его автоматического изменения в ходе расчета.

Command(s): AUTOTS,ON

GUI: Main Menu> Solution> -Load Step Opts- Time/Frequenc> Time & Time Step  
Main Menu> Solution> -Load Step Opts- Time/Frequenc> Time & Sub-steps

- Установите число равновесных итераций на величине, которая подходит к шагу по времени. При SOLCONTROL,ON, эта команда по умолчанию устанавливает от 15 до 26 итераций, в зависимости от проблемы.

Command(s): NEQIT

GUI: Main Menu> Solution> -Load Step Opts- Nonlinear> Equilibrium Iter

- Включите предсказатель-корректор, если Вы не предполагаете больших поворотов.

Command(s): **PRED**

GUI: **Main Menu> Solution> -Load Step Opts- Nonlinear> Predictor**

- Установите полный метод Ньютона-Рафсона – FULL, с адаптивным спуском.

Command(s): **NROPT,FULL,,ON**

GUI: **Main Menu> Solution> Analysis Options**

- Многие расхождения в контактном анализе есть результат использования слишком большой величины контактной жесткости (реальная постоянная KN). Непременно следуйте рекомендациям, данным ранее в этом разделе для начальной оценки контактной жесткости. Если такая оценочная величина приводит к расхождению, то уменьшите контактную жесткость и произведите рестарт. (Вы должны так же явно определить касательную жесткость, смотрите *Замечание* ниже.)
- Наоборот, если в Вашем контактном анализе происходит перепроникание, то это значит, что Вы назначили слишком маленькую величину KN. В этом случае увеличьте величину контактной жесткости до приемлемого уровня, и переопределите ее, используя команду **R** через отдельные шаги нагрузки в рестарте. (Вы можете так же явно определить тангенциальную жесткость, смотрите *Замечание* ниже.)

**Замечание:** Несмотря на то, что Вы можете изменить величину контактной жесткости (реальная постоянная KN), Вы не можете изменить никакой другой реальной постоянной между нагрузочными шагами. Поэтому, если Вы планируете изменить KN при рестарте (или от одного шага нагрузки к другому), Вы не можете позволить величине тангенциальной контактной жесткости ("sticking") (реальная постоянная KT) определяться по умолчанию, поэтому программа должна затем переопределить касательную жесткость по измененной контактной жесткости. Вы должны явно определять касательную жесткость всякий раз, когда Вы изменяете контактную жесткость, чтобы поддерживать согласованную величину касательной жесткости на протяжении всех шагов нагрузки.

### 5.2.7. Решение задачи

Вы можете сразу запустить на решение так же, как Вы это делали в нелинейном анализе.

Для этого выполните следующие шаги:

1. Сохраните резервную копию базы данных с отдельным именем.

Command(s): **SAVE**

GUI: **Utility Menu> File> Save As**

2. Запуск на решение.

Command(s): **SOLVE**

GUI: **Main Menu> Solution> -Solve- Current LS**

3. Если необходимо, определите шаги нагрузки. Более подробную информацию по этому поводу смотрите в главе 8, "*Nonlinear Structural Analysis*", этого учебника.

4. Закройте меню решателя SOLUTION.

Command(s): **FINISH**

GUI: **Выйдите из меню решателя**

### 5.2.8. Просмотр результатов

Результаты контактного анализа включают главным образом перемещения, напряжения, деформации, силы реакций и контактную информацию (то есть, контактное давление, скольжение и так далее). Вы можете просмотреть эти результаты или в главном постпроцессоре, POST1, или во временном постпроцессоре, POST26.

Конкретно, выходные величины этих элементов включают:

- Статус (STAT) и старый статус (OLDST) элемента: открыт (нет контакта); в контакте и сцепление; в контакте и скольжение. Сцепление = 1, скольжение = 2, открыт = 3 или 4.
- Зазор между двумя поверхностями (GAP). Если положителен, то поверхности разделены (STAT=3 или 4). Если отрицателен, то имеет место взаимное проникновение (STAT = 1 или 2).
- Нормальная сила  $F_n$  (FN).
- Сила скольжения  $F_s$  (FS). Компоненты сил трехмерного контакта также выводятся в системе координат поверхности (элемента).

Напомним, что в постпроцессоре POST1 одновременно может быть прочитан только результат из одного подшага решения, причем он должен быть записан в файле результатов *Jobname.RST* в ходе решения. (Опция шага нагрузки команды **OUTRES** задает, результаты каких подшагов сохраняются в файле результатов.) Обычная последовательность действий в постпроцессоре POST1 описывается ниже.

#### Напоминание

- Для просмотра результатов в постпроцессоре POST1, база данных должна содержать ту же модель, что и рассчитанное решение.
- Должен иметь место файл результатов (*Jobname.RST*).

#### Обзор результатов в POST1

1. Проверьте по выходному файлу (*Jobname.OUT*), имеется ли сходимость на всех шагах нагружения.
  - Если нет, Вы, вероятно, захотите войти в постпроцессор только для того, чтобы установить причину отсутствия сходимости.
  - Если Ваше решение сошло, то продолжите действия в постпроцессоре.
2. Войдите в POST1. Если Ваше модель не является текущей в базе данных, то выполните ее чтение командой **RESUME**.

Command(s): **/POST1**

GUI: **Main Menu> General Postproc**

3. Прочитайте результаты из желаемого шага нагрузки и подшага, который задается номером шага нагрузки или подшага или временем.

Command(s): **SET**

GUI: **Main Menu> General Postproc> -Read Results- load step**

4. Отобразите в графическом окне результаты, используя следующие опции. При этом важно проверить, что Вы задали все контактные области. То есть, на всех ли перекрывающихся частях модели задано контактное взаимодействие?

После отобразите на экране контактные области, чтобы проверить перекрытие. Если Вы не можете увидеть их, тогда контактные напряжения, вероятно, слишком малы. Распечатайте величины контактного проникновения (GAP), чтобы подробнее проверить, что величины проникновения приемлемы.

#### Отображение формы деформации

Command(s): **PLDISP**

GUI: **Main Menu> General Postproc> Plot Results> Deformed Shape**

#### Графическое отображение распределения величин

Command(s): **PLNSOL  
PLESOL**

GUI: **Main Menu> General Postproc> Plot Results> -Contour Plot- Nodal Solu  
Main Menu> General Postproc> Plot Results> -Contour Plot- Element Solu**

Используйте эти опции для графического отображения распределения напряжений, деформаций и других интересующих объектов. Отобразите в графическом окне распределение контактных напряжений и проверьте их гладкость. Градиент через любой подлежащий элемент не должен быть слишком резким. Если Вы имеете соседствующие элементы с различным поведением материалов (как, например, с пластическими или упругими мультимодальными свойствами материалов, с различными типами материалов, или соседствующие дезактивированные и активизированные элементы), Вы должны избежать ошибок осреднения узловых напряжений в Ваших результатах. Выбранная логика (описание в *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide*) обеспечивает среднее число, исключая такие ошибки.

Вы также можете отобразить данные по элементам и данные по линейным элементам:

Command(s): **PLETAB  
PLLS**

GUI: **Main Menu> General Postproc> Element Table> Plot Element Table  
Main Menu> General Postproc> Plot Results> -Conour Plot- Line Elem Res**

Используйте команду **PLETAB** для вывода на графический экран табличных данных по элементам и команду **PLLS** для вывода данных линейных элементов.

**Табличный вывод данных**

Command(s): PRNSOL (узловые результаты)  
 PRESOL (элементные результаты)  
 PRRSOL (реакции)  
 PRETAB  
 PRINTER  
 NSORT  
 ESORT

GUI: Main Menu> General Postproc> List Results> Nodal Solution  
 Main Menu> General Postproc> List Results> Element Solution  
 Main Menu> General Postproc> List Results> Reaction Solution

Используйте команды NSORT и ESORT для сортировки данных перед их табличным выводом.

**Анимация**

Вы также можете представить результат контактной задачи в виде анимации по времени.

Command(s): ANTIME

GUI: Utility Menu> PlotCtrls> Animate> Over Time

**Другие возможности**

В постпроцессоре POST1 имеется много других функций, например, представление результатов в виде графика вдоль выбранного пути и так далее. Для дополнительных деталей смотрите главу 5 *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide*. Комбинирование случаев нагружения обычно не действует в нелинейном анализе.

**Просмотр результатов в постпроцессоре POST26**

Вы можете также посмотреть отклик в зависимости от истории нагружения нелинейной структуры, используя постпроцессор POST26. Используйте POST26 для сравнения одной переменной ANSYS с другой. Например, Вы можете построить график перемещения в узле в зависимости от уровня нагрузки, или можете распечатать пластическую деформацию в узле в соответствующие моменты времени. Обычно в постпроцессоре POST26 принята следующая последовательность шагов:

1. Проверьте в выходном файле (*Jobname.OUT*), сошелся ли анализ на всех шагах нагружения. Вы не должны базировать свое решение на не сошедшихся результатах.
2. Если Ваше решение сошло, войдите в POST26. Если ваша модель не присутствует в текущей базе данных, прочитайте ее, выполнив RESUME.

Command(s): /POST26

GUI: Main Menu> TimeHist Postpro

3. Определите переменные для использования в вашей постпроцессорной сессии. Команда SOLU будет вызывать параметры различных итераций и сходимости, чтобы прочитать в базе данных, откуда Вы можете включить их в Вашу постпроцессорную процедуру.

Command(s): NSOL  
ESOL  
RFORCE

GUI: Main Menu> TimeHist Postpro> Define Variables

4. Графическое отображение и список значений переменных величин.

Command(s): PLVAR (graph variables)  
PRVAR  
EXTREM (list variables)

GUI: Main Menu> TimeHist Postpro> Graph Variables  
Main Menu> TimeHist Postpro> List Variables  
Main Menu> TimeHist Postpro> List Extremes

### Другие возможности

В постпроцессоре POST26 имеется много других функций. Для дополнительных деталей смотрите главу 6 *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide*.

### 5.2.9. Использование CONTACT6

Элемент CONTACT6 есть контактный элемент "узел-жесткая поверхность". Когда используется CONTACT6, Вы следуете тем же самым базовым процедурам, которые описываются выше со следующими дополнениями:

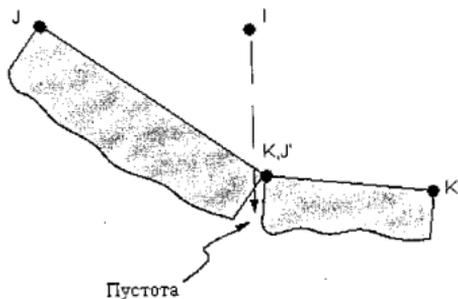
Во-первых, создайте жесткую целевую поверхность. Сохраните в памяти следующие моменты:

- Этот элемент определяется через три узла в глобальной плоскости X-Y и может использоваться в 2-D плосконапряженном, плоскодеформированном и осесимметричном анализе. Смотрите описание элемента в главе 4 *ANSYS Elements Reference*.

*Замечание* – CONTACT6 может использоваться в 3-D анализе, если только целевые узлы J-K лежат в общей плоскости X-Y. В этой конфигурации, жесткая целевая поверхность ведет себя, как если бы она расширялась бесконечно в положительном и отрицательном глобальном направлении Z.

- Узел I упоминается, как *контактный узел*, обычно связан с поверхностью конечно-элементной модели.
- Узлы J и K включают в себя целевую поверхность, которая принимает на себя роль закрепленной (grounded) поверхности. Заметим, что любая нагрузка, прикладываемая к этой целевой поверхности, не будет давать вклад в силы реакции.
- Форма цели может быть прямой, круговой выпуклой, или круговой вогнутой (задается через реальные постоянные).

- Пустоты будут происходить в контактной поверхности, когда форма поверхности, которая моделируется узлами J-K, будет или вогнутой или иметь разрывы. Потеря контакта может происходить, когда узел I двигается в одну из этих пустот. Смотрите рисунок 26.



**Рисунок 26. Потеря контакта при "проваливании"**

Затем создайте деформируемую контактную поверхность. Используйте только метод прямой генерации.

Command(s): E

GUI: **Main Menu> Preprocessor> Create> Elements> Thru Nodes**

Вы также должны управлять движением жесткой целевой поверхности. Если нет явных ограничений, то целевые узлы трактуются как фиксированные или закрепленные. Тем не менее, целевые узлы могут подвергаться движению как жесткое тело (то есть, они могут внедряться в податливую конечно-элементную модель). Целевые узлы, тем не менее, никогда не должны быть частью податливой конечно-элементной модели. Если установлено податливое движение между этими узлами, ANSYS выдает предупреждающее сообщение.

Остальные шаги такие же, как описывались для контактных элементов "узел-поверхность".

## 6. Выполнение контактного анализа "узел-узел"

Вы можете использовать контактные элементы "узел-узел" для моделирования податливо-податливого или жестко-податливого контакта между двумя узлами. При этом Вы можете использовать эти элементы для представления контакта между двумя поверхностями, задавая индивидуальный контакт "узел-узел" между противоположными узлами каждой поверхности. Это требует, чтобы узлы на противоположных поверхностях были геометрически пары и скольжение между поверхностями – мало.

Обычное использование элементов "узел-узел" проиллюстрировано на рисунке 27.

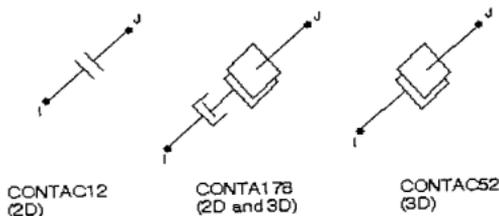


Рисунок 27. Контактные элементы "узел-узел"

Этот тип является простейшим и требует наименьших затрат процессорного времени из всех типов контактных элементов. В определенных условиях, эти элементы являются эффективным инструментом при моделировании различных контактных ситуаций. Элемент CONTA178 предлагает больше возможностей и более гибок в использовании, чем CONTACT12 и CONTACT52. По сравнению с последними элемент CONTA178 имеет следующие возможности:

- Большой выбор контактных алгоритмов, включая метод множителей Лагранжа (KEYOPT(2))
- Полуавтоматический выбор контактной жесткости (реальные постоянные FKN-FKS)
- Большую гибкость в определении контактной нормали
- Больше моделей контактного поведения (KEYOPT(10))
- Цилиндрический зазор с трением (KEYOPT(4) = 4)
- Демпфирование (реальные постоянные CV1, CV2)



Элемент CONTA178 поддерживает только упругое Кулоново трение. Для моделирования жесткого Кулонова трения используйте элементы CONTACT12 и CONTACT52.

Процедура выполнения контактного анализа "узел-узел" подобна описанной в разделе *Выполнение контактного анализа "узел-поверхность"*. Ниже приведена схематическая последовательность типовых шагов при проведении анализа. Каждый из этих шагов разъяснен в деталях в последующих разделах.

- Создание геометрии и сеточное разбиение модели.
- Создание контактных элементов.
- Задание контактной нормали.
- Задание начального натяга или зазора.
- Выбор контактного алгоритма.
- Приложение необходимых граничных условий.
- Задание опций решения.
- Решение задачи.
- Просмотр результатов.

## 6.1. Создание геометрии и сеточное разбиение

Контактные элементы "узел-узел" передают усилия только в узлах (по сравнению с контактными элементами "поверхность-поверхность", которые передают давление в гауссовых точках). Эта особенность ограничивает их использование только вместе с низкорядковыми элементами.

Вы должны точно идентифицировать места, где будет происходить контактное взаимодействие в результате деформации вашей модели. Узлы на обеих поверхностях потенциально-го контакта должны выстроиться друг против друга. После того как Вы задали возможные контактные поверхности и создали соответствующую сетку, Вы можете создать контактные элементы.

## 6.2. Создание контактных элементов

Вы можете сгенерировать контактные элементы "узел-узел" одним из двух путей:

- Используя прямой метод:  
Command(s): E  
GUI: Main Menu> Preprocessor> Create> Elements> Thru Nodes
- Используя команду EINTF для автоматического создания контактных элементов в совпадающих или сдвинутых на определенное расстояние узлов. Этот способ более подробно обсуждается ниже.

### 6.2.1. Автоматическое создание контактных элементов в совпадающих узлах

Если два твердых тела находятся в состоянии точного соприкосновения, то Вы можете использовать команду EINTF для автоматического создания контактных элементов. Или в этом случае использовать путь-меню: **Main Menu> Preprocessor> Create> Elements> At Coincident Nodes**. Следует помнить, что только узлы с точностью положения, определяемой первым аргументом команды (*TOLER*), будут считаться совпадающими. Если Вы хотите при создании контактных элементов ограничиться определенным набором совпадаю-

щих узлов, то сначала выделите все эти узлы, используя команду NSEL.

### 6.2.2. Автоматическое создание контактных элементов в узлах со сдвигом по координате

Если два твердых тела разделены зазором, то, используя команду EINTF, Вы можете создать элементы между узлами, имеющими определенный сдвиг по координатам (DX, DY, DZ) в указанной вами системе координат KCN. То же Вы можете выполнить при помощи пути-меню: **Main Menu > Preprocessor > Create > Elements > Offset Nodes**.

Если аргумент KPOT установлен равным 1, то узлы, принадлежащие создаваемым контактным элементам, поворачиваются в систему координат KCN.

Например, на рисунке 28 показан контакт между двумя концентрическими цилиндрами, разделенными зазором. В этом примере, KCN присваивается значение номера цилиндрической системы координат с центром в точке O, а DX устанавливается равным  $\Delta$  ( $\Delta \pm \text{TOLER}$ ).

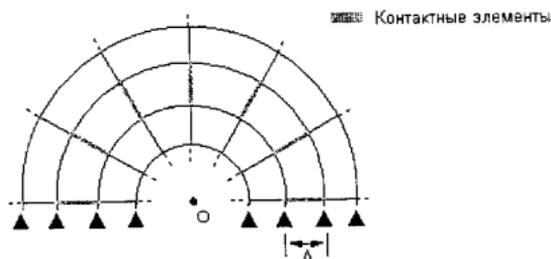


Рисунок 28. Контакт между двумя концентрическими трубами

#### Порядок узлов

Порядок узлов может быть критичен при определении контактной нормали. Вы можете использовать установку команды EINTF,,,LOW или EINTF,,,HIGH для управления узловым порядком. Когда установлен аргумент LOW, двухузловые элементы генерируются от низшего номера узла к высшему. Когда установлен аргумент HIGH, двухузловые элементы генерируются от высшего номера узла к низшему. Для проверки направления контактной нормали используйте команду /PSYMB,ESYS. Если Вы обнаружите, что порядок узлов некорректен, то Вы можете изменить направление нормали на противоположное, используя команду EINTF,,,REVE. Для определения, какая сторона контактного взаимодействия содержит узлы I, используйте следующие команды:

ESEL, ,ENAME, ,178

NSLE, ,POS,1

ESLN

NSLE

## EPLOT

**6.3. Задание контактной нормали**

Направление контактной нормали чрезвычайно важно в контактном анализе с элементом **CONTA178**. По умолчанию (**KEYOPT(5) = 0** и **NX,NY,NZ = 0**), программа **ANSYS** будет рассчитывать направление контактной нормали, базируясь на начальном положении узлов **I** и **J**, так что положительное перемещение (в системе координат элемента) узла **J** относительно узла **I** открывает зазор. Однако, при некоторых следующих условиях Вы должны задать направление контактной нормали:

- Если узлы **I** и **J** имеют одни и те же начальные координаты.
- Если части модели изначально находятся в состоянии "перекрывтия", при котором подлежащие элементы геометрически перекрываются.
- Если начальный размер открытого зазора очень мал.

