

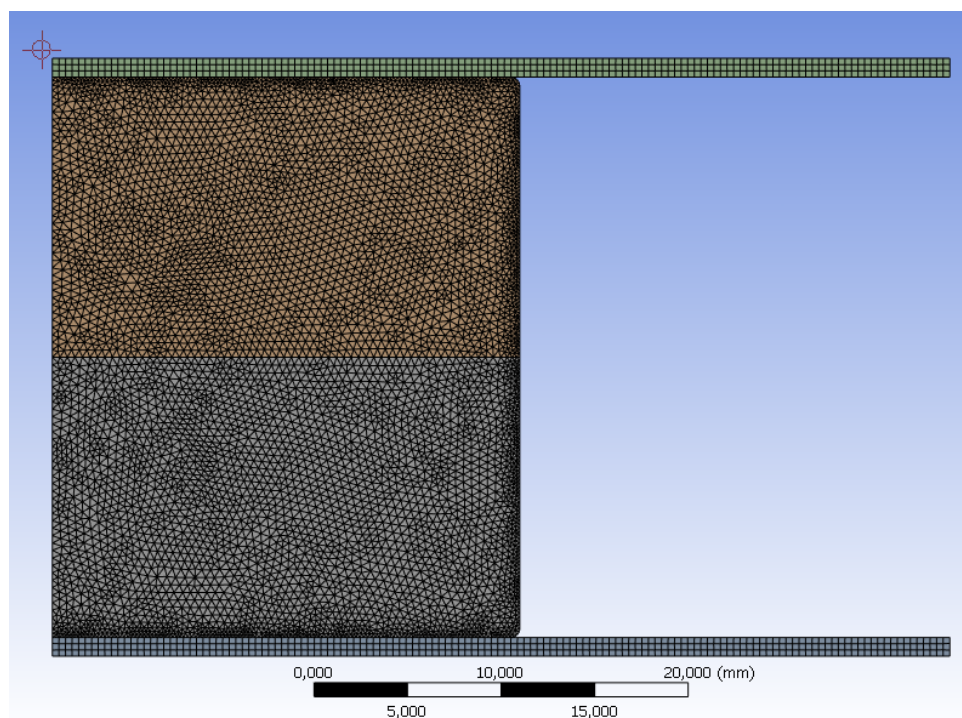
Описание задачи:

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.

Сжатие происходит в два этапа:

- 1-ый этап сжатие на величину 15 мм – по линейному закону – см. сл.рисунок- за время 60 секунд.



- 2-ой этап релаксация - время 1 сутки = 86 400 секунд.

Между деталями заданы контакты.

Модель трения – статический закон трения Кулона , величина к-т трения задавалась от 0 ,0.05, 0.1, 0.2

Используется модель материала **Three Network Model** - учитывающая нелинейную вязкость, краткое описание модели см.: <https://polymerfem.com/three-network-model/>

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

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.

1184

L. Zhang et al./Materials and Design 65 (2015) 1181–1188

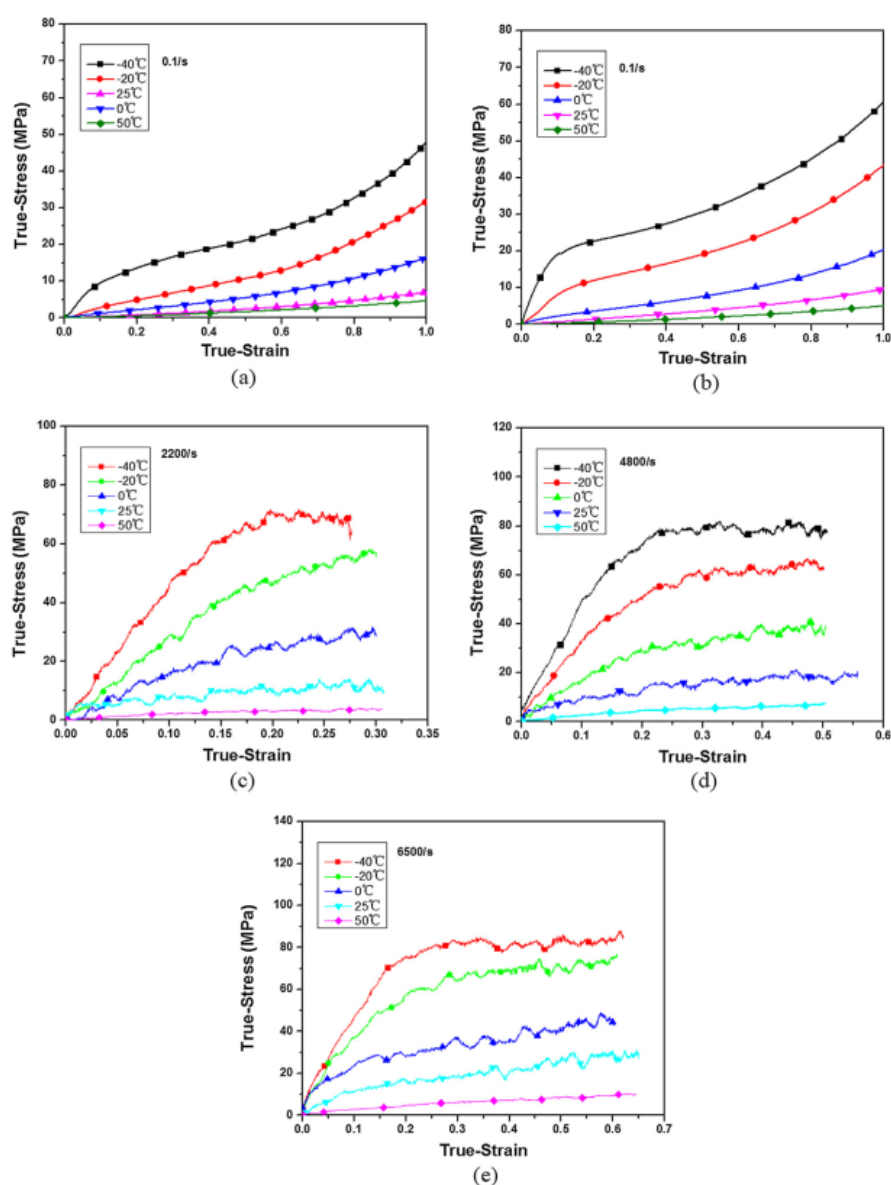
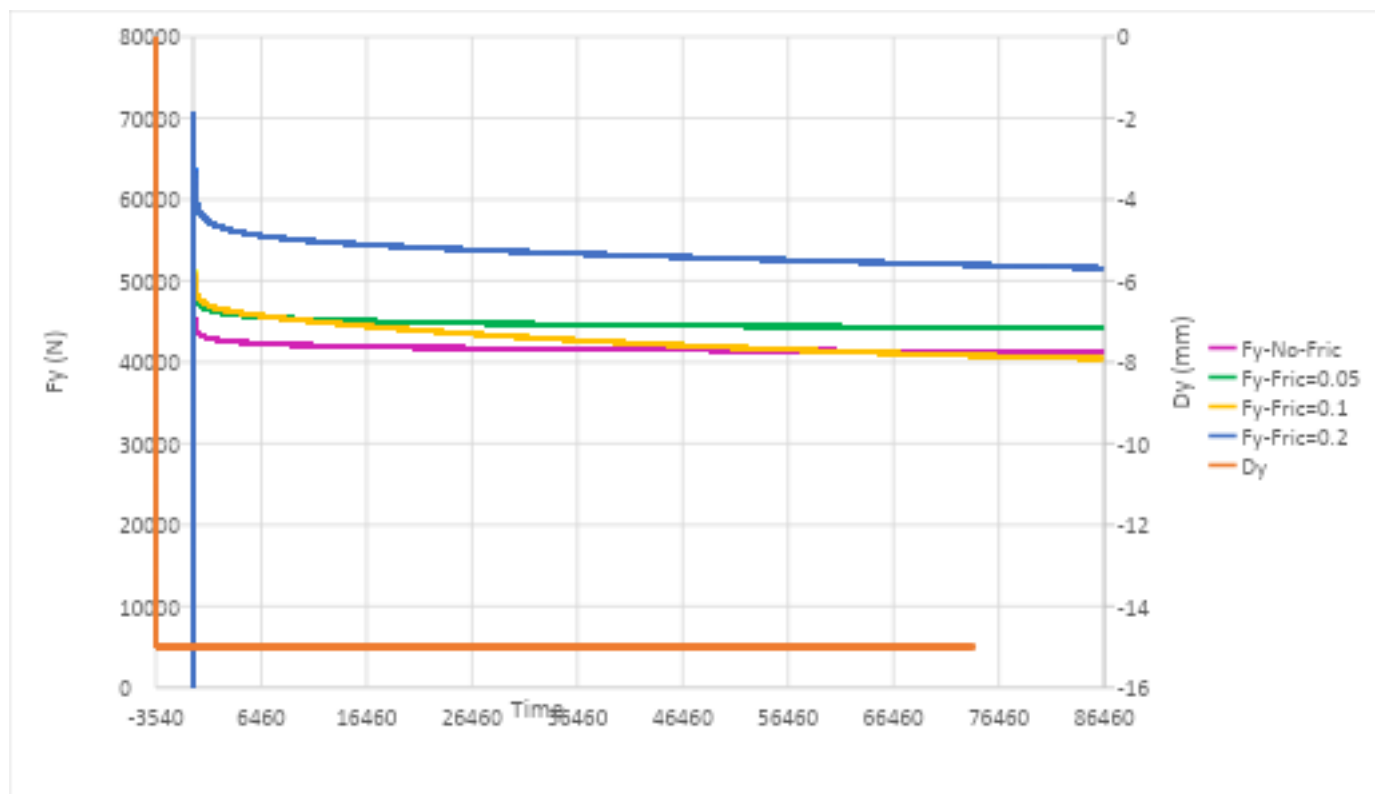


Fig. 5. True stress-strain curves of the polyurethane interlayer at different temperatures at a certain strain rate (a) 0.01/s, (b) 0.1/s, (c) 2200/s, (d) 4800/s, (e) 6500/s.

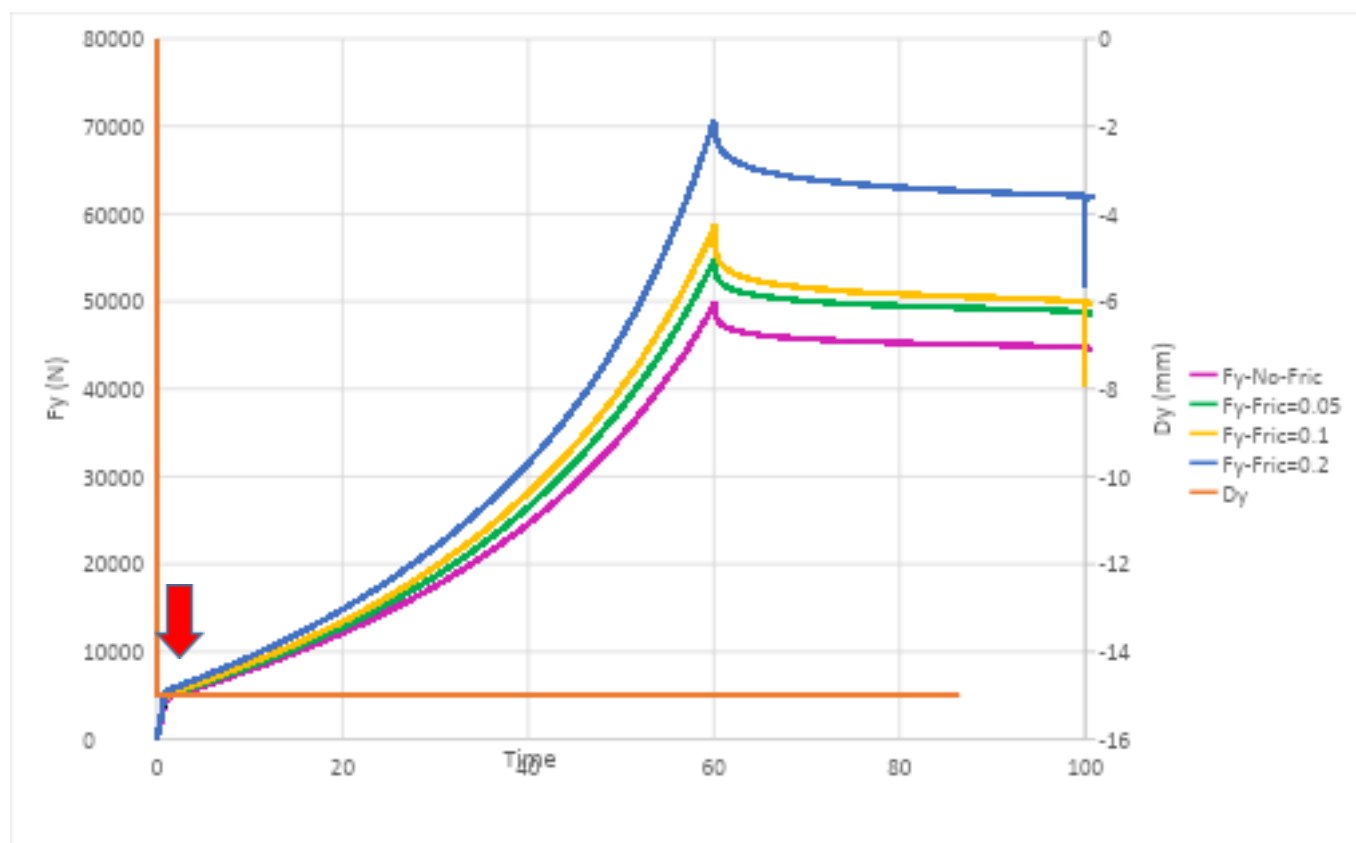
Результаты расчета.



Изменение величины суммарного усилия,
при различных k -тах трения на всем временном диапазоне.

