

**Н.Н. ТКАЧУК**, аспирант каф. ДПМ, НТУ „ХПИ”

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ

В роботі обґрунтовано застосування методики аналізу та синтезу деталей з кінематично генерованими поверхнями для розрахунку напружено-деформованого стану ланок силових ланцюгів. Побудовано деталізовану модель сегмента ланцюга, що застосовується в шахтних конвеєрах, за допомогою якої досліджено її розтягнення поздовжнім зусиллям.

In the paper application of one method for synthesis and analysis of machines parts with kinematically generated surfaces to chain links stress-strain state determination is grounded. A detailed model of a chain segment is build and employed to investigate its tension by an axial force.

**Введение.** Одним из видов машиностроительных изделий, элементы которых имеют кинематически генерируемые поверхности (КГП) [1, 2] являются горные круглозвенные цепи [3]. Они применяются в шахтных конвейерах и являются ответственными компонентами данного типа горного оборудования, к которым предъявляются повышенные требования прочности, надежности и долговечности. Основными проблемными вопросами, возникающими при их проектировании, изготовлении и применении в приводах, являются:

§ обоснование конструктивных параметров по кинематическим и прочностным критериям;

§ обоснование выбора материала для изготовления звеньев цепи и режимов их термообработки;

§ назначение допустимых режимов эксплуатации конвейеров, в которых применяются цепи той или иной спецификации.

Эти задачи необходимо решать с учетом наличия сложившейся до настоящего времени унификации этого типа изделий. Конструкторы вынуждены обеспечивать требуемые эксплуатационные характеристики приводов конвейеров, будучи ограниченными стандартными размерами и номенклатурой применяемых в них цепей. В связи с этим возникает потребность в расчете их нагрузочной способности и определения запасов прочности. Эти характеристики являются определяющими при принятии рациональных решений оснащения и технологии изготовления шахтных конвейеров.

Достоверные результаты возможно получить лишь в рамках исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) звеньев рассматриваемых цепей с учетом их контактного взаимодействия. Методика синтеза и анализа тел с КГП, предложенная в работах [1-2], дает возможность организовать исследовательский цикл для данного класса объектов и создавать специализированные средства моделирования, позволяющие оперативно решать поставленные выше задачи.

В данной работе предлагается реализация этого подхода для исследований силовых цепей, результаты которых представлены на частном примере расчета одной круглозвенной цепи.

**Постановка задачи.** Рассматривается круглозвенная цепь 30x108 [3, 4], форма звеньев которой представлена на рис. 1. Предназначена она для передачи продольных растягивающих усилий, принимающих значительные величины. Это выдвигает определенные требования к ее нагрузочной способности, которые можно сформулировать в виде прочностных критериев. В то же время сочленения звеньев типа цепи должны обладать некоторой степенью подвижности, что является определяющим кинематическим критерием. Приведенные на рис. 1 геометрические параметры им заведомо удовлетворяют, а поэтому в рамках данного исследования анализ проводится исключительно по прочностным критериям.

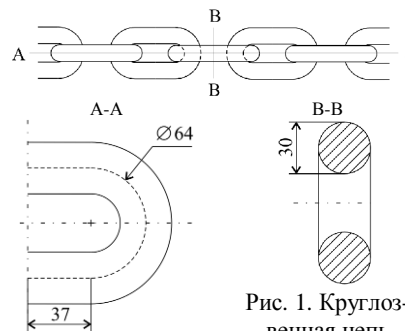


Рис. 1. Круглозвенная цепь

Интерес представляют интегральные прочностные характеристики, основными из которых являются предельная нагрузка и остаточное удлинение звеньев. Наряду с этим необходимо установить основные закономерности их деформирования и взаимодействия, а также указать зоны, в которых следует ожидать начала разрушения.

**Целью работы** является построение модели, позволяющей получать перечисленные выше интересующие проектировщика результаты, и проведение с ее помощью анализа модельной задачи оценки контактного взаимодействия и деформирования звеньев цепи, изображенной на рис. 1.