В приведенных выше случаях, порядок узлов **I** и **J** имеет критическое значение. Корректно заданная контактная нормаль обычно направлена от узла **I** к узлу **J**, за исключением контакта с начальным перекрывтием.

Вы можете задать направление контактной нормали, используя или реальные постоянные **NX, NY, NZ** (направляющие косинусы в глобальной декартовой системе координат), или элементную опцию **KEYOPT(5)**. Ниже приведен список возможных установок опции **KEYOPT(5)**:

**KEYOPT(5)=0**

Направление контактной нормали базируется или на значениях реальных постоянных **NX, NY, NZ**, или на положении узлов, когда эти реальные постоянные не определены. Для двумерного контакта **NZ = 0**.

**KEYOPT(5)=1 (2,3)**

Контактная нормаль расположена в направлении, которое является средним направляющим косинусом для оси **X (Y, Z)** узловой системы координат для узлов **I** и **J**. Направляющие косинусы в узлах **I** и **J** должны быть очень близки. Эта опция может быть подкреплена командами **NORA** и **NORL**, которые поворачивают ось **X** узловой системы координат в направлении нормали к поверхности (линии) твердотельной модели. Для выполнения этих команд Вы можете использовать соответствующие пути-меню:

**Main Menu> Preprocessor> Move/Modify> Rotate Node CS - To Surf Normal> On Area**

**Main Menu> Preprocessor> Move/Modify> Rotate Node CS - To Surf Normal> On Lines**

**Main Menu> Preprocessor> Move/Modify> Rotate Node CS - To Surf Normal> With Area**

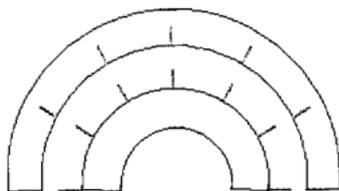


Рисунок 29. Контакт между двумя концентрическими трубами

Контакт между трубами по схеме "труба в трубе" происходит по нормальям, повернутым надлежащим образом.

KEYOPT(5)=4 (5,6)

Контактная нормаль направлена по оси X (Y, Z) элементной системы координат, установленной командой **ESYS**. Если Вы используете эту опцию, то убедитесь, что определенная командой **ESYS** система координат является декартовой.



Для элемента **CONTA12** вы можете определить ориентацию контактной поверхности с помощью реальной постоянной **THETA**. Для элемента **CONTA52** Вы можете использовать в этих целях реальные постоянные **NX**, **NY**, **NZ**.

#### 6.4. Задание начального перекрытия или зазора

При использовании контактного элемента **CONTA178**, размер зазора может быть автоматически вычислен из реальной постоянной **GAP** и положения узлов (проекция вектора, направленного от узла I к узлу J на контактную нормаль). Это производится по умолчанию (**KEYOPT(4)=0**). Таким образом, если Вы хотите определить начальный зазор только положением узлов, то установите опцию **KEYOPT(4)=0** и задайте реальную постоянную **GAP=0**.

Если установлена опция **KEYOPT(4)=1**, то размер начального зазора базируется только на реальной постоянной **GAP** (при этом игнорируется положение узлов). Отрицательное значение размера зазора может быть использовано для моделирования начального перекрытия.

Вы можете в расчете постепенно прикладывать начальное перекрытие (линейно нарастающее на шаге нагружения), используя опцию **KEYOPT(9)=1**. Но эта опция не поддерживается контактными элементами **CONTA12** и **CONTA52**. Заметим, что реальная постоянная **GAP** элемента **CONTA52** имеет противоположное действие по сравнению с реальной постоянной **INTF** элемента **CONTA12**, которая устанавливает перекрытие. Опция **KEYOPT(4)** для элементов **CONTA12** и **CONTA52**, также отличается от опции элемента **CONTA178**.

#### 6.5. Выбор контактного алгоритма

Для задачи с контактным элементом **CONTA178** Вы можете выбрать один из четырех различных контактных алгоритмов:

- Чистый метод множителей Лагранжа.

- Метод множителей Лагранжа по контактной нормали и метод штрафов в тангенциальном направлении.
- Модифицированный метод Лагранжа.
- Чистый метод штрафов.

Контактные элементы **CONTAC12** и **CONTAC52** предполагают использование только чистого метода штрафов, в котором Вы должны указать контактную жесткость. Нормальная жесткость **KN** будет базироваться на жесткости поверхности в контакте. Однако, если Вы выбрали для использования элемент **CONTA178** с чистым методом штрафов или модифицированным методом Лагранжа, то программа "полуавтоматически" обеспечивает установку нормальной и тангенциальной контактных жесткостей.

Программа **ANSYS** по умолчанию назначает нормальную контактную жесткость **FKN**, которая базируется на модуле Юнга **E** и размере подлежащего элемента. Величины **FKN** и **FKS** являются множителями. Если Вы хотите ввести абсолютные значения **FKN** и **FKS**, то вводите их в виде отрицательных величин.

## 6.6. Приложение граничных условий

Сейчас Вы можете приложить необходимые граничные условия, как это делается в любом прочностном анализе программы **ANSYS**. Для большей информации о приложении граничных условий смотрите соответствующее описание в главах руководства по прочностному анализу.

При использовании метода множителей Лагранжа, будьте внимательны, чтобы не перезакрепить модель. Модель считается перезакрепленной, когда контактное ограничение конфликтует с установленным граничным условием на степень свободы в одном и том же узле. Следующий рисунок иллюстрирует эту проблему:



Рисунок 30. Пример перезакрепленной контактной задачи

Перемещения в узлах **I** и **J** зафиксированы в направлении **X**. В этом случае модель перезакреплена только тогда, когда оба твердых тела находятся в контакте, который был определен или как грубый, или как скрывающийся. Это может встретиться, если контактное состояние – прилипание ("sticking"). В этих случаях ограничение в направлении **X** дублируется, что служит причиной перезакрепления модели.

Предупреждающие сообщения "Zero Pivot" и "Numerical Singularity" указывают на перезакрепленность в модели. Перезакрепленность может иметь следствием трудности в сходимости и/или неточности результатов. Она может быть легко обойдена изменением или условий контакта, или граничных условий.

## 6.7. Задание опций решения

Поведение сходимости для контактных задач сильно зависит от особенностей проблемы. Опции, приведенные ниже, являются или типичными, или рекомендуемыми для большинства контактных задач "узел-узел".

- Установите режим автоматического шага по времени, используя опцию KEYOPT(7). Для большей информации смотрите раздел *Contact Predictions*. Команда SOLCONTROL выключает его по умолчанию.
- Размер шага по времени должен быть достаточно мал, чтобы уловить характерную контактную зону. Плавный перенос контактных усилий нарушается, если размер шага слишком велик. Надежным путем для установления точного размера шага является включение автоматической установки его программой. Команда SOLCONTROL включает эту опцию по умолчанию.

Command(s): AUTOTS,ON

GUI: Main Menu> Solution> Sol'n Control: Basic Tab

Main Menu> Solution> Unabridged Menu> -Load Step Opts-  
Time/Frequenc> Time - Time Step

Main Menu> Solution> Unabridged Menu> -Load Step Opts-  
Time/Frequenc> Time and Substps

- Установите количество итераций, которое соответствует приемлемому размеру шага по времени. При установленной команде SOLCONTROL,ON, по умолчанию программа устанавливает от 15 до 26 итераций, в зависимости от физики проблемы.

Command(s): NEQIT

GUI: Main Menu> Solution> Sol'n Control: Nonlinear Tab

Main Menu> Solution> Unabridged Menu> -Load Step Opts-  
Nonlinear> Equilibrium Iter

- Включите опцию предсказания-коррекции, если Вы не ожидаете в ходе анализа больших поворотов.

Command(s): PRED

GUI: Main Menu> Solution> Sol'n Control: Nonlinear Tab

Main Menu> Solution> Unabridged Menu> -Load Step Opts-  
Nonlinear> Predictor

- Установите опцию Ньютона-Рафсона (Newton-Raphson) – FULL с адаптивным спуском.

Command(s): NROPT,FULL,,ON

GUI: Main Menu> Solution> Unabridged Menu> Analysis Options

- Для анализа, включающего трение, использование установки NROPT,UNSYM полезно (а также иногда требуется, если коэффициент трения  $\mu > 0.2$ ) для проблем, когда нормальное и тангенциальное (скольжение) движения сильно связаны.

- Опция **NLGEOM,ON** поддерживается, но контактная нормаль не модифицируется в ходе анализа. Убедитесь, что Вы имеете в решаемой задаче маленькие повороты вдоль контактных поверхностей (за исключением опции цилиндрического зазора).
- Часто отсутствие сходимости в контактном анализе является результатом слишком большой величины контактной жесткости (реальная постоянная KN). Обратите внимание на рекомендации, данные выше в этом разделе для начальной оценки контактной жесткости. Если такая оценка не приводит к сходимости вычислений, то уменьшите контактную жесткость и стартуйте вновь. (Вы должны также явно задать тангенциальную жесткость – смотрите замечание ниже.)
- Наоборот, если Вы в контактном анализе встретили перепроникание, то Вы, вероятно, использовали слишком маленькую величину KN. В этом случае постепенно увеличивайте величину контактной жесткости, используя команду **R**, путем рестартов до достижения приемлемого результата. (Вы должны также явно задать тангенциальную жесткость – смотрите замечание ниже.)



Несмотря на то, что Вы можете изменить величину контактной жесткости (реальная постоянная KN), Вы не можете изменить никакой другой реальной постоянной между шагами нагружения. Поэтому, если Вы планируете изменить KN при рестарте (или при переходе от одного шага нагружения к другому), то Вы не сможете учесть величину тангенциальной контактной жесткости (реальная постоянная KT), делая это по умолчанию, потому что программа попытается переопределить тангенциальную жесткость, как измененную контактную жесткость. Вы должны явным образом задавать тангенциальную жесткость всякий раз, когда Вы изменяете нормальную контактную жесткость, чтобы сохранить согласующуюся величину тангенциальной жесткости на всем протяжении шагов нагружки.

## 6.8. Решение задачи

После выполненных выше действий Вы можете сейчас приступить к решению, так же, как Вы это делали в любом другом виде нелинейного анализа.

Следуйте приведенным ниже шагам для решения Вашего контактного анализа "узел-узел":

1. Сохраните копию исходной базы данных в файле с отдельным именем.

Command(s):       **SAVE**

GUI:                **Utility Menu> File> Save As**

2. Запустите процесс решения.

Command(s):       **SOLVE**

GUI:                **Main Menu> Solution> -Solve- Current LS**

3. Если необходимо, определите последовательные шаги нагружения. Для получения дополнительной информации относительно задания множественных последовательных шагов нагружения, смотрите раздел *Nonlinear Structural Analysis* этого учебника.

4. Выйдите из меню решателя.

Command(s):       **FINISH**  
 GUI:               **Close the Solution menu**

## 6.9. Просмотр результатов

Постпроцессорный просмотр результатов анализа с участием этого типа контактных элементов требует использования команды **ETABLE**. Основная информация относительно пользования постпроцессором изложена в главе *ANSYS Basic Analysis Guide*.

Вы можете просмотреть отклик нелинейной конструкции в зависимости от истории нагружения во временном постпроцессоре **POST26**. Используйте постпроцессор **POST26**, чтобы сравнить одни переменные с другими. Например, Вы можете построить график перемещения в узлах в зависимости от уровня прикладываемой нагрузки, или вывести таблицу пластических деформаций в узлах от соответствующей величины *TIME* (которая для статических задач эквивалентна уровню нагрузки). Ниже приведена типовая последовательность шагов во временном постпроцессоре **POST26**:

1. Проверьте в Вашем выходном файле (Jobname.OUT), сошелся ли анализ на всех требуемых шагах нагружения. Вы не должны основывать свои выводы на несошедшихся результатах.
2. Если Ваше решение сошлось, то войдите во временной постпроцессор **POST26**. Если Ваша модель не находится в текущей базе данных, то прочитайте ее, используя команду **RESUME**.

Command(s):       **/POST26**  
 GUI:               **Main Menu> TimeHist Postpro**

3. Вы можете выбрать для просмотра в постпроцессоре переменные. Команда **SOLU** определяет различные итерационные параметры и параметры сходимости для просмотра в постпроцессоре.

Command(s):       **NSOL , ESOL , RFORCE**  
 GUI:               **Main Menu> TimeHist Postpro> Define Variables**

4. Графически отобразите распределение переменных или выведите их в виде таблицы.

Command(s):       **PLVAR** (графическое отображение)  
                   **PRVAR**  
                   **EXTREM** (графический вывод)  
 GUI:               **Main Menu> TimeHist Postpro> Graph Variables**  
                   **Main Menu> TimeHist Postpro> List Variables**  
                   **Main Menu> TimeHist Postpro> List Extremes**

- Определите начальный статус, используя реальную постоянную START. START может быть определен, если только отвергаются условия, предполагаемые INTF. Действующие стартовые условия:
  - START=0: статус зазора определяется из INTF или GAP
  - START=1: зазор закрыт и скольжения нет
  - START=2: зазор закрыт и скольжение происходит в положительном направлении
  - START=-2: зазор закрыт и скольжение происходит в отрицательном направлении
  - START=3: зазор открыт
- Определите контактную поверхность реальной постоянной THETA (только для CONTACT12).

## 7. Описание контактных и целевых элементов

- *CONTAC49* 3-D контактный элемент "узел-поверхность"
- *CONTAC52* 3-D контактный элемент "узел-узел"
- *TARGE169* 2-D целевой сегмент
- *CONTA171* 2-D двухузловой контактный элемент "поверхность-поверхность"
- *CONTA178* 3-D контакт "узел-узел"

## 7.1. CONTACT49

CONTACT49 -- трехмерный контактный элемент "узел-поверхность"

Продукты: MP ME ST PP ED

### Описание элемента

Элемент CONTACT49 может быть использован для моделирования контакта и скольжения двух поверхностей (или узла и поверхности) в трехмерном пространстве. Элемент имеет пять узлов с тремя степенями свободы в каждом: перемещения в узловых направлениях X, Y и Z. Контакт происходит, когда контактный узел проходит целевую поверхность. При анализе допускается упругое и жесткое Кулоново трение, при скольжении вдоль целевой поверхности. Элемент позволяет моделировать тепловое сопротивление в контактном взаимодействии. Для получения дополнительной информации относительно этого элемента смотрите раздел 14.49 ANSYS *Theory Reference*. Среди других доступных контактных элементов имеются CONTACT12, CONTACT26, COMBIN40, CONTACT48, CONTACT52 и так далее.

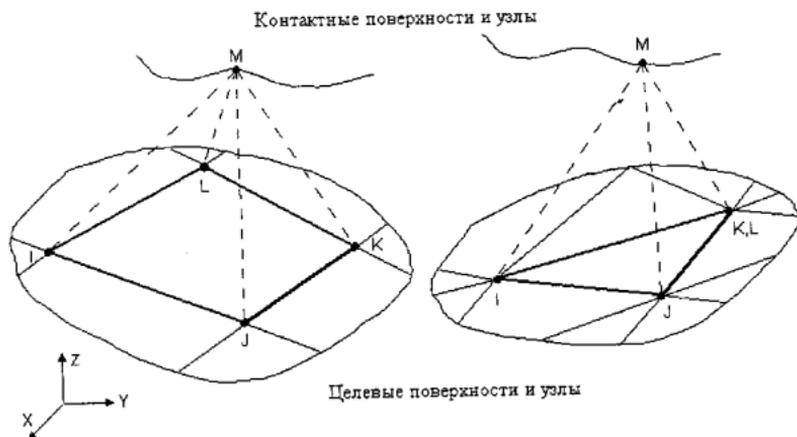


Рис. 31. Контактный элемент "узел-поверхность" CONTACT49

## Входные данные

Геометрия, положение узлов и системы координат этого элемента приведены на рис. 31. Элемент имеет форму пирамиды с основанием в виде четырехугольника, вершинами которого являются узлы, находящиеся на одной поверхности (называемой целевой поверхностью), и противоположной вершиной на другой поверхности (называемой контактной поверхностью). Программа может создавать элементы тетраэдральной формы с треугольником в основании. Основание пирамиды (тетраэдра) является целевой поверхностью, а узлы, лежащие на ней, – целевыми узлами. Узлы, принадлежащие контактной поверхности, которые венчают пирамиду (тетраэдр) называются контактными узлами. Графическое отображение этого элемента имеет вид целевого основания и контактного узла (как звездочка). Подробное обсуждение создания элементов CONTACT49 при помощи команды GCGEN приведено в *ANSYS Structural Analysis Guide*.

Узлы I, J, K и L определяют целевое основание, а узел M является контактным узлом. Первый касательный вектор целевой поверхности является единичным вектором, касательным к целевой поверхности и имеет направление от узла I к узлу J. Вектор поверхностной нормали имеет единичную длину, перпендикулярен к целевому основанию элемента и направлен от него. Второй касательный вектор целевой поверхности является результатом векторного произведения вектора нормали и первого касательного вектора. Таким образом, эти три вектора в соответствии с правилом правой руки образуют систему координат элемента. Узлы I, J, K и L должны быть расположены в таком порядке, чтобы вектор, являющийся результатом векторного произведения векторов II и JK, был направлен из узла J во внешнюю сторону свободной поверхности тела (как показано на рис. 1). Изначально, узел M может быть далеко расположен от целевого основания, может быть компланарен к целевому основанию, или может быть в состоянии проникания за целевое основание. Состояние контакта происходит только тогда, когда нормальная проекция (к целевой линии) узла M лежит на целевом основании.

Нормальная контактная жесткость, KN, используется в методе штрафных функций для определения контактной силы. KN имеет размерность [Сила/Длина]. Величина KN соответствует штрафной жесткости, которая действует в направлении нормали к целевой поверхности. Она используется для усиления совместности перемещений в установленных пределах взаимного проникновения целевой базы и контактного узла. Очень большое значение KN обычно необходимо для принудительной совместности, если выбран метод штрафных функций (KEYOPT(2) = 0). Низкое значение величины KN может быть необходимо при использовании метода штрафных функций вместе с методом множителей Лагранжа (KEYOPT(2) = 1). В некоторых случаях (таких, как начальное перекрытие (натяг), отсутствие сходимости или перепроникание) может быть полезно изменение величины KN между шагами или в ходе рестарта, с целью получения точного сходящегося решения.

