

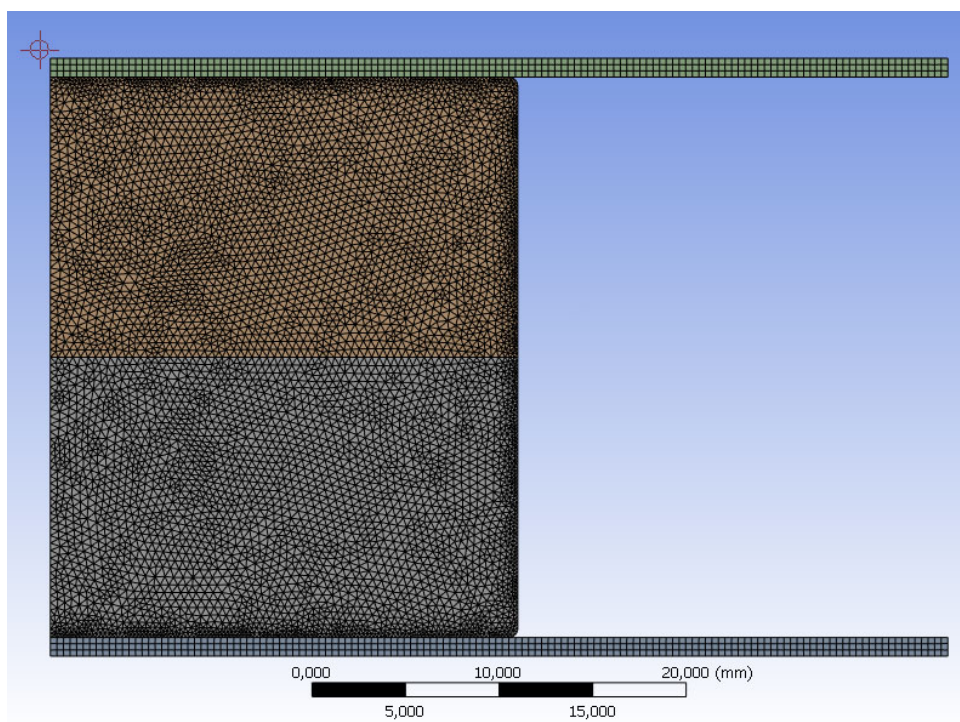
Описание задачи:

Выполняется численное моделирование сжатия «стандартного» образца энергопоглощающего элемента (полиуретана).

Размеры: высота – 30 мм, диаметр 50 мм.

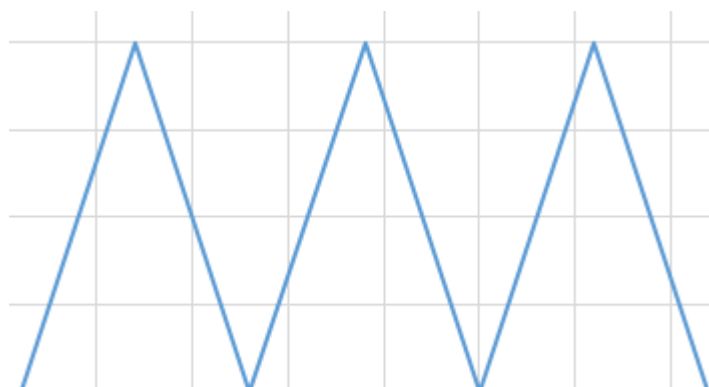
На внешних (радиальных) ребрах сделаны скругления 0,5 мм – для упрощения численного моделирования.

Влияние этих скруглений на результаты моделирования «пренебрежимо мало».



Геометрия и сетка КЭ.

Нагрузка: задается (вертикальное) перемещение на верхнюю поверхность (верхней) пластины: три цикла сжатия/разгрузки - за время 360 секунд – см. сл.рисунок.



Граничное условие:

- на нижней горизонтальной поверхности (нижней) пластины задано «жесткое» заземление (перемещения по двум координатам = 0).

Между всеми деталями заданы контакты.

Модель трения – «динамический» закон Кулона.

Используется модель материала Bergstrom-Boyce (269) - учитывающая нелинейную вязкость, краткое описание модели см.: <https://polymerfem.com/bergstrom-boyce-bb-model/>

Данная модель материала не учитывает образование и развитие трещин (разрушения).

