

УДК 625.143

Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, В. А. ГАПАНОВИЧ, ОАО «РЖД», Москва, Россия, В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук, В. И. МАТВЕЦОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, С. С. ЩЕРБАКОВ, доктор физико-математических наук, Белорусский государственный университет, Минск, В. В. КОМИССАРОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

ТРИБОФАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОЛЕСО / РЕЛЬС ДЛЯ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ: ПОВЫШЕНИЕ НАГРУЗКИ И... СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ?*

Сделана попытка в первом приближении обосновать и сформулировать задачу многокритериальной оптимизации системы колесо / рельс применительно к тяжеловесному движению.

С середины прошлого века основная тенденция мирового технического прогресса – рост нагрузок, скоростей, давлений и температуры и, следовательно, производительности машин и оборудования. Так что обсуждаемая в данной работе проблема находится в русле глобальной технической политики.

Реализация этой тенденции обычно сопряжена с повышением затрат в сферах производства и эксплуатации в связи с необходимостью обеспечения требуемых показателей надежности и безопасности. Однако рыночная экономика предъявляет жесткие требования снижения расходов. И поэтому на первый план, естественно, выдвигается задача оптимизации, в том числе и применительно к системе колесо / рельс, особенно в связи с развитием тяжеловесного движения.

Удивительно, но факт: хотя система колесо / рельс и является базисом железнодорожного транспорта, который, как известно, имеет большое не только народнохозяйственное, но и стратегическое, военное и социальное значения; хотя эксплуатационные контактно-усталостные ее повреждения приносят огромные материальные потери и нарушают гарантии безопасности для персонала; хотя так называемый колесно-рельсовый вирус уже более 10 лет потрясает практически все технически развитые страны, особенно в случаях тяжеловесного движения; хотя ученые и специалисты не реже чем раз в 2 года специально обсуждают проблему колесо / рельс на международных научных конференциях (см., например, [1–5]), но до сих пор, по имеющимся сведениям, задача оптимизации системы не только не была решена, но даже не ставилась. По-видимому, это связано не только со сложностью проблемы, но и с известной неясностью ее постановки. В данной работе сделана попытка восполнить этот пробел и хотя бы в первом приближении обосновать и сформулировать задачу многокритериальной оптимизации системы колесо / рельс применительно к тяжеловесному движению.

И тут сразу же возникает специфическая (железнодорожная) проблема. Оказывается, что традиционная концепция системы колесо / рельс имеет устойчивый синдром максимизации (рисунок 1): совокупные затраты (C_0) в сферах производства и эксплуатации неуклонно растут (в зависимости от роста многочисленных факторов) – и практически ничто не снижается. Именно этим объясняется, что в последнее десятилетие стоимость перевозок постоянно увеличивается, так что конкурентоспособность железнодорожного транспорта практически падает.

ВОКУПНЫЕ ЗАТРАТЫ ТРУДА, СРЕДСТВ И МАТЕРИАЛОВ В СФЕРАХ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

НЕКЛАССИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ:

$$C_0 = C_0(Q_2(\sigma_{ij}) \uparrow, v \uparrow, \theta(T, Ch) \uparrow, IS \uparrow, \text{Эк} \uparrow, \Sigma N \uparrow, R \uparrow, S_p \uparrow, H \uparrow, K \uparrow, Me \uparrow, Tech \uparrow, \text{Test} \uparrow, \text{Рем} \uparrow, \dots) \Rightarrow \max C_0 \text{ ПРЕДЕЛЫ РОСТА} \uparrow ?$$

Нагрузки Скорость Среда, в т.ч. смазка Инфраструктура
Эксплуатация Пропущенный тоннаж Технический ресурс Безопасность
ШПОКР Конструкция Материалы Технологии
Испытания Ремонт

СТОИМОСТЬ ПЕРЕВОЗОК ↗ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ Ж/Д ТРАНСПОРТА ↘

Рисунок 1 – Традиционная концепция системы колесо / рельс: синдром максимизации

С точки зрения нового научного направления, которое получило краткое название *трибофатика*, мы рассматриваем систему колесо / рельс именно как трибофатическую. Это значит, что ее эксплуатационная стойкость, по нашим представлениям, не может быть в полной мере оценена в рамках таких частных научных дисциплин, как механика усталостного разрушения, трибология и др. Это значит, что для решения поставленной задачи необходим комплексный подход.

* Статья написана как обобщение докладов авторов на VII международном симпозиуме по трибофатике (Гомель, 26–27 ноября 2015 г.), заседаниях Президиума НАН Беларуси (Минск, 22 февраля 2016 г. и 30 марта 2016 г.), на совещании в Совете Министров Республики Беларусь (Минск, 26 февраля 2016 г.), на заседании главных инженеров железнодорожных администраций государств – членов ЕАЭС по вопросам научно-технического сотрудничества и внедрения перспективных технологий и техники на железнодорожном транспорте (Гомель, 27 ноября 2016 г.) и на заседании НТС ОАО «РЖД» (Москва, 27 июля 2016 г.).