Допуск в направлении нормали к поверхности, TOLN, используется для определения, удовлетворяется ли совместность перемещений в контакте, когда применяется метод штрафных функций вместе с методом множителей Лагранжа (KEYOPT(2) = 1). Условие контактной совместности считается удовлетворенным, если контактный узел находится в пределах допуска TOLN от любой стороны целевого основания. Величина TOLN должна быть положительной и имеет размерность [Длина].

Если KEYOPT(3) = 0, то трение не принимается во внимание и ни один из параметров реальных постоянных не требуется. Контактная жесткость сцепления, KT, имеет размерность [Сила/Длину]. Параметр KT используется только, если установлена опция упругого Кулонова трения (KEYOPT(3) = 1). Это приводит к когезионной (сцепляющей) составляющей контактного трения и соответствует жесткости в тангенциальном к целевому основанию направлению. По умолчанию величина KT принимается равной KN/100. По умолчанию соотношение статического и динамического коэффициентов трения, FACT, принимается равным минимальному значению - 1.0. Он используется, когда установлена опция KEYOPT(3) = 1.

Задание коэффициента трения, MU, необходимо, когда KEYOPT(3) = 1 или 2. Он может быть задан как функция температуры. Это единственное использование температуры в элементе. Задаваемая величина MU определяет динамический коэффициент трения, в то время как статический коэффициент трения определяется выражением: FACT\*MU.

Реальная постоянная TOLS используется для задания небольшой величины, на которую будет увеличиваться площадь целевого основания (узлы I - L). Величина TOLS определяется в процентах (1.0 подразумевает - 1.0% увеличение целевой площади). Использование величины TOLS полезно в задачах, когда контактные узлы (M) могут лежать на ребре целевой поверхности (например, плоскости симметрии или для моделей созданных по контактному шаблону узел-узел). В этой ситуации, контактный узел может часто соскальзывать с одной целевой области на другую, или полностью выйти из контакта, результатом этого будут трудности в сходимости по причине контактной осцилляции (дребезга). Задание небольшой величины TOLS обычно предупреждает возникновение такой ситуации.

Реальная постоянная PINB определяет радиус поиска соответствующего контактного узла, то есть, если он попадает вовнутрь этой области, то устанавливается или контакт или состояние близкое к нему. По умолчанию программа рассчитывает этот радиус исходя из размера целевой части элемента. Если начальное перекрытие частей Вашей модели больше линейного размера целевого основания, то вы можете задать ваш собственный радиус поиска (в противном случае, это начальное перекрытие не будет определяться). То же самое может быть необходимым, если контактный узел проходит за целевую поверхность с величиной перемещения большей линейного размера целевого основания. Однако следует иметь в виду, что слишком большая величина радиуса будет увеличивать время поиска контакта.

Комбинированный термпрочностной контакт задается, если установлена опция KEYOPT(1) = 1 (активируются прочностные и тепловые степени свободы) и определена величина контактной теплопроводности COND. Реальная постоянная COND имеет размерность [Дж/(сек\*град)]. Если имеет место контакт, то маленькое значение COND приводит к формированию несовершенного контакта и температурного разрыва по границе контактного взаимодействия. Для большой величины COND, результирующий скачок температур стремится к нулю и контакт стремится к совершенному состоянию. Когда контакт отсутствует, то полагается, что переноса тепла через целевую поверхность не происходит.

Общий список входных величин и параметров приведен в таблице 3. Основные описания входных параметров элементов приведены в разделе *Element Input* главы *Element Reference*.

Таблица 3. Входные параметры элемента CONTAC49

Имя элемента	CONTAC49	
Узлы	I, J, K, L, M	
Степени свободы	UX, UY, UZ (если KEYOPT(1) = 0)	
	UX, UY, UZ, TEMP (если KEYOPT(1) = 1)	
Реальные постоянные	KN, KT, TOLN, FACT, TOLS, COND, PINB	
Свойства материала	MU	
Поверхностные нагрузки	нет	
Твердотельные нагрузки	Температура -	T(I), T(J), T(K), T(L), T(M)
Специальные свойства	Нелинейность, большие перемещения, адаптивный спуск	
KEYOPT(1)	Выбор пользователем степеней свободы (смотрите выше)	
KEYOPT(2)	0 -	Метод штрафных функций
	1 -	Метод штрафных функций + множителей Лагранжа
KEYOPT(3)	0 -	Трения нет
	1 -	Упругое Кулоново трение
	2 -	Жесткое Кулоново трение
KEYOPT(7)	Выбор алгоритма выбора приращения по времени. Отметим, что эта опция будет активизироваться сразу, если опция SOLCONTROL установлена ON. Установка SOLCONTROL,ON,ON является наиболее часто используемой с этим элементом. Если установлено SOLCONTROL,ON,OFF, то эта ключевая опция не активизируется.	
	0 --	Ни контакт, ни его потеря или сцепление/скольжение не прогнозируются
	1 --	Предсказание производится с целью поддержания разумного приращения по времени (или нагружения) (рекомендуется)
	2 --	Предсказание производится с целью минимизации приращения по времени (или нагружения) всякий раз, когда происходит изменение контактного состояния элемента

## Выходные данные

Выходное решение, связанное с элементом, представляется в двух формах:

- Узловые перемещения, включенные в общее узловое решение.
- Дополнительный вывод данных элемента (только если STAT = 1 или 2, то есть, если зазор закрыт) в соответствии с таблицей 4.

Основное описание вывода результатов решения дано в разделе *Solution Output*. Смотрите *ANSYS Basic Analysis Guide* для описания способов просмотра результатов.

В таблице 4 используются следующие обозначения:

Двоеточие (:) в колонке Name указывают объекты, которые могут быть доступны при помощи метода компонентных имен [ETABLE,ESOL]. В колонках O и R указывается нахождение данных в файле Jobname.OUT (O) или файле результатов (R), соответственно. Y указывает, что объект *всегда* имеется, цифровая ссылка в табличной ссылке указывает, когда объект *условно* имеется, а - указывает, что объект отсутствует.

Таблица 4. Определения выходных величин элемента CONTAC49

Name	Definition	O	R
EL	Номер элемента	Y	Y
NODES	Узлы I, J, K, L и M	Y	Y
XC, YC, ZC	Координаты тоски вывода результатов (центр тяжести)	Y	4
TEMP	Температуры T(I), T(J), T(K), T(L), T(M)	Y	Y
STAT,OLDST	Новое и старое контактные состояния	1	1
NORM	Компоненты вектора нормали к поверхности (X, Y, Z)	Y	-
FNTOT	Общая нормальная сила	Y	Y
FNPF	Составляющая штрафной функции нормальной силы	Y	Y
GAP	Величина зазора или проникания	Y	Y
AREA	Площадь целевого основания	Y	Y
LOC1,LOC2	Безразмерное местоположение контактного узла M на целевом основании: (от -1 до +1), если основание четырехугольное; (от 0 до +1), если основание треугольное	Y	Y
FS1	Тангенциальная сила в 1 элементном направлении (elastic or sliding)	2	2
FS2	Тангенциальная сила во 2 элементном направлении (elastic or sliding)	2	2
FSLIM	Предельная сила трения	2	2
MU	Коэффициент трения	2	2
ANGLE	Главный угол силы трения	2	2
Q	Поток контактного тепла (тепло/время)	-	3

Если величина STAT,OLDST равна:

- 1 – контакт закрыт и имеется состояние сцепления контактных поверхностей
- 2 – контакт закрыт и имеется состояние скольжения
- 3 – контакт открыт, но положение близкое к нему
- 4 – контакт открыт, но положение далекое

Если KEYOPT(3) = 1 или 2 и STAT = 1 или 2

Если KEYOPT(1) = 1 и STAT = 1 или 2

Определяется только в центре элемента, через команду \*GET

В таблице 5 приведен список выходных величин, доступных через команду **ETABLE**, использующую метод Последовательных Номеров. Смотрите раздел *The General Postprocessor (POST1)* в *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide* и раздел *Item and Sequence Number* этого учебника для дополнительной информации. В таблице 5 используются следующие условные обозначения:

<b>Name</b>	выходная величина, определенная в таблице 4
<b>Item</b>	предопределенная метка <i>Item</i> для команды <b>ETABLE</b>
<b>E</b>	"последовательные" номера для однозначных величин или постоянных данных элемента
<b>I,J,K,L,M</b>	последовательные номера для данных в узлах I,J,K,L,M

Таблица 5. Метки и номера величин элемента CONTAC49 для команд ETABLE и ESOL

Name	Item	E	I	J	K	L	M
FNTOT	SMISC	1	-	-	-	-	-
FS1	SMISC	2	-	-	-	-	-
FS2	SMISC	3	-	-	-	-	-
FNPF	SMISC	4	-	-	-	-	-
Q	SMISC	5	-	-	-	-	-
STAT	NMISC	1	-	-	-	-	-
OLDST	NMISC	2	-	-	-	-	-
GAP	NMISC	3	-	-	-	-	-
AREA	NMISC	4	-	-	-	-	-
MU	NMISC	5	-	-	-	-	-
FSLIM	NMISC	6	-	-	-	-	-
ANGLE	NMISC	7	-	-	-	-	-
LOC1	NMISC	8	-	-	-	-	-
LOC2	NMISC	9	-	-	-	-	-
TEMP	LBFE	-	1	2	3	4	5

## Ограничения и допущения

Координаты контактных поверхностей и силы полностью модифицируются, несмотря на то, какую опцию команды NLGEOM Вы задали – большие или малые прогибы. В динамическом контактном анализе должен использоваться метод штрафных функций (KEYOPT(2) = 0). Нормальная контактная жесткость, KN, должна быть обязательно задана и быть положительной, но ее величина не должна быть слишком большой, так как это может привести к численной неустойчивости. Однако, несмотря на то, что Вы можете изменить величину KN между шагами нагружения, Вы не можете этого сделать относительно других реальных постоянных. Поэтому, если Вы планируете изменить величину KN, то Вы не можете разрешить программе устанавливать величину KT по умолчанию, поскольку она будет в таком случае стремиться переопределить KT как измененный KN. Вы должны напрямую переопределять величину KT, всякий раз, когда изменяете KN, чтобы сохранить согласованную величину в ходе всех шагов нагружения. В статическом анализе может быть использован или метод штрафных функций (KEYOPT(2) = 0), или метод штрафных функций + метод множителей Лагранжа (KEYOPT(2) = 1). Значение величины KN может быть очень маленьким, когда добавляется метод множителей Лагранжа, для которого должна быть задана величина TOLN.

Элемент должен быть определен таким образом, чтобы учесть возможные комбинации контактного узла с целевым основанием. Один контактный узел может быть связан со многими целевыми основаниями, и многие контактные узлы могут быть связаны с одним целевым основанием. Элементы не могут быть деактивированы командой EKILL.

## Ограничения по продуктам

### ANSYS/Structural

Степень свободы TEMP не доступна. KEYOPT(1) = 0.

## 7.2. CONTAC52

CONTAC52 — трехмерный контактный элемент "узел-узел"

Продукты: MP ME ST PR PP ED

### Описание элемента

Элементы CONTAC52 представляют две поверхности, которые могут находиться в состоянии физического контакта (или нет) и скользить одна относительно другой. Элемент способен поддерживать только сжатие в направлении нормали к контактной поверхности и сдвиг (Кулоново трение) в тангенциальном направлении. Элемент имеет три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлениях узловой системы координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Элемент может иметь изначально заданное нагружение в направлении нормали или, наоборот, иметь заданный начальный зазор. Заданные жесткости действуют в нормальном и тангенциальном направлениях, когда зазор закрыт и скольжение отсутствует. Для дополнительных деталей смотрите раздел 14.52 руководства *ANSYS Theory Reference*. Другими аналогичными элементами в программе являются CONTAC12, CONTAC26, COMBIN40, CONTAC48 и CONTAC49.

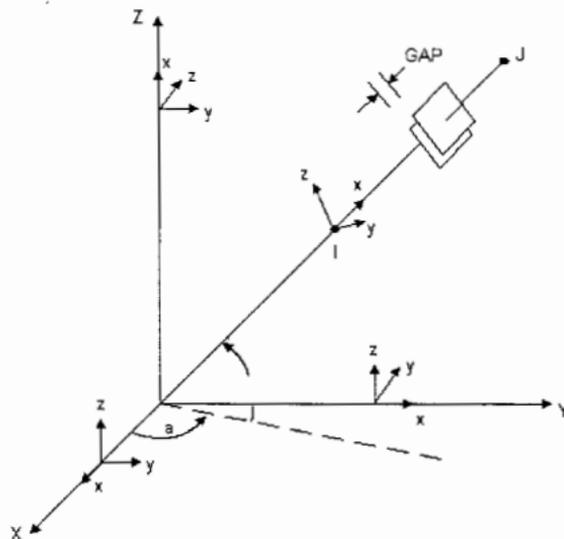


Рис. 32. Трехмерный контактный элемент CONTAC52 "узел-узел"

## Входные данные

Геометрия, положение узлов и системы координат этого элемента показаны на рисунке 32. Элемент определяется двумя узлами, двумя жесткостями (KN и KS), начальным зазором или перекрытием (GAP), и начальным состоянием элемента (START). Ориентация поверхности взаимодействия определяется положением узлов или задаваемым пользователем направлением зазора. Поверхность взаимодействия принимается перпендикулярной к линии, соединяющей узлы I и J, или к заданному направлению зазора. Элементная система координат имеет начало в узле I, а ось X направлена от узла I к узлу J или в направлении определенного пользователем зазора. Поверхность взаимодействия параллельна плоскости YZ элемента.

Нормальная жесткость, KN, базируется на жесткости контактирующих поверхностей. Руководящие указания по выбору величины KN изложены в разделе *Nonlinear Structural Analysis* в главе *ANSYS Structural Analysis Guide*. В некоторых случаях (таких, как анализ с посадкой, отсутствие сходимости или перепроникание) может быть полезным изменение величины KN между шагами нагружения или при рестарте, для получения точного сходящегося решения. Жесткость сцепления, KS, представляет собой жесткость в тангенциальном направлении, когда выбрана модель упругого Кулонова трения ( $\mu > 0.0$  и установлена опция KEYOPT(1) = 0). Коэффициент трения  $\mu$  вводится, как свойство материала MU, и может быть задан как функция температуры элемента (средняя температура двух узлов). Жесткости могут быть вычислены как максимально ожидаемая сила, деленная на максимально допустимое перемещение поверхности. По умолчанию величина KS принимается программой равной KN.

Начальный зазор определяет собственно размер зазора (если величина положительная) или величину геометрического перекрытия (если отрицательна). Этот способ противоположен заданию в элементе CONTACT12. Если вы не задали направление зазора (путем определения реальных постоянных NX, NY и NZ), то условие натяга приведет к разделению узлов. Размер зазора может быть введен как реальная постоянная (GAP) или автоматически рассчитана через положение узлов (как расстояние между узлами I и J), если KEYOPT(4) = 1. Перекрытие должно быть введено, как реальная постоянная. Жесткость ассоциируется с нулевым или отрицательным зазором. Начальный статус элемента (START) используется для задания предшествующего состояния взаимодействия, чтобы использовать его в стартовом первом подшаге расчета. Задание этой величины не принимает во внимание условия, вытекающие из состояния натяга, и полезно в предвидении окончательной конфигурации взаимодействия для уменьшения числа итераций, необходимых для сходимости.

Вы можете задать направление зазора при помощи реальных постоянных NX, NY и NZ (как компоненты вектора в Глобальной системе координат). Если Вы не указали направление зазора, то программа будет рассчитывать его на базе начального положения узлов I и J, так что положительное перемещение (в элементной системе координат) узла J по отношению к узлу I будет открывать зазор. Вы всегда должны указывать направление зазора, если начальное положение узлов I и J совпадает, если модель находится в начальном состоянии натяга при котором подлежащие элементы геометрически перекрываются, или если величина начального открытого зазора очень мала. Если зазор изначально геометрически открыт, то обычно iránylıное направление нормали (NX, NY, NZ) идет от узла I к узлу J.

Элемент использует только одно свойство материала – коэффициент трения  $\mu$ . Для определения бесфрикционного взаимодействия этот коэффициент задается равным нулю. В узлах элемента может быть задана температура (только для определения свойств материала). Температура T(I) узла I по умолчанию принимается равной TUNIF. Температура узла J по умолчанию принимается равной T(I).

Усилие, действующее в контактном элементе, может быть разделено на нормальную и касательную составляющие, как показано на рисунке 2. Состояние элемента в начале нервного

подшага определяется параметром START. Если взаимодействующие поверхности сомкнуты и неподвижны относительно друг друга, то величина KN представляет собой усилие противодействия созданию зазора, а KS – усилие сопротивления срабатыванию. Если взаимодействующие поверхности сомкнуты, но скользят относительно друг друга, то KN представляет собой усилие противодействия созданию зазора, а постоянная сила трения  $\mu FN$  представляет собой усилие сопротивления скольжению.

Когда сила в нормальном направлении (FN) отрицательна, то "поверхность взаимодействия" остается в контакте и работает как линейная пружина. Как только нормальная сила становится положительной, так сразу контакт обрывается и усилие от одной части конструкции к другой не передается.

Опция KEYOPT(3) может быть использована для задания в зазоре "слабой" пружины, которая предупреждает движение объекта, как твердого целого, что позволяет производить статический анализ. Жесткость этой пружины вычисляется умножением нормальной жесткости на некоторый множитель. По умолчанию он принимается равным  $1E-6$ , но может быть пересpecified путем задания реальной постоянной REDFACT.

Следует понимать, что эта "слабая" пружина не является аналогом пружинного элемента (такого как COMBIN14) с малой величиной жесткости. Величина REDFACT не ограничивает разделяющий зазор, когда приложено растягивающее усилие.

В тангенциальном направлении, для  $FN < 0$  и абсолютной величины тангенциальной силы (FS) меньшей, чем  $\mu|FN|$ , взаимодействующие поверхности сцепляются и срабатывают, как линейная пружина. Для  $FN < 0$  и  $FS = \mu|FN|$ , происходит скольжение. Если контакт нарушен, то  $FS = 0$ .

При установке KEYOPT(1) = 1, выбирается жесткое Кулоново трение, и величина KS не используется, а способность упруго сцепления удаляется. Эта опция полезна для задач с управляемым перемещением или для некоторых динамических задач, где доминирует скольжение.

Для анализа включающего трение, KEYOPT(11) = 1 (несимметричная опция) полезна (и в действительности иногда требуется) для задач, когда нормальное и тангенциальное движения строго связаны, как например, в задаче о клиновой прокладке.

Общий список входных величин и параметров приведен в таблице 6. Основные описания входных параметров элементов приведены в разделе *Element Input* главы *Element Reference*.