А так же по ссылкам есть много других публикаций, посвященных этой модели материала:

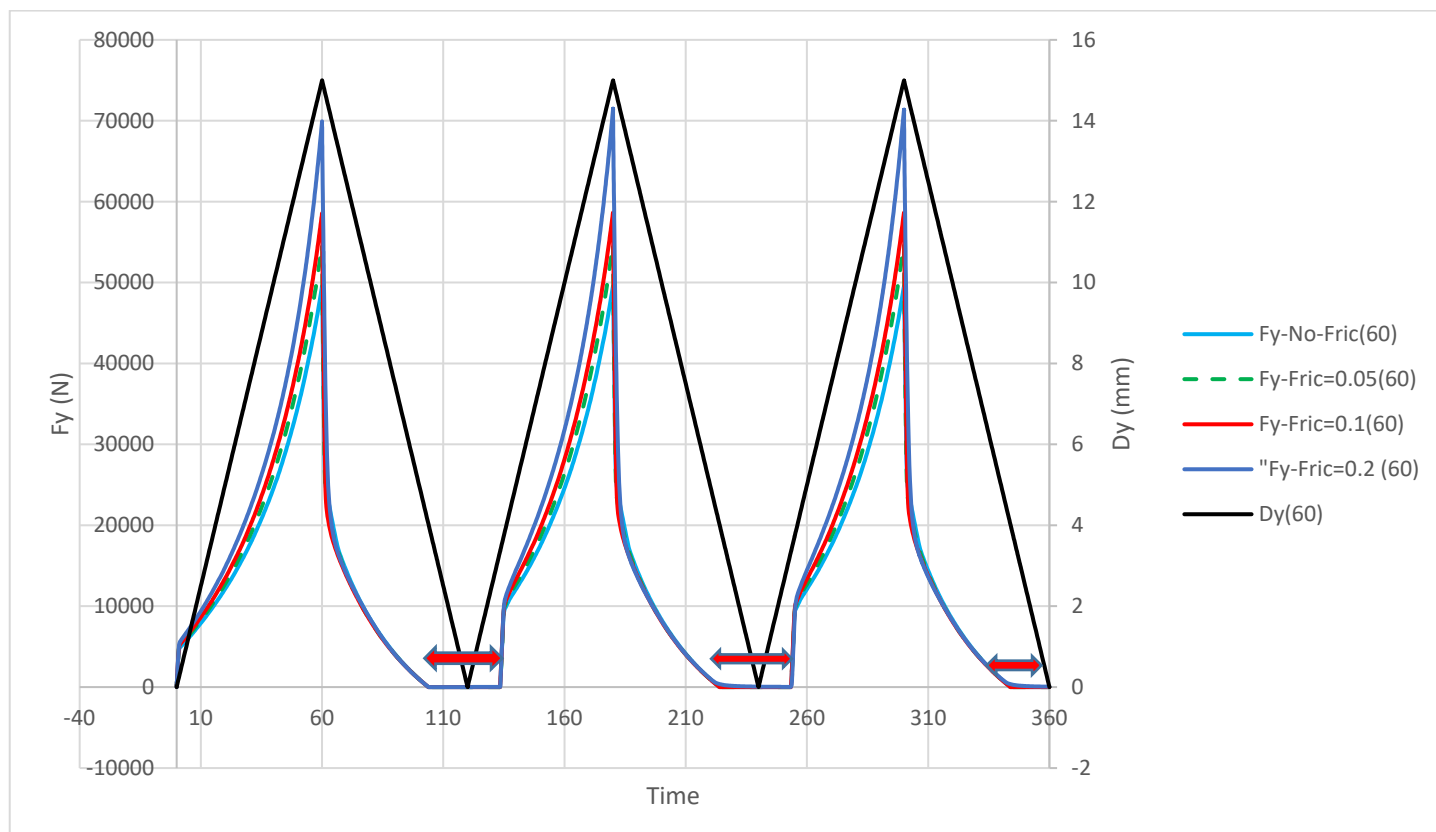
https://www.google.com/search?q=Ansys-Bergstrom-Boyce+theoretical&rlz=1C1NHXL_enRU754RU756&biw=1707&bih=907&sxsrf=ALiCzsadlzqwwRiuxC0hpU04zio5SuaYFA%3A1668864422999&ei=ptl4Y76vPJWgptQP_-OCsAM&ved=0ahUKEwi-mvG4rLr7AhUVklkEHf-xADY4ChDh1QMIDw&uact=5&oq=Ansys-Bergstrom-Boyce+theoretical&gs_lcp=Cgxnd3Mtd2l6LXNlcnAQAzIFCCEQoAEyBQghEKABMgUIIRCgAToHCAAQHhCwAzoJCAAQCBAeELADOgQIABAeOgYIABAIEB46BwghEKABEApKBAhBGAFKBAhGGABQ_gVY8ydgrThoAXAAeACAAeMDiAGSF5IBCTAuNC42LjEuMZgBAKABAcgBAsABAQ&sclient=gws-wiz-serp

