



*Достижение высокого технического уровня производства за счет внедрения передовых и инновационных технологий, позволяющих успешно конкурировать с отечественными организациями в республике и товаропроизводителями других стран на внешнем рынке, – одно из главных направлений дальнейшего развития предприятий в 2007 – 2010 годах.*

*Инновационный путь развития экономики Витебской области предусматривает максимальное использование научно-технического и производственного потенциала в целях разработки и освоения в производстве новых видов продукции, эффективных технологий, оборудования и других объектов. Выполнение региональной научно-технической программы «Инновационное развитие Витебской области» будет способствовать дальнейшему социально-экономическому развитию области и достижению важнейших параметров: увеличению объема промышленного производства, экспорта, объема новой продукции, сохранению и расширению внутренних и внешних рынков сбыта продукции, сокращению расходов валютных средств за счет уменьшения импорта оборудования, материалов и технологий.*

УДК 621.771.63

#### ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ИНСТРУМЕНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕССОР

*акад., д-р техн. наук, проф. В.В. КЛУБОВИЧ, д-р физ.-мат. наук, доц. В.С. КРАВЧУК,  
канд. техн. наук В.А. ТОМИЛО  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Представлены конструкции автомобильных малолистовых рессор и упругих элементов сельскохозяйственной техники. Исследованы некоторые случаи отклонений профиля рессор, вызванные нарушением технологических режимов или неточностью при изготовлении, а также локальным износом инструмента. Из рассмотренных в работе отклонений формы (выпуклость, вогнутость и непараллельность образующих) наибольшую опасность представляет вогнутость, ведущая к резкому увеличению главного напряжения при изгибе и, как следствие, уменьшению ресурса рессоры. Исследовано также влияние макроотклонений поверхности рессоры на ее жесткость и напряженное состояние.*

**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. Преимущество рессоры в том, 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 недостатков, главные из них:

- высокое межлистовое трение, способное сильно ухудшить плавность хода на хорошей дороге;
- большая материалоемкость в сочетании с технологической сложностью при производстве листов.

**Исследовательская часть.** Листы для рессор изготавливают из дорогостоящей, высокопрочной стали, содержащей кремний и марганец (55ГС, 55С2, 60С2), а также хром и никель (50ХГ) [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 затратном технологическом процессе. Предел текучести стали, идущей на изготовление листов рессоры, должен быть не менее  $1150 \text{ Н/см}^2$ . 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 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. Причины две: 1) неблагоприятный закон изменения трения и 2) нестабильность 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 %. Замечено, что в грузовых автомобилях с высокой посадкой водителя именно силы межлистового трения вызывают крайне неприятные для здоровья водителя колебания.

Для уменьшения межлистового трения изготовители применяют малолистовые рессоры (в том числе однолистовые переменной толщины и ширины), листы специальной формы, вводят смазку и вставки между листами.

Эволюцию конструкции рессоры можно проследить на примере, проиллюстрированном рисунком 1. Здесь показаны рессоры равной длины (1650 мм) и жесткости (200 Н/мм): рисунок 1, а – классическая многолистовая, состоящая из листов постоянной толщины (14 листов, высота пакета 140 мм, масса – 122 кг); рисунок 1, б – усовершенствованная с раскатанными концами листов (9 листов, высота пакета 127 мм, масса 94 кг); рисунок 1, в – малолистовая параболическая (3 листа, высота пакета 64 мм, масса 61 кг).