Таблица 6. Входные параметры элемента CONTACT52

Имя элемента	CONTACT52	
Узлы	I, J	
Степени свободы	UX, UY, UZ	
Реальные постоянные	KN, GAP, START, KS, REDFACT, NX, NY, NZ Отрицательная величина GAP означает условие состояния начального натяга. Если START = 0.0 или не определено, то начальное состояние элемента определяется по начальному зазору. Если START = 1.0, то зазор изначально закрыт и скольжение отсутствует (если MU>0.0), или имеет место (если MU = 0.0). Если START = 2.0, то зазор изначально закрыт и имеется скольжение. Если START = 3.0, то зазор изначально закрыт.	
Свойства материала	MU	
Поверхностные нагрузки	Нет	
Твердотельные нагрузки	Температуры -	T(I), T(J)
Специальные свойства	Нелинейность, адаптивный спуск	
KEYOPT(1)	Используется только, если MU > 0.0	
	0 -	Упругое Кулоново трение (KS used for sticking stiffness)
	1 -	Жесткое Кулоново трение (resisting force only)
KEYOPT(3)	0 -	"Слабая" пружина отсутствует в открытом зазоре
	1 -	В открытом зазоре используется "слабая" пружина
KEYOPT(4)	0 -	Размер зазора базируется на реальной постоянной
	1 -	Размер зазора определяется начальным положением узлов (реальная постоянная игнорируется)
KEYOPT(7)	Выбор алгоритма выбора приращения по времени. Отметим, что эта опция будет активизироваться сразу, если опция SOLCONTROL установлена ON. Установка SOLCONTROL,ON, ON является наиболее часто используемой с этим элементом. Если установлено SOLCONTROL,ON,OFF, то эта ключевая опция не активизируется.	
	0 -	Предсказание производится с целью минимизации приращения по времени (или нагружения) всякий раз, когда происходит изменение контактного состояния элемента
	1 -	Предсказание производится с целью поддержания разумного приращения по времени (или нагружения) (рекомендуется)
KEYOPT(11)	0 -	Используется симметричная матрица
	1 -	Используется несимметричная матрица

## Выходные данные

Выходные данные, связанные с элементом, доступны в двух видах:

- узловые перемещения включены в общее узловое решение,
- дополнительный элементный вывод представлен в таблице 7.

Кривая Сила-Перемещение приведена на рисунке 33.

Величина USEP определяется из нормального перемещения ( $u_n$ ) (в направлении оси X элемента) между взаимодействующими узлами в конце подшага, то есть  $USEP = (u_n)_J - (u_n)_I + GAP$ . Эта величина используется для определения нормальной силы FN. Величины  $UT(Y,Z)$  являются общими перемещениями в элементных направлениях Y и Z. Максимальное значение силы сопротивления скольжению FS есть  $\mu|FN|$ . Скольжение может происходить в обоих элементных направлениях Y и Z. Величина STAT описывает состояние элемента в конце подшага. Если  $STAT = 1$ , то зазор закрыт и скольжение отсутствует. Если  $STAT = 3$ , то зазор открыт. Величина  $STAT = 2$  указывает, что узел J скользит относительно узла I. Для бесфрикционного взаимодействия ( $\mu = 0.0$ ), сходящееся состояние элемента есть  $STAT = 2$  или 3.

Углы ориентации координатной системы элемента  $\alpha$  и  $\beta$  (смотрите рисунок 32) вычисляются программой на основании положения узлов. Эти величины соответственно выводятся, как значения ALPHA и BETA. Величина  $\alpha$  изменяется от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , а  $\beta$  от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . Элементы, лежащие вдоль оси Z, имеют значения углов ориентации  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = \pm 90^\circ$ . Заметим, что для  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta \rightarrow 90^\circ$ , элементная система координат поворачивается на  $90^\circ$  вокруг оси Z. Величина ANGLE представляет собой угол направления действия силы трения в элементной плоскости Y-Z.

Основное описание вывода результатов решения приводится в разделе 2.2 главы *Element Reference*. Смотрите главу *ANSYS Basic Analysis Guide* для описания способов просмотра результатов.

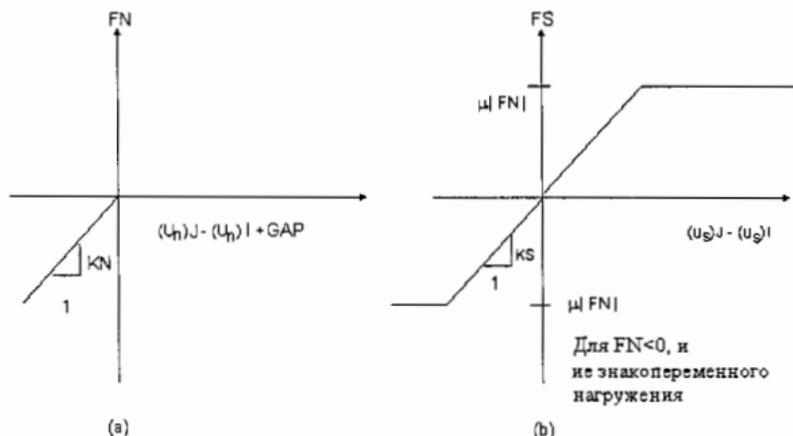


Рис. 33. Зависимость Сила-Перемещение для элемента CONTACT52

В таблице 7 используются следующие обозначения:

Двоеточие (:) в колонке **Name** указывают объекты, которые могут быть доступны при помощи метода компонентных имен [ETABLE,ESOL]. В колонках **O** и **R** указывается нахождение данных в файле *Jobname.OUT* (**O**) или файле результатов (**R**), соответственно. **Y** указывает, что объект *всегда* имеется, цифровая ссылка в табличной сноске указывает, когда объект *условно* имеется, **a** - указывает, что объект отсутствует.

Таблица 7. Определения выходных величин элемента CONTA52

Name	Definition	O	R
EL	Номер элемента	Y	Y
NODES	Узлы - I, J	Y	Y
XC, YC, ZC	Местоположение центра тяжести	Y	3
TEMP	T(I), T(J)	Y	Y
USEP	Размер зазора	Y	Y
FN	Нормальная сила (вдоль линии I-J)	Y	Y
STAT	Состояние элемента	1	1
ALPHA, BETA	Углы ориентации элемента	Y	Y
MU	Коэффициент трения	2	2
UT(Y,Z)	Перемещение (узел J - узел I) в элементных направлениях Y и Z	2	2
FS	Тангенциальная сила (суммарный вектор)	2	2
ANGLE	Главный угол силы трения в элементной плоскости YZ	2	2

Значения величины STAT означает:

- 1 – Контакт, но скольжение отсутствует
- 2 – Контакт со скольжением
- 3 – Зазор открыт

Если  $MU > 0.0$

Определяется только в центре элемента, через команду \*GET

В таблице 8 приведен список выходных величин, доступных через команду ETABLE, использующую метод Последовательных Номеров. Смотрите раздел *The General Postprocessor (POST1)* главы *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide* и раздел *Item and Sequence Number* этого учебника для дополнительной информации. В таблице 8 используются следующие условные обозначения:

<b>Name</b>	выходная величина, определенная в таблице 8
<b>Item</b>	предопределенная метка <i>Item</i> для команды ETABLE
<b>E</b>	"последовательные" номера для однозначных величин или постоянных данных элемента

**Таблица 8. Метки и номера величин элемента CONTAC52 для команд ETABLE и ESOL**

Name	Item	E
FN	SMISC	1
FS	SMISC	2
STAT	NMISC	1
OLDST	NMISC	2
USEP	NMISC	3
ALPHA	NMISC	4
BETA	NMISC	5
UTY	NMISC	6
UTZ	NMISC	7
MU	NMISC	8
ANGLE	NMISC	9

## Допущения и ограничения

Элемент действует билинейно только в статическом и нелинейном динамическом анализе. Если он используется в другом типе анализа, то элемент сохраняет свой статус на всем протяжении этого анализа. Элемент является нелинейным и требует итеративного решения. Не сошедшиеся подшаги решения считаются соответствующими неравновесным состояниям.

За исключением случая задания через реальные постоянные (NX, NY, NZ), направления зазора, узлы I и J не могут совпадать, так как их положение определяет ориентацию поверхности взаимодействия. Элемент сохраняет свою начальную ориентацию как в анализе малых, так и больших перемещений. Величина зазора может быть задана вне зависимости от местоположения узлов. Элементная система координат определяется начальным положением узлов или заданием направления зазора. Элемент может иметь повернутые узловые системы координат, так как преобразование перемещений включено в элементную систему координат.

Жесткость элемента KN не должна быть точно равна нулю. Также следует избегать не обосновано высокой величины жесткости. Скорость сходимости уменьшается с ростом жесткости. Следует помнить, что несмотря на то, что допускается изменение величины KN, однако не допустимо изменение никаких других реальных постоянных между шагами нагружения. Поэтому, если Вы планируете изменение величины KN, то Вы не можете по умолчанию переопределить значение KS, поскольку программа будет тогда пытаться переопределить величину KS, как изменяемую величину KN. Вы должны явным образом задавать KS всякий раз, когда изменяете значение KN, чтобы сохранить согласованные величины на протяжении всех шагов нагружения. Элемент не может быть деактивирован командой EKILL. Если  $\mu$  не равно нулю, то элемент неконсервативен, а также нелинейен. Неконсервативные элементы требуют, чтобы нагрузка прикладывалась совсем понемногу в ходе истории нагружения и в правильной последовательности (если существует несколько пагрузок).

## Ограничения по продуктам

Когда элемент используется в одном из приведенных ниже программных продуктов, то последние накладывают дополнительные ограничения на его использование.

### ANSYS/Professional

Этот элемент не имеет трения. Поэтому задание величины коэффициента трения MU не требуется, также не требуется задания реальной постоянной KS.

Температурная нагрузка неприменима в прочностном анализе.

Опция KEYOPT(1) не используется.

## 7.3. TARGE169 2-D Target Segment

TARGE169 -- 2-D целевой сегмент

Продукты: MP ME ST PP ED

TARGE169 используется для представления различных 2-D целевых ("target") поверхностей, связанных с контактными элементами CONTA171 и CONTA172. Контактные элементы покрывают твердотельные элементы, описывая границу деформируемого тела, и потенциально находятся в контакте с целевой поверхностью, определяемой элементами TARGE169. Эта целевая поверхность дискретно представляется целевыми сегментными элементами (TARGE169) и представляет собой нару со связанной, посредством общего набора реальных постоянных, с ней контактной поверхностью. Вы можете задать любое попутательное или вращательное перемещение элемента целевого сегмента. Вы можете также задать силы и моменты на целевых элементах. Смотрите Раздел 14.169 *ANSYS Theory Reference* для более детальной информации относительно этого элемента. Для представления 3-D целевых поверхностей, используйте 3-D целевой элемент TARGE170. Для жесткой целевой поверхности, эти элементы могут легко моделировать сложные целевые формы. Для податливых целевых поверхностей, эти элементы будут покрывать твердотельные элементы, описывая границу деформируемого целевого твердого тела.

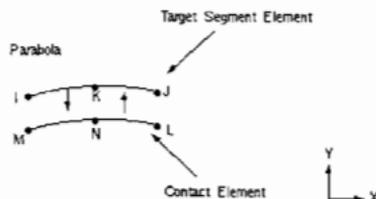


Рис. 34. Целевой поверхностный элемент TARGE169

### Входные данные

Целевая поверхность моделируется через набор *целевых сегментов*, обычно в состав одной целевой поверхности входит несколько целевых сегментов.

Целевая поверхность может быть или жесткой, или деформируемой (податливой). Для моделирования жестко-податливого контакта, жесткая поверхность должна представлять собой целевую поверхность. Для податливо-податливого контакта, одна из деформируемых поверхностей должна быть покрыта целевыми элементами. Смотрите Главу *Contact* в разделе *ANSYS Structural Analysis Guide* для дополнительной информации относительно предназначения контактной и целевой поверхностей.

Целевая и связанная с ней контактная поверхности идентифицируются через общий набор реальных постоянных. Этот набор реальных постоянных включает все реальные постоянные и для целевых, и для контактных элементов.

Каждая целевая поверхность может быть связана только с одной контактной поверхностью, и наоборот. Тем не менее, некоторые контактные элементы могут создавать контакт-

ную поверхность, и таким образом входить в контакт с одной и той же целевой поверхностью. Так же некоторые целевые элементы могут создавать целевую поверхность и таким образом входить в контакт с одной и той же контактной поверхностью. И для целевой и для контактной поверхностей, Вы можете собрать много элементов в единую целевую или контактную поверхность, но делая так, Вы можете увеличить расход компьютерных ресурсов. Для большей эффективности модели, локализируйте контактные и целевые поверхности, разделяя большие поверхности на маленькие целевые и контактные поверхности, каждая из которых содержит небольшое количество элементов.

Если контактная поверхность может контактировать более, чем с одной целевой поверхностью, Вы должны определить дублирующие контактные поверхности, которые обладают одинаковой геометрией, но относятся к различным целевым объектам (targets), то есть, имеют различные номера реальных постоянных.

Для любого определения целевой поверхности, порядок расположения узлов элемента целевого сегмента критичен для правильного нахождения контакта. Узлы должны иметь такой порядок (для 2-D поверхности), чтобы связанные с ними контактные элементы (CONTA171 или CONTA172) всегда лежали справа от целевой поверхности, когда Вы двигаетесь от целевого узла I к узлу J. Для полной жесткой окружности, контакт должен происходить с внешней стороны окружности, внутреннее контактирование не допускается.

### Жесткие целевые поверхности

Каждый целевой сегмент является простым элементом, обладающим специфической формой, называемой *типом сегмента*. Типы сегментов определяются одним, двумя или тремя узлами и кодом целевой формы, TSHAP, и описаны в таблице 9. Команда TSHAP указывает геометрию (форму) элемента. Размеры сегмента определяются реальной постоянной (R1), а положение сегмента задается узлами. ANSYS поддерживает шесть 2-D типов сегментов, смотрите таблицу 9.

Таблица 9. 2-D Типы сегментов, коды целевой формы и узлы

TSHAP	Segment Type	Node 1 (DOF)	Node 2 <sup>1</sup> (DOF)	Node 3 (DOF)	R1 <sup>2</sup>	R2
LINE	Прямая линия	Первый край (UX, UY), (TEMP)	Второй край (UX, UY), (TEMP)	Нет	Нет	Нет
ARC	Дуга, по часовой стрелке	Первый край (UX, UY), (TEMP)	Второй край (UX, UY), (TEMP)	Центр окружности (UX, UY), (TEMP)	Нет	Нет
CARC	Дуга, против часовой стрелки	Первый край (UX, UY), (TEMP)	Второй край (UX, UY), (TEMP)	Центр окружности (UX, UY), (TEMP)	Нет	Нет
PARA	Парабола	Первый край (UX, UY), (TEMP)	Второй край (UX, UY), (TEMP)	Посередине кривой (UX, UY), (TEMP)	Нет	Нет
CIRC	Окружность	Центр окружности (UX, UY), (TEMP)	Нет	Нет	Радиус	Нет
PILO	Pilot node	2-D: (UX, UY, ROTZ), (TEMP)	Нет	Нет	Нет	Нет

1. Степени свободы зависят от установок опции KEYOPT(1) соответствующего контактного элемента. Для дополнительной информации смотрите описание элемента CONTA171 или CONTA172.
2. Когда создание окружности идет путем прямого генерирования, Вы должны перед созданием элемента определить реальную постоянную элемента R1.

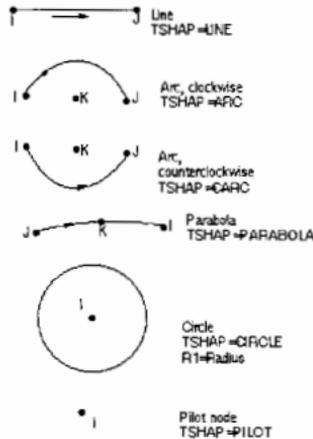


Рис. 35. 2-D типы сегментов TARGE169

Для обычной жесткой целевой поверхности, Вы можете определить элементы целевого сегмента путем прямого генерирования. Вы, во-первых, должны указать аргумент *SHAPE* команды TSHAP. Когда создаете прямым генерированием окружности, Вы должны также определить реальную постоянную R1 перед созданием элемента. Реальная постоянная R1 (смотрите таблицу 9) определяет радиус целевой окружности.

Обычно для 2-D жестких поверхностей, элементы целевых сегментов могут быть определены путем сеточного разбиения линий (LMESH). Вы можете также использовать сеточное разбиение ключевых точек (KMESH) для генерирования "ведущего" (pilot) узла.

Если целевые элементы TARGE169 будут создаваться путем автоматического сеточного разбиения (LMESH или KMESH), то команда TSHAP игнорируется, и ANSYS выбирает корректную форму автоматически.

Ведущий узел обеспечивает удобный, эффективный путь назначения граничных условий, таких как вращения, перемещения и моменты, прикладываемые целиком к жесткой целевой поверхности. Вы назначаете условия только на ведущий узел, исключая необходимость приложения граничных условий к отдельным узлам, и уменьшая тем самым вероятность ошибки. Ведущий узел, в отличие от других типов сегментов, используется для задания степеней свободы для целевой поверхности целиком. Это узел может (но не обязательно) быть одним из узлов целевой поверхности. Все возможные движения целевой поверхности будут комбинацией перемещений и вращения относительно этого узла. Граничные условия (включая перемещение, вращение, силу и момент) для целой целевой поверхности могут

быть заданы только на "ведущем" узле.

По умолчанию, ANSYS автоматически фиксирует степени свободы для узлов жесткой целевой поверхности, если они не имеют прямых ограничений (KEYOPT(2)=0). Если Вы хотите, Вы можете отключить автоматическую установку граничных условий, установив KEYOPT(2)=1.

По умолчанию программа устанавливает значение температуры равное TUNIF, в случае же, если эта величина явно не задана, то - нулем. Для теплового контактного анализа, например, моделирования конвекции и радиационного обмена, поведение тепловой контактной поверхности (или "ближнее поле" или "свободная" поверхность) обычно базируется на контактном состоянии (статусе). Контактное состояние действует на поведение контактной поверхности следующим образом:

- Если контактная поверхность находится вне области определения контактного взаимодействия ("pinball" region), то ее поведение аналогично свободной поверхности. В этом случае, конвективный и радиационный теплообмен происходит с температурой внешней среды.
- Если контактная поверхность находится внутри области определения контактного взаимодействия, то ее поведение будет как у поверхности ближней зоны (near-field surface).

Несмотря на это, состояние тепловой контактной поверхности игнорируется, если установлено значение опции KEYOPT(3)=1, и поверхность всегда ведет себя, как свободная поверхность (смотрите описание элементов CONTA171 и CONTA172).

