

Минько Д. В., Жирун К. С., Карпей Ф. С.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ ТОНКОСТЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Исследованы процессы деформации тонкостенных металлических труб при осевом нагружении методом конечных элементов в среде LS-DYNA. Анализ проведен для трех типов материалов – меди М1, стали 08КП и коррозионностойкой стали 12Х18Н9Т – отличающихся пределами текучести и пластичностью. Моделирование осуществлялось для трубы диаметром 50 мм, толщиной стенки 2 мм и длиной 150 мм. Осевая нагрузка прикладывалась к торцевой части с постоянной скоростью.

Численный анализ выявил динамику формоизменения труб при инверсии стенок, критические нагрузки и зоны концентрации пластических деформаций. Коррозионностойкая сталь 12Х18Н9Т продемонстрировала наибольшую устойчивость, тогда как медь М1 оказалась наиболее подверженной разрушению. Работа содержит рекомендации по выбору материалов для демпфирующих систем и обосновывает применение метода конечных элементов (МКЭ) для оптимизации их конструкций в условиях динамических нагрузок [1].

С древних времен применялись простейшие средства гашения вибраций – от амортизирующих элементов в колесницах до первых упругих устройств в мостовых конструкциях. С развитием машиностроения и авиации возникла необходимость в системах, способных эффективно поглощать энергию колебаний, предотвращать резонанс и снижать динамические нагрузки на конструкции. Это привело к созданию современных демпферов, которые используют как эластичные (пружины и рессоры), так и вязкопластические элементы (амортизаторы), преобразующие механическую энергию в тепло (рис. 1) [2; 3; 4].

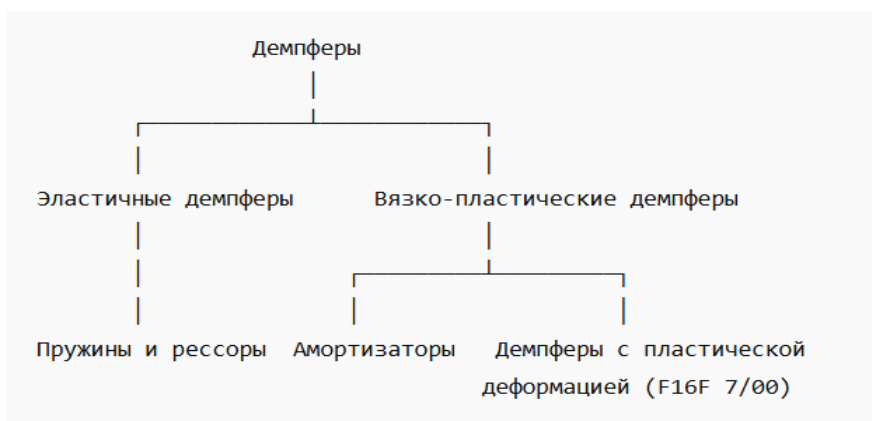


Рис. 1. Классификация демпферов

Физическая основа демпфирования заключается в том, что энергия колебаний рассеивается за счет вязкого трения или необратимой пластической деформации материалов. Особенно эффективными являются демпферы, использующие контролируемую пластическую деформацию – они способны быстро поглощать энергию ударов, что критически важно для защиты конструкций [5].

Применение демпферов стало неотъемлемой частью современной техники и быта. Например, в автомобильной промышленности амортизаторы помогают снижать воздействие дорожных неровностей, в аэрокосмической отрасли демпферы обеспечивают защиту от динамических нагрузок при взлете и посадке, а в строительстве устройства гашения колебаний способствуют повышению устойчивости зданий и мостов [1].

Современное машиностроение, аэрокосмическая и строительная промышленность предъявляют высокие требования к надежности и долговечности конструкций, в которых тонкостенные металлические трубы играют ключевую роль. При осевом сжатии тонкостенные трубы часто теряют устойчивость из-за явления «buckling» – быстрого бокового изгиба, когда первоначальное равновесие нарушается. Даже небольшие геометрические дефекты или начальные отклонения могут значительно снизить критическую нагрузку, при которой труба остается стабильной. Кроме того, при превышении предельных напряжений происходит локальное накопление пластических деформаций, что усугубляет изгибающие моменты и приводит к необратимому разрушению конструкции. Для повышения надежности трубчатых элементов демпфирующих систем важно учитывать эти неустойчивости при проектировании и принимать меры по усилению конструкции и оптимизации геометрии, позволяющие смягчить динамические нагрузки и предотвратить катастрофические последствия. Трубчатые элементы демпфирующих систем подвержены значительным механическим воздействиям, в частности осевому нагружению, вызывающему сложные деформационные процессы, включая инверсию стенок. В таких условиях внутренняя поверхность трубы может начать функционировать как внешняя, что сопровождается перераспределением напряжений и концентрацией пластических деформаций [6].

