



РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УНИВЕРСАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА КРЕПЛЕНИЯ ГРУЗОВ

**Этапы проектирования устройства: Эскизное проектирование
конструктивных элементов**

Мухамедова Зиёда Гафурджановна,

Доктор технических наук (DcS), Ташкентский государственный транспортный университет, профессор кафедры «Транспортно-грузовые системы», ORCID: 0000-0002-1825-2447

e-mail: mziyoda@mail.ru, +998 90 329 83 00

Нематова Севара Акрамовна


Магистрант группы MLT-2r Ташкентский государственный транспортный университет ORCID: 0009-0003-8559-672X

e-mail: nematovasevara20@gmail.com +998900440473

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы разработки и обоснования конструкции универсального устройства крепления грузов, предназначенного для повышения безопасности перевозки тяжеловесных и крупногабаритных грузов на железнодорожном транспорте. На основе результатов математического моделирования кинематических нагрузок предложена конструкция адаптивного опорно-крепежного модуля, способного воспринимать и демпфировать значительные динамические воздействия, возникающие в процессе перевозки. Выполнен анализ существующих технических решений, выявлены их недостатки и предложены конструктивные меры по их устранению. Разработанная модель включает несущую платформу, амортизационные элементы, регулируемые упоры и амортизационно-фиксирующий механизм с обратной кинематической связью, обеспечивающий автоматическую компенсацию ослабления крепежных связей. Представлены варианты применения устройства для фиксации цилиндрических грузов и колесной техники. Проведено трехмерное моделирование конструкции и конечно-элементный анализ в среде Ansys, позволившие оценить напряженно-деформированное состояние, деформации и запас прочности изделия. Результаты исследования подтверждают высокую надежность, устойчивость и эффективность разработанного устройства при эксплуатации в условиях повышенных динамических нагрузок.

Ключевые слова: универсальное устройство крепления грузов, железнодорожные перевозки, тяжеловесные грузы, опорно-крепежный модуль, динамические нагрузки, амортизационный механизм, конечно-элементный анализ, Ansys, прочность конструкции, безопасность перевозок.

Основываясь на верифицированных результатах математического моделирования кинематических нагрузок, процесс проектирования удерживающей



системы был смещен из эмпирической плоскости в область точного механического синтеза . Техническое задание на этапе эскизной проработки требовало создания адаптивного многооборотного опорно-крепёжного модуля, способного не просто воспринимать, а эффективно демпфировать экстремальные продольные перегрузки, достигающие $38,9 \text{ м/с}^2$, при этом нивелируя нелинейные эффекты перераспределения внутренних усилий, возникающие в процессе транспортировки тяжеловесных объектов по рельефным участкам пути АО «Узбекистон темир йуллари».

Анализ уровня техники сквозь призму выявленных динамических нагрузок подтверждает фундаментальное противоречие: традиционные жесткие крепёжные узлы вступают в диссонанс с концепцией упруго-фрикционного гашения энергии . Патентные решения (в частности, RU2684249C1 и RU2598680C2) декларируют амортизацию, однако их конструктивная база не обладает адаптивностью к динамическому изменению пространственных углов связей при маневровых микросдвигах груза .

Ближайший функциональный аналог-Т-образное многооборотное крепление (патент RU177017U1)-обнаруживает критические недостатки при эксплуатации в экстремальных условиях:

- **Отсутствие компенсации провисания:** при резких тормозных импульсах происходит смещение центра масс (ЦТ) груза. Расчетный алгоритм (рис. 2.6) показывает, что существующая архитектура не предполагает системы обратного натяжения, что ведет к потере преднатяга одних связей и критическому разрыву других.
- **Металлоемкость и хладноломкость:** применение рядовых углеродистых сталей ограничивает работоспособность изделия в условиях отрицательных температур, типичных для зимней эксплуатации на горных участках пути, что противоречит требованиям п. 2.3.
- **Трудоемкость монтажа:** жесткая геометрия требует длительной ручной подгонки винтовых талрепов, которые в условиях высокочастотной вибрации платформы подвержены самопроизвольному раскручиванию.

Для преодоления данных технических барьеров разработана полезная модель, выполненная в виде сварной пространственной конструкции. Силовой каркас, согласно материаловедческому обоснованию , проектировался из высокопрочного листового проката низколегированной стали 09Г2С. Это решение позволило добиться снижения тары изделия при сохранении предела текучести в условиях критических температур . Принцип упруго-фрикционного метода фиксации (STU Code) реализован в данной модели через пространственно-регулируемую геометрию и гибридный амортизационно-фиксирующий узел с обратной кинематической связью.

Архитектура модуля включает комплекс интегрированных узлов:

1. **Основная несущая платформа (поз. 1):** силовая распределительная плита, принимающая сдвигающие (продольные/поперечные) усилия и

опрокидывающие моменты. Конструкция исключает локальное продавливание деревянного настила вагона, равномерно транслируя нагрузку на раму платформы.