**Построение моделей.** При выборе методов исследования напряженно-деформированного состояния и построения расчетных моделей звеньев силовых цепей необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- 1) происходит контакт тел с поверхностями сложной формы;
- 2) первоначальный зазор между ними мал, и в их сопряжении возникает большое контактное пятно, размеры которого сравнимы с толщиной звеньев и радиусами кривизн их поверхностей;
- 3) при передаче больших усилий в телах развиваются большие деформации;
- 4) наряду с этим возможно пластическое деформирование материала.

Ряд особенностей объекта исследования, тем не менее, упрощает создание расчетной модели. К ним относятся: наличие симметрии как всей цепи, так и усилий, действующих на каждое ее отдельное звено; эквивалентность в пределах нагрузочной способности цепи ее силового нагружения в продольном направлении кинематическому (при простом нагружении относительное удлинение уча-

стка цепи является строго монотонной функцией усилия, которым он нагружен).

Это позволяет ограничиться моделированием лишь малого сегмента цепи, изображенного на рис. 2, ограниченного четырьмя плоскостями симметрии всей цепи и отдельных ее звеньев. Тот факт, что сечения, принадлежащие этим плоскостям, при нагружении остаются плоскими, учитывается при задании граничных условий.

В рамках применяемой методики построение модели сопряжено с выполнением цикла исследований, результаты которых позволяют уточнить ее параметры (размеры и тип конечных элементов (КЭ), степень сгущения сетки в сопряженных поверхностях звеньев, способ описания их контакта) и вывить общие закономерности деформирования моделируемого участка цепи (конфигурация пятна контакта, характер изгиба прямых участков звеньев, расположение зон, в которых материал цепи испытывает повышенные напряжения и растяжения).

Исходя из этих данных была построена детализированная конечно-элементная модель (КЭМ), изображенная на рис. 3, с использованием гексагонального элемента SOLID95 с промежуточными узлами. Сгущение сетки осуществлялось на внутренних участках тороидальных поверхностей звеньев, примыкающих к точке первоначального контакта (см. рис. 3). Для описания контакта задавалась симметричная контактная пара, что позволило сохранить в модели объективное равноправие звеньев. Для учета возможности распространения контакта на поверхности прямых участков звеньев в контактную пару дополнительно было включено большое число элементов, расположенных на внешних поверхностях звеньев и на их прямых участках (рис. 4). Всего в данной модели содержится 24565 конечных элементов, в том числе 5856 контактных, а также 83276 узлов.

**Результаты расчетов.** Первоначально с помощью этой КЭМ был выполнен расчет для случая однородного упругого материала звеньев с параметрами: модуль упругости  $E = 200$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ . Его целью является установление качественного характера деформирования звеньев, а результаты служат первым приближением, позволяющим затем установить влияние пластического деформирования на перераспределение усилий в звеньях цепи и контактных давлений на их поверхностях.

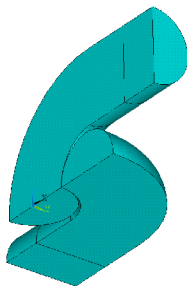


Рис. 2. Моделируемый сегмент цепи

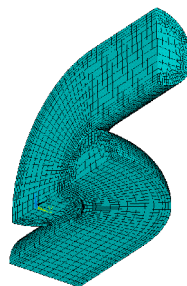


Рис. 3. Конечно-элементное разбиение моделируемого сегмента

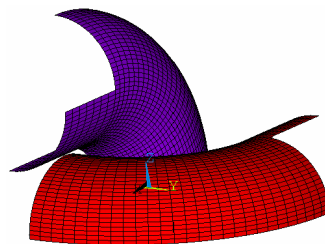


Рис. 4. Симметричная контактная пара в сопряжении звеньев цепи

Исходя из отмеченной выше эквивалентности кинематического и силового способов нагружения, в данном расчете задавалось удлинение участка цепи, значение которого составляли 1 мм, 2 мм и 4 мм. При столь большом растяжении звенья заведомо выходят за пределы области упругого деформирования, что подтверждается изображенными на рис. 5 распределениями эквивалентных напряжений, полученными для рассматриваемых вариантов нагружения. Даже эти оценочные картины позволяют выделить общую закономерность: зона с максимальными эквивалентными напряжениями перемещается из центральной части подповерхностного слоя (рис. 5, а) к боковым участкам звеньев и выходит при этом на их поверхность (рис. 5, а, б).

