

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 14.03.2022.

О ВЫБОРЕ СОВРЕМЕННОГО КОНСТРУКЦИОННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ. ЧАСТЬ 1

Показано, что при решении проблем обеспечения качества, надежности, конкурентоспособности механических систем ответственного назначения фундаментальное значение имеет металл, комплекс его механических и служебных свойств. Сталистый чугунок 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 термопрочным сталям. Это позволяет рекомендовать его для изготовления различных 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) 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/10.46864/1995-0470-2022-3-60-85-96>

Введение. В 50–60-х годах прошлого века началось интенсивное послевоенное возрождение промышленности страны. Оно базировалось, в частности, на росте нагрузок, скоростей, размеров и, следовательно, производительности машин, механизмов, оборудования. Это потребовало специальной разработки и совершенствования методов расчета и проектирования их тяжело нагруженных деталей и узлов, прежде всего по критериям прочности, в том числе

при повторно-переменных напряжениях [1–18]. А в высших учебных заведениях курс по деталям машин стал одним из важнейших для подготовки инженеров-механиков. Поскольку практика эксплуатации показала, что усталость и износ — это два «бича» [18] современной техники, стали актуальными исследования не только сопротивления усталости, но и износостойкости материалов и узлов трения [19–25]. При этом если износ ведет к значительным материальным затратам,

то усталостные поломки — это не только крупные материальные потери, но и тяжелые аварии с нарушением гарантий безопасности для персонала, угроза здоровью и жизни людей. Поэтому борьба с износом и усталостными поломками деталей и узлов ответственного назначения стала главной заботой конструкторов и ученых при решении проблем качества и надежности изделий [26–31].

В этой борьбе особое значение придается уровню механических и служебных свойств материалов [3, 9, 18, 32–36]. Было разработано и внедрено в производство огромное количество марок чугуна, стали, цветных металлов и сплавов, которые соответствовали разнообразным и высоким требованиям для изготовления конкретных объектов. В этой связи проблема выбора марки металла и обеспечения его должного микроструктурного состояния стала весьма важной. Поскольку масса изделия в значительной мере определяется уровнем характеристик прочности материалов, то его конкурентоспособность напрямую зависит от точности расчетов. Если коэффициент запаса прочности завышен, вес машины становится неоправданно большим, а если он занижен — возможны преждевременные эксплуатационные отказы [6, 18, 27, 29, 33].

К концу прошлого века было осознано [37], что удовлетворение отдельным критериям прочности и износостойкости конкретных деталей машин и оборудования не обеспечивает требуемого качества, надежности и конкурентоспособности изделий. Это привело и к известным тяжелым авариям практически во всех областях техники ([37] сообщение о бомбе Махутова, колесно-рельсовом вирусе, преждевременном обрыве турбобуров в установках сверхглубокого бурения).

В последней четверти XX века пришло понимание и того, что в трибофатических системах (ТФС) процессы трения реализуются на фоне повторно-переменного объемного деформирования хотя бы одного из взаимодействующих элементов (например, рельса в системе «колесо — рельс» [38]). Отсюда следовало общее заключение, что неконтактные циклические нагрузки (при растяжении, сжатии, изгибе, кручении) могут в зависимости от условий эксплуатации или испытаний существенно повышать или снижать силу и коэффициент трения в системе [39, 40]. Более того, теоретические и экспериментальные исследования показали [38–44], что износ в ТФС может как резко снижать (до 2 раз), так и повышать (примерно на 10...20 %) сопротивление усталости элементов ТФС. Это так называемый прямой эффект в трибофатике. Стало ясным, что считавшийся всегда вредным износ может служить характеристикой для соответствующего управления надежностью ТФС. Кроме того, было показано, что усталостные повреждения, со своей стороны, могут как

снижать (в 1,5 раза и более), так и повышать (на 10...30 % и более) износостойкость ТФС (обратный эффект в трибофатике). При этом было установлено, что трение и износ, с одной стороны, и усталость — с другой не могут рассматриваться как факторы взаимного влияния, но должны быть изучены как взаимодействующие явления. Так возникла инновационная методология принципов расчета и проектирования не отдельных деталей, а механических систем [37–39]. Она базируется на известной теории диалектических Λ -взаимодействий повреждений, обусловленных нагрузками разной природы [38]. Эти принципы схематически представлены на рисунках 1 *a, b*. А на рисунке 1 *c* охарактеризована роль материала в создании любых машин, механизмов, оборудования. Например, проект трактора — это всего лишь его виртуальная модель; она становится физической реальностью, только когда для каждой его детали принят конкретный металл. Аналогично проектная технология изготовления всех деталей трактора является виртуальной; она становится физически реальной (заводской), когда после изготовления указано конкретное состояние металлов, принятых для каждой детали. А состояние металла опосредованно обусловлено комплексом его механических и служебных свойств (см. рисунок 1 *c*). Нетрудно видеть, сколь сложна и ответственна задача проектирования, когда перед конструктором встает проблема обоснования выбора марки материала и его разнообразных состояний. Задачи и цели проектирования кратко сформулированы на рисунках 1 *a, b*. Надо оговориться, что хотя новая методология расчета, проектирования и изготовления ТФС в принципе разработана довольно давно [43], к настоящему времени она не стала рабочей: имеются лишь серьезные публикации [44], но пока нет ни одного нормативного документа. В СКБ машиностроительных заводов Республики Беларусь пока отсутствуют методики расчета ТФС, которые были бы утверждены в установленном порядке.

Цель нашей работы не может состоять в анализе всего комплекса проблем, представленных на рисунке 1. Задача автора состояла в том, чтобы обратить внимание на проблему «МЕТАЛЛ» при создании конкурентоспособных изделий, содержащих ТФС ответственного назначения. Эта проблема сформулирована в названии статьи. Обратим внимание, что речь идет не о требованиях к механическим и служебным свойствам конкретной марки материала для конкретных элементов данных ТФС, а о поиске обобщенного ответа на вопрос, каким комплексом свойств должен обладать конструкционный материал, чтобы его можно было принять для изготовления многих и разных элементов ТФС, работающих в разнообразных условиях.

Чугун и сталь: конкуренция продолжается в области высокопрочных состояний. Сталь и чугун — два класса железоуглеродистых сплавов, производство которых в известной мере определяет мировой технический прогресс в течение последних 150 лет [45]. Объем производства этих черных металлов (рисунок 2 а) растет непрерывно, несмотря на то, что в развитых странах идет постоянный поиск их заменителей — специальных цветных сплавов, порошковых материалов, полимеров, композитов.

Задачи: механико-математическое моделирование и расчет динамики, прочности, износостойкости и надежности машин, оборудования и материалов с прогнозированием и оптимизацией контролируемого и управляемого ресурса изделия и обеспечением его интегрального качества в соответствии с требованиями рынка, в том числе по критериям безопасности для людей, техногенного и экологического риска эксплуатации



ККП – комплекс компьютерных программ; НДС – совмещенное пространственное напряженно-деформированное состояние; V_p, ω_x – состояния объемной поврежденности; ПЗ, ОЭ – прямой, обратный эффекты; ПС – многокритериальное предельное состояние; R – управляемый ресурс; p/S_p – состояние риск / безопасность; C_{Σ} – совокупные затраты в сферах производства и эксплуатации; $\Pi(X)$ – интегральное качество.