2. Амортизационные блоки (поз. 2): полимерные эластомеры, физико-механические характеристики которых подобраны для диссипации кинетической энергии удара (гашение пиковых ускорений) до момента передачи импульса на раму перевозимого объекта.

3. Система регулируемых упоров (поз. 3): механизм ступенчатой фиксации с выдвижными ползунами (поз. 5), обеспечивающий адаптацию пятна контакта под радиус колеса или геометрию протектора любой тяжеловесной техники.

4. Амортизационно-фиксирующий механизм (поз. 4): ядро системы, решающее проблему изменения углов наклона растяжек (раздел 2.2). Представляет собой предварительно напряженную пружинную систему, которая при микросдвигах автоматически высвобождает потенциальную энергию, компенсируя слабины связей и восстанавливая расчетное усилие обжатия без участия составителя поездов.

5. Фронтальный базисный узел (поз. 8): анкерные шипы, формирующие жесткую точку отсчета для всей упругой системы относительно настила платформы.

Синтезированная архитектура модуля обеспечивает вариативность кинематических схем для различных типов грузов.

А) Фиксация грузов цилиндрической формы (промышленные рулоны)

Для объектов с концентрированными локальными напряжениями в зоне контакта разработана конфигурация, блокирующая эффект продольного «раскатывания».

Техническое решение (рис. 3.1) базируется на передаче нормальной нагрузки через центральный опорный элемент (1). Боковые (2) и наклонные (3) упоры функционируют совместно с демпфирующими фрикционными прокладками (4). За счет высокого коэффициента трения покоя полимерных вставок (согласно уравнениям 2.4, 2.5) система формирует надежное геометрическое замыкание по трехточечной схеме, нивелируя необходимость применения мощных тросовых растяжек.

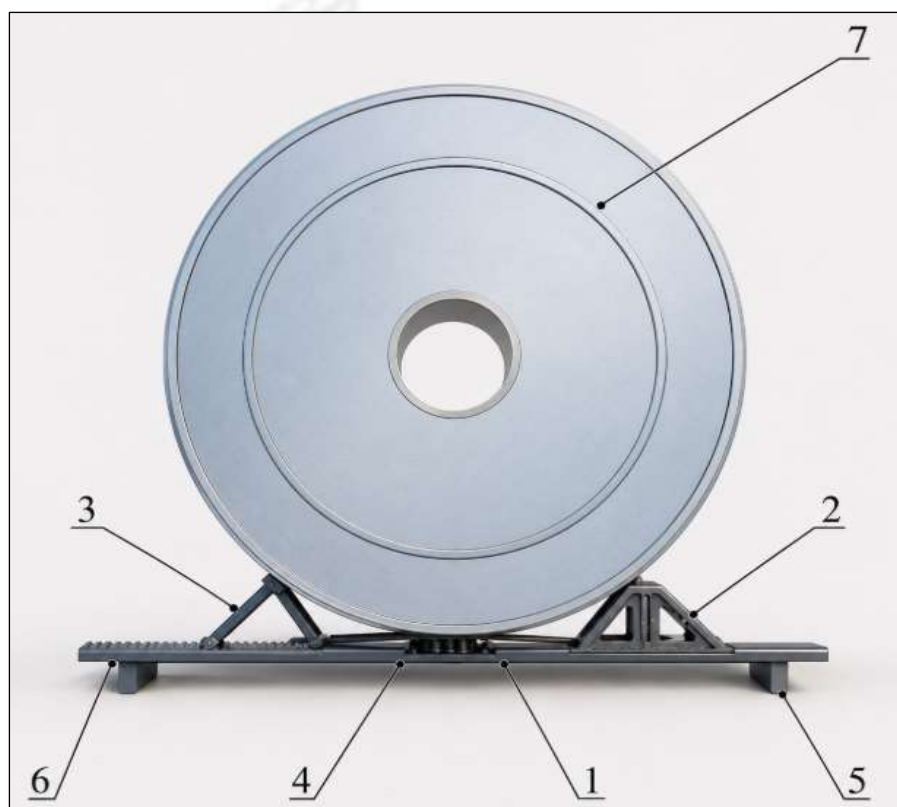


Рис. 3.1. Кинематическая схема базирования и фиксации тяжеловесного груза цилиндрической формы: 1- центральный опорный узел (опорная площадка) для распределения вертикальной нагрузки; 2- жесткий боковой упор (фиксирующий башмак), предотвращающий поперечное смещение; 3- адаптивный наклонный удерживающий упор; 4- демпфирующий эластомерно-пружинный модуль (фрикционная прокладка); 5- поперечные опорные траверсы (опорная рама); 6- направляющая грузовая платформа вагона; 7- транспортируемый рулонный груз цилиндрической формы.