Итак, ставится и решается задача о снижении совокупных затрат (C_0) труда, средств и материалов в сферах производства (A), эксплуатации (B) и ремонта (B) трибофатической системы колесо / рельс при обеспечении оптимальных технического ресурса (R), безопасности (S_p) и пропущенного тоннажа (ΣQ) при одновременной минимизации внутренних усилий (σ_{int}) в условиях тяжеловесного движения, когда повышается эксплуатационная нагрузка (Q_Σ):

$$\left. \begin{array}{l} \text{Нагрузка } Q_\Sigma \Rightarrow \max \\ \text{Внутренние усилия } \sigma_{int} \Rightarrow \min \\ \text{Совокупные затраты } C_0(A, B, B) \Rightarrow \min \end{array} \right\} \rightarrow \text{Opt} \left\{ \begin{array}{l} \Sigma Q \text{ Пропущенный тоннаж} \\ S_p \text{ Безопасность} \\ R \text{ Технический ресурс (надежность)} \end{array} \right.$$

Решение задачи достигается путем вариации и обоснованных ограничений многих параметров:

- диаметр колеса (D_k);
- геометрия и параметры контакта ($R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}, a, b, A_0, \dots$);
- физико-механические и служебные свойства материалов ($\Sigma, \mu, \sigma_b, \sigma_{-1}, p_f, \dots$);
- износ (i);
- контактно-усталостные повреждения (V_{int});
- коэффициент трения (f_R);
- коэффициент сцепления (f_c);
- физико-химические и служебные свойства смазки и процессы самосмазывания;
- управляемость;
- размах виляний;
- и др.

Конечно, попытка подробно изложить все направления для решения этой очень сложной задачи в рамках одной статьи представляется невозможной, поэтому далее делается только два предложения (рисунок 2), которые имеют одно определяющее значение; при этом второе из наших предложений дает сокращенную интерпретацию задачи оптимизации.

1. Преодоление 150-летней традиции **НИ-ТЕСН: ЛИТЫЕ РЕЛЬСЫ**
 Расходы € (Me, Tech) ↓
 Прогнозируется уменьшение стоимости рельсов до 2-х раз (и, возможно, более), при безусловном обеспечении требуемого ресурса и безопасности

2. Преодоление некоторых устойчивых представлений железнодорожной науки **НОВАУ: К ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ КОЛЕСО/РЕЛЬС**
 Расходы C ($R, S_p, \Sigma N$) ↓

$$\left. \begin{array}{l} Q_\Sigma \Rightarrow \max \\ \sigma_{ij} \Rightarrow \min \\ \Sigma C(A, B, C) \Rightarrow \min \end{array} \right\} \rightarrow \text{Opt} (C_\Sigma, S_p, \Sigma N, R)$$

 Ставится и решается задача о снижении затрат труда, средств и материалов в сферах производства (A), эксплуатации (B) и ремонта (C) системы при обеспечении ее оптимального технического ресурса и требуемой безопасности

Рисунок 2 – Трибофатика: два предложения

Далее опишем эти предложения более подробно, опираясь на наши работы [6–18], выполненные большим коллективом авторов в течение последнего десятилетия.

1 Hi-Tech: литые рельсы. Это первое предложение уникально, потому что оно нарушает более чем 150-летнюю традицию изготовления рельсов из высококачественной стали высокопроизводительным, но очень энергозатратным и дорогим методом прокатки. Чтобы реализовать это предложение, необходимо решить две

труднейшие проблемы. Первая: предложить новый материал для изготовления рельсов, который не уступает стали по важнейшим критериям работоспособности (по механическим и служебным свойствам). И вторая: материал должен иметь высокие технологические свойства, чтобы можно было отлить длинномерные рельсы, у которых размеры соседних сечений резко изменяются в несколько раз.

Поиск показывает, что у стали есть единственный серьезный конкурент: это чугун с шаровидным графитом. Вот краткий перечень достоинств современных высокопрочных чугунов:

- хорошие антифрикционные свойства;
- способность быстро гасить вибрации и резонансные колебания;
- малая чувствительность к надразам;
- меньший, чем у стали, удельный вес;
- повышенная теплопроводность;
- повышенные, по сравнению со сталью, литейные и технологические свойства;
- более низкая температура плавления;
- хорошая обрабатываемость резанием.

Но указанных свойств недостаточно, чтобы известные марки чугунов могли бы заменить сталь при изготовлении рельсов: нужны соответствующие механические и служебные свойства. Конкурентная ситуация чугун – сталь по характеристикам прочности и пластичности представлена на рисунке 3. Видно, что современные так называемые высокопрочные чугуны серьезно отстают от современных же упрочненных сталей именно в высокопрочной области (при пределах прочности $\sigma_b > 1000$ МПа). Ученые и специалисты ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» и ОАО «Гомсельмаш» совершили прорыв именно в этой области (см. рисунок 3), когда разработали высокопрочный чугун (ВЧ) производства фирмы по трибофатике (буква Т в марке ВЧТГ) и завода «Гомсельмаш» (буква Г в марке ВЧТГ).