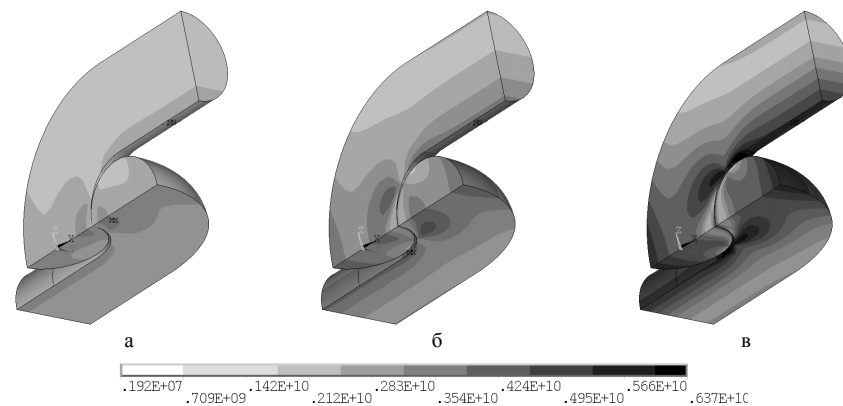


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при удлинении моделируемого сегмента, равном 1 мм (а), 2 мм (б) и 4 мм (в)

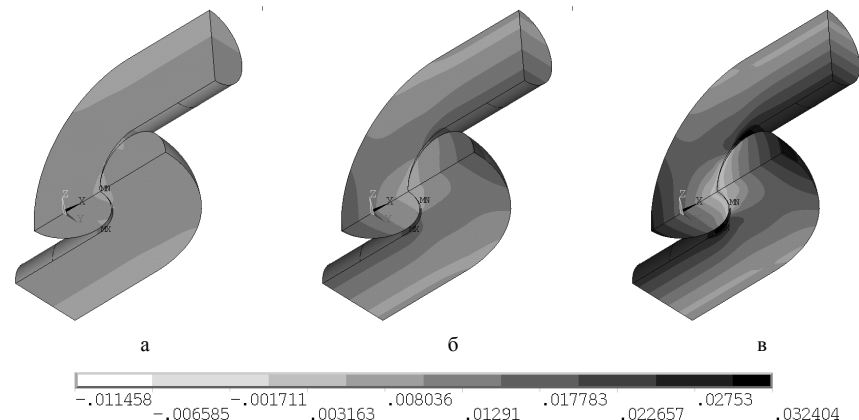


Рис. 6. Распределение первых главных деформаций при удлинении моделируемого сегмента, равном 1 мм (а), 2 мм (б) и 4 мм (в)

Эту картину дополняют распределения максимальных положительных

деформаций (рис. 6). Они принимают большие значения на внешней поверхности звеньев в районе точки, диаметрально противоположной точке первоначального касания. Однако наибольшие растяжения возникают на внутренней части поверхности звеньев в районе перехода их круглого участка в прямой (см. рис. 6).

Эти закономерности объясняются характером изгиба звеньев и распределения контактных давлений (рис. 7). Прямой участок звена и центральная часть его круглого участка испытывают изгиб в различных направлениях (рис. 8). Поэтому на прямом участке наиболее растянутыми оказываются те слои поперечного сечения, которые расположены ближе к продольной оси звена, в то время как на круглом участке растянутыми являются его внешние слои, что и объясняет характер распределения положительных главных деформаций. В точках их максимума растяжение и изгиб звена складывается с положительными поверхностными деформациями, возникающими вблизи границы пятна контакта (см. рис. 7).