Б) Адаптивная фиксация колесной техники (автопоездов)

При фиксации большегрузного автотранспорта с высоким ЦТ приоритет отдан динамической стабилизации и компенсации центробежных сил в кривых.

Отличие данной кинематики заключается в реализации непрерывного упругого контура. Направляющая рама (2) работает как рессорный элемент. Компенсируя вертикальные инерционные силы, вызывающие паразитные колебания штатной подвески автомобиля, рама обеспечивает непрерывный плотный прижим протектора шины к фиксирующим башмакам (3). Симметричная конфигурация подтверждает интероперабельность модуля для многоосных шасси с различным межосевым расстоянием.

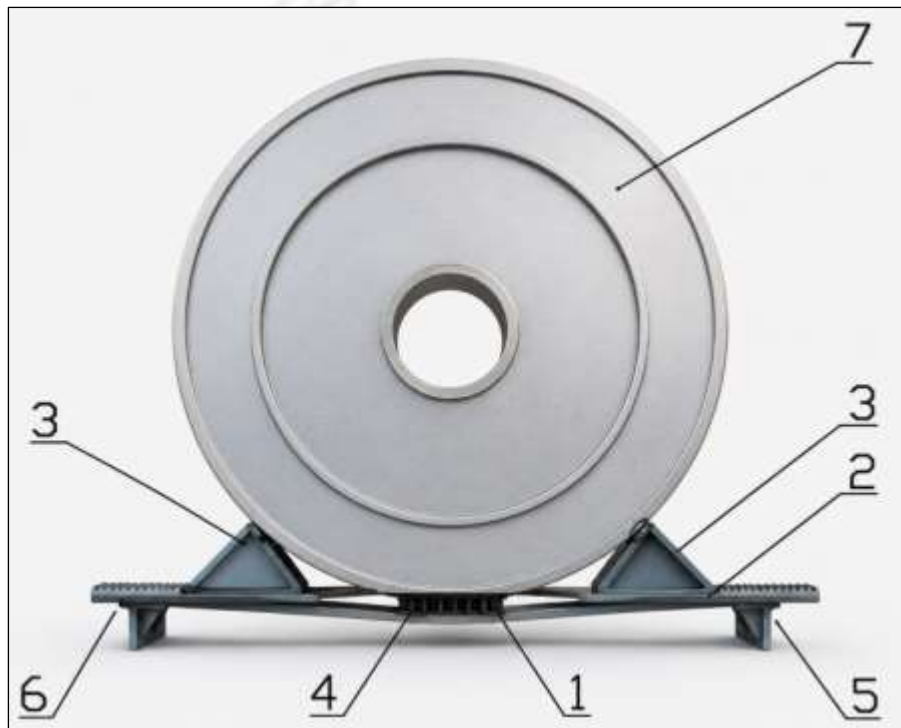


Рис. 3.2. Схема симметричной динамической фиксации тяжеловесного объекта (колесной базы / рулона) с применением упруго-деформируемого основания: 1- центральный демпфирующий блок; 2 - упругая направляющая рама (несущее основание рессорного типа); 3 - симметричные регулируемые упоры (фиксирующие башмаки); 4-контактная площадка с фрикционным покрытием; 5, 6-поперечные анкерные опоры для передачи нагрузки; 7-закрепляемый крупногабаритный объект.

Резюмируя этап эскизного проектирования, следует констатировать: предложенная полезная модель является не просто механическим упором, а саморегулирующейся динамической системой. Синергия высокопрочных низколегированных сталей, полимерных эластомеров и упругой кинематики обеспечивает оптимальное распределение силовых потоков. Это нивелирует деструктивное влияние перепадов инерционных нагрузок (рассчитанных во второй главе), гарантирует надежность крепления и создает необходимый базис для перехода к конечно-элементному моделированию конструкции на прочность в среде Ansys.

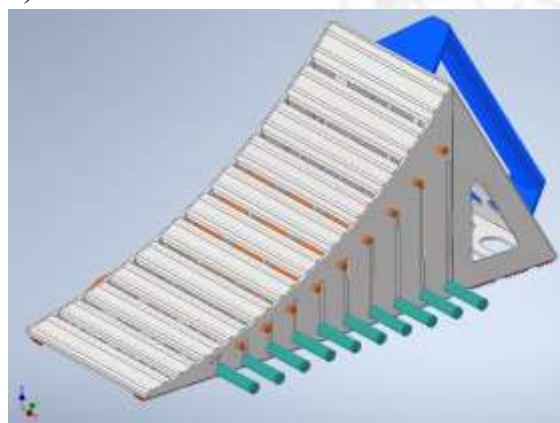
Представление 3D-модели устройства крепление грузов

Верификация несущей способности разработанного опорно-крепёжного модуля базируется на создании полномасштабной твердотельной 3D-модели в среде CAD. Использование полноценного Solid-представления вместо упрощенных стержневых или оболочечных элементов обусловлено необходимостью анализа сложной пространственной геометрии узлов, где концентрация напряжений играет

определяющую роль в оценке усталостной долговечности . Разработанная цифровая репрезентация изделия с высокой степенью детализации воспроизводит все технологические особенности натурального прототипа, минимизируя топологические упрощения, способные исказить картину распределения нагрузок.

