



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 625.143

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.

директор¹

E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

А.А. НОВИКОВ

заместитель генерального директора по техническим вопросам и качеству — главный инженер²

E-mail: iznoslab@mail.ru

С.С. ЩЕРБАКОВ, д-р физ.-мат. наук

профессор кафедры теоретической и прикладной механики³

E-mail: sherbakovss@mail.ru

В.В. КОМИССАРОВ, канд. техн. наук, доц.

заведующий лабораторией «Динамика и прочность» ИЦЖТ «СЕКО»⁴

E-mail: komissarov@belsut.gomel.by

С.А. ТЮРИН, канд. техн. наук

ведущий специалист лаборатории износоусталостных испытаний²

E-mail: iznoslab@mail.ru

П.С. ДРОБЫШЕСКИЙ

начальник лаборатории износоусталостных испытаний²

E-mail: iznoslab@mail.ru

¹ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», г. Гомель, Республика Беларусь

²ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Республика Беларусь

³Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

⁴Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 01.06.2017.

КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ И СТРУКТУРА

Дан краткий обзор практического использования нового конструкционного материала МОНИКА. Впервые выполнено экспериментальное исследование по анализу влияния микроструктурного состояния на сопротивление усталости. Установлено, что на базе 10^8 циклов предел выносливости этого материала не ниже 243 МПа. Обсуждается роль концентрации напряжений в окрестности неметаллических (графитовых) включений на формирование сопротивления усталости МОНИКИ. Указаны пути возможного повышения предела выносливости этого материала до ~300 МПа и более.

Ключевые слова: трибофатическая система, конструкционный материал, чугун, МОНИКА, зубчатые колеса, система «колесо — рельс», «нож — противорежущий брус», микроструктура, включения графита, сопротивление усталости, прочность, пластичность, тяжеловесное движение

Трибофатические системы ответственного назначения, например, «колесо — рельс», зубчатые передачи, «нож — противорежущий брус» и т. д., как правило, работают в тяжелых условиях при

действии высоких нагрузок, имеющих повторно-переменный характер. Их эксплуатационная надежность в решающей степени ограничивается реализуемым сопротивлением усталости. Поэтому

для изготовления их элементов традиционно применяют дорогие высококачественные стали и высокочувствительные технологии обработки давлением. Существенное снижение расходов достигается, когда удается использовать технологии литья (взамен обработки давлением). При этом в качестве альтернативы для стали рассматривается высокопрочный ($\sigma_B > 1000$ МПа) чугун с шаровидным графитом [1–3]. В таком случае только экономия электроэнергии может составлять до 50 % и более [4]. Важно, что такой чугун обнаруживает ряд более высоких, чем сталь, эксплуатационных и технологических свойств [1–3, 5–8]:

- 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.

Однако конкурентные свойства чугуна в определяющей степени обесцениваются существенно более низкими механическими и служебными свойствами. Уровень механических свойств характеризуется, например, диаграммой прочность — пластичность (рисунок 1) [1], из которой следует очевидное заключение о значительно ограниченных возможностях чугуна. Аналогичная ситуация и со служебными свойствами, характеризуемыми сопротивлением усталости. Так, согласно требованиям ISO, предел выносливости чугуна существенно меньше, чем стали (таблица 1).

Специалисты ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» и ОАО «Гомсельмаш» около 10 лет назад разработали для трибофатических систем новый конструкционный материал: высокопрочный чугун с шаровидным графитом и высокими сопротивлением усталости (см. рисунок 1 и таблицу 1), который первоначально получил обозначение ВЧТГ (ВЧ — высокопрочный чугун, ТГ — производство фирмы «ТРИБОФАТИКА» и ОАО «Гомсельмаш»).

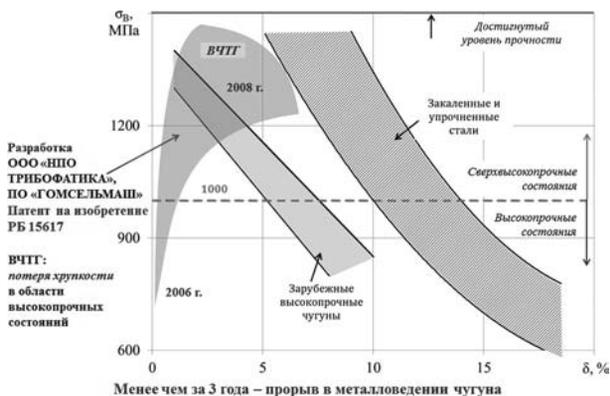


Рисунок 1 — Чугун и сталь: диаграмма пластичность — прочность

Таблица 1 — «МОНИКА» и сталь: служебные свойства

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

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

Как следует из рисунка 1, к 2008 году свойства этого материала достигли уровня стали (см. диаграмму на рисунке 1) в ее наиболее высокопрочной области. А его сопротивление контактной усталости оказалось выше, чем стали (см. таблицу 1). И только при механической усталости предел выносливости нового конструкционного материала был меньше (на 14 %), чем у стали, но выше (на 21 %), чем у лучших зарубежных высокопрочных чугунов (см. таблицу 1). Такие особые свойства нового материала определяются не только его оригинальным химическим составом (патент РБ № 15617), но и оригинальной тройственной системой модифицирования (Mo—Ni—Cu). В этой связи материал получил название МОНИКА [2]. Важно, что МОНИКА, в зависимости от режимов термообработки, может иметь практически все известные базовые микроструктуры (рисунок 2), а также их любые смеси, что и позволяет изменять его физико-механические свойства в широком интервале. Анализ особых механических свойств МОНИКИ дан в работах [1–3, 7].

Практическое использование МОНИКИ было начато с изготовления крупногабаритных зубчатых колес (диаметр ~500 мм) для бортовых редукторов высокопроизводительного самоходного

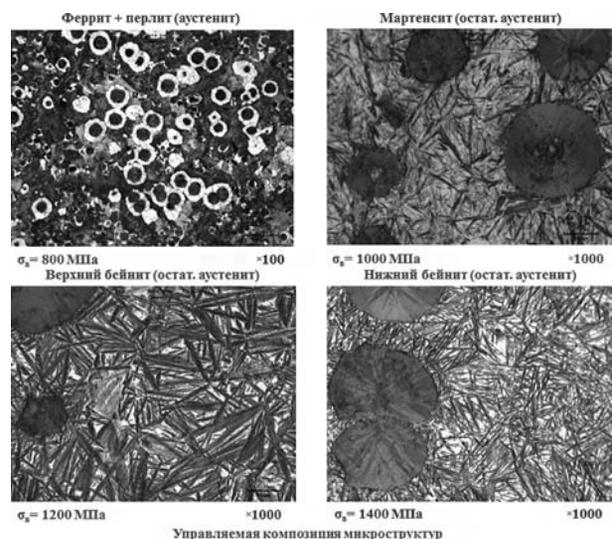


Рисунок 2 — Базовые структуры материала «МОНИКА»

сельскохозяйственного комбайна КВК-800. В работах [1–3] изложены результаты успешных эксплуатационных испытаний таких колес. Согласно данным плано-экономического управления ОАО «Гомсельмаш», стоимость крупногабаритных колес из МОНИКИ в индивидуальном производстве примерно на 20 % ниже стоимости стальных колес, серийно изготавливаемых из поковок.