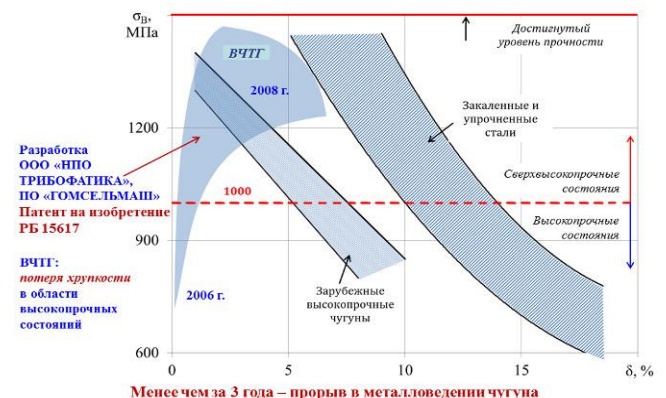


Рисунок 3 – Чугун и сталь: диаграмма пластичность – прочность

С физической точки зрения чугун ВЧТГ обнаруживает важную особенность: в зависимости от режимов термообработки можно получить любую базовую микроструктуру (рисунок 4) либо произвольную их смесь, так что предел прочности варьируется в большом интервале значений (от 800 до 1600 МПа). А с механической точки зрения чугун ВЧТГ дает неожиданную и оригинальную диаграмму прочность – пластичность

(рисунок 5). В самом деле, хорошо известная традиционная закономерность такова: с ростом прочности, как правило, идет вязко-хрупкий (В→Х) переход, т.е. неуклонное снижение пластичности (см. штрихпунктирную линию для ADI); другими словами, происходит охрупчивание металла. Для ВЧТГ закономерность иная – противоположная: с ростом прочности металл теряет хрупкость, поскольку идет хрупко-вязкий (Х→В) переход, т.е. его пластичность повышается (см. массив точек, разброс которых обусловлен разными режимами термообработки материала).

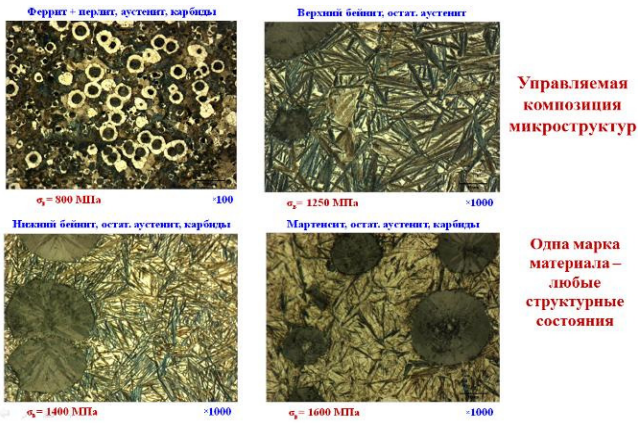
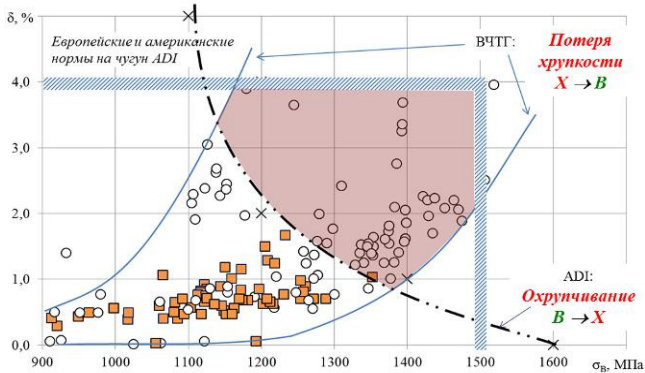


Рисунок 4 – Основные структурные состояния материала «МОНИКА»

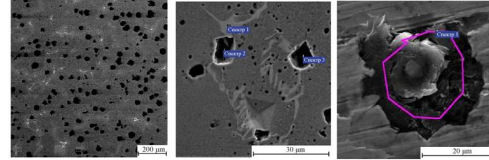
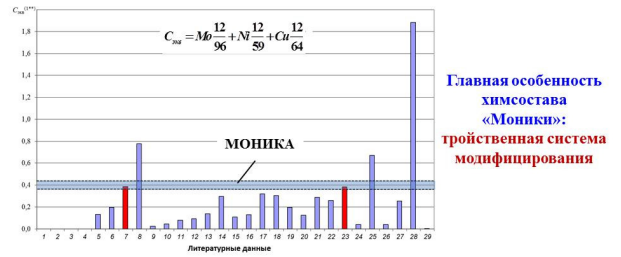


Уникальная закономерность: рост прочности ведет к повышению пластичности

Рисунок 5 – Материал «МОНИКА»: диаграмма прочность – пластичность

В первом приближении причина этого неожиданного поведения ВЧТГ является оригинальный химический состав с оригинальным соотношениям (и уровнями) его углеродного эквивалента (рисунок 6) по трем модифицирующим элементам: молибдену (Mo), никелю (Ni) и меди (Cu). В этой связи чугун ВЧТГ назван новым конструкционным материалом МОНИКА (сталистый высокопрочный чугун с шаровидным графитом). Здесь слову *сталистый* придается смысл *пластичный* (как сталь). Заметим, что в прошлом веке сталистым называли обыкновенный серый чугун с уменьшенным содержанием углерода, получаемого за счет добавления стали в расплав. Добавим, что исследования показали (см. рисунок 6 внизу), что при некоторых состояниях в структуре МОНИКИ обнаруживается характерный молибденовый каркас (см. белые пятна – поля); это дает основание думать, что мы имеем дело со своеобразным молибденовым сплавом. По-видимому, и это обстоятельство

обуславливает тот факт, что диаграмма прочность – пластичность МОНИКИ (ВЧТГ) необычна (см. рисунок 5).