Анализ подобных явлений требует применения современных численных методов. МКЭ позволяет детально моделировать поведение материалов и изучать распределение напряжений в конструкции. Программное обеспечение LS-DYNA эффективно моделирует механико-тепловые эффекты и динамические изменения в режиме реального времени [6].

Основная **цель исследования** – моделирование поведения тонкостенных металлических труб из различных материалов при осевом деформировании. Особое внимание уделено распределению напряжений и деформаций, а также динамике развития инверсии стенок.

В работе рассматривается влияние различных материалов – меди М1, стали 08кп и коррозионностойкой стали 12Х18Н9Т – на поведение тонкостенных труб при осевом нагружении. Рассматриваемая труба представляет собой стандартный цилиндрический элемент заданного диаметра и конечной длины,

изготовленный по бесшовной технологии. Исходная труба подвергается дополнительной формообразующей обработке путем пластической деформации с получением раструба (участка большего диаметра) на одном из концов. При этом кольцевой участок стенки трубы в месте перехода к раструбу задает положение очага деформации трубы при осевом нагружении. Это позволяет повысить устойчивость конструкции при последующем осевом сжатии, создать предварительную концентрацию напряжений в материале, обеспечить более равномерное распределение осевых усилий по диаметру трубы [7].

Объект исследования – металлическая труба с раструбом, характеризуется следующими параметрами:

- исходный диаметр трубы: 50 мм;
- диаметр раструба: 100 мм;
- толщина стенки: 2 мм;
- длина трубы с раструбом: 150 мм.

Выбор данных параметров обоснован необходимостью имитации реальных эксплуатационных условий, характерных для конструкций, подверженных высоким осевым нагрузкам.

Рассматриваемые три типа металлов обладают разными механическими характеристиками. **Медь М1** (предел текучести – 330 МПа) – высокая пластичность, но низкая прочность. **Сталь 08кп** (предел текучести – 400 МПа) – умеренная пластичность и хорошая сопротивляемость деформациям. Коррозионностойкая сталь 12Х18Н9Т (предел текучести – 500 МПа) – наибольшая устойчивость к нагрузкам и высокая пластичность.

Трехмерная модель трубы (рис. 2) создана с использованием САД-систем, после чего проведено разбиение конструкции на конечные элементы. Особое внимание уделено точности сетки в зонах возможных концентраций напряжений.

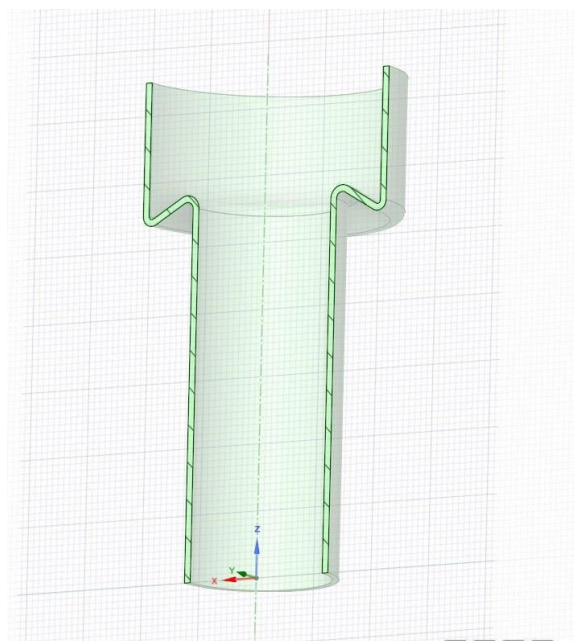


Рис. 2. Трехмерная модель трубы с раструбом

В данном исследовании моделирование проводится в условиях статического нагружения, при котором не учитываются изменения направления нагрузки и скорость ее приложения. Такой подход позволяет сконцентрироваться на анализе распределения внутренних напряжений и деформационных процессов при постоянном осевом усилии, исключая динамические эффекты, связанные с инерционными силами и временными изменениями нагрузки. Статическая модель обеспечивает детальное понимание механизма деформации конструкции, что является ключевым для оценки ее устойчивости и надежности в условиях постоянного воздействия [8].