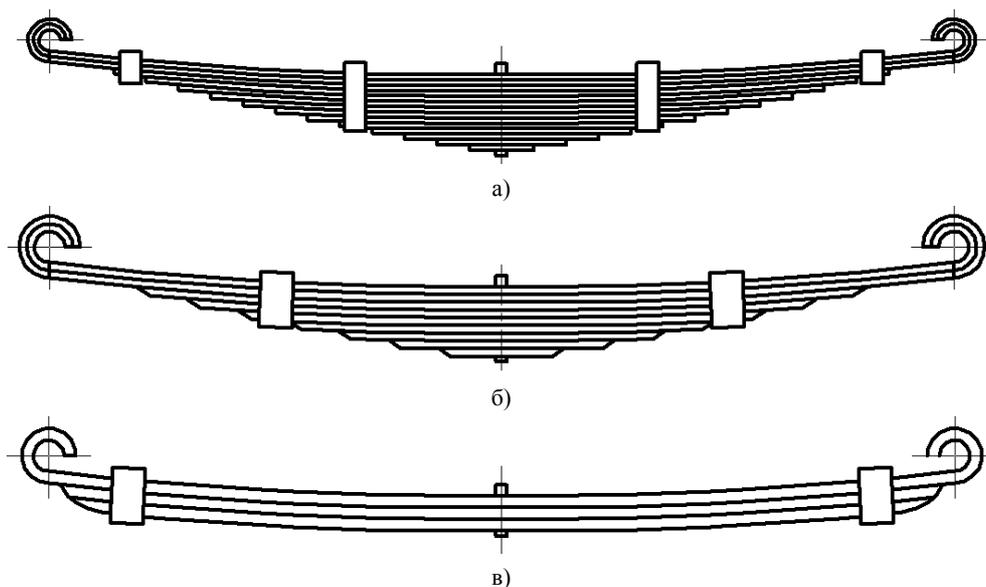


Рис. 1. Эволюция конструкции рессоры грузового автомобиля

Несмотря на широкое распространение периодических профилей в подвесках транспортных средств, защитные упругие элементы почвообрабатывающей и другой сельскохозяйственной техники состоят из листов постоянного профиля. Во многом это связано с тем, что прокатка периодических профилей из-за нестационарных условий ее протекания представляет собой достаточно сложный процесс обработки металлов давлением. Главная трудность заключается в обеспечении стабильности периода по длине заготовки и достижении высокой размерной точности [2].

Минский завод шестерен выпускает широкую гамму почвообрабатывающих агрегатов. Для защиты рабочих органов при наезде на имеющиеся в почве инородные предметы (камни, пни и др.) почвообрабатывающие машины оснащены предохранительными механизмами. В качестве упругого элемента, используемого в предохранительных механизмах многократного действия, применяются спиральные и плоские пружины, сжатый газ, резиновые элементы. Предохранительный механизм с плоскими пружинами отличается высокой эксплуатационной надежностью, возможностью быстрого изменения характеристик за счет добавления или удаления листов. В настоящее время плоские пружины изготавливают из

полосы шириной 140 и 170 мм, толщиной 3,5...4,0 мм из рессорно-пружинных сталей 50ХГФА, 60С2, 65Г и др. Попытки изготовить плоскую пружину из листа успеха не имели. Микродефекты структуры, возникающие на боковой кромке листа при рубке, приводили к очень быстрому его разрушению.

Как показывает опыт автомобилестроения, многослойная рессора из листов постоянного профиля может быть с успехом заменена на малолистовую из листов переменной толщины, имеющую вес на 15...30 % ниже при лучших эксплуатационных характеристиках.

Расчетным путем установлено, что кривой жесткости в пределах деформаций до 90 мм наиболее точно соответствуют два установленных параллельно листа шириной 60...65 мм и толщиной 8...10 мм в центральной части и 3,5...4,0 – на концах [3].

В напряженном состоянии в рессоре верхняя часть сечения работает на растяжение, нижняя – на сжатие. При прямоугольном сечении рессоры расстояние от нейтральной линии до наиболее удаленных точек (верхних и нижних) одинаково, поэтому одинаковы и наибольшие рабочие напряжения – растягивающие и сжимающие. Поломки рессор чаще всего бывают усталостного происхождения. При переменных напряжениях пределы выносливости стали становятся разными: меньшими – при растяжении и большими – при сжатии. Это необходимо учитывать при разработке конструкции и технологии изготовления листов 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, следовательно, 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. Основное отклонение формы прокатного профиля – разнотолщинность краев в поперечном сечении, вызываемая неточностью (конусностью) валков и неравномерными упругими деформациями клетки, а также отклонением прямолинейности образующей валков вследствие износа или неточности изготовления.