### Податливые целевые поверхности

Для обычных деформируемых поверхностей, Вы обычно будете использовать команду ESURF, чтобы покрыть целевыми элементами границу существующего сеточного разбиения. Отметим, что типы сегментов (команда TSHAP) не должна использоваться в этом случае.

### Сводка входных параметров

Резюме входных параметров элемента приведено в таблице 10. Основное описание их дано в Разделе 2.1. Описание реальных постоянных FKN, FTOLN, ICONT, PINB, PMAX, PMIN, TAUMAX, CNOF, FKOP смотрите в описании элементов CONTA171 и CONTA172.

Таблица 10. Входные данные элемента TARGE169

Имя элемента	TARGE169
Узлы	I, J, K (J и K требуются не для всех типов сегментов)
Стенны свободы	UX, UY, ROTZ, TEMP (ROTZ используется только для pilot узла )
Реальные постоянные	R1, R2, FKN, FTOLN, ICONT, PINB, PMAX, PMIN, TAUMAX, CNOF, FKOP
Свойства материала	Не задаются

Поверхностные нагрузки	Нет	
Твердотельные нагрузки	Нет	
Специальные свойства	Нелинейность, смерть и рождение	
KEYOPT (2)	Граничные условия для узлов жесткой целевой поверхности:	
	0 -	Автоматически определяются программой ANSYS
	1 -	Задаются пользователем
KEYOPT (3)	Поведение тепловой контактной поверхности	
	0 -	Базируется на контактом состоянии
	1 -	Трактруется, как свободная поверхность

## Выходные данные

Имеющиеся дополнительные выходные данные результатов, связанные с элементом, представлены в таблице 11. Следующие обозначения используются в таблице 11:

Двоеточие (:) в колонке **Имя** указывают объекты, которые могут быть доступны при помощи метода компонентных имен [ETABLE,ESOL]. Колонки **O** и **R** указывают нахождение данных в файле *Jobname.OUT* (**O**) или файле результатов (**R**). **Y** указывает, что объект всегда имеется, цифровая ссылка в табличной ссылке указывает, когда объект условно имеется, а **A** указывает, что объект отсутствует.

Таблица 11. Определения выходных величин элемента TARGE169

Имя	Определение	O	R
<i>EL</i>	Номер элемента	Y	Y
<i>NODES</i>	Узлы I, J и K	Y	Y
<i>ITARGET</i>	Номер целевой поверхности (назначаемой ANSYS)	Y	Y
<i>TSHAP</i>	Тип формы сегмента	Y	Y
<i>ISEG</i>	Нумерация сегмента	1	1

1. Определяется программой ANSYS

## Допущения и ограничения

2-D сегментные элементы должны быть определены в плоскости X-Y. Для круговой дуги третий узел определяет действующий центр окружности и должен быть точно определен, когда генерируется элемент, и должен перемещаться согласованно с другими узлами в процессе деформации. Если третий узел не перемещается согласованно с другими узлами, то форма дуги будет изменена в ходе движения узлов. Чтобы обеспечить корректное поведе-

ние, приложите все граничные условия к ведущему узлу. Для параболических сегментов третья точка должна находиться в середине параболы.

Вообще говоря, Вы не должны изменять реальную постоянную R1 между шагами нагрузки или в ходе рестарта; иначе программа ANSYS примет, что радиус окружности изменен между шагами нагрузки. Когда используется прямая генерация, реальная постоянная R1 для окружностей должна быть определена перед введением элементных узлов. Если задается множество жестких окружностей, каждая из которых имеет свой радиус, они должны определяться разными целевыми поверхностями.

Для жестких поверхностей, внешние силы могут быть приложены только в пилотном узле (и ни в каких других узлах целевой поверхности). Если ведущий узел задается для целевой поверхности, ANSYS будет игнорировать граничные условия на любых узлах целевой поверхности за исключением ведущего узла. Для каждого ведущего узла, ANSYS будет автоматически определять внутренний узел и внутренние ограничивающие уравнения. Вращательная степень свободы ведущего узла согласовывается с поступательными степенями свободы внутреннего узла путем внутренних ограничительных уравнений. Вы не можете использовать уравнения связи и ограничений для ведущих узлов.

## Ограничения по продуктам

Не имеется ограничений для этого элемента.

## 7.4. CONTA171

CONTA171 -- двумерный двухузловой контактный элемент "поверхность-поверхность"

Продукты: MP ME ST PP ED

CONTA171 используется для представления контакта и скольжения между 2-D "целевыми" поверхностями (TARGE169) и деформируемой поверхностью, представляемой этим элементом. Этот элемент имеет две степени свободы в каждом узле: перемещение в узловых направлениях X и Y. Этот элемент располагается на поверхности 2-D твердого тела, оболочечного или балочного элемента без срединных узлов (PLANE42, PLANE182, HYPER56, VISCO106, SHELL51, BEAM3, BEAM23 и MATRIX50). Он имеет те же самые геометрические характеристики, как стороны твердотельных, оболочечных или балочных элементов, с которыми он связан (смотрите фигуру 4.171-1). Контакт происходит, когда поверхность элементов проникает в один из элементов целевого сегмента (TARGE169) на заданной целевой поверхности. Допускается Кулоново трение и трение сдвигового напряжения (shear stress). Смотрите Раздел 14.171 *ANSYS Theory Reference* для дополнительной информации относительно этого элемента. Имеются также и другие контактные элементы "поверхность-поверхность" (CONTA172, CONTA173, CONTA174).



Рис. 36. Двумерный двухузловой контактный элемент CONTA171 "поверхность-поверхность"

### Входные данные

Геометрия и местоположение узлов показано на рисунке 36. Элемент определяется двумя узлами (подстилающие твердотельные, оболочечные или балочные элементы не должны иметь срединных узлов). Если же подлежащие твердотельные, оболочечные или балочные элементы имеют срединные узлы, то используйте элемент CONTA172. Ось X элемента расположена вдоль линии I-J элемента. Правильный порядок узлов контактного элемента критичен для правильного определения контакта. Узлы должны располагаться так, чтобы "цель" лежала с правой стороны от контактного элемента, когда движетесь от первого узла контактного элемента ко второму, как на фигуре 4.171-1. Смотрите Главу 9 *ANSYS Structural Analysis Guide* относительно информации по автоматическому генерированию элементов, используя команду ESURF.

2-D элементы контактной поверхности связываются с 2-D элементами целевого сегмента (TARGE169) через общий для них набор реальных постоянных. ANSYS ищет контакт

только между поверхностями с одним и тем же набором реальных постоянных. Для моделирования или жестко-податливого, или податливо-податливого контакта деформируемая (или одна из них) поверхность должна быть выбрана контактной поверхностью. Смотрите Главу 9 *ANSYS Structural Analysis Guide* для получения более подробной информации относительно назначения контактной и целевой поверхностей.

Если более, чем одна целевая поверхность контактирует с одной и той же границей твердотельных элементов, то Вы должны определить отдельные контактные элементы, которые используют одну и ту же геометрию, но относятся к различным целям (целевые поверхности, которые имеют различные наборы (номера) реальных постоянных), или Вы должны скомбинировать две целевые поверхности в одну (целевые элементы, которые совместно используют одинаковые наборы (номера) реальных постоянных).

Этот элемент поддерживает различные 2-D напряженные состояния, включая плосконапряженное, плоскодеформированное и осесимметричное состояния. Напряженное состояние автоматически определяется по соответствующему заданному состоянию подлежащего элемента. Тем не менее, если подлежащий элемент является суперэлементом, то Вы должны использовать опцию KEYOPT(3) для задания вида напряженного состояния.

Реальная постоянная R1 используется только для определения радиуса, если соответствующая связанная форма целевой поверхности (TARGET169) является окружностью. Если подлежащий элемент является суперэлементом с плосконапряженным состоянием с заданной толщиной (KEYOPT(3)=3), используйте для задания реальную постоянную R2 для задания толщины элемента (R2 по умолчанию - 1).

Используйте реальную постоянную FKN для задания коэффициента нормальной контактной жесткости. Диапазон коэффициента 0.001-100, а по умолчанию - 1.0. Маленькая величина обеспечивает легкую сходимости, но большее проникновение. По умолчанию величина соответствует объемной деформации. Если доминирует изгибная деформация, то мы рекомендуем использование малых величин (0.01-0.1). Если Вы сталкиваетесь с трудностями в сходимости или имеете слишком большое проникновение, Вы можете отрегулировать этот жесткостной коэффициент. В случаях, когда подлежащие элементы имеют пластические свойства, определенные командой TB (активные или неактивные), нормальная контактная жесткость будет уменьшена в 100 раз.

Программа ANSYS автоматически по умолчанию задает величину тангенциальной контактной жесткости, которая пропорциональна MU и нормальной контактной жесткости. Эта величина тангенциальной жесткости соответствует величине FKT, принимаемой по умолчанию равной 1.0. Вы можете установить различные значения тангенциальной жесткости, задавая свои значения FKT. Положительная величина FKT является множителем (по умолчанию равным 1.0); отрицательное значение FKT означает абсолютную величину тангенциальной жесткости.

Используйте реальную постоянную FTOLN для задания коэффициента допуска, который прикладывается по направлению нормали к поверхности. Диапазон этого множителя меньше 1.0 (обычно меньше, чем 0.2), по умолчанию принимается равным 0.1, и базируется на толщине подлежащего элемента. Этот коэффициент используется для определения, что контактная совместимость (или совместимость проникания) удовлетворяется, когда используется по умолчанию метод штрафов + метод Лагранжа (KEYOPT(2)=0). Контактная совместимость удовлетворяется, если проникновение находится в пределах зазора, кратного величине FTOLN к глубине подлежащего твердотельного, оболочечного или балочного элемента, смотрите рисунок 37 на примере глубины подлежащего твердотельного элемента.

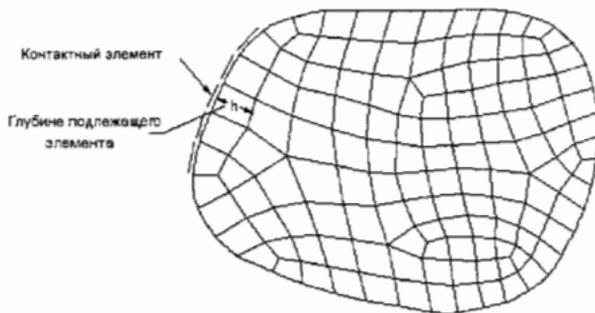


Рис. 37. Размер контактного элемента и глубина подлежащего элемента

Будьте внимательны при задании величин FKN и FTOLN. Если значение FKN слишком мало, а значение FTOLN слишком велико, то Вы можете получить слишком большое проникновение. Если величина FKN очень большая, или значение FTOLN слишком мало, то Вы можете столкнуться с проблемой сходимости.

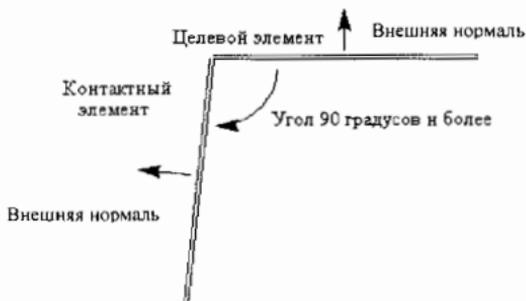
Для исключения конфигурации ложного контакта, которые возникают, когда целевой сегмент далек от контактного элемента, но есть проникновение, Вы можете указать "pinball region" - область поиска узлов контактной пары (круг, окружающий контактный элемент) через реальную постоянную PINB. По умолчанию, программа ANSYS принимает размер этой области равным четырехкратной глубине подлежащего твердотельного, оболочечного или балочного элемента для жестко-податливого контакта, и двукратной величине для податливо-податливого контакта.

В некоторых случаях симметричного контакта, в число которых входит самоконтакт, ANSYS может ошибочно принимать контакт между контактной и целевой поверхностями, которые находятся в очень близком геометрическом положении. Это обычно происходит в углах, и может происходить по причине начального геометрического положения элементов или в ходе деформации во время анализа. Когда две поверхности находятся в пределах "pinball region", и угол между ними меньше 90 градусов, ANSYS полагает, что произошло слишком большое проникновение. Рисунок 38 иллюстрирует этот сценарий.

Вы можете предупредить ANSYS о том, чтобы он принял во внимание такие случаи ложного контакта, установив опцию KEYOPT(8)=1. ANSYS будет тогда игнорировать контакт с перепрониканием, который может происходить благодаря одному из следующих моментов:

- Изначально определенное проникновение больше на 20 % величины контактного допуска (FTOLN).
- Контактный статус внезапно изменяется из состояния дальнего контакта в состояние перепроникания (изображено на рисунке 38 б).

**Замечание** – Внимательно проверьте Вашу модель перед использованием KEYOPT(8)=1. Используйте эту опцию, только если изменение величины PINB не может предупредить ложный контакт. Если Вы используете эту опцию, и истинное проникновение удовлетворяет одному из двух приведенных выше сценариев, то это будет игнорироваться.



а) Контакт не установлен



б) Контакт ошибочно установлен. Это может быть или благодаря начальному геометрическому положению, или деформации в ходе анализа. Если KEYOPT(8)=1, то такой контакт игнорируется.

**Рис. 38. Определение ложного контакта**

KEYOPT(8) часто полезна для самоконтактных проблем, таких как деформация резиновых манжет (boots) или уплотнений (seals).

В некоторых задачах, контактные и целевые поверхности не имеют начального контакта, вследствие или численного округления при геометрическом моделировании и сеточном разбиении, или вследствие кривизны или иррегулярности поверхностей. Эти ситуации приводят к сингулярной (нулевой или отрицательной ведущий элемент (pivot)) матрице жесткости в статическом анализе. Чтобы преодолеть эти проблемы, задайте начальное смыкание (closure) (ICONT), допускающее начальное проникновение (PMIN, PMAX), или определите сдвиг контактной поверхности (CNOF).

Используйте реальную постоянную ICONT для задания коэффициента начального смыкания. Если начальный зазор меньше определенного допуска (ICONT есть множитель для глубины подлежащего твердотельного, оболочечного или балочного элемента), то про-

грамма ANSYS рассматривает модель в состоянии начального контакта. Если Вы не задали ICONT, тогда ANSYS обеспечивает маленькую величину (меньше чем 0.03), в зависимости от геометрических размеров. Задайте очень маленькую величину, если Вы хотите установить незначительное замыкание начального контакта.

Если Вы указываете PMIN и PMAX и ненулевые ограничения на целевой поверхности в начале анализа, ANSYS перемещает целиком целевую поверхность, которая попадает в диапазон PMIN ... PMAX, в контакт с контактной поверхностью. Более того, если начальное проникание больше чем PMAX, ANSYS приводит целевую поверхность к состоянию уменьшенного проникания в диапазон PMIN/PMAX. При контакте двух податливых тел эта методика приводит к тому, что все деформируемое тело, связанное с целевой поверхностью, целиком оказывается в контакте с контактной поверхностью. Убедитесь, что это деформируемое тело не связано ни с какими другими контактными или целевыми поверхностями.

Реальная постоянная CNOF определяет величину сдвига, прикладываемую к контактной поверхности. Величина этого сдвига может быть как положительной, так и отрицательной. Положительный сдвиг означает, что контактная поверхность целиком смещается по направлению к целевой поверхности (то есть, проникание увеличивается или зазор уменьшается). Отрицательный сдвиг означает, что контактная поверхность целиком отдалается от целевой поверхности (то есть, проникание уменьшается или зазор увеличивается).

*Примечание* - При выборе KEYOPT(5), программа ANSYS может автоматически обеспечить CNOF, которая построит модель в конфигурации безулового касания ("just in touch"). В этом случае ICONT по умолчанию равно нулю. Опция KEYOPT(5)=1 закрывает зазор. KEYOPT(5)=2 уменьшает начальное проникание. KEYOPT(5)=3 или закрывает зазор, или уменьшает проникание, в зависимости от начального контактного состояния.

Для балок и оболочек "толщинное" смещение может быть автоматически включено, если KEYOPT(11)=1.

Истинное проникновение, следовательно, включает две части: проникновение благодаря геометрии и проникновение вследствие положительного сдвига контактной поверхности (смотрите рисунок 39).

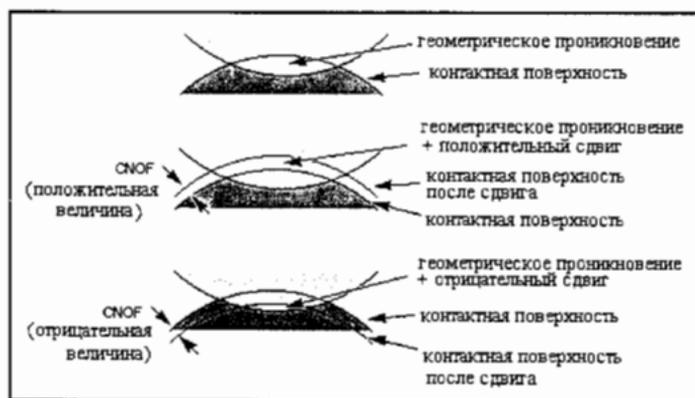


Рис. 39. Составляющие истинного проникновения

Чтобы принять во внимание начальное проникание или смоделировать начальное перекрытие, Вы можете включить оба или один из двух эффектов.

- Чтобы включить геометрическое проникание и исключить сдвиг, установите  $CNOF=0.0$  (по умолчанию).
- Чтобы включить оба эффекта, которые сразу вступают в действие (stepped) на первом шаге нагрузки, установите  $KEYOPT(9)=0$  (по умолчанию) и установите положительную или отрицательную величину сдвига  $CNOF$ .
- Чтобы игнорировать начальное проникновение обеих частей, установите  $KEYOPT(9)=1$ . Когда  $KEYOPT(12)=4$  или 5, эта установка опции  $KEYOPT(9)$  будет также игнорировать начальные усилия в пружинах в открытом зазоре, создавая таким образом изначально идеальную поверхность контакта, не имеющую исходных сил, действующих в контакте.
- Чтобы приложить линейно нарастающее начальное проникание на первом шаге нагружения (для моделирования проблемы начального перекрытия, например), установите  $KEYOPT(9)=2$ . Также установите  $KVC,0$  и не указывайте никакой внешней нагрузки на первом шаге нагружения.
- Чтобы игнорировать начальное проникание, связанное с геометрией, но включить сдвиг, установите  $KEYOPT(9)=3$ . Когда  $KEYOPT(12)=4$  или 5, эта установка опции  $KEYOPT(9)$  будет также игнорировать начальные усилия в пружинах в открытом зазоре, создавая таким образом изначально идеальную поверхность контакта, не имеющую исходных сил, действующих в контакте.
- Чтобы приложить линейно нарастающий начально заданный сдвиг (в то время как игнорируется начальное проникание по геометрии), установите  $KEYOPT(9)=4$ . В этом случае, Вы должны также установить  $KVC,0$  и не задавать внешней нагрузки на первом шаге нагружения. Когда  $KEYOPT(12)=4$  или 5, эта установка опции  $KEYOPT(9)$  будет также игнорировать начальные усилия в пружинах в открытом зазоре, создавая таким образом изначально идеальную поверхность контакта, не имеющую исходных сил, действующих в контакте.