Наномеханизмы формирования молибденового сплава

ИТМО НАНБ

Рисунок 6 – Углеродный эквивалент по трем элементам: Ni-Mo-Cu и молибденовый каркас в структуре материала «МОНИКА»

Конечно, особый интерес представляют служебные характеристики нового конструкционного материала, а именно сопротивление механической и контактной усталости. Именно эти характеристики в значительной мере определяют эксплуатационную работоспособность системы колесо / рельс, особенно в условиях тяжеловесного движения. На рисунке 7 представлены необходимые результаты экспериментов. Видно, что по сопротивлению усталости МОНИКА практически не уступает известным зарубежным аналогам – стали и чугуну.

Материал	Предел выносливости, МПа	
	при контактной нагрузке, p_f	при изгибе с вращением, σ_{-1}
ЧГУ УН с шаровидным графитом (ISO 6336-5:2003(E))	625	229
Легированная термоупрочненная СТАЛЬ (ISO 6336-5:2003(E))	915	337
Материал «МОНИКА» (плавка № 25)	975	290

Сопротивление усталости «МОНИКИ»: по контактной выносливости – превосходит известные материалы, по изгибной усталости – превосходит современные чугуны и приближается к термоупрочненной стали

Рисунок 7 – «МОНИКА» и сталь: служебные свойства

Обобщая, можно сформулировать следующие инновационные особенности и достоинства МОНИКИ как конструкционного материала:

1 Химический состав: оригинальная тройственная система модифицирования

(Mo-Ni-Cu) + (наномеханизмы) Молибденовый сплав?

2 Управляемая композиция микроструктур

Перлит / Феррит

Бейнит (H, B) / Мартенсит => Композиции

3 Нетрадиционная взаимосвязь основных свойств:

прочность – пластичность – твердость

4 Уникальный комплекс механических (твердость, прочность, пластичность, трещиностойкость), служебных (сопротивление механической и контактной усталости, износостойкость), технологических (жидкотекучесть, обрабатываемость и др.) и эксплуатационных (гашение вибрации и резонансных колебаний, самосмазываемость, теплопроводность и др.) свойств.

Таким образом, выполненный комплекс экспериментальных исследований убедительно показал, что новый конструкционный материал МОНИКА вполне соответствует (по механическим и служебным свойствам, а также микроструктурному состоянию) современным термоупрочненным сталям, в том числе и рельсовым. На рисунке 8 представлено сопоставление требований к механическим свойствам рельсовой стали и МОНИКИ по соответствующим (российскому и белорусскому) стандартам. Видно: МОНИКА может (и, по нашему мнению, должна) быть достойным конкурентом рельсовой стали.

Прочность рельсовой стали
ГОСТ Р 51685 – 2013 г.

Категория рельсов	Не менее	
	Временное сопротивление, $\sigma_{0.2}$, МПа	Твердость на поверхности катания, НРС
ОТЗ70НК	1280	40–44
ДТЗ70НК		
ОТЗ50		
ОТЗ50НН		
ОТЗ50СС	1180	38–43
ДТЗ50		
ДТЗ50НН		
ДТЗ50СС		
ДТЗ50ВС	1080	–
НТЗ20		
НТЗ20ВС		
НТЗ00		
НТЗ60	980	–
НТЗ60	900	–

Несколько марок стали

Прочность сплава МОНИКА
СТП 315-647-2013

Марка чугуна	Временное сопротивление, $\sigma_{0.2}$, МПа	Твердость, НРС ± 5
ВЧТГ-900	900	50
ВЧТГ-1000	1000	48
ВЧТГ-1100	1100	46
ВЧТГ-1200	1200	45
ВЧТГ-1400	1400	44

Одна марка ВЧТГ (МОНИКА)

Рисунок 8 – Механические свойства рельсовой стали и «МОНИКИ»

В этой связи была разработана специальная опытная технология литья натуральных рельсов из МОНИКИ сначала длиной 0,5 м (рисунок 9). Особая трудность отливки определялась (как было отмечено выше) тем, что сечение современного рельса не соответствует основному требованию к отливке, поскольку имеет резкие изменения (в несколько раз) соседних размеров сечения (см. на рисунке 9 профили сечений рельсов). Еще одна трудность: толщина стойки рельса Р65 (18 мм) близка к допустимой (предельной) малой толщине отливки (~10...12 мм), при этом протяженность этой стойки огромна (6,5 м). Тем не менее, указанные трудности удалось преодолеть и в условиях опытного производства отлить три рельса Р65 длиной по 6,5 м каждый (см. рисунок 9). Кроме того, были отлиты отрезки рельсов Р65 100 см. Результаты испытаний на изгиб натурального чугунного рельса показали (рисунок 10), что его конструкционная прочность составляет ~975 МПа – как и для нетермообработанного стального рельса (~900 МПа). Важно заметить, что чугунный рельс сломался штатно – на две части, а не «разлетелся» на много кусков, как кое-кто ожидал (ввиду «недостатка» пластичности).