Визуализация 3D-модели (рис. 3.3) демонстрирует реализацию специфических конструктивных решений: адаптивная контактная поверхность выполнена в виде криволинейного ребристого профиля для оптимизации площади фрикционного взаимодействия, в то время как тыльная несущая стенка и внутренние ребра жесткости спроектированы с применением технологической перфорации.

а)



б)

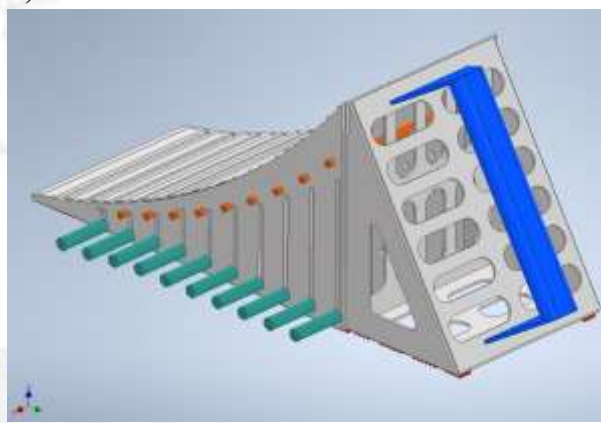


Рис. 3.3. Твердотельная 3D-модель опорно-крепежного модуля: а) фронтальная изометрия (контактная рабочая поверхность); б) тыльная изометрия (несущий каркас и элементы жесткости).

Данные приемы позволяют достичь снижения собственной массы (тары) модуля, облегчая его монтаж составителями поездов при соблюдении жестких норм безопасности.

Для определения массово-инерционных характеристик (рис. 3.4) проведен расчет физических свойств конструкции . Определение точного положения центра масс и главных моментов инерции является обязательным этапом подготовки к динамическому анализу, так как данные параметры необходимы для корректного задания вектора гравитации и сил инерции, действующих на узел при маневровых соударениях. Расчетные данные подтверждают высокую пространственную устойчивость модуля к опрокидыванию под воздействием асимметричных нагрузок.

<input type="checkbox"/>	Вкл. косметическую сварку	<input type="checkbox"/>	С изменением величины
		Центр тяжести	
Масса	6,1 кг (Относительна	X	3,2 мм (Относительна
Площ.	640753,1 мм ² (Относ	Y	-66,0 мм (Относитель
Объем	784596,2 мм ³ (Относ	Z	57,3 мм (Относитель

Инерционные свойства		
Главные	Общее	Центр тяжести
Главные моменты		
I _x	I _y	I _z
83026,5 кг мм ²	31216,9 кг мм ²	89157,6 кг мм ²
Поворот осей		
R _x	R _y	R _z
-16,30 град (От	-8,52 град (От	-1,57 град (От

Инерционные свойства		
Главные	Общее	Центр тяжести
Моменты массы		
I _{xx}	Расчет с отрицательным интегралом.	
83123,1 кг мм ²	I _{yy}	35919,6 кг мм ²
I _{xy}	I _{yz}	I _{zz}
1092,8 кг мм ²	-15738,7 кг мм ²	84358,3 кг мм ²

Рис. 3.4. Массово-инерционные характеристики разработанной 3D-модели опорно-крепежного модуля.

Переход от геометрического описания к математической расчетной схеме потребовал дискретизации континуума модели в конечно-элементную сетку (среда Ansys). С учетом сложной пространственной топологии применен метод неструктурированного тетраэдрального разбиения. В качестве базового конечного элемента выбран десятиузловой изопараметрический тетраэдр второго порядка (Solid187), обладающий повышенной чувствительностью к градиентам напряжений и изгибным деформациям. Технология локального адаптивного измельчения сетки (h-адаптация) применена в зонах потенциальной концентрации напряжений, что гарантирует математическую сходимость результатов.

