

Моделирование высокоскоростного деформирования рессор с помощью ls-dyna

Клубович В.В., академик НАН Беларуси, доктор техн. наук, профессор, Кравчук А.С., доктор физ.-мат. наук, доцент, Томило В.А., кандидат техн. наук
Белорусский национальный технический университет

Резюме: Целью исследования является разработка методики прогнозирования деформационных и прочностных характеристик рессор с профилем переменной толщины по заданным параметрам прокатного валька, исходной толщине листа рессоры и его прогибу после окончательной обработки. Исходя из анализа деформирования листа рессоры установлено, что достаточно применить модель материала **Linear Isotropic**, которая основана на использовании плотности материала, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Исследовали влияние макро-отклонений сечения рессоры от прямоугольной формы на ее жесткость и напряженное состояние. На основании решения задачи установлено, что наибольшие главные напряжения возникают у краев рессоры идеальной формы, выпуклость листа рессоры и скругление кромок позволяет уменьшить концентрацию напряжений у краев, увеличить предельную нагрузку, однако существенно увеличивают жесткость рессоры.

Ключевые слова: Рессора, периодический профиль, конечно-элементное моделирование, деформирование.

Введение. Конструкция современных машин, механизмов, транспортных средств и других продуктов машиностроения требуют использования в их составе деталей и компонентов с максимально сбалансированными эксплуатационными и ресурсными характеристиками. В идеальном случае срок службы всех деталей механизма должен быть одинаковым, или достаточно точно прогнозируемым для осуществления планово-предупредительных ремонтов. Несмотря на широкое распространение в современной автомобильной технике подвесок с упругим элементом в виде пружин, торсионов, пневматических и пневмогидравлических систем, грузовые автомобили и некоторые сельскохозяйственные машины и агрегаты по-прежнему оснащаются классическими рессорами, известными за несколько веков до появления первого автомобиля. Особенностью листовой рессоры является то, что она одновременно является упругим элементом и направляющим аппаратом подвески. Ее использование облегчает сборку и ремонт машины. Рессора проста по конструкции и в ремонте, но не лишена и целого ряда серьезных недостатков. К главным из них относятся: высокое межлистовое трение, способное сильно ухудшить плавность хода на хорошей дороге, а также большая материалоемкость в сочетании с технологической сложностью при производстве листов. Листы для рессор изготавливают из дорогой, высокопрочной стали, содержащей кремний и марганец (55ГС, 55С2, 60С2), а также хром и никель (50ХГ, 50ХГФА) [1]. Чтобы рессоры могли выдерживать высокие, многократно повторяющиеся напряжения, возникающие во время прогиба, на поверхности листов после термообработки не должно быть обезуглероженных участков, трещин и других дефектов, а этого можно добиться только при довольно дорогом технологическом процессе. Предел текучести стали, идущей для изготовления листов рессоры, должен быть не менее 1150 Н/см². Отсюда и высокая стоимость рессоры.

Межлистовое трение приводит к появлению зон с высокими контактными напряжениями, что в условиях колебаний вызывает задиры на поверхности листов и, в конечном счете, появление очагов общего разрушения. Это явление ослабляется при введении межлистовых прокладок. Трение в рессоре в прошлом позволяло обходиться без специальных амортизаторов в подвеске грузовых автомобилей, что удешевляло машину и упрощало уход за ней. В настоящее время скорости движения грузовиков выросли настолько, что для обеспечения безопасности движения и плавности хода установка амортизаторов стала необходима, так же, как и борьба с трением в листах рессор. Причин две: из-за неблагоприятного закона изменения трения и нестабильности его величины при эксплуатации. При малых толчках, когда сила, передающаяся через рессору, меньше силы трения между листами, рессора «блокируется», неровности компенсируются только шинами, и плавность хода значительно ухудшается. Те же силы трения при колебаниях большой амплитуды не способствуют достаточному их затуханию. У рессор, работающих без смазки, сила трения может достигать 25 % от упругой силы рессоры. Для обеспечения хорошей плавности хода автомобиля сила трения не должна превышать 5-8 %. Для уменьшения межлистового трения изготовители применяют малолистовые рессоры (в том числе однолистовые переменной толщины и ширины), листы специаль-

ной формы, вводят смазку и вставки между листами.

