

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Металлургия и материаловедение

УДК 699.14 (571.56)

Перспективы развития металлургии в Якутии в связи с созданием новых поколений сталей северного исполнения

Б.С. Ермаков*, О.И. Слепцов**, П.П. Петров**

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург
** Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Дается оценка эффективности использования местного минерального сырья для создания хладостойких, высокопрочных и износостойких сплавов в северном исполнении. Рассмотрены некоторые направления разработки и создания сталей северного исполнения, в том числе работающих в условиях большого износа. Проанализирована целесообразность применения железомарганцевых руд Ленского рудного поля при изготовлении литых изделий с целью восстановления узлов и деталей техники эксплуатируемой горнодобывающей отрасли Республики Саха (Якутия). Приведены химические составы созданных хладостойких, высокопрочных и износостойких сталей нового поколения с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: металлургия, хладноломкость стали, плавка руды, переработка минерального сырья, Ленское рудное поле, редкие и редкоземельные металлы.

The article assesses the efficiency of the use of local mineral resources for the creation of cold-resistant, high-strength and wear-resistant alloys for the north execution. Certain directions of the development and creation of the steels of north execution including those working in conditions of heavy wear are considered. The expediency of use of iron-manganese ores of the Lena ore field in production of cast products for restoring parts and components of mining machinery operated in the Republic of Sakha (Yakutia). The chemical compositions of created cold-resistant, high-strength and wear-resistant steels of new generation with a given set of operating properties are presented.

Key words: metallurgy, cold brittleness of steel, ore melting, mineral raw materials processing, Lena ore field, rare and rare earth metals.

Российская Федерация, как государство, располагается, в основном, в двух климатических зонах – умеренно-холодной, где температура в зимние месяцы редко опускается ниже -40°C и холодной, где температура может достигать $-60\dots-70^{\circ}\text{C}$. В холодной климатической зоне – Восточной Сибири, Таймыре, Якутии, Сахалине и т. д. располагаются основные запасы полезных ископаемых страны, развиваются добывающие и перерабатывающие производства, базируются крупные войсковые соединения.

Анализ развития добывающих и перерабатывающих отраслей промышленности в последние двадцать–тридцать лет показывает, что отчетливо наметился перенос центра тяжести добычи и переработки полезных ископаемых, в том числе нефти, газа, металлов, в заполярную тундру, шельфовую зону Северного Ледовитого океана и Северного Сахалина. Одной из острых проблем, вставших при освоении северных территорий, является хладноломкость материалов – явление их хрупкого разрушения при низких температурах.

Впервые явление хладноломкости стало предметом широкого обсуждения в связи с бурным строительством железных дорог в конце XIX века, когда было отмечено, что рельсы, изготовленные из литого металла, внезапно разруша-

*ЕРМАКОВ Борис Сергеевич – д.т.н., проф., ermakov55@bk.ru; **СЛЕПЦОВ Олег Ивкентьевич – д.т.н., проф., зав. отделом, o.i.sleptsov@iptpn.ysn.ru; **ПЕТРОВ Петр Петрович – в.н.с., ppp32@mail.ru.

лись при понижении температуры. Уже тогда была признана актуальной проблема хладноломкости металлов и необходимость изучения ее природы и выработки мероприятий по ее устранению.

Еще в XVIII веке (1733–1743 гг. обеспечение необходимым снаряжением Второй Камчатской экспедиции Витуса Беринга) кованые изделия (якоря, гвозди, скобы, полозья и т. п.), изготовленные мастерами рудных дел и кузнецами Тамгинского железного завода из буотамской железной руды, отличались повышенной прочностью и износостойкостью, чем аналогичные изделия, привезенные из европейской части Российского государства. А впоследствии, как выяснилось, причиной этого явился особый минеральный и химический состав марганцовистых бурых железняков Ленского рудного поля Центральной Якутии. Тамгинский железный завод (1735–1756 гг.) на заре индустриальной эпохи был первым промышленным предприятием Российского государства, продукция которого предназначалась исключительно для восточной части страны. Железные изделия распространялись на огромной территории от западных границ Якутии до самых восточных окраин России, что явилось переломным моментом промышленного освоения необжитых территорий [1].

В связи с реализацией проектов по добыче и переработке минерального сырья, а также с завершением строительства и последующей эксплуатации железной дороги Беркабит–Якутск особую остроту приобретают вопросы применения высокопрочных хладостойких сталей различного назначения, изготавливаемых на базе железомарганцевых руд или с использованием марганцовистых концентратов. На территории республики разведаны месторождения железных (Десовское, Таежное, Горкитское, Тарынахское), железомарганцевых (Буотамское), железотитановых руд, редких и редкоземельных металлов (Томторское). Это позволяет рассчитывать на создание на территории республики собственной металлургической базы, опирающейся на собственное сырье и, практически, не зависимой от внешних поставок.

Институтом физико-технических проблем Севера СО РАН совместно с ведущими институтами Российской Федерации (гг. Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Томск, Красноярск и др.) в течение последних (с 2005 по 2014 г.) лет ведутся научно-исследовательские работы по изучению технологических качеств железомарганцевых руд, расположенных на территории Ленского рудного поля (Центральная Якутия) [2,3].

Железорудные месторождения Якутии с учетом геохимической специализации региона, имеющего повышенный фон редких и редкозе-

мельных элементов, являются перспективным материалом для разработки специальных сталей. Особый интерес представляют осадочные месторождения железа (рис.1), имеющие уникальный состав руды и шлакообразующих минералов. Для экспериментальных исследований процессов прямого восстановления (рис.2 и 3) и экспериментальной апробации получения новых хладостойких, износостойких и высокопрочных конструкционных сплавов на базе системы Fe–Mn вполне пригодны железомарганцовистые, а также природно-легированные руды Ленского рудного поля, в частности из рудопроявлений «Лютенге» и «Куртанг».



Рис.1. Рудное тело на рудопроявлении «Куртанг» Ленского рудного поля

При финансовой поддержке и согласно ряду постановлений Президиума СО РАН (с 2007 по 2013 г.) по итогам конкурса поддержки экспедиционных работ сотрудниками ИФТПС СО РАН были организованы и успешно проведены экспедиционные работы на месторождениях железомарганцовистых руд Центральной и Южной Якутии.



Рис.2. Выплавленная крица из руды Ленского рудного поля



Рис.3. Выплавленный ферросплав из руды Ленского рудного поля

В настоящее время одним из главнейших направлений развития металловедения и металлургии становится создание новых прочных материалов с высокими хладостойкостью, огнестойкостью, пластичностью, устойчивостью к переменным нагрузкам и перегрузкам.

Наиболее простым и эффективным методом повышения прочности стали является увеличение содержания в ней углерода. Однако этот механизм упрочнения не пригоден для сталей низкотемпературной техники, содержание углерода – основного упрочняющего железа элемента в этих сталях должно быть сведено к минимуму (0,08–0,17 %), так как увеличение концентрации углерода в стали на 0,01 % повышает температуру, при которой происходит охрупчивание стали на 10–15 %. Для замещения упрочняющего воздействия углерода и повышения хладостойкости стали необходимо применять метод микролегирования, который позволяет регулировать свойства железоуглеродистых сплавов (сталей). В состав легирующих элементов входят редкие и редкоземельные металлы и их соединения [4].

В последние годы приобретает актуальность создание новых материалов с заранее заданными физико-механическими свойствами с использованием минерального сырья (рис.4) с



Рис.4. Обогащенная и измельченная железомарганцевая руда, как готовая шихта для последующей плавки

природным комплексом легирующих элементов, обеспечивающих эти свойства. Для создания новых высокопрочных хладостойких сталей, отвечающих климатическим зонам, необходимо провести опытно-экспериментальные исследования [5,6]. Перспективным материалом для разработки специальных сталей являются месторождения марганцовистых бурых железняков в Якутии.

В Центральной Якутии марганцево-железные месторождения распространены на обширной территории Лено-Буотамского и Лено-Амгинского междуречья, образуя Ленское рудное поле. Наиболее изученным и хорошо разведанным является Буотамское месторождение марганцовистых бурых железняков [7].

Перспективным путем повышения прочности и хладостойкости сталей является регулирование размером зерен. Уменьшение действительных и наследственных зерен может быть достигнуто несколькими технологическими приемами – оптимизацией химического состава стали и технологии ее выплавки; микролегированием, например одним или несколькими элементами из группы V, Nb, Zr, Ti; модифицированием редкоземельными и щелочно-земельными металлами с целью глобуляризации нематаллических включений. С этой точки зрения особый интерес представляют собой природно-легированные железомарганцевые руды Ленского рудного поля Республики Саха (Якутия), в составе которых содержатся как микролегирующие, так и модифицирующие примеси [8].

Совместно с СПБГПУ созданы конструкционные стали нового поколения, обладающие высокими прочностными свойствами в условиях низких климатических температур.

Сталь создана на базе железомарганцевой руды Ленского рудного района. Химический состав (мас. %): углерод 0,12–0,18; марганец 0,3–0,6; кремний 0,15–0,37; ванадий 0,08–0,12; ниобий + титан 0,1–0,15; фосфор 0,005–0,020; сера 0,001–0,020; алюминий 0,03–0,06; РЗМ (церий, лантан, неодим, иттрий – в соотношении 35:35:15:15) 0,01–0,09; кальций 0,001–0,01; барий 0,001–0,01; азот 0,03–0,06; железо – остальное. Сталь обладает высоким уровнем хладостойкости, механических свойств и трещиностойкости, пониженным уровнем сегрегаций атомов примесных элементов в границах зерен за счет оптимизации микролегирующего комплекса и термической обработки, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность и долговечность оборудования, температура эксплуатации которого может опускаться до –60 °С.

Разработаны и прошли широкие натурные испытания в условиях Республики Саха (Якутия):

- хладостойкая, маломагнитная сталь для узлов и деталей бурового оборудования. Химический состав (мас. %): углерод 1,0–1,2; марганец 24,0–26,0; хром 2,5–5,0; алюминий 4,0–6,0; бор 0,005–0,1; иттрий 0,005–0,05; церий 0,005–0,05; ванадий 0,08–0,12; ниобий 0,01–0,04; кальций 0,001–0,01; железо – остальное. Сталь имеет высокие механические свойства и низкую магнитную проницаемость, величина которой не изменяется в диапазоне рабочих температур бурового оборудования;

- хладостойкая малоперлитная экономлегированная сталь для сварных литых деталей рам большегрузных промышленных тракторов и т.п. Химический состав (мас. %): углерод 0,10–0,16; марганец 0,9–1,3; кремний 0,2–0,6; хром 0,2–0,6; ванадий 0,10–0,15; содержание серы и фосфора не более 0,020 % каждого. Рекомендуемое содержание остаточного алюминия составляет 0,3–0,06 %, а кальция при обработке ШЗМ 0,025–0,035 %. Температура нагрева под нормализацию 900–950 °С. Критический коэффициент интенсивности напряжений стали при динамическом нагружении в 1,4 раза выше такового серийной стали. Удельная работа развития трещины при – 60 °С составляет 14 Дж/см², а критическая температура хрупкости T_{50} равна –22 °С. Сталь имеет высокие литейно-технологические свойства, хорошую свариваемость и обрабатываемость резанием, не склонна к образованию горячих и холодных трещин при сварке, а механические свойства и хладостойкость сварных соединений удовлетворяют указанным требованиям;

- хладостойкая сталь с повышенной прочностью. Химический состав (мас. %): углерод 0,15–0,22; марганец 0,3–0,6; кремний 0,15–0,40; ванадий 0,08–0,12; титан 0,001–0,040; ниобий 0,001–0,040; алюминий 0,03–0,06; сера 0,010–0,020; фосфор 0,010–0,020; церий 0,005–0,05; кальций 0,001–0,01; барий 0,001–0,01, железо – остальное;

- высокопрочная среднелегированная сталь для ответственных деталей техники в северном исполнении, в том числе опорные катки и зубья ковшей мощных карьерных экскаваторов. Химический состав (мас. %): углерод 0,38–0,45; кремний 0,40–0,50; марганец 0,80–1,20; хром 2,0–2,50; молибден 0,20–0,30; никель 1,30–1,60; медь не более 0,30; ванадий 0,10–0,15; кальций 0,005–0,01; церий 0,005–0,01; алюминий 0,03–0,06; железо – остальное. Сталь обладает повышенной износостойкостью при работе экскаваторов в различных горных породах.

Предложенные стали обладают хорошей технологичностью, не требуют усложнения производственного процесса и рекомендованы для

изготовления ответственных деталей горнодобывающей техники.

Созданные стали (рис.5) по физико-механическим свойствам превосходят своих прототипов (серийных аналогов) на 15–25 %.



Рис.5. Образцы выплавленных хладостойких и высокопрочных сталей

Заключение

1. В связи с планируемым развитием Арктического шельфа Северного Ледовитого океана на территории Республики Саха (Якутия), включающим проведение широкомасштабных геологоразведочных работ и разработку минерально-сырьевых ресурсов, необходимо усилить обеспечение работ в области материаловедения, металлургии и работоспособности механизмов и конструкций в условиях естественных низких температур. В Институте физико-технических проблем Севера СО РАН имеются все условия для развития данного направления, в частности, накопленный за 45 лет интеллектуальный багаж и высококвалифицированный кадровый состав. Важным фактором развития данного направления является территориальная близость интересующей территории и возможность комплексирования научных исследований с другими подразделениями ЯНЦ СО РАН, которые так или иначе будут задействованы в данном проекте – Институт горного дела Севера и Институт мерзлотоведения.

2. В области разработки новых металлических материалов и технологических процессов их производства сплавы системы Fe–Mn занимают особое место. Легированные сплавы, созданные на основе системы Fe–C–Mn, имеют высокую прочность при низких температурах, повышенную коррозионную стойкость, а также удовлетворительные динамические характеристики.

3. Предложенные новые поколения среднелегированных сталей, обладающих хорошей тех-

нологичностью, рекомендованы для изготовления высокопрочных ответственных литых деталей. Разработки технологии восстановления руд Ленского рудного поля для выплавки хладостойких сталей, в частности, предложенные химические составы, будет способствовать значительному сокращению себестоимости металлопродукции и повышению работоспособности горнодобывающей техники.