Результаты натуральных испытаний рельсов в условиях эксплуатации (см. рисунок 10) показали, что литые рельсы из МОНИКИ могут быть достойным конкурентом стальных рельсов, полученных методом прокатки. В первом приближении эффективность нашего предложения иллюстрирует рисунок 11. А для Республики Беларусь ее можно охарактеризовать конкретными цифрами (рисунок 12). Но, конечно, здесь возникает серьезная технологическая проблема изготовления качественных рельсов из МОНИКИ длиной 25 м. Ее воз-

можное решение (в первом приближении) представлено на рисунке 13. Как видно, это вполне реалистичная технология.

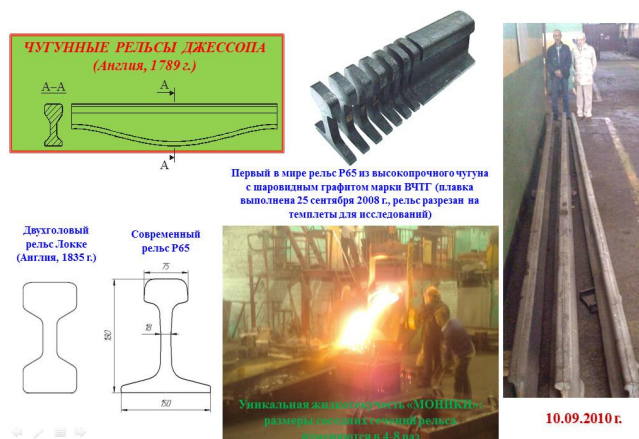


Рисунок 9 – Первые рельсы из материала МОНИКА длиной 6,5 м (Hi-Tech)

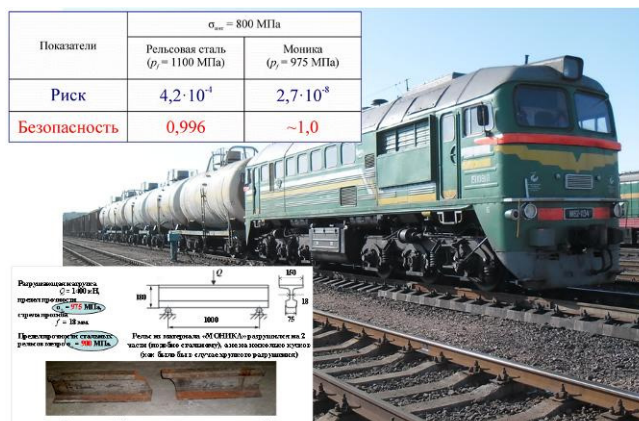


Рисунок 10 – Поезд идет по новым рельсам (вес 3000 т)



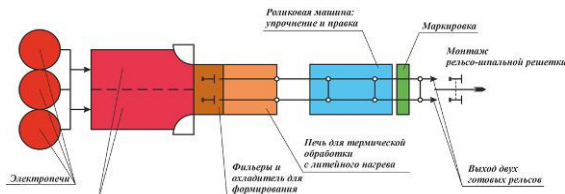
Рисунок 11 – Прокатный стан и литейный завод для производства рельсов: конкурентоспособность

2 Оптимизация системы колесо / рельс для тяжеловесного движения. Итак, мы кратко охарактеризовали наше первое предложение (см. рисунок 2). Обратимся далее ко второму предложению – постановке и решению задачи оптимизации системы колесо / рельс для тяжеловесного движения. Раскрыть поставленную задачу в краткой статье невозможно, поэтому дадим лишь тезисное изложение ее основных моментов.

Республика Беларусь	Импортозамещение:	<ul style="list-style-type: none"> экономия более 35 млн \$ ежегодно; создание нескольких сот (а в перспективе тысяч) новых рабочих мест.
Потребители, в том числе БЧ	Экономия при закупке новых рельсов:	<ul style="list-style-type: none"> ~30-50% от стоимости стальных рельсов; ~50-70% транспортных расходов.

Возможные первые заказчики и потребители рельсов
БЕЛАРУСЬ, РОССИЯ, КИТАЙ

Рисунок 12 – Литые рельсы из «МОНИКА»: эксплуатационная эффективность



- Особенности:**
1. Термообработка, упрочнение и правка с литым нагревом.
 2. Риск изготовления практически отсутствует, т.к. предусматривается использование установки для изготовления **блоков общестроительского назначения** (простоно, вальше, криль, др.) и **таких общестроительных деталей широкой номенклатуры** (убийные колеса, гильзы, вулканы и т.д.).
 3. Установка может быть **многопозиционной**, что повышает ее производительность в 3-5 раз.
- Стоимость установки ~50 млн. долларов США, что примерно в 20 раз меньше стоимости рельсостанка (более 900 млн. долларов США)

Рисунок 13 – Эскиз установки для непрерывного горизонтального литья рельсов (Hi-Tech)