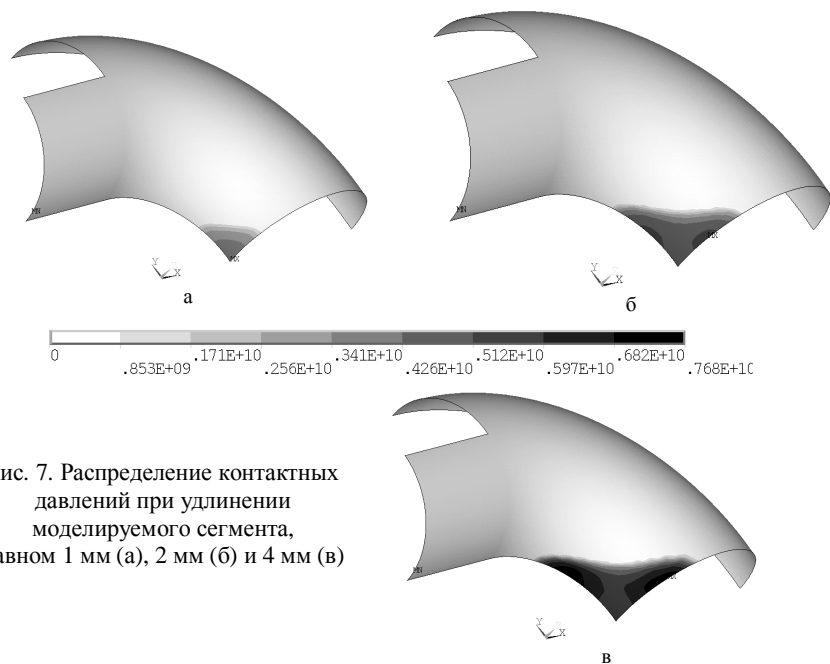


Рис. 7. Распределение контактных давлений при удлинении моделируемого сегмента, равном 1 мм (а), 2 мм (б) и 4 мм (в)

Особенностью распределения контактных давлений является то, что с увеличением нагружения пятно контакта расширяется преимущественно в двух направлениях плоскостей симметрии. Объясняется это тем, что в этих направлениях зазор между поверхностями контактирующих тел минимален, так и тем, что вследствие изгиба звеньев они обжимают друг друга, а это еще больше уменьшает зазор между ними в указанных направлениях.

Данная закономерность выражается в том, что образуется два максимума контактных давлений, расходящихся в боковых направлениях. Вызванные ими большие касательные напряжения в районе точек выхода звеньев из контакта наряду с растягивающими напряжениями, действующими на внутренней поверхности звеньев в этом же районе, и служат причиной возникновения концентрации эквивалентных напряжений, показанные на рис. 5, б, в. Разумеется, что это объяснение становится справедливым только при достаточно больших нагрузках (в данном случае, лишь для значений удлинения моделируемого участка, равных 2 мм и 4 мм).

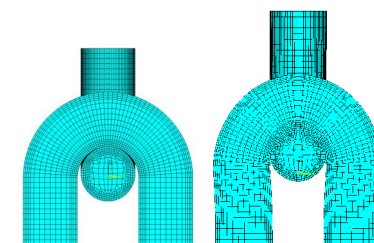


Рис. 8. Характер изгиба звена: конечноэлементная сетка моделируемого участка в исходном и деформированном состояниях

Проверка и анализ построенной модели на тестовой задаче позволил произвести основной расчет в наиболее полной постановке. Поскольку предварительные оценки показали, что звенья деформируются за пределами упругости (см. рис.5), в расчете была принята модель пластического поведения тел, соответствующая свойствам материалов, применяемых для изготовления конвейерных цепей: вязких хроммолибденовых сталей. Параметры кривой билинейного упрочнения были приняты следующими: предел текучести  $\sigma_T = 800$  МПа, пластический модуль  $E_T = 2$  ГПа (рис. 9). Поскольку внутри рассматриваемого цикла нагружение не изменяет своего знака, оправданным является применение модели изотропного упрочнения. Кроме того, в данной модели учитывается геометрическая нелинейность, связанная с большими перемещениями и деформациями материала.