Цели: обеспечить импортозамещение, энергосбережение, снижение затрат труда, средств и материалов в сферах производства и эксплуатации, и, в конечном счете повысить конкурентоспособность изделий (Hi-Tech)

a



М.С. Высоцкий : «... мы уходим от традиционного расчета отдельных деталей и переходим к расчету и конструированию механических систем»

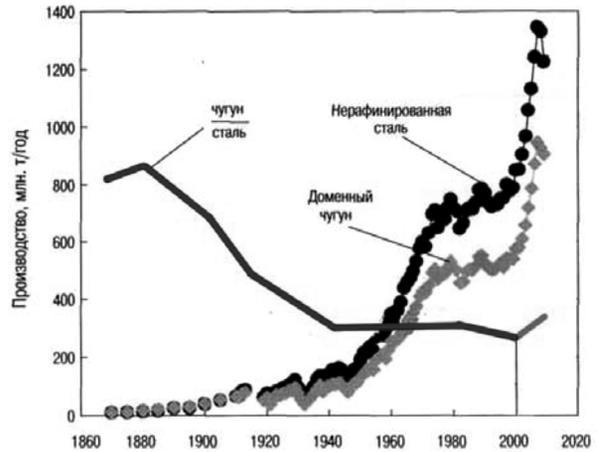
b

Назначение	НИР	Конструкция	Материалы	Технологии	Испытания	Условия эксплуатации
СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ						
Механические свойства (классические)	Служебный свойства (стандартные)					
	Элемент конструкции	Пара трения	Трибофатическая система			
Прочность σ Пластичность δ Твердость H Ударная вязкость KCV	Сопротивление усталости - механической σ_{-1} - контактной p_f	Интенсивность износа (износ) I(W) - при скольжении - при качении Коэффициент трения f_s - при скольжении - при качении	Сопротивление ПУП - контактно-механической σ_{-2p} - фрикционно-механической τ_{-2f} - фреттинг-усталости σ_{-3f} Коэффициент трения f_{s2} Трещиностойкость K_c			

c

Рисунок 1 — Качество, надежность, конкурентоспособность изделий ответственного назначения: a — инновационный алгоритм расчета и проектирования; b — методология последовательной постановки и решения задач;

c — фундаментальная роль материалов
Figure 1 — Quality, reliability, competitiveness of high-duty products: a — innovative algorithm of calculation and design; b — methodology of consistent formulation and solution of problems; c — fundamental role of materials



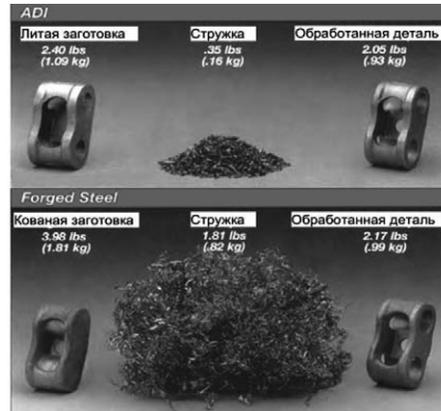
a

Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	Параметры		42CrMo4	ADI-1050
	ADI	Сталь		
Получение материала	2500	4500	Прочность на растяжение Н/мм²	1000
			Граница пластичности Н/мм²	750
Преварительная термообработка			Удлинение %	11
			Модуль Е кН/мм²	210
Аустемперинг	600	-	Твердость НВ	300
			Ударная вязкость (ДВМ) (Д)	40
Упрочнение			Предел усталости Н/мм²	500
			Стойкость на износ	низкая
ИТОГО:	3100	5800-6200	Способность к деформированию	низкая
			Живучесть	низкая
			Плотность г/см³	7,9
			Способность к самозалечиванию	низкая
			Влияние толщин стенок	высокая
			Стойкость	низкая

Сравнение расхода энергии в процессе изготовления деталей из чугуна ADI (Austempered Ductile Iron) и стали

Сравнение свойств чугуна ADI-1050 и стали 42 CrMo4

b



Литые концевые коннекторы из ADI в сравнении с прокованной сталью в производственной последовательности

c

Тип структуры бейнита в чугуне	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость, HRC	Ударная вязкость, МДж
Нижний бейнит	1100-1500	1-4	42-48	0,2-0,5
Верхний бейнит	800-1200	3-10	36-45	0,2-0,4

- хорошие антифрикционные свойства;
- способность быстро гасить вибрации и резонансные колебания;
- малая чувствительность к надрезам;
- меньший, чем у стали, удельный вес;

- повышенная теплопроводность;
- повышенные, по сравнению со сталью, литейные и технологические свойства;
- более низкая температура плавления;
- хорошая обрабатываемость резанием.

d

Рисунок 2 — Чугун и сталь: конкуренция продолжается в высокопрочной области: a — сравнение мирового производства чугуна и стали; b — чугун и сталь: технико-экономические аспекты; c — чугун и сталь: технологические аспекты; d — свойства чугуна с бейнитной структурой
Figure 2 — Cast iron and steel: competition continues in the high-strength field: a — comparison of the world production of cast iron and steel; b — cast iron and steel: technical and economic aspects; c — cast iron and steel: technological aspects; d — properties of cast iron with a bainite structure

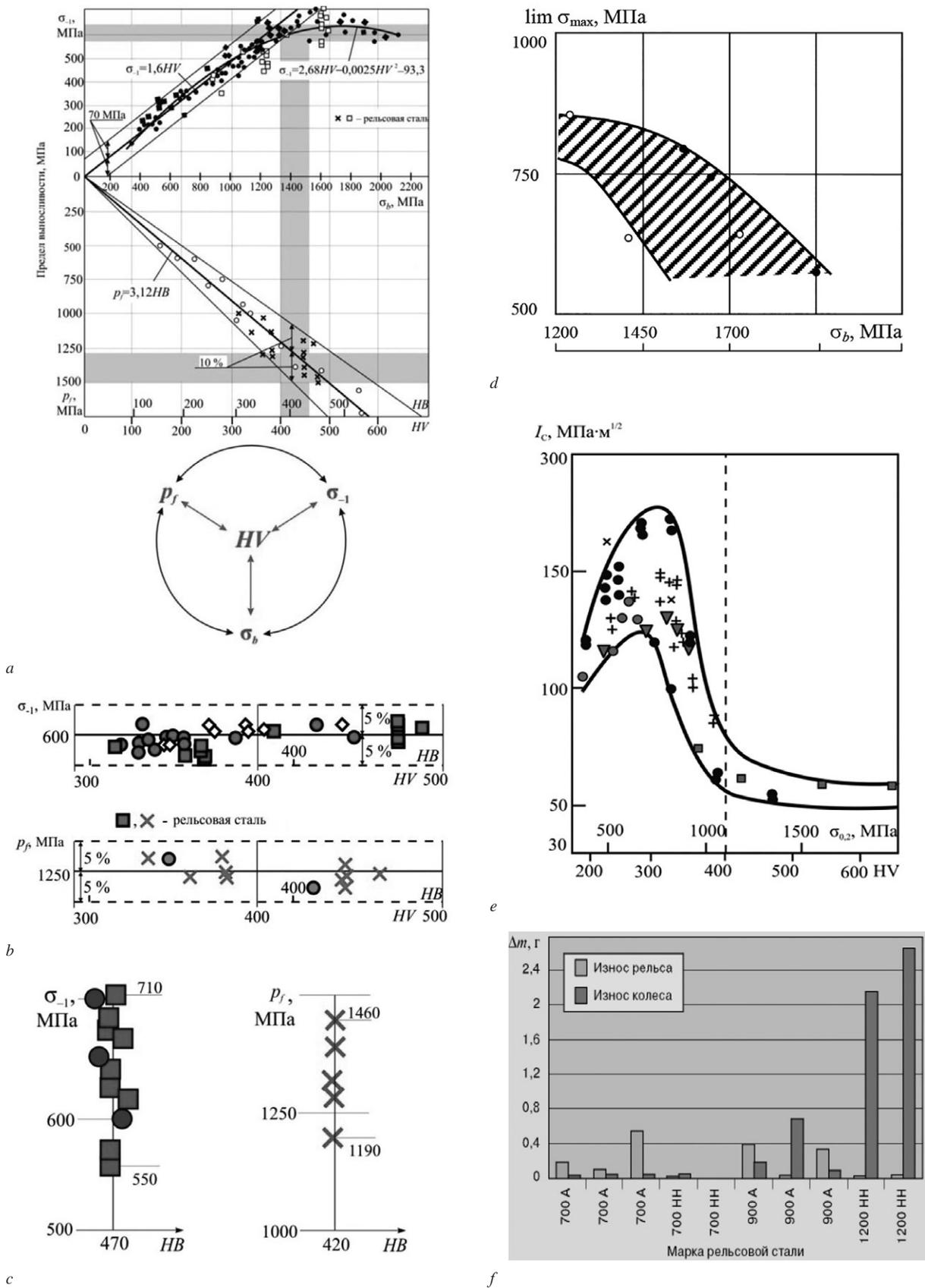


Рисунок 3 — Механические и служебные свойства — пределы роста: *a* — пределы роста сопротивления усталости с повышением твердости; *b* — изменение твердости и сопротивления усталости сталей; *c* — изменение величин σ_{-1} и p_f при заданной твердости сталей; *d* — снижение сопротивления ударно-механической усталости высокопрочных сталей при $\sigma_b > 1200$ МПа; *e* — зависимость предела трещиностойкости от твердости; *f* — износ системы «колесо — рельс»