Реально при эксплуатации системы колесо / рельс работает лишь ~10 % контактной поверхности (рисунок 14), поэтому предлагается увеличить площадь контакта (на 15–20 %) и, следовательно, уменьшить наибольшее контактное давление p_0 , а также интенсивность напряжений (σ_{int}) в контакте. Иллюстративный пример на этом рисунке (см. рисунок 14) показывает: если p_0 уменьшить примерно на 17 %, то контактная долговечность может возрасти в десятки и даже сотни раз. А дополнительно, следуя предложению В. А. Гапановича, можно увеличить диаметр D_k колеса. Тогда, согласно верхнему рисунку (рисунок 15), получаем уменьшение p_0 дополнительно на ~14 %. Наконец, следует усовершенствовать геометрию контактирующих элементов путем перехода от традиционного контакта цилиндра (с изменяющейся кривизной) в сечении головки рельса / усеченный конус (колесо) со взаимно перпендикулярными осями к новому контакту цилиндр (рельс) / конус с вогнутой поверхностью (колесо). Это приводит к дополнительному снижению давления до 30 % (см. рисунок 15). Все это означает, что при тяжеловесном движении нагрузку на ось можно повышать до 0,26–0,29 кН, не снижая несущую способность оптимальной системы колесо / рельс.

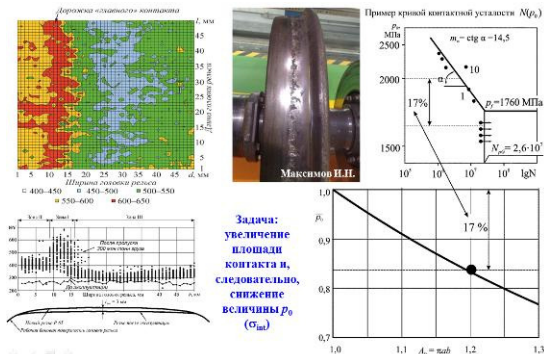


Рисунок 14 – О работе системы колесо / рельс

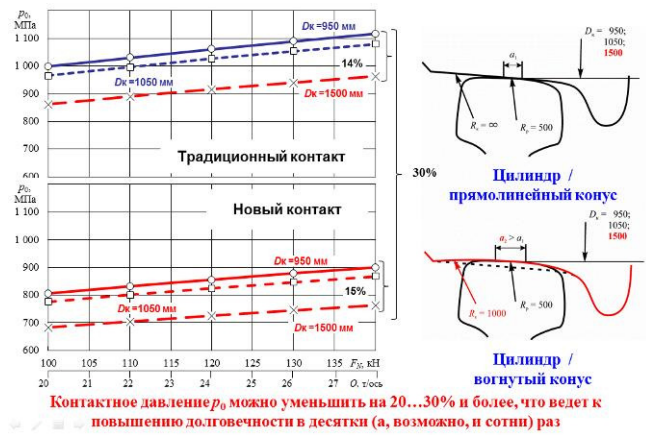


Рисунок 15 – К задаче оптимизации контакта

Комплекс проведенных теоретических исследований показал, что применение материала МОНИКА для изготовления колеса или рельса приводит к новым и дополнительным положительным эффектам. Так, интенсивность напряжений (σ_{int}) снижается до 8 %, повреждаемость (V_{int}) – до 45 %, при этом обеспечивается самосмазываемость системы (рисунок 17). Все это приводит к тому, что ее износ уменьшается в 1,5 и более раз (рисунок 18); обобщенный результат – повышенная безопасность (см. рисунок 16).

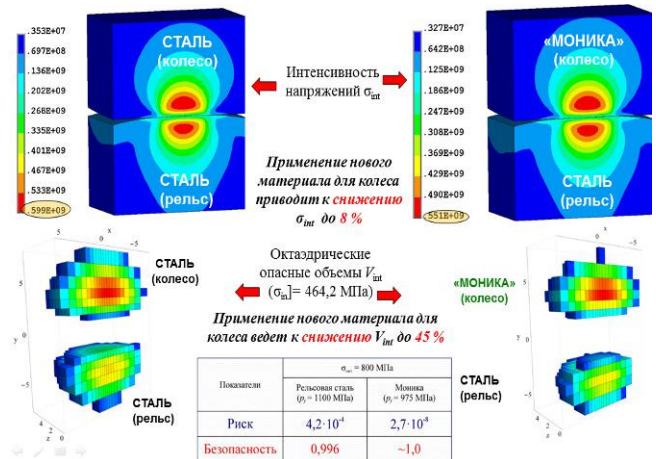


Рисунок 16 – Трибофатическая система колесо / рельс: интенсивность напряжений σ_{int} , повреждаемость V_{int} и безопасность S_p