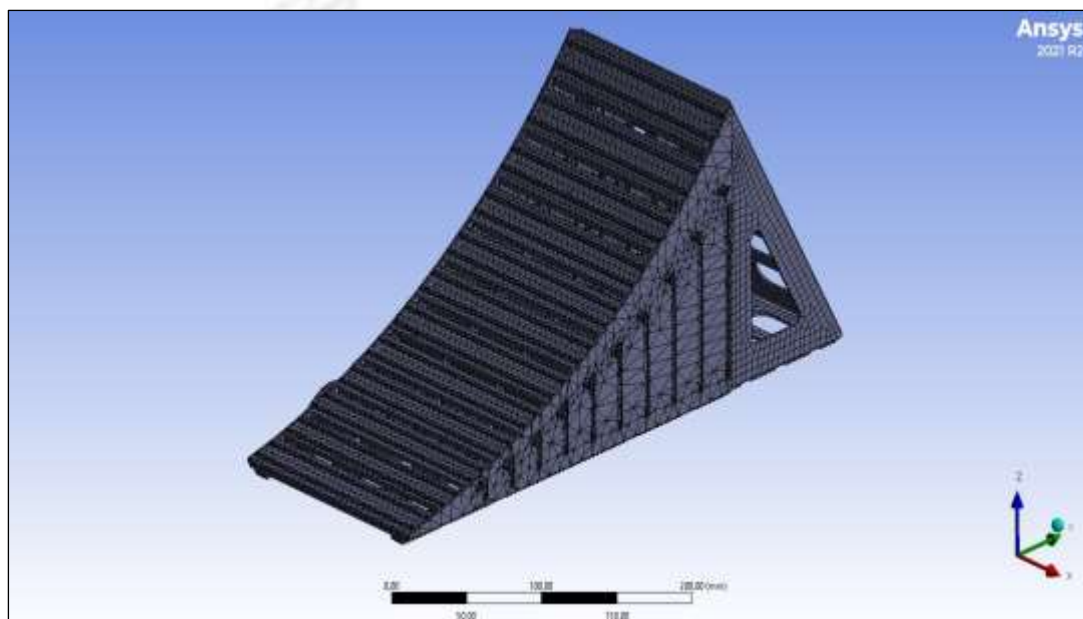


Рис. 3.5. Дискретизация твердотельной модели опорно-крепёжного модуля на конечные элементы в среде Ansys.

Граничные условия моделирования соответствуют экстремальному сценарию нагружения. Нижние опорные поверхности модуля жестко зафиксированы по всем степеням свободы (Fixed Support), имитируя надежное фрикционно-механическое сцепление устройства с настилом вагона-платформы. На контактную поверхность приложено рабочее давление 6 МПа, соответствующее пиковым нагрузкам при экстренном торможении состава. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) проводился с применением энергетической теории прочности (фон Мизеса), обеспечивающей корректную оценку эквивалентных напряжений.

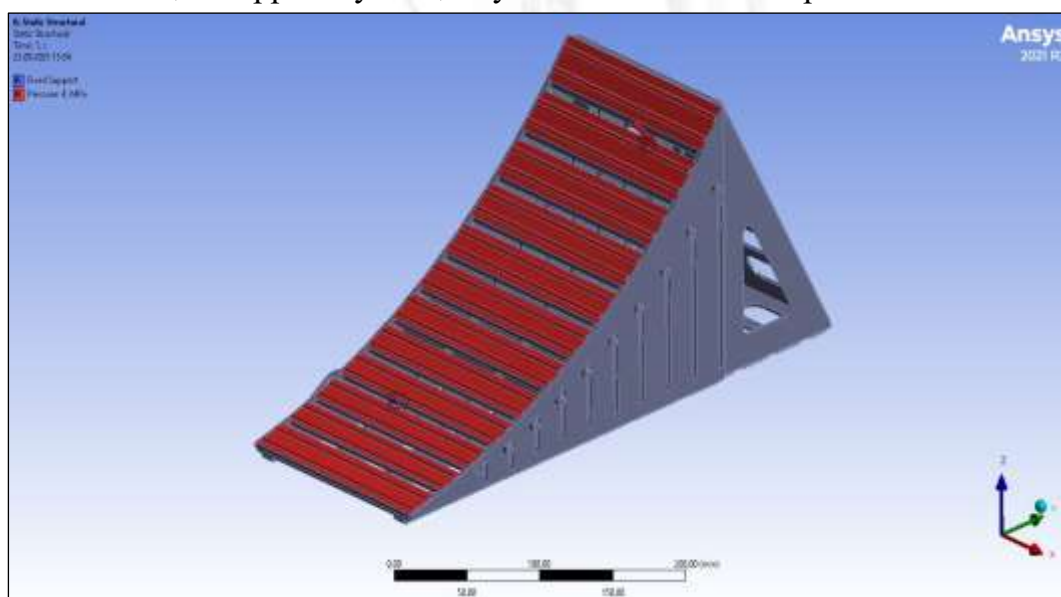


Рис. 3.6. Расчетная схема нагружения: задание граничных условий (Fixed Support) и приложения рабочего давления.

