



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.

доцент кафедры⁴

С.А. ТЮРИН, канд. техн. наук

ведущий специалист²

E-mail: iznoslab@mail.ru

П.С. ДРОБЫШЕВСКИЙ

начальник лаборатории²

E-mail: iznoslab@mail.ru

С.В. ТОКАРЬ

заместитель директора¹

E-mail: tribo-fatigue@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 11.05.2017.

КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: РАССЕЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Изложены результаты первых статистических исследований механических свойств нового конструкционного материала МОНИКА. Установлены статистические параметры пределов прочности и текучести, относительного удлинения, модуля Юнга и твердости. Анализируются взаимосвязи характеристик прочность — пластичность и прочность — твердость для этого материала.

Ключевые слова: рассеяние свойств, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение при разрыве, твердость, модуль Юнга, кривая растяжения, эмпирическая функция распределения случайной величины, параметры функции распределения

В течение 10 лет для разных целей было проведено большое число испытаний на растяжение нового конструкционного материала ВЧТГ,

получившего также название МОНИКА. Массивы соответствующих детерминированных опытных данных широко обсуждались и опубликованы

Протокол испытания

Номер заказа:
 Партия:
 Заказчик: ООО «НПО ТРИБОФАТИКА»
 Материал: ВЧТГ
 Поставщик: ОАО «Гомсельмаш»
 Термообработка: 44-49 НРС
 Рабочая карта:
 Оператор: Дробышевский

Исполнитель: ЛИИ
 Дата испытания: 12.01.2017
 Стандарт испытания: ГОСТ 1497-84
 Тип испытания: Растяжение



Статика	Rm [MPa]	Fm [kN]	A [%]	Z [%]	Emod [GPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	S-Rp2 [MPa]
СТБ ВЧТГ 3.04	1423.23	71.18	2.16	4.95	144.18	0.00	0.00	971.08
СТБ ВЧТГ 3.16	1482.15	72.28	2.40	2.52	156.55	0.00	0.00	989.26
СТБ ВЧТГ 3.17	1434.64	71.04	2.11	3.99	155.04	0.00	0.00	931.65
СТБ ВЧТГ 3.21	1404.11	70.05	2.53	4.71	148.70	0.00	0.00	810.11
СТБ ВЧТГ 3.28	1429.11	71.83	2.44	5.42	144.39	0.00	0.00	937.36
СТБ ВЧТГ 3.36	1431.88	71.44	2.59	4.71	156.71	0.00	0.00	889.86
СТБ ВЧТГ 3.42	1450.44	72.72	2.42	5.19	148.22	0.00	0.00	936.83
СТБ ВЧТГ 3.44	1434.20	72.27	2.38	5.66	149.80	0.00	0.00	957.58
СТБ ВЧТГ 3.49	1398.12	70.10	2.17	5.19	138.21	0.00	0.00	818.71
СТБ ВЧТГ 3.60	1400.08	66.05	2.21	-0.78	160.49	0.00	0.00	797.79
AM	1428.80	70.90	2.34	4.16	150.23	0.00	0.00	904.02

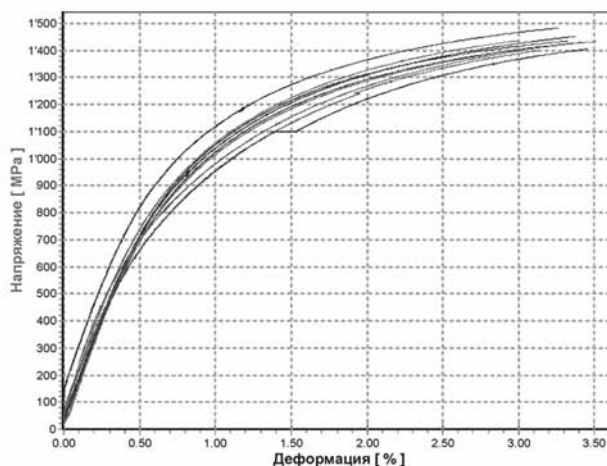


Рисунок 1 — Типичный протокол испытаний ($R_m - \sigma_B, A - \delta, E_{mod} - E, S-Rp2 - \sigma_{0,2}$)

ны [1, 2]; установлены и некоторые взаимосвязи между отдельными характеристиками механических свойств, например, прочность — пластичность, прочность — твердость и т. д. Основные характеристики свойств могут быть использованы в детерминированных расчетах на прочность и жесткость. Поэтому в 2013 году был разработан и введен в действие стандарт предприятия (ОАО «Гомсельмаш») СТП 315-647-2013 «Общие требования к механическим свойствам высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ по характеристикам прочности и пластичности при растяжении, механической и контактной усталости, ударной вязкости и твердости».

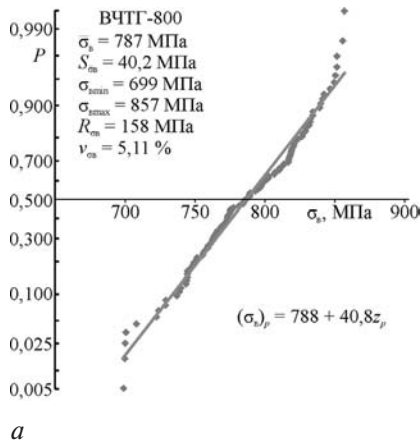
Поскольку практическое применение материала МОНИКА расширяется для весьма ответственных трибофатических систем современных машин и оборудования, назрела необходимость исследования его статистических свойств, которые можно было бы использовать для вероятностных методов расчета на прочность и жесткость в машиностроении. А возможная стандартизация таких свойств должна обеспечить соответствующее качество МОНИКИ при производстве на разных предприятиях Республики Беларусь. В настоящее время ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» и ОАО «Гомсельмаш» разрабатывают государственный стандарт Республики Беларусь СТБ «Высокопрочный чугун с шаровидным графитом и высоким сопротивлением усталости. Марки и механические свойства» (тема 2.1.3-001.14). Научно-методическое обоснование будущего стандарта проводится в Белорусском государственном университете и Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси по заданию ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» (подпрограмма «Металлургия»). В данной статье используются результаты соответствующих экспериментальных исследований, выполненных организациями-разработчиками государственного стандарта.

Для исследований и испытаний принят серийный материал МОНИКА, микроструктур-

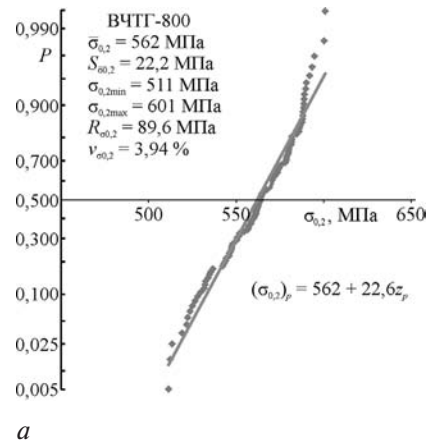
ное строение и усталостные свойства которого описаны в [1, 2]. Ниже изложены результаты его статистических испытаний на растяжение, одновременно сделаны и необходимые измерения твердости по Роквеллу.

Испытаниям на растяжение подвергали стандартные образцы диаметром 8 мм, изготовленные из одной плавки по стандартной методике. Испытания вели, используя высокоточную машину LFV 100.1 фирмы Walter+Bai AG (Швейцария). Применение этой машины было эффективным, так как на ней автоматически записывается кривая растяжения (рисунок 1) и одновременно определяется весь комплекс свойств: предел прочности σ_B , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение при разрыве δ и модуль Юнга E (см. рисунок 1). Это позволяет исключить возможные ошибки человека-оператора. Погрешность (точность) определения всех свойств не хуже 1,5 %.

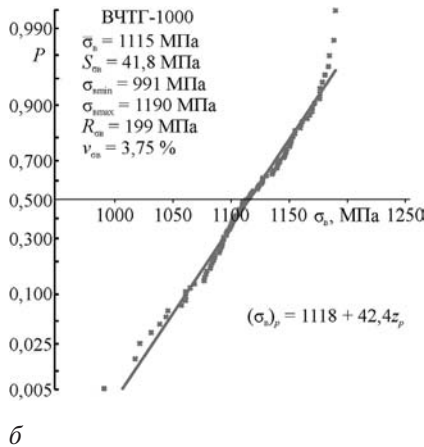
Результаты статистических испытаний обрабатывали по известным методикам и программам [3–6]. Они представлены на рисунках 2–6. Принятые обозначения параметров распределения случайных величин X_i ($\sigma_B, \sigma_{0,2}, \delta, E, НРС$): \bar{X} — средние значения; $S_{\bar{X}}$ — средние квадратические отклонения; X_{\min} и X_{\max} — экстремальные значения, соответствующие вероятностям $P_{\min} = 0,015$ и $P_{\max} = 0,995$ (их оказалось возможным определить ввиду того, что объем выборки $n = 100$ значений случайной величины); $\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$ — размах рассеяния случайной величины и $v_X = S_{\bar{X}} / \bar{X}$ — коэффициент их вариации. Из рисунков 2–6 можно видеть, что изменения средних значений случайных величин были весьма широкими: от ~800 до ~1450 МПа для пределов прочности, от ~550 до ~1000 МПа для пределов текучести, от ~0,5 до ~2,5 % и для модуля Юнга от ~130 до ~150 МПа. Для твердости НРС они составляли от ~20 до ~50 единиц. А коэффициенты вариации для пределов прочности и текучести не превышают 5,62 % и для твердости — не выше 2,6 %.



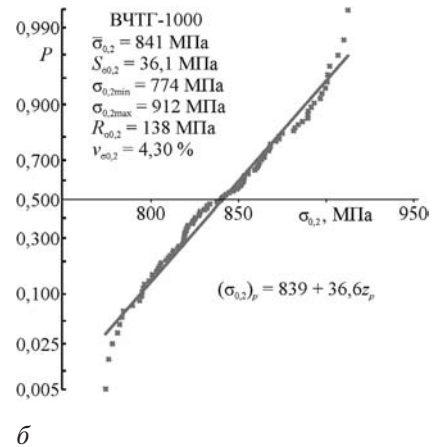
a



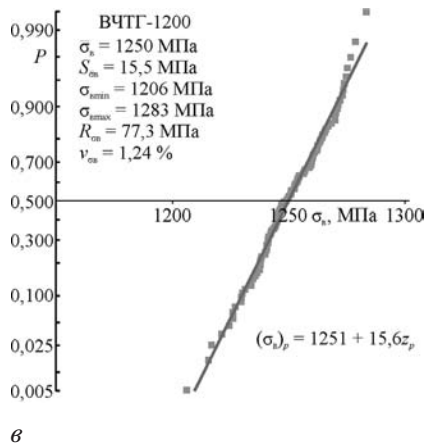
a



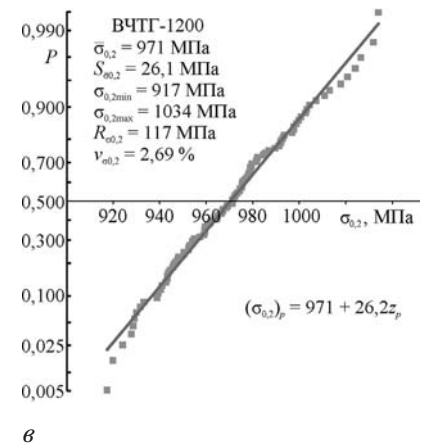
б



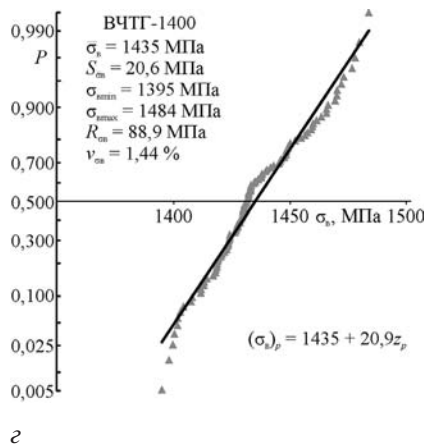
б



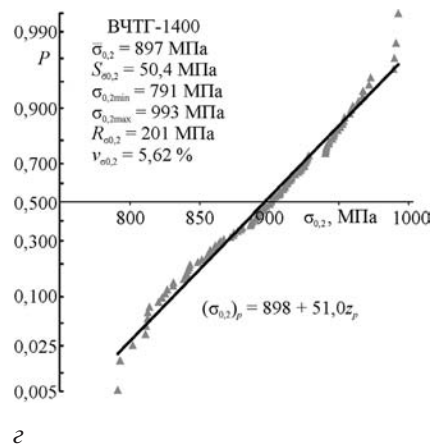
в



в



г



г

Рисунок 2 — Эмпирические функции распределения пределов прочности

Рисунок 3 — Эмпирические функции распределения пределов текучести

Таблица 1 — Прочность рельсовой стали (ГОСТ Р 51685–2013)

Категория рельсов	Временное сопротивление, $\sigma_{\text{вmin}}$, МПа	Твердость на поверхности катания, HRC
ОТ370ИК	1280	40–44
ДТ370ИК		
ОТ350	1180	38–43
ОТ350НН		
ОТ350СС		
ДТ350		
ДТ350НН		
ДТ350СС	1080	—
ДТ350ВС		
НТ320		
НТ320ВС	980	—
НТ300		
НТ260		
НТ260		

Таблица 2 — Прочность и твердость материала МОНИКА по статистическим данным

Марка чугуна	Временное сопротивление, σ , МПа	Твердость, \overline{HRC}
ВЧТГ-800	787	22
ВЧТГ-1000	1115	53
ВЧТГ-1200	1250	39
ВЧТГ-1400	1435	45

Видно, что МОНИКА имеет уникальные возможности варьирования уровня основных механических свойств, которые позволяют использовать ее для изготовления самых многообразных элементов трибофатических систем, технические требования к которым существенно различаются. В качестве обобщенного примера для анализа примем тяжелые железнодорожные рельсы при условии, что изготавливать их рекомендуется из МОНИКИ (см., например, [1, 2]).

В таблице 1 приведены известные требования к основным свойствам материалов для рельсов: по государственному стандарту — для стальных рельсов и для рельсов из МОНИКИ — по стандарту предприятия. Нетрудно видеть: чтобы удовлетворить разным (детерминированным) требованиям к стали для различных условий эксплуатации рельсов, требуется иметь несколько марок стали, которым вполне соответствует всего одна марка МОНИКИ. Соответствие ее различным требованиям достигается путем термообработки. Теперь, на основании статистических исследований (см. рисунки 2 и б), составим аналогичную таблицу 2 (но уже по средним значениям характеристик). Оказывается, что необходимое количество состояний МОНИКИ (чтобы быть использованной для

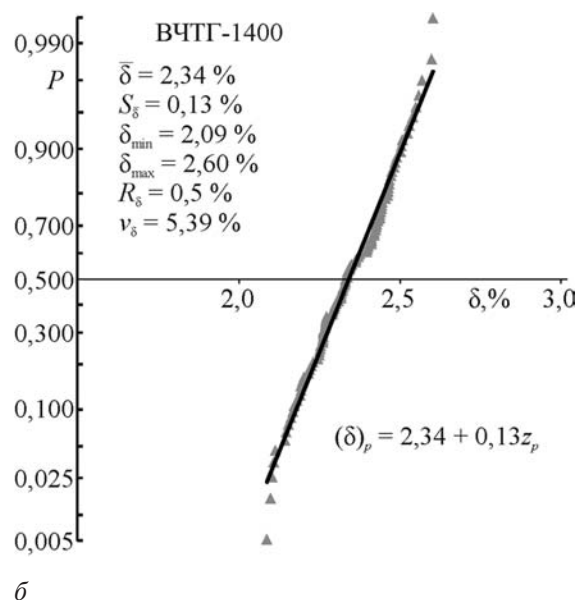
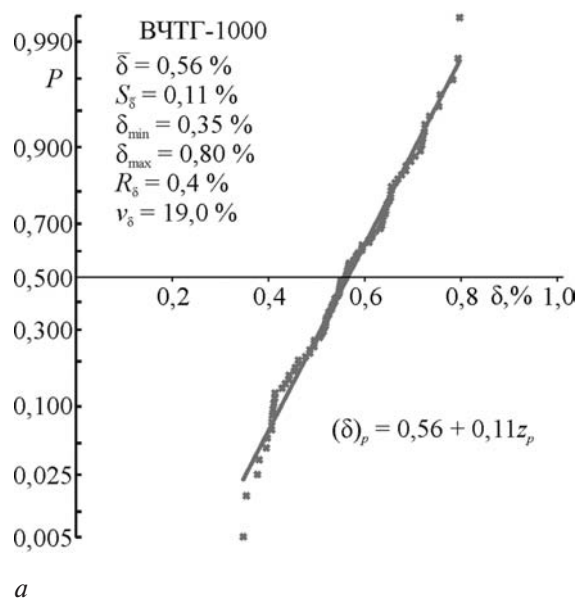


Рисунок 4 — Эмпирические функции распределения удлинения при разрыве

изготовления рельсов) сокращается до 4-х. Таким образом, еще раз и убедительно показано, что МОНИКА весьма перспективна для литья рельсов.

Обратим внимание на статистические данные по модулю упругости (см. рисунок 5). Во-первых, в общем случае модуль Юнга для МОНИКИ меньше, чем для стали, что имеет важное практическое значение в случае ее использования для изготовления, например, рельсов или железнодорожных колес [1, 2]. Во-вторых, новый конструкционный материал и сам по себе имеет ту особенность, что его модуль упругости в заметных пределах варьируется путем термообработки.

Дадим анализ некоторых взаимосвязей между отдельными характеристиками механических свойств в статистическом аспекте.

На рисунке 7 а для МОНИКИ представлена диаграмма прочность — пластичность, построен-

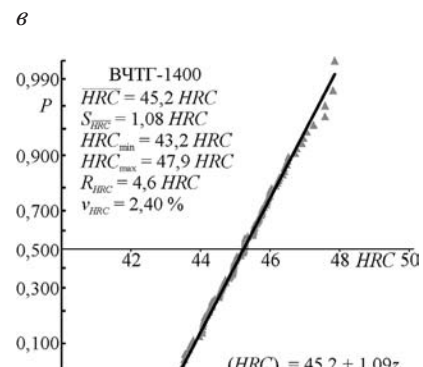
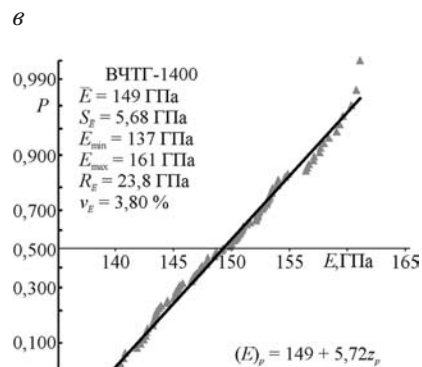
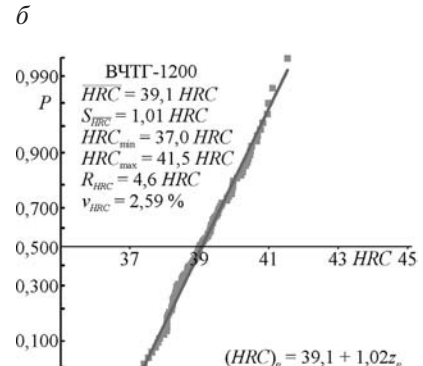
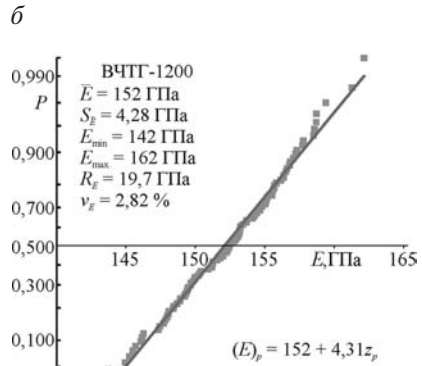
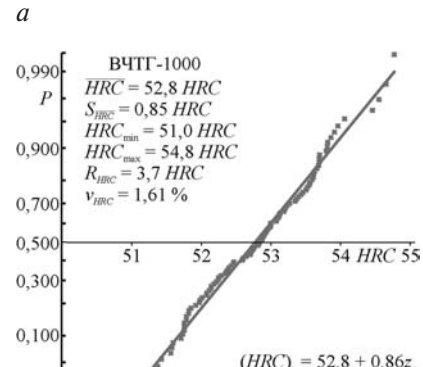
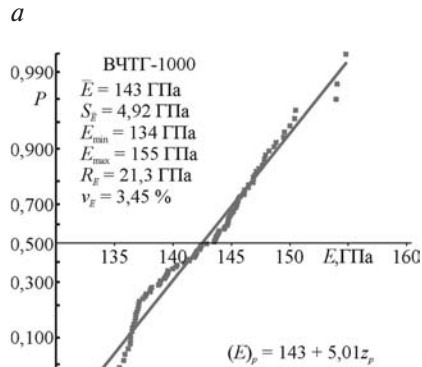
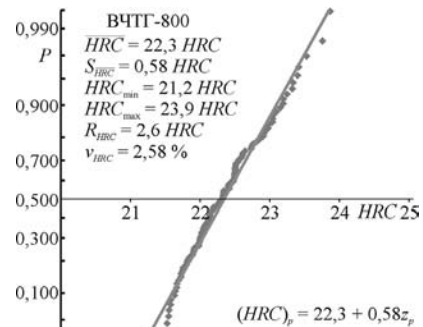
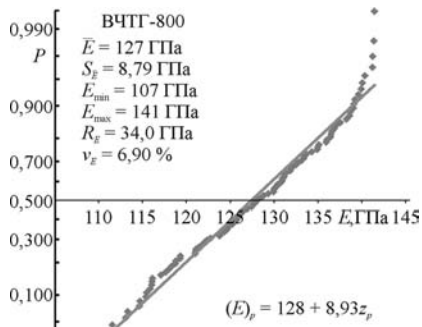
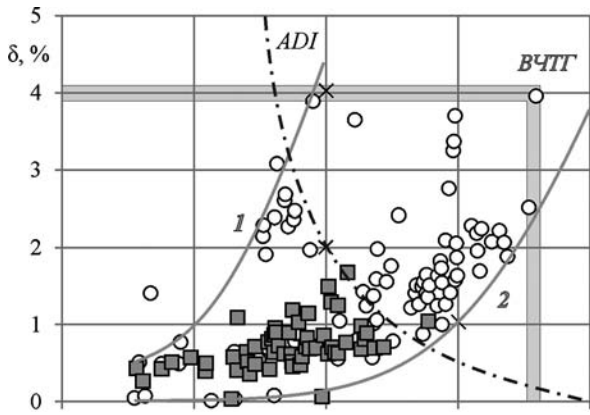
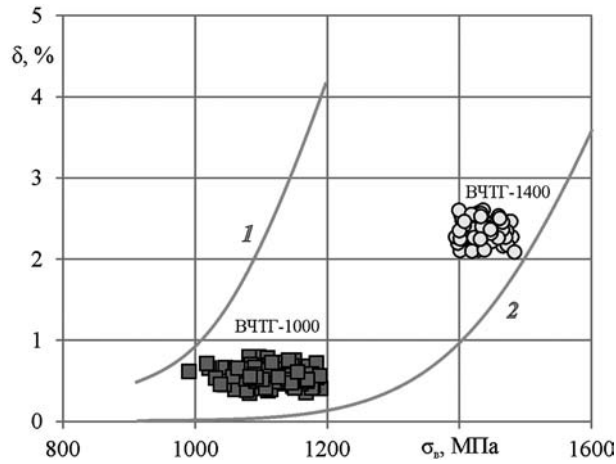


Рисунок 5 — Эмпирические функции распределения модуля упругости

Рисунок 6 — Эмпирические функции распределения твердости по Роквеллу

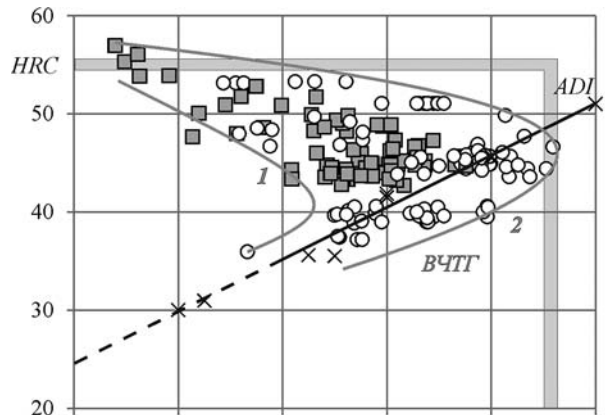


a

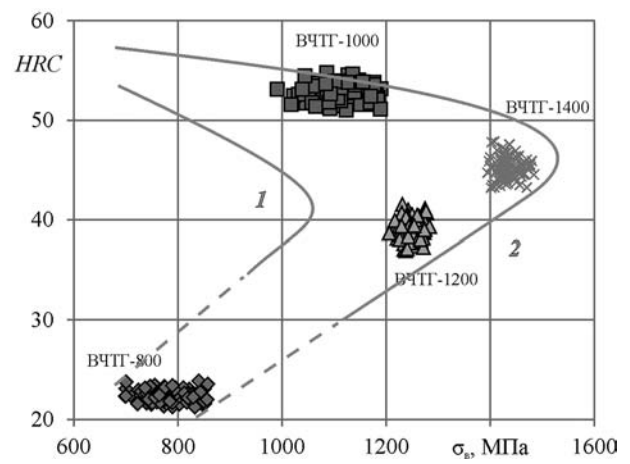


б

Рисунок 7 — Сравнение диаграмм прочность — пластичность, построенных по детерминированным (a) и статистическим (б) данным



a



б

Рисунок 8 — Сравнение диаграмм прочность — твердость, построенных по детерминированным (a) и статистическим (б) данным

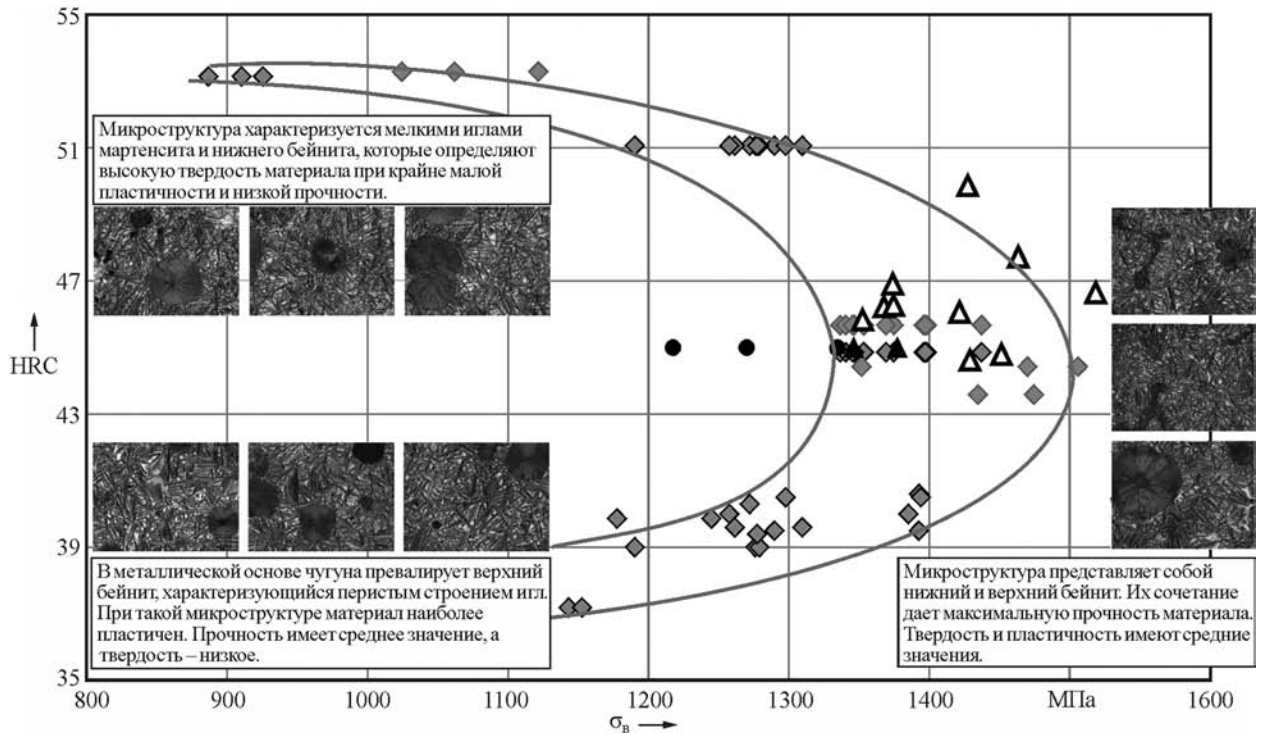


Рисунок 9 — Взаимосвязь механических свойств и микроструктуры МОНИКИ

ная ранее [1] по большому массиву экспериментальных точек, ограниченному двумя огибающими линиями (1 и 2). Детерминированные испытания проводили на образцах многих плавок, при этом материал находился в разных структурных состояниях. В результате установлена неожиданная новая закономерность: с повышением прочности растет и пластичность МОНИКИ. В литературе хорошо известна иная (традиционная, для любых металлических материалов) закономерность: чем выше прочность, тем меньше пластичность. Эту закономерность описывает и характеризует количественно, например, кривая для известных зарубежных высокопрочных чугунов с шаровидным графитом ADI (см. на рисунке 7 *a* штрихпунктирную линию). Как понятно, нельзя переоценить практическую значимость материала МОНИКА, который теряет хрупкость когда его прочность увеличивается. Это особенно важно для области высокопрочных состояний, когда $\sigma_b > 1000$ МПа.

Та же диаграмма прочность — пластичность, ограниченная огибающими линиями 1 и 2, изображена и на рисунке 7 *b*. Но теперь здесь точками показаны области рассеяния свойств, полученные по результатам статистической обработки образцов, изготовленных из одной плавки (см. рисунки 2 и 4). Видно, что эти области рассеяния входят (вписываются) в поле 1–2. Это естественно: межплавочное поле рассеяния должно включать результаты испытаний одной плавки [3].

А на рисунке 8 *a, б* дано аналогичное сопоставление диаграммы прочность — твердость (огибающие линии 1–2) для МОНИКИ. Она описывает новую и снова неожиданную закономерность [1]: изменение твердости HRC может быть как прямо пропорциональным, так и обратно пропорциональным пределу прочности в зависимости от микроструктурного состояния, получаемого в результате термообработки. На рисунке 8 *a* снова штрихпунктирной линией показана для ADI традиционно известная для любых металлических материалов закономерность: прочность и твердость прямо пропорциональны. Можно отметить очень важное практическое значение этих взаимосвязей. Так, например, можно получить для МОНИКИ твердость порядка 30 либо 55 единиц HRC при одной и той же прочности порядка 900 МПа (см. рисунок 8 *a*). Возможность получить, например, высокотвердое состояние материала с относительно низкой прочностью открывает новые области возможного применения МОНИКИ в машиностроении.

А на рисунке 8 *б* показана та же диаграмма, но на ее поле рассеяния 1–2 нанесены результаты статистических испытаний образцов, изготовленных из одной плавки. Заключение естественное: последние результаты не выходят за поле 1–2.

Взаимосвязь основных механических свойств МОНИКИ и ее микроструктуры показана на рисунке 9. Видно, что уровень прочности, пластичности и твердости этого материала определяется его микроструктурным состоянием. Такой вывод согласуется с известными литературными данными.

Заключение. 1. Получены эмпирические функции распределения и определены их параметры для следующих характеристик механических свойств нового конструкционного материала МОНИКА: пределов прочности и текучести, относительного удлинения при разрыве, модуля упругости и твердости. Дан краткий анализ рассеяния указанных характеристик.

2. Установлены статистические закономерности взаимосвязей характеристик прочность — пластичность, а также прочность — твердость для МОНИКИ. Показано, что они являются новыми и неожиданными. Особое практическое значение имеют две закономерности: с повышением прочности наблюдается рост пластичности МОНИКИ, т. е. потеря ею хрупкости; с ростом прочности МОНИКИ ее твердость может как расти, так и падать. Эти взаимосвязи реализуются в зависимости от режимов термообработки МОНИКИ.

3. Изложенные в данной работе результаты экспериментальных исследований механических и служебных свойств МОНИКИ применительно к трибофатической системе «колесо — рельс» убедительно свидетельствуют о перспективности проекта Hi-Tech «Литые рельсы» на базе нового конструкционного материала; соответствующие расчеты подтверждают эту перспективу.

Список литературы

1. Чугун и сталь в трибофатических системах современных машин и оборудования / Л.А. Сосновский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2014. — № 4(29). — С. 5–20.
2. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как конкурент упрочненной стали / В.А. Жмайлик [и др.] // 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. 2. — С. 73–77.
3. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М.Н. Степнов. — М.: Машиностроение, 1985. — 231 с.
4. 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.
5. Жмайлик, В.А. Трибофатика–96/97: ежегодник / под общ. ред. Л.А. Сосновского. — Гомель–Минск: НПО «ТРИБОФАТИКА» — НП ООО «ТАМРАСАТ», 1998. — Вып. 1: Качество материалов и силовых систем / В.А. Жмайлик, В.Н. Подобедов, Л.А. Сосновский; под ред. А.В. Богдановича. — 1998. — 164 с.
6. Максимов, С.И. Статистический анализ данных с применением MS Excel и SPSS: учеб.-метод. пособие / С.И. Максимов, Е.М. Зайцева, Е.И. Князева. — Минск: РИВШ, 2012. — 114 с.

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

Director¹

E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

NOVIKOV Alexandr A.

Deputy General Director — Chief Engineer²

E-mail: iznoslab@mail.ru

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

Professor of the Department³

E-mail: sherbakovss@mail.ru

KOMISSAROV Victor V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department⁴

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

Chief Specialist²

E-mail: iznoslab@mail.ru

DROBYSHEVSKIY Pavel S.

Head of the Laboratory²

E-mail: iznoslab@mail.ru

TOKAR Sergei V.

Deputy Director¹

E-mail: tribo-fatigue@mail.ru

¹S&P Group TRIBOFATIGUE Ltd., Gomel, Republic of Belarus

²OJSC “Gomselmash”, Gomel, Republic of Belarus

³Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

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

Received 11 May 2017.

CONSTRUCTION MATERIAL FOR TRIBO-FATIGUE SYSTEMS: DISSIPATION OF MECHANICAL PROPERTIES

The results of the first statistical studies of the mechanical properties of the new construction material of MONICA are presented. The statistical parameters of the strength and yield strength, the relative elongation, Young's modulus and hardness are established. The interrelations of the strength — plasticity and strength — hardness characteristics for this material are analyzed.

Keywords: dispersion of properties, ultimate strength, yield stress, elongation at break, hardness, Young's modulus, stretching curve, empirical distribution function of a random variable, parameters of the distribution function

References

1. Sosnovskiy L.A. [et al.] Chugun i stal v tribofaticheskikh sistemakh 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.
2. Zhmailik V.A. [et al.] Spetsialnyy vysokoprochnyy chugun s sharovidnym grafitom kak konkurent uprochnennoy stali [Special high-strength cast iron with nodular graphite as a competitor to reinforced steel]. *Trudy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike* [Proc. VI International Symposium on Tribo-Fatigue]. Minsk, 2010, vol. 2, pp. 73–77.
3. Stepnov M.N. *Statisticheskiye metody obrabotki rezultatov mekhanicheskikh ispytaniy* [Statistical methods for processing the results of mechanical tests]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1985. 231 p.
4. 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.
5. Zhmailik V.A., Podobedov V.N., Sosnovskiy L.A. *Tribofatika-96/97: yezhegodnik* [Tribo-Fatigue–96/97: Annual]. *Kachestvo materialov i silovykh sistem* [Quality of materials and active systems], Gomel–Minsk, NPO “TRIBOFATIKA”–NP OOO “TAMPACAT”, 1998. 164 p.
6. Maksimov S.I., Zaytseva E.M., Knyazeva E.I. *Statisticheskiy analiz dannykh s primeneniyem MS Excel i SPSS: uchebn.-metod. posobiye* [Statistical analysis of data using MS Excel and SPSS: Teaching aid]. Minsk, RIVSH, 2012. 114 p.