Нижняя часть трубы неподвижно закреплена. Осевая нагрузка прикладывается к торцевой части трубы с постоянной скоростью через подвижную жесткую плиту. Температура материала фиксирована на уровне 22 °С. Граничные условия выбраны таким образом, чтобы учитывать эффекты пластической деформации.

Для каждого материала заданы индивидуальные кривые «напряжение – деформация», учитывающие переход от упругой области к пластическому состоянию. В модели также включены тепловые эффекты, возникающие при деформации.

Моделирование проводилось в программной среде LS-DYNA в динамическом режиме осевого нагружения с малыми временными шагами. Определены критические нагрузки, инициирующие процесс инверсии стенок, а также зоны локального накопления напряжений.

Для численного анализа использовался высокопроизводительный вычислительный комплекс:

- **процессор:** Intel Core i7;
- **ОЗУ:** 32 ГБ;
- **видеокарта:** NVIDIA Quadro;
- **накопитель:** SSD 1 ТБ.

На рис. 3 представлена визуализация распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, полученная для разных материалов на начальном этапе осевой деформации. Контурные линии разных цветов показывают зоны концентрации напряжений и пластической деформации.

Геометрическая трансформация конструкции сопровождается образованием складок и деформационных зон, что указывает на потерю устойчивости стенок трубы.

Инверсия стенок и перераспределение напряжений – один из ключевых механизмов разрушения конструкции, возникающий под действием осевой нагрузки.

На рис. 3, а показано распределение напряжений на начальном этапе осевой деформации трубы из меди М1. Обширная красная зона в верхней части раструба говорит о том, что материал на участке раструба быстро достигает высоких напряжений, что создает угрозу пластической деформации и разрушения вне созданной зоны концентрации напряжений из-за возможной потери устойчивости.

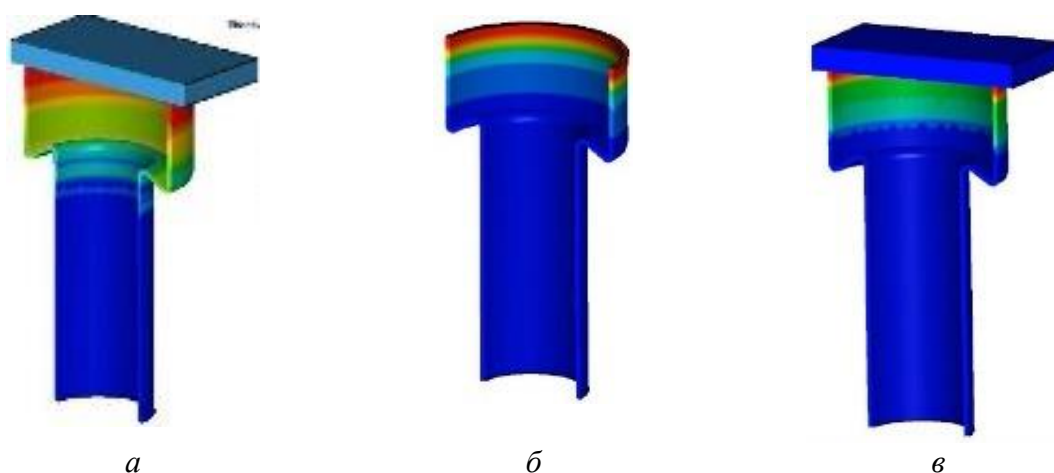


Рис. 3 Распределение напряжений в стенках трубы из различных материалов на начальном этапе осевого нагружения:
a – медь М1; *б* – сталь 08кп; *в* – сталь 12Х18Н9Т

Желто-оранжевая окраска верхней области раструба и преобладание зеленых оттенков при осевой деформации трубы из стали 08кп (рис. 3, *б*) указывают на более равномерное распределение напряжений и большую устойчивость к деформации вне зоны концентрации напряжений по сравнению с трубой из меди. В тоже время наблюдается образование зоны концентрации максимальных напряжений по верхнему торцу трубы [6].

Небольшие красно-оранжевые участки и преимущественно зелено-синий фон в области раструба (рис. 3, *в*) свидетельствуют о высокой устойчивости стали 12Х18Н9Т к нагрузкам – пиковые напряжения локализованы и занимают меньшую площадь.