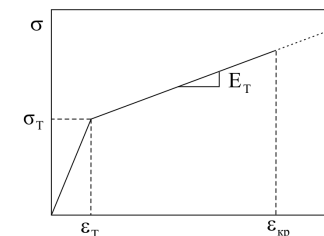


Рис. 9. Модель билинейного упрочнения принятого для материала цепи

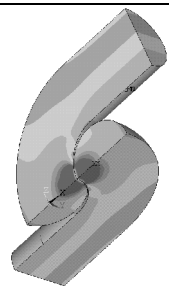
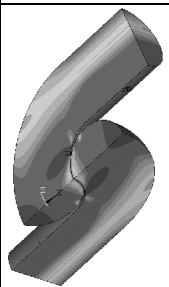
В модельной постановке предполагается, что разрушение материала начинается при достижении в некоторой точке критического значения положительных локальных деформаций  $\epsilon_{кр}$ . Поскольку  $\epsilon_{кр}$  зависит от сорта стали и ее термообработки и может значительно различаться, был промоделирован большой цикл нагружения рассматриваемого участка, состоящий из растяжения до принятия им удлинения 15 мм, что соответствует относительному удлинению порядка 14%. Этот цикл заведомо содержит момент разрушения, т.к. для большинства применяемых при изготовлении цепей сталей предельное растяжение составляет порядка 10%.

В дополнение также был рассчитан этап разгрузки моделируемого участка после указанного растяжения. Несмотря на то, что возникновение пластических

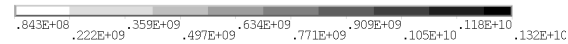
деформаций приводит к перераспределению напряжений, качественная картина изменения НДС звеньев цепи с увеличением нагрузки остается подобной той, что была установлена для случая линейно-упругого материала.

Таблица 1

Картины изменения НДС при малых удлинениях моделируемого сегмента цепи

Удлинение, мм	Напряжения по Мизесу*	Удлинение, мм	Напряжения по Мизесу*
0.5		2.5	

Примечание: \* - шкала эквивалентных напряжений



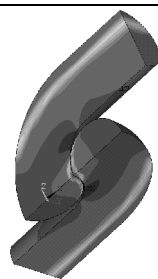
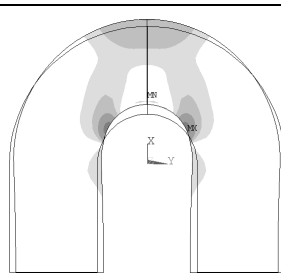
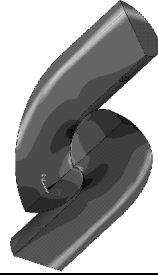
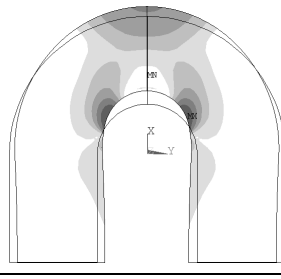
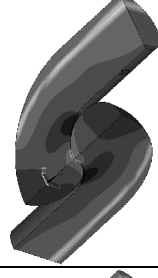
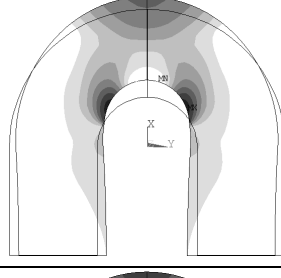
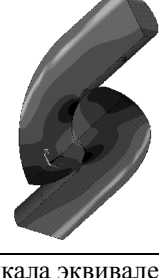
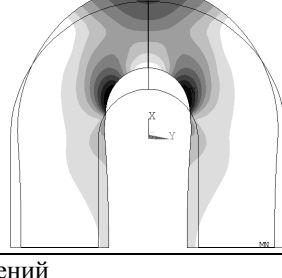
практически неизменным: наибольшее растяжение происходит в точках на внутренней стороне звена на небольшом удалении от его прямого участка (см. табл.1). Эту область можно указать как наиболее вероятное место начала разрушения, поскольку с ростом нагрузки именно там впервые будут достигнуты предельные деформации.