Задача решается без учета влияния изменения температуры на свойства полиуретана.

Температура – постоянная (изотермическое условие).

Хотя как известно, свойства полимеров (в том числе и полиуретана) сильно зависят от температуры – см. графики на сл. рисунке.

Результаты расчета.



Изменение величины суммарного усилия, (время сжатия 60 секунд)
при различных к-тах трения на всем временном диапазоне.

График $D_y(60)$ — это закон изменения вертикального сжимающего усилия от времени.

Графики $F_y\text{-}....$ — это «отклики» на сжатие - изменение суммарного усилия от времени решения, для разных к-тов трения и при времени сжатия 60 секунд.

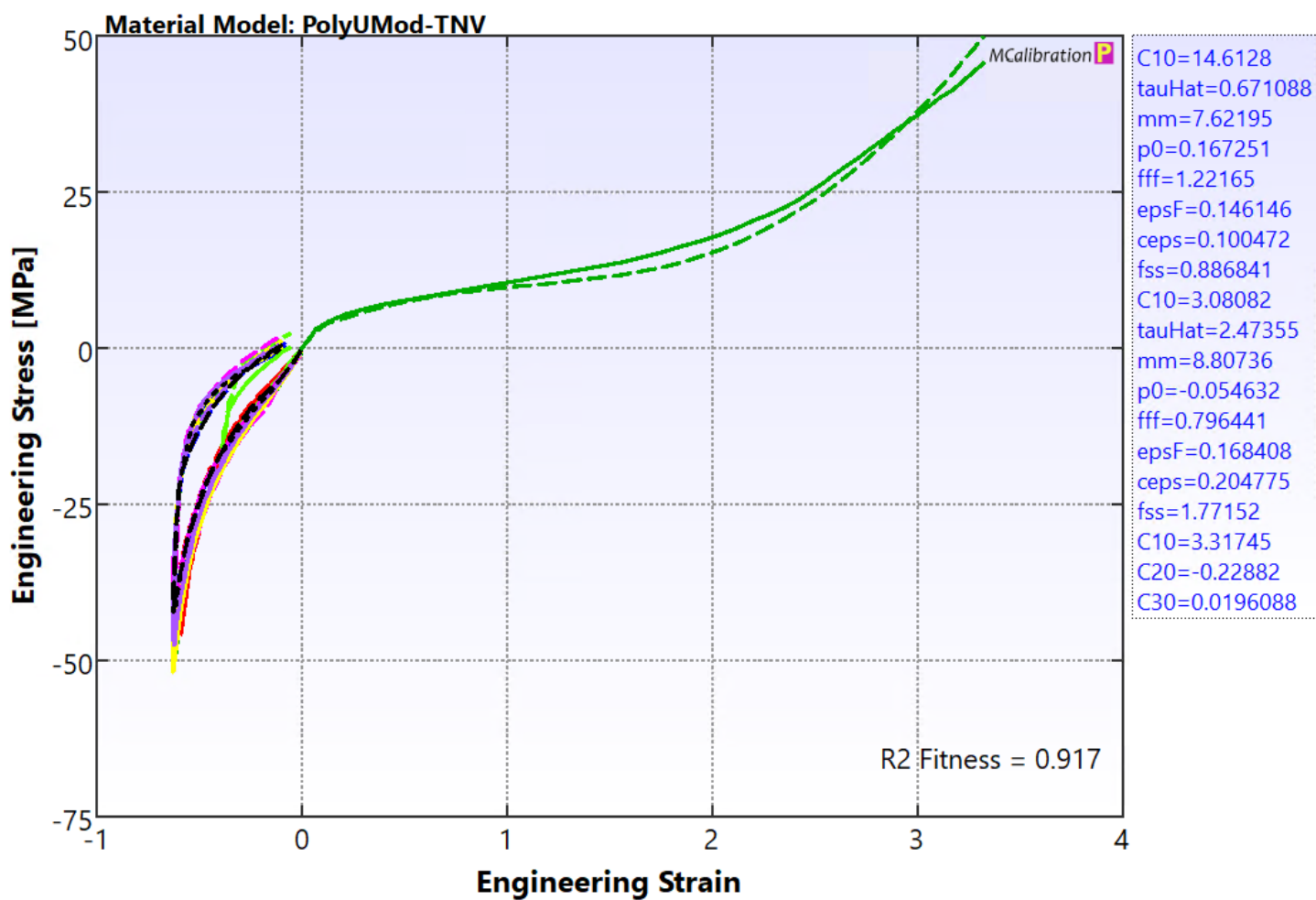
Недостаток/дефект таких «графиков» (результатов натурных экспериментов) — нарушается однозначная связь между перемещением/деформацией и напряжением/усилием на участках : указанных красными стрелками.