Далее выполнен комплекс исследований, целью которых было изготовление и обеспечение требуемой эксплуатационной стойкости ножей режущо-измельчающего аппарата кормоуборочных комбайнов. В первый же год внедрения в порядке импортозамещения было сэкономлено 740 тыс. евро и получен экономический эффект в сумме 2,46 млрд рублей (по данным плано-экономического управления ОАО «Гомсельмаш») [1–3].

Такой успешный опыт позволил разработчикам предложить проект Hi-Tech «Литые рельсы» [9–16]. Конечно, это беспрецедентный проект: это нарушение 150-летней безусловно успешной традиции изготовления рельсов из высококачественной стали методом прокатки. И он вызвал серьезное опасение, что будут нарушены гарантии безопасности для людей из-за недостаточной эксплуатационной надежности рельсов из МОНИКИ. С другой стороны, проект сулит многомиллиардные (долларовые) прибыли, поскольку прогнозируется, что стоимость рельсов из МОНИКИ по меньшей мере на 30–50 % дешевле, чем стальных. Поэтому в целом проект вызвал ожесточенные споры и широкую дискуссию. Его активно обсуждали на многих авторитетных международных научно-технических форумах [9–16], состоявшихся в 2009–2015 годах. В 2016 году острые споры по нему проходили на заседании Бюро и расширенном заседании Президиума НАН Беларуси под руководством академика В.Г. Гусакова, на заседании Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь под руководством доктора экономических наук А.Г. Шумилина, и, наконец, на совещании в Совете Министров Республики Беларусь под председательством вице-премьера В.И. Семашко. Объективности ради заметим, что на этих заседаниях не только были отмечены положительные составляющие проекта — некоторые ученые и специалисты-железнодорожники высказались резко против него. Однако отторжение проекта Hi-Tech «Литые рельсы» основывалось не столько на конкретных аргументах, сколько на всплесках эмоций. Достаточно упомянуть, что проект кое-кто считал нереальным, потому что «по уровню сложности и стоимости» он якобы сравним со строительством Белорусской АЭС. Основные положения проекта обсуждали также ученые и специалисты железных дорог, в том числе на заседании Научно-технического Совета ОАО «РЖД» (2009 год) под председательством Президента ОАО «РЖД»

В.И. Якунина), а также на заседании главных инженеров железнодорожных администраций государств — членов ЕАЭС по вопросам научно-технического сотрудничества и внедрения перспективных технологий и техники на железнодорожном транспорте (2015 год) под председательством старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановича. Главное заключение специалистов железных дорог СНГ таково [17]: «Рекомендовать ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Белорусскому государственному университету транспорта (БелГУТ), Белорусскому государственному университету (БГУ) совместно с Национальной академией наук Беларуси продолжить дальнейшие исследования в части практического применения нового конструкционного материала «МОНИКА» в различных ответственных конструкциях, парах трения, трибофатических и механотермодинамических системах железнодорожного транспорта, в том числе в качестве материала для производства рельсов». Можно отметить, что на этом заседании один из авторов данной статьи (и проекта) получил высшую награду ОАО «РЖД» [17]. Что касается научно-академической общественности и специалистов Республики Беларусь — оценка (обобщенная Председателем Президиума НАН Беларуси академиком В.Г. Гусаковым, данная им на упомянутых выше заседаниях) в целом положительно-осторожная: нужны дополнительные многоплановые исследования. Конкретные работы по проекту продолжаются.

Выполнено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния системы «колесо — рельс» для двух вариантов изготовления: рельс изготавливается либо из стали, либо из МОНИКИ (рисунки 3 и 4). При этом использованы два метода расчета: традиционное решение контактной задачи и новое решение с позиций трибофатики. В любом из вариантов расчета установлена безусловная перспективность изготовления рельсов из МОНИКИ: при прочих равных условиях интенсивность действующих напряжений снижается до 8 %, а интенсивность эксплуатационных повреждений, оцениваемая величиной комплекс-

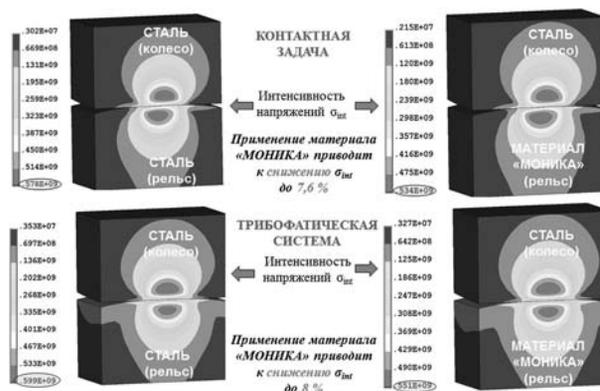
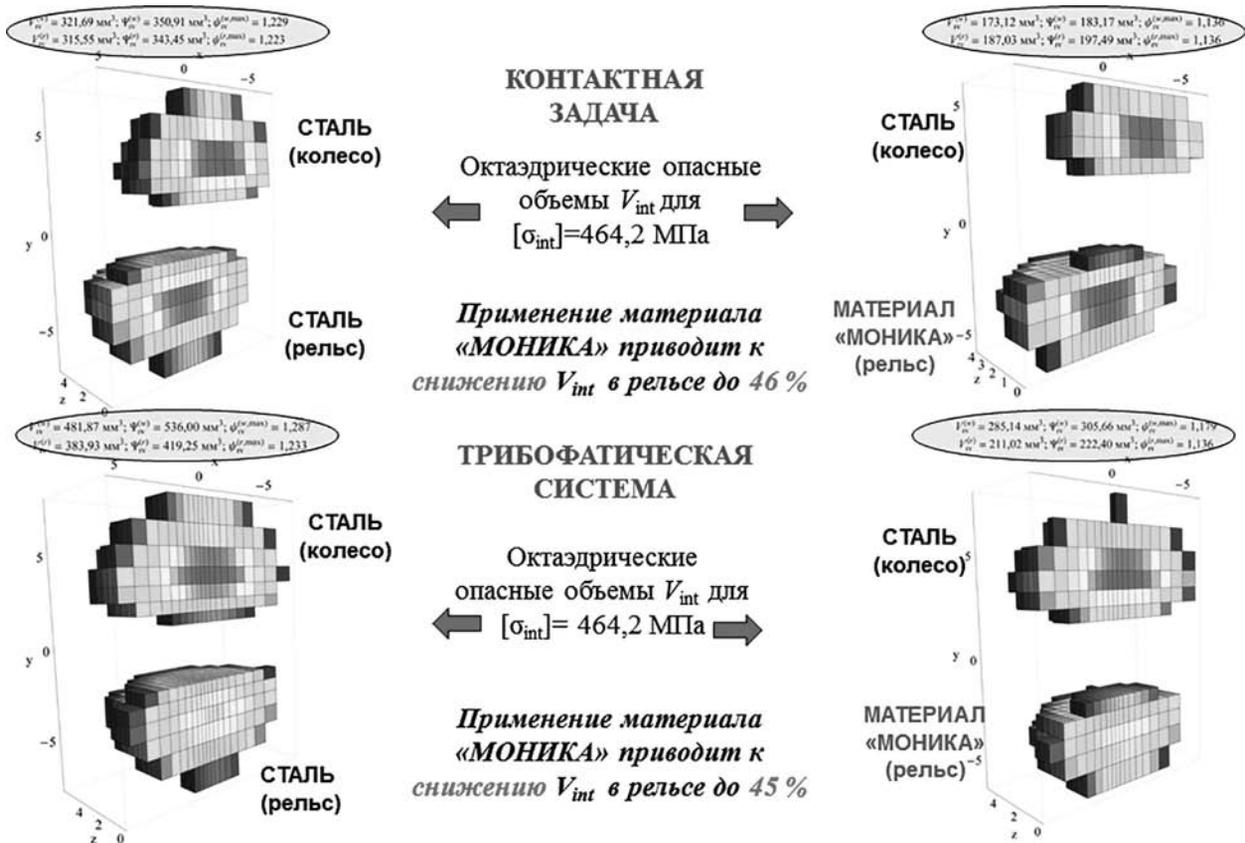


Рисунок 3 — «Колесо — рельс»: интенсивность напряжений σ_{int}

Рисунок 4 — «Колесо — рельс»: опасные объемы V_{int} как характеристика интегральной повреждаемости

ного опасного объема, уменьшается до 45 %. Такие эффекты достигаются в связи с тем, что модуль Юнга для МОНИКИ меньше, чем у стали.

На одном из перечисленных выше заседаний председатель Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь А.Г. Шумилин указал на необходимость оценки риска (безопасности) при эксплуатации новых рельсов. Для расчетов приняты характеристики сопротивления усталости при контактном нагружении и при изгибе, представленные в таблице 4 работы [13], см. также таблицу 1 статьи. Результаты расчетов представлены на рисунке 5. Из него убедительно следует: применение МОНИКИ для изготовления железнодорожных рельсов не только не снижает их безопасность, но даже прогнозируется ее некоторое повышение.

Завершением этого цикла работ были стандартные испытания на изгиб натуральных отрезков рельсов из МОНИКИ (рисунок 5) и, наконец, опытная их эксплуатация на Гомельской дистанции пути в 2012–2014 годах [13, 16]. Эксплуатационные испытания (см. рисунок 5) рельсов из МОНИКИ в условиях организованного движения показали, что они в принципе работоспособны: испытания проведены во все сезоны года — каких-либо повреждений не обнаружено.

Несмотря на известные успехи по проекту Hi-Tech «Литые рельсы», проблема остается острой и нерешенной, поскольку у оппонентов не иссякает целый ряд возражений и вопросов. Так, на

одном из упомянутых выше совещаний академик А.П. Ласковнев указал на необходимость проведения тщательных микроструктурных исследований нового материала и необходимости оценки влияния графитовых включений на сопротивление усталости с учетом того, что они, будучи микроконцентраторами напряжений, могут существенно снизить сопротивление усталости МОНИКИ.

По заказу ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» и ОАО «Гомсельмаш» микроструктурные возможности МОНИКИ были исследованы под руководством академика С.А. Чижика в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси и Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси (под руководством кандидата технических наук В.И. Комаровой) с применением тонких металлофизических методов. Основные результаты обобщены в таблице 2.

Из всего многообразия возможных микроструктурных состояний были выбраны три термообработки образцов ($T_{из.выл.}$ равна 270, 300 и 330 °С) для усталостных испытаний. Указанные режимы термообработки признаны характерными и наиболее представительными для материала МОНИКА. Испытания на усталость вели по стандартной методике [18]. Результаты испытаний представлены на рисунке 6.

Первый и главный вывод из этих результатов испытаний таков: предел выносливости МОНИКИ, находящейся в структурных состояниях, оха-

рактикованных в таблице 2, на базе 10^8 циклов не зависит от микроструктуры материала и равен ~ 243 МПа. Это не ожидаемое заключение, по крайней мере, оно не согласуется с известными закономерностями влияния микроструктуры на сопротивление усталости сталей. Экспериментально показано, например, что мартенситной структуре соответствует более высокий предел выносливости, чем составным структурам «мартенсит + бейнит» или «мартенсит + перлит», при условии, что пределы прочности стали в различных структурных составляющих примерно одинаковы. Феррито-перлитные структуры, как правило, имеют более низкое сопротивление усталости. При этом установлена устойчивая закономерность: уменьшение размера зерна ведет к соответствующему росту предела выносливости. Объясняется это тем, что границы зерен обнаруживают более высокие сопротивления развитию субмикро- и микротрещин, чем тело зерна [19].

Выполним анализ микроструктурных состояний МОНИКИ (см. таблицу 2) с учетом результатов усталостных испытаний (см. рисунок 6). Видно, что микроструктура металлической основы МОНИКИ была существенно различной в зависимости от температуры изотермической выдержки $T_{из.в.д.}$, но форма графитовых включений, их размеры, распределение и плотность оставались примерно одинаковыми. И пределы выносливости образцов с разной твердостью и микроструктурой тоже оказались одинаковыми. Далее все микроструктурные состояния получены для одной плавки с единым соотношением перлита (70%) и феррита (30%) при одинаковом количестве (%) графита

ШГ10. Это означает, по-видимому, что единая металлическая матрица (основа) и одинаковая плотность неметаллических включений и определили практически одинаковый предел выносливости. Отметим, что и рассеяние долговечности образцов при усталостных испытаниях оказалось небольшим в связи с изменением микроструктурного состояния МОНИКИ (рисунок 7): показатели наклона m_σ левой ветви кривой усталости (см. рисунок 6) укладываются в узкую компактную полосу разброса, а абсцисса точки перелома кривой усталости $N_{G\sigma}$ (циклов) (см. рисунок 6) различается всего примерно в 3 раза. Хорошо известно, что рассеяние долговечности в 10...100 раз является характерным для сопротивления усталости [20].

Отметим далее, что размер графитовых включений (ШГд) также был примерно одинаковым для всех микроструктурных состояний, а именно 10...40 мкм. Важное замечание состоит в том, что диаметр графитовых шариков порядка 10 мкм является практически минимальным для МОНИКИ.

Анализ литературных источников [21] показывает, что количество, размер, природа, форма и распределение неметаллических включений в стали существенно влияют на ее сопротивление усталости, поскольку неметаллические включения являются концентраторами напряжений и создают дополнительные поля остаточных напряжений. Имеются сведения, что существует критическая (минимальная) величина неметаллических включений, ниже которой они уже не оказывают заметного влияния на сопротивление усталости. На рисунке 8 показано снижение $\Delta\sigma$ предела выносливости углеродистой стали, вызванное

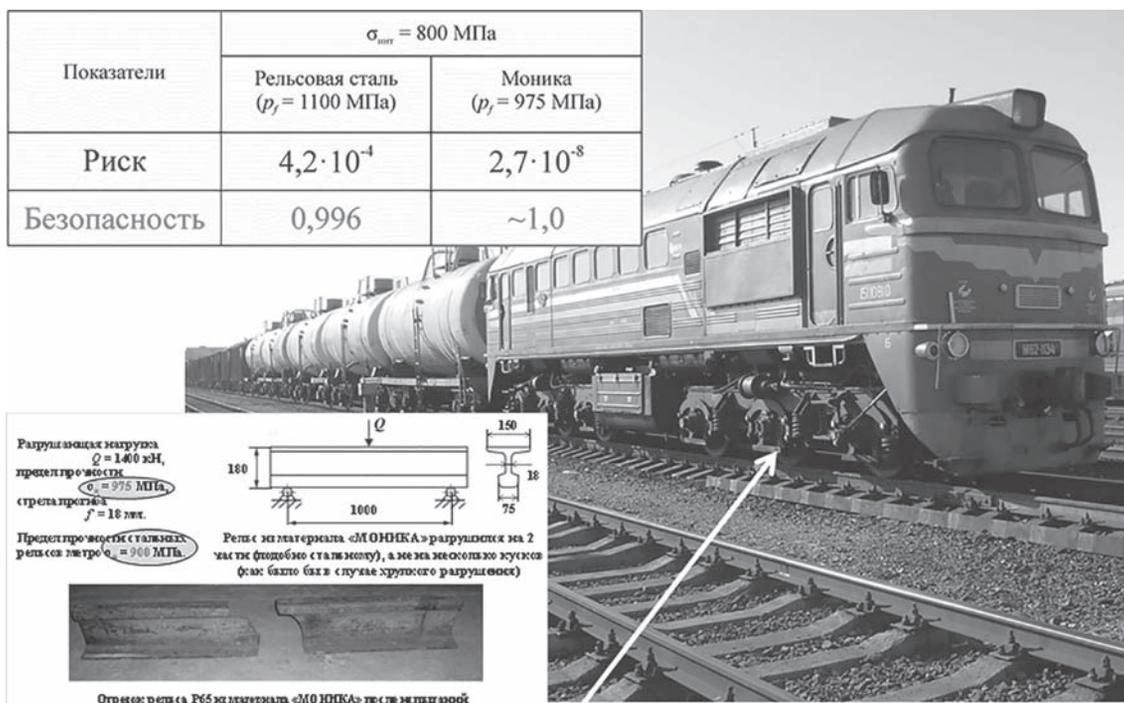
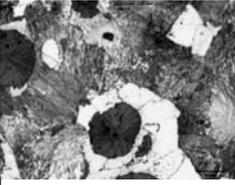
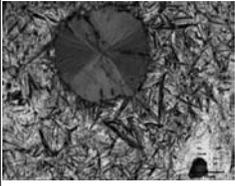
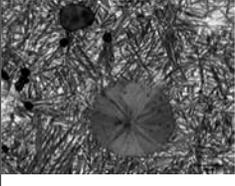
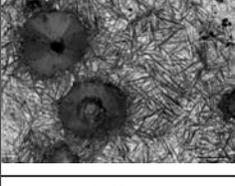
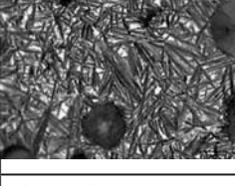
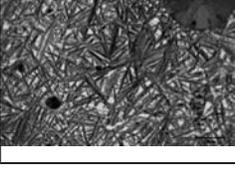


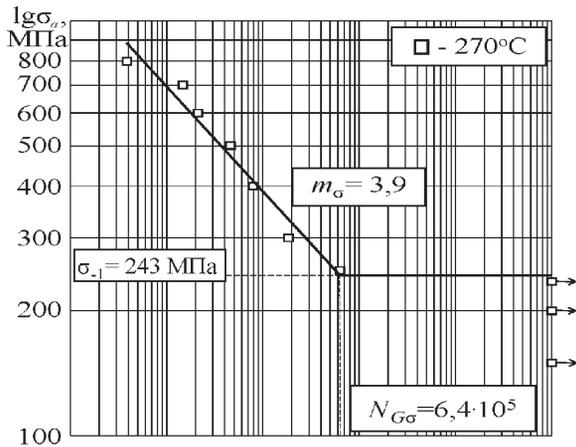
Рисунок 5 — Грузовой состав впервые идет по рельсам из МОНИКИ (вес 3000 тонн): Гомельская дистанция пути (ноябрь 2012 года)

Таблица 2 — Микроструктура МОНИКИ в зависимости от температуры изотермической выдержки $T_{из. выд.}$

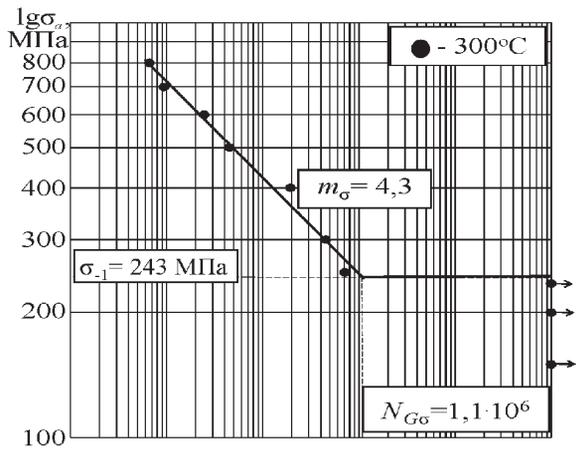
Тиз. выд., °С	Микроструктура металлической основы (×1000)	Параметры α-фазы			Параметры γ-фазы		Твердость по Роквеллу, HRC	Микротвердость фаз H_v , МПа
		Период решетки a , нм	Внутренние микроискажения $\Delta a/a$, 10 ⁻⁴	Размер блоков D , мкм	Период решетки a , нм	Количественное содержание аустенита P , %		
без термообработки	феррит (30%), перлит(70%), бейнит + сорбитообразный перлит, аустенит, карбиды 	0,28664	3,8	0,660	0,36353	6	24	феррит 1630–1950, перлит 3300–3800, бейнит 4150–5500
		Графит в структуре чугуна (ГОСТ 3443)						
250	мелкоигльчатый мартенсит, бейнит (16%), аустенит, карбиды 	0,28705	10,5	0,086	0,36012	15	45	мелкоигльчатый мартенсит 7660–7970, нижний бейнит 8300–8650
		- Форма включений шаровидная неправильная и правильная ШГф5; - Диаметр включений графита ШГд25 – ШГд40; - Распределение включений равномерное ШГр1; - Количество включений (%): ШГ10.						
270	мартенсит, бейнит (20%), аустенит, карбиды 	0,28685	3,5	0,113	0,36256	16	44	нижний бейнит, мартенсит 8650–9020
		- Форма включений шаровидная неправильная и правильная ШГф5; - Диаметр включений графита ШГд25 – ШГд40; - Распределение включений равномерное ШГр1; - Количество включений (%): ШГ10.						
300	мартенсит, бейнит (35%), аустенит, карбид 	0,28672	1,1	0,101	0,36123	18	54	нижний бейнит, мартенсит 6830–7370
		- Форма включений шаровидная неправильная и правильная ШГф5; - Диаметр включений графита ШГд25 – ШГд40; - Распределение включений равномерное ШГр1; - Количество включений (%): ШГ10. - Наблюдаются внутренние трещины.						
330	бейнит (75%), аустенит, карбиды 	0,28651	8,4	0,137	0,36347	16	37	верхний бейнит 5020–5730
		- Форма включений шаровидная неправильная и правильная ШГф5; - Диаметр включений графита ШГд25 – ШГд40; - Распределение включений равномерное ШГр1; - Количество включений (%): ШГ10.						
360	бейнит (70%), аустенит, карбиды 	0,28665	3,5	0,131	0,36317	20	38	верхний бейнит 5360–5920
		- Форма включений шаровидная неправильная и правильная ШГф5; - Диаметр включений графита ШГд25 – ШГд40; - Распределение включений равномерное ШГр1; - Количество включений (%): ШГ10						

присутствием неметаллических включений (цифры у кривых дают значение предела прочности, МПа). Из рисунка 8 следует, что критический

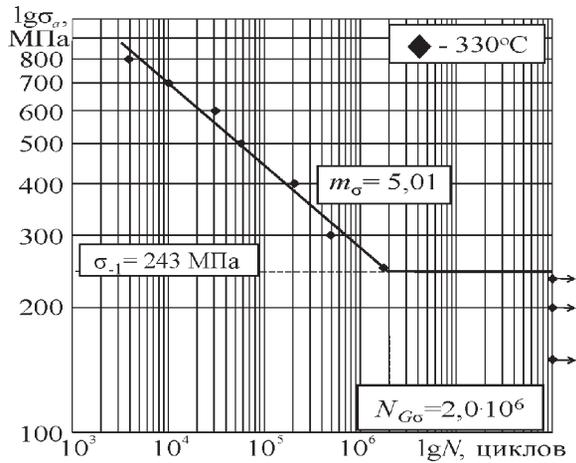
размер d_k включения равен примерно 6,5 мкм. Если области неметаллических включений рассматривать как поры (а это оправдано, когда мо-



а



б



в

Рисунок 6 — Кривые механической усталости МОНКИ.
Микроструктура: а — мартенсит, бейнит (20 %), аустенит; б — мартенсит, бейнит (35 %), аустенит; в — бейнит (75 %), аустенит

дуль упругости металлической матрицы больше модуля упругости неметаллического включения), то аналогично можно установить (рисунок 9): существует некоторый критический размер радиуса r_k концентратора напряжений, меньше которого

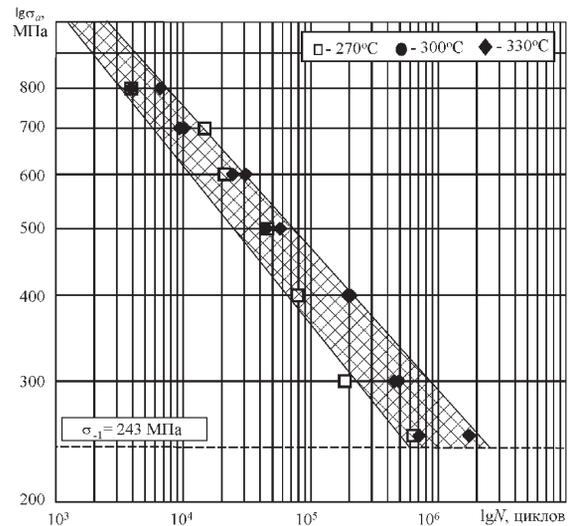


Рисунок 7 — Влияние микроструктуры МОНКИ на рассеяние долговечности

влияние концентрации напряжений не обнаруживается. Для легких сплавов $r_k \sim 0,01 \text{ мм} = 10 \text{ мкм}$. По обоим этим критериям материал МОНИКА должен быть чувствительным к концентрации напряжений, поскольку размер графитовых зерен составляет, как указывалось, 10–40 мкм. Именно это обстоятельство и определило полученные результаты усталостных испытаний (см. рисунок 7). Наконец, на рисунке 10 показано влияние заполнителя с разными модулями нормальной упруго-

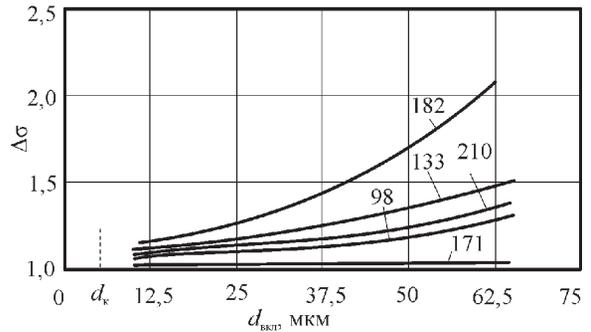


Рисунок 8 — Влияние размера неметаллических включений на изменение предела выносливости стали

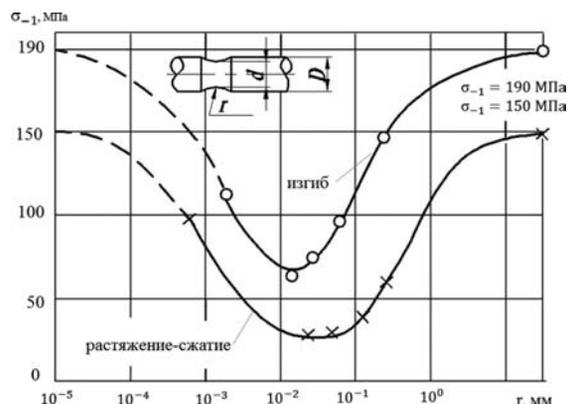


Рисунок 9 — Влияние концентрации напряжений на сопротивление усталости алюминиевого сплава

сти (E_1, E_2, \dots, E_3) на величину α_σ для дефекта круглой формы (1 — $E_1 = 0$; 2 — $E_2 < E_0$; 3 — $E_3 = E_0$; 4 — $E_4 > E_0$; 5 — $E_5 \rightarrow \infty$; E_0 — модуль упругости матрицы). Из рисунка 3 следует, что не всякое неметаллическое включение приводит к концентрации напряжений, а только такое, у которого $E < E_0$ (если же $E > E_0$, то в таком случае неметаллическое включение не снижает σ_{-1}). Это заключение вполне соответствует данным для МОНИКИ.

Выполненный анализ указывает возможный путь к дальнейшему повышению сопротивления усталости материала МОНИКА: надо увеличить размеры графитовых включений при повышении их однородности. Это может быть достигнуто, например, путем соответствующего изменения соотношения перлит / феррит в металлической основе. Это подтверждается результатами испытаний на усталость плавки № 25 МОНИКИ (см. таблицу 1): для нее $\sigma_{-1} = 290$ МПа. А для исследованного состояния МОНИКА имеет, по-видимому, минимальное значение предела механической усталости ($\sigma_{-1} = 243$ МПа). Именно это значение и закладывается в основной нормативный документ — государственный стандарт на новый конструкционный материал. Разработка этого стандарта будет завершена в 2017 году в соответствии с планом государственной стандартизации Республики Беларусь (тема 2.1.3-001.14). Научно-методическое обоснование стандарта выполняется по заданию ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» (подпрограмма «Металлургия»).

В этой связи трудно не согласиться с авторами работы [2], которые пришли к заключению, что разработанный материал МОНИКА — лишь первый представитель возможного нового класса (СВЧ-ТГ) железоуглеродистых сплавов, который можно было бы назвать сталистым чугуном (или молибденовым чугуном). Ожидается, что в скором времени будут найдены и другие составы таких материалов с неожиданными (необычными) свойствами. Это означает, что дальнейшие исследова-

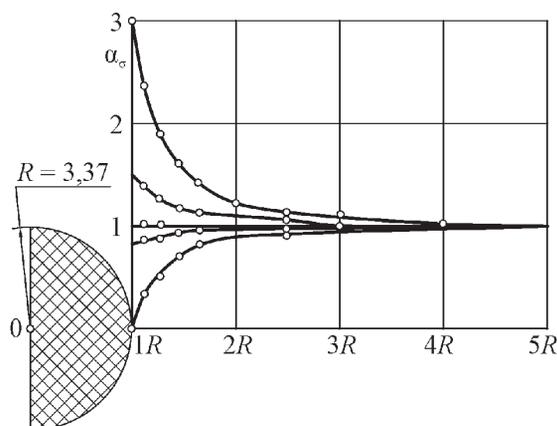


Рисунок 10 — Влияние неметаллических включений на величину теоретического коэффициента концентрации напряжений

ния в этом направлении следует считать и актуальными и перспективными.

Что же касается проблемы Ni-Tech «Литые рельсы», то она, будучи масштабной, неординарной, спорной и стратегически значимой, является и высокоэффективной экономически. Именно стоимостной фактор и дает ей практическую перспективу. Поэтому в настоящее время соответствующий комплекс НИОКР продолжает формироваться в сотрудничестве со странами, для которых производство рельсов является задачей большой государственной важности.

Следует особо подчеркнуть перспективность МОНИКИ в связи с развитием тяжеловесного движения на железных дорогах России. С.С. Щербаков и Л.А. Сосновский представили доклад «Об оптимизации трибофатической системы «колесо — рельс» для тяжеловесного движения» на заседании Научно-технического совета ОАО «РЖД» «О развитии тяжеловесного движения, в том числе по результатам опытной эксплуатации вагонов с нагрузкой 25 и 27 тс» (Москва, 27 июля 2016 г.). Заседание вел президент ОАО «РЖД» О.В. Белозеров. В частности, было предложено [22] изготавливать из МОНИКИ железнодорожное колесо. Одно из обоснований следующее. Если в системе «колесо — рельс», один из элементов которой изготовлен из МОНИКИ, интенсивность напряжений σ_{int} (при прочих равных условиях) уменьшается до 8–10 % (см. рисунок 3) в случае «нормального» движения (24 тс), то это означает: при сохранении той же эксплуатационной стойкости рельсов осевые нагрузки можно повысить до 27...29 тс. Тем самым, по существу, решается начальная задача обеспечения тяжеловесного движения, особенно если учесть и новое предложение авторов доклада усовершенствовать (оптимизировать) геометрию контакта системы «колесо — рельс» [22].

В связи с предложением изготавливать из МОНИКИ железнодорожные колеса, особое значение приобретает сопротивление материала контактной усталости. Один из результатов экспериментальных исследований (в условиях точечного контакта) представлен на рисунке 11. Видно, что предел выносливости при контактной усталости на базе 10^8 циклов равен примерно $p_f = 3750$ МПа. Это существенно превышает его значение, указанное в таблице 1. Оно получено в случае рациональной термообработки МОНИКИ, которая обеспечивает соответствующую микроструктуру материала. Экспериментальными исследованиями (которые здесь не излагаются) показано, что для формирования требуемого сопротивления контактной усталости микроструктура материала оказывается более сильным фактором, чем система графитовых включений. Более того, экспериментально установлена положительная роль графитовых включений: они обеспечивают смазываемость пары трения и существенно сни-

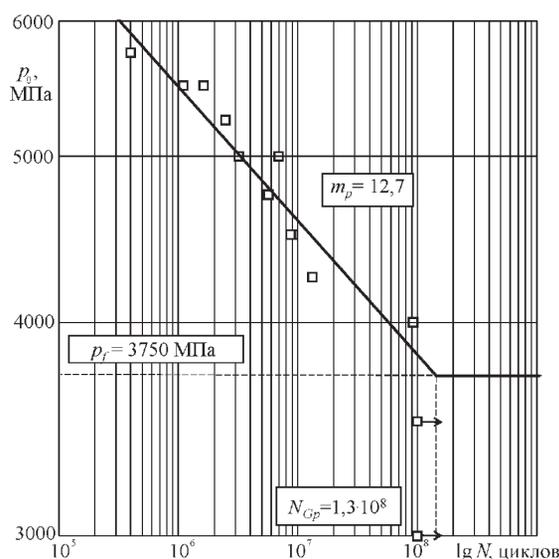


Рисунок 11 — Кривая контактной усталости МОНИКИ

жают коэффициент трения в ней [23]. Переоценить значение этих явлений трудно, принимая во внимание, что сверхинтенсивный износ привел стальные железные дороги мира к так называемому колесно-рельсовому вирусу (см., например, [10]), который обеспечивает колоссальные материальные потери. В этой связи применение МОНИКИ опять-таки оказывается благотворным: износ (как мера повреждаемости) в системе «колесо — рельс» может быть (см. рисунок 4) уменьшен на 30...50 % и более.

Закключение. 1. Характеристики сопротивления механической усталости нового конструкционного материала МОНИКА весьма чувствительны к микроструктурному его состоянию в том смысле, что оно определяется размерами и плотностью графитовых включений, которые играют роль рассеянных микроконцентраторов напряжений. Аналогичное влияние неметаллических включений и пустот характерно и для других металлических материалов (стали, алюминиевые сплавы и др.).

2. Характеристики сопротивления механической усталости МОНИКИ практически нечувствительны к строению блоков и типу микроструктурных составляющих металлической матрицы, когда размеры графитовых включений составляют примерно 10...40 мкм. Оказывается, что микроструктурная концентрация напряжений (на границах раздела составляющих блоков и зерен, или связанная, например, с микроискажениями кристаллической решетки (см. таблицу 2) — фактор значительно более слабый, чем графитовые включения.

3. Минимальное значение предела выносливости на базе 10^8 циклов при наиболее опасном — симметричном цикле напряжений — составляет для МОНИКИ примерно 243 МПа. Оно может быть повышено примерно до 300 МПа при рациональных (оптимальных) размерах графитовых

включений. В таком случае следует ожидать, что дополнительный рост предела выносливости МОНИКИ может быть обеспечен путем оптимизации микроструктуры материала в результате соответствующей термообработки. Как известно, такой путь является весьма эффективным при формировании сопротивления усталости стали.

4. Сопротивление МОНИКИ контактной усталости, напротив, определяется ее микроструктурным состоянием, тогда как графитовые включения (опять же, напротив) играют полезную роль, обеспечивая самосмазываемость пары трения при качении (и, следовательно, соответствующее снижение коэффициента трения). Предел выносливости МОНИКИ при контактной усталости достигает значения $p_f = 3750$ МПа (точечный контакт). Прогнозируется, что износостойкость пары трения при этом повышается примерно в 1,5 раза. Как известно, конструкционные стали подобными свойствами не обладают.

В исследованиях принимали участие сотрудники упомянутых выше организаций. Всем им авторы статьи выражают благодарность.

Список литературы

1. Сталь и чугун: конкуренция продолжается в области высокопрочных состояний / Л.А. Сосновский [и др.] // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения: тр. междунар. конф., посвящ. 75-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 21–22 нояб. 2013 г. // ИМАШ РАН им. А. А. Благонравова, 2013. — С. 99.
2. 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.
3. Новый высокопрочный материал с особыми свойствами для машиностроения: настоящее и будущее / Л.А. Сосновский [и др.] // Живучесть и конструкционное материаловедение: междунар. конф., Москва, 22–24 окт. 2012 г. / ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова. — М., 2012.
4. Roedter, H. ADI – Austempered Ductile Iron / H. Roedter (фирма RTIRON&TITANUM GMBH) // Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей: инф. сб. техн. материалов / под ред. Н.Н. Александрова [и др.]. — М., 2004. — С. 249–258.
5. Покровский, А.И. Использование высокопрочного бейнитного чугуна для изготовления зубчатых колес / А.И. Покровский, Л.Р. Дудецкая // Литье и металлургия. — 2015. — № 2(79). — С. 126–134.
6. Корниенко, Э.Н. Перспективы производства отливок из ЧШГ аустенитно-бейнитного класса / Э.Н. Корниенко, А.Г. Панов, Д.Ф. Хальфин // Литейщик России. — 2014. — № 6. — С. 11–16.
7. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как конкурент упрочненной стали / В.А. Жмайлик [и др.] // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), Минск, 25 окт. — 1 нояб. 2010 г. / БГУ; редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. — Минск, 2010. — Т. 2. — С. 73–77.
8. Структура и свойства специального высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В.О. Зяматнин [и др.] // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), Минск, 25 окт.—1 нояб. 2010 г. / БГУ; редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. — Минск, 2010. — Т. 2. — С. 79–84.
9. Железнодорожные рельсы из высокопрочного чугуна. Постановка проблемы / Л.А. Сосновский [и др.] //

- Комплексная система содержания инфраструктуры ОАО «РЖД»: материалы науч.-практ. конф., Москва, 28 окт. 2009 г. / ОАО «РЖД». — М.: 2009. — С. 74–78.
10. Garanovich, V.A. What Must Surface Hardness of Rails Be? / V.A. Garanovich, L.A. Sosnovskiy // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), Минск, 25 окт.–1 нояб. 2010 г. / БГУ; редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. — Минск.: 2010. — Т. 1. — С. 179–186.
 11. О перспективности изготовления железнодорожных рельсов из высокопрочного чугуна / В.И. Сенько [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте: тез. докл. V Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 25–26 нояб. 2010 г. / БелГУТ. — Гомель, 2010. — С. 199–200.
 12. 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 ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2013. — С. 54–55.
 13. 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. / ИМАШ РАН им. А. А. Благонравова. — М., 2014. — С. 41.
 14. Литые рельсы из специального чугуна — важный инновационный проект / Л.А. Сосновский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — 2012. — Вып. 1.
 15. О перспективах производства железнодорожных рельсов из специального чугуна / Л.А. Сосновский [и др.] // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: III Междунар. науч. практич. конф., посвящ. 60-летию БелИИЖТа БелГУТа, Гомель, 17–18 окт. 2013 г. — Гомель, 2013.
 16. Матвеев, В.И. Опыт изготовления и испытаний рельсов длиной 6,5 м из специального чугуна / В.И. Матвеев, Н.Е. Мирошников // Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2013. — Вып. 2. — С. 405–407.
 17. Сенько, В.И. Введение / В.И. Сенько // Вест. БелГУТа: Наука и транспорт. — 2016. — № 1(32). — С. 6–9.
 18. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость (Межгосударственный стандарт): ГОСТ 30754–2001. — Введ. 01.07.02. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. — 32 с.
 19. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. — М.: Металлургия, 1975. — 455 с.
 20. Трошенко, В.Т. Сопrotивление усталости металлов и сплавов: справ.: в 2 т. / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. — Киев: Наук. думка, 1987. — Т. 1. — 510 с.; Т. 2. — 825 с.
 21. Сосновский, Л.А. Механика усталостного разрушения: словарь-справ. / Л.А. Сосновский. — Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1994. — Т. 1. — 328 с.; Т. 2. — 340 с.
 22. Трибофатическая система «колесо — рельс» для тяжелого движения: повышение нагрузок и... снижение затрат? / Л.А. Сосновский [и др.] // Вестн. БелГУТа: Наука и транспорт. — 2016. — № 1(32). — С. 219–226.
 23. Сосновский, Л.А. Экспериментальное исследование влияния проскальзывания на изменение характеристик трения при качении / Л.А. Сосновский, В.В. Комиссаров, С.А. Тюрин // Вестн. БелГУТа: Наука и транспорт. — 2016. — № 1(32). — С. 116–125.

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

Director¹

E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

NOVIKOV Alexander A.

Deputy General Director for Technical Issues and Quality - Chief Engineer²

E-mail: iznoslab@mail.ru

SHERBAKOV Sergey S., D. Sc. in Phys. and Math.

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics³

E-mail: sherbakovss@mail.ru

COMMISSAROV Victor V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.⁴

E-mail: komissarov@belsut.gomel.by

TYURIN Sergey A., Ph. D. in Eng.

Leading Specialist²

E-mail: iznoslab@mail.ru

DROBYSHEVSKIY Pavel S.

Head of the Laboratory²

E-mail: iznoslab@mail.ru

¹S&P GROUP TRIBOFATIGUE Ltd, Gomel, Republic of Belarus

²OJSC “Gomselmash”, Gomel, Republic of Belarus

³Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

⁴Belorussian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Received 01 June 2017.

CONSTRUCTION MATERIAL FOR TRIBO-FATIGUE SYSTEMS: FATIGUE RESISTANCE AND STRUCTURE

A brief overview of the practical use of the new construction material of MONICA is given. An experimental study was performed for the first time on the analysis of the influence of the microstructural state on fatigue resistance.

It is established that the fatigue limit of this material, based on 10^8 cycles, is not lower than 243 MPa. The role of the stress concentration in the vicinity of nonmetallic (graphite) inclusions on the formation of the fatigue resistance of MONICA is discussed. The ways of possible increase of the fatigue limit of this material up to ~300 MPa and more are indicated.

Keywords: tribo-fatigue system, structural material, cast iron, MONICA, gear wheels, “wheel — rail” system, “knife — counter beam”, microstructure, graphite inclusions, fatigue resistance, strength, ductility, heavy traffic

References

- Sosnovskiy L.A. [et al.] Stal i chugun: konkurencija prodolzhaetsya v oblasti vysokoprochnykh sostojanij [Steel and cast iron: competition continues in the field of high-strength states]. *Trudy Mezhdunar. konf., posvyashhennoj 75-letiju Instituta mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN “Mashiny, tehnologii i materialy dlja sovremennogo mashinostroeniya”* [Proc. of the Int. Conf. on the 75th anniversary of the A.A. Blagonravov Institute of Engineering Science of the RAS “Machines, technologies and materials for modern engineering”]. Moscow, 2013. 99 p.
- Sosnovskiy L.A. [et al.] Chugun i stal v tribofaticheskikh sistemah sovremennykh mashin i oborudovaniya [Cast iron and steel in tribo-fatigue systems of modern machines and equipment]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2014, no. 4(29), pp. 5–20.
- Sosnovskiy L.A. [et al.] Novyj vysokoprochnyj material s osobymi svoystvami dlja mashinostroeniya: nastojashchee i budushchee [New high-strength material with special properties for mechanical engineering: present and future]. *Trudy Mezhdunar. konf. “Zhivuchest i konstrukcionnoe materialovedenie”* [Proc. Int. Conf. “Vitality and Structural Material Science”]. Moscow, 2012.
- Aleksandrov N.N., Roedter H. [et al.] ADI — Austempered Ductile Iron. Chuguny s sharovidnym i vermikuljarnym grafitom i austenitno-bejnitnoy matricej. *Sovremennye materialy dlja lityh detalej: informacionnyj sbornik tehnikeskikh materialov* [Cast iron with spherical and vermicular graphite and austenitic-bainitic matrix. Modern materials for cast parts: information collection of technical materials], Moscow, 2004, pp. 249–258.
- Pokrovskiy A.I., Dudeckaya L.R. Ispolzovanie vysokoprochnogo bejnitnogo chuguna dlja izgotovleniya zubchatykh koles [Use of high-strength bainitic iron for manufacturing gear wheels]. *Lite i metallurgija* [Casting and metallurgy], 2015, no. 2(79), pp. 126–134.
- Kornienko E.N., Panov A.G., Halfin D.F. Perspektivy proizvodstva otlivok iz ChShG austenit no-bejnitnogo klassa [Prospects for the production of castings from austenitic-bainitic cast iron]. *Litejshhik Rossii* [Foundry of Russia], 2014, no. 6, pp. 11–16.
- Zhmailik V.A. [et al.] Specialnyj vysokoprochnyj chugun s sharovidnym grafitom kak konkurent uprochnennoj stali [Special high-strength cast iron with nodular graphite as a competitor to reinforced steel]. *Trudy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike* [Proc. VI Int. Symp. on Tribo-Fatigue]. Minsk, 2010, vol. 2, pp. 73–77.
- Zamyatnin V.O. [et al.] Struktura i svoystva spetsialnogo vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom [Structure and properties of special high-strength cast iron with nodular graphite]. *Trudy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike* [Proc. VI Int. Symp. on Tribo-Fatigue]. Minsk, 2010, vol. 2, pp. 79–84.
- Sosnovskiy L.A. [et al.] Zheleznodorozhnyye relsy iz vysokoprochnogo chuguna. Postanovka problemy [Railway rails of high-strength cast iron. Formulation of the problem]. *Trudy nauch.-prakt. konf. “Kompleksnaya sistema soderzhaniya infrastruktury OAO “RZHD”* [Proc. Scientific-Practical Conf. “Complex system of infrastructure maintenance of JSCo “Russian Railways”]. Moscow, 2009, pp. 74–78.
- Gapanovich V.A., Sosnovskiy L.A. What Must Surface Hardness of Rails Be? *Trudy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike* [Proc. VI Int. Symp. on Tribo-Fatigue]. Minsk, 2010, vol. 1, pp. 179–186.
- Senko V.I. [et al.] O perspektivnosti izgotovleniya zheleznodorozhnykh relsov iz vysokoprochnogo chuguna [On the prospects of manufacturing railway rails from high-strength cast iron]. *Trudy V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. “Problemy bezopasnosti na transporte”* [Proc. V Int. scientific-practical conf. “Problems of transport security”]. Gomel, 2010, pp. 199–200.
- Sosnovskiy L.A., Matvetsov V.I., Psyrvok N.V. Ob izgotovlenii zheleznodorozhnykh relsov iz vysokoprochnogo chuguna [On manufacturing of railway rails from high-strength cast iron]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoj 100-letiyu professora M.A. Frishmana “Problemy vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava”* [Proc. Int. Scientific-Practical Conf., devoted to the 100th anniversary of Professor M.A. Frishman “Problems of interaction between the track and the rolling stock”]. Dnepropetrovsk, 2013, pp. 54–55.
- Matvetsov V.I., Miroshnikov N.E., Sosnovskiy L.A. Naturnyye ispytaniya tyazhelykh zheleznodorozhnykh relsov iz chuguna VCHTG [Full-scale testing of heavy railway rails from cast iron VCTG]. *Trudy 2 Mezhdunar. konf. “Zhivuchest i konstrukcionnoe materialovedeniye”* [Proc. 2nd Int. Conf. “Vitality and structural materials science”]. Moscow, 2014. 41 p.
- Sosnovskiy L.A. [et al.] Lityye relsy iz spetsialnogo chuguna — vazhnyy innovatsionnyy proyekt [Molded rails of special cast iron — an important innovative project]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. “Innovatsii v mashinostroyenii—2012”* [Proc. Int. Scientific and Technical Conf. “Innovations in Mechanical Engineering—2012”]. Minsk, 2012.
- Sosnovskiy L.A. [et al.] O perspektivakh proizvodstva zheleznodorozhnykh relsov iz spetsialnogo chuguna [On the prospects for the production of railway rails from special cast iron]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. “Problemy i perspektivy razvitiya transportnykh sistem i stroitel'nogo kompleksa”* [Proc. III Int. Scientific and Practical Conf. “Problems and Perspectives of the Development of Transport Systems and the Building Complex”]. Gomel, 2013.
- Matvetsov V.I., Miroshnikov N.E. Opyt izgotovleniya i ispytaniya relsov dlinoy 6,5 m iz spetsialnogo chuguna [Experience in the manufacture and testing of 6.5 m long rails of special cast iron]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. tr.* [Topical Issues of Mechanical Engineering: collection of scientific papers], 2013, vol. 2, pp. 405–407.
- Senko V.I. Vvedeniye [Introduction]. *Vestnik BelGUTA: Nauka i transport* [Bulletin of BelSUT: Science and Transport], 2016, no. 1(32), pp. 6–9.
- GOST 30754-2001. Tribofatika. Metody iznosoustalostnykh ispytaniy. *Ispytaniya na kontaktno-mekhanicheskuyu ustalost* [State Standart 30754–2001. Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Tests Methods. Mechano-Rolling Fatigue Tests]. Minsk, 2002. 32 p.
- Ivanova V.S., Terentyev V.F. *Priroda ustalosti metallov* [Nature of metal fatigue]. Moscow, Metallurgiya, 1975. 455 p.
- Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. *Soprotivleniye ustalosti metallov i splavov: spravochnik* [Resistance to fatigue of metals and alloys: a reference book]. Kiev, Naukova dumka, 1987, vol. 1. 510 p., vol. 2. 825 p.
- Sosnovskiy L.A. *Mekhanika ustalostnoye razrusheniye: slovar-spravochnik* [Mechanics of fatigue failure: a dictionary-reference]. Gomel, NPO “TRIBOFATIKA”, 1994, vol. 1. 328 p., vol. 2. 340 p.
- Sosnovskiy L.A. [et al.] Tribofaticheskoy sistema koleso / rels dlya tyazhelovestnogo dvizheniya: povysheniye nagruzok i ... snizheniye zatrat? [A tribo-fatigue wheel / rail system for heavy traffic: increasing loads and ... reducing costs?]. *Vestnik BelGUTA: Nauka i transport* [Bulletin of BelSUT: Science and Transport], 2016, no. 1(32), pp. 219–226.
- Sosnovskiy L.A., Konissarov V.V., Tyurin S.A. *Eksperimentalnoye issledovaniye vliyaniya proskalyzvaniya na izmeneniye kharakteristik treniya pri kachenii* [Experimental study of the influence of slip on the change in frictional characteristics during rolling]. *Vestnik BelGUTA: Nauka i transport* [Bulletin of BelSUT: Science and Transport], 2016, no. 1(32), pp. 116–125.