В данной работе исследовалось влияние макротоклонений поверхности рессоры на ее жесткость и напряженное состояние. Наиболее эффективным современным средством теоретического анализа напряженно-деформированного состояния является использование метода конечных элементов. В настоящее время существует достаточно много программных продуктов для решения широкого спектра задач расчета деформаций и определения прочности. Одно из наиболее мощных программных средств решения подобных задач – **LS-DYNA** [4]. Данный программный продукт позволяет решать задачи с геометрически большими деформациями твердотельных моделей, а также рассматривать их разрушение.

В силу симметричности листа рессоры рассматривается его половина, а вторая часть заменяется соответствующими закреплениями. Это стандартная процедура для программ, использующих метод конечных элементов, позволяющая сократить число элементов в конечно-элементном разбиении модели и существенно уменьшить время решения задачи.

Используя валки с эксцентриситетом, можно прокатать лист с периодическим распределением высот  $h(x)$ , без учета опережения:

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

где  $h_{\max}$  – исходная толщина листа;  $e$  – эксцентриситет валка;  $L$  – полудлина листа рессоры.

Минимальная толщина листа  $h_{\min}$  определяется по формуле:

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

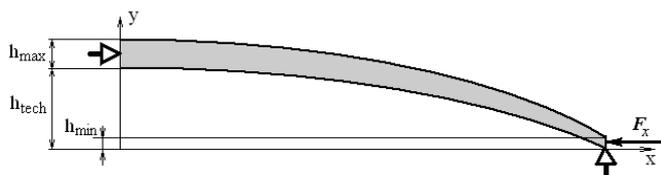


Рис. 2. Форма рессоры после окончательной обработки, а также нагрузки  $F_x$  и закрепления модели половины рессоры (направления, указываемые стрелками)

После прокатки периодического профиля рессоре придается определенная форма с прогибом центральной части, равным  $h_{tech}$  (рис. 2). Отметим, что нижняя граница рессоры представляет собой поверхность, близкую к параболической. Кроме того, отношение  $\frac{h_{tech}}{L}$  является пренебрежимо малой величиной. Это позволяет использовать непосредственно высоты, полученные с помощью (1), для построения трехмерной твердотельной модели.

**Методика построения конечно-элементного разбиения и решения задачи.** При решении задачи использовалось упорядоченное разбиение модели. Оно позволяет существенно сократить время решения задачи и повысить достоверность получаемых исследователем значений. Необходимо отметить, что с помощью непосредственного сопоставления значений, полученных при использовании Implicit и Explicit методов решения, установлено, что значения, полученные на основе Explicit метода, являются наиболее достоверными.

В ходе решения краевых задач для ряда рессор установлено, что наибольшие главные напряжения возникают у кромки рессоры (рис. 3).