Т.е. нужно разгружать образец не до нуля (по перемещения), а до «каких-то» величин — при которых усилие не было бы еще равно нулю => таким образом сохранялась бы постоянная «связь» между перемещением/деформацией и напряжением/усилием при циклических сжатиях.

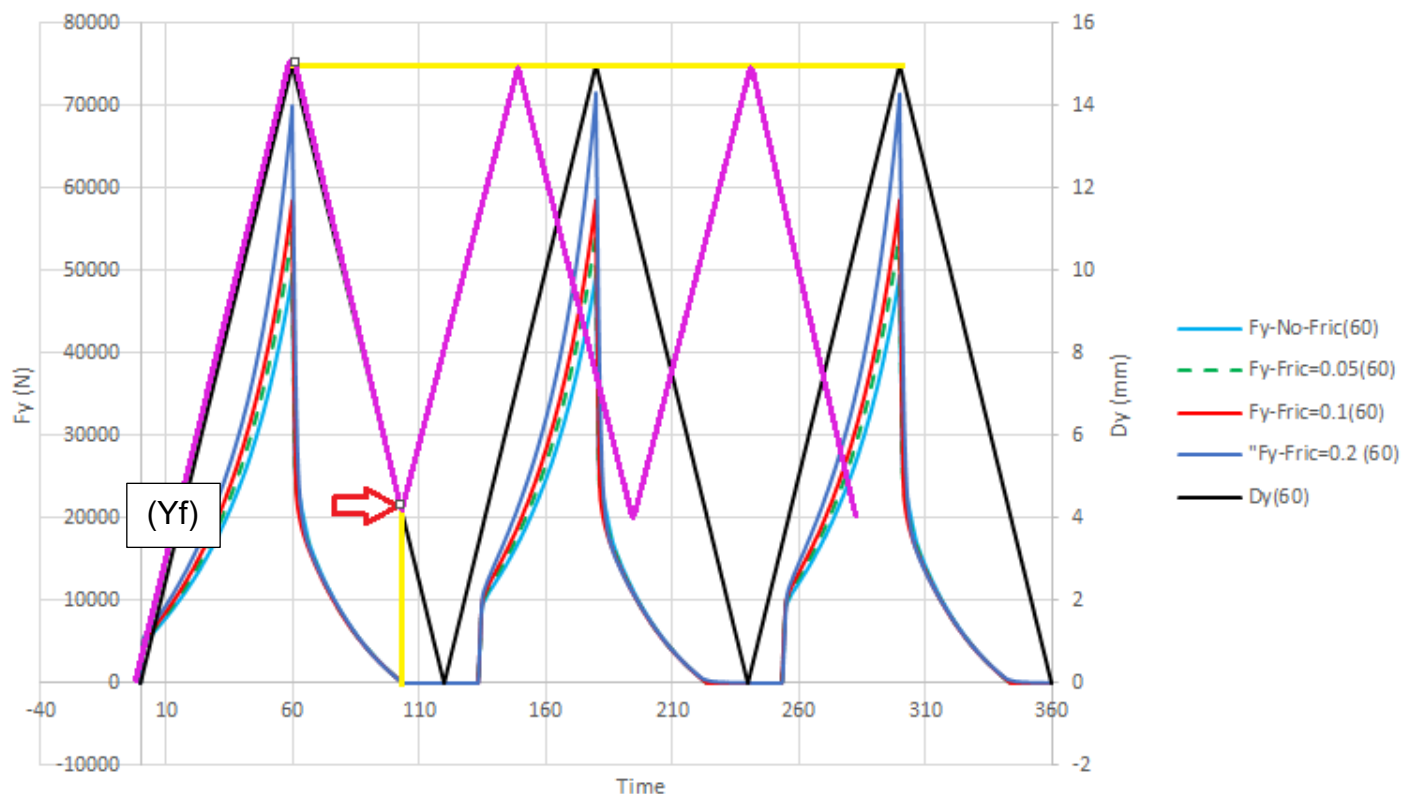
Нужно учесть, что для данного «демонстрационного» расчета, я использовал «чужие» экспериментальные данные одноосного сжатия и одноосного растяжения при разных скоростях нагружения (см. сд.рисунок).