При эксплуатации в условиях высоких нагрузок, скоростей деформирования качество поверхности является одним из определяющих факторов в обеспечении эксплуатационной надежности рессор. Большое влияние на формирование качества поверхности детали и, в связи с этим, на их эксплуатационные свойства, оказывает технология производства. Качество поверхности определяют: геометрические параметры (отклонение от размера и отклонение от формы), а также физико-механические характеристики поверхности и детали в целом (твердость, пластичность и т.д.). Заготовки малолистовых рессор получают продольной периодической прокаткой в одной или нескольких двухвалковых клетях. На размерную точность прокатанных листов оказывает влияние большое количество факторов: точность изготовления инструмента и деталей клетки, свойства материала и температура заготовки перед прокаткой и ее изменение в процессе прокатки, жесткость прокатной клетки и др. Основными отклонениями формы прокатного профиля является разнотолщинность краев в поперечном сечении, вызываемая неточность (конусностью) валков и неравномерными упругими деформациями клетки, а также отклонением прямолинейности образующей валков вследствие износа, или неточностью изготовления.

В данной работе исследовали влияние макро-отклонений поверхности рессоры на ее жесткость и напряженное состояние. Наиболее эффективным современным средством теоретического анализа напряженно-деформированного состояния является использование метода конечных элементов. Метод конечных элементов позволяет значительно сократить затраты при разработке новых изделий, так как позволяет существенно сократить объемы или даже полностью отказаться от дорогостоящих стендовых испытаний, кроме того с помощью метода конечных элементов можно в сравнительно короткие сроки оценить характеристики разных вариантов конструкций и выбрать наилучшую. В последнее время метод конечных элементов применяется в самых разных отраслях промышленности. Чрезвычайно широкое применение программные продукты, использующие метод конечных элементов получили в машиностроении. Они используются для расчетов на прочность, самых разных узлов и конструкций современных машин. Эффективным современным средством теоретического анализа напряженно-деформированного состояния деталей машин является метод конечных элементов. Одним из наиболее мощных программных продуктов решения подобных задач является **LS-DYNA**. Она позволяет решать динамические задачи с геометрически большими деформациями моделей, а также рассматривать разрушение последних [2].

Методика определения геометрических параметров твердотельной модели рессоры. Основные допущения, используемые в модели. Целью исследования является разработка методики прогнозирования деформационных и прочностных характеристик рессор с профилем переменной толщины по заданным параметрам прокатного валка, исходной толщине листа рессоры и его прогибу после окончательной обработки. В данной статье используется допущение об абсолютной жесткости (недеформируемости) прокатного валка.

Используя валки с эксцентриситетом можно прокатать лист с периодическим распределением высот $h(x)$ (рис. 1):

$$h(x) = h_{max} - e \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{L}\right) \right) \quad (1)$$

где h_{max} – исходная толщина листа, e – эксцентриситет валка, L – полудлина листа рессоры. Минимальная толщина листа h_{min} определяется по формуле:

$$h_{min} = h_{max} - 2 \cdot e.$$

После прокатки периодического профиля (1) рессоре придается параболическая форма с прогибом центральной части равным h_{tech} (рис. 2). Отметим, что нижняя граница рессоры представляет собой поверхность

близкую к параболической. Кроме того, h_{tech}/L является пренебрежимо малой величиной. Это позволяет использовать непосредственно высоты, полученные с помощью (1) для построения трехмерной твердотельной модели.

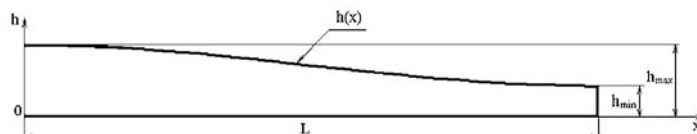


Рис. 1. Периодический профиль половины рессоры после прокатки

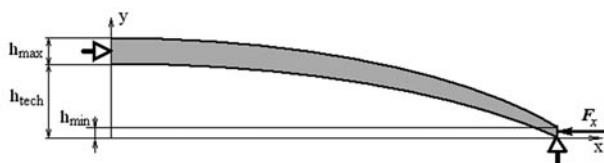


Рис. 2. Форма рессоры после окончательной обработки, характер приложения нагрузки F_x и закрепления модели половины рессоры (направления, указываемые стрелками)

Исходя из анализа деформирования листа рессоры установлено, что необходимо использовать модель материала **Linear Isotropic**. Это позволяет существенно сократить затраты при проведении вычислительного эксперимента. Модель использует модуль упругости и коэффициент Пуассона для описания упругих деформаций (таблица).