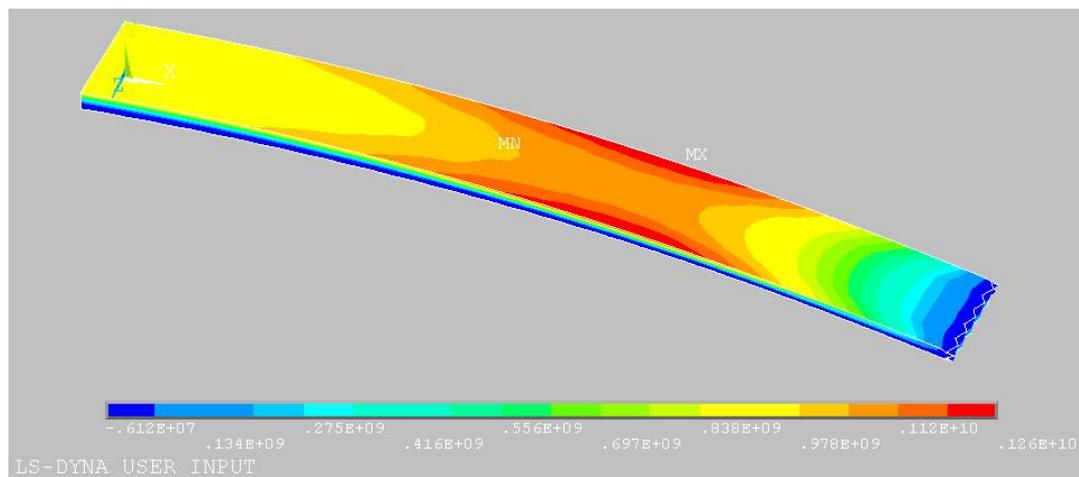


Рис. 3. Распределение первого главного напряжения для перемещения вдоль 0X 155 мм (ширина листа рессоры 60 мм;  $L = 400$  мм;  $h_{max} = 8$  мм;  $h_{min} = 4,5$  мм; действующая нагрузка 4320 кН)

В данной работе рассматривается твердотельная модель половины рессоры с соответствующими параметрами макроотклонения поверхности. В ходе предварительного анализа было установлено, что в силу симметричности листа рессоры при моделировании необходимо создать твердотельную, а затем и конечно-элементную, модель половины листа, заменив вторую часть соответствующим закреплением. Необходимо отметить, что для повышения достоверности и точности решения при создании конечно-элементной модели было использовано упорядоченное разбиение [4, 5]. При решении задачи предполагалось, что усилие, приложенное к концу рессоры, возрастает.

Исходя из анализа деформирования листа рессоры установлено, что достаточно использовать модель материала **Linear Isotropic**. Модель же использует модуль упругости 210 000 МПа и коэффициент Пуассона для описания упругих деформаций 0,27, плотность 7865 кг/м<sup>3</sup>.

**Макроотклонения в геометрии рессор.** При численных экспериментах листа рессоры ( $L = 0,8$  м;  $h_{max} = 0,008$  м;  $h_{min} = 0,004$  м; продолжительность нагружения 0,5 с) рассматривалась, в частности, непараллельность границ сечения рессоры (рис. 4) с отклонением в «плюс» и «минус» на  $h^{\pm} = 0,0005$  м и отклонение от прямолинейности образующей контура, так называемая «бочкообразность» (рис. 5). Данные макроотклонения могут быть вызваны как неточностями изготовления инструмента, его износом, так и рядом других причин.

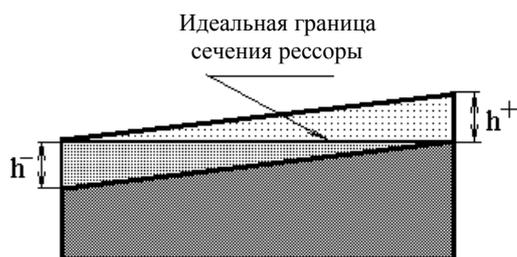


Рис. 4. Макроотклонение формы сечения в виде трапеции, вызываемое конусностью прокатного валька



Рис. 5. Макроотклонение формы сечения в виде трапеции, вызываемое бочкообразным профилем прокатного валька

На рисунках 6 и 7 представлены соответственно зависимость жесткости рессоры и величины 1-го главного напряжения в зависимости от силы, приложенной к рессоре, и макроотклонений формы.