Figure 3 — Mechanical and service properties — limits of growth: *a* — limits of fatigue resistance growth with increasing hardness; *b* — change in hardness and fatigue resistance of steels; *c* — change in values σ_{-1} and p_f at a given hardness of steels; *d* — reduction of resistance to shock-mechanical fatigue of high-strength steels at $\sigma_b > 1200$ МПа; *e* — dependence of the crack resistance limit on hardness; *f* — wear of the “wheel — rail” system

Однако по объему выплавки чугун существенно уступает стали. Это естественно. Последние десятилетия характеризуются новым неуклонным и значительным ростом производительности, скорости, нагруженности машин и оборудования, что обеспечивается соответствующим повышением прочности материалов, используемых для изготовления их наиболее ответственных элементов и систем. Между тем именно прочностные свойства чугуна были относительно низкими (по сравнению со сталью). Но когда были разработаны высокопрочные чугуны с шаровидным графитом, прочность которых сначала достигла, а затем и перешагнула рубеж 1000 МПа, открывалась перспектива применения таких чугунов [46–53] для изготовления деталей наиболее массовых механических систем современных машин и оборудования. На рисунках 2 *b–d* представлены сведения по физическим, механическим и служебным их свойствам.

Со временем выяснилось, что и чугуны, и стали обнаруживают определенные для них пределы роста [18, 43, 53–55] механических и служебных свойств (рисунок 3). Так, стремление повысить предел прочности стали более 1200 МПа не ведет к ожидаемому росту предела выносливости (см. рисунок 3 *a*), а в случае ударных нагрузок он даже резко уменьшается (см. рисунок 3 *d*). Аналогично падает и трещиностойкость (см. рисунок 3 *e*). А при контактной усталости оказывается, что можно создавать новые марки стали (следовательно, получать высокопрочные их состояния), но их пределы выносливости в соответствующем диа-

пазоне остаются практически одинаковыми (см. рисунки 3 *b, c*). Все это приводит к тому, что, например, износ в системе «колесо — рельс» сильно зависит от сочетания свойств материалов для этих элементов (см. рисунок 3 *f*). В пределе возможен эффект «точила»: износ колеса более чем в 10 раз превышает износ рельса (действие «колесно-рельсового вируса»).

Белорусские ученые и инженеры тоже включились [54–65] в конкурентную борьбу чугуна и стали с целью возможного использования высокопрочного чугуна с шаровидным графитом как конструкционного материала для высоконагруженных и массовых изделий ответственного назначения — ТФС. Как известно, трибофатической называют всякую механическую систему, которая воспринимает и транзитно передает повторно-переменную нагрузку и в которой одновременно реализуется процесс трения в любых его проявлениях: при скольжении, качении, проскальзывании (фреттинге), ударе [66]. Иными словами, ТФС — это пара трения, хотя бы один из элементов которой работает в условиях объемной усталости. Такие исследования представлялось необходимым выполнять по трем причинам. Чугун, во-первых, обнаруживает, как уже отмечалось выше, ряд несомненно более высоких технологических и служебных свойств, чем сталь (см. рисунок 2). Во-вторых, это экономический фактор: экономия только энергии при замене стали на чугун может достигать 50 % и более (см. рисунок 2). А в-третьих, перспектива перехода от высокоэнергетических и высокзатратных кузнечно-прессовых

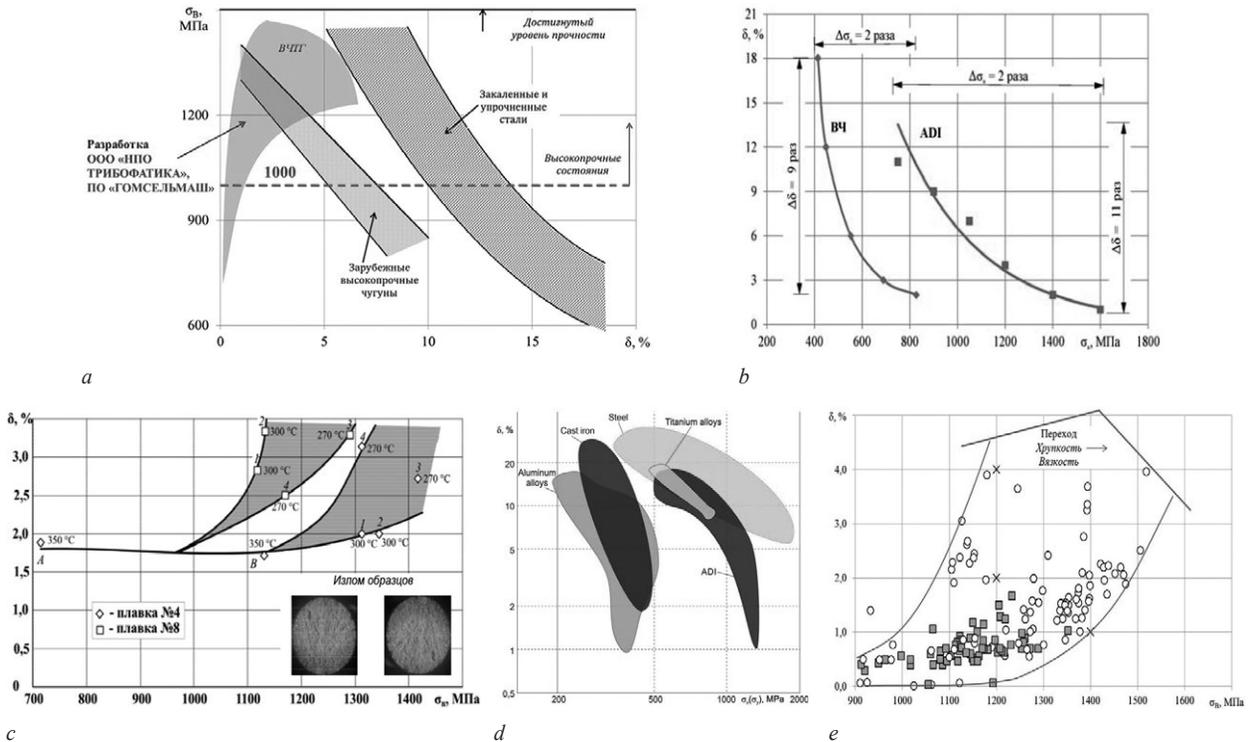


Рисунок 4 — Чугун и сталь: диаграмма пластичность–прочность
 Figure 4 — Cast iron and steel: plasticity–strength diagram

и сварных технологий изготовления сложных элементов конструкций к технологиям качественного литья во всем мире признается технологически и экономически весьма выгодной ввиду существенного уменьшения массы и стоимости изделия (см. рисунок 2).

К настоящему времени по данной тематике в Беларуси выполнен большой комплекс экспериментальных и теоретических исследований в рамках государственных программ, а также по

ряду крупных хозяйственных договоров с участием высококвалифицированных специалистов и ученых многих организаций (ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», НЦ ПММ НАН Беларуси, РУП «Белавтотракторостроение» НАН Беларуси, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Белорусский государственный университет, Белорусский национально-технический университет, Белорусский государственный университет транспорта, ОАО «Российские железные дороги», Институт машиноведения РАН