Таблица

Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность (кг/м ³)
210 000	0.27	8000

Конечно-элементная модель рессоры. При построении конечно-элементной модели из-за симметричности листа рессоры рассматривается его половина, а вторая часть заменяется соответствующими закреплениями (рис. 2, 3). Это позволяет сократить число элементов и существенно уменьшить время решения задачи [3]. При решении задачи использовалось упорядоченное разбиение модели (рис. 3). Это позволяет существенно повысить достоверность получаемых исследователем результатов (рис. 4).

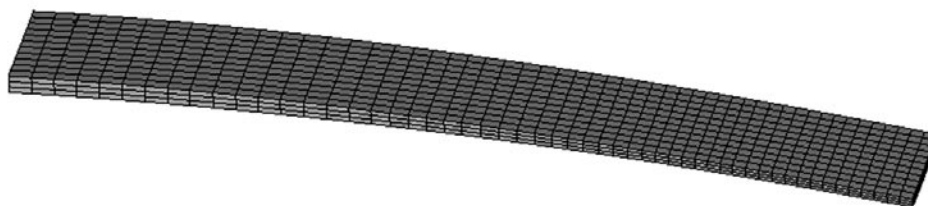


Рис. 3. Конечно-элементное разбиение листа рессоры

LS-DYNA USER INPUT
 Time = 0.25
 Contours of Max Prin Strain
 min=3.7227e-05, at elem# 2439
 max=0.00931856, at elem# 4284

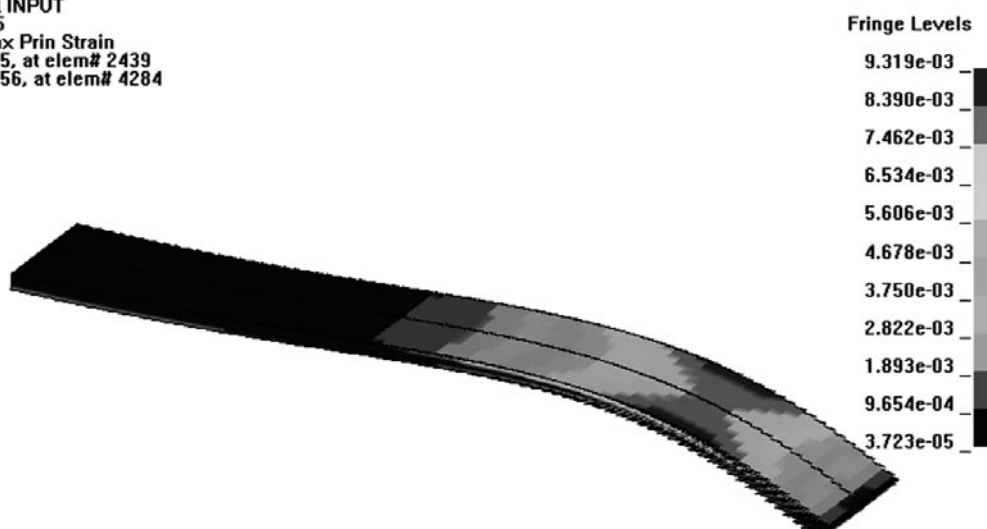


Рис. 4. Распределение главных максимальных деформаций

Влияние скорости нагружения на деформирование листа рессоры. В ходе численных экспериментов установлено, что геометрия рессоры, скорость нагружения оказывают существенное влияние на характер деформирования рессоры (рис. 5) и скорость затухания упругих волн, что может приводить к существенной концентрации напряжений. Так установлено, что чем тоньше лист рессоры, тем сильнее влияние динамических эффектов на напряженное состояние рессоры. За время нагружения упругая волна несколько раз доходит до середины рессоры и возвращается, что выражается в постоянном перемещении пика максимальных главных деформаций по листу рессоры.