Т.е. у меня не было экспериментальных данных по многократным циклическим нагружениям.

Вычисленные константы для модели материала, лишь ПРИМЕРНО описывают поведение полиуретана при циклических нагружениях.



Экспериментальные данных по полиуретану.



Нужно найти «НОВУЮ» траекторию нагружения, которая бы «гарантировала» ненулевые значения усилия на всем временном участке испытания.

Это можно сделать графическими или аналитическими методами.

1. Определяем координаты точки (отмеченная красной стрелкой), где величина усилия будет нулевая.

«Немного – на пример на 5%» увеличиваем координату точки по оси усилия (Y_f) и уменьшаем величину по оси времени = что бы получить гарантировано ненулевое значение по напряжениям в указанной точке при разгрузке.

2. «Рисуем» линию нагружения для второго цикла - до пересечения с верхней (горизонтальной) ограничивающей линией желтого цвета.

Эта линия должна быть параллельна «исходной» линии нагружения черного цвета.

3. «Рисуем» линию разгрузки для второго цикла - до пересечения с «предельным» значением по усилию (Y_f).

Эта линия должна быть параллельна «исходной» линии разгрузки черного цвета.

4. Далее еще раз повторяем п.2,3

5. В результате получим «НОВУЮ» траекторию нагружения – обозначенную малиновым цветом.

Описанные действия дают лишь ПРИМЕРНОЕ положение «узловых» точек «новой» траектории нагружения, так как исходной информацией являются результаты «приблизительных» расчетов, выполненных на «чужих» экспериментальных данных.

Возможно потребуется несколько итераций для уточнения контрольных точек требуемой траектории нагружения.

Многие экспериментальные стенды имеют возможности автоматизировать подобные эксперименты, но для этого нужно уметь программировать эти стенды хотя бы на минимальном уровне:

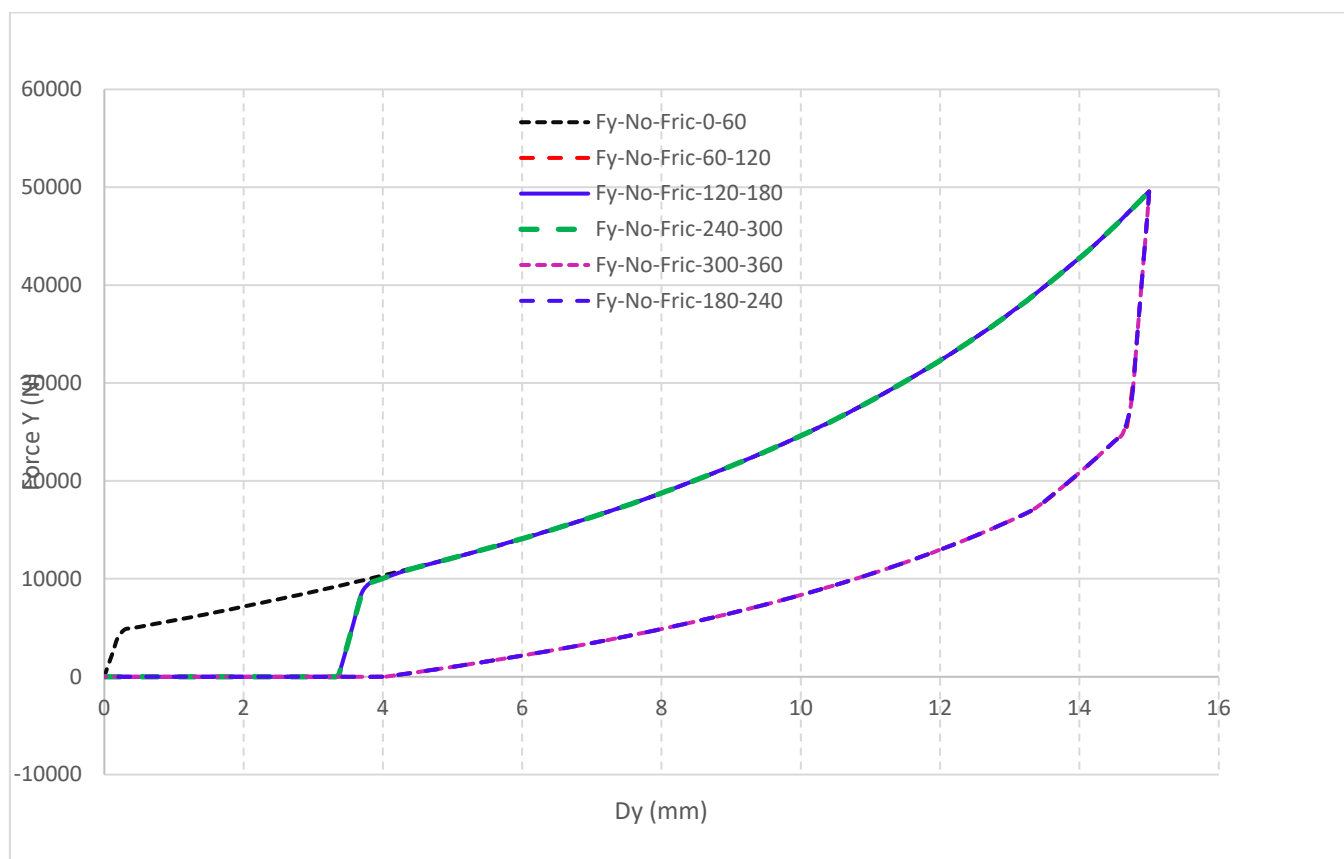
– в данном случае нужно лишь указать минимальное значение усилия при разгрузке, после которого нужно начать следующий цикл нагружения.

Если я правильно понял по описанию, то стенд Instron 4 имеет возможность программирования и позволяет реализовывать на много более сложные условия нагружений, нежели то – что нам сейчас нужно.

Для того что бы вычислить константы для модели вязкого НЕПОРИСТОГО материала, нужно иметь результаты экспериментов (сжатие, растяжение, сдвиг) как минимум для трех «характерных» скоростей нагружения - если нагружение описывается линейными законами, как в данном случае.

Если нужно рассчитать деформирование пористого гиперупругого материала, имеющего вязкие свойства – на пример пенополиуретан:

дополнительно нужно ОБЯЗАТЕЛЬНО провести эксперименты на объемное сжатие - как минимум для трех «характерных» скоростей нагружения.

