

УДК 669.13.018:669.131.7

Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, *В. В. КОМИССАРОВ*, кандидат технических наук, *В. И. МАТВЕЦОВ*, кандидат технических наук, *Н. Е. МИРОШНИКОВ*, научный сотрудник, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

НОВЫЙ КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ: МЕХАНИЧЕСКИЕ И СЛУЖЕБНЫЕ СВОЙСТВА

Приведен краткий обзор и дан обобщающий анализ проблемы снижения стоимости железнодорожных рельсов. Обсуждается вопрос о замене традиционной технологии их производства методом прокатки на современную технологию горизонтального непрерывного литья. При этом используется новый конструкционный материал – сталистый высокопрочный чугу́н. Дано экспериментальное обоснование этого нетривиального и поэтому спорного предложения. Обсуждается его высокая экономическая эффективность.

Железнодорожные рельсы являются одним из основных и наиболее дорогостоящих элементов верхнего строения железнодорожного пути. Требования к эксплуатационной стойкости рельсов все повышаются, поскольку растет спрос на перевозку грузов и пассажиров на все более длинные расстояния при неуклонном росте осевых нагрузок и скоростей движения. Железнодорожный путь имеет большое стратегическое, военное и технико-экономическое значение [1]. Так, в 2013 г. на железнодорожном транспорте Беларуси было занято 1,7 % трудоспособного населения (в России – 1,3 %), и это обеспечивает 2,7 % валового национального продукта (в России – 2,0 %).

В настоящее время в России повышенное внимание уделяется модернизации Восточного полигона. Наибольший интерес представляет коридор Европа – Азия для контейнерных перевозок. Ранее планировалось, что контейнерные поезда будут доставлять груз через всю Россию от Тихого океана до западных границ за 11 дней (маршрутная скорость – порядка 1000 км/сут). Теперь достигнута маршрутная скорость порядка 1200 км/сут [2], что позволяет сократить срок доставки до 8 суток.

В настоящее время только 0,2 % контейнерного грузооборота между Китаем и странами Европы приходится на территорию стран Единого экономического пространства. Неосвоенный потенциал оценивается более чем в 285 тыс. контейнеров. Перспективным является наращивание транзита между Европой и азиатскими странами. Как подсчитали эксперты, рост может составлять до миллиона контейнеров в год [3].

Кроме того, готовятся к реализации трансконтинентальные железнодорожные коридоры Европа – Китай через Казахстан и Европа – Аляска.

Для обеспечения безопасности движения скоростных контейнерных поездов необходимо проводить своевременную сплошную замену отслуживших срок службы рельсов, а также одиночную замену дефектных рельсов. Стоимость рельсов в зависимости от их качества колеблется в пределах от 700 до 1400 долларов за тонну. Протяженность железных дорог Таможенного союза превышает 150 тыс. км. Ежегодная потребность новых рельсов составляет более 6000 км (около 8000 тыс. т). Общие ежегодные затраты железных дорог Таможенного союза на новые рельсы достигают 800 млн долларов США. Уменьшение расходов на но-

вые рельсы всего на 1 % приведет к экономии порядка 80 млн долларов США. Поэтому снижение стоимости железнодорожных рельсов за счет сокращения затрат на их производство является одной из важнейших задач, стоящих перед железными дорогами Таможенного союза.

Износ и усталость – два явления, которые в определенной мере и в конечном счете ведут к недопустимому повреждению и (или) разрушению рельсов в процессе эксплуатации. И неизбежно встает огромная проблема утилизации рельсов. Решается она очень просто: сдача в металлолом. Это означает, что первоначальная стоимость рельсов практически погашается незначительно (стоимость стального лома в 6–10 раз меньше цены рельсов). Рельсы, достигшие предельного состояния, к сожалению, не подлежат восстановлению, и из металлолома можно выплавить и прокатать только рельсы той же первоначальной стоимости.

Настойчивый поиск приводит к неординарному и нетрадиционному, поэтому весьма спорному, но высокоэффективному предложению по резкому снижению затрат на производство железнодорожных рельсов [4]. Это предложение формулируется в двух пунктах. Пункт первый: надо попытаться заменить высокозатратную и высокоэнергетическую технологию прокатки стальных рельсов на дешевую технологию их горизонтального непрерывного литья. Однако есть немалая сложность задачи: резкие изменения площади элементов поперечного сечения рельса (головки, подошвы, шейки) и большая протяженность его по длине делает это предложение бесперспективным, если ставить задачу отливки рельсов из стали: ее жидкотекучесть недостаточна. К тому же, как хорошо известно, качество литой стали, ее характеристики механических свойств несравненно хуже, чем прокатанной. Тогда выдвигается пункт второй: для изготовления литых рельсов принять чугу́н, технологические свойства которого весьма высоки (таблица 1 [5], отмечено полужирным шрифтом). Подчеркнем, что высокопрочный чугу́н с шаровидным графитом имеет и весьма благоприятные служебные свойства (см. таблицу 1): повышенная стойкость против износа, высокая демпфирующая способность и, наконец, естественное свойство самосмазываемости. И это очень важно практически. На протяжении последних 20 лет проблемы износа и смазки стальных рельсов привели к дополнительным многомиллиардным (в дол-

ларах) эксплуатационным расходам во всех технически развитых странах [6–8]. Из изложенного следует, что перспективным является предложение [9–11] изготавливать железнодорожные рельсы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом методом горизонтального непрерывного литья (т.е. свести проанализированные выше пункты 1 и 2 к единому «знаменателю»).

Таблица 1 – Сравнение свойств стали 42CrMo4 и чугуна ADI-1050

| Параметры | Сталь | Чугун |
|--|----------------|----------------|
| | 42CrMo4 | ADI-1050 |
| Прочность на растяжение, Н/мм ² | 1000 | 1050 |
| Граница пластичности, Н/мм ² | 750 | 700 |
| Удлинение, % | 11 | 7 |
| Модуль E, кН/мм ² | 210 | 170 |
| Твердость, НВ | 300 | 302–363 |
| Ударная вязкость, (DVM) (J) | 40 | 10 |
| Предел усталости, Н/мм ² | 500 | 400 |
| Стойкость на износ | Низкая | Высокая |
| Способность к демпфированию | » | » |
| Жидкотекучесть | » | » |
| Плотность, г/см ³ | 7,9 | 7,2 |
| Способность к самосмазыванию | Низкая | Высокая |
| Влияние толщины стенки | Высокая | Низкая |
| Стоимость, % | 100 | 40–80 |

На рисунке 1 представлено сравнение рассматриваемых технологий. Готовые литые чугунные рельсы получают с одного нагрева, тогда как производство стальных рельсов требует многократных нагревов. Протяженность рельсового завода составляет порядка

1300 м, в то время как протяженность завода литья чугунных рельсов всего порядка 120 м. Вывод однозначен: в ценовом отношении технология литья в 2–3 и более раз дешевле, чем прокатка рельсов.

Но далее на первый план выступает грозная проблема обеспечения требуемой безопасности движения по литым (чугунным) рельсам. Решение этой проблемы состоит, в первом приближении, в следующем: надо иметь (или получить) высокопрочный чугун с шаровидным графитом, механические и служебные свойства (в первую очередь сопротивление усталости) которого были бы, по меньшей мере, не хуже, чем таковые для традиционных рельсовых сталей. По имеющимся сведениям, эта проблема за рубежом не решена (хотя ее «штурм» и идет).

Гомельские специалисты с 2006 г. приступили к разработке чугуна, по своим свойствам не уступающего высокопрочным сталям, и к 2008 г. достигли значительных успехов [12] (рисунок 2). Это было материализовано в патенте Республики Беларусь № 15617. Достигнутые к настоящему времени результаты описываются ниже.

1 Испытания при растяжении. В таблицах 2 и 3 приведены результаты испытаний на растяжение образцов рельсовой стали и разработанного чугуна ВЧТГ (ВЧ – высокопрочный чугун с шаровидным графитом, ТГ – разработка ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» и ПО «Гомсельмаш»). Видно: пределы прочности обоих типов рельсов практически одинаковы. Однако чугун ВЧТГ проигрывает рельсовой стали по относительному удлинению при разрыве.

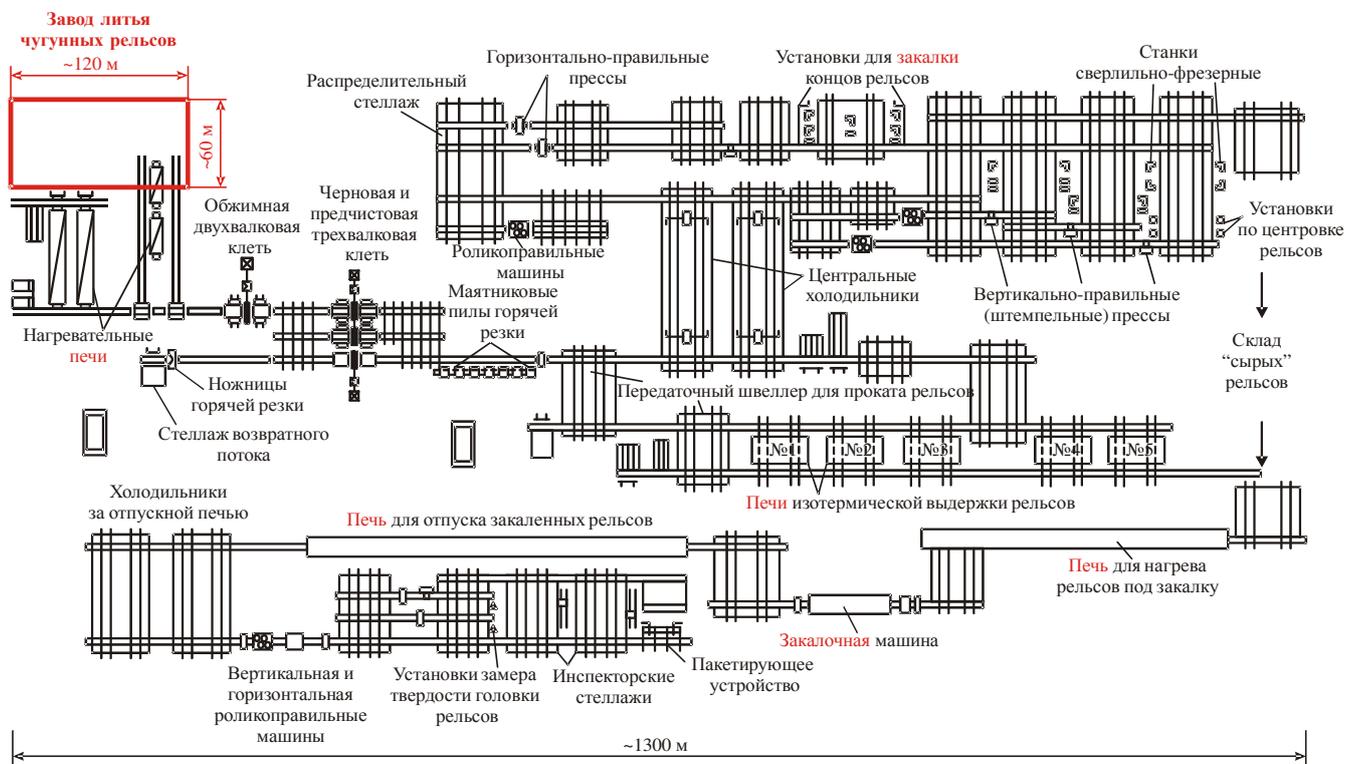


Рисунок 1 – Сравнение схем рельсoproкатного стана и литейного завода для производства чугунных рельсов

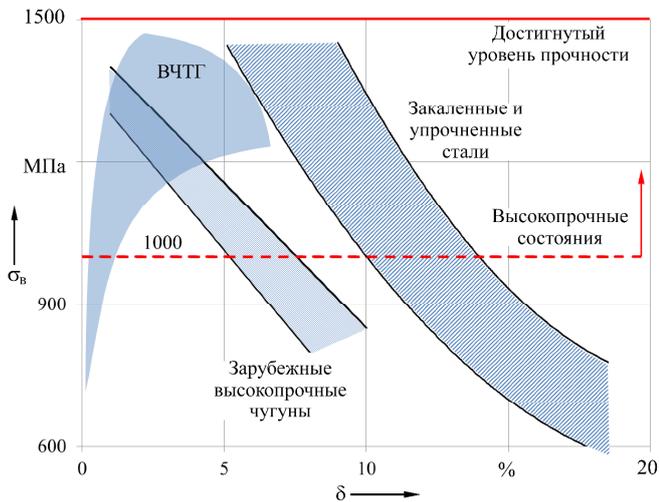


Рисунок 2 – Диаграммы пластичность – прочность чугуна и стали

Таблица 2 – Свойства рельсовой стали (согласно ГОСТ Р 51685–2013)

| Категория рельсов | Временное сопротивление, $\sigma_{\text{вmin}}$, МПа | Относительное удлинение, δ , % | Твердость на поверхности катания, НВ |
|-------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | |
| ОТ370ИК | 1280 | 8,0 | 370–409 |
| ДТ370ИК | | 9,0 | |
| ОТ350 | 1180 | 8,0 | 352–401 |
| ОТ350НН | | | |
| ОТ350СС | | | |
| ДТ350 | | | |
| ДТ350НН | | | |
| ДТ350СС | 1180 | 9,0 | |
| ДТ350ВС | | | |
| НТ320 | 1080 | 9,0 | – |
| НТ320ВС | | | |
| НТ300 | 980 | 10,0 | – |
| НТ260 | 900 | 10,0 | – |

Таблица 3 – Достигнутые свойства чугуна ВЧТГ (его минимальные значения регламентирует СТН 315-647-2013 ПО «Гомсельмаш»)

| Марка чугуна | Временное сопротивление, $\sigma_{\text{вmin}}$, МПа | Относительное удлинение, δ , % | Твердость, HRC |
|--------------|---|---------------------------------------|----------------|
| ВЧТГ-1000 | 1000 | 1,8–3,0 | 44–56 |
| ВЧТГ-1100 | 1100 | | |
| ВЧТГ-1200 | 1200 | | |
| ВЧТГ-1400 | 1400 | | |

Используя разные режимы термообработки, можно варьировать прочность ВЧТГ практически в огромных пределах: от $\sigma_b = 800$ МПа до 1600 МПа (рисунок 3). Такая прочность обусловлена микроструктурным состоянием чугуна, основные типы которого приведены на рисунке 3. Ясно, что в этом отношении ВЧТГ не уступает современным рельсовым сталям. Однако, как отмечено выше (см. рисунок 2), ВЧТГ проигрывает рельсовой стали по пластичности (δ – относительное удлинение при разрыве). Необходимо разобраться, насколько важно это свойство для рельсов.

Проясним этот вопрос. Для рельсов (и для рельсовой стали) главное значение имеет свойство сопротивления усталости при контактном нагружении и при изгибе [8]. Но пластичность (сама по себе) не определяет сопротивление усталости. На рисунке 4 приведе-

ны литературные данные [13] о корреляции предела выносливости при изгибе σ_{-1} , относительного удлинения δ или относительного сужения ψ для разных сталей и их состояний. Вывод убедителен: рост (или уменьшение) величины ψ практически не ведет к изменению предела выносливости при изгибе (см. рисунок 4, б). И чем больше относительное удлинение, тем меньше предел выносливости при изгибе (см. рисунок 4, а). При трении качения ситуация аналогична: чем меньше пластичность, тем выше сопротивление контактной усталости [14]. Таким образом, если речь идет об эксплуатационной стойкости рельсов по критериям изгибной и контактной усталости, то требование о необходимости иметь при этом «высокую» (какую именно – не вполне ясно) пластичность представляется малообоснованным.

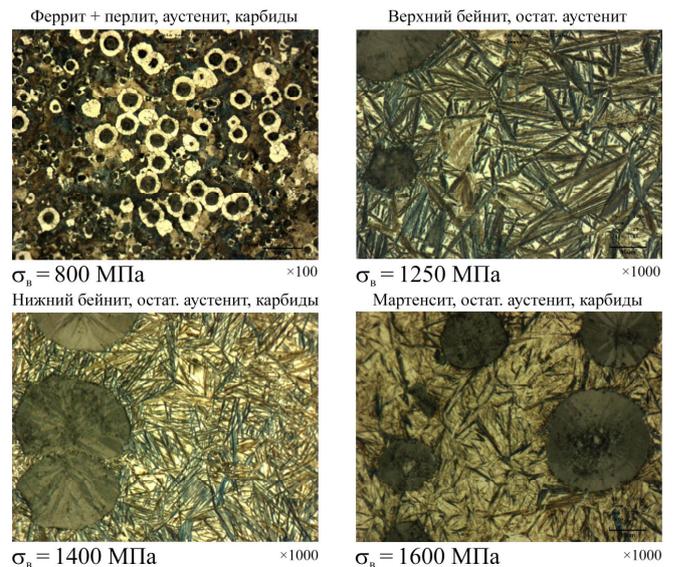


Рисунок 3 – Основные структурные состояния чугуна ВЧТГ

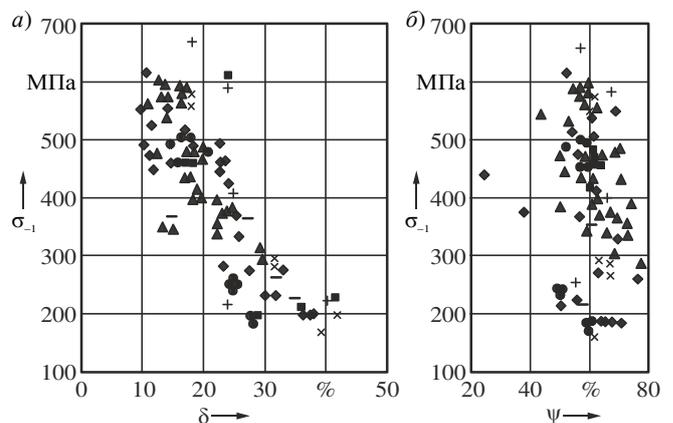


Рисунок 4 – Диаграммы предела выносливости при изгибе с вращением: относительного удлинения (δ) (а) и сужения (ψ) (б) при растяжении

2 Твердость. Проблема рациональной твердости рельсовой стали обсуждается давно и постоянно (см., например, [15, 16]). Реально она имеет значения порядка 350–400 НВ [17]. И для стали имеет место строгая закономерность: чем выше твердость, тем больше предел прочности при растяжении. Для ВЧТГ эта закономерность нарушается. Связь между HRC и σ_b , представленная на рисунке 5, имеет сложный характер. Он таков, что при одинаковом пределе прочности (например, 1000–1100 МПа) твердость, в зависимости от режимов термообработки, может изменяться в интервале

36–39 HRC и достигать значений 50 HRC и более. При твердости ~35 HRC в металлической основе чугуна превалирует верхний бейнит, характеризующийся перистым строением игл. При такой микроструктуре материал наиболее пластичен. Прочность имеет среднее значение, а твердость – относительно низкое. При повышении твердости до ~45 HRC микроструктура представляет собой нижний и верхний бейнит. Их сочетание дает максимальную прочность материала. Твер-

дость и пластичность имеют средние значения. При твердости ~55 HRC микроструктура характеризуется мелкими иглами мартенсита и нижнего бейнита, которые определяют высокую твердость материала при относительно малой пластичности и сравнительно низкой прочности. Как видно, реализуемые соотношения твердости и прочности определяются микроструктурным состоянием, а по характеристике твердости ВЧТГ никак не уступает современным рельсовым сталям.

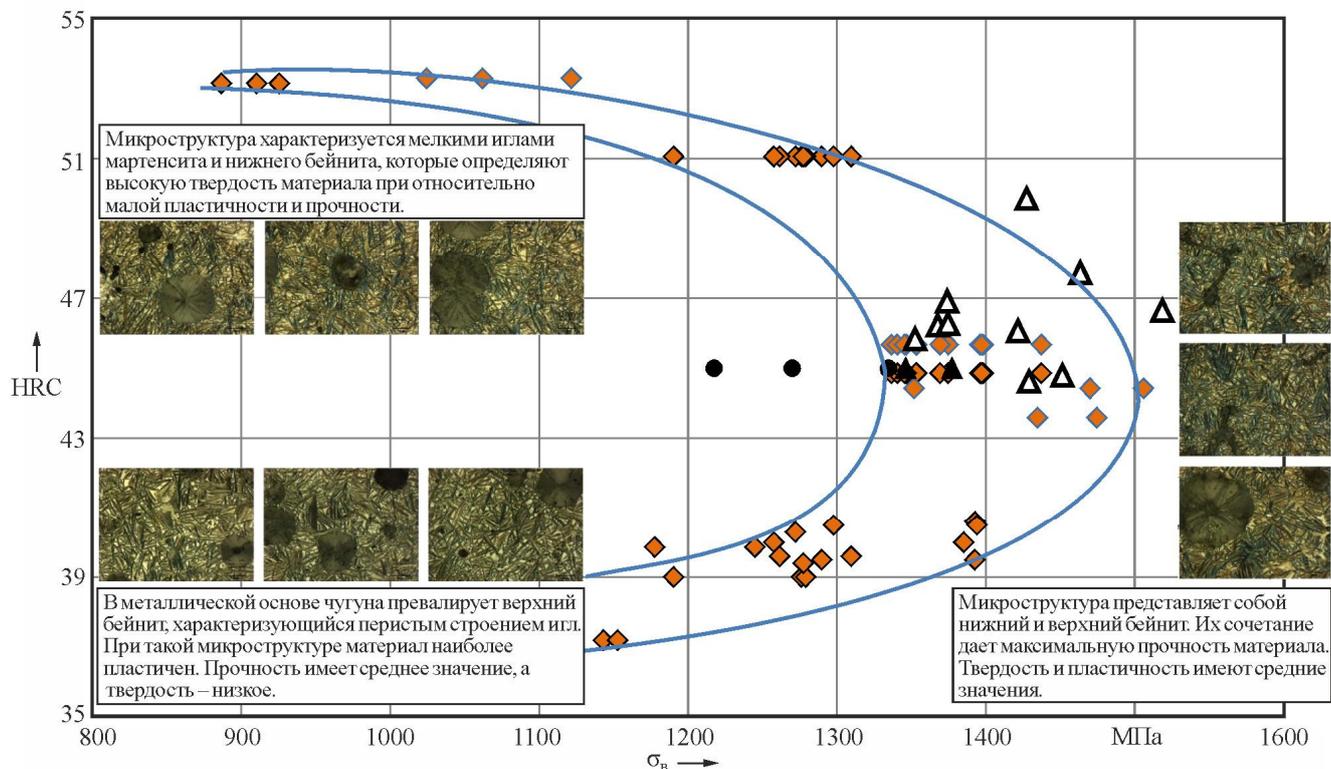


Рисунок 5 – Связь твердости, прочности и микроструктуры чугуна ВЧТГ

Из рисунка 5 также следует, что по структуре чугун ВЧТГ не является ни чисто бейнитным, ни чисто мартенситным, ни чисто феррито-перлитным; это – *специальный чугун*, который, в зависимости от режимов термообработки, может обнаруживать различные и многообразные структурные состояния, аналогичные микроструктуре стали.

Что касается связи твердости и пластичности для ВЧТГ, то, как следует из рисунка 6, при изменении δ от 0,5 до ~4 % HRC оказывается в диапазоне от ~42 до 50. Это еще одно доказательство того, что пластичность для черных металлов не является определяющей служебной характеристикой, хотя она, конечно, имеет важное значение как «противоядие» хрупкости.

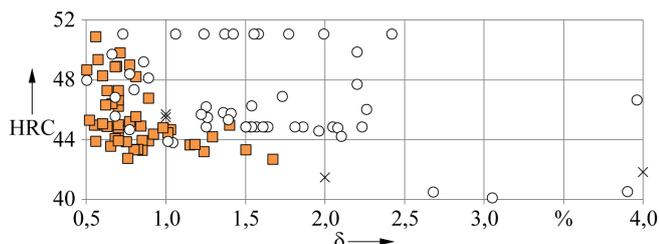


Рисунок 6 – Чугун ВЧТГ: диаграмма пластичность – твердость

3 Сопротивление усталости. Анализ следует подвзргнуть характеристики сопротивления усталости как

при изгибе, так и при контактном нагружении, ибо именно эти типы деформации характерны для работы рельсов в эксплуатационных условиях [18]. Сравнение пределов выносливости чугуна ВЧТГ и стали представлено в таблице 4; здесь также приведены сведения о высокопрочном зарубежном чугуне. Нетрудно видеть, что ВЧТГ существенно превосходит зарубежный чугун и «настигает» легированную термоупрочненную сталь. Если сравнивать их по несущей способности и долговечности, вывод будет аналогичен (рисунок 7). По критерию контактной усталости чугун соответствует свойствам стали 18ХГТ, а по критерию механической усталости разница составляет всего ~19 % (см. рисунок 7).

Таблица 4 – Чугун и сталь: пределы выносливости

| Материал | Твердость, HВ | Предел выносливости, МПа | |
|--|---------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| | | при контактном нагружении p_f | при изгибе с вращением σ_{-1} |
| Чугун с шаровидным графитом (ISO 6336-5:2003(E)) | 250 | 625 | 229 |
| Легированная термоупрочненная сталь (ISO 6336-5:2003(E)) | 295 | 915 | 337 |
| ВЧТГ (плавка №25) | 340 | 975 | 290 |

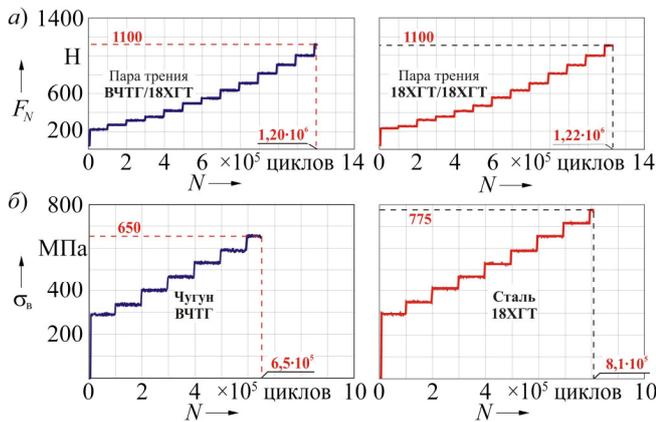


Рисунок 7 – Чугун и сталь: долговечность и несущая способность:

a – сопротивление контактной усталости (F_N – контактная нагрузка);
b – сопротивление механической усталости (σ_b – амплитуда напряжений при циклическом изгибе)

4 Трение. Отметим важное своеобразие требований к процессам трения применительно к системе колесо/рельс. Для систем общетехнического применения ситуация проста: если речь идет о тормозных системах, обеспечивают повышенное значение коэффициента трения, а если речь идет о системах с трением движения, стремятся к его снижению (повышая тем самым износостойкость их элементов). Для системы колесо/рельс особое значение имеет совокупное свойство трения и сцепления: если коэффициент трения уменьшается, снижается и сцепление колеса с рельсом, что ведет к нарушению условий безопасности движения.

На рисунке 8 показано, что при замене пары сталь/сталь на пару сталь/чугун ВЧТГ процессы трения остаются в «традиционной норме» при широком изменении степени проскальзывания.

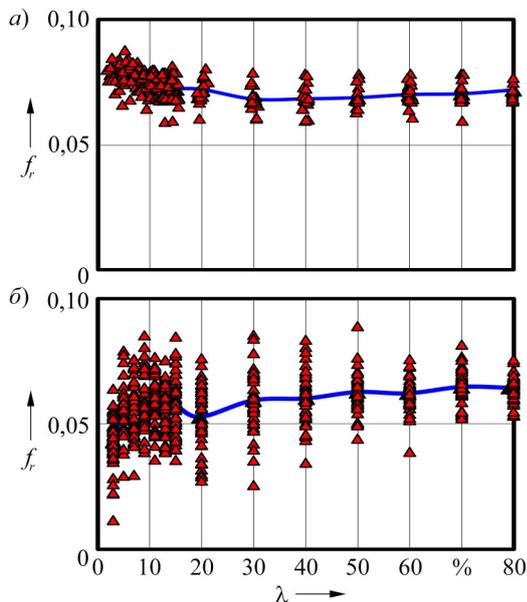


Рисунок 8 – Влияние степени проскальзывания (λ) на коэффициент сопротивления качению (f_r) при трении с капельной смазкой:

a – пара сталь 18ХГТ/сталь 18ХГТ; *b* – пара чугун ВЧТГ/сталь 25ХГТ

Таким образом, обобщая изложенное, можно сказать, что в результате возможного перехода от стальных рельсов, изготовленных методом прокатки, к ли-

тым рельсам, изготовленным из сталитого чугуна методом литья, ожидается, по меньшей мере, сохранение общей эксплуатационной стойкости системы. Кроме того, прогнозируется повышение износостойкости ее элементов и значительное уменьшение расходов на смазку.

Общий итог таков: литые рельсы из сталитого высокопрочного чугуна СВЧТГ будут дешевле стальных от двух (пессимистический прогноз) до четырех (оптимистический прогноз) раз, а их эксплуатационная стойкость может стать оптимальной (с технико-экономической точки зрения). Здесь следует указать на перспективу «безотходного» использования чугуна: поврежденные и снятые из эксплуатации рельсы из ВЧТГ непосредственно пойдут на переплавку и изготовление новых рельсов. Такое воспроизводство рельсов из ВЧТГ сулит немалую выгоду.

Конечно, наши предварительные ориентировочные оценки требуют уточнения при разработке бизнес-плана большого проекта «Литые железнодорожные рельсы из сталитого высокопрочного чугуна». Время и исследования покажут, насколько наши ожидания правомерны.

Список литературы

- 1 Проблемы повышения скоростей, массы и безопасности движения поездов на подходах к портам Дальнего Востока / В. А. Попов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2004. – 250 с.
- 2 Поменяли вектор. Стратегию развития железнодорожного транспорта скорректировали // Гудок. – 2014. – № 201. – С. 1–2.
- 3 **Штаева, М.** Транзитная цель. Растет интерес к Евразийскому транспортному коридору / М. Штаева // Гудок. – 2013. – № 184. – С. 1.
- 4 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. – М., 2009. – С. 74–78.
- 5 **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: информационный сборник технических материалов / под ред. Н. Н. Александрова [и др.]. – М.: Metallurg, 2004. – С. 249–258.
- 6 **Богданов, В. М.** Современные проблемы системы колесо/рельс / В. М. Богданов, С. М. Захаров // Железные дороги мира. – 2004. – № 1. – С. 57–62.
- 7 **Большаков, А. Н.** Проблема износа гребней колесных пар и рельсов / А. Н. Большаков // Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути: сб. докл. науч.-практ. конф. «Колесо–рельс–2003», 20–21 нояб. 2003 г., Щербинка, Россия. – М.: Интекст, 2003. – С. 37–40.
- 8 **Сосновский, Л. А.** О главных путях повышения эксплуатационной надежности трибофатической системы тормозные колодки-колесо-рельс / Л. А. Сосновский, В. А. Гапанович // Тр. VI Междунар. симп. по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / Редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 187–201.
- 9 **Псырков, Н. В.** Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как новый конструкционный материал / Н. В. Псырков // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3–4. – С. 213–218.

10 Сталь и чугун: конкуренция продолжается в области высокопрочных состояний / Л. А. Сосновский [и др.] // Машины, технологии и материалы для современного машино-

строения (Междунар. конф., посвященная 75-летию Ин-та машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, 21—22 нояб. 2013 г., Москва, Россия). – М. : Ин-т компьютерных исследований, 2013. – С. 99.

11 Об изготовлении железнодорожных рельсов из высокопрочного чугуна / Л. А. Сосновский [и др.] // Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава : Тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию профессора М. А. Фришмана, Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 18–20 сентября 2013 г.). – Днепропетровск, 2013. – С. 54–55.

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

13 Хейвуд, С. Г. Проектирование с учетом усталости / С. Г. Хейвуд; под ред. И. Ф. Образцова. – М., 1969. – 504 с.

14 Сусин, А. А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А. А. Сусин. – Мн. : Беларуская навука, 1999. – 175 с.

15 Thermally hardened rails / A. F. Zolotarskv [et al.]. – Moscow : Transport, 1976. – 264 p.

16 Shur, E. A. To the problem on the optimal hardness ratio of wheels and rails / E. A. Shur // Modern Problems on the Interaction of a Rolling Stock and a Truck : collected Papers of Scientific-Practical Conference. – Moscow : Intext, 2003. – P. 87–93.

17 Gapanovich, V. A. What must surface hardness of rail? / V. A. Gapanovich, L. A. Sosnovskiy. – Гомель : ОАО «РЖД»-ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», 2009. – 20 с.

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

Получено 18.10.2014

L. A. Sosnovskiy, V. V. Komissarov, V. I. Matvecov, N. E. Miroshnikov. New structural material for rails: mechanical and service properties.

A brief overview and general analysis of the problem of reducing the cost of rail. It is discussed to replace the traditional technology of their production by rolling on the modern technology of horizontal continuous casting. This is a new structural material – semi-high-strength cast iron. Given the experimental rationale for this non-trivial and therefore controversial proposals. Discusses its high economic efficiency.