Таблица 2

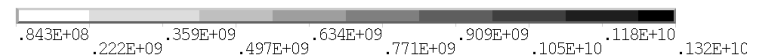
Картины изменения НДС с увеличением удлинения моделируемого сегмента цепи

Удлинение, мм	Напряжения по Мизесу*	Первые главные деформации**
1	2	3
5.3125		

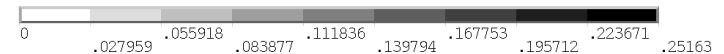
Продолжение табл. 2

1	2	3
7		
9.531		
12.062		
15		

Примечание: \* - шкала эквивалентных напряжений



\*\* - шкала первых главных деформаций



Для того чтобы для заданных значений предельных деформаций установить величину усилия, которое приведет к разрушению звена, необходимо воспользоваться зависимостью максимальных положительных главных деформаций от значения действующей на цепь нагрузки. Ее график приведен на рис. 10. На нем (помимо основного цикла нагружения) также представлен и участок разгрузки. Вместе с этим на графике изображена кривая относительных удлинений цепи. Локальные деформации в зоне их концентрации почти в 2 раза превышают среднее удлинение всего участка цепи: при развитых пластических деформациях их отношение составляет 1,8-1,9.

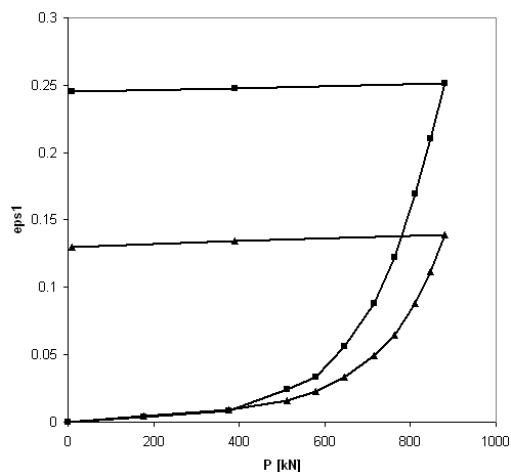


Рис. 10. Зависимость максимальных главных деформаций ( $\blacksquare$ ) и относительного удлинения цепи ( $\blacktriangle$ ) от величины растягивающего усилия

Значения растягивающих усилий, отложенные на рис. 10 по оси абсцисс, получены как суммарные реакции в сечениях на различных этапах кинематического нагружения. Результаты их вычисления отражены в диаграмме на рис. 11, устанавливающей взаимнооднозначную связь между удлинением моделируемого участка цепи по мере его увеличения от 0 мм до 15 мм с величиной продольного усилия. Следует отметить нелинейность этой зависимости, связанную с наличием в системе контакта и пластического поведения материала.

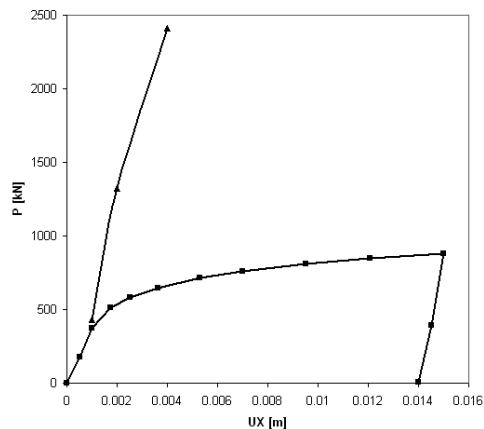


Рис. 11. Связь между удлинением моделируемого сегмента цепи и величиной продольного усилия  $P$  при пластическом ( $\blacksquare$ ) и линейно-упругом ( $\blacktriangle$ ) поведении материала

Влияние последнего фактора можно оценить, сравнив приведенную кривую с аналогичной, построенной по ранее полученным результатам для линейно-упругого деформирования

цепи и также приведенной на рис. 11. С развитием пластических деформаций и переходом их на прямой участок звена малое приращение растягивающего усилия приводит к значительному удлинению цепи, т.к. при этом падает сопротивляемость изгибу сечения. Увеличение шага, равного расстоянию между точками сочленения ее звеньев, происходит за счет изгиба его круглых участков и растяжения их внутренних поверхностей (см. рис. 8).