Условный номер чугуна	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Mg, %	Ni, %	Mn, %	Cu, %	Cr, % (не более)
1	3,29	2,67	0,24	0,062	0,010	0,047	-	-	-	-
2	3,50	2,66	0,60	0,062	0,010	0,042	-	-	-	-
3	3,43	2,46	0,97	0,060	0,009	0,055	-	-	-	-
4	3,49	2,69	1,23	0,041	0,005	0,061	-	-	-	-
5	3,47	2,56	0,27	0,032	0,009	0,054	0,65	-	-	-
6	3,49	2,42	0,28	0,061	0,010	0,058	0,97	-	-	-
7	3,50	2,55	0,27	0,061	0,011	0,062	1,90	-	-	-
8	3,46	2,64	0,25	0,060	0,010	0,060	3,82	-	-	-
9	3,44	2,63	0,42	0,042	0,009	0,065	-	0,19	-	-
10	3,56	2,69	0,43	0,040	0,007	0,065	-	0,36	-	-
11	3,46	2,69	0,45	0,041	0,006	0,056	-	0,63	-	-
12	3,36	2,74	0,42	0,042	0,009	0,050	-	0,74	-	-
13	3,47	2,76	0,34	0,031	0,017	0,043	-	-	0,74	-
14	3,44	2,68	0,36	0,031	0,013	0,056	-	-	1,58	-
15	3,58	2,78	0,55	0,031	0,014	0,037	0,54	-	-	-
16	3,50	2,78	0,34	0,030	0,012	0,043	0,53	0,17	-	-
17	3,41	2,12	0,34	0,017	0,015	0,057	1,38	0,32	-	-
18	3,66	2,51	0,53	0,028	0,015	0,059	1,34	0,26	-	-
19	3,75	2,63	1,14	0,033	0,013	0,049	-	-	1,04	-
20	3,58	2,52	0,51	0,031	0,008	0,057	-	0,21	0,53	-
21	3,53	2,44	0,50	0,030	0,011	0,056	-	0,25	1,37	-
22	3,48	2,76	0,45	0,032	0,016	0,050	0,53	0,27	0,63	-
23	3,85	2,8	0,25	-	-	-	-	-	-	0,05
24	3,85	2,8	0,30	-	-	-	0,10	-	-	0,05
25	3,80	2,75	0,55	-	-	-	0,70	-	0,30	0,15
26	3,75	2,75	0,60	-	-	-	0,70	-	0,30	0,15
27	3,68	0,014	0,23	0,012	-	-	0,03	0,42	0,13	0,5
28	3,85	0,016	0,23	0,005	-	-	0,03	0,47	0,13	1,04
29	3,65	2,85	0,18	0,027	0,005	0,041	0,04	-	0,97	-
30 (ВЧПТ)	3,6	2,65	0,25	0,08	0,01	0,05	0,55	0,5	1,20	0,06

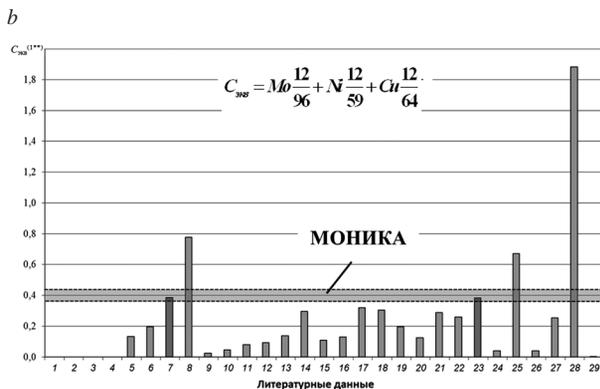
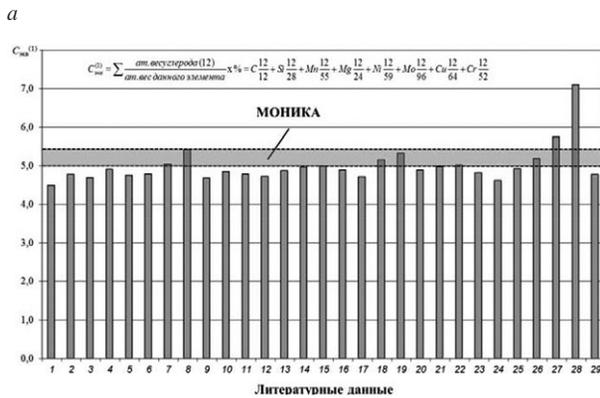


Рисунок 5 — Анализ химического состава чугунов с шаровидным графитом: а — анализ химического состава бейнитных чугунов; б — углеродный эквивалент металлов; с — углеродный эквивалент по трем элементам: Mo–Ni–Cu (МОНИКА)
Figure 5 — Analysis of the chemical composition of cast iron with spherical graphite: а — analysis of the chemical composition of bainite cast iron; б — carbon equivalent of metals; с — carbon equivalent of three elements: Mo–Ni–Cu (MONICA)

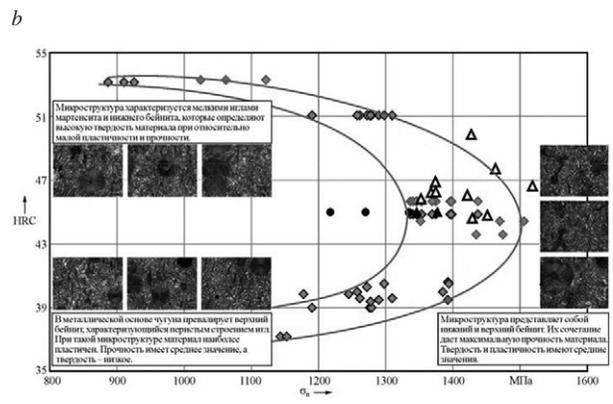
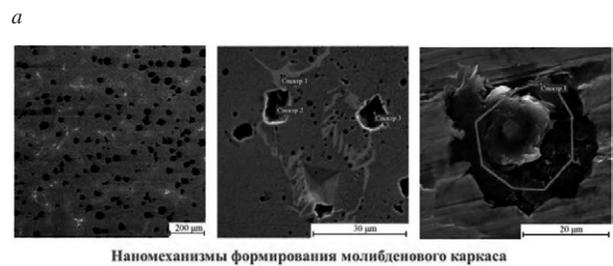
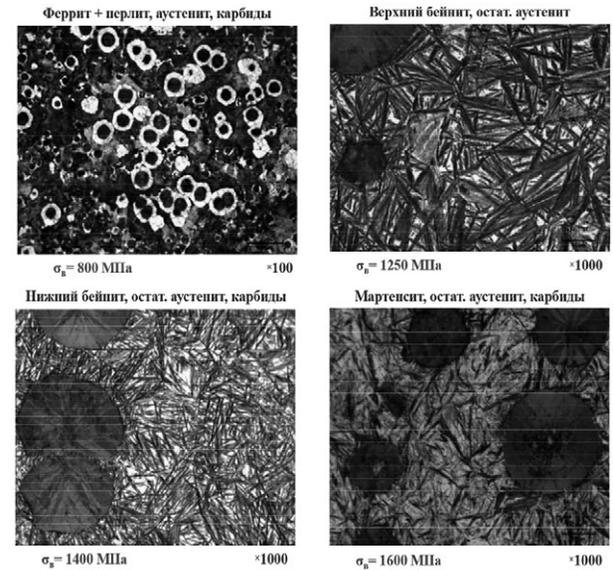


Рисунок 6 — Анализ структурных состояний МОНИКИ: а — основные типы микроструктуры; б — молибденовый каркас в структуре материала МОНИКА; с — связь твердости, точности и микроструктуры материала МОНИКА
Figure 6 — Analysis of the structural states of MONICA: а — main types of microstructure; б — molybdenum frame in the structure of the MONICA material; с — relationship of hardness, accuracy and microstructure of the MONICA material

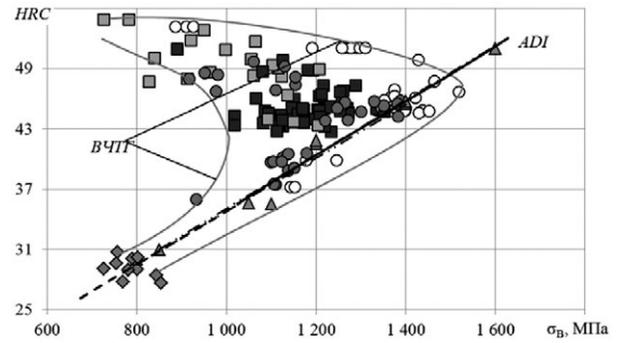
им. А.А. Благодравова). Некоторые результаты исследований были обсуждены на международных конференциях России, Китая и других стран. Большая группа авторов выступала там с докладами, которые и легли в основу данной статьи. И теперь наша дополнительная цель состоит в том, чтобы выполнить обобщающий анализ инновационных исследований по обоснованию пригодности специальных чугунов для изготовления высоконагруженных деталей ТФС.

