

МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 669.13.018; 669.131.7

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры «Локомотивы»
E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 07.07.2022.

О ВЫБОРЕ СОВРЕМЕННОГО КОНСТРУКЦИОННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ. ЧАСТЬ 2

Показано, что при решении проблем обеспечения качества, надежности, конкурентоспособности механических систем ответственного назначения фундаментальное значение имеет металл, комплекс его механических и служебных свойств. Сталистый чугун МОНИКА (Mo–Ni–Cu) (патент ВУ 15617) обнаруживает нетрадиционную и уникальную способность терять хрупкость (повышать вязкость) с ростом прочности. По служебным свойствам он не уступает легированным термоупрочненным сталям. Это позволяет рекомендовать его для изготовления многих и разных высоконагруженных деталей и узлов современной техники. В статье приведено несколько примеров эффективного применения МОНИКИ для изготовления литых ножей режущие-измельчающих аппаратов кормоуборочных комбайнов (Hi-Tech), крупногабаритных зубчатых колес диаметром 500 мм для бортовых редукторов сельскохозяйственных комбайнов (ноу-хау), а также опытных литых рельсов для железнодорожного транспорта (Hi-Tech). Комплексом лабораторных и натурных испытаний убедительно доказано, что одна марка нового конструкционного материала вполне обеспечивает требуемую эксплуатационную надежность разных трибофатических систем, работоспособность которых определяется многими критериями (усталость, износ, трение, трещиностойкость и др.) при действии высоких повторно-переменных и ударно-циклических нагрузок. Это обуславливает безусловную экономичность и конкурентоспособность механических систем ответственного назначения (трибофатических систем) для современных машин и оборудования.

Ключевые слова: металл; механические и служебные свойства; пределы прочности, усталости, трещиностойкости; износостойкость; напряженно-деформированное и предельное состояния; модифицирование; микроструктура; МОНИКА

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-86-96>

Окончание № 3(60) 2022.

МОНИКА для конструктивных элементов трибофатических систем (ТФС). Приведем здесь несколько примеров.

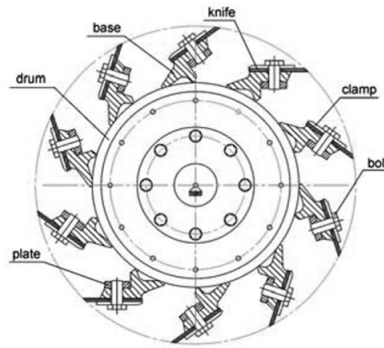
Hi-Tech: литые ножи для ТФС «нож — прижим — болты — основание» («нож — противорежущий брус — основание») [1–4]. Более 20 лет ОАО «Гомсельмаш» не могло решить проблему изготовления ножей для режущих аппаратов кормоуборочных комбайнов (рисунок 1): ножи работают

в крайне тяжелых условиях (высокие контактные и изгибные ударные циклические нагрузки и активная органическая масса в качестве среды). Решение проблемы было единственно возможным: импорт ножей, изготавливаемых из качественной стали; на режущую кромку ножей нанести (специальная технология) твердосплавное покрытие.

Для изготовления ножей методом литья было решено применить новый материал МОНИКА.



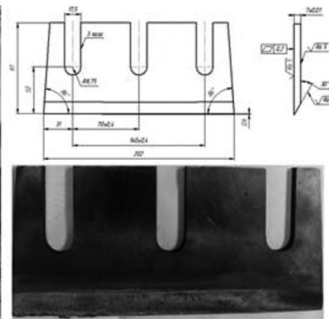
ПОКАЗАТЕЛЬ	ЗНАЧЕНИЕ
Мощность двигателя, л.с.	450
Производительность, т/ч	155
Скорость движения, км/ч	20
Масса, кг	11 000
Габариты, мм	8 200 x 3 650 x 4 000



a

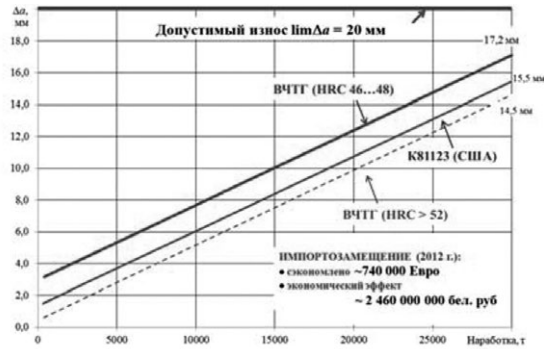


Режущий барабан комбайна КВК-800



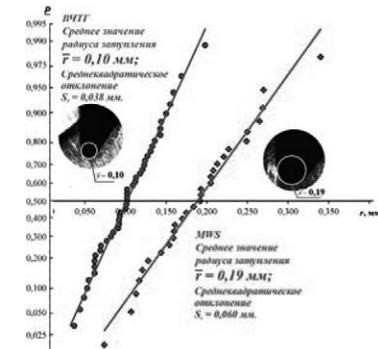
Нож режущего барабана

b

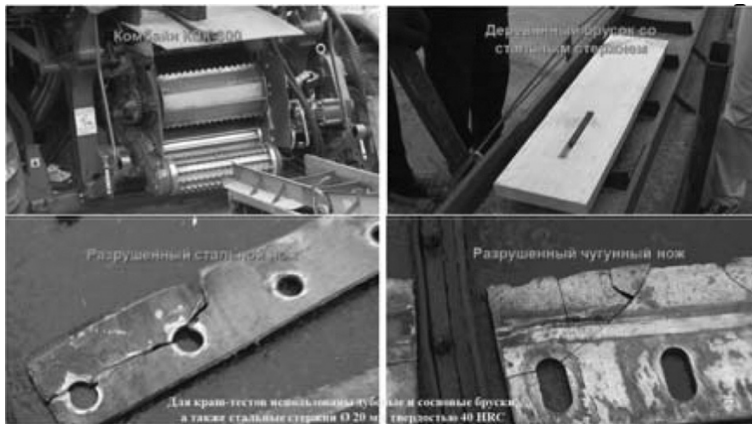


Оценка уменьшения ширины (износ + заточка) режущей кромки ножей из чугуна ВЧТГ в зависимости от наработки, построенная по результатам эксплуатационных испытаний