Замечания по графикам:

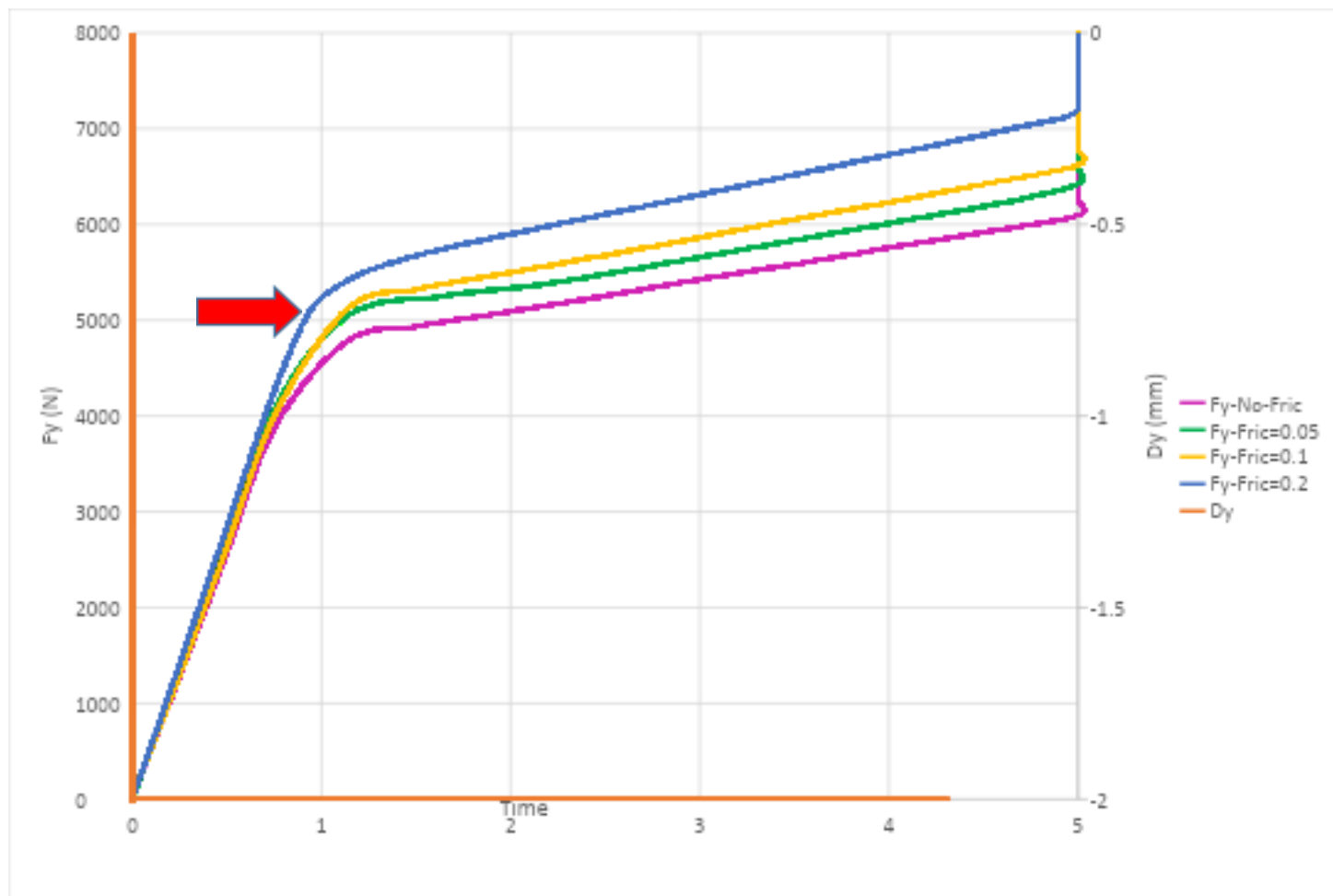
- Величина / закон трения между образцом и пластинам существенно влияет на результаты эксперимента и расчета.**
Т.е. когда рассматривают результаты эксперимента/расчета, в дополнение к другим факторам (скорость деформирования, амплитуда / закон деформирования и так далее ..), нужно так же подробно описывать закон трения —изменения k -та трения от давления, относительной скорости перемещения контактирующих поверхностей и пр.
- Временная область активного {нелинейного} изменения (релаксация) напряжения происходит в течении относительно непродолжительного времени – около 6000 секунд = 1,5-2 часа.**
Далее напряжение уменьшается по «квазилинейному» закону, который вероятно можно рассматривать как линейный.
- Графики можно разделить на две группы:
 - а) трение нулевое и трение = 0,05 – **малиновый** и **зеленый** графики,
 - б) трение = 0,1 и 0,2 – **синий** и **желтый** графики.Следует обратить внимание, что обе группы графиков имеют РАЗНЫЕ «углы наклона» для «квазилинейных» участков.
- При одной и той деформации , но при разных k -тах трения - получаем СУЩЕСТВЕННО РАЗНЫЕ величины усилий = от 40 000 до 70 000 Ньютон.
– см. сл. график



Изменение величины суммарного усилия,
при различных к-тах трения на начальном временном диапазоне (0-100 секунд).

Замечания по графикам:

1. График «воздействия» - задавалось перемещение = ЛИНЕЙНЫЙ, а графики «отклика» - напряжения = существенно нелинейные.
Это одно из многочисленных проявлений вязких свойств полиуретана.
2. Красной стрелкой указана область в начале нагружения, где наблюдаются «скачки» на графиках, причина этого следующая:
для вязких сред/материалов, деформации «отстают» от напряжений, а поскольку в данном случае деформации – «фиксированы» - т.е. они принудительно задаются – то изменение напряжения «опережает» изменение деформации.
Для данной задачи – время опережения составляет – около 1 секунды – см. сл. график.
3. При проведении экспериментов на одноосное сжатие/растяжение/сдвиг, даже непродолжительная остановка приведет к существенным релаксационным спадам.



Изменение величины суммарного усилия,
при различных к-тах трения на начальном временном диапазоне (0-5 секунд).

Следует обратить внимание на область «перегиба» всех графиков, отмеченной красной стрелкой.

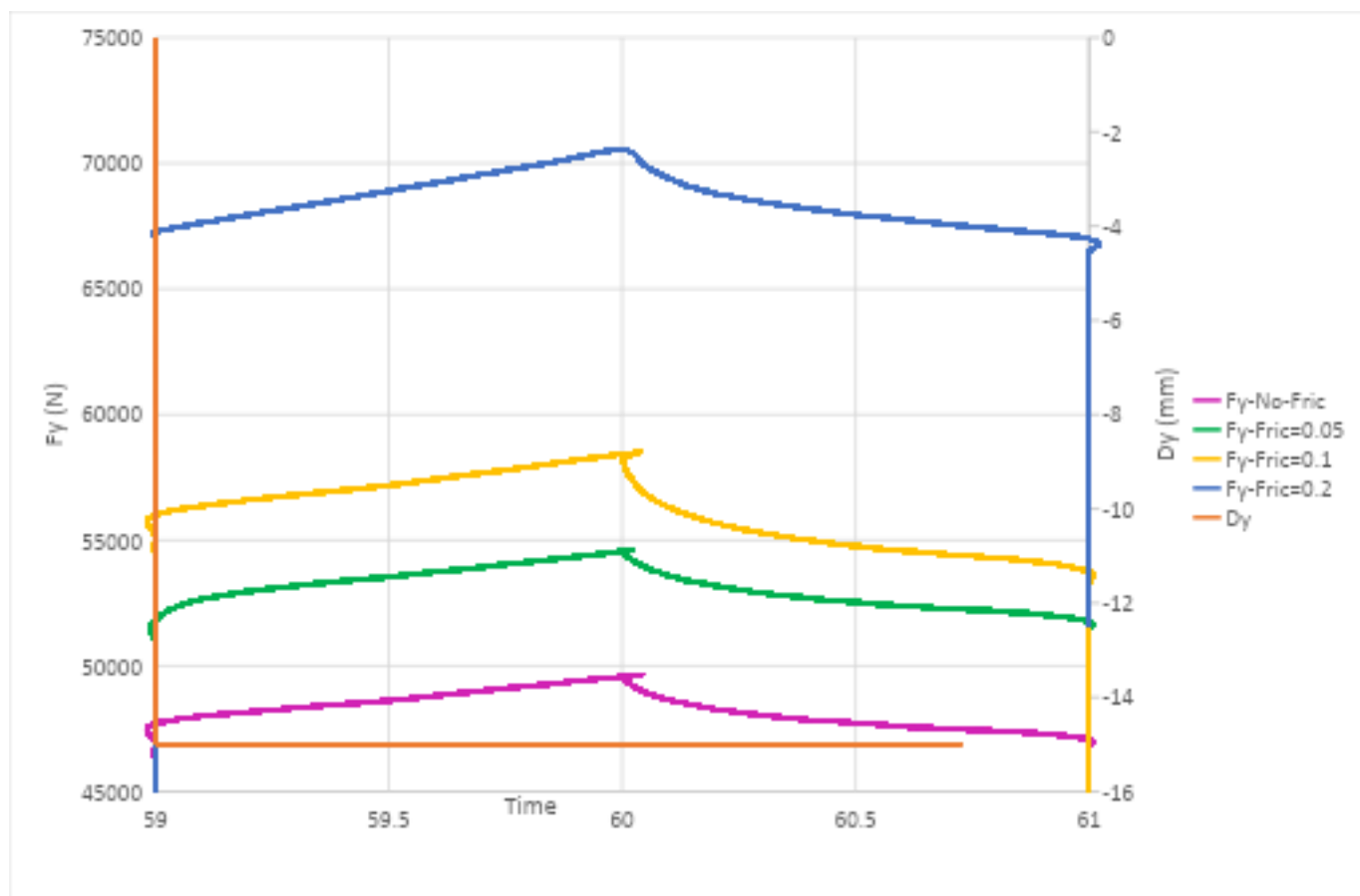
Характер «деформирования/поведения» материала качественно разный.

Об этом я буду писать несколько позднее.

«Среднее» время опережения напряжений - области «перегибов» ,для всех графиков находятся в диапазоне (0,75 секунды до 1,5 секунд).

Эту величину «задержки» можно и нужно использовать как начальное/примерное значение поиска величины требуемой «отсечки» величины разгрузки при циклических нагружениях.

**На пример: 1 секунда – это 1/30 или 1/60 величины деформации, т.е. при «обратном» ходе нагружения (разгрузке) – нужно выполнять разгрузку не до нуля, а до величины = $15 \text{ мм} \cdot 1/30 = 0,5 \text{ мм}$
15 мм – это величина сжатия
30 – это время нагружения.**



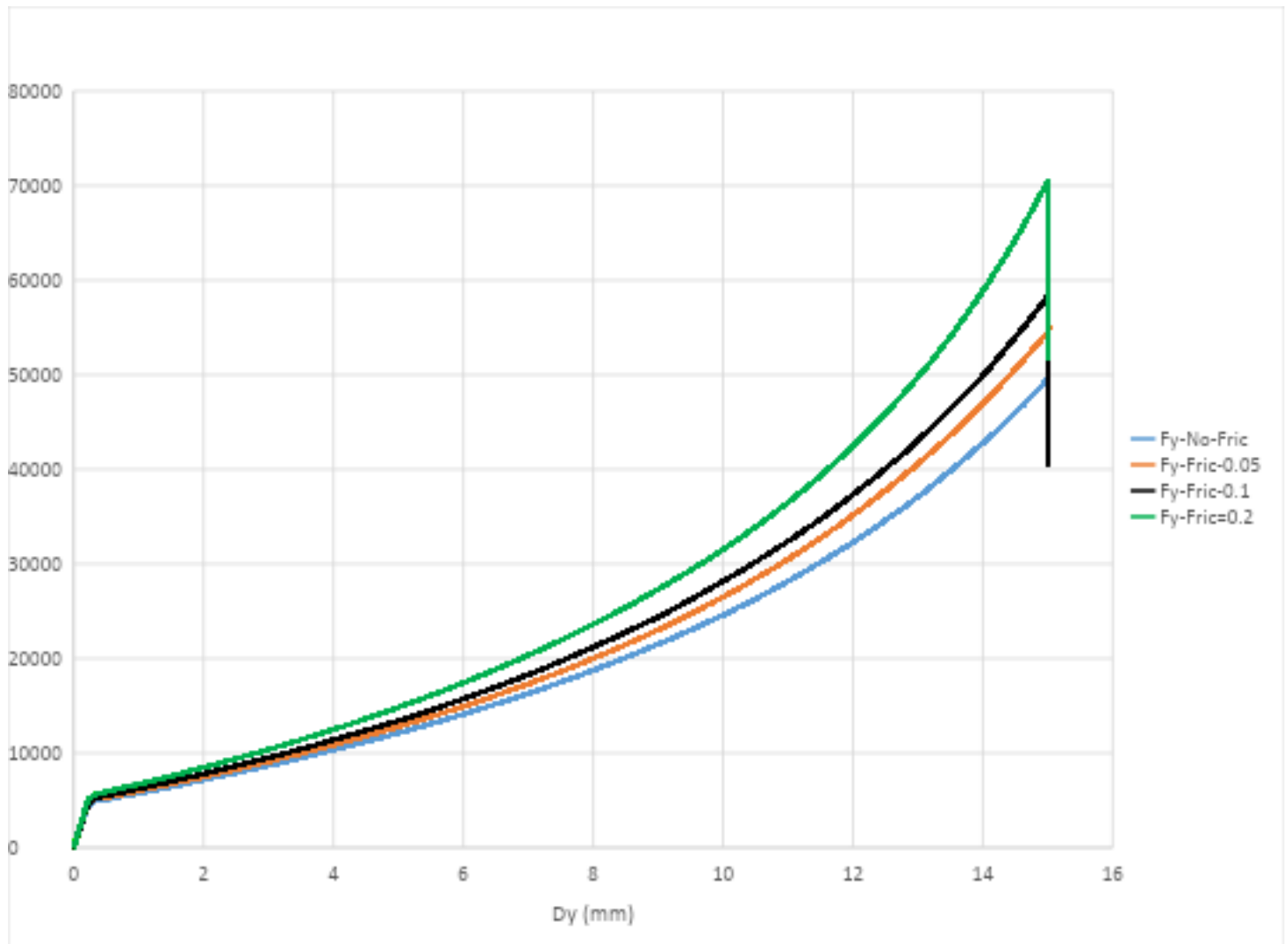
Изменение величины суммарного усилия,
при различных к-тах трения в момент остановки нагружения (60 секунд).

Следует обратить внимание на область «перегиба» всех графиков, отмеченной красной стрелкой.

В момент начала процесса релаксации, характер «деформирования/поведения» материала качественно разный.

Об этом я так же я буду писать несколько позднее.

Сейчас просто прошу обратить внимание на эти два ВАЖНЫХ факта и запомнить их.



Изменение величины суммарного усилия в зависимости от перемещения,
для времени сжатия 60 секунд..

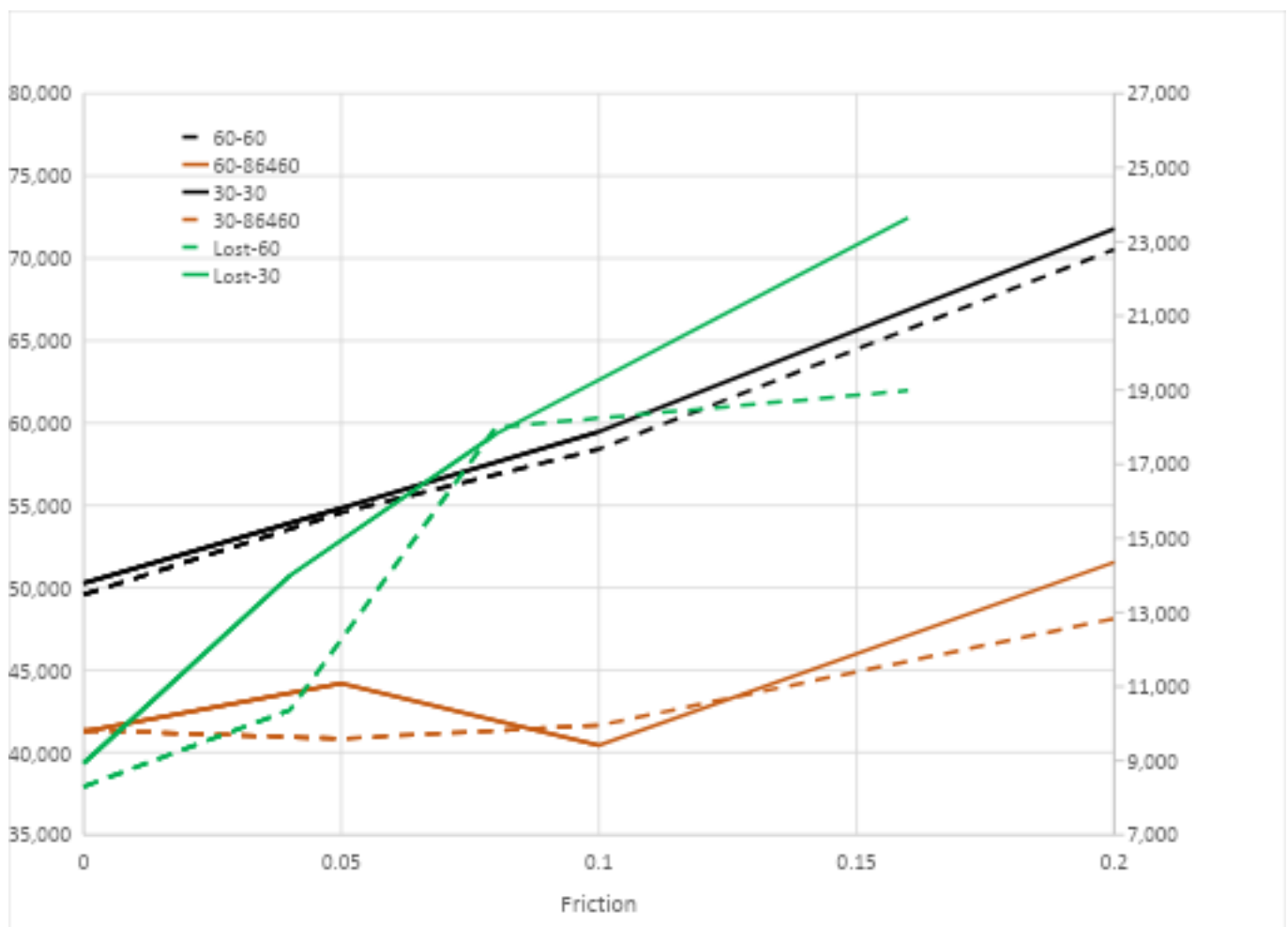
Таким образом, результатами экспериментов должны быть два графика:

1. Зависимость усилия от времени.
2. Зависимость усилия от перемещения.