МОНИКА теряет хрупкость при росте прочности. Давно и хорошо известна взаимозависимость двух важнейших физико-механических свойств металлических материалов: если повышается прочность, обязательно и безусловно падает пластичность и, следовательно, растет хрупкость металла (рисунок 4 а). Хрупкость очень опасна, поэтому нежелательна для ответственных деталей машин и элементов конструкций. И ситуация такова, что именно свойство хрупкости практически ограничивает и контролирует использование высокопрочных материалов в технике. Особенно удручает тот факт, что желательный рост прочности, с одной стороны, и нежелательное падение пластичности (охрупчивание) — с другой имеют сильно различающиеся скорости. Если для традиционных чугунов DI (Ductile Iron) и современных ADI (Austempered Ductile Iron) [51–53] предел прочности σ_B при растяжении возрастает только вдвое, то относительное удлинение при разрыве δ падает в 9 и 11 раз (см. рисунок 4 б). Как видно, падение сильнее для более прочного состояния. Такой стремительный рост хрупкости в определяющей степени обесценивает усилия специалистов по созданию высокопрочных чугунов для объектов ответственного назначения.

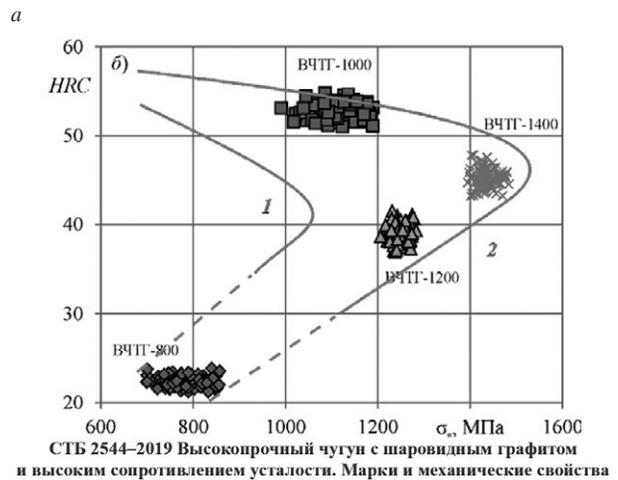
По имеющимся сведениям, задача преодоления указанной выше закономерности не ставилась в науке о металлах, поскольку она считается фундаментальной (см. рисунок 4 d) [46, 53]. Ученые и специалисты интенсивно работают лишь над проблемой уменьшения скорости падения пластичности (роста хрупкости) с повышением предела прочности (предела текучести). Мы, по-видимому, впервые смогли преодолеть эту традиционную закономерность и реализовать неизвестную ранее закономерность: материал (чугун) МОНИКА обнаруживает потерю хрупкости (т. е. рост пластичности) с повышением прочности (см. рисунки 4 с, e). Подчеркнем, что такое поведение обнаруживается в области высокопрочных состояний ($\sigma_B > 900$ МПа) (см. рисунок 4 с).

Чтобы установить и убедительно подтвердить данную закономерность, для нового материала испытаниями на растяжение подвергали более 300 образцов (диаметр 10 мм), которые изготавливали после каждой плавки и термообработки. На рисунке 4 с каждая точка есть среднее значение по испытаниям трех образцов. Кроме того,

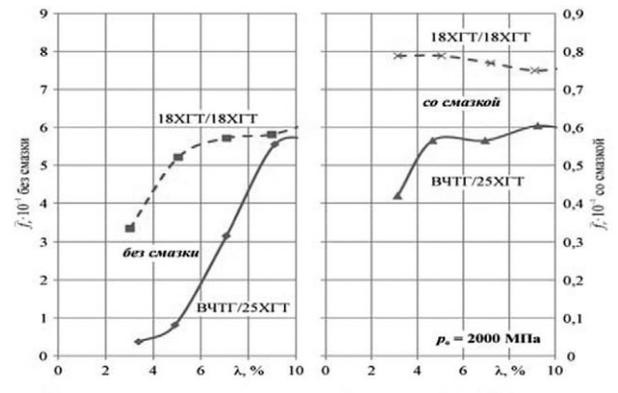
были проведены специальные статистические испытания. Некоторые результаты обработки данных представлены на рисунке 4 e. Таким образом,



Уникальная закономерность: прямая и обратная пропорциональность между прочностью и твердостью



СТБ 2544–2019 Высокопрочный чугун с шаровидным графитом и высоким сопротивлением усталости. Марки и механические свойства



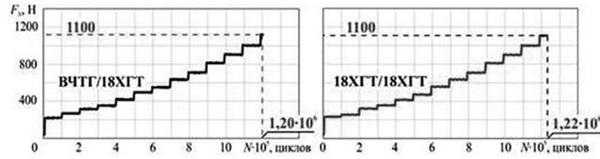
Влияние степени проскальзывания (λ) на средний коэффициент сопротивления качению при трении без смазки и со смазкой

1. Химический состав: тройственная система модифицирования (Ni-Mo-Si) + (наномеханизмы) Сталистый чугун?
2. Управляемая композиция микроструктур Перлит/Феррит Бейнит (нижний, верхний)/Мартенсит ⇒ Композиции
3. Нетрадиционная диаграмма основных свойств: Рост прочности ведет к потере хрупкости (повышению вязкости)
4. Уникальная закономерность: прямая и обратная пропорциональность между прочностью и твердостью
5. Уникальный комплекс механических (твердость, прочность, пластичность, трещиностойкость), служебных (сопротивление механической и контактной усталости, износоустойкость), технологических (заводоточность, обрабатываемость и др.) и эксплуатационных (гашение вибрации и резонансных колебаний, самосмазываемость, теплопроводность и др.) свойства

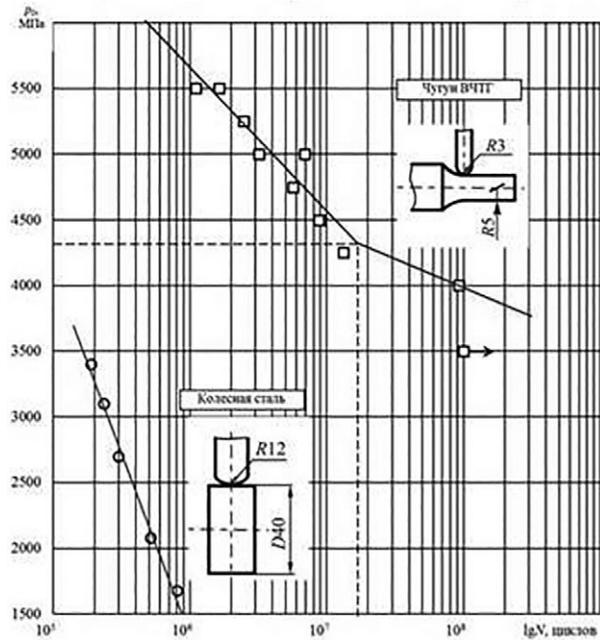
Рисунок 7 — Особые свойства материала МОНИКА:
 a — диаграмма прочность–твердость; b — статистические свойства; c — самосмазываемость; d — основные инновации
Figure 7 — Special properties of the MONICA material:
 a — strength–hardness diagram; b — statistical properties; c — self-lubricity; d — main innovations

особые полезные свойства нового материала были убедительно подтверждены.

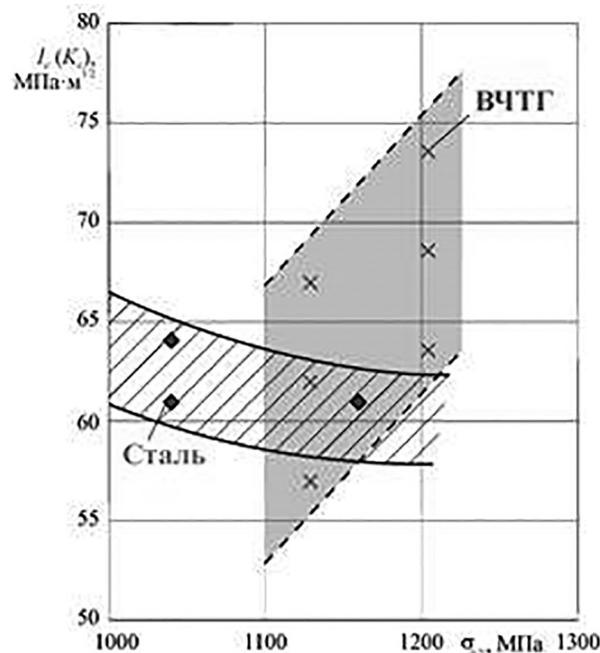
Почему МОНИКА обнаруживает особые свойства [56, 57]. МОНИКА имеет оригинальный химический состав (рисунки 5 а, б) и оптимальное соотношение трех модифицирующих элементов



а



б



с

Рисунок 8 — Служебные свойства стали и МОНИКИ
Figure 8 — Service properties of steel and MONICA

Мо-Ni-Cu (см. рисунок 5 с): ни один из известных чугунов не имеет в совокупности такого углеродного химического эквивалента. Именно это обстоятельство и определяет МОНИКУ как инновационное, а не только оригинальное достижение: все особенности свойств, описанные выше, обусловлены им. Экспериментально показано, что определенное количество Мо в составе МОНИКИ способно приводить к образованию молибденового каркаса [56] (см. рисунок 6 б) в его микроструктуре, что тоже обуславливает его особые механические свойства. Наконец, различные режимы термообработки позволяют получить практически любой тип микроструктуры (см. рисунок 6 а), а также любые их смеси.