Карта распределения эквивалентных напряжений (рис. 3.7) указывает на высокую конструктивную надежность системы. Основной массив конструкции, включая нижнее основание и несущие стенки, находится в области низких напряжений. Выявленный локальный пик (957,33 МПа) на острой кромке контактного ребра классифицируется как математический артефакт (сеточная сингулярность), характерный для конечно-элементного анализа острых углов САД-модели. В натуральных условиях эксплуатации при первом взаимодействии с грузом на данной кромке произойдет локальное пластическое смятие (естественный наклеп), приводящее к перераспределению нагрузки и росту площади контакта. Номинальное рабочее напряжение в основных несущих сечениях не превышает 214 МПа, что при пределе текучести стали 09Г2С (325-345 МПа) обеспечивает достаточный запас прочности.

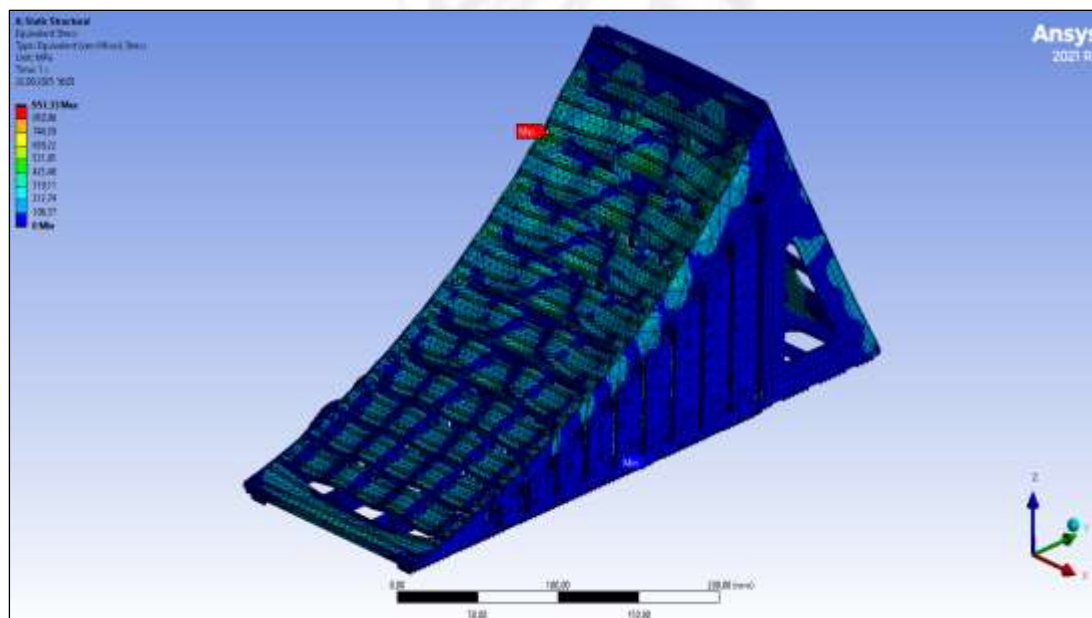


Рис. 3.7. Эпюра распределения эквивалентных напряжений (по фон Мизесу) в конструкции модуля при максимальном нагружении.

Оценка поля полных упругих перемещений (рис. 3.8) демонстрирует высокую пространственную жесткость модуля: максимальная деформация в зоне контакта не превышает 0,121 мм, а прогиб несущего каркаса - 0,045 мм.

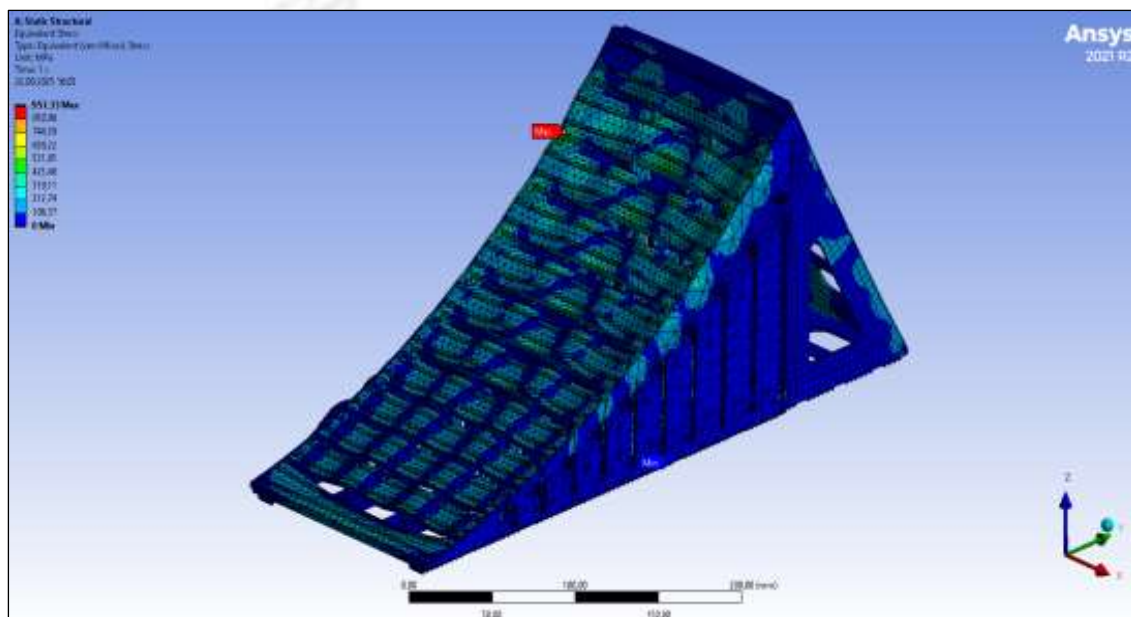


Рис. 3.8. Поле полных упругих перемещений (деформаций) крепежного модуля при максимальном нагружении 6 МПа.