«Потеря» усилия на этапе релаксации.

60 сек					30 сек				
время	к-т трения				время	к-т трения			
	0	0.05	0.1	0.2		0	0.05	0.1	0.2
60	49 580	54 554	58 422	70 537	30	50281	54834	59471	71779
86460	41 276	44 187	40 427	51 552	86460	41348	40842	41652	48134
Потери	8 304	10 367	17 995	18 985	Потери	8933	13992	17819	23645

Таблицы величин сжимающего усилия при разных временах и значения к-та трения.



«Потеря» усилия в зависимости от времени, на этапе релаксации.

Графики 60-60 и 30-30 – это изменение достигнутой величины усилия, в моменты времени 60 и 30 секунд, когда сжатие закончено – при разных к-тах трения.

Вертикальная ось – слева.

Графики 60-86460 и 30-86460 – это изменение достигнутой величины усилия, в момент окончания периода релаксации 86 460 секунд – при разных к-тах трения.

Вертикальная ось – слева.

Графики Lost-60 и Lost-30 – это потери (разница между двумя предыдущими графиками)– при разных k -тах трения.

Вертикальная ось – справа.

Описание графиков:

1. **Графики 60-60 и 30-30** – это изменение достигнутой величины усилия, в моменты времени 60 и 30 секунд – имеют линейные зависимости от величины k -та трения.

Причиной линейного роста вертикального усилия, является **ЛИНЕЙНЫЙ** закон возрастания сил трения.

Вероятно, если закон трения будет нелинейный, графики роста усилия будут так же нелинейными.

2. **Графики 60-86460 и 30-86460** – это изменение достигнутой величины усилия в момент времени 86460 секунд в зависимости от величины k -та трения, для двух случаев – времен сжатия 60 и 30 секунд.

Графики имеют «псевдолинейный» вид, с очевидным ростом величины силы сжатия на момент времени 86460 секунд для больших значений k -та трения.

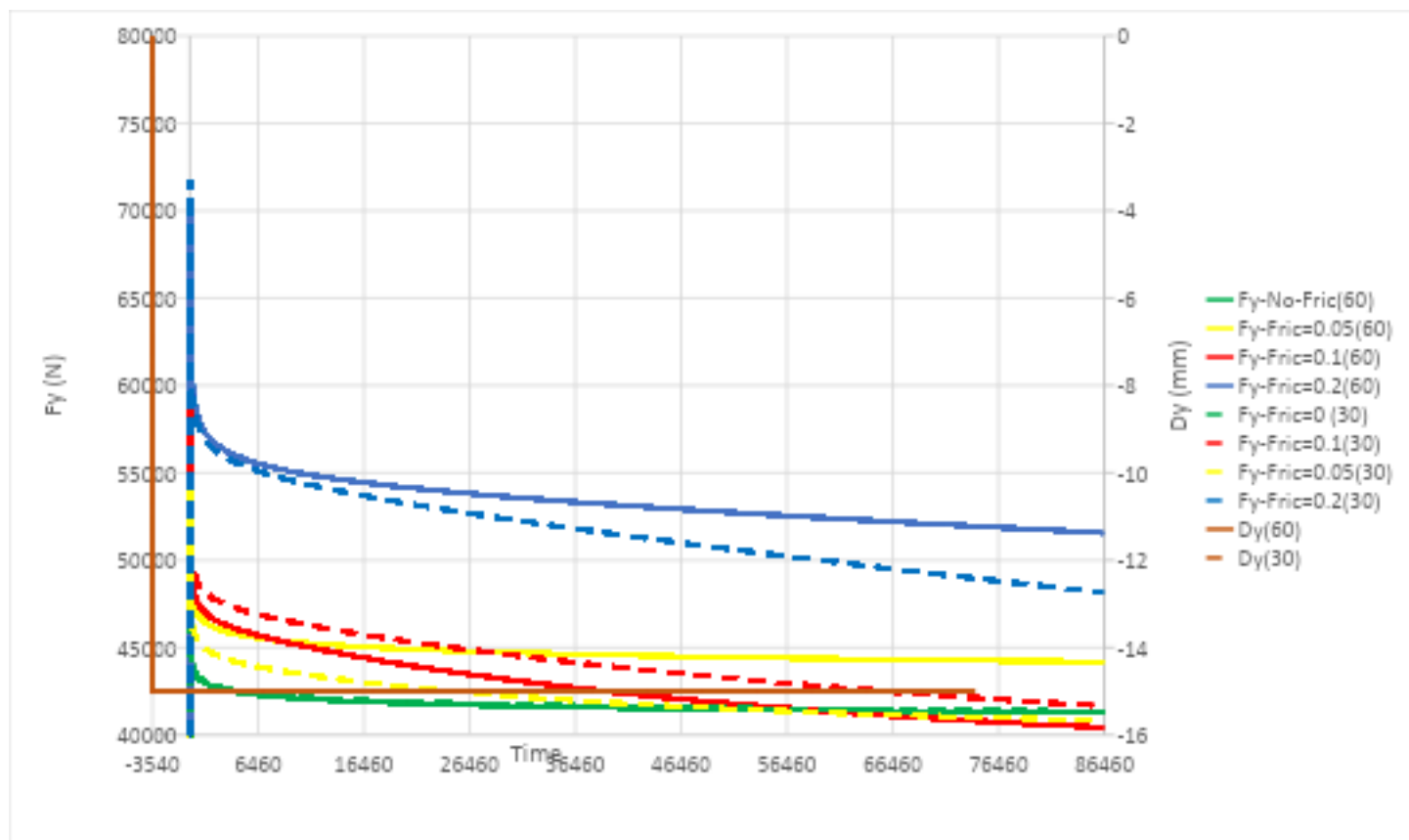
Причиной этому вероятно являются силы трения, которые в данной формулировке закона трения Кулона – прямо пропорциональны k -ту трения.

Чем больше силы трения на контактирующих поверхностях, тем сложнее материалу образца проявлять вязкие свойства – «течь».

3. **Графики Lost-60 и Lost-30** – точно/однозначно объяснить поведение этих графиков пока не могу.

Есть предположения – но их нужно обдумать.

Сравнение графиков суммарного усилия при разных временах сжатия 30 и 60 секунд.



- **Пунктирные линии** – графики суммарного усилия для времени сжатия 30 секунд, при разных к-тах трения.
- **Сплошные линии** – графики суммарного усилия для времени сжатия 60 секунд, при разных к-тах трения.

В области «релаксации», графики для времен сжатия 30 и 60 секунд имеют различия, при чем – чем больше к-т трения, тем большее различие.

Для к-та трения = 0.2 график (30 сек) проходит ниже графика (60 сек)

Для к-та трения = 0.1 график (30 сек) проходит выше графика (60 сек)

Для к-та трения = 0.05 график (30 сек) проходит ниже графика (60 сек)

- Причин такого поведения я не знаю = нужно будет подумать...

Для графиков с к-том трения = 0, в области «релаксации» графики полностью совпадают, что подтверждает что закон (величина) трения между образцом и пластинами в эксперименте является «значимым».

- Еще раз отмечу, что используемый в этих расчетах закон трения Кулона, является самым простым/примитивным, и конечно же он не отражает всех факторов влияющих процесс трения.

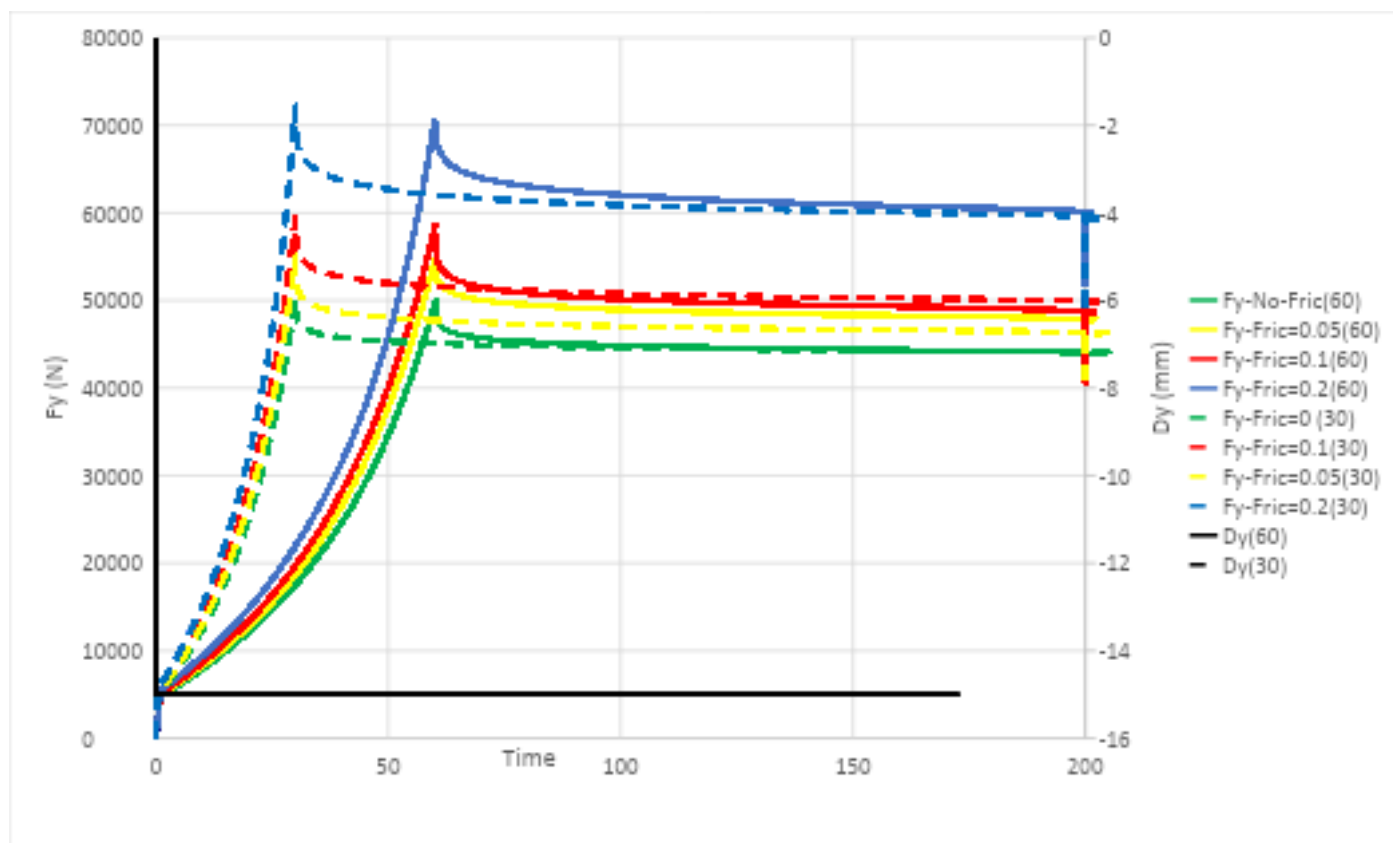
Как известно, есть рекомендации - следует стремиться к минимизации трения между контактирующими деталями в экспериментальной сборке любого типа.

Не редко, нужно учитывать большое кол-во «составляющих» причин/источников трения, на пример – «молекулярную» составляющую:

если два тела «объединили» в сборку и сразу же начали проводить эксперименты, то получили «один» результат.

но если два тела «объединили» в сборку и какое-то время с ними ничего не делали (хранили) , а лишь спустя «некоторое» время начали проводить эксперименты, то получили «ДРУГОЙ» результат.

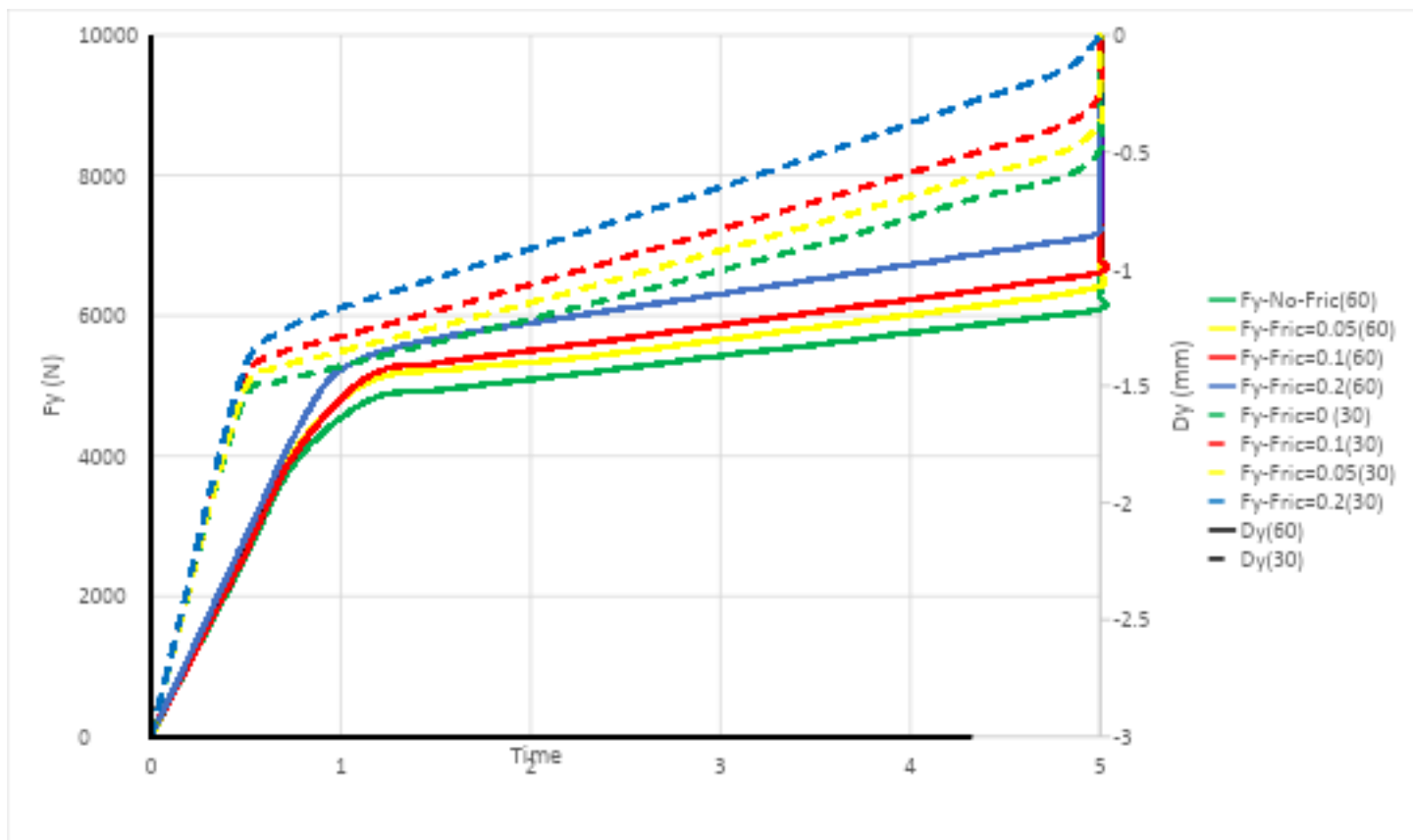
Причина проста – появилось «молекулярное сцепление» между материалами деталей, которое увеличило силу трения.



Изменение величины суммарного усилия, при различных k -тах трения в для временного диапазона (0-200 секунд) (30 и 60 секунд).

Максимальные величины для графиков (30 секунд) «чуть-чуть» больше, чем для графиков (60 секунд), вероятно причина этому следующая: материал за 30 секунд успевает меньше релаксировать/деформироваться, чем за 60 секунд.





Изменение величины суммарного усилия,
при различных к-тах трения в для временного диапазона (0-5 секунд) (30 и 60 секунд).

Изломы на графиках, в местах указанных красной стрелкой, отличаются количественно и качественно.