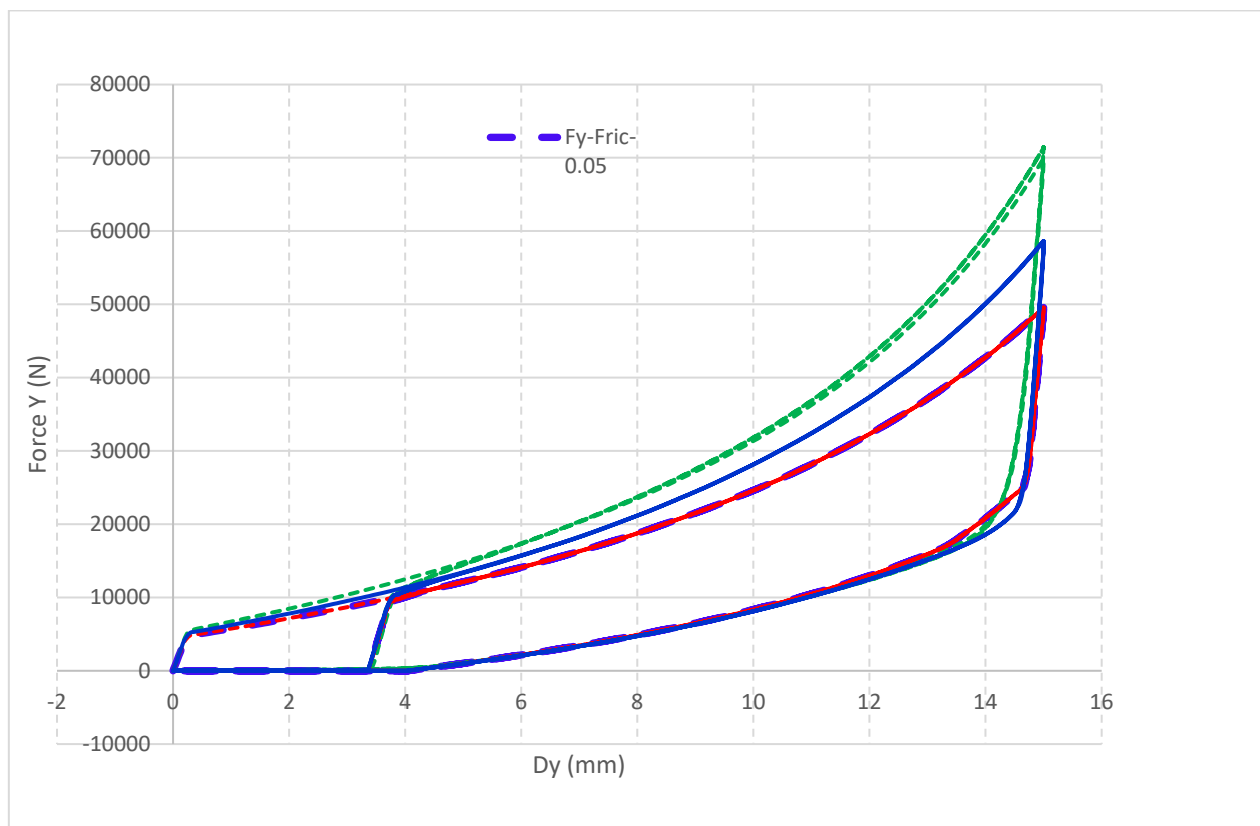


Изменение вертикального сжимающего усилия (время сжатия 60 секунд, к-т трения = 0),
в зависимости от вертикального перемещения.

Каждый этап : 3 сжатия и 3 разгрузения имеют отдельный цвет.

В данном случае, графики 2 и 3-го циклов практически совпадают.

Но так не далеко не всегда бывает – т.е. далеко не всегда удастся получить
«стабилизированное» деформированное состояние материала.



Изменение вертикального сжимающего усилия (время сжатия 60 секунд), для разных k -тов трения в зависимости от вертикального перемещения.

Эти графики подтверждают, что трение оказывает существенное влияние на результаты экспериментов и расчетов.

Естественно, что нужно стараться минимизировать величину трения.

Важно, что бы величина трения не очень сильно менялась в процессе эксперимента – т.е. как минимум имели «небольшую» зависимость от давления (нормального напряжения) между контактирующими поверхностями.

Делать подробное описание полученных результатов для данной серии расчетов не буду, поскольку я это сделал в описании первого этапа: сжатие + релаксация.

Но главное – нужно будет «пересчитать» эту задачу по трем циклам нагружения, для «НОВОЙ» траектории нагружения – где описание будет более важным и полезным.

Еще немного о законах трения, в данном случае о простейшем законе трения Кулона:
https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%90%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0_%E2%80%94%D0%9A%D1%83%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D0%B0

Силы трения не могут расти бесконечно, т.е. в какой-то момент времени начинается скольжение между ранее неподвижными контактирующими поверхностями.

Поэтому эксперименты «по выяснению процессов трения» являются крайне важными, как для правильного планирования/проведения экспериментов на одноосное сжатие, так и для численного моделирования работы производимой продукции.

В интернете есть огромное кол-во книг, статей и видео посвященных вопросам проведения экспериментов по трению и обработке полученных экспериментальных данных.

Существует большое кол-во законов трения и в настоящее время их активно продолжают разрабатывать, в том числе и для полимеров/резин.

Законы трения «граничат» с еще одной важной областью знаний – это ИСТИРАНИЕ/ИЗНОС.