Как известно, Cu, Ni либо Мо широко применяются в качестве легирующих присадок для повышения прочности АДІ. Особенность легирования МОНИКИ состоит в том, что для этого используют не Ni либо Мо, как это делается традиционно, а одновременно и Мо, и Ni (вместе с Cu) в определенных количествах. Наше предположение состоит в том, что МОНИКА есть своеобразный молибденовый (точнее, молибдено-никелевый) железоуглеродистый сплав. Закономерности влияния этой смеси на изменение свойств металлов пока не изучены, тогда как закономерности влияния отдельных указанных элементов на свойства железоуглеродистых сплавов известны. Например, установлено, что Мо — значительно более эффективный элемент, чем Ni. Чтобы получить предел выносливости стали $\sigma_{-1} = 150$ МПа, количество Ni должно быть примерно в 10 раз больше, чем Мо. При одинаковом количестве Ni либо Мо в стали предел выносливости снижается примерно на 30 %, если легирование ведут за счет Ni (взамен Мо).

У нового конструкционного материала обнаруживается и нетрадиционная взаимозависимость прочность–твердость, которая показана на рисунке 6 с в связи с микроструктурным состоянием металла. А на рисунке 7 дана общая характеристика особых свойств МОНИКИ. Сравнительный анализ служебных свойств МОНИКИ и современной высокопрочной стали представлен на рисунке 8.

Преимущества нового конструкционного материала по всему комплексу свойств (сопротивлению усталости, долговечности, несущей способности, трещиностойкости, трению и самосмазываемости) очевидны.

Окончание следует.

Список литературы

1. Расчеты на прочность в машиностроении: в 3 т. / С.Д. Пономарев [и др.]; под ред. С.Д. Пономарева. — М.: Машгиз, 1956–1959. — Т. 3 — 1115 с.
2. Гребеник, В.М. Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования / В.М. Гребеник. — М.: Машиностроение, 1969. — 256 с.

3. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей / И.А. Биргер [и др.]; под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Балашова. — М.: Машиностроение, 1981. — 222 с.
4. Кудрявцев, И.В. Усталость крупных деталей машин / И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченко, Н.М. Саввина. — М.: Машиностроение, 1981. — 237 с.
5. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.
6. Одинг, И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И.А. Одинг. — М.: Машгиз, 1962. — 260 с.
7. Олейник, Н.В. Выносливость деталей машин / Н.В. Олейник. — Киев: Техника, 1979. — 199 с.
8. Почтенный, Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин / Е.К. Почтенный. — Минск: Наука и техника, 1982. — 246 с.
9. Трубин, Г.К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес / Г.К. Трубин. — М.: Машгиз, 1962. — 404 с.
10. Фролов, К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиностроения / К.В. Фролов. — М.: Машиностроение, 1984. — 233 с.
11. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. — М.: Машиностроение, 1979. — 702 с.
12. Пути снижения коэффициентов запаса прочности и металлоемкости машин при одновременном повышении их надежности и долговечности / В.В. Бойцов [и др.] // Вестник машиностроения. — 1981. — № 11. — С. 46–49.
13. Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов / А.А. Кузнецов [и др.]. — М.: Машиностроение, 1974. — 144 с.
14. Писаренко, Г.С. Современные проблемы прочности / Г.С. Писаренко // Современные проблемы теоретической и прикладной механики. — Киев, 1978. — С. 25–52.
15. Решетов, Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин / Д.Н. Решетов. — М.: Высш. школа, 1974. — 206 с.
16. Целиков, А.Я. Надежность конструкций и механизмов / А.Я. Целиков, Д.Н. Решетов, Б.А. Морозов // Вестн. АН СССР. — 1974. — № 12. — С. 37–42.
17. Цитович, И.С., Безотказность и долговечность тракторов и сельскохозяйственных машин / И.С. Цитович, Н.Н. Дорожкин, В.А. Дьяченко; под ред. И.С. Цитовича. — Минск: Ураджай, 1977. — 151 с.
18. Сосновский, Л.А. Механика усталостного разрушения: словарь-справ.: в 2 т. / Л.А. Сосновский. — Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1994. — Т. 2
19. Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. — М.: Машиностроение, 1985. — 24 с.
20. Жуковский, Н.Е. Трение бандажей железнодорожных колес о рельсы: собр. соч.: в 16 т. / Н.Е. Жуковский. — Л.: Гостехиздат, 1950. — Т. 7. — С. 426–478.
21. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М. В. Добычин, В. С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
22. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. — М.: Машиностроение, 1986. — 223 с.
23. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. — М.: Мир, 1989. — 510 с.
24. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. — М.: Наука, 2001. — 478 с.
25. Боуден, Ф.Р. Трение и смазка / Ф.Р. Боуден, Д. Тейбор. — М.: Машгиз, 1960. — 101 с.
26. Коновалов, Л.В. Нагруженность, усталость, надежность деталей металлургических машин / Л.В. Коновалов. — М.: Металлургия, 1981. — 280 с.
27. Сосновский, Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л.А. Сосновский. — Минск: Наука и техника, 1987. — 288 с.
28. Цитович, И.С. Пути повышения надежности машин / И.С. Цитович, О.В. Берестнев. — Минск: Наука и техника, 1979. — 81 с.
29. Биргер, И.А. Вероятность разрушения, запасы прочности и диагностика / И.А. Биргер // Проблемы механики деформированного твердого тела: сб. науч. тр. — Л.: Судостроение, 1970. — С. 71–82.
30. Болотин, В.В. Статистические методы в строительной механике / В.В. Болотин. — М.: Стройиздат, 1965. — 280 с.
31. Кугель, Р.В. Надежность машин массового производства / Р.В. Кугель. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.
32. Степнов, М.Н. Усталость легких конструктивных сплавов / М.Н. Степнов, Е.В. Гиацинтов. — М.: Машиностроение, 1973. — 317 с.
33. Трошенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ.: в 2 т. / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. — Киев: Наук. думка, 1987. — Т. 2.
34. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряжении состояния: справ. / А.А. Лебедев [и др.]; отв. ред. В.Т. Трошенко. — Киев: Наук. думка, 1983. — 366 с.
35. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях: в 2 т. / Г.С. Писаренко [и др.]; под ред. Г.С. Писаренко. — Киев: Наук. думка, 1980. — Т. 2.
36. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: монография в 2 ч. / Я.Б. Фридман. — М.: Машиностроение, 1974. — Ч. 2. — 368 с.
37. Слово о трибофатике / В.И. Стражев [и др.], ред.-сост. А.В. Богданович. — Гомель–Минск–Москва–Киев: Remika, 1996. — 132 с.
38. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский // Проблемы безопасности на транспорте: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., 18–20 окт. 2000 г. / БелГУТ; под ред. В.Я. Негрея. — Гомель, 2000. — С. 186.
39. Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. — Минск: БГУ, 2011. — 407 с.
40. Сосновский, Л.А. Закон трения: от трибологии к трибофатике. Сообщение 1. Классический закон сухого трения и необходимость его корректировки / Л.А. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 1(46). — С. 64–76.
41. Сосновский, Л.А. Закон трения: от трибологии к трибофатике. Сообщение 2. Теоретические исследования / Л.А. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 2(47). — С. 66–77.
42. Сосновский, Л.А. Закон трения: от трибологии к трибофатике. Сообщение 3. Экспериментальные исследования / Л.А. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 4(49). — С. 95–106.
43. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики: учеб. пособие / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 1. — 246 с.; Т. 2. — 234 с.
44. Сосновский, Л.А. Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики: курс лекций / Л.А. Сосновский, М.А. Журавков, С.С. Щербаков. — Минск: БГУ, 2011. — 488 с.
45. Люнген, Х.Б. Развитие производства чугуна и стали / Х.Б. Люнген, М. Петере, П. Шмеле // Черные металлы. — 2011. — № 9.
46. Designing with Austempered Ductile Iron (ADI) / J.R. Keough, K.L. Hayrynen, G.L. Pioszak // AFS Proc. 2010. — American Foundry Society, Schaumburg. — 2010. — 15 p.
47. Roedter, H. ADI – Austempered Ductile Iron / H. Roedter // Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей: информационный сб. техн. материалов / Металлург; под ред. Н.Н. Александрова [и др.]. — М., 2004. — С. 249–258.
48. Your Means to Improved Performance, Productivity and Cost: Proc. of the 1st International Conference on Austempered Ductile Iron, 2–4 April 1984 / Hyatt Regency O'Hare. — Rosemont, 1984. — 300 p.
49. Your Means to Improved Performance, Productivity and Cost: Proc. of the 2nd International Conference on Austempered Ductile Iron, 17–19 March 1986 / Rackham School, University of Michigan. — Ann Arbor, 1986. — 463 p.
50. Proceedings of the World Conference on Austempered Ductile Iron: 12–14 March 1991. — Bloomington, 1991. — 460 p.
51. Gagne, M. Environmental Embrittlement of Ductile Iron / M. Gagne, K.L. Hayrynen / Proc. of the 8th International Symposium on Science and Processing of Cast Iron. — Beijing, 2006. — Pp. 452–457.
52. Hayrynen, K.L. Determination of Mechanical Properties in Various Ductile Irons after Subjecting Them to Long-Term Elevated Temperatures / K.L. Hayrynen, J.R. Keough, B.V. Kovacs [Electronic resource]. — Mode of access: <https://citeseerx.ist>.

- psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.732.2661&rep=rep1&type=pdf.
53. Proceedings of the World Conference on Austempered Ductile Iron: 26–27 September 2002. — Louisville, 2002. — 524 p.
 54. Gapanovich, V.A. What must surface hardness of rail be? / V.A. Gapanovich, L.A. Sosnovskiy // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике, Минск, 25 окт.–1 нояб. 2010 г. / БГУ, редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. — Минск, 2010. — Т. 1. — С. 179–186.
 55. Georgiev, M.N. Fracture durability of railway rails / M.N. Georgiev. — Kemerovo: ООО “Master-flag” Ltd, 2006. — 212 p.
 56. Сосновский, Л.А. 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.
 57. Комиссаров, В.В. Крупногабаритные зубчатые колеса из высокопрочного чугуна / В.В. Комиссаров, В.О. Замятнин, Е.С. Таранова // Живучесть и конструкционное материаловедение: материалы конф., 22–24 окт. 2012 г. — М.: ИМАШ РАН им. А.А. Благодарова, 2012. — С. 26.
 58. 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.]. — Минск, 2013. — Вып. 2. — С. 391–394.
 59. 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. Благодарова, 2014. — С. 68.
 60. 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.
 61. Сосновский, Л.А. О литых рельсах из нового конструкционного материала / Л.А. Сосновский, В.И. Матвеев, С.С. Щербаков // Наука и образование транспорта. — 2016. — № 2. — С. 200–204.
 62. Новый конструкционный материал для железнодорожных рельсов: механические и служебные свойства / Л.А. Сосновский [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. — 2014. — № 2(29). — С. 77–82.
 63. 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. Благодарова, 2014. — С. 41.
 64. 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. / Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — Минск, 2013. — Вып. 2. — С. 405–407.
 65. 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.
 66. Трибофатика. Термины и определения: ГОСТ 30638–99. — Введ. 17.06.1999. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1999. — 17 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 14 March 2022.

ON THE CHOICE OF MODERN STRUCTURAL METAL MATERIAL FOR HIGH-DUTY MECHANICAL SYSTEMS. PART 1

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 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 a new structural material fully provides the required operational reliability of many and different tribo-fatigue systems, the performance of which is determined by many criteria (fatigue, wear, friction, crack resistance) 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/10.46864/1995-0470-2022-3-60-85-96>

References

- Ponomarev S.D. *Raschety na prochnost v mashinostroenii. Tom 3* [Strength calculations in mechanical engineering. Volume 3]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956–1959. 1115 p. (in Russ.).
- Grebenik V.M. *Ustalostnaya prochnost i dolgovechnost metallurgicheskogo oborudovaniya* [Fatigue strength and durability of metallurgical equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 256 p. (in Russ.).
- Birger I.A., et al. *Konstruktsionnaya prochnost materialov i detaley gazoturbinykh dvigateley* [Structural strength of materials and parts of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 222 p. (in Russ.).
- 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.).
- Makhtov N.A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktivnykh na prochnost* [Deformation criteria of destruction and calculation of structural elements for strength]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 272 p. (in Russ.).
- 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.).
- Oleynik N.V. *Vynoslivost detaley mashin* [Endurance of machine parts]. Kiev, Tekhnika Publ., 1979. 199 p. (in Russ.).
- Pochtenny E.K. *Prognozirovaniye dolgovechnosti i diagnostika ustalosti detaley mashin* [Predicting durability and diagnosing fatigue of machine parts]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 246 p. (in Russ.).
- Trubin G.K. *Kontaktная usalost materialov dlya zubchatykh kolez* [Contact fatigue of materials for gears]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 404 p. (in Russ.).
- Frolov K.V. *Metody sovershenstvovaniya mashin i sovremennyye problemy mashinostroeniya* [Methods of improving machines and modern problems of mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 233 p. (in Russ.).
- Birger I.A., Schorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost detaley mashin* [Calculation of the strength of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 702 p. (in Russ.).
- Boytsov V.V., et al. *Puti snizheniya koeffitsientov zapasa prochnosti i metalloemkosti mashin pri odnovremennom povyshenii ikh nadezhnosti i dolgovechnosti* [Ways to reduce the safety factors and metal consumption of machines while increasing their reliability and durability]. *Vestnik mashinostroeniya*, 1981, no. 11, pp. 46–49 (in Russ.).
- Kuznetsov A.A., Zolotov A.A., Komyagin V.A., Titov M.I. *Nadezhnost mekhanicheskikh chastey konstruktivnykh letatelnykh apparatov* [Reliability of mechanical parts of the design of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 144 p. (in Russ.).
- Pisarenko G.S. *Sovremennyye problemy prochnosti* [Modern problems of strength]. *Sovremennyye problemy teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki*, 1978, pp. 25–52 (in Russ.).
- Reshetov D.N. *Rabotosposobnost i nadezhnost detaley mashin* [Performance and reliability of machine parts]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1974. 206 p. (in Russ.).
- Tselikov A.Ya., Reshetov D.N., Morozov B.A. *Nadezhnost konstruktivnykh i mekhanizmov* [Reliability of structures and mechanisms]. *Vestnik Akademii nauk SSSR*, 1974, no. 12, pp. 37–42 (in Russ.).
- Tsitovich I.S., Dorozhkin N.N., Dyachenko V.A. *Bezotkaznost i dolgovechnost traktorov selskokhozyaystvennykh masin* [Reliability and durability of tractors and agricultural machines]. Minsk, Uradzhay Publ., 1977. 151 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Mekhanika ustalostnogo razrusheniya. Tom 2* [Fatigue failure mechanics. Volume 2]. Gomel, NPO “TRIBO-FATIKA”, 1994 (in Russ.).
- Garkunov D.N. *Tribotekhnika* [Tribotechnology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p. (in Russ.).
- Zhukovskiy N.E. *Trenie bandazhey zheleznodorozhnykh kolez o relsy. Tom 7* [Friction of bandages of railway wheels on rails. Volume 7]. Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1950. Pp. 426–478 (in Russ.).
- Kragelskiy I.V., Dobychin M.V., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Basics of calculations for friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 526 p. (in Russ.).
- Drozdov Yu.N., Pavlov V.G., Puchkov V.N. *Trenie i iznos v ekstremalnykh usloviyakh* [Friction and wear in extreme conditions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 223 p. (in Russ.).
- Johnson K.L. *Contact mechanics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1985.
- Goryacheva I.G. *Mekhanika friktsionnogo vzaimodeystviya* [Mechanics of friction interaction]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 478 p. (in Russ.).
- Bowden F.P., Tabor D. *Friction and lubrication*. London, Methuen, 1956. 150 p.
- Konovalov L.V. *Nagruzhenost, ustalost, nadezhnost detaley metallurgicheskikh mashin* [Loading, fatigue, reliability of parts of metallurgical machines]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 280 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Statisticheskaya mekhanika ustalostnogo razrusheniya* [Statistical mechanics of fatigue destruction]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1987. 288 p. (in Russ.).
- Tsitovich I.S., Berestnev O.V. *Puti povysheniya nadezhnosti mashin* [Ways to improve machine reliability]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1979. 81 p. (in Russ.).
- Birger I.A. *Veroyatnost razrusheniya, zapasy prochnosti i diagnostika* [Probability of destruction, safety factors and diagnostics]. *Problemy mekhaniki deformirovannogo tverdogo tela*, 1970, pp. 71–82 (in Russ.).
- Bolotin V.V. *Statisticheskie metody v stroitelnoy mekhanike* [Statistical methods in construction mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1965. 280 p.
- Kugel R.V. *Nadezhnost mashin massovogo proizvodstva* [Reliability of mass production machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 244 p. (in Russ.).
- Stepnov M.N., Giatsintov E.V. *Ustalost legkikh konstruktivnykh splavov* [Fatigue of light structural alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 317 p. (in Russ.).
- Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov. Tom 2* [Resistance to fatigue of metals and alloys. Volume 2]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1987.
- Lebedev A.A., Kovalchuk B.I., Giginyak F.F., Lamashevskiy V.P. *Mekhanicheskie svoystva konstruktivnykh materialov pri slozhnom napryazhenii sostoyaniya* [Mechanical properties of structural materials under complex stress]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1983. 366 p. (in Russ.).
- Pisarenko G.S., et al. *Prochnost materialov i elementov konstruktivnykh v ekstremalnykh usloviyakh. Tom 2* [Strength of materials and structural elements in extreme conditions. Volume 2]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1980.
- Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva metallov. Mekhanicheskie ispytaniya. Konstruktsionnaya prochnost. Chast 2* [Mechanical properties of metals. Mechanical tests. Structural strength. Part 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 368 p. (in Russ.).
- Strazhev V.I., et al. *Slovo o tribofatike* [The word about tribo-fatigue]. Gomel, Minsk, Moscow, Kiev, Remika Publ., 1996. 132 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Mekhanika iznosoustalostnogo povrezhdeniya* [Mechanics of wear and tear damage]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Problemy bezopasnosti na transporte”* [Report abstracts of International scientific and practical conference “Transport safety problems”]. Gomel, 2000, p. 186 (in Russ.).
- Sherbakov S.S., Sosnovskiy L.A. *Mekhanika tribofaticheskikh sistem* [Mechanics of tribo-fatigue systems]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2011. 407 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Zakon treniya: ot tribologii k tribofatike. Soobshchenie 1. Klassicheskiy zakon sukhogo treniya i neobkhodimost ego korrrektirovki* [Law of friction: from tribology to tribo-fatigue. Report 1. Classical law of (dry) friction and need for its adjustment]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 1(46), pp. 64–76 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Zakon treniya: ot tribologii k tribofatike. Soobshchenie 2. Teoreticheskie issledovaniya* [Law of friction: from tribology to tribo-fatigue. Report 2. Theoretical studies]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 2(47), pp. 66–77 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Zakon treniya: ot tribologii k tribofatike. Soobshchenie 3. Eksperimentalnye issledovaniya* [Law of friction: from tribology to tribo-fatigue. Report 3. Experimental studies]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 4(49), pp. 95–106 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Osnovy tribofatiki* [Fundamentals of tribo-fatigue]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2003. Vol. 1, 246 p., vol. 2, 234 p. (in Russ.).