Для дополнительной информации по использованию реальных постоянных в контактном анализе, смотрите Главу 9 *ANSYS Structural Analysis Guide*.

Для модели трения Кулона коэффициент трения  $MU$  – это единственное используемое свойство материала для этого элемента. Используйте  $MU=0$  для задания бесфрикционного контакта, то есть контакта без трения.  $MU$  может быть задана, как функция от температуры. Если подлежащий элемент есть суперэлемент (**MATRIX50**), набор свойств материала должен быть такой же, как один из используемых исходных элементов, которые собраны в суперэлементе.

Программа ANSYS предлагает одно расширение классической модели трения Кулона: **TAUMAX** есть максимальное контактное трение в единицах напряжения. Эта величина может быть близка к  $\sigma_y/\sqrt{3}$ , где  $\sigma_y$  есть предел текучести деформируемого материала. Это максимальное напряжение контактного трения может быть введено так, чтобы не обращать внимания на величину нормального контактного давления, скольжение будет происходить, если напряжение трения достигает этой величины. Вы обычно используете **TAUMAX**, когда контактное давление становится очень большим (такое как при процессе объемной металлоштампки). **TAUMAX** по умолчанию -  $1.0e20$ .

Другой реальной постоянной используемой при задании закона трения является когезия  $CONE$  (по умолчанию  $CONE=0$ ), которая имеет размерность напряжения. Она обеспечивает сопротивление скольжению при нулевом нормальном давлении (смотрите рисунок 40).

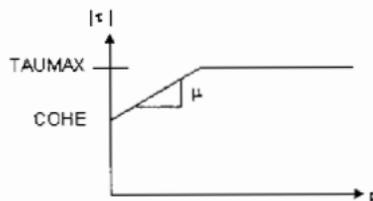


Рис. 40. Сопротивление контактному скольжению

Контактные проблемы, учитывающие трение, продуцируют несимметричную матрицу жесткости. По умолчанию, программа ANSYS решает симметричные системы уравнений. Однако, когда скольжение с трением доминирует в задаче, анализ и сходимость становятся более трудными, поэтому Вы должны использовать выбор несимметричной матрицы жесткости, выполнив команду **NROPT,UNSYM**.

Нормальная и тангенциальная контактные жесткости могут быть обновлены в ходе проведения анализа или автоматически (благодаря эффекту больших деформаций, который изменяет жесткость подлежащих элементов), или напрямую путем задания значений величин **FKN** или **FKT**. Опция **KEYOPT(10)** обуславливает, как модифицируются нормальная и тангенциальная жесткости:

- **KEYOPT(10)=0** подавляет любые изменения контактной жесткости для элементов, которые уже имеют контактное состояние - закрытое. Для элементов, которые изменяют состояние из открытого контакта на закрытое, контактная жесткость будет модифицироваться на каждом подшаге.
- **KEYOPT(10)=1** допускает изменение контактной жесткости для элементов, которые уже имеют контактное состояние - закрытое, но только между шагами нагружения или при рестарте. Для элементов, которые изменяют состояние из открытого контакта на закрытое, контактная жесткость будет модифицироваться на каждом подшаге.
- **KEYOPT(10)=2** такая же, как и **KEYOPT(10)=1**, за исключением того, что программа сама будет на каждом подшаге модифицировать жесткость для всех элементов, невзирая на их статус.

Используйте опцию **KEYOPT(12)** для моделирования различного поведения контактной поверхности.

- **KEYOPT(12)=0** моделирует стандартный односторонний контакт, то есть давление равно нулю, если произошло разъединение.
- **KEYOPT(12)=1** моделирует достаточно грубый фрикционный контакт, где отсутствует скольжение. Этот случай соответствует бесконечному коэффициенту трения и игнорирует свойство материала **MU**.
- **KEYOPT(12)=2** моделирует неразделяемый контакт ("no separation"), в котором целевая и контактная поверхности "сцепляются" (хотя проскальзывание допускается)

для последующего анализа, как только контакт установлен, то есть после первого взаимодействия поверхности не могут разойтись.

- KEYOPT(12)=3 моделирует скрывающийся контакт, в котором целевая и контактная поверхности соединяются во всех направлениях (как только контакт установлен) для последующего анализа.
- KEYOPT(12)=4 моделирует неразделяемый контакт, в котором точки обнаружения контакта, которые или изначально находились внутри области поиска узлов контактной пары ("pinball region"), или однажды вошли в контакт, навсегда прикреплены к целевой поверхности вдоль нормали к контактной поверхности (скольжение допускается).
- KEYOPT(12)=5 моделирует скрывающийся (связывающий) контакт, в котором точки обнаружения контакта, которые или изначально находились внутри области поиска узлов контактной пары ("pinball region"), или однажды вошли в контакт, навсегда прикреплены к целевой поверхности вдоль нормального или касательного направления к контактной поверхности (полностью связаны).
- KEYOPT(12)=6 моделирует скрывающийся контакт, в котором точки обнаружения контакта, которые изначально находятся в контакте, будут оставаться принадлежащими целевой поверхности, а точки, которые имели статус открытого контакта (open state), будут оставаться в этом состоянии в ходе всего анализа.

Для неразделяемого и скрывающегося контакта, Вам может быть необходимо задание реальной постоянной FKOP, которая является множителем при вычислении усилия, прикладываемого при открытии контакта. Истинное усилие (жесткость) открытия контакта равно FKOP умноженной на контактную жесткость, когда контакт закрыт (то есть для предотвращения открытия контакта прикладывается усилие, равное FKOP умноженное на усилие при закрытом контакте).

По умолчанию, FKOP=1. Неразделяемый и скрывающийся контакты генерируют силу "pull back" ("оттаскивания", "отдергивания"), когда происходит раскрытие контакта, и эта сила не может полностью предотвратить разделения контактных поверхностей.

Вы можете задать больший коэффициент силы FKOP для уменьшения разделения. В некоторых случаях стандартного контакта (KEYOPT(12)=0), разделение ожидается, в то время как "соединение" все же необходимо, чтобы предупредить общее жесткое движение твердого тела. Вы можете иметь необходимость задать маленькое значение FKOP (иногда называемое как пружина малой жесткости (weak spring)), чтобы предупредить общее жесткое движение твердого тела.

Для реальных постоянных ICONT, FKN, FTOLN, PINB, PMAX, PMIN и FKOP, Вы можете признать значение по умолчанию или задать положительную или отрицательную величину. ANSYS интерпретирует положительное значение, как *масштабный фактор*, а отрицательное значение, как *абсолютное значение*. Например, положительное значение 0.1 для ICONT указывает фактор начальной замкнутости равный 0.1 от глубины подстилающего элемента. В то же время, отрицательная величина 0.1 указывает действующий диапазон регулировки равный 0.1 используемой единицы длины. Вы можете изменять FKN, FTOLN, PINB и FKOP между шагами нагрузки.

## Тепловой контакт

Комбинированный термочувствительный контакт включается, если установлена опция KEYOPT(1)=1 (активируются прочностные и тепловые степени свободы). Характерные черты теплового контакта:

- Контактная теплопроводность между двумя контактирующими поверхностями.
- Тепловая конвекция между свободной поверхностью и окружающей средой или между двумя разделенными поверхностями с очень маленьким зазором.
- Тепловой радиационный обмен между свободной поверхностью и окружающей средой или между двумя разделенными поверхностями с очень маленьким зазором.
- Выделение тепла вследствие диссипации энергии при трении.
- Заданный тепловой поток.

## Моделирование контактной теплопроводности

Теплообмен между двумя контактирующими поверхностями определяется выражением:

$$q = TCC * (T_i - T_c)$$

где:

$q$  Тепловой поток через поверхность (единицу поверхности).

TCC Коэффициент контактной теплопроводности.

$T_i$  и  $T_c$  Температуры в контактирующих точках на целевой и контактной поверхностях.

Величина TCC вводится через реальную постоянную, которая может быть функцией температуры, давления, времени и местоположения, используя опцию %TABLE%. TCC имеет размерность - [Тепловая энергия / (Время \* Площадь \* Градус)]. Если имеет место контакт, то маленькая величина TCC определяет меру несовершенства контакта, что приводит к температурному скачку при переходе через контактную поверхность. Для больших значений TCC, скачок температур на границе стремится к исчезновению, и мы приближаемся к идеальному тепловому контакту. Когда нет состояния контакта, то предполагается, что нет теплового потока через область контакта. Если установлены условия "ограниченного" или неразделяемого контактного взаимодействия, то между двумя поверхностями, разделенными минимальным зазором, может иметь место теплопроводность.

## Моделирование конвекции

Когда контакт открыт, то может иметь место конвективный теплообмен. Он определяется выражением:

$$q = CONV * (T_c - T_c)$$

где коэффициент конвекции CONV задается через команду SFE, используя KVAL=0 и CONV, как метки поверхностной нагрузки. Значение  $T_c$  определяется одним из двух путей:

**Конвекция "ближнего поля":** Когда установлено пересечение контактной и целевой поверхностей (в направлении нормали к контактной границе), и величина зазора мала

меньше, чем радиус области поиска контактных узлов (the pinball radius), то  $T_e$  принимается равной температуре целевой поверхности в месте пересечения. В этом случае программа учитывает конвективный теплообмен между контактной и целевой поверхностями.

**Конвекция "свободной поверхности":** Если это пересечение не установлено или зор больше радиуса области поиска контактных узлов, или опция ответного целевого элемента установлена KEYOPT(3)=1, то за  $T_e$  принимается температура внешней среды, задаваемая командой SFE таблично с KVAL=2 и CONV. В этом случае не происходит теплообмена между контактными и целевыми элементами.

### Моделирование радиационного теплообмена

Когда контакт открыт, то может иметь место лучистый теплообмен. Он определяется уравнением:

$$q = RDVF * EMIS * SBCT [(T_e + TOFFST)^4 - (T_c + TOFFST)^4]$$

где:

- TOFFST** Разность температур между абсолютным нулем и нулем используемой температурной шкалы (задается командой TOFFST).
- EMIS** Степень черноты поверхности (определяется, как свойство материала).
- SBCT** Постоянная Стефана-Больцмана (задается, как реальная постоянная). Она не определяется по умолчанию, и поэтому, если она не задана, то радиационный эффект исключается из рассмотрения.
- RDVF** Коэффициент радиационного поля зрения вводится (the radiation view factor), как реальная постоянная (по умолчанию - 1). Величина RDVF может быть определена, как функция температуры, величины зазора, времени и местоположения, используя опцию %TABLE%.

Для "ближнего поля", когда установлено пересечение контактной и целевой поверхностей (в направлении нормали к контактной границе), и величина зазора много меньше, чем радиус области поиска контактных узлов (the pinball radius), то  $T_e$  принимается равной температуре целевой поверхности в месте пересечения. Моделирование радиационного теплообмена предполагает, что он происходит в направлении нормали между двумя поверхностями с малым зазором. По умолчанию считается, что RDVF является функцией зазора, геометрия также может быть принята в рассмотрение. Используйте в общем случае метод Radiosity Solver (для дополнительной информации обратитесь к главе *ANSYS Thermal Analysis Guide*).

Для "свободной поверхности", величина  $T_e$  становится внешней температурой, определяемой как температура внешней среды ("bulk temperature") командой SFE (используя KVAL=2 и CONV). Пользовательское задание RDVF игнорируется для этого случая (RDVF=1.0). Другие условия радиационного теплообмена признаются пользовательским заданием величины RDVF.

### Задание теплового потока

Тепловой поток может быть введен, как поверхностная нагрузка на контактные элементы, используя команду SFE с меткой HFLUX. Однако следует помнить, что на контактном элементе может быть задана или конвекция, или внешний тепловой поток, но не оба одновременно.

## Выделение тепла вследствие трения

В совместном термомеханическом контактно-моделировании, интенсивность диссипации определяется выражением:

$$q = FHTG * \tau * V$$

где:

$\tau$  Эквивалентное напряжение трения.

$V$  Скорость скольжения.

**FHTG** Часть диссипирующей энергии, обращающейся в тепловую энергию. Эта величина, по умолчанию, полагается равной 1 и может быть задана, как реальная постоянная.

Количество диссипирующей тепловой энергии на контактной и целевой поверхностях определяется выражениями:

$$q_c = FWGT * FHTG * \tau * V$$

и

$$q_T = (1 - FWGT) * FHTG * \tau * V$$

где  $q_c$  - контактная часть выделившегося тепла, а  $q_T$  - целевая часть, и FWGT есть весовой фактор для распределения тепла между контактной и целевой поверхностями (задается, как реальная постоянная). По умолчанию полагается FWGT=0.5.

Общий список входных величин и параметров приведен в таблице 12. Основные описания входных параметров элементов приведены в разделе *Element Input* главы *Element Reference*.

**Таблица 12. Входные данные элемента CONTA171**

Имя элемента	CONTA171
Узлы	I, J
Степени свободы	UX, UY
Реальные постоянные	R1, R2, FKN, FTOLN, ICONT, PINB, PMAX, PMIN, TAUMAX, CNOF, FKOP, FKT, CONE, TCC, FHTG, SBCT, RDVF, FWGT
Свойства материала	MU
Поверхностные нагрузки	Конвекция, грань 1 (I-J) Тепловой поток, грань 1 (I-J)
Специальные свойства	Нелинейность, большие перемещения, смерть и рождение
KEYOPT(1)	Выбор степеней свободы 0 -- UX, UY 1 -- UX, UY, TEMP

KEYOPT(2)	0 - Функция штрафов + множители Лагранжа (по умолчанию) 1 - Функция штрафов
KEYOPT(3)	0 - Использовать с h-элементами (не суперэлементами) 1 - Осесимметричная проблема (использовать только с суперэлементами) 2 - Плосконапряженная/плоскодеформируемая проблема (использовать только с суперэлементами) 3 - Плосконапряженная проблема с учетом толщины (использовать только с суперэлементами)
KEYOPT(4)	Местоположение точек определения контакта 0 - В Гауссовых точках (для основных случаев) 1 - В узловых точках (рекомендуется только для контакта "узлов-поверхность")
KEYOPT(5)	Автоматическая корректировка CNOF 0 - Нет автоматической корректировки 1 - Зазор закрыт 2 - Уменьшенное проникновение 3 - Зазор закрыт/ уменьшенное проникновение
KEYOPT(7)	Управление приращением нагрузки 0 - Управление отсутствует 1 - Автоматическая бисекция приращения 2 - Изменение в контактном предсказании производится, чтобы поддерживать приемлемое приращение время/нагрузка* 3 - Изменение в контактном предсказании производится, чтобы добиться минимального приращения время/нагрузка всякий раз, когда происходит изменение контактного статуса*  * Включает автоматическую бисекцию приращения. Она активируется только, если SOLCONTROL,ON,ON.
KEYOPT(8)	Предотвращение ложного контакта (симметричный контакт, включая самоконтакт) 0 - Предотвращение отсутствует 1 - Ложный контакт устанавливается и игнорируется
KEYOPT(9)	Эффект начального проникновения 0 - Включает и начальное геометрическое проникновение и сдвиг 1 - Исключает и начальное геометрическое проникновение и сдвиг 2 - Включает и начальное геометрическое проникновение и сдвиг, но с эффектом последовательного нарастания 3 - Включает только сдвиг (исключает начальное геометрическое проникновение или зазор*) 4 - Включает только сдвиг, но с эффектом последовательного нарастания  * Для KEYOPT(9)=1, 3 или 4, эффект начального зазора учитывается только, если KEYOPT(12) = 4 или 5.

KEYOPT(10)	Обновление контактной жесткости 0 - Нет 1 - Каждый шаг нагружения 2 - Каждый подшаг
KEYOPT(11)	Эффект балочно-оболочечной толщины 0 - Исключен 1 - Включен
KEYOPT(12)	Поведение контактной поверхности 0 - Стандартное 1 - Грубое 2 - Неразделяемое (скольжение возможно) 3 - Сцепленное 4 - Неразделяемое (всегда) 5 - Сцепленное (всегда) 6 - Сцепленное (изначальный контакт)

## Выходные данные

Выходные данные, связанные с элементом, доступны в двух видах:

- узловые перемещения включены в общее узловое решение
- дополнительный элементный вывод представлен в таблице 13.

Следующие обозначения используются в таблице 13:

Основное описание вывода результатов решения приводится в разделе 2.2. Смотрите главу *ANSYS Structural Analysis Guide* для описания способов просмотра результатов.

Двоеточие (:) в колонке **Name** указывают объекты, которые могут быть доступны при помощи метода компонентных имен [ETABLE,ESOL]. Колонки **O** и **R** указывают нахождение данных в файле *Jobname.OUT* (**O**) или файле результатов (**R**), **Y** указывает, что объект всегда имеется, цифровая ссылка в табличной ссылке указывает, когда объект условно имеется, а **A** указывает, что объект отсутствует.

Таблица 13 дает выходные данные. В файле результатов, узловые результаты получаются из их ближайших точек интегрирования.