Количественное отличие по напряжениям:

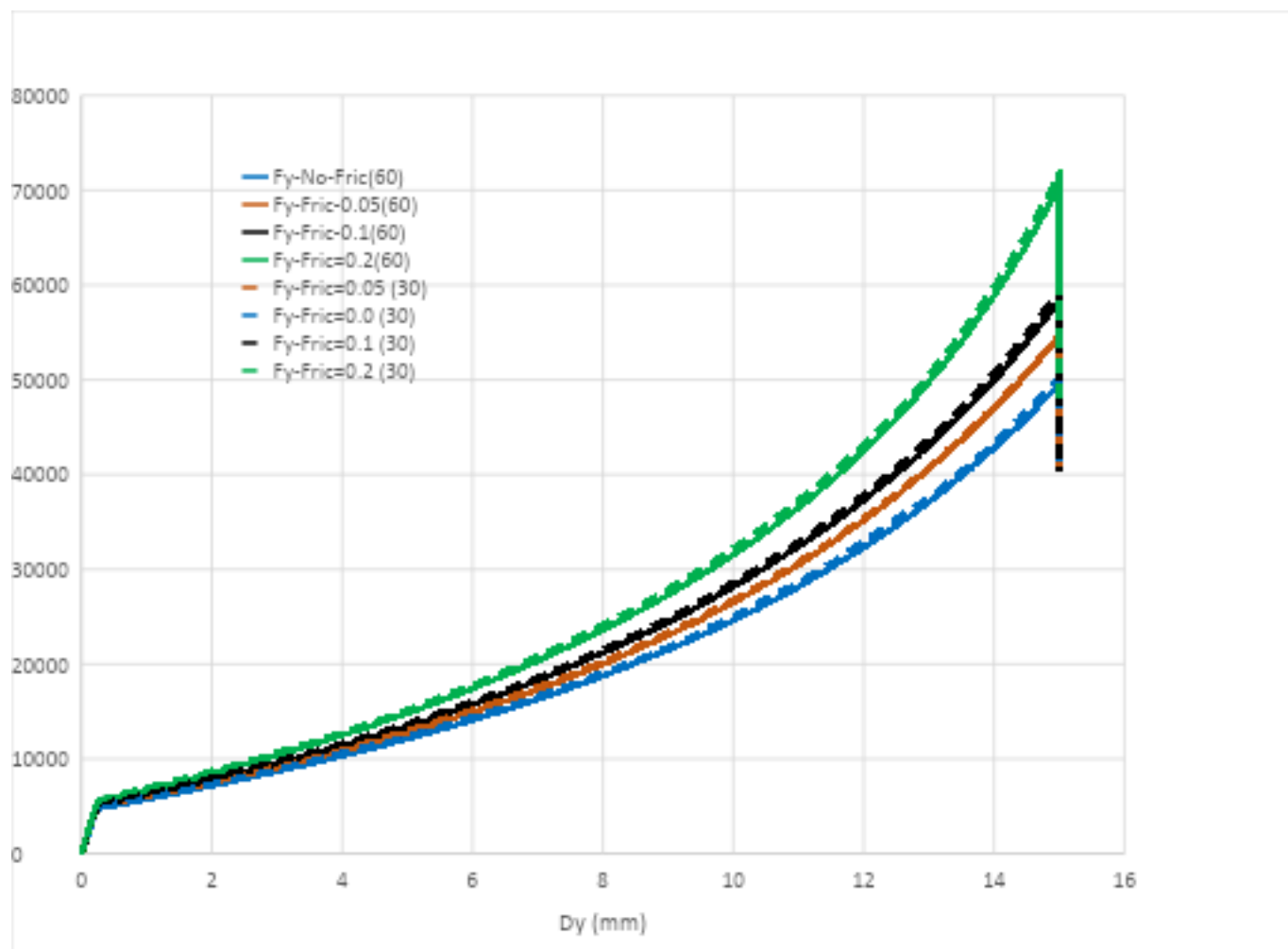
материал за 30 секунд успевает меньше релаксировать/деформироваться, чем за 60 секунд.

Количественное отличие по времени:

материал чувствителен к изменению скорости деформации, т.е. при увеличении скорости деформирования – материал становится более «жестким» => и как следствие растут напряжения.

*** что подтверждается простым примером – если в воду падает тело с маленькой скоростью, то тело остается целым, а вода «уходит» в стороны, но если тело падает в жидкость с большой скоростью, то оно может разрушиться – так как жидкость при больших скоростях может рассматриваться как «твердое» и не сжимаемое тело.

Качественное отличие изломов графиков для 30 и 60 секунд – это я еще не изучал – нужно будет подумать...

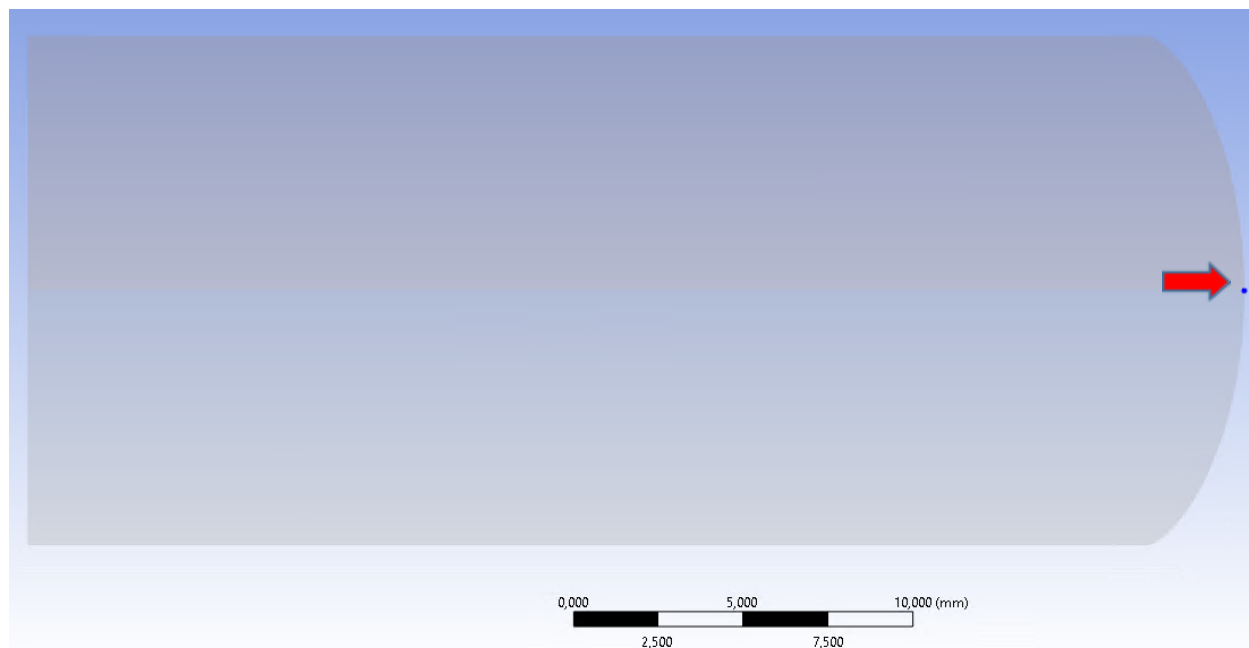


Изменение величины суммарного усилия в зависимости от вертикального перемещения, при различных к-тах трения.

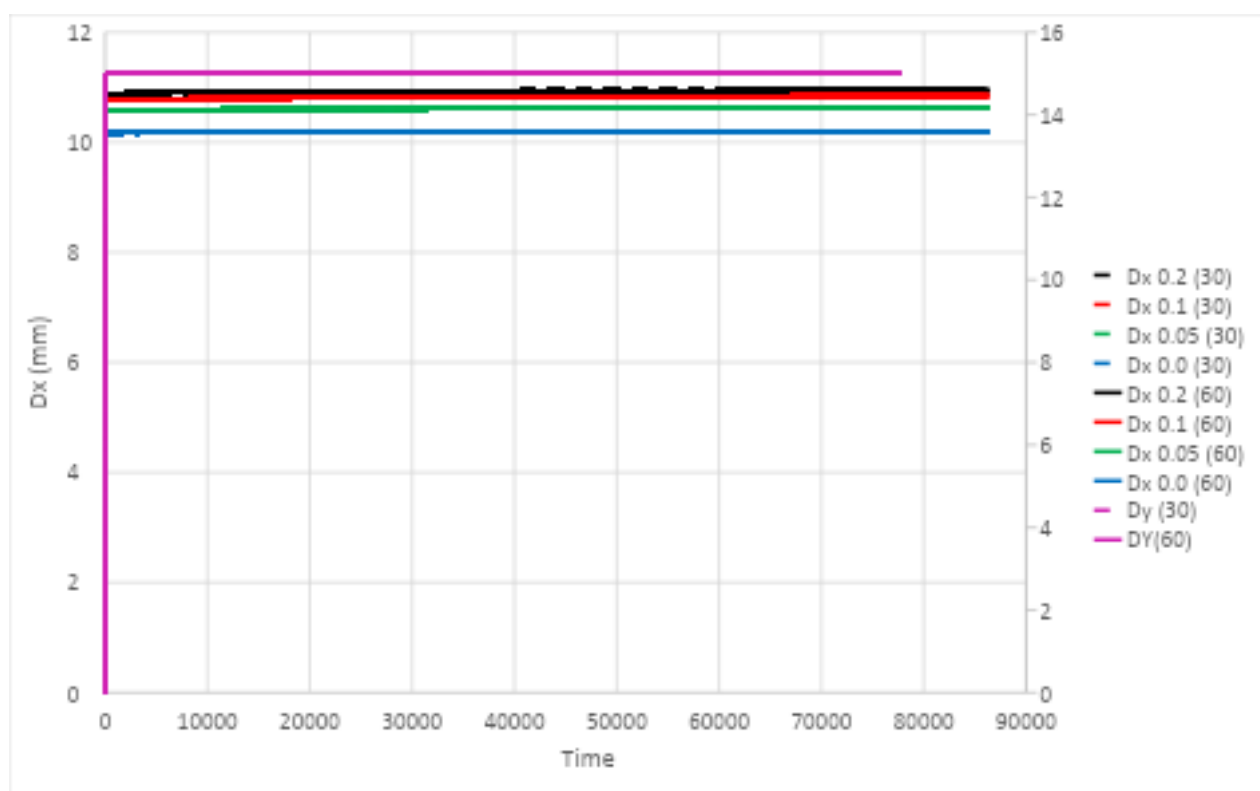
Время сжатия 30 секунд – пунктирные линии.

Время сжатия 60 секунд – сплошные линии.

Несколько групп таких графиков, времена сжатия которых соответствуют условиям реальной задачи – являются частью необходимой исходной информации для вычисления и калибровки констант для модели материала.

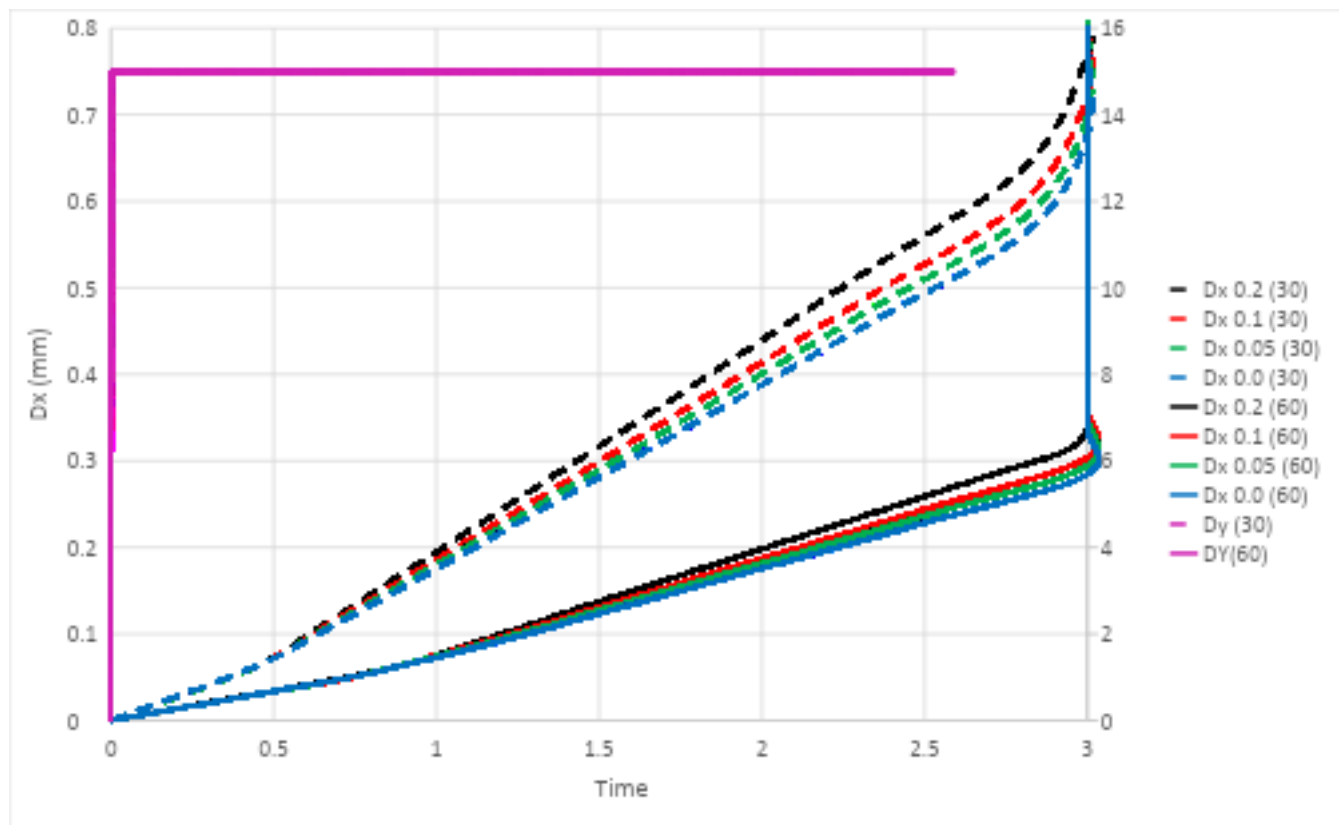


Красной стрелкой отмечена точка КЭ на срединной линии, для которой будут строиться графики перемещений, при различных значениях k -та трения и разных временах нагружения (30 и 60 сек).



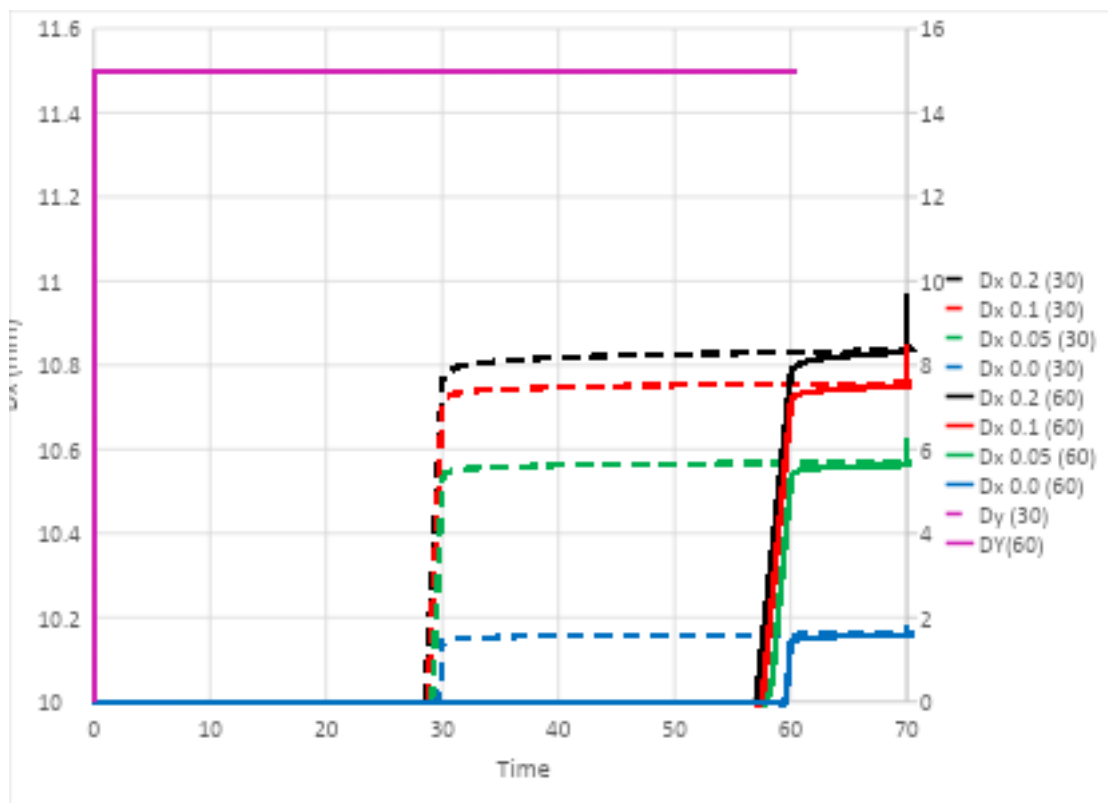
Изменение величины перемещения по оси X, при различных k -тах трения для всего временного диапазона (86460 сек).