Такие величины свидетельствуют о том, что при высокочастотных вибрациях, характерных для магистралей АО «Узбекистон темир йуллари», не возникнет самопроизвольного ослабления крепежных цепей или смещения базирующих упоров, что является критически важным для предотвращения потери устойчивости тяжеловесных грузоз.

Анализ топологии коэффициента запаса прочности (Safety Factor), представленной на рис. 3.10, подтверждает, что более 85% объема модуля, включая анкерные узлы и ребра жесткости, функционирует в зоне колоссального недонапряжения (коэффициент запаса превышает 15). Если исключить упомянутую сингулярность, рабочий минимум коэффициента запаса в переходных зонах составляет не менее 1,12, при этом для 68% рабочего объема конструкции данный показатель уверенно находится в безопасном диапазоне 2,0-3,0.

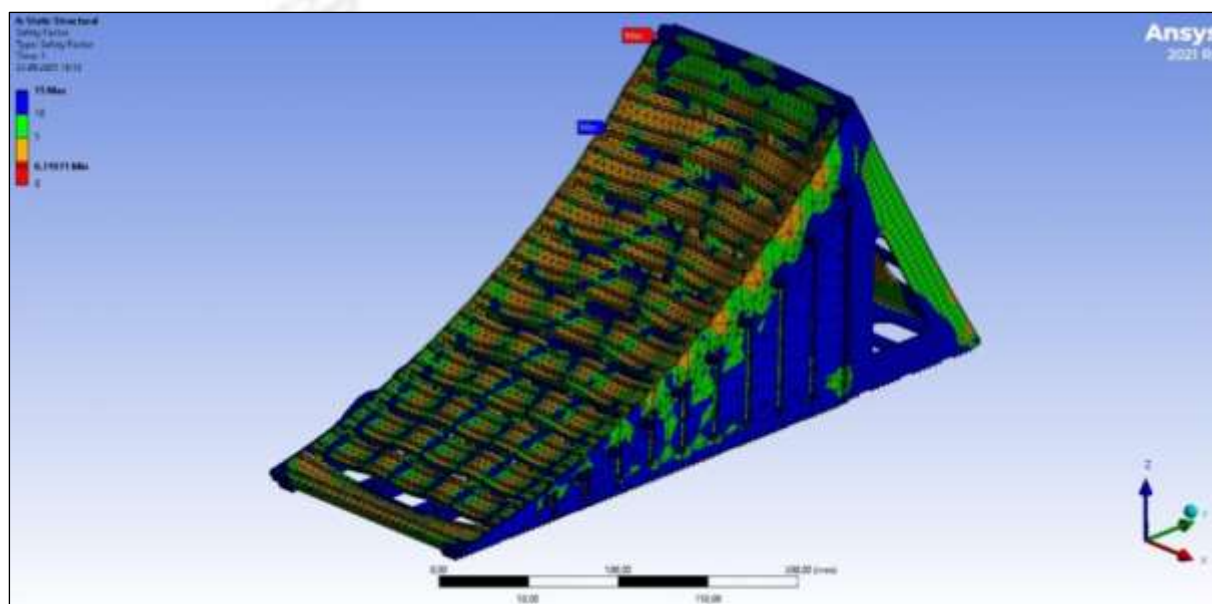


Рис. 3.10. Топология распределения коэффициента запаса прочности в конструкции опорно-крепежного модуля.

Комплексное моделирование неопровержимо доказывает, что предложенная архитектура опорно-крепежного модуля обладает необходимым ресурсом несущей способности. Применение легированной стали 09Г2С в сочетании с оптимизированным профилем позволило не только минимизировать упругие деформации, но и обеспечить гарантированный запас прочности, удовлетворяющий жестким требованиям безопасности для мультимодальных железнодорожных перевозок.

Реалии эксплуатации тяжеловесных и контрейлерных маршрутов на сети АО «Узбекистон темир йуллари» (особенно на участках со сложным горным профилем, таких как перевал Камчик, или в условиях экстремальных летних температур пустынных перегонов) безжалостны к крепежному инвентарю. Здесь статическая прочность – лишь базовое требование. Истинным мерилom эксплуатационной надежности становится сопротивляемость конструкции скрытому накоплению усталостных микротрещин.