При достижении критических нагрузок (150 кН – медь М1, 190 кН – сталь 08КП, 210 кН – коррозионностойкой стали 12Х18Н9Т) наблюдается локальное разрушение структуры (рис. 4).

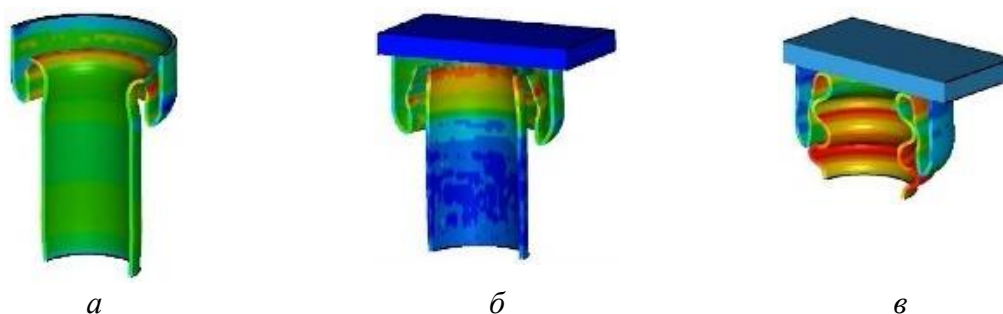


Рис. 4 Распределение напряжений в стенках трубы из различных материалов на конечном этапе осевого нагружения:
a – медь М1; *б* – сталь 08кп; *в* – сталь 12Х18Н9Т

Разрушение трубы из меди М1 (рис. 4, *a*) происходит по продольной оси, что ведет к потере несущей способности. Сталь 08кп (рис. 4, *б*) демонстрирует локальные зоны разрушения, а коррозионностойкая сталь 12Х18Н9Т сохраняет равномерное распределение напряжений.

Медь М1 – наименее устойчива к нагрузкам, быстро деформируется.

Сталь 08кп – средний уровень устойчивости, наблюдаются локальные разрушения.

Коррозионностойкая сталь 12Х18Н9Т – наиболее прочная, демонстрирует равномерное распределение напряжений.

Метод конечных элементов в LS-DYNA позволил провести детальный анализ пластической деформации тонкостенных труб. Полученные результаты:

1. Определены критические нагрузки для каждого материала: 150 кН для меди М1, 190 кН для стали 08КП и 210 кН для коррозионностойкой стали 12Х18Н9Т.

2. Выявлены зоны концентрации напряжений в раструбе и переходной области, что указывает на повышенный риск локальных деформаций и потери устойчивости.

3. Показано различие в поведении материалов: медь М1 быстрее достигает предельных состояний, сталь 08КП демонстрирует промежуточные показатели, а коррозионностойкая сталь 12Х18Н9Т обладает наилучшей устойчивостью.

4. Установлено, что наибольшие напряжения возникают в зоне раструба и перехода к цилиндрической части, где происходит инверсия стенок и локальное разрушение.

Так же были выделены критические зоны разрушения, которые показали преимущество нержавеющей стали как наиболее устойчивого к динамической деформации материала.

Будущие исследования должны включать экспериментальные испытания, учет усталостных нагрузок и температурных эффектов.

Результаты работы могут быть использованы для оптимизации процессов демпфирования, особенно с учетом влияния динамических нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цинкевич, О. С. Метод конечных элементов: основы и принципы / О. С. Цинкевич, Р. Л. Тейлор, Ц. З. Жу. – М.: Эльзевир, 2013. – 752 с.
2. Rao, S. S. Mechanical Vibrations. – 5th ed. – Upper SaddleRiver, NJ: Prentice Hall, 2011. – 1152 p.
3. Smith, J. D. Vibration Control. – London: Chapman & Hall, 1998. – 342 p.
4. US Patent US4560123A. Vibration Dampening Device for Automotive Suspension Systems. – 1985.
5. US Patent US5123456A. Plastic Deformation Vibration Damper. – 1992.
6. Ansys / LS-DYNA – URL: <https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/inaki/docs/pdem/EMtheory.pdf> (дата обращения: 09.01.2025).
7. Гушин, А. М. Анализ прочности трубных конструкций методом конечных элементов / А. М. Гушин, В. И. Никитин. – Вестник машиностроения. – 2018. – №6. – С. 45–50.
8. Banabic, D. Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation. – Springer, 2010. – 321 p.

Поступила 31.03.2025