c



d



e

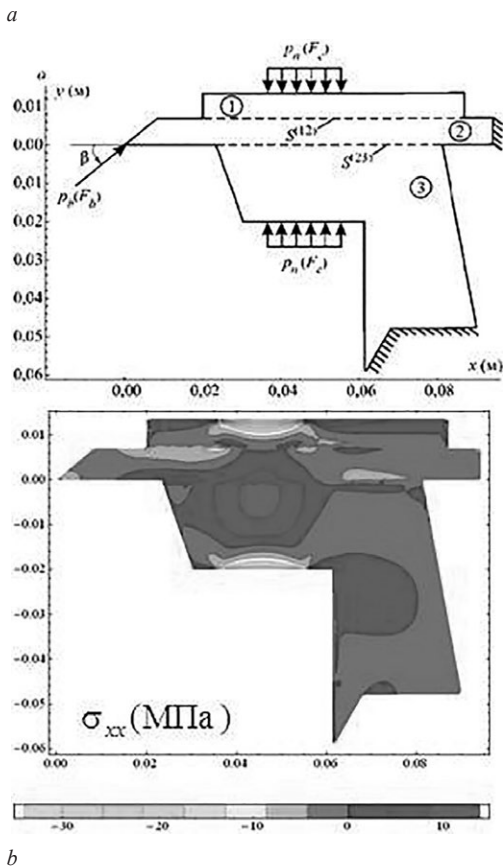
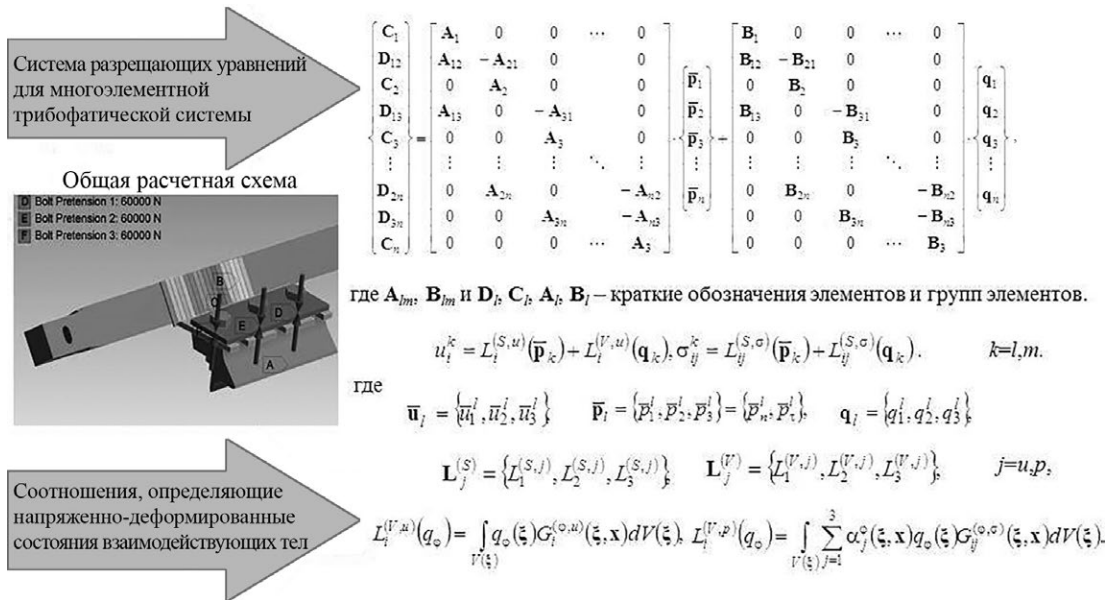
Рисунок 1 — Hi-Tech: литые ножи: a — режущий барабан кормоуборочного комбайна КВК-800; b — режуще-измельчающий аппарат и ножи комбайна КВК-800; c — эксплуатационная стойкость литых чугунных и стальных ножей; d — эмпирические функции изменения радиуса режущей кромки ножей; e — краш-тесты чугунных и стальных ножей

Figure 1 — Hi-Tech: cast knives: a — cutting drum of the KVK-800 forage harvester; b — cutting and grinding machine and knives of the KVK-800 harvester; c — operational durability of cast iron and steel knives; d — empirical functions of changing the radius of the cutting edge of knives; e — crash tests of cast iron and steel knives

Основные результаты представлены на рисунке 1. Видно, что по двум важнейшим критериям работоспособности — износу и затупляемости режущей кромки — чугунные ножи не хуже импортных. Задача импортозамещения была в принципе решена. Экономический эффект приведен на рисунке 1 по официальным данным ОАО «Гомсельмаш». В результате краш-тестов чугунных и стальных ножей (см. рисунок 1 е) происходит изгиб кромки

стальных ножей, что ведет, как правило, к отделению их крупных фрагментов и далее к разрушению всего режущего аппарата. При работе чугунных ножей их изгиб не инициируется — возникает только локальное хрупкое разрушение (отделение) относительно мелких кусочков, которые безопасно проходят режущий аппарат и уносятся в почву.

Механико-математическое моделирование (рисунок 2) повреждаемости трибофатической систе-



Формула для расчета повреждаемости — опасных объемов

$$V_{\text{int}} = \int_{\sigma_{\text{int}} / \sigma_{\text{int}}^{\text{(lim)}}(V) \geq 1} dV$$

Кумулятивные опасные объемы во времени

$$4SS: \int_{t_0}^T V_{IV} dt = 4,735 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 \cdot \text{мкс}$$

$$4SI: \int_{t_0}^T V_{IV} dt = 3,261 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 \cdot \text{мкс}$$

4SI: нож из Моники, брус из стали:

$$\sigma_{IV}^{\text{(lim)}} = 26 \text{ МПа}; \quad V_{IV} = 1604 \text{ мм}^3; \quad t = 330 \text{ мкс}$$

4SS: нож и брус из стали:

$$\sigma_{IV}^{\text{(lim)}} = 26 \text{ МПа}; \quad V_{IV} = 2121 \text{ мм}^3; \quad t = 330 \text{ мкс}$$

Рисунок 2 — Механико-математическая модель ТФС:

a — алгоритм; b — расчетная схема и напряжения в двумерной постановке; c — повреждаемость ножа и бруса

Figure 2 — Mechanical and mathematical model of a tribo-fatigue system:

a — algorithm; b — calculation scheme and stresses in two-dimensional formulation; c — damage to the knife and beam

мы показало, что наиболее эффективной парой является «чугун (нож) — сталь (противорежущий брус)»; другие возможные комбинации («сталь — сталь» либо «чугун — чугун») менее работоспособны: повреждаемость различается на 25...30 %.