Принимая во внимание, что эти графики «монотонны и подобны», а так же учитывая что в этой точке ротации напряжений практически нет, можно попробовать получить «связать» перемещения по X в этой точке, с каким-то «интегральным» параметром реального закона трения – попробую об этом подумать..

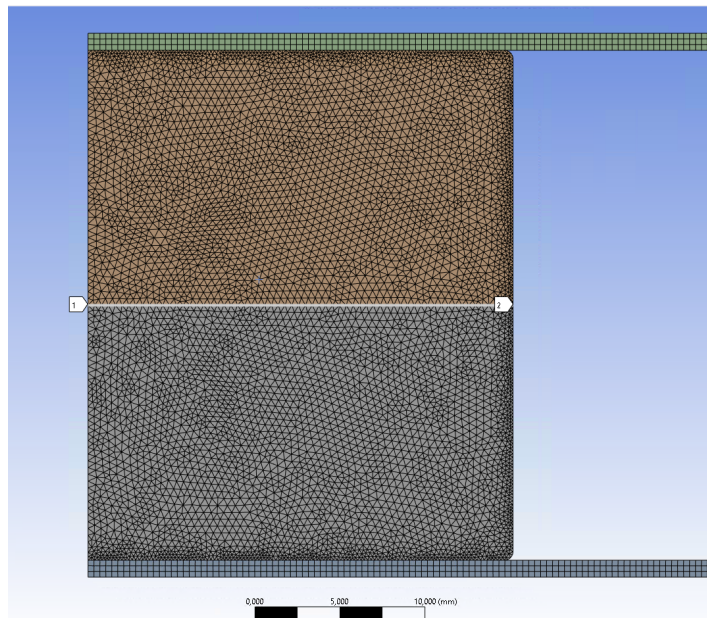


Изменение величины перемещения по оси X,
при различных k -тах трения для временного диапазона (0-3 секунд).

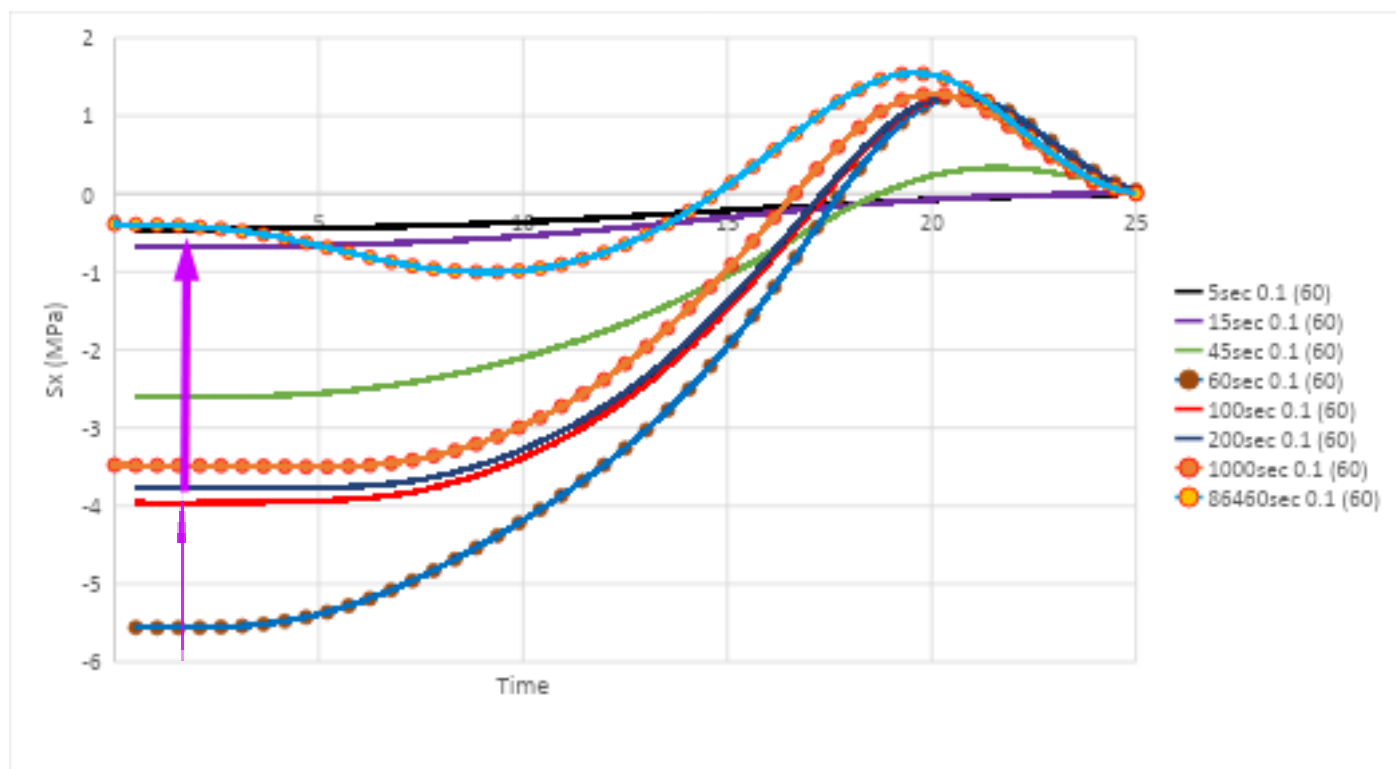
Графики подтверждают все ранее написанное.



Изменение величины перемещения по оси X,
при различных k -тах трения для временного диапазона (30-60 секунд).



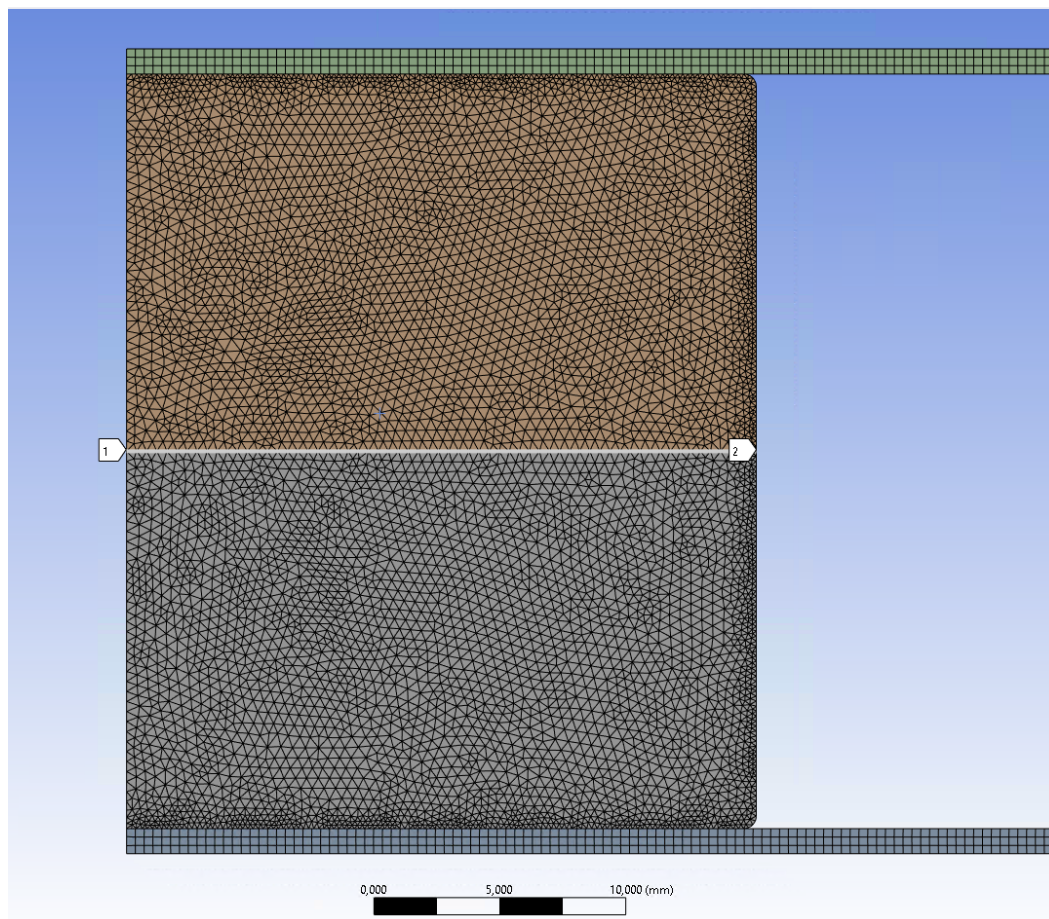
Для точек КЭ, лежащих на выделенной линии [1,2] будут построены графики перемещения по оси X.



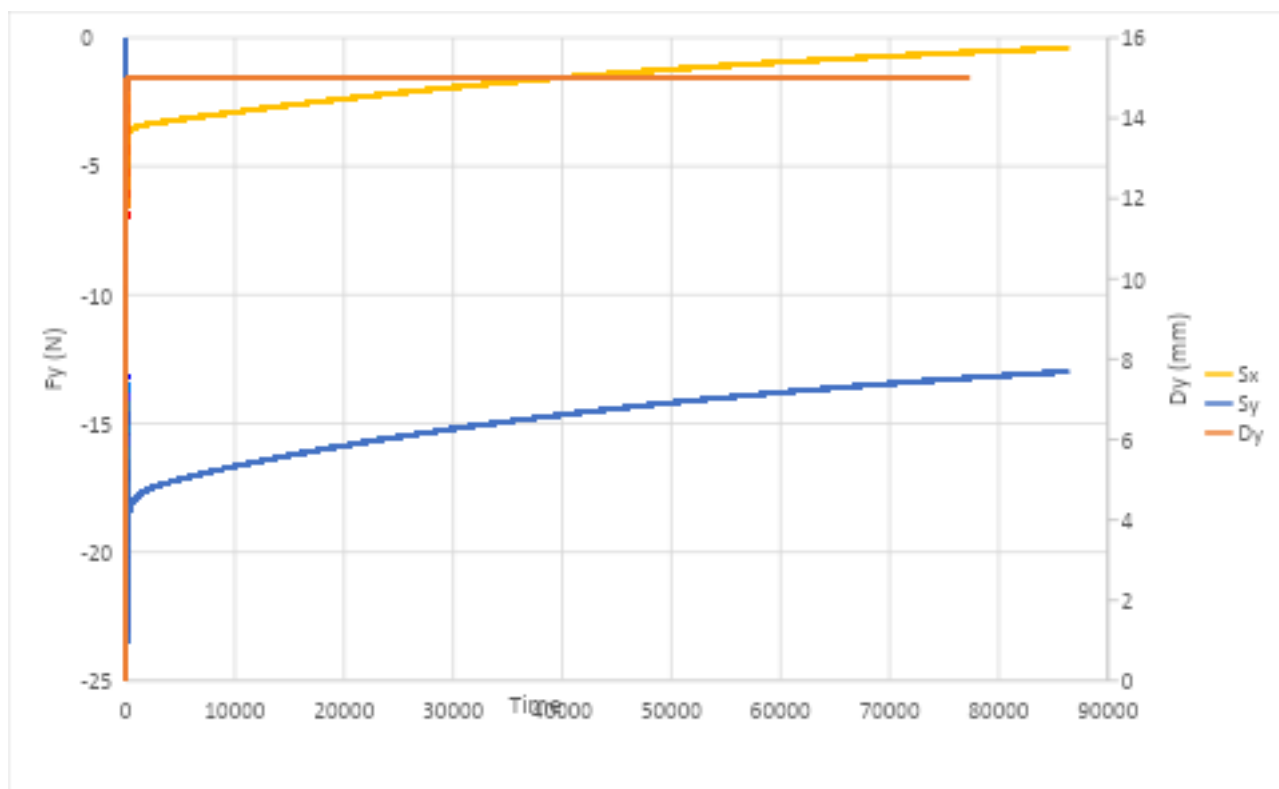
Графики напряжения по оси X для точек КЭ, лежащих на выделенной линии [1,2] при разных временах решения.

Малиновыми стрелками показана очередность распределения напряжения вдоль линии, для трех времен 60, 10 000 и 86 460 секунд.

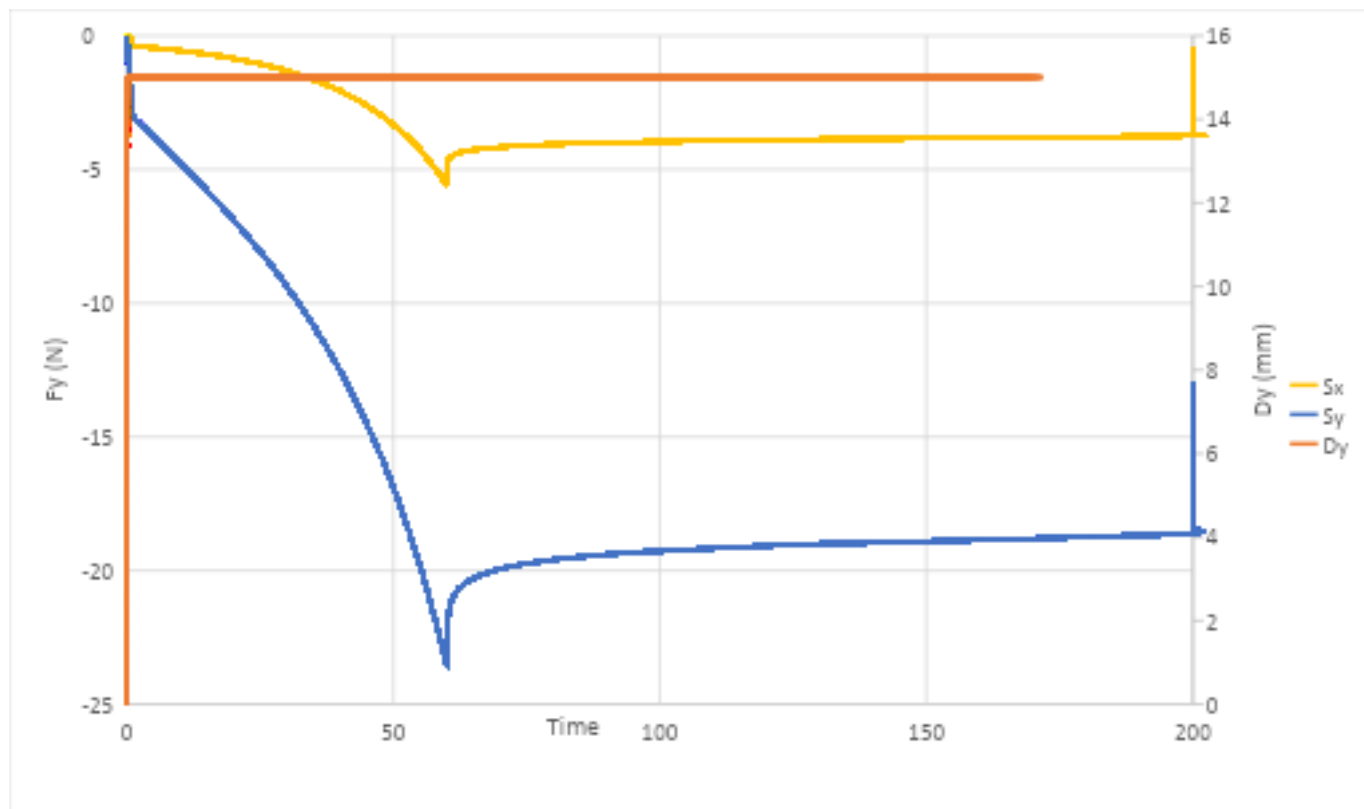
Столь значительное количественное изменение напряжения, подтверждает необходимость изучения и учета вязких свойств полиуретана и аналогичных материалов.