Таблица 13. Определения выходных величин элемента CONTA171

Имя	Определение	O	R
<i>EL</i>	Номер элемента	Y	Y
<i>NODES</i>	Узлы I, J	Y	Y
<i>XC, YC</i>	Положение точки вывода результата	-	5
<i>TEMP</i>	Температуры T(I), T(J)	Y	Y

<i>LENGTH</i>	Длина элемента	Y	-
<i>VOLU</i>	Площадь	Y	Y
<i>NPI</i>	Номера точек интегрирования	Y	Y
<i>ITRGET</i>	Номер целевой поверхности (устанавливаемый программой)	Y	Y
<i>ISOLID</i>	Номер подстилающего твердотельного, оболочечного или балочного элемента	Y	Y
<i>CONT:STAT</i>	Текущий контактный статус	1	1
<i>OLDST</i>	Старый контактный статус	1	1
<i>NX, NY</i>	Компоненты вектора нормали к поверхности	Y	-
<i>ISEG</i>	Номер подлежащего текущего сегмента	Y	Y
<i>OLDSEG</i>	Номер подлежащего старого сегмента	Y	-
<i>CONT:PENE</i>	Текущее проникновение (зазор=отрицательная величина; проникновение=положительная величина)	Y	Y
<i>OPENE</i>	Старое проникновение (зазор=отрицательная величина; проникновение=положительная величина)	Y	-
<i>IPENE</i>	Начальное проникновение	2	-
<i>CONT:PRES</i>	Нормальное контактное давление	Y	Y
<i>CONT:SFRIC</i>	Касательное контактное напряжение	Y	Y
<i>KN</i>	Текущая нормальная штрафная жесткость, [Сила/Длина**3]	Y	Y
<i>KT</i>	Текущая касательная штрафная жесткость, [Сила/Длина**3]	Y	Y
<i>MU</i>	Коэффициент трения	Y	-
<i>CONT:SLIDE</i>	Суммарное проскальзывание (абсолютная сумма)	3	3
<i>CONT:ASLIDE</i>	Суммарное проскальзывание (алгебраическая сумма)	3	3
<i>TOLN</i>	Допускаемое проникновение	Y	Y
<i>CONT:STOTAL</i>	Общее напряжение SQRT (PRES**2+SFRIC**2)	Y	Y
<i>DBA</i>	Изменение проникновения (penetration variation)	Y	Y
<i>PINB</i>	Область поиска узлов контактной пары (Pinball Region)	-	Y
<i>CNFX</i>	X-компонента контактной силы элемента	-	4
<i>CNFY</i>	Y-компонента контактной силы элемента	-	Y

<i>CONV</i>	Коэффициент конвективной теплопередачи	Y	Y
<i>RAC</i>	Коэффициент радиационной передачи тепла	Y	Y
<i>TCC</i>	Коэффициент теплопроводности	Y	Y
<i>TEMPS</i>	Температура в точке контакта	Y	Y
<i>TEMPT</i>	Температура целевой поверхности	Y	Y
<i>FXCV</i>	Тепловой поток благодаря конвекции	Y	Y
<i>FXRD</i>	Тепловой поток благодаря радиационному излучению	Y	Y
<i>FXCD</i>	Тепловой поток благодаря теплопроводности	Y	Y
<i>FDDIS</i>	Диссипация энергии за счет трения	Y	Y
<i>FLUX</i>	Общий поток тепла на контактной поверхности	Y	Y
<i>FXNP</i>	Внешний тепловой поток	--	Y
<i>CNFH</i>	Тепловой поток контактного элемента (Contact element heat flow)	--	Y
<i>CAREA</i>	Площадь контакта	--	Y

1. Возможные значения величин *STAT* и *OLDST*:

- 0 = открыт, но не близок к контакту
- 1 = открыт, но близок к контакту
- 2 = закрыт и имеет место скольжение
- 3 = закрыт и имеет место сцепление

2. ANSYS будет оценивать модель для определения начальных условий.

3. Только увеличивает (accumulates) скольжение, когда происходит контакт.

4. Силы контактных элементов определяются в глобальной декартовой системе координат.

5. Определяется только в центре элемента, через команду \*GET.

Таблица 14 приводит список выходных величин доступных через команду **ETABLE**, использующую метод Последовательных Номеров. Смотрите Главу 5 *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide* для дополнительной информации. Таблица 14 использует следующие условные обозначения:

Name – выходная величина, определенная в таблице 2

Item - предопределенная метка *Item* для команды **ETABLE**

E – "последовательные" номера для однозначных величин или постоянных данных элемента

I, J – последовательные номера для данных в узлах I, J

Таблица 14. CONTA171 Объекты и последовательные номера для команд ETABLE и ESOL

Name	Item	E	I	J
PRES	SMISC	5	1	2
SFRIC	SMISC	-	3	4
FLUX	SMISC	-	6	7
FDDIS	SMISC	-	8	9
FXCV	SMISC	-	10	11
FXRD	SMISC	-	12	13
FXCD	SMISC	-	14	15
FXNP	SMISC	-	16	17
STAT <sup>1</sup>	NMISC	19	1	2
OLDST	NMISC	-	3	4
PENE <sup>2</sup>	NMISC	-	5	6
DBA	NMISC	-	7	8
SLIDE	NMISC	-	9	10
KN	NMISC	-	11	12
KT	NMISC	-	13	14
TOLN	NMISC	-	15	16
IPENE	NMISC	-	17	18
PINB	NMISC	20	-	-
CNFX	NMISC	21	-	-
CNFX	NMISC	22	-	-
ISEG	NMISC	-	23	24
ASLIDE	NMISC	-	25	26
CAREA	NMISC	-	27	28
MU	NMISC	-	29	30
TEMPS	NMISC	-	37	38

TEMP	NMISC	-	39	40
CONV	NMISC	-	41	42
RAC	NMISC	-	43	44
TCC	NMISC	-	45	46
CNFH	NMISC	47	-	-

1. Статусы элемента = наивысшее значение статуса точек интегрирования в пределах элемента.

2. Проникновение = положительная величина, зазор = отрицательная величина

Вы можете отобразить на экране или вывести в виде списка контактные результаты через команды основного постпроцессора POST1. Специфические контактные параметры для пользования командами PLNSOL, PLESOL, PRNSOL и PRESOL перечислены ниже:

STAT	Контактный статус
PENE	Контактное проникновение
PRES	Контактное давление
SFRIC	Напряжение контактного трения
STOT	Общее контактное напряжение (давление плюс трение)
SLIDE	Расстояние контактного скольжения
GAP	Расстояние контактного зазора
FLUX	Общий поток тепла через контактную поверхность

## Допущения и ограничения

2-D контактный элемент должен задаваться в плоскости X-Y и ось Y должна быть осью симметрии для осесимметричного анализа. Осесимметричная структура должна моделироваться в положительных X-квadrантах. Этот 2D контактный элемент работает с любым трехмерным элементом в Вашей модели. Нумерация узлов должна быть в соответствии с внешней поверхностью подстилающего твердотельного, оболочечного или балочного элемента, или с исходными элементами, входящими в состав суперэлемента. Этот элемент является нелинейным и требует полного Ньютоновского итеративного решения, вне зависимости от перемещений. Коэффициент нормальной контактной жесткости (FKN) не должен быть большим с тем чтобы не вызвать численной неустойчивости. FKN, FTOLN, PINV и FKOP могут изменяться между шагами нагрузки или в ходе стадии рестарта. Величина FKN может быть маленькой, когда сочетается с методом множителей Лагранжа, для которого должно использоваться FTOLN.

Вы можете использовать этот элемент в нелинейном статическом или полном нелинейном динамическом анализе. Кроме того, Вы можете использовать его в модальном анализе и

анализе устойчивости по собственным формам. Для модального анализа и анализа устойчивости по собственным формам, программа предполагает, что начальное состояние элемента не изменяется (то есть, состояние в конце статического анализа по определению напряженного состояния, если это имеет место).

Этот элемент допускает смерть и рождение, и будет следовать статусу смерти и рождения подстилающих твердотельных, оболочечных, балочных или целевых элементов.

## **Ограничения по программным продуктам**

Не имеется ограничений по программным продуктам для этого элемента.

## 7.5. CONTA178

CONTA178 - 3-D контакт "узел-узел"

Продукты: MP ME ST PP ED

### Описание элемента

Элемент CONTA178 представляет контактное взаимодействие и скольжение между двумя узлами элементов любых типов. Элемент имеет два узла с тремя степенями свободы в каждом: перемещения по направлениям X, Y и Z. Он может быть также использован в двумерных плоских и осесимметричных моделях при фиксированном перемещении Uz. Элемент может воспринимать сжимающую нагрузку в направлении нормали к контакту и Кулоново трение в тангенциальном направлении (в плоскости контакта). Элемент может иметь изначальное предварительно напряженное состояние, или может быть задан зазор. У элемента имеется онция демпфирования в продольном направлении. Для дополнительной информации относительно этого элемента смотрите *ANSYS Theory Reference*. Аналогичными контактными элементами являются элементы CONTACT12, COMBIN40, CONTACT52.

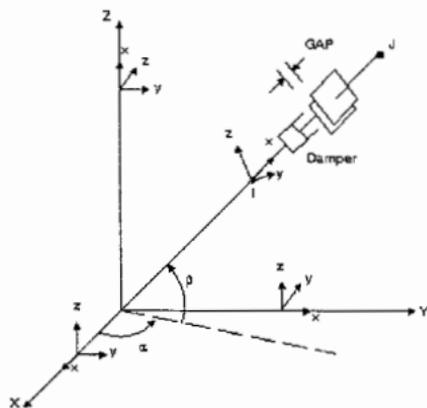


Рис. 41. Контактный элемент CONTA178

### Входные данные

Геометрия, положение узлов и системы координат этого элемента приведены на рис. 41. Элемент определяется двумя узлами, начальным зазором или натягом (interference) (GAP), начальным статусом элемента (START) и коэффициентами демпфирования CV1 и CV2. Ориентация области контакта определяется положением узлов (I и J), или направлением нормали к контакту, задаваемой пользователем. Контактная поверхность подразумевается перпендикулярной к линии узлов I-J или к заданному направлению зазора. Система координат элемента имеет начало в узле I, а ось X прямо направлена от узла I к узлу J или определена заданием направлением зазора. Контактная поверхность параллельна плоскости Y-Z элемента. Для дополнительной информации относительно автоматической генерации элементов командой EINTF смотрите раздел *Contact* в главе *ANSYS Structural Analysis Guide*.

## Контактные алгоритмы

Пользователь может выбрать любой из приведенных ниже контактных алгоритмов:

- Чистый метод множителей Лагранжа (KEYOPT(2) = 0)
- Метод множителей Лагранжа в направлении нормальном к контакту и метод штрафов в тангенциальном (фрикционном) направлении (KEYOPT(2) = 1)
- Модифицированный (Augmented) метод Лагранжа (KEYOPT(2) = 2)
- Метод штрафных функций (KEYOPT(2) = 3)

Приведенные ниже разделы обрисовывают принципы этих четырех алгоритмов.

### Метод множителей Лагранжа

Метод множителей Лагранжа не требует задания контактной жесткости FKN, FKS. Вместо этого он требует параметров управления "контактного дребезга" TOLN, FTOL, по которым программа ANSYS определяет неизменность состояния контакта. TOLN является максимально допустимым проникновением, а FTOL - максимально допустимая контактная растягивающая сила.



Отрицательная контактная сила имеет место, когда контактное состояние – контакт закрыт. Положительная контактная сила (растягивающая) означает тенденцию к разделению контактных поверхностей, однако необязательно контакт имеет состояние - открытый.

Поведение при расчете может быть характеризуется следующим:

- Если контактное состояние на предыдущем шаге – открытый контакт, и рассчитанное текущее проникновение меньше, чем величина TOLN, то контакт остается открытым. В противном случае контактное состояние переключается на "закрытое" и снова происходит повторение процесса итерации (то есть, по всей видимости, продолжаются итерации в рамках текущего подшага приращения нагрузки).
- Если контактное состояние на предыдущем шаге – закрытый контакт, и рассчитанная текущая контактная сила имеет положительное значение, но меньшее, чем FTOL, то контакт остается закрытым. Если растягивающее контактное усилие больше, чем FTOL, то контактное состояние изменится на открытое и программа перейдет к следующей итерации.

ANSYS, по умолчанию, назначает приемлемые значения TOLN и FTOL. При задании величин TOLN и FTOL следует помнить, что:

- Положительная введенная величина представляет собой масштабный коэффициент по отношению к определенному по умолчанию значению.
- Знак минус перед величиной рассматривается программой, как абсолютное значение, которое перепределяет установленное по умолчанию.

Целью параметров TOLN и FTOL является обеспечение устойчивости (стабильности) счета, которая проявляет "контактную вибрацию", благодаря изменениям контактного состоя-

ния (статуса). Если Вы используете для этих точностей слишком малые величины, то решение будет требовать большего числа итераций. Однако, если Вы зададите чересчур большие значения, то это отрицательно скажется на точности решения, поскольку допускается только определенная степень проникновения или растягивающей контактной силы. Теоретически метод множителей Лагранжа приводит к нулевому проникновению, когда контакт закрыт и имеет место нулевое проскальзывание ("zero slip"), когда выполняется условие "слипшегося" контакта. Однако, метод множителей Лагранжа вводит дополнительные степени свободы в модели и требует дополнительных итераций по стабилизации контактных условий. Это увеличивает компьютерное время и даже может привести к расхождению решения, если контактные точки осциллируют между состоянием слипания и проскальзывания в ходе итераций.

### Метод множителей Лагранжа по нормали и метод штрафов в тангенциальной плоскости

Альтернативным вышеприведенному алгоритму является комбинированный метод, включающий метод множителей Лагранжа по нормали к контакту и метод штрафов (жесткость тангенциального контакта) во фрикционной плоскости. Этот метод применим только при очень маленьком значении проскальзывания, то есть для условий "слипшегося" контакта. Он требует параметров управления "контактной вибрацией" TOLN, FTOL а так же максимально допустимого значения упругого скольжения SLTOL. С другой стороны, ANSYS обеспечивает по умолчанию величину точности, которая хорошо работает в большинстве случаев. Вы можете переопределить значение SLTOL, установленное по умолчанию, задавая масштабный коэффициент (положительная величина) или абсолютную величину (отрицательная величина). Базируясь на точности текущей контактной силы и коэффициенте трения, программа автоматически находит тангенциальную контактную жесткость FKS. По своему желанию Вы можете переопределить значение FKS, задав масштабный коэффициент (положительная величина) или абсолютное значение (отрицательная величина). При этом следует проявить внимательность, когда задаете величины SLTOL и FKS. Если величина SLTOL слишком велика, а значение FKS наоборот слишком мало, то Вы можете столкнуться со слишком большим упругим скольжением. Если величина SLTOL слишком мала или FKS слишком велика, то могут возникнуть проблемы со сходимостью.

### Модифицированный метод Лагранжа

Третьим контактным алгоритмом является модифицированный метод Лагранжа, который по существу представляет собой метод штрафов с дополнительным контролем проникания. Этот метод требует задания нормальной контактной жесткости FKN, максимально допустимого проникновения TOLN и максимально допустимого скольжения SLTOL. FKS может быть вычислена программой, базируясь на максимально допустимом скольжении SLTOL и текущем значении нормальной контактной силы. Программа ANSYS устанавливает по умолчанию нормальную контактную жесткость FKN, которая базируется на величине модуля Юнга и размере подлежащих твердых элементов. Если модуль Юнга E не задан, то принимается значение  $E = 1 \times 10^9$ . Вы можете переопределить установленное по умолчанию значение нормальной контактной жесткости FKN, задавая скалярный множитель (положительная введенная величина) или абсолютное значение (отрицательная введенная величина с размерностью [Сила / Длина]). Если Вы задали большое значение TOLN, то модифицированный метод Лагранжа работает как метод штрафных функций. Будьте внимательны, когда устанавливаете величины FKN и TOLN. Если значение FKN слишком мало, а TOLN напротив слишком велико, то вы можете столкнуться со слишком большим проникновением. Если значение FKN очень велико, а TOLN – мало, то вы можете столкнуться с проблемой сходимости.

## Метод штрафов

Последним из доступных алгоритмов является метод штрафов. Этот метод требует задания как жесткости нормального контакта  $FKN$ , так и жесткости тангенциального контакта  $FKS$ . Реальные постоянные  $TOLN$ ,  $FTOLN$  и  $SLTOL$  не используются, и проникание не управляется в этом методе. По умолчанию величина  $FKN$  принимается аналогично, как и в модифицированном методе Лагранжа. По умолчанию величина  $FKS$  вычисляется программой, как  $MU \times FKN$ . Когда  $FKN$ ,  $FKS$  заданы, как абсолютные величины (отрицательные значения), то метод работает так же, как и метод штрафов, используемый в элементе  $CON-TAC52$ .

## Определение контактной нормали

Направление контактной нормали имеет первостепенную важность в контактном анализе. По умолчанию [ $KEYOPT(5) = 0$  и  $NX, NY, NZ = 0$ ], программа ANSYS будет рассчитывать направление контактной нормали, базирываясь на начальном положении узлов  $I$  и  $J$  так что положительное перемещение (в системе координат элемента) узла  $J$  относительно узла  $I$  открывает зазор. Однако, Вы должны задать направление контактной нормали для любого из перечисленных ниже случаев:

- Если узлы  $I$  и  $J$  имеют одни и те же начальные координаты.
- Если модель имеет изначальное состояние контактирующих частей, при котором подлежащие элементы геометрически перекрываются.
- Если размер изначально открытого зазора очень мал.

В перечисленных выше случаях порядок узлов  $I$  и  $J$  имеет важное значение. Правильная нормаль контакта обычно направлена от узла  $I$  к узлу  $J$ , за исключением изначального перекрывающегося контакта.

Вы можете задать нормаль контакта с помощью реальных постоянных  $NX$ ,  $NY$ ,  $NZ$  (направляющие косинусы относительно глобальной декартовой системы координат) или опции  $KEYOPT(5)$ . Ниже приведен список различных значений опции  $KEYOPT(5)$ :

$KEYOPT(5) = 0$	Нормальный контакт базируется или на заданных реальных постоянных $NX$ , $NY$ , $NZ$ или на положении узлов, когда $NX$ , $NY$ , $NZ$ не определены. Для двумерного контакта $NZ = 0$ .
$KEYOPT(5) = 1 (2,3)$	Нормаль контакта принимает направление, которое является средним по отношению к направляющим косинусам осей $X (Y, Z)$ узловых систем координат обоих узлов $I$ и $J$ . Направляющие косинусы в узлах $I$ и $J$ должны быть очень близко расположены. Эта опция подкрепляется (выполнением команд) командами $NORA$ и $NORL$ , которые поворачивают ось $X$ узловой системы координат к положению нормали к поверхности твердого тела.
$KEYOPT(5) = 4 (5,6)$	Нормаль контакта направлена по оси $X (Y, Z)$ координатной системы элемента, определенной командой $ESYS$ . Если Вы используете эту опцию, то убедитесь, что система координат элемента, определенная командой $ESYS$ , является Декартовой системой.

## Контактное состояние

Начальный зазор определяется или размером зазора (если величина положительная), или натяга (если величина отрицательная). Если  $KEYOPT(4) = 0$ , по умолчанию, то размер зазора может быть автоматически рассчитан программой, используя реальную постоянную  $GAP$  и положение узлов (проекция вектора от узла  $I$  к узлу  $J$  на нормаль к контакту), то есть размер зазора определяется из совместного действия геометрического зазора и величины  $GAP$ .

Если  $KEYOPT(4) = 1$ , то размер зазора базируется только на реальной постоянной  $GAP$  (положение узлов не принимается во внимание).

По умолчанию  $KEYOPT(9)$  устанавливается равным 0, которое предполагает "приложение" величины начального зазора целиком на первом шаге нагружения. Чтобы произвести это постепенно с первого шага (чтобы, например, смоделировать проблему посадки), установите  $KEYOPT(9) = 1$ . Так же установите  $KBC, 0$  и не задавайте никакой внешней нагрузки на первом шаге нагружения.

Усилие в контактном элементе может быть разложена в нормальном и касательном направлениях. В нормальном направлении, когда нормальная сила ( $FN$ ) отрицательна, остается состояние закрытого контакта ( $STAT = 3$  или  $2$ ). В тангенциальном направлении для  $FN < 0$  и абсолютном значении тангенциальной силы ( $FS$ ) меньше, чем  $\mu|FN|$ , контактное состояние считается "слипшимся" ( $STAT = 3$ ). Для  $FN < 0$  и  $FS = \mu|FN|$  скольжение происходит ( $STAT = 2$ ). Как только  $FN$  становится положительным, контакт прерывается ( $STAT = 1$ ) и сила не передается ( $FN = 0, FS = 0$ ).