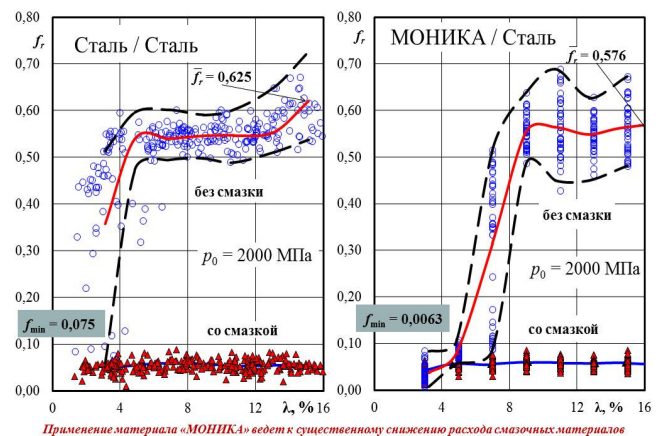


Рисунок 17 – Самосмазываемость в паре трения с новым материалом



Рисунок 20 – Испытательные центры СИ

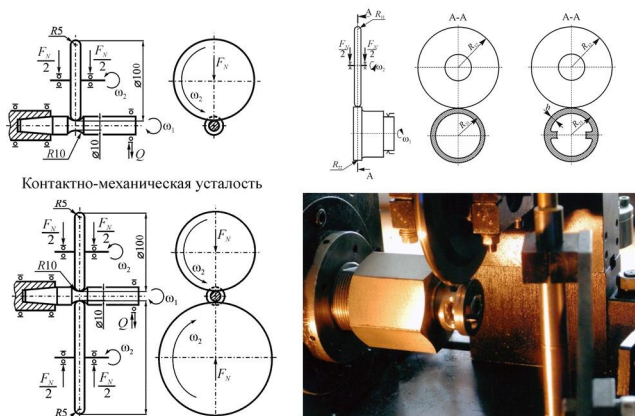


Рисунок 21 – Моделирование системы колесо / рельс для лабораторных исследований

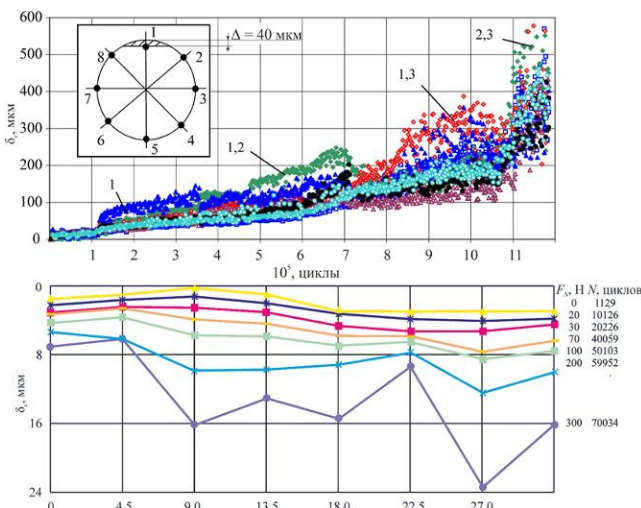


Рисунок 22 – Пример экспериментальных исследований: явление тропки

Вносятся следующие предложения:

- разработать проект и изготовить опытно-промышленную установку для горизонтального литья рельсов Р65 длиной не менее 25 м, при этом установка должна быть многоцелевой (см. рисунок 13);
- провести комплекс НИОКР по научно-техническому обеспечению проекта;
- изготовить опытную партию рельсов Р65 из «Моники» длиной 25 м и провести их испытания в соответствии с действующим (для стальных рельсов) ГОСТ Р

51685–2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия»;

- дать приближенную экономическую оценку Hi-Tech «Литые рельсы», исходя из их производства как для собственных нужд, так и на экспорт;
- разработать механико-математическую модель оптимизации системы колесо / рельс в связи с ростом нагрузок и дать ее экспериментальное обоснование (на основе совершенствования геометрии контакта, изменения диаметра колеса и применения нового конструкционного материала «МОНИКА» для его изготовления).

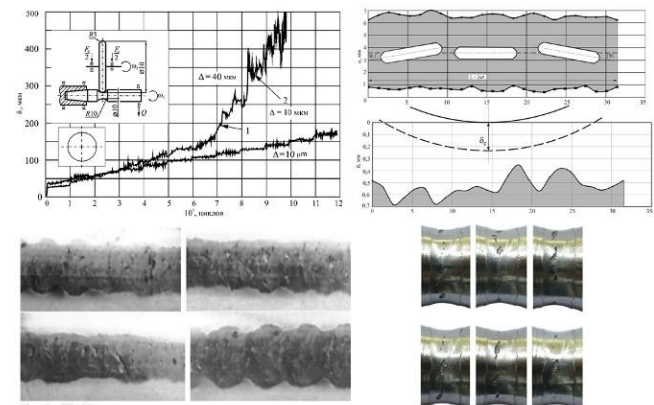


Рисунок 23 – Воспроизведение нерегулярных волнообразных повреждений в лабораторных условиях

Предлагается объединить усилия специалистов ОАО «РЖД» и Республики Беларусь (на самом высоком уровне) и сосредоточить соответствующие средства для реализации двух предложений:

- Hi-Tech: литые рельсы;
- ноу-хау: оптимизация системы колесо / рельс.