В точке (1) будут построены напряжения по осям X и Y (МПа)

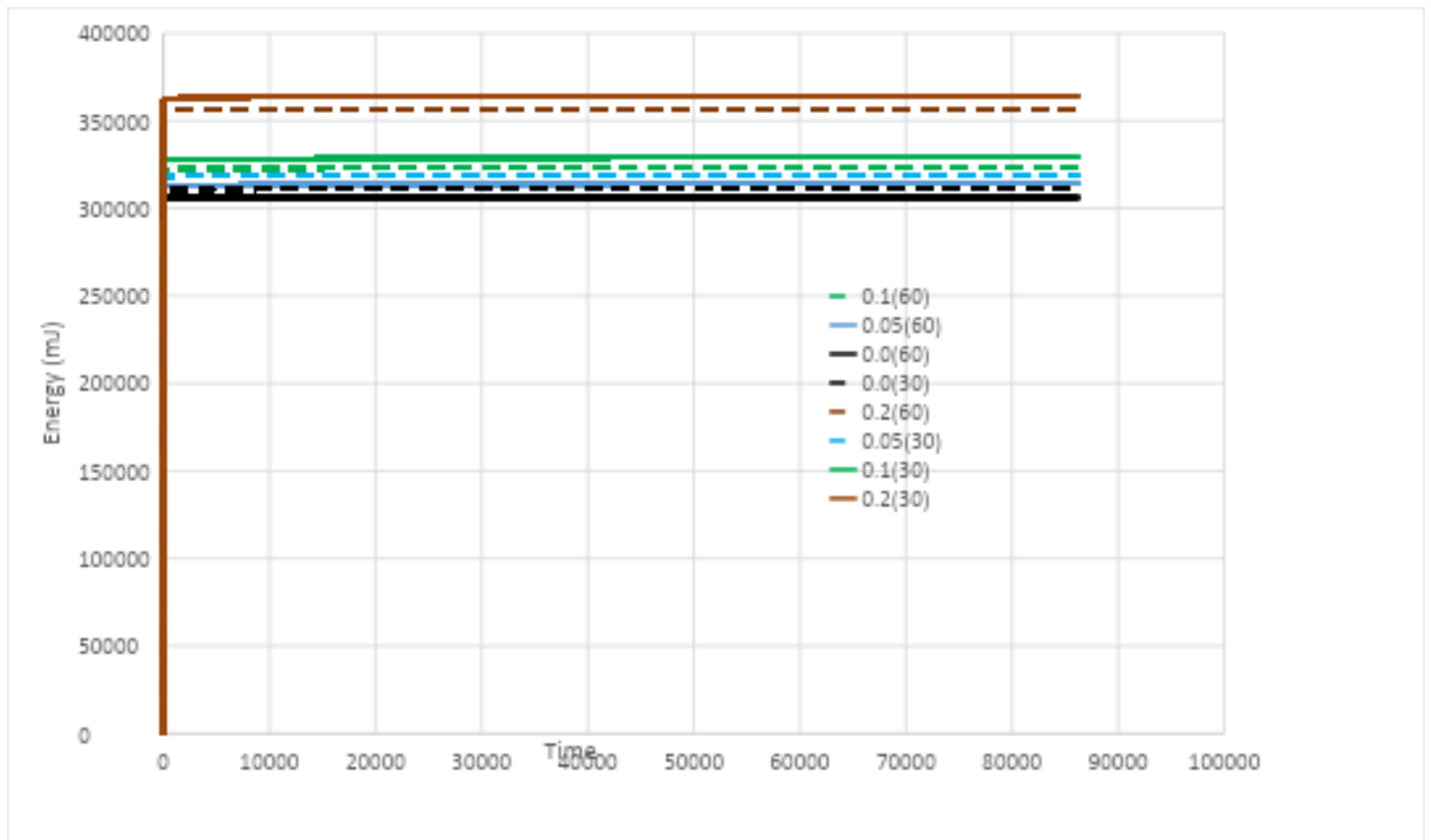


Изменение напряжений по осям X и Y для точки 1, для всего диапазона решения. (МПа)



Изменение напряжений по осям X и Y для точки 1, для диапазона 0-200 сек. (МПа)

Энергия



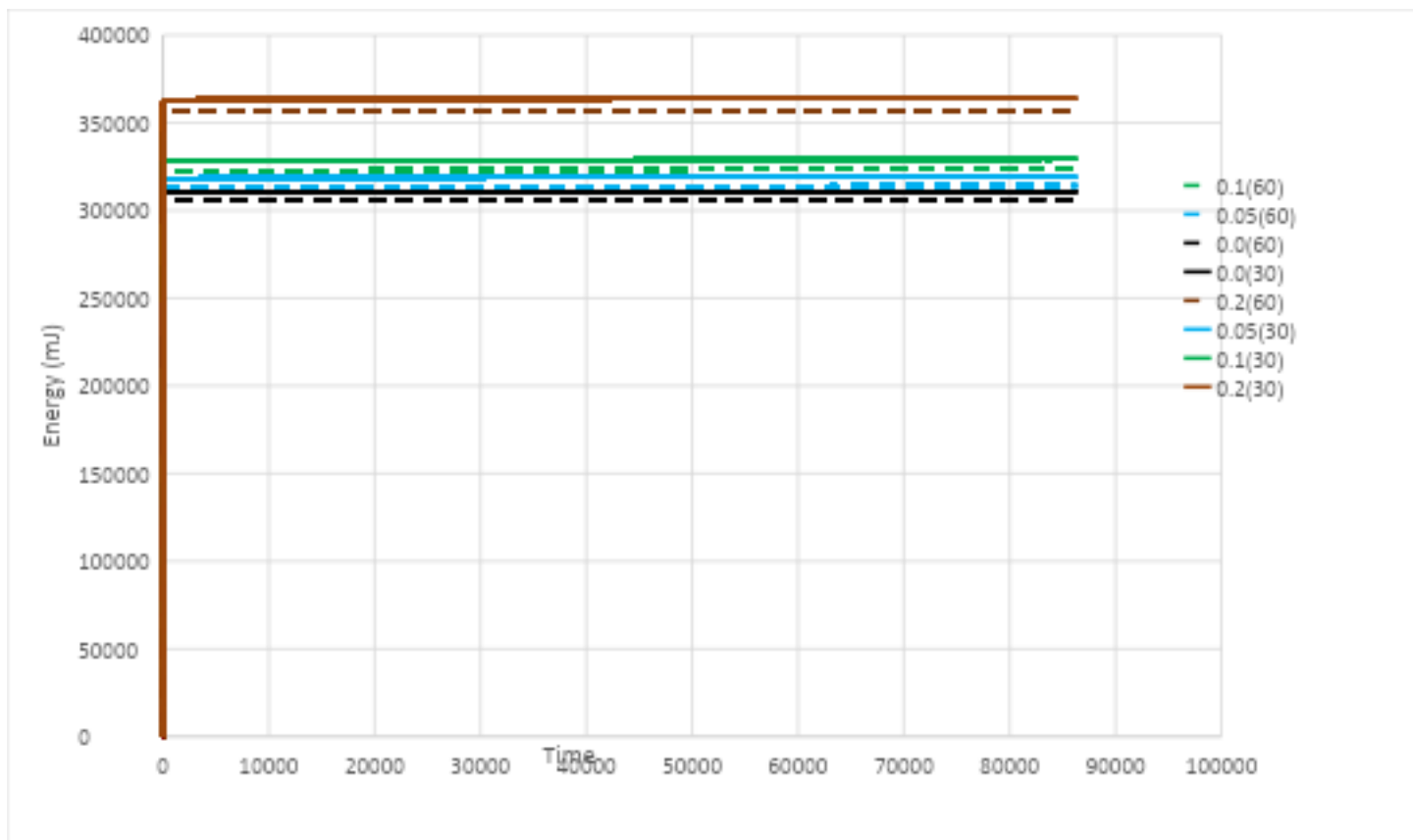
Изменение величины накопленной (потенциальной) энергии в зависимости от времени, при различных k -тах трения на всем временном диапазоне, для двух времен нагружения 30 и 60 секунд.

Время сжатия 60 секунд – пунктирные линии.

Время сжатия 30 секунд – сплошные линии.

Единица измерения энергии - mJ – мили джоули

Графики для времени нагружения 60 секунд, находятся ниже графиков для времени нагружения 30 секунд – это объясняется тем, что за более длительное время нагружения 60 секунд, материал образца успевает деформироваться больше, чем за время 30 секунд = соответственно запасенная энергия в образцах для времени нагружения 60 секунд несколько меньше.



Изменение величины накопленной (потенциальной) энергии в зависимости от времени, при различных к-тах трения на всем временном диапазоне, для двух времен нагружения 30 и 60 секунд.

Диапазон значений энергии – вертикальная шкала от 300 000 mJ до 370 000 mJ

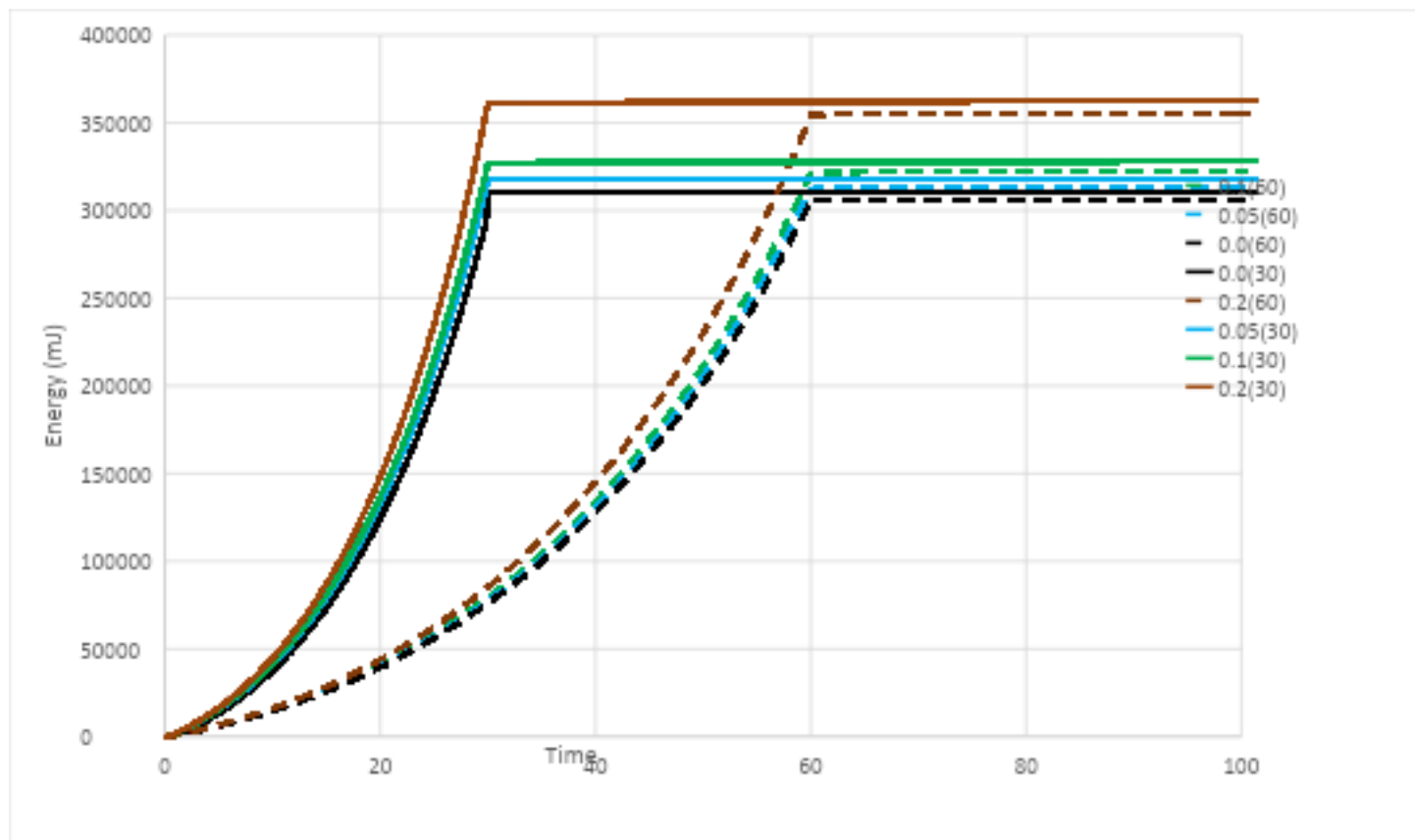
Время сжатия 60 секунд – пунктирные линии.

Время сжатия 30 секунд – сплошные линии.

Наблюдается небольшой рост потенциальной энергии, в период релаксации.

При чем этот рост неравномерный:

- для графиков где к-ты трения = 0.05 и 0.1 = рост больше, чем для графиков где к-ты трения = 0.0 и 0.2 = причин этому я пока не знаю... = нужно думать...



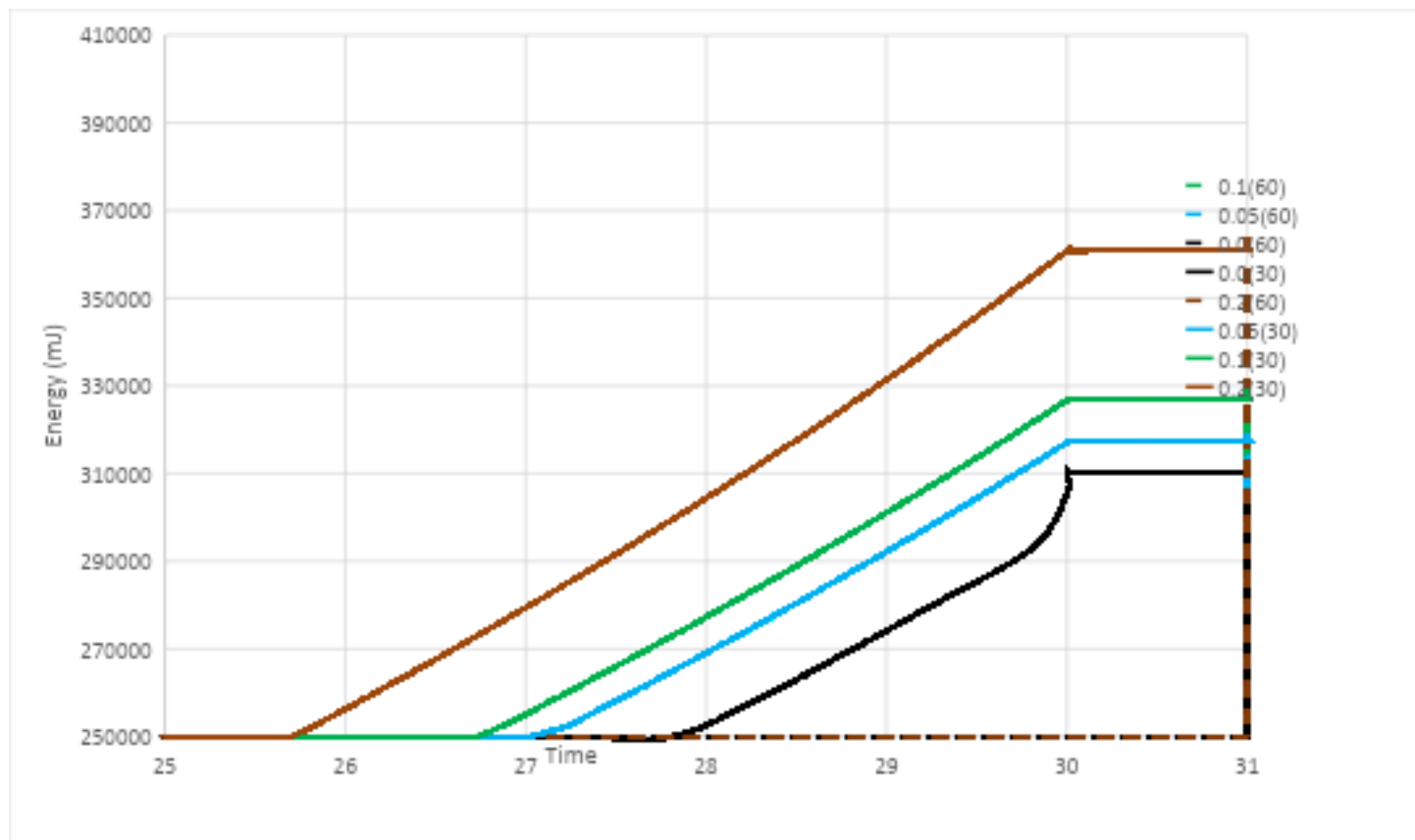
Изменение величины накопленной (потенциальной) энергии в зависимости от времени, при различных k -тах трения на временном диапазоне 0-100 секунд, для двух времен нагружения 30 и 60 секунд.