Нотация: ТФС зубчатого зацепления [1, 5–8]. В связи с проблемой получения поковок крупногабаритных (эпициклических) зубчатых колес (диаметр ~500 мм, рисунок 3 а) для бортовых редукторов сельскохозяйственных комбайнов была поставлена задача их отливки из МОНИКИ.

Результаты сравнительных испытаний серийных стальных и опытных чугунных зубчатых колес, которые были установлены и работали одновременно (с левой и правой сторон) на каждом комбайне, показаны на рисунках 3 б, с. По данным ОАО «Гомсельмаш», цена одной шестерни, изготовленной из стальной поковки, при крупносерийном производстве составляет ~62 евро, а цена одной опытной шестерни, изготовленной из материала МОНИКА методом литья, при индивидуальном производстве составляет ~48 евро (ниже более чем на 20 %). Расчеты на прочность показали, что зубчатые колеса из МОНИКИ имеют коэффициенты запаса при механической и контактной усталости, равные 2,0 и 2,6. Вывод однозначен: крупногабаритные зубчатые колеса из МОНИКИ дешевле и надежнее, чем стальные. При этом переход от стали на МОНИКУ обеспечивает снижение шума примерно на 20 %.

Ni-Tech: литые рельсы для ТФС «колесо — рельс» [1, 9–13]. Для подтверждения особых свойств нового материала МОНИКА в конструкциях поставлена и решена беспрецедентная задача: Ni-Tech «Литые рельсы» (рисунок 4). Как известно, более 150 лет рельсы изготавливают методом прокатки из качественной высокопрочной стали. При этом стоимость современного прокатного стана достигает 1 млрд долл. США. Вопрос об изготовлении рельсов методом литья даже не возникал. Никакой другой известный в течение этого времени материал не мог быть предложен для решения столь уникальной, особо ответственной и экономически высокоэффективной задачи: альтернативы для стали просто не было. Рельсы, изготовленные методом литья, термообработке не подвергались.

ОАО «Гомсельмаш» и ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» разработали технологию литья рельсов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом и высоким сопротивлением усталости ВЧТГ (МОНИКА) [14–16]. По данной технологии 24 августа 2008 г. был отлит первый рельс Р65 (см. рисунок 4 а).

По разрешению Гомельского отделения Белорусской железной дороги в 2012–2014 гг. во все сезоны года была проведена плановая эксплуатация опытной партии рельсов Р65 из ВЧТГ на путях организованного движения поездов (см. рисунок 4 б). После эксплуатационных испытаний рельсы были демонтированы для изучения. Установлено: верти-

кальный и боковой износ головок рельсов отсутствовал, дополнительных трудностей в процессе эксплуатации в зимний и летний периоды не возникло, общий вид и состояние рельсов нормальное, рельсы можно повторно укладывать и эксплуатировать в действующем участке пути.

Согласно расчетам, износостойкость литых чугунных рельсов примерно в 1,5 раза выше, чем стальных, в одинаковых условиях работы. Это объясняется особыми свойствами чугуна (само-смазываемость, способность гасить вибрации).

Таким образом, результаты натурных испытаний рельсов в условиях эксплуатации показали, что литые рельсы из МОНИКИ могут быть достойным конкурентом стальным рельсам, полученным методом прокатки. Расчетная оценка риска и безопасности эксплуатации чугунных рельсов подкрепила и этот вывод (см. рисунок 4 б).

Разработана механико-математическая модель (рисунок 5) трибофатической системы «колесо (сталь) — рельс (МОНИКА)». Комплекс проведенных теоретических исследований показал, что применение материала МОНИКА для изготовления колеса или рельса приводит к новым и дополнительным положительным эффектам. Так, интенсивность напряжений снижается до 8 %, повреждаемость — до 45 %, при этом обеспечивается самосмазываемость системы. Подтверждено, что прогнозируемый износ данной пары приблизительно в 1,5 раза меньше, чем традиционной пары «сталь — сталь» (в одинаковых условиях эксплуатации).

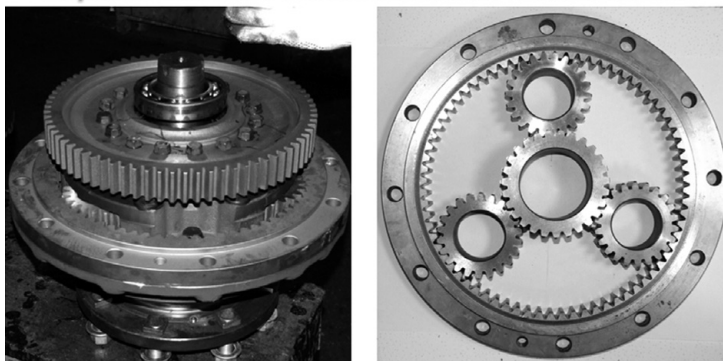
Необходимо подчеркнуть, что при отливке опытных отрезков рельсов Р65 установлены уникальные технологические (литейные) свойства МОНИКИ: изготовлен элемент конструкции, для которого характерно резкое изменение размеров соседних поперечных сечений (от 150 до 18 мм, т. е. в 8 раз), при этом шейка рельса имеет длину 6,5 м при сечении 18×150 мм. Время заполнения формы составило всего несколько секунд — и никаких усадочных раковин (или несплошностей) не обнаружено.

С целью крупнотоннажного производства необходимо создать уникальную установку и технологию непрерывного горизонтального литья железнодорожных рельсов. Предполагается многоцелевое применение такой установки (например, для изготовления длинноразмерных профилей общетехнического назначения).

Некоторые направления дальнейших НИОКР. Исходя из вышеизложенного, можно предложить несколько актуальных работ.