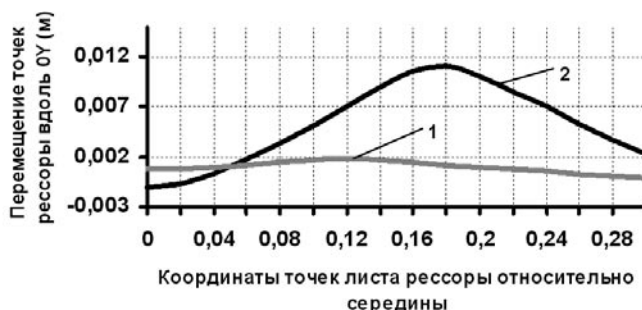


Рис. 5. Профиль половины листа рессоры в зависимости от скорости приложения нагрузки во время 0.1 с:
 1 – скорость 0.01 м/с 2 – скорость 0.05 м/с

Макро-отклонения в геометрии рессор. При эксплуатации в условиях высоких нагрузок, скоростей деформирования качество поверхности является одним из определяющих факторов в обеспечении эксплуатационной надежности рессор. Большое влияние на формирование качества поверхности детали и, в связи с этим, на их эксплуатационные свойства, оказывает технология производства. Качество поверхности определяют: геометрические параметры (отклонение от размера и отклонение от формы), а также физико-механические характеристики поверхности и детали в целом (твердость, пластичность и т.д.).

Рассматривалась, в частности, непараллельность границ сечения рессоры с отклонением в «плюс» и в «минус» на $h^{\pm} = 0.0005 \text{ i}$ (рис. 6, 7). Данные макро-отклонения могут быть вызваны, как неточностями изготовления инструмента, так и его износом.

Установлено, что макроотклонения в геометрии листов рессор могут вызвать существенный разброс их жесткости и прочности (рис. 8, 9). Однако необходимо отметить, что выпуклость листа рессоры позволяет несколько уменьшить концентрацию напряжений по краям.

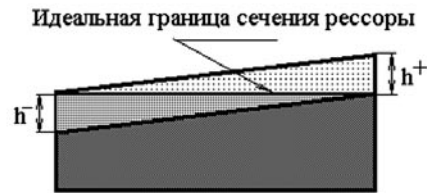


Рис. 6. Макро-отклонение формы сечения в виде трапеции, вызываемое конусностью прокатного вала



Рис. 7. Макро-отклонение формы сечения в виде трапеции, вызываемое бочкообразным профилем прокатного вала

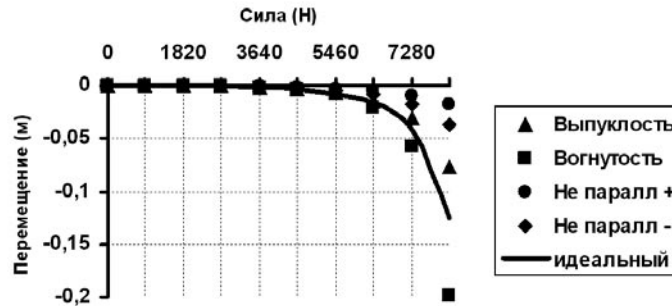


Рис. 8. Зависимость жесткости рессоры от макро-отклонений формы

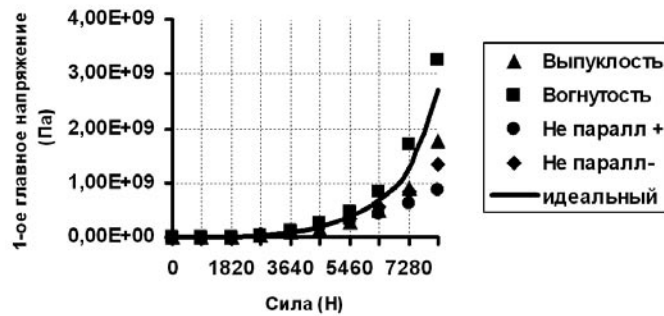


Рис. 9. Изменение величины первого главного напряжения в зависимости от силы приложенной к рессоре и макро-отклонений формы

Влияние геометрии кромок рессоры. Проведенные исследования скосов (рис. 10) и скруглений (рис. 11) у листов рессоры выявили их слабое влияние на напряженное состояние рессор (не более 5-7 %). Однако скос позволяет перенести место концентрации в глубь листа, что, вероятно положительно скажется на его усталостных характеристиках.