44. Sosnovskiy L.A., Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S. *Fundamentalnye i prikladnye zadachi tribofatiki* [Fundamental and applied problems of tribo-fatigue]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2011. 488 p. (in Russ.).
45. Lyungen Kh.B., Peters M., Shmele P. Proizvodstvo chuguna i stali [Iron and steel production]. *Chernye metally*, 2011, no. 9, pp. 18–25 (in Russ.).
46. Keough J.R., Hayrynen K.L., Pioszak G.L. Designing with austempered ductile iron (ADI). *AFS Proceedings* 2010, 2010, 15 p.
47. Roedter H. ADI – austempered ductile iron. *Chuguny s sharovidnym i vermikul'yarnym grafitom i austenitno-beynitnoy matritsey. Sovremennyye materialy dlya litykh detaley*, 2004, pp. 249–258.
48. *Proc. 1st International conference on austempered ductile iron “Your means to improved performance, productivity and cost”*. Rosemont, 1984. 300 p.
49. *Proc. 2nd International conference on austempered ductile iron “Your means to improved performance, productivity and cost”*. Ann Arbor, 1986. 463 p.
50. *Proceedings of the World conference on austempered ductile iron*. Bloomingdale, 1991. 460 p.
51. Gagne M., Hayrynen K.L. Environmental embrittlement of ductile iron. *Proc. 8th International symposium on science and processing of cast iron*. Beijing, 2006, pp. 452–457.
52. Hayrynen K.L., Keough J.R., Kovacs B.V. *Determination of mechanical properties in various ductile irons after subjecting them to long-term elevated temperatures*. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.732.2661&rep=rep1&type=pdf>.
53. *Proceedings of the World conference on austempered ductile iron*. Louisville, 2002. 524 p.
54. Gapanovich V.A., Sosnovskiy L.A. What must surface hardness of rail be? *Trudy 6 Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike* [Proc. 6th International symposium on tribo-fatigue]. Minsk, 2010, vol. 1, pp. 179–186.
55. Georgiev M.N. *Fracture durability of railway rails*. Kemerovo, OOO “Master-flag” Ltd, 2006. 212 p.
56. 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.).
57. Komissarov V.V., Zamyatnin V.O., Taranova E.S. Krupnogabarnitnye zubchatye kolea iz vysokoprochnogo chuguna [Large-sized gears made of high-strength cast iron]. *Materialy konferentsii “Zhivuchest i konstruksionnoe materialovedenie”* [Proc. conference “Survivability and structural materials science”]. Moscow, 2012, p. 26 (in Russ.).
58. Psyrkov N.V., Komissarov V.V., Tyurin S.A., Taranova E.S. Opytnye krupnogabarnitnye zubchatye kolea 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.).
59. Komissarov V.V., Taranova E.S., Zamyatnin V.O., Psyrkov N.V., Sosnovskiy L.A. Sravnitel'naya otsenka rabotosposobnosti krupnogabarnitnykh zubchatykh kolea 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 konstruksionnoe materialovedenie”* [Report abstracts of the 2nd International conference SSMS-2014 “Survivability and structural materials science”]. Moscow, 2014, p. 68 (in Russ.).
60. Komissarov V.V., Taranova E.S., Drobyshevskiy P.S., Zamyatnin V.O., Tyurin S.A., Sosnovskiy L.A. Ob opyte izgotovleniya i ekspluatatsii zubchatykh kolea iz novogo konstruksionnogo materiala “MONIKA” [About experience of manufacture and maintenance of gears from the new structural material “MONIKA”]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 107–112 (in Russ.).
61. Sosnovskiy L.A., Matvetsov V.I., Sherbakov S.S. O litykh relsakh iz novogo konstruksionnogo materiala [On cast rails made of new structural material]. *Nauka i obrazovanie transportu*, 2016, no. 2, pp. 200–204 (in Russ.).
62. Sosnovskiy L.A., Komissarov V.V., Matvetsov V.I., Miroshnikov N.E. Novyy konstruksionnyy 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.).
63. 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 konstruksionnoe materialovedenie”* [Report abstracts of International conference SSMS-2014 “Survivability and structural materials science”]. Moscow, 2014, p. 41 (in Russ.).
64. 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.).
65. Sosnovskiy L.A., Matvetsov V.I., Psyrkov N.V. Ob izgotovlenii zheleznodorozhnykh 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.).
66. State Standard 30638-99. *Tribofatika: terminy i opredeleniya* [Tribofatigue: terms and definitions]. Minsk, Mezhgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belorusskiy sovet po standartizatsii i sertifikatsii Publ., 1999. 17 p. (in Russ.).