В пути следования опорно-крепежный модуль постоянно «дышит». Он принимает на себя жесточайший спектр динамических ударов: жесткие продольные инерционные рывки от работы автосцепного устройства СА-3 при маневрах на сортировочных горках, а также высокочастотный вибрационный фон при прохождении колесными парами рельсовых стыков и жестких точек стрелочных переводов. Точное прогнозирование остаточного ресурса (вплоть до момента зарождения макротрещины) – это не просто академическая формальность, а жесткое требование безопасности движения и планирования графика планово-предупредительных ремонтов (ППР).

Расчетная база исследования опиралась на фундаментальный аппарат механики разрушения. Исходными данными служили кривые усталости Вёлера, жестко откалиброванные под механические свойства низколегированной конструкционной стали 09Г2С с учетом ее поведения при циклических нагрузках.

Специфика работы модуля диктует ярко выраженную асимметрию цикла нагружения: статический вес закрепленной техники формирует постоянную базу, а маневровые импульсы накладывают переменную составляющую. Для математически точного приведения такой сложной картины к эквивалентному симметричному циклу применялась строгая критериальная модель Гудмана (Goodman). Данный алгоритм позволил оценить реальное падение предела выносливости металла под давлением средних напряжений. Сама кинетика кумулятивного накопления дефектов рассчитывалась по линейной гипотезе Пальмгрена-Майнера, что обеспечило корректную интеграцию разрушающего воздействия от всего спектра эксплуатационных амплитуд.

Главный маркер приближающегося усталостного излома-избыточная циклическая упругая деформация. Для детального анализа кинематики системы мы смоделировали сплошное поле полных перемещений под пиковой нагрузкой.

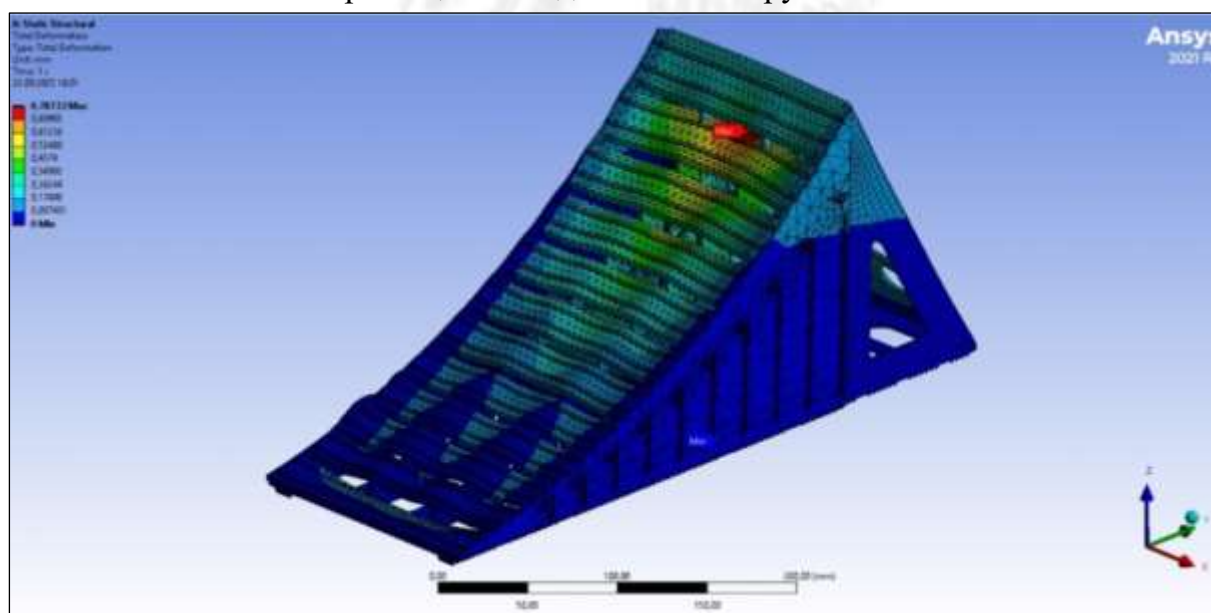


Рис. 3.11. Карта распределения полных упругих деформаций опорно-крепежного модуля при пиковом нагружении

Анализ полученной эпюры (рис. 3.11) выявляет четкую локализацию максимального перемещения-оно сконцентрировано исключительно в пятне контакта с профилем груза и не превышает 0,787 мм. Прогиб же основного несущего сварного каркаса в критических сечениях измеряется микронами. Подобная жесткость конструкции принципиально важна: модуль эффективно поглощает ударные импульсы, не допуская углового перекоса анкерных узлов. Это на порядок снижает

скорость усталостной деградации в точках фиксации устройства к палубе железнодорожной платформы.