Во-первых, создать и утвердить в установленном порядке республиканский нормированный документ по методам расчета ТФС общемашиностроительного назначения, например коленчатых валов, с учетом того, что для коренной шейки характерно комплексное износоусталостное повреждение. Основу такого документа может составить комплекс наших работ. Желательно, чтобы

Разработка ООО «НПО ТРИБОФАТИКА и ПО «ГОМСЕЛЬМАШ»



a



b

Комплекс высокопроизводительный кормоуборочный КВК-800 (№ 751)
Сравнение эксплуатационных повреждений зубьев эпицикла из МОНИКИ (а, в) и стали (б, г) после наработки 444 часов (1 сезон работы)

Результаты исследования нового и отработанного смазочного материала

Характеристика	До эксплуатации	После эксплуатации		Сравнение отработанных масел
	Новое масло	Эпицикл из МОНИКИ	Стальной эпицикл	
Содержание мех. примесей	0,006 (отс)	0,22	0,63	в 3,5 раза меньше в редукторе с чугунной шестерней

По данным ПЭУ ПО «ГОМСЕЛЬМАШ», цена одной шестерни, изготовленной из стальной поковки, при крупносерийном производстве составляет 677853 бел. руб., а цена одной опытной шестерни, изготовленной из МОНИКИ методом литья, при индивидуальном производстве составляет 527000 бел. руб. (снижение цены более чем на 20 %) [2012 г.].

Оценка долговечности по методике И.С. Цитовича: шестерня из МОНИКИ имеет технический ресурс (~ 3,58 · 10⁸ км) не меньше ресурса стальных зубчатых колес

Тип комбайна	Номер машины	Сельхозпредприятие	Наработка в моточасах (годовая норма 330...400 моточасов)	Заготовка в тоннах
Комбайн зерноуборочный самоходный КЗС 1218	5738	КСУП Куритичи Петриковский р-н	310	844 (зеленой массы)
Комплекс высокопроизводительный кормоуборочный КВК 800	750	КСУП Куритичи Петриковский р-н	298	8196 (зеленой массы)
Комплекс высокопроизводительный кормоуборочный КВК 800	751	Криничное Мозырский р-н	444	12661 (кукурузы на силос)

За время эксплуатации бортовых редукторов в сельхозпредприятиях замечаний по работе крупногабаритных зубчатых колес из МОНИКИ не имеется, повреждений не обнаружено. Испытания будут продолжены в 2013 – 2014 гг.

c

Рисунок 3 — Эксплуатационная стойкость зубчатых зацеплений (ноу-хау):

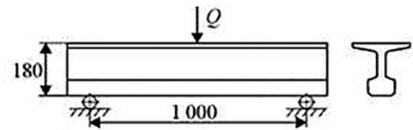
a — бортовой редуктор: литые зубчатые колеса диаметром 500 мм из материала МОНИКА; b — бортовой редуктор: результаты испытаний; c — эксплуатационные испытания литых зубчатых колес из МОНИКИ

Figure 3 — Operational resistance of gears (know-how): a — on-board gearbox: cast gears with a diameter of 500 mm made of MONICA material; b — on-board gearbox: test results; c — operational tests of cast gears made of MONICA



a

Разрушающая нагрузка
 $Q_b = 1400$ кН,
 предел прочности
 $\sigma_b = 975$ МПа,
 стрела прогиба
 $f_b = 18$ мм.
 Предел прочности стальных
 рельсов для метро
 $\sigma_b = 900$ МПа.



Чугунный рельс разрушился на 2 части (подобно стальному), а не на несколько кусков (как было бы в случае хрупкого разрушения)



b



c



d

Рисунок 4 — Испытания рельсов из чугуна ВЧТГ (МОНИКА): a — первый литой рельс; b — результаты испытания отрезка рельса Р65 на статический изгиб; c — поезд весом 3000 т идет по литым рельсам; d — вид дорожек качения в процессе эксплуатации (верхний ряд, слева направо: Абехтиков М.В. — старший мастер ЦЦЛ ОЛП «ГЗЛиН»; Салашный В.М. — начальник ЦЦЛ; Сосновский Л.А. — директор ООО НПО «ТРИБОФАТИКА»; Квитанов А.А. — директор ОЛП «ГЗЛиН»; Палазник С.М. — начальник технодела ОЛП «ГЗЛиН»; нижний ряд: Моисеенко Е.А. — технолог ОЛП «ГЗЛиН»)

Figure 4 — Tests of rails made of cast iron VChTG (MONICA): a — first cast rail; b — results of testing a piece of rail R65 for static bending; c — train weighing 3,000 t goes on cast rails; d — type of raceways in operation (top row, from left to right: Abekhtikov M.V. — senior master of the non-ferrous casting workshop of OLP “GZLiN”; Salashnyy V.M. — head of the non-ferrous casting workshop; Sosnovskiy L.A. — director of S&P GROUP TRIBOFATIGUE Ltd; Kvitinov A.A. — director of the OLP “GZLiN”; Palaznik S.M. — head of the technical department of the OLP “GZLiN”; bottom row: Moiseenko E.A. — technologist of the OLP “GZLiN”)

в разработке и согласовании такого документа приняли участие конструкторы ведущих белорусских машиностроительных заводов.

Во-вторых, создавая централизованное производство редукторов и трансмиссий, рационально построить на его базе литейный цех для выплавки и термообработки МОНИКИ. Это обеспечило бы создание зубчатых зацеплений современного технического уровня с перспективой конкурентоспособности (низкий шум, высокая контактная прочность, практически безызносность и, следовательно, требуемая эксплуатационная стойкость по важнейшим критериям надежности и безопасности при одновременном снижении затрат на производство и ремонт).

Что касается транспортного машиностроения, то тут следует особо указать проблему железнодорожных колес для грузовых вагонов и локомотивов.