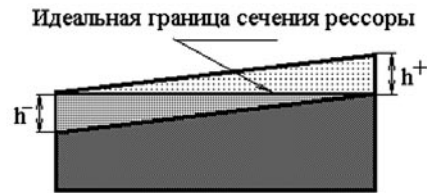


Рис. 6. Макро-отклонение формы сечения в виде трапеции, вызываемое конусностью прокатного вала



Рис. 7. Макро-отклонение формы сечения в виде трапеции, вызываемое бочкообразным профилем прокатного вала

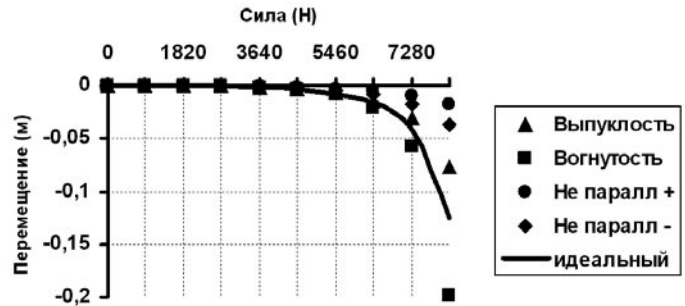


Рис. 8. Зависимость жесткости рессоры от макро-отклонений формы

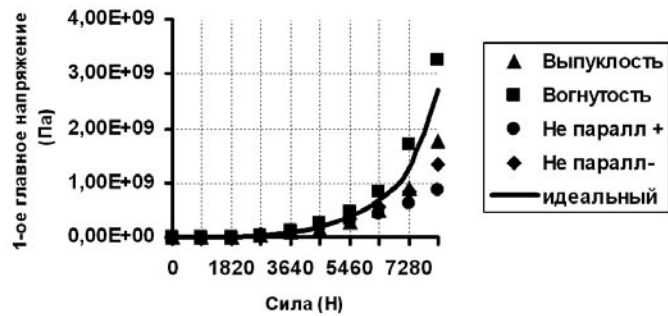


Рис. 9. Изменение величины первого главного напряжения в зависимости от силы приложенной к рессоре и макро-отклонений формы

Влияние геометрии кромок рессоры. Проведенные исследования сколов (рис. 10) и скруглений (рис. 11) у листов рессоры выявили их слабое влияние на напряженное состояние рессор (не более 5-7 %). Однако скол позволяет перенести место концентрации в глубь листа, что, вероятно положительно скажется на его усталостных характеристиках.



Рис. 10. Скос в профиле листа рессоры Рис. 11. Скругление в профиле листа рессоры

Выводы. Построена модель высокоскоростного деформирования рессор с помощью LS-DYNA. Она позволяет определить влияние скорости нагружения на деформирование и напряженно-деформированное состояние листа рессоры, учесть макро-отклонения в геометрии рессор, а также влияние геометрии кромок рессоры.

Литература

1. Томило, В.А. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей: монография / В.В. Клубович, В.А. Томило. – Мн.: БНТУ, 2007. – 298 с.
2. LS-Dyna Keyword User's Manual. – Livermore Software Technology Corporation, 2003.
3. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. – М: Машиностроение-1, 2004, 512с.



Рис. 10. Скос в профиле листа рессоры Рис. 11. Скругление в профиле листа рессоры

Выводы. Построена модель высокоскоростного деформирования рессор с помощью LS-DYNA. Она позволяет определить влияние скорости нагружения на деформирование и напряженно-деформированное состояние листа рессоры, учесть макро-отклонения в геометрии рессор, а также влияние геометрии кромок рессоры.

Литература

1. Томило, В.А. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей: монография / В.В. Клубович, В.А. Томило. – Мн.: БНТУ, 2007. – 298 с.
2. LS-Dyna Keyword User's Manual. – Livermore Software Technology Corporation, 2003.
3. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. – М: Машиностроение-1, 2004, 512с.