Большие пластические деформации также сказываются и на характере контактного взаимодействия. Из-за их появления происходит перераспределение напряжений, в результате чего снижаются и контактные давления. Их максимальные значения оказываются намного ниже полученных ранее в оценочном расчете с упругим поведением материала, а также предсказываемых теорией Герца (рис. 12). Более того, в отличие от упругого случая максимальные контактные давления перестают расти при достижении определенного значения растягивающего усилия и не являются монотонной функцией нагрузки  $P$ .

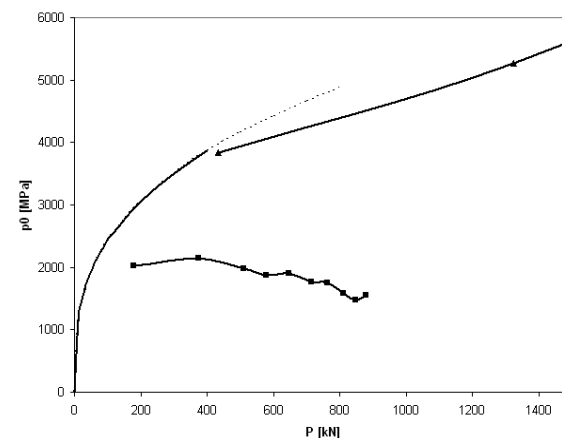


Рис. 12. Изменение величины максимальных контактных давлений с увеличением нагрузки: оценка по Герцу ( $\blacktriangle$ ), модель с упругим материалом ( $\blacklozenge$ ), модель с пластическим материалом ( $\blacksquare$ )

Продемонстрируем применение построенных зависимостей на одном примере расчета, производимого с их помощью. Рассмотрим цепь, изготовленную из материала, предельная деформация которого  $\epsilon_{кр}$  составляет 15%. Для нее, используя диаграмму рис. 10, можем в рамках принятой модели разрушения оценить разрушающее усилие в 790 кН (79 т). Это означает, что согласно зависимости, приведенной на рис. 11, перед разрушением цепь примет окончательное удлинение около 8,9 %.

**Закключение.** В рамках цикла исследований была построена детализированная модель участка цепи, подвергаемого продольному растяжению. В модели учитывается существенно нелинейный характер процессов: наличие контакта поверхностей сложной формы, пластическое поведение материала, наличие больших деформаций. С ее помощью были установлены особенности

деформирования звеньев цепи и было дано их качественное и количественное обоснование.

Анализ результатов решения модельной задачи позволяет сделать следующие выводы:

§ в звеньях цепи реализуется сложное трехмерное напряженно-деформированное состояние.

§ имеет место сложная конфигурация формы контактных пятен и распределения контактных давлений;

§ область контакта характеризуется неоднородным распределением локальных напряжений и деформаций, имеющих при больших нагрузках концентрацию на внутренней поверхности звена цепи вблизи границы пятна контакта;

§ перед разрушением цепь принимает относительное удлинение, приближенно равное половине значения предельной локальной деформации материала, из которого она изготовлена.

Предложенный подход предоставляет возможности корректного решения задач анализа контактного взаимодействия и напряженно-деформированного состояния элементов силовых цепей при их проектировании, выборе материала, режимов термообработки, а также при определении предельных режимов эксплуатации. Основным преимуществом описанной модели является комплексный учет геометрической нелинейности, пластичности, контактного взаимодействия, что отличает ее от ранее использованных методик расчета. Полученные результаты могут быть внедрены в практику проектирования различных машин, содержащих в качестве рабочего органа силовые цепи.

**Список литературы:** 1. *Ткачук Н.Н.* Оценка контактных напряжений в сопряжении сложнопрофильных деталей // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 24. – С.138-152. 2. *Ткачук Н.Н.* Особенности построения дискретных моделей тел с кинематически генерируемыми поверхностями // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 33. – С.133-152. 3. *Александров М.П.* Подъемно-транспортные машины: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с. 4. *Шеффлер М., Патер Г., Курт Ф.* Основы и конструирование подъемно-транспортных машин. – М. Машиноведение, 1980. – 258 с.

*Поступила в редколлегию 08.04.2008*