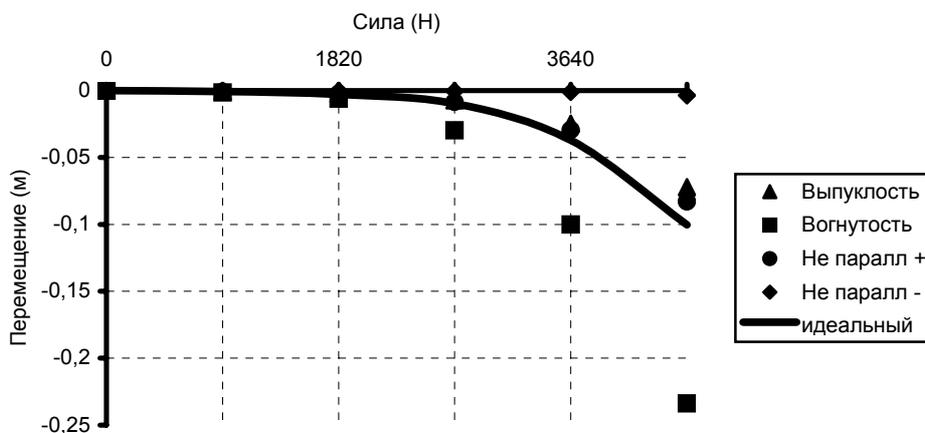


Рис. 6. Зависимость жесткости рессоры от макроотклонений формы

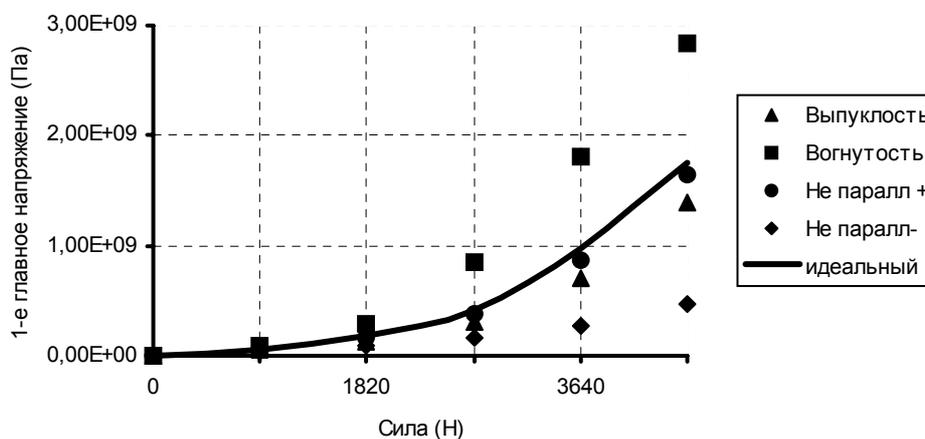


Рис. 7. Изменение 1-го главного напряжения в зависимости от силы, приложенной к рессоре, и макроотклонений формы

**Заключение.** В подавляющем большинстве случаев многолистовые рессоры автомобильной и сельскохозяйственной техники могут быть заменены малолистовыми с аналогичными показателями жесткости и усталостной долговечности. Упругие характеристики листов рессор переменного сечения и их ресурс в большой степени зависят от макроотклонений формы поперечного сечения, вызываемых локальным износом инструмента и неточностью его изготовления, а также неравномерной и (или) недостаточной жесткостью прокатной клетки. Из рассмотренных в работе отклонений формы (выпуклость, вогнутость и непараллельность образующих) наибольшую опасность представляет вогнутость, ведущая к резкому увеличению главного напряжения при изгибе и, как следствие, уменьшению ресурса рессоры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брон, Д.Д. Рекомендации по выбору материалов и оборудования для производства автомобильных листовых рессор / Д.Д. Брон, Г.А. Волченко, И.И. Левитина. – М.: ВНИИавтопром, 1971. – 32 с.
2. Клубович, В.В. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей: моногр. / В.В. Клубович, В.А. Томило. – Минск: БНТУ, 2007. – 295 с.
3. Упругие элементы переменного профиля в сельскохозяйственной технике / В.В. Клубович [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2007. – № 4. – С. 36 – 39.
4. LS-Dyna Keyword User's Manual. – Livermore Software Technology Corporation, 2003.
5. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М: Машиностроение, 2004. – 512 с.

Поступила 27.12.2007