Время сжатия 60 секунд – пунктирные линии.

Время сжатия 30 секунд – сплошные линии.

Обращаю внимание, что на этапе сжатия - «отклики» - графики потенциальной энергии нелинейные, хотя графики изменения перемещения – линейные.

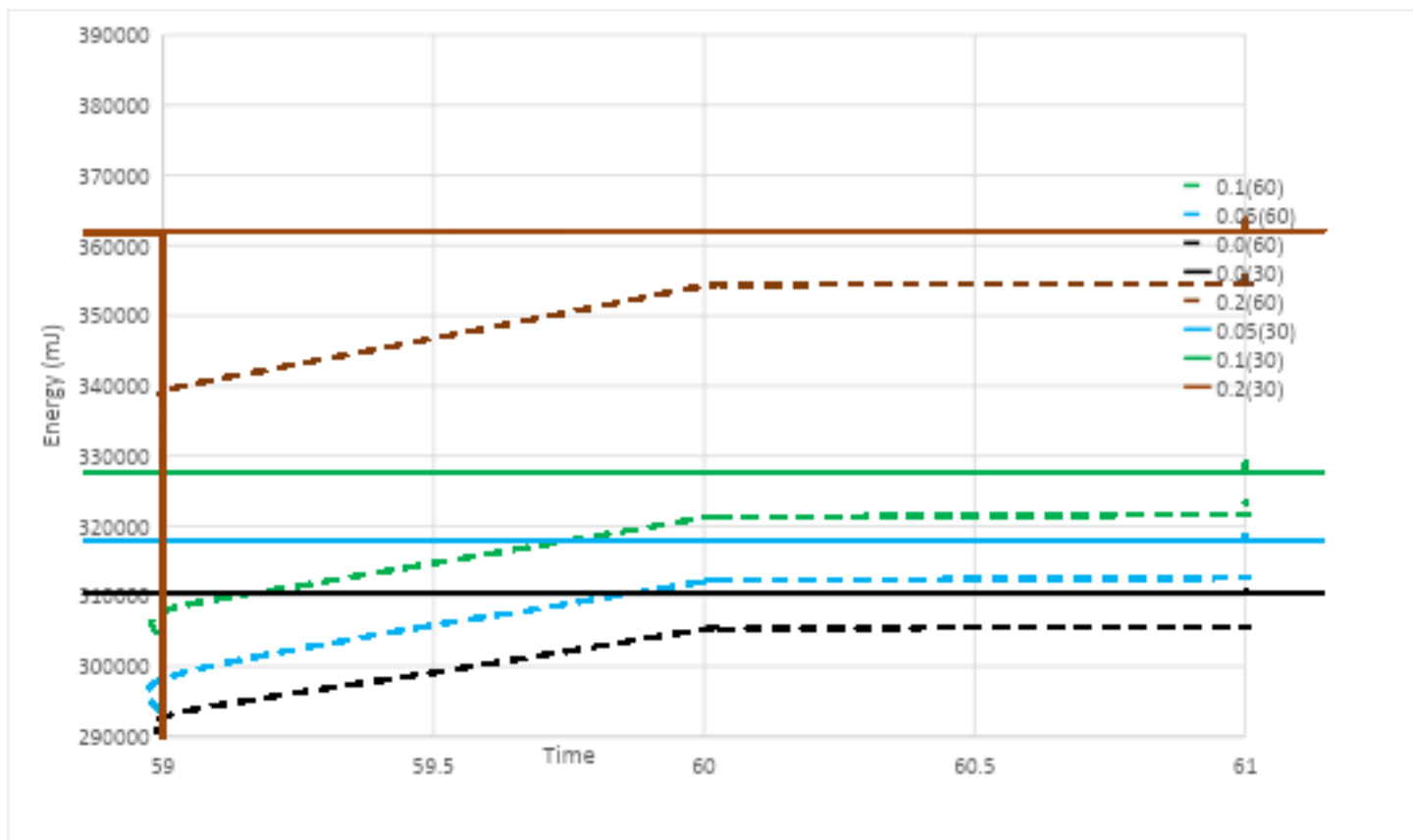
Это объясняется наличием вязких свойств у полиуретана.



Изменение величины накопленной (потенциальной) энергии в зависимости от времени, при различных к-тах трения на момент окончания сжатия, для времени нагружения 30.

Время сжатия 30 секунд – сплошные линии.

На графике с к-том трения = 0, в области окончания процесса сжатия наблюдается непонятное изменение графика – объяснение этому я пока не знаю.

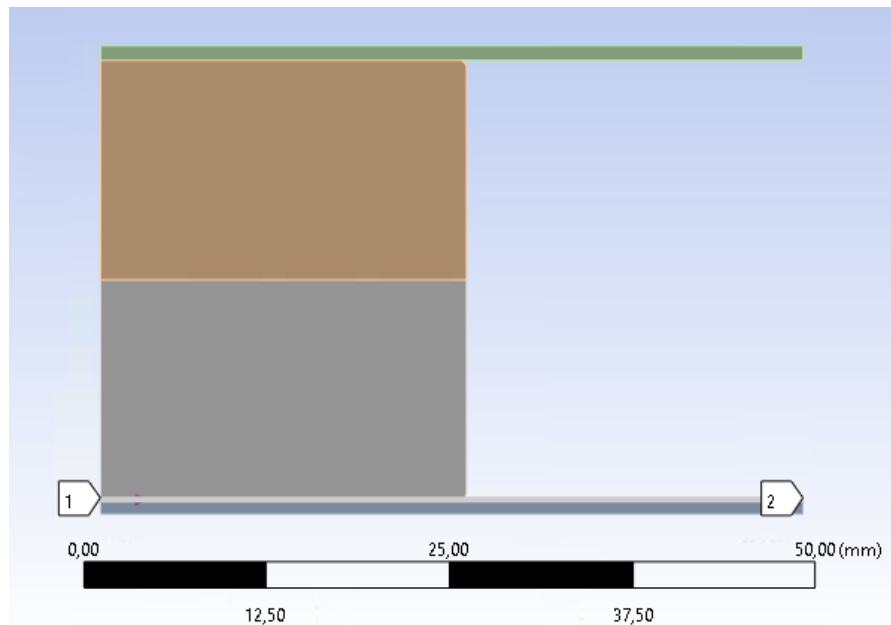


Изменение величины накопленной (потенциальной) энергии в зависимости от времени, при различных k -тах трения на момент окончания сжатия, для времени нагружения 60.

Время сжатия 60 секунд – пунктирные линии.

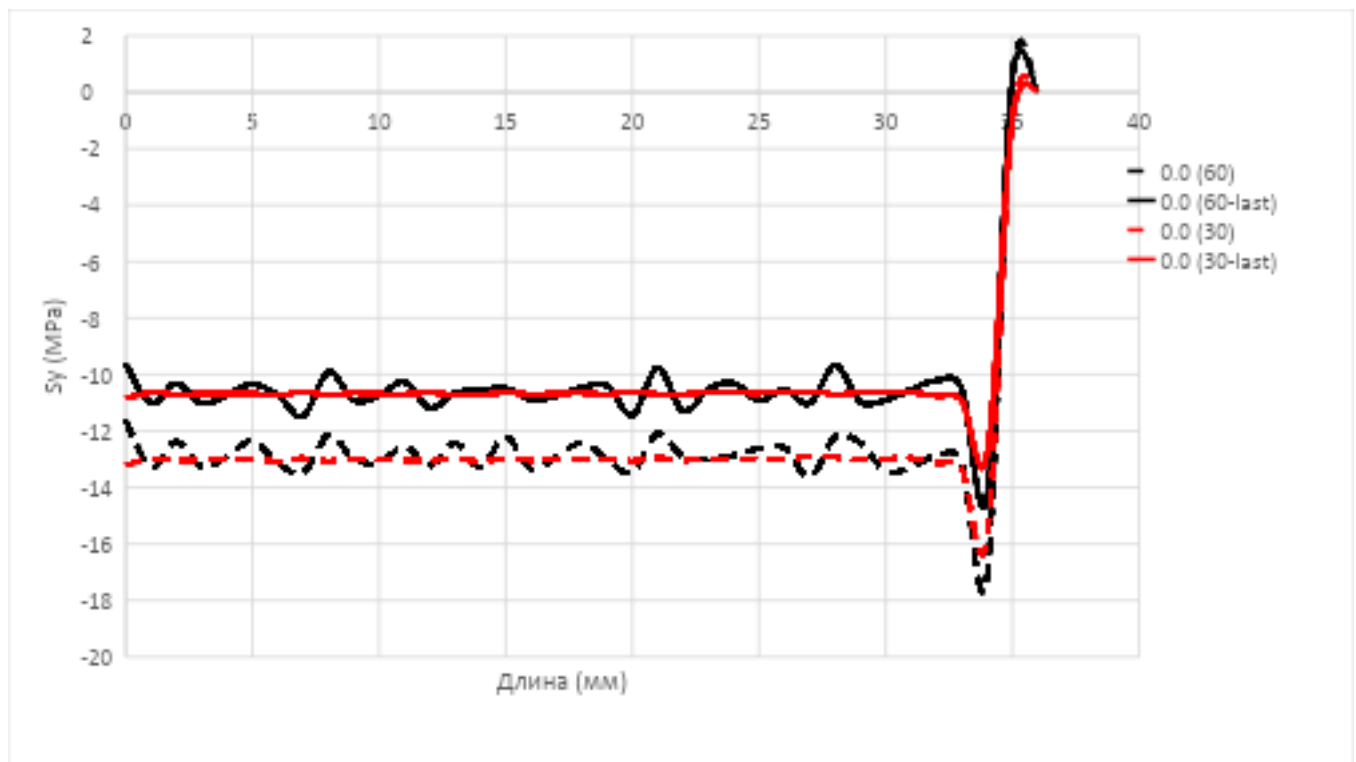
На графике с k -том трения = 0, в области окончания процесса сжатия не наблюдается каких-либо «аномалий».

Напряжения в контакте.



Линия (1-2) находится на поверхности нижней опорной пластины, на которую опирается цилиндрический образец.

По линии (1-2) будут построены графики σ_x , σ_y - нормальное и касательное напряжение на поверхности контакта.



Графики распределения напряжения по оси Y (вертикальное направление) при k -те трения = 0, для двух вариантов сжатия 30 и 60 секунд, при времени 60/30 и 86460 секунд.

За время релаксации происходит довольно значительное изменение уровня напряжения – примерно 15%, что следует учитывать при проведении экспериментов.

Резкие изменение графиков на правых концах, обусловлены:

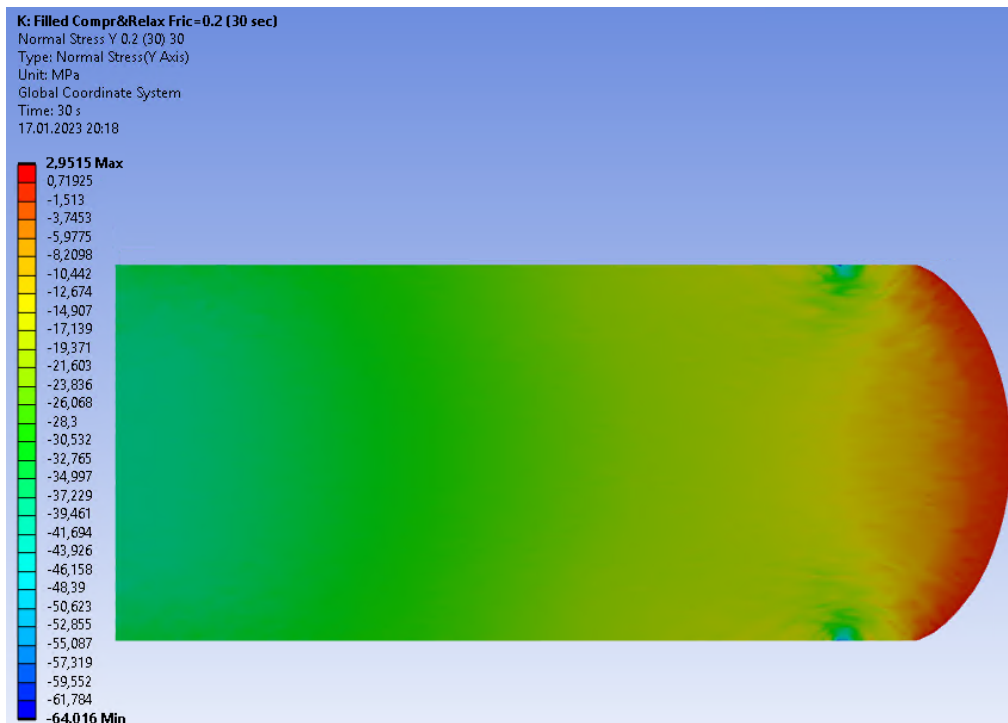
- повышение - концентрацией напряжений на ребре образца
- снижение – окончанием контактна между поверхностями.

Приведенные данные/графики подтверждают необходимость минимизации трения, с целью получения максимально равномерного (однородного) поля напряжений/деформаций.

В качестве дополнительного «аргумента» - см. распределение напряжений на сл. картинках для двух случаев.



Напряжение по оси Y (продолжительно 30 секунд, к-т трения = 0) при времени 30 секунд.



Напряжение по оси Y (продолжительно 30 секунд, к-т трения = 0.2) при времени 30 секунд.



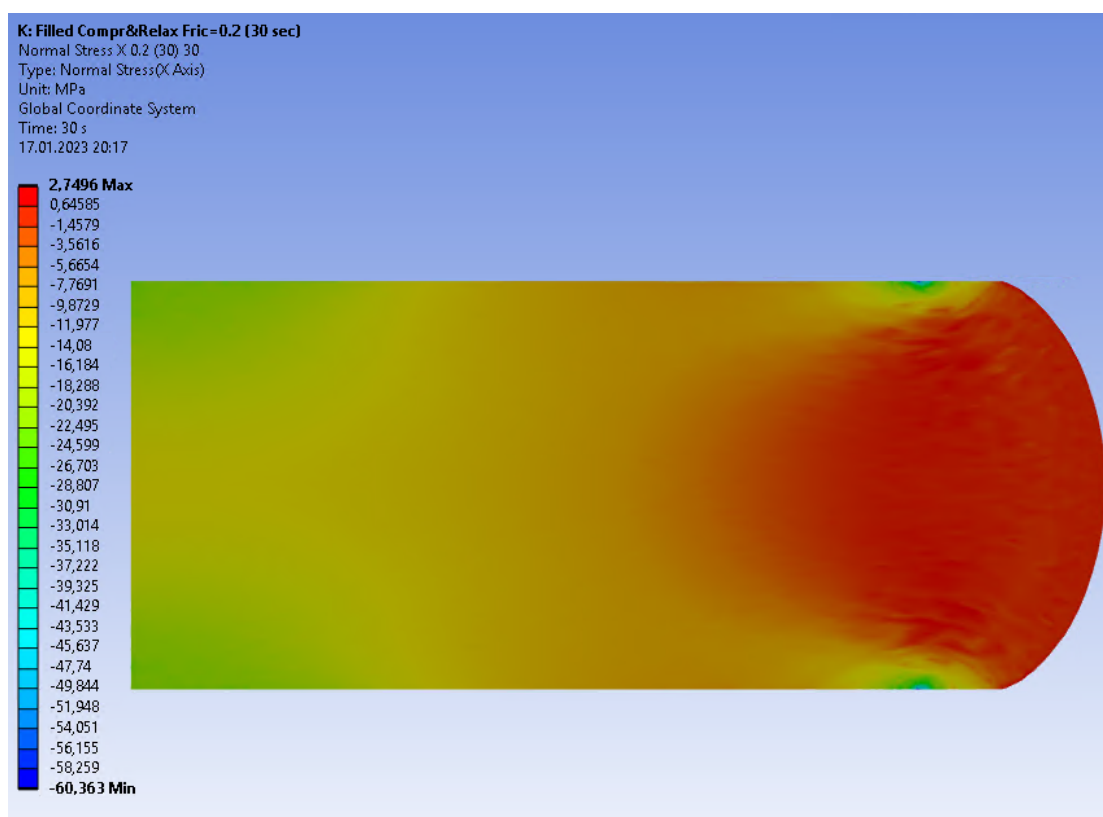
Напряжение по оси Y (продолжительно 30 секунд, к-т трения = 0) при времени 86460 секунд.