Контактные условия в начале первого подшага могут быть определены из параметра  $START$ . Начальный статус элемента ( $START$ ) используется для задания "предыдущего" состояния области контакта при старте первого подшага. Эта величина устанавливает предлагаемые условия контактного взаимодействия и может быть полезна в предвидении окончательной конфигурации контактного взаимодействия и уменьшить количество итераций до достижения сходимости. Однако следует иметь в виду, что задание нереалистичных значений  $START$  может в некоторых случаях ухудшить сходимость.

Если значение  $START = 0.0$  или не указано, то начальное состояние элемента определяется или из величины  $GAP$ , или установки опции  $KEYOPT(4)$ . Если  $START = 3.0$ , контакт изначально закрыт и скольжение отсутствует ( $\mu \neq 0$ ), или имеет место (если  $\mu = 0.0$ ). Если

$START = 2.0$ , контакт изначально закрыт и имеет скольжение. Если  $START = 1.0$ , контакт изначально открыт.

## Трение

Единственное свойство материала этого элемента – коэффициент трения  $\mu$  ( $MU$ ) на поверхности раздела. Нулевое значение  $\mu$  означает бесфрикционное взаимодействие контактных поверхностей. Температуры, задаваемые в узлах элемента, необходимы только для вычисления свойств материала. Коэффициент трения  $\mu$  вычисляется по средней температуре двух узлов. Температура  $T(I)$  узла  $I$  по умолчанию принимается равной  $TUNIF$ . Температура в узле  $J$  по умолчанию принимается равной  $T(I)$ .

Для анализа, включающего трение, полезно использование команды  $NROPT, UNSYM$  (и, в действительности, временами требуется, если коэффициент трения  $\mu > 0.2$ ) для задач, когда нормальное и тангенциальное (скольжение) движения сильно связаны.

## Пружина малой жесткости

Опция KEYOPT(3) может быть использована для задания пружины малой жесткости ("weak spring") поперек открытой или свободно скользящей контактной поверхности, которая полезна для предупреждения движения тела, как твердого целого, что может встретиться в статическом анализе. Жесткость такой пружины вычисляется умножением нормальной жесткости KN на некоторый коэффициент (по умолчанию  $1 \times 10^{-6}$ ), если реальная постоянная REDFACT положительна. Жесткость ее может быть переопределена, если REDFACT имеет отрицательное значение. Установите значение опции KEYOPT(3) = 1, чтобы добавить пружину малой жесткости только в направлении контактной нормали, когда контакт открыт. Установите значение опции KEYOPT(3) = 2, чтобы добавить пружину малой жесткости в направлении контактной нормали для открытого контакта и тангенциальной плоскости для свободного от трения или открытого контакта.

Так же как и для элемента CONTACT52, пружина малой жесткости только вносит вклад в общую жесткость, которая оберегает от сингулярных состояний встречающихся при решении контактной проблемы, если KEYOPT(3) = 1.2. При установке KEYOPT(3) = 3,4, пружина малой жесткости будет вносить вклад и в общую жесткость и во внутренние узловые силы, которые удерживают два разделяемых узла.



Опция пружины малой жесткости никогда не должна использоваться вместе со значениями опции KEYOPT(10), которые устанавливают неразделяемое или ограниченное контактное взаимодействие.

## Контактное поведение

Опция KEYOPT(10) предназначена для моделирования различного контактного поведения элемента:

KEYOPT(10) = 0	Моделирует стандартный односторонний контакт, то есть, нормальное давление равно нулю, если произошло разделение поверхностей.
KEYOPT(10) = 1	Моделирует контакт грубо обработанных поверхностей, когда скольжение отсутствует. Этот случай соответствует бесконечному коэффициенту трения, а свойство материала MU игнорируется.
KEYOPT(10) = 2	Моделирует неразделяющийся контакт, в котором два узла зазора остаются связанными в ходе всего остального анализа (несмотря на то, что допускается скольжение), как только контакт установлен.
KEYOPT(10) = 3	Моделирует ековывающий контакт, в котором два узла зазора ограничиваются во всех направлениях (как только контакт установлен) для оставшейся части анализа.
KEYOPT(10) = 4	Моделирует неразделимый контакт, в котором два узла зазора всегда связаны между собой (скольжение допускается) на всем протяжении анализа.
KEYOPT(10) = 5	Моделирует ековывающий контакт, в котором два узла зазора ограничены во всех направлениях на всем протяжении анализа.
KEYOPT(10) = 6	Моделирует скывающий контакт, в котором два узла зазора, которые в начале анализа имели состояние закрытого контакта, остаются в этом состоянии на всем протяжении анализа, аналогично два узла, которые в начале анализа имели состояние открытого контакта, остаются в этом состоянии.

## Цилиндрический зазор

Опция цилиндрического зазора (KEYOPT(1) = 1) полезна, когда конечное положение контактной нормали не фиксируется в ходе анализа, например, при пересечении между двумя концентрическими трубами. С этой опцией, Вы определяете реальные постоянные NX, NY, NZ как направляющие косинусы цилиндрических осей ( $\vec{N}$ ) в глобальной декартовой системе координат. Направление контактной нормали расположено в поперечном сечении, которое перпендикулярно к цилиндрическим осям. Программа определяет проекцию дистанции  $|XJ - XI|$  между текущим положением узла I и текущим положением узла J на поперечное сечение. По умолчанию NX, NY, NZ имеют значение (0,0,1), что является случаем двумерного цилиндрического зазора. С опцией цилиндрического зазора, опции KEYOPT(4) и KEYOPT(5) игнорируются и порядок нумерации узлов может быть произвольным. Реальная постоянная GAP более не рассматривается, как размер начального зазора и его нулевая величина не допускается. Следующие пояснения позволяют задать модель, базирываясь на знаке величины GAP.

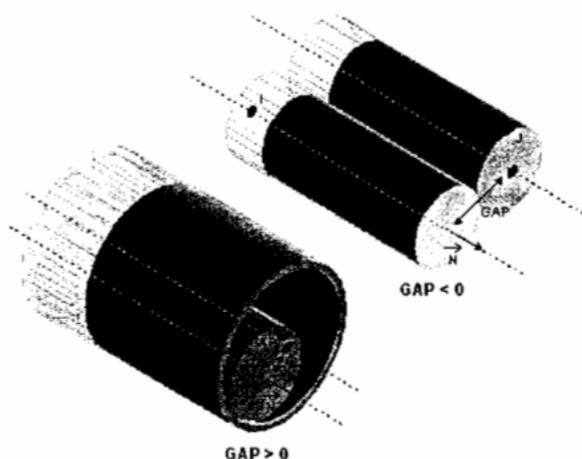


Рис. 42. Зазор и узлы элемента CONTA178

- Положительное значение GAP моделирует контакт, когда один маленький цилиндр вставлен в другой параллельный больший цилиндр. GAP принимается равным разности между радиусами цилиндров ( $|RJ - RI|$ ) и представляет максимально допустимую дистанцию в проекции на поперечное сечение. Контактное ограничивающее условие может быть записано как:  $|XJ - XI| \leq |GAP|$
- Отрицательное значение GAP моделирует внешний контакт между двумя параллельными цилиндрами. GAP принимается равным сумме радиусов цилиндров ( $|RJ + RI|$ ) и представляет минимально допустимую дистанцию в проекции на поперечное сечение. Контактное ограничивающее условие может быть записано как:

$$|XJ - XI| \geq |GAP|$$

## Демпфирование

Демпфирующие возможности элемента могут использоваться только в модальном или динамическом анализе. По умолчанию, эти возможности удаляются из элемента. Демпфирование действует только по направлению нормали к контакту, когда контакт закрыт. Коэффициент демпфирования имеет размерность [Сила \* Время/Длина]. Для двумерного осесимметричного анализа коэффициент определяется на базе 360°. Сила демпфирования вычисляется как  $F_x = -C_v * dU_x/dt$ , где  $C_v$  – коэффициент демпфирования, определяемый выражением  $C_v = C_{v1} + C_{v2} * V$ . Величина  $V$  – скорость, определяемая на предыдущем подшаге. Второй коэффициент демпфирования ( $C_{v2}$ ) позволяет учесть нелинейный (зависящий от скорости) коэффициент демпфирования.

## Мониторинг контактного состояния

По умолчанию программа не выводит контактное состояние и контактную жесткость для каждого отдельного элемента. Используйте установку опции KEYOPT(12) = 1 для вывода такой информации, которая может оказаться полезной при решении трудно сходящихся задач.

Общий список входных величин и параметров приведен в таблице 15.

Таблица 15. Входные параметры элемента CONTA178

Имя элемента	CONTA178	
Узлы	I, J	
Степени свободы	UX, UY, UZ	
Реальные постоянные	FKN, GAP, START, FKS, REDFACT, NX, NY, NZ, TOLN, FTOL, SLTOL, CV1, CV2	
Свойства материала	MU	
Поверхностные нагрузки	Нет	
Твердотельные нагрузки	Температуры - T(I), T(J)	
Специальные свойства	Тип нелинейного зазора	
KEYOPT(1) -- Gap type	0 --	Однонаправленный зазор
	1 --	Цилиндрический зазор
KEYOPT(2) -- контактный алгоритм	0 --	Метод множителей Лагранжа
	1 --	Метод множителей Лагранжа на нормальном контакте и метод штрафов на касательном
	2 --	Модифицированный метод Лагранжа
	3 --	Метод штрафных функций
KEYOPT(3) – слабая пружина	0 --	Не используется
	1 --	Действует поперек открытого контакта (только делает вклад в жесткость)
	2 --	Действует поперек открытого контакта или свободно скользящей плоскости (только делает вклад в жесткость)

	3 --	Действует поперек открытого контакта (вносит вклад в жесткость и внутреннюю силу)
	4 --	Действует поперек открытого контакта или свободно скользящей плоскости (вносит вклад в жесткость и внутреннюю силу)
KEYOPT(4) – размер зазора	0 --	Размер зазора базируется на реальной постоянной GAP + начальное местоположение узлов
	1 --	Размер зазора базируется на реальной постоянной GAP (начальное местоположение узлов игнорируется)
KEYOPT(5) – база для нормали к "контактной поверхности"	0 --	Определяется положением узлов или реальными постоянными NX, NY, NZ
	1 --	Определяется X – компонентой узловой системы координат (усредненная по двум контактирующим узлам)
	2 --	Определяется Y – компонентой узловой системы координат (усредненная по двум контактирующим узлам)
	3 --	Определяется Z – компонентой узловой системы координат (усредненная по двум контактирующим узлам)
	4 --	Определяется X – компонентой элементной системы координат (ESYS)
	5 --	Определяется Y – компонентой элементной системы координат (ESYS)
KEYOPT(7) -- управление приращением нагрузки	0 --	Управление отсутствует
	1 --	Изменение в контактном предсказании производится, чтобы поддержать приемлемое приращение время/ нагрузка. Она активизируется только, если установлена опция команды SOLCONTROL,ON,ON.
	2 --	Изменение в контактном предсказании производится, чтобы добиться минимального приращения время/ нагрузка, всякий раз когда происходит изменение контактного статуса. Она активизируется только, если установлена опция команды SOLCONTROL,ON,ON.
KEYOPT(9) -- способ приложения размера начального зазора	0 --	Начальный зазор прикладывается сразу в начале первого шага нагружения
	1 --	Начальный зазор прикладывается постепенно на первом шаге нагружения
KEYOPT(10) -- поведение контактной поверхности	0 --	Стандартное
	1 --	"Грубый"
	3 --	Неразделимы (скольжение допускается)
	4 --	Неразделимы (всегда)
	5 --	Сковывающий (всегда)
	6 --	Сковывающий (начальный)
KEYOPT(12) – Контактное состояние	0 --	Отсутствует вывод контактного состояния (по умолчанию)
	1 --	Мониторинг и вывод контактного состояния, контактной жесткости

## Выходные данные

Выходное решение, связанное с элементом, представляется в двух формах:

- Узловые перемещения, включенные в общее узловое решение
- Дополнительный вывод данных элемента в соответствии с таблицей 16.

Величина USEP определяется из нормального перемещения (UN) по направлению оси X элемента, между контактными узлами в конце подшага. Эта величина используется при определении нормальной силы FN. Величина UT(Y,Z) представляет общее перемещение в направлении Y и Z в системе координат элемента. Максимальное значение силы FS равно  $\mu|FN|$ . Скольжение может происходить в обоих поперечных направлениях элемента (Y и Z). Величина STAT описывает состояние элемента в конце подшага.

- Если STAT = 3, контакт закрыт и скольжение отсутствует
- Если STAT = 1, контакт открыт
- Если STAT = 2, узел J скользит относительно узла I

Для контактных поверхностей без трения ( $\mu = 0.0$ ), математически сходящееся состояние элемента - или STAT = 2, или 1.

Углы ориентации элементной системы координат  $\alpha$  и  $\beta$  (смотрите рис. 1) рассчитываются программой из местоположения узлов. Эти величины выводятся как ALPHA и BETA соответственно. Угол  $\alpha$  изменяется в пределах от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , а  $\beta$  - от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . Элементам, лежащим вдоль оси Z, устанавливаются значения углов  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = \pm 90^\circ$ , соответственно. Элементы, не лежащие вдоль оси Z, имеют свои системы координат ориентированными углами  $\alpha$  и  $\beta$ , как показано на рисунке 1.



Для  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta \rightarrow 90^\circ$ , элементная система координат поворачивается на  $90^\circ$  вокруг оси Z. Величина ANGLE представляет собой главный угол направления силы трения в элементной плоскости Y-Z.

Основное описание вывода результатов решения дано в разделе *Element Solution*. Смотрите главу *ANSYS Structural Analysis Guide* для описания способов просмотра результатов.

В таблице 16 используются следующие обозначения:

Двоеточие (:) в колонке **Name** указывает объекты, которые могут быть доступны при помощи метода компонентных имен [ETABLE,ESOL]. В колонках **O** и **R** указывается нахождение данных в файле *Jobname.OUT* (**O**) или файле результатов (**R**), соответственно. **Y** указывает, что объект *всегда* имеется, а цифровая ссылка в табличной ссылке указывает, когда объект *условно* имеется, а -- указывает, что объект отсутствует.

Таблица 16. Определения выходных величин элемента CONTA178

Обозначение	Описание	O	R
EL	Номер элемента	Y	Y
NODES	Узлы - I, J	Y	Y
XC, YC, ZC	Координаты точки вывода результатов (центр тяжести)	Y	3
TEMP	T(I), T(J)	Y	Y
USEP	Размер зазора	Y	Y

Обозначение	Описание	O	R
FN	Нормальная сила (вдоль линии I-J)	Y	Y
STAT	Состояние (статус) элемента	1	1
OLDST	Предыдущее состояние (статус) элемента	1	1
ALPHA, BETA	Углы ориентации элемента	Y	Y
MU	Коэффициент трения	2	2
UT(Y,Z)	Перемещение (узел J - узел I) в элементной системе координат (Y и Z)	2	2
FS(Y,Z)	Тангенциальная сила (трения) в направлениях Y и Z элементной системы координат	2	2
ANGLE	Угол направления вектора силы трения в элементной плоскости Y-Z	2	2

1. Значения величины STAT:

- 1 - контакт открыт
- 2 - скользящий контакт
- 3 - сцепленный контакт (нет скольжения)

2. Если  $MU > 0.0$

3. Допускается только в центре тяжести через команду \*GET

В таблице 3 приведен список обозначений величин, которые доступны в постпроцессоре через команду **ETABLE**, используя метод "последовательных номеров". Для дополнительной информации смотрите *The General Postprocessor (POST1)* в главе *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide*. В таблице 17 используются следующие обозначения:

**Name** Выходные величины, определенные в таблице 2

**Item** Заранее установленная метка для команды **ETABLE**

**E** Последовательный номер для однозначных величин или постоянных данных элемента

Таблица 17. Метки и номера величин элемента CONTA178 для команд **ETABLE** и **ESOL**

Name	Item	E
FN	SMISC	1
FSY	SMISC	2
FSZ	SMISC	3
STAT	NMISC	1
OLDST	NMISC	2
USEP	NMISC	3
ALPHA	NMISC	4
BETA	NMISC	5
UTY	NMISC	6
UTZ	NMISC	7
MU	NMISC	8
ANGLE	NMISC	9

Name	Item	E
KN	NMISC	10
KS	NMISC	11
TOLN	NMISC	12
FTOL	NMISC	13
SLTOL	NMISC	14

## Ограничения и допущения

Элемент работает билинейно только в статическом и нелинейном динамическом анализе. Если он используется в другом типе анализа, то он сохраняет свое состояние в ходе всего анализа. Поскольку элемент является нелинейным, то он требует итерационного решения. Несходящийся процесс решения означает неравновесное состояние. За исключением случая задания контактной нормали через (NX, NY, NZ) или опцию KEYOPT(5), узлы I и J не должны совпадать или "перекрестываться", так как местоположение узлов определяет ориентацию границы раздела. В этом случае порядок узлов не имеет значения. Но с другой стороны, если контактная нормаль не определяется положением узлов, то узловой порядок является критическим. Для проверки направления контактной нормали используйте команду /PSYMB,ESYS, а в случае необходимости реверсируйте ее, используя команду EINTF,,REVE, если установлен неправильный порядок. Чтобы определить, какая сторона области контакта содержит узлы, используйте команду ESEL,,ENAM,,178, а затем команду NSLE,,POS,1.

Элемент сохраняет свою первоначальную ориентацию как в анализе с малыми, так и большими прогибами, за исключением случая использования опции цилиндрического зазора. Для реальных постоянных FKN, REDFACT, TOLN, FTOL, SLTOL и FKS вы можете указать или положительное, или отрицательное значение. Программа ANSYS интерпретирует положительное значение как скалярный множитель, а отрицательное значение - как абсолютную величину. Эти реальные постоянные могут быть изменены между шагами нагружения или при рестарте.

Метод множителей Лагранжа приводит к нулевым диагональным членам в матрице жесткости. Решатель PCG может столкнуться с матричной сингулярностью. Метод множителей Лагранжа часто не закрепляет модель, если граничные условия, связи степеней свободы и уравнения, наложенные на контактные узлы, накладываются на контактные ограничения. Метод множителей Лагранжа также приводит к большому количеству степеней свободы, что может иметь результатом - ложные формы собственных колебаний в модальном анализе и линейном анализе на устойчивость. Поэтому выбор опции модифицированного метода Лагранжа подходит для: итерационного решателя PCG, динамического анализа, включающего удар, модального анализа и при решении проблемы устойчивости.

Элемент не может быть деактивирован командой EKILL.

## Ограничения по программным продуктам

Не имеется ограничений по программным продуктам для этого элемента.