Список литературы

- 1 Sosnovskiy, L. A. Special Class of Contact Problems and the Calculation of the State of Stress of Wheel / Rail System Elements (CM105) / L. A. Sosnovskiy, S. S. Sherbakov // Proc. of the 7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail / Wheel Systems (Brisbane, Australia, Sept. 24–27, 2006). – Brisbane, 2006. – V. 1. – P. 93–104.
- 2 Железнодорожные рельсы из высокопрочного чугуна. Постановка проблемы / Л. А. Сосновский [и др.] // Комплексная система содержания инфраструктуры ОАО «РЖД»: материалы науч.-практ. конф., 28 окт. 2009 г. – М.: ОАО «РЖД», 2009. – С. 74–78.
- 3 Sherbakov, S. S. Stress–Strain State and Damage of the Mutelement System with Complex Contact Interactions Between its Elements / S. S. Sherbakov, L. A. Sosnovskiy // Proceedings of the World Tribology Congress V (Torino, Sept. 8–13, 2013). – Torino, 2013. – 4 p.
- 4 Gapanovich, V. A. What Must Surface Hardness of Rails Be? / V. A. Gapanovich, L. A. Sosnovskiy // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 179–186.
- 5 Rail Corrugation: Experiment and Theory / L. A. Sosnovskiy [et al.] // ICEM-15. Experimental Mechanics. New Trends and Perspectives: proceedings of the 15th International Conference on Experimental Mechanics (Porto, Portugal, July 22–27, 2012) / editors: J. F. Silva Gomes, Mario A. P. Vaz. – Porto: Edicoes INEGI, 2012. – P. 889–890.

6 Железнодорожные рельсы из высокопрочного чугуна. Постановка проблемы / Л. А. Сосновский [и др.] // Комплексная система содержания инфраструктуры ОАО «РЖД»: материалы науч.-практ. конф., 28 окт. 2009 г. – М.: ОАО «РЖД», 2009. – С. 74–78.

7 Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как конкурент упрочненной стали / В. А. Жмайлик [и др.] // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 73–77.

8 Структура и свойства специального высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В. О. Замятнин [и др.] // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 79–84.

9 О перспективности изготовления железнодорожных рельсов из высокопрочного чугуна / В. И. Сенько [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте: тез. докл. V Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 25–26 нояб. 2010 г. – Гомель: БелГУТ, 2010. – С. 199–200.

10 Тюрин, С. А. Методические особенности оценки основных механических свойств высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / С. А. Тюрин, П. С. Дробышевский, М. С. Василенко // Механика-2011: материалы V Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике, Минск, 26–28 окт. 2011 г. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2011. – Т. II. – С. 92–96.

11 Таранова, Е. С. Экспериментальная ускоренная оценка сопротивления усталости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / Е. С. Таранова, С. А. Тюрин // Междунар. сб. науч. тр. – Вып. 6 / под ред. А. О. Шимановского. – Гомель, 2012. – С. 139–148.

12 Тюрин, С. А. Контактная усталость высокопрочного чугуна с шаровидным графитом: ускоренные испытания / С. А. Тюрин, Е. С. Таранова // Междунар. сб. науч. тр. –

Вып. 6 / под ред. А. О. Шимановского. – Гомель, 2012. – С. 153–162.

13 Сосновский, Л. А. Об изготовлении железнодорожных рельсов из высокопрочного чугуна / Л. А. Сосновский, В. И. Матвеев, Н. В. Псырков // Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава: тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию профессора М. А. Фришмана, Днепропетровск, 18–20 сент. 2013 г. – Днепропетровск: Изд-во Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, 2013. – С. 54–55.

14 Сталь и чугун: конкуренция продолжается в области высокопрочных состояний / Л. А. Сосновский [и др.] // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения: тр. Междунар. конф., посвященной 75-летию Института машиноведения им. А. А. Благодирова РАН, 21–22 нояб. 2013 г. – М.: ИМАШ РАН им. А. А. Благодирова, 2013. – С. 99.

15 Матвеев, В. И. Опыт изготовления и испытаний рельсов длиной 6,5 м из специального чугуна / В. И. Матвеев, Н. Е. Мирошников // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. – Вып. 2. – Минск: ОИМ НАНБ, 2013. – С. 405–407.

16 Экспериментальное построение полной кривой контактной усталости пары «высокопрочный чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ» и ее анализ / Л. А. Сосновский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 1 (26). – С. 32–39.

17 Матвеев, В. И. Натурные испытания тяжелых железнодорожных рельсов из чугуна ВЧТГ / В. И. Матвеев, Н. Е. Мирошников, Л. А. Сосновский // Живучесть и конструкционное материаловедение: тез. докл. 2-й Междунар. конф. SSMS-2014, Москва, 21–23 окт. 2014 г. – Москва: ИМАШ РАН им. А. А. Благодирова, 2014. – С. 41.

18 Чугун и сталь в трибофатических системах современных машин и оборудования / Л. А. Сосновский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 4 (29). – С. 5–20.

Получено 30.04.2016

L. A. Sosnovskiy, V. A. Gapanovich, V. I. Senko, V. I. Matvetsov, S. S. Sherbakov, V. V. Komissarov. Tribofatigue system wheel / rail for heavy movement: increasing workload and... reduce costs?

An attempt was made in the first approximation to justify and formulate the problem of multi-criteria optimization system wheel / rail in relation to the movement of heavy.