Напряжение по оси Y (продолжительно 30 секунд, к-т трения = 0.2) при времени 86460 секунд.



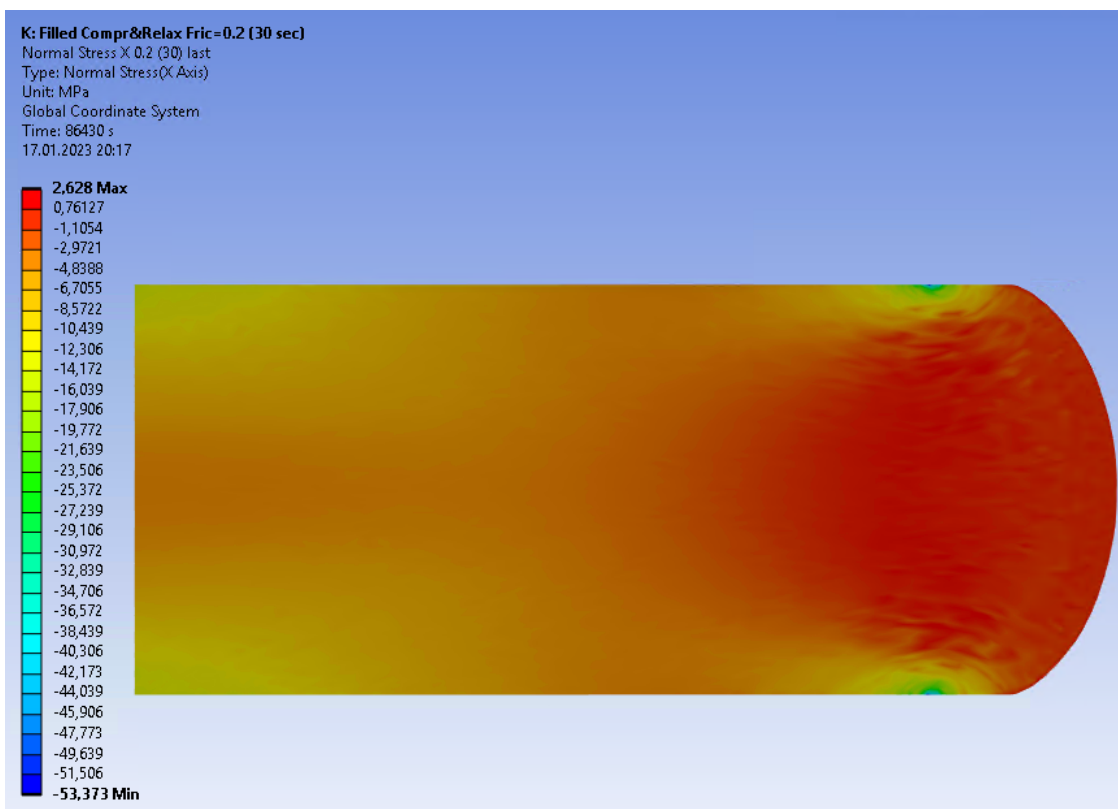
Напряжение по оси X (продолжительно 30 секунд, к-т трения = 0) при времени 30 секунд.



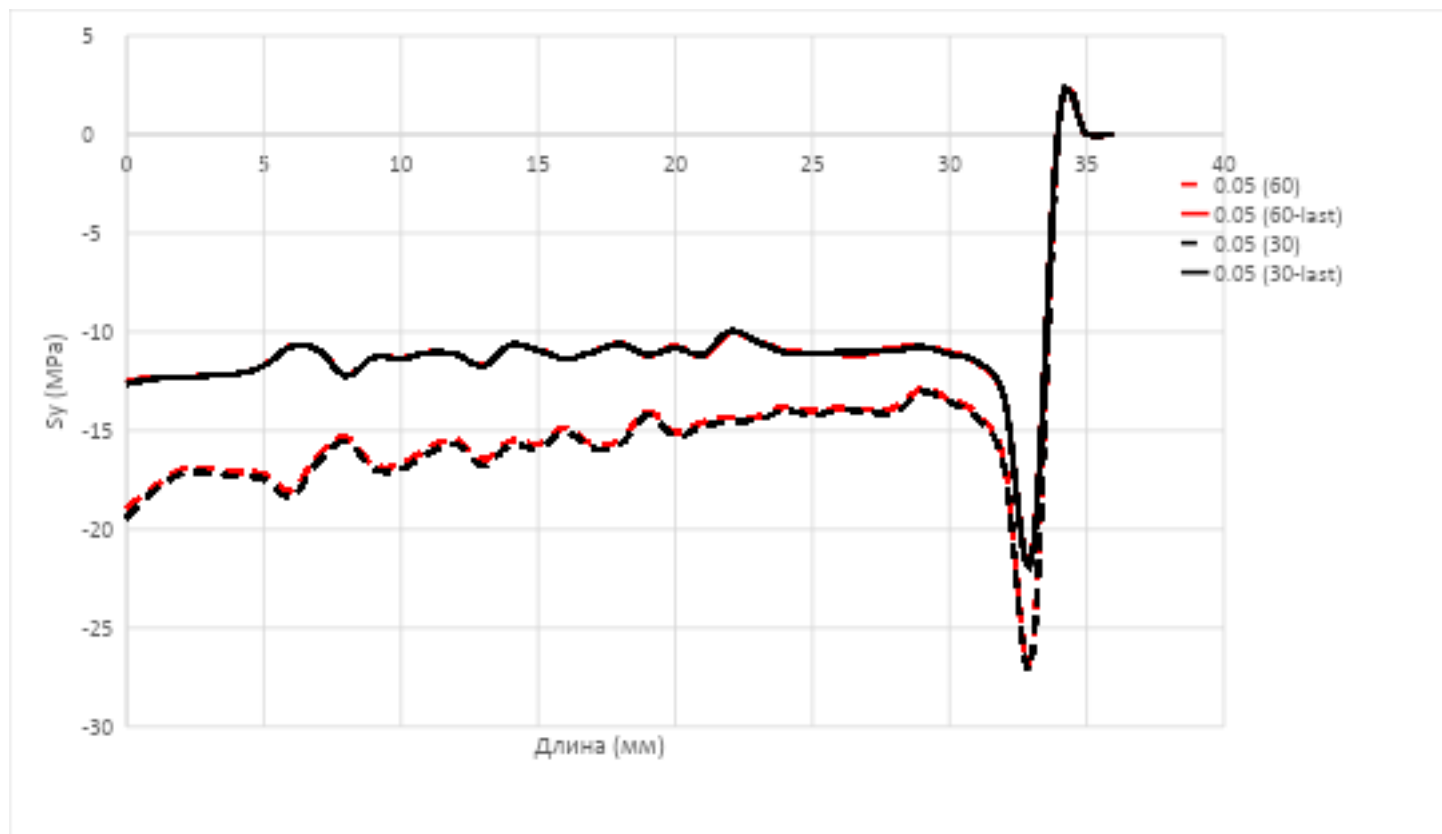
Напряжение по оси X (продолжительно 30 секунд, к-т трения = 0.2) при времени 30 секунд.



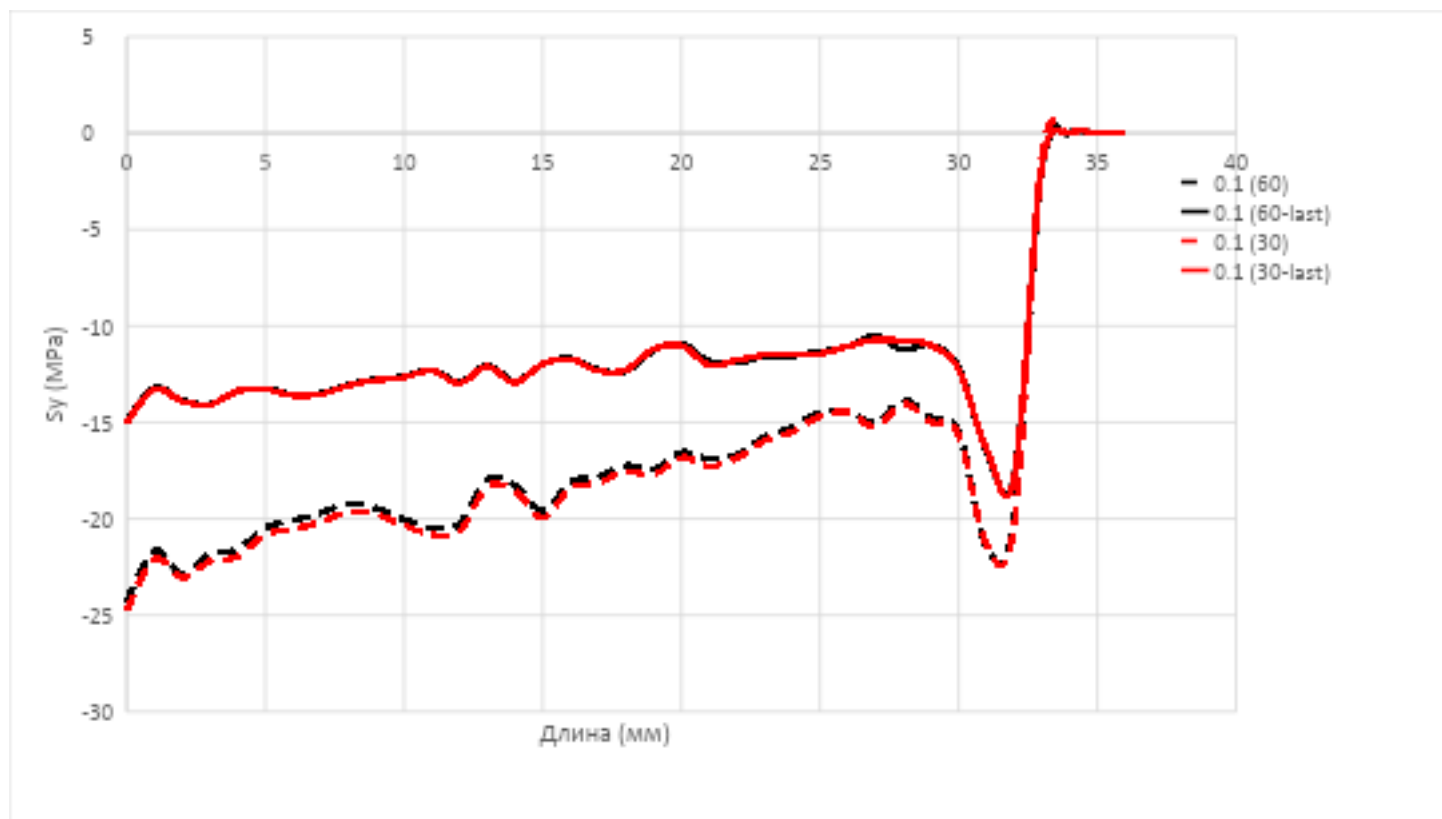
Напряжение по оси X (продолжительно 30 секунд, к-т трения = 0) при времени 86460 секунд.



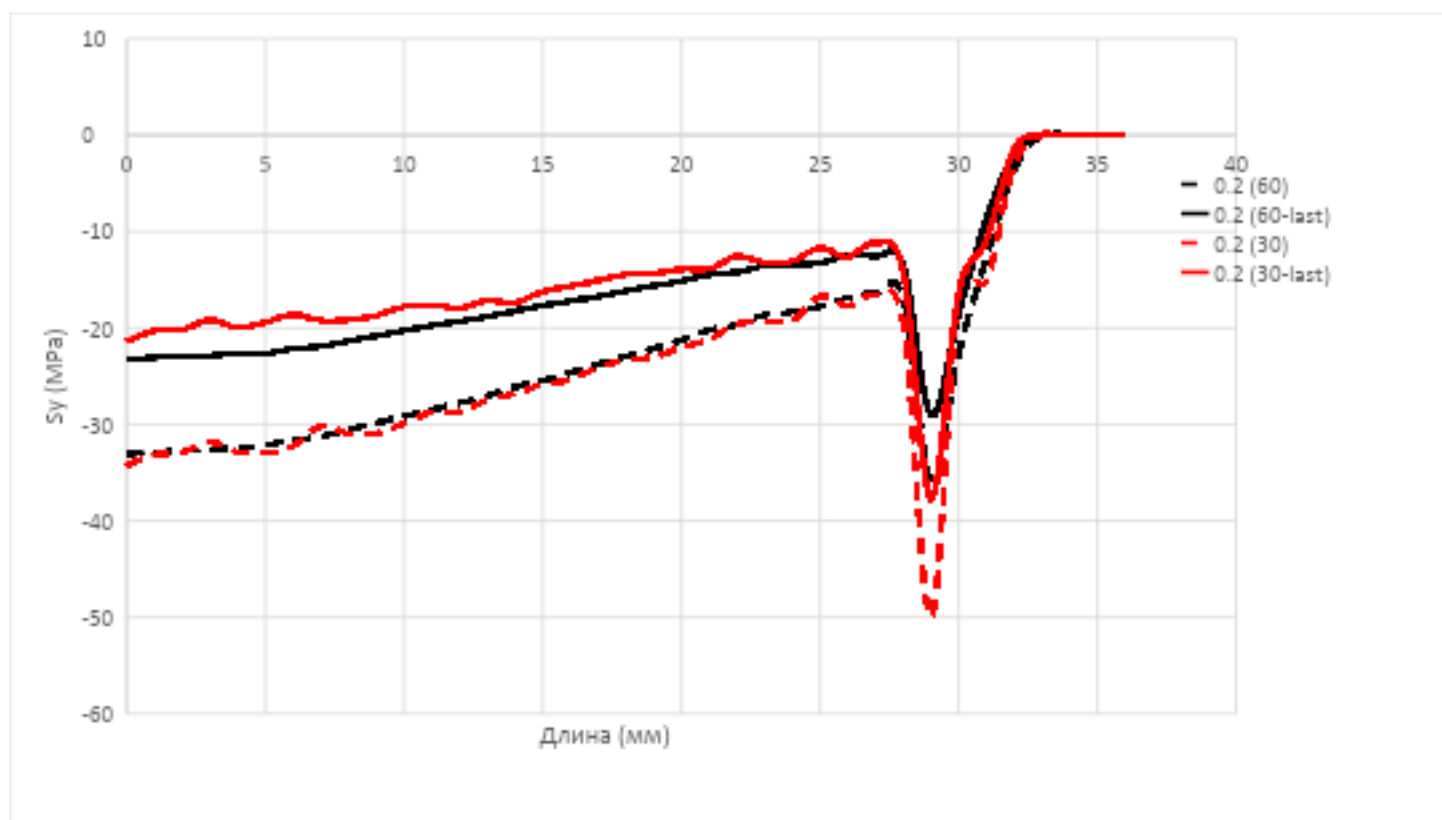
Напряжение по оси X (продолжительно 30 секунд, к-т трения = 0.2) при времени 86460 секунд.



Графики распределения напряжения по оси Y (вертикальное направление) при k -те трения = 0.05, для двух вариантов сжатия 30 и 60 секунд, при времени 60/30 и 86460 секунд.



Графики распределения напряжения по оси Y (вертикальное направление) при k -те трения = 0.1, для двух вариантов сжатия 30 и 60 секунд, при времени 60/30 и 86460 секунд.



Графики распределения напряжения по оси Y (вертикальное направление) при k -те трения = 0.2, для двух вариантов сжатия 30 и 60 секунд, при времени 60/30 и 86460 секунд.