В настоящее время на РЖД эксплуатируются цельнокатанные железнодорожные колеса, изготавливаемые (основной производитель АО ВМЗ) из заготовок на пресо-прокатных линиях методом поэтапного горячего деформирования,

включающего операции штамповки и прокатки по ГОСТ 10791-2011 [17]. В качестве конструкционного материала применяется углеродистая сталь. За рубежом (в странах Америки, Африки, в Китае и Индии) широко используются значительно более дешевые литые железнодорожные колеса в основном для грузового подвижного состава (компания Griffin Steel) [18], поскольку эксплуатационная надежность (следовательно безопасность) движения вагонов с литыми стальными колесами оказывается недостаточной для пассажирских перевозок. Литые стальные колеса, изготовленные на заводах Xinyang Amsted Tonghe Wheels Co Ltd (КНР), Amsted Rail (США) из стали марок AAR B и AAR C по стандарту AAR M-107/M-208 по химическому составу и основному механическому свойству (пределу прочности) пересекаются со стальными цельнокатанными колесами АО ВМЗ из сталей марки Т и марки 2 по [17] (таблица).

Сравнение их с составом и свойствами МОНИКИ (см. таблицу) показывает, что они различаются кардинально по химическому составу (углероду, молибдену, никелю, меди) и по важнейшим

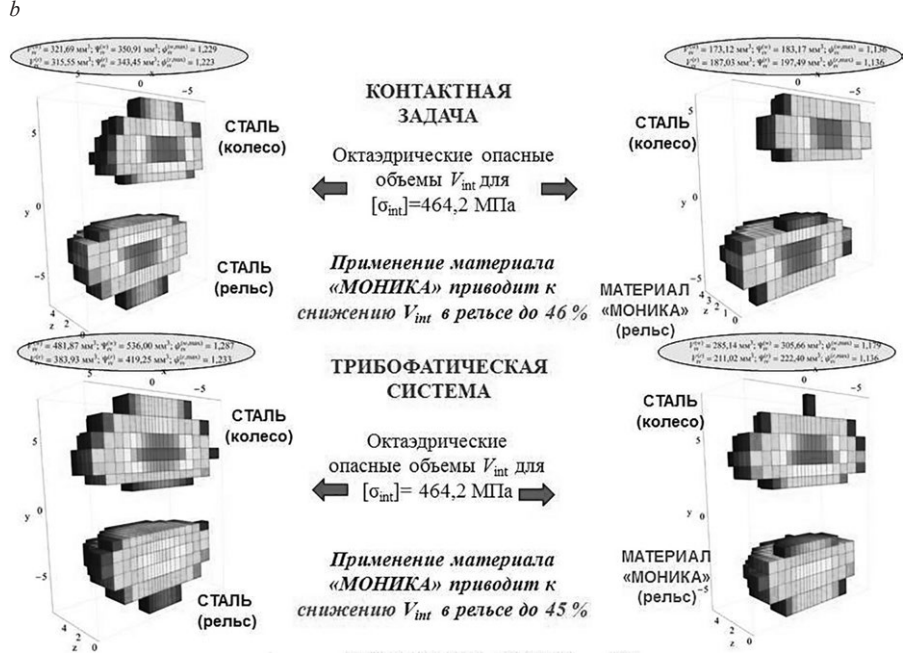
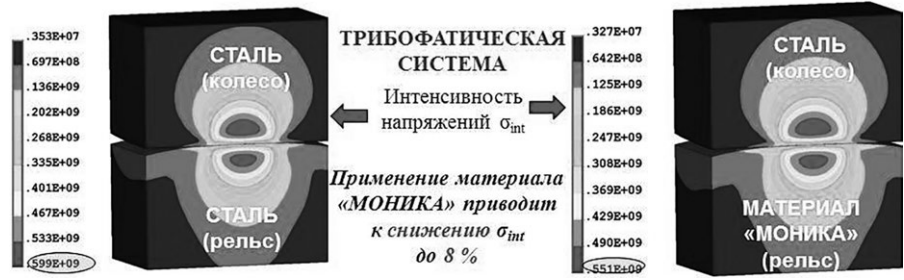
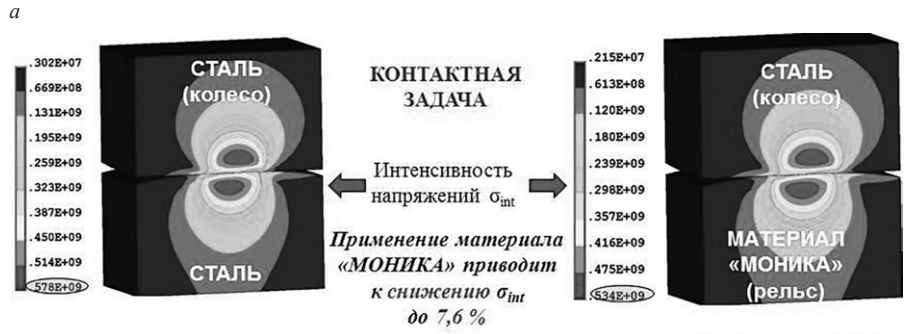
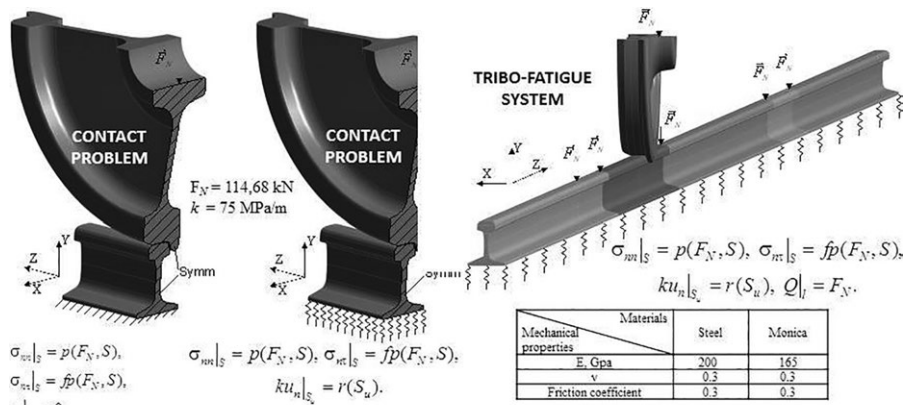


Рисунок 5 — Модель объемной повреждаемости системы «колесо — рельс» и результаты расчетов:
 a — граничные условия и конечно-элементные сетки моделей (контактное нагружение и изгиб рельса силами 114,7 кН с коэффициентом постели 75 МПа/м; b — интенсивность напряжений; c — объемная повреждаемость (износ)
 Figure 5 — Model of volumetric damage of the “wheel — rail” system and calculation results:
 a — boundary conditions and finite element grids of models (contact loading and bending of the rail by forces of 114.7 kN with a coefficient of subgrade reaction of 75 MPa/m); b — stress intensity; c — volumetric damage (wear)

Таблица — Сравнение состава и свойств металлов для литья и цельнокатанных колес
Table — Comparison of the composition and properties of metals for casting and all-rolled wheels

Состав и свойства	Литые колеса из сталей марок AAR B, AAR C по стандарту AAR M-107/M-208	Стальные катанные колеса по ГОСТ 10791-2011 из сталей марок Т и 2	Литые заготовки, в том числе рельсы из МОНИКИ
C, %	0,56–0,77	0,53–0,73	3,5–3,7
Mn, %	0,60–0,90	0,47–1,05	0,2–0,3
Cr, %	0,08–0,25	0,32–0,42	0,02–0,06
V, %	0,02–0,15	0,12–0,17	—
Al, %	0,027–0,06	—	—
Mo, %	0,001–0,100	0,08	0,4–0,6
Ni, %	0,03–0,25	0,32	0,5–0,6
Cu, %	0,03–0,35	0,33	1,1–1,3
Ti, %	≤ 0,005	< 0,003	0,01–0,02
σ_b , МПа	1120–1570	910–1229	1200–1400
K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	47–60	min 50	69–74
Твердость	HB334	HB311	HRC (43–52)
Микроструктура	перлитно-ферритная (сорбитообразный перлит с разорванной сеткой)		смесь верхнего и нижнего бейнита

служебным свойствам (твердость и трещиностойкость), тогда как пределы их прочности принадлежат к практически одинаковым интервалам.

Существенным является и различие по микроструктурному состоянию (см. таблицу) металлов. Как известно, структура железоуглеродистых сплавов может до двух и более раз изменять их сопротивление усталости и износостойкость.

Таким образом, МОНИКА обнаруживает особые свойства, которые и определяют ее высокую эксплуатационную стойкость по важнейшим критериям работоспособности: износостойкости, сопротивлению усталости, прочности и безопасности, самосмазываемости, снижению коэффициента трения, высокой демпфирующей способности при колебаниях и ударах, потере хрупкости с ростом прочности, уменьшение (по сравнению со сталью) удельного веса, возможностью варьирования микроструктурного состояния в зависимости от режимов ТО.

Поскольку колесо работает при силовом взаимодействии с рельсом, неизбежным оказывается и повышение несущей способности трибофатической системы «колесо — рельс» [19], так что она может выдерживать осевые нагрузки до 30–35 т без потери требуемого ресурса. Отметим здесь и тот факт, что литые стальные колеса за рубежом получают методом точного литья (отливка в графитовые формы, центробежное литье), тогда как опытные рельсы из МОНИКИ (см. рисунок 4) отливали в песчаные формы.

Исходя из вышеизложенного, ожидается, что литые железнодорожные колеса, изготовленные, как и опытные рельсы (см. рисунок 3), из МОНИКИ, будут существенно дешевле, чем цельнокатанные и литые стальные колеса.

Дадим здесь примерную оценку экономической эффективности планируемого ноу-хау, которая выполнена совместно с канд. техн. наук В.В. Комиссаровым (Белорусский государственный университет транспорта). При прогнозируемой на период 2022–2025 гг. потребности (только одной) России в колесах (1,49 млн штук в год при цене 80 тыс. руб. за колесо) примем, что стоимость одного колеса уменьшается минимум на треть. Тогда получается, что:

- годовая экономия средств для закупки колес составит примерно 40 млрд руб.;
- потребность в колесах уменьшится примерно на 0,5 млн штук в год;
- сэкономится примерно 300 000 т металла за год (принимая во внимание, что вес заготовки для одного колеса составляет 600 кг);
- повышение осевой нагрузки (несущей способности) системы «колесо — рельс» обеспечат пока трудно оцениваемую, но огромную экономию средств в сфере перевозочного процесса.

Заключение. 1. Создан (патент 15617 ВУ) и практически применен новый конструкционный материал с особыми физико-механическими и служебными свойствами — сталистый высокопрочный чугуи ВЧТГ, который получил название МОНИКА (тройственная система модифицирования молибденом (Mo), никелем (Ni), медью (Cu)).

Выполнен комплекс экспериментальных исследований механических и служебных свойств нового конструкционного материала. Показано, что он обнаруживает оригинальную и уникальную совокупность таких свойств, как прочность на уровне современных легированных термоупрочненных сталей и одновременно технологические и служебные свойства как у современных высокопрочных чугунов с шаровидным графитом.

Разработан и введен стандарт предприятия СТП 315-638-2012 «Методы определения основных механических свойств высокопрочного чугуна с шаровидным графитом».

Разработан и введен стандарт предприятия СТП 315-647-2013 «Общие требования к механическим свойствам высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ по характеристикам прочности и пластичности при растяжении, механической и контактной усталости, ударной вязкости и твердости».

В 2019 г. по плану Государственной стандартизации Республики Беларусь утвержден СТБ 2544-2019 «Высокопрочный чугун с шаровидным графитом и высоким сопротивлением усталости. Марки и механические свойства».

Таким образом, с нормативной точки зрения нет никаких препятствий для широкомасштабного практического использования МОНИКИ в промышленности. Для конкретных изделий требуется лишь разработка и утверждение ТУ в рабочем порядке.

2. В работе приведены примеры конкретно и высокоэффективного использования первого представителя этого класса металлов — сталистого чугуна МОНИКА. Применение такого металла — это работы Ni-Tech: перевод получаемых обработкой давлением деталей из многих и разных марок легированной термоупрочненной стали на технологию литья из сталистого чугуна с обеспечением требуемой эксплуатационной надежности при существенной экономии средств и материалов в сферах их производства, эксплуатации, ремонта. Тем самым можно повысить конкурентоспособность отечественных изделий ответственного назначения.

3. Сформулированы некоторые направления дальнейших НИОКР. Обоснована особая перспективность и огромная экономическая значимость решения проблемы обеспечения высокой надежности, безопасности и эксплуатационной долговечности тяжелонагруженных литых колес для грузовых вагонов и локомотивов (Ni-Tech, ноу-хау, изобретения, прорывные инновации).

4. Дается однозначная рекомендация: нужно разработать и внедрить новый класс черных металлов типа МОНИКА с содержанием углерода от 2,1 до 3,2 % (это высокопрочные и пластичные чугуны) и оптимальной тройственной системой модифицирования (Mo-Ni-Cu). Такой инновационный класс металлов может удовлетворить практически любые запросы конструкторов современных машин ответственного назначения.

Список литературы

1. 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.
2. Псырков, Н.В. Эксплуатационная стойкость ножей режущих барабанов кормоуборочных комбайнов КВК-800 / Н.В. Псырков, В.О. Замятин // Механика-2011: сб. науч. тр. V Белорус. конгресса по теоретич. и прикл. механике,

- Минск, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси, редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2011. — Т. 2. — С. 85–91.
3. Щербаков, С.С. Напряженно-деформированное состояние и повреждаемость трибофатической системы «прижим — нож — опора» режущего инструмента комбайна / С.С. Щербаков // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 2(19). — С. 75–80.
4. Псырков, Н.В. Опыт внедрения специального чугуна марки ВЧТГ для изготовления ножей режущих барабанов кормоуборочной техники / Н.В. Псырков, А.А. Квитанов, В.О. Замятин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — 2013. — Вып. 2. — С. 388–390.
5. Комиссаров, В.В. Крупногабаритные зубчатые колеса из высокопрочного чугуна / В.В. Комиссаров, В.О. Замятин, Е.С. Таранова // Живучесть и конструкционное материаловедение: материалы конф., 22–24 окт. 2012 г. — М.: ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, 2012. — С. 26.
6. Опытные крупногабаритные зубчатые колеса для бортовых редукторов сельскохозяйственных комбайнов из специального чугуна марки ВЧТГ / Н.В. Псырков [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — 2013. — Вып. 2. — С. 391–394.
7. Сравнительная оценка работоспособности крупногабаритных зубчатых колес из специального чугуна марки ВЧТГ и стали / В.В. Комиссаров [и др.] // Живучесть и конструкционное материаловедение: тез. докл. 2-й междунар. конф. SSMS-2014, Москва, 21–23 окт. 2014 г. — М.: ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, 2014. — С. 68.
8. Об опыте изготовления и эксплуатации зубчатых колес из нового конструкционного материала «МОНИКА» / В.В. Комиссаров [и др.] // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. — 2017. — Т. 20, № 2. — С. 107–112.
9. Сосновский, Л.А. О литых рельсах из нового конструкционного материала / Л.А. Сосновский, В.И. Матвеев, С.С. Щербаков // Наука и образование транспорту. — 2016. — № 2. — С. 200–204.
10. Сосновский, Л.А. Новый конструкционный материал для железнодорожных рельсов: механические и служебные свойства / Л.А. Сосновский [и др.] // Вест. БелГУТа: Наука и транспорт. — 2014. — № 2(29). — С. 77–82.
11. 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. — М.: ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, 2014. — С. 41.
12. 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. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — 2013. — Вып. 2. — С. 405–407.
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 Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. транспорта им. акад. В. Лазаряна, 2013. — С. 54–55.
14. Одинг, И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И.А. Одинг. — М.: Машгиз, 1962. — 260 с.
15. Олейник, Н.В. Выносливость деталей машин / Н.В. Олейник. — Киев: Техника, 1979. — 199 с.
16. Почтенный, Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин / Е.К. Почтенный. — Минск: Наука и техника, 1982. — 246 с.
17. Колеса цельнокатаные. Технические условия: ГОСТ 10791-2011. — Взамен ГОСТ 10791-2004 и ГОСТ 9036-88; введ. 01.01.2012. — М.: Стандартинформ, 2011. — 27 с.
18. Особенности химического состава и свойств стали литых и цельнокатаных железнодорожных колес / М.Е. Гетманов [и др.] // Сталь. — 2017. — № 1. — С. 59–66.
19. Кудрявцев, И.В. Усталость крупных деталей машин / И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченков, Н.М. Саввина. — М.: Машиностроение, 1981. — 237 с.

SOSNOVSKIY Leonid A., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department “Locomotives”

E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Received 07 July 2022.

ON THE CHOICE OF MODERN STRUCTURAL METAL MATERIAL FOR HIGH-DUTY MECHANICAL SYSTEMS. PART 2

It is shown that when solving the problems of assurance of quality, reliability, competitiveness of high-duty mechanical systems, metal and a complex of its mechanical and service properties are of fundamental importance. Steel cast iron MONICA (Mo–Ni–Cu) (patent BY, no. 15617) exhibits an unconventional and unique ability to lose brittleness (increase viscosity) with increasing strength. In terms of service properties, it is not inferior to alloyed heat-strengthened steels. This makes it possible to recommend it for the manufacture of many and various highly loaded parts and assemblies of modern technology. The article provides several examples of the effective use of MONICA for the manufacture of cast knives for cutting and chopping devices of forage harvesters (Hi-Tech), large-sized gear wheels with a diameter of 500 mm for final drives of agricultural combines (know-how), as well as experimental cast rails for railway transport (Hi-Tech). A complex of laboratory and full-scale tests has convincingly proved that one brand of the new structural material fully provides the required operational reliability of many and different tribo-fatigue systems, the performance of which is determined by many and different criteria (fatigue, wear, friction, crack resistance, etc.) under the action of high repetitive variables and shock-cyclic loads. This determines the unconditional efficiency and competitiveness of critical mechanical systems (tribo-fatigue systems) for modern machines and equipment.

Keywords: metal; mechanical and service properties; limits of strength, fatigue, crack resistance; wear resistance; stress-strain and limit states; modification; microstructure; MONICA

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-86-96>

References

- Sosnovskiy L.A., Vitiaz P.A., Gapanovich V.A., Psyrkov N.V., Makhutov N.A. Chugun i stal v tribofaticheskikh sistemakh sovremennykh mashin i oborudovaniya [Iron and steel in tribo-fatigue systems for modern machinery and equipment]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2014, no. 4(29), pp. 5–20 (in Russ.).
- Psyrkov N.V., Zamyatin V.O. Ekspluatatsionnaya stoykost nozhey rezhushchikh barabanov kormouborochnykh kombaynov [Operational stability of knives of cutting drums of forage harvesters KVK-800]. *Mekhanika-2011*, 2011, vol. II, pp. 85–91 (in Russ.).
- Sherbakov S.S. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i povrezhdaemost tribofaticheskoy sistemy “prizhim — nozh — opora” rezhushchego instrumenta kombayna [Stress-strain state and damage of tribo-fatigue system clamp-knife-base of harvester cutting instrument]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2012, no. 2(19), pp. 75–80 (in Russ.).
- Psyrkov N.V., Kvitinov A.A., Zamyatin V.O. Opyt vnedreniya spetsialnogo chuguna marki VChTG dlya izgotovleniya nozhey rezhushchikh barabanov kormouborochnoy tekhniki [Experience in introducing special cast iron of VChTG brand for the manufacture of knives of cutting drums of fodder harvesting equipment]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2013, iss. 2, pp. 388–390 (in Russ.).
- Komissarov V.V., Zamyatin V.O., Taranova E.S. Krupnogabaritnye zubchatye koleasa iz vysokoprochnogo chuguna [Large-sized gears made of high-strength cast iron]. *Materialy konferentsii “Zhivuchest i konstruktivnoye materialovedenie”* [Proc. conference “Survivability and structural materials science”]. Moscow, 2012, p. 26 (in Russ.).
- Psyrkov N.V., Komissarov V.V., Tyurin S.A., Taranova E.S. Opytnye krupnogabaritnye zubchatye koleasa dlya bortovykh reduktorov selskokhozyaystvennykh kombaynov iz spetsialnogo chuguna marki VChTG [Experimental large-sized gears for side gearboxes of agricultural combines made of special cast iron of the VChTG brand]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2013, iss. 2, pp. 391–394 (in Russ.).
- Komissarov V.V., Taranova E.S., Zamyatin V.O., Psyrkov N.V., Sosnovskiy L.A. Sravnitel'naya otsenka rabotosposobnosti krupnogabaritnykh zubchatykh koleas iz spetsialnogo chuguna marki VChTG i stali [Comparative assessment of the performance of large-sized gears made of special cast iron of VChTG and steel grade]. *Tezisy dokladov 2 Mezhdunarodnoy konferentsii SSMS-2014 “Zhivuchest i konstruktivnoye materialovedenie”* [Report abstracts of the 2nd International conference SSMS-2014 “Survivability and structural materials science”]. Moscow, 2014, p. 68 (in Russ.).
- Komissarov V.V., Taranova E.S., Drobyshevskiy P.S., Zamyatin V.O., Tyurin S.A., Sosnovskiy L.A. Ob opyte izgotovleniya i ekspluatatsii zubchatykh koleas iz novogo konstruktivnogo materiala “MONIKA” [About experience of manufacture and maintenance of gears from the new structural material “MONICA”]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 107–112 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A., Matvetsov V.I., Sherbakov S.S. O litykh relsakh iz novogo konstruktivnogo materiala [On cast rails made of new structural material]. *Nauka i obrazovanie transportu*, 2016, no. 2, pp. 200–204 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A., Komissarov V.V., Matvetsov V.I., Miroshnikov N.E. Novyy konstruktivnyy material dlya zheleznodorozhnykh relsov: mekhanicheskie i sluzhebnye svoystva [New structural material for iron and road rails: mechanical and service properties]. *Bulletin of BSUT: science and transport*, 2014, no. 2(29), pp. 77–82 (in Russ.).
- Matvetsov V.I., Miroshnikov N.E., Sosnovskiy L.A. Naturnye ispytaniya tyazhelykh zheleznodorozhnykh relsov iz chuguna VChTG [Full-scale tests of heavy railway rails made of cast iron VChTG]. *Tezisy dokladov 2 Mezhdunarodnoy konferentsii*

- SSMS-2014 “Zhivuchest i konstruktsionnoe materialovedenie” [Report abstracts of International conference SSMS-2014 “Survivability and structural materials science”]. Moscow, 2014, p. 41 (in Russ.).
12. Matvetsov V.I., Miroshnikov N.E. Opyt izgotovleniya i ispytaniy relsov dlinoy 6.5 m iz spetsialnogo chuguna [Experience in the manufacture and testing of 6.5 m long rails made of special cast iron]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2013, iss. 2, pp. 405–407 (in Russ.).
 13. Sosnovskiy L.A., Matvetsov V.I., Psyrkov N.V. Ob izgotovlenii zhelezodorozhnykh relsov iz vysokoprochnogo chuguna [On the manufacture of railway rails from high-strength cast iron]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu professora M.A. Frishmana “Problemy vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava”* [Proc. International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of Professor M.A. Frishman “Problems of interaction of track and rolling stock”]. Dnipropetrovsk, 2013, pp. 54–55 (in Russ.).
 14. Oding I.A. *Dopuskaemye napryazheniya v mashinostroenii i tsiklicheskaya prochnost metallov* [Allowable stresses in mechanical engineering and cyclic strength of metals]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 260 p. (in Russ.).
 15. Oleynik N.V. *Vynoslivost detaley mashin* [Endurance of machine parts]. Kiev, Tekhnika Publ., 1979. 199 p. (in Russ.).
 16. Pochtennyy E.K. *Prognozirovanie dolgovechnosti i diagnostika ustalosti detaley mashin* [Predicting durability and diagnosing fatigue of machine parts]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 246 p. (in Russ.).
 17. State Standard 10791-2011. *Kolesa tselnokatnye. Tekhnicheskie usloviya* [All-rolled wheels. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 27 p. (in Russ.).
 18. Getmanova M.E., Ilyukhin D.S., Nikulin A.N., Filippov G.A. Osobennosti khimicheskogo sostava i svoystv stali litykh i tselnokatnykh zhelezodorozhnykh koles [Peculiarities of chemical composition and properties of steel cast and all-rolled railway wheels]. *Stal*, 2017, no. 1, pp. 59–66 (in Russ.).
 19. Kudryavtsev I.V., Naumchenkov N.E., Savvina N.M. *Ustalost krupnykh detaley mashin* [Fatigue of large parts of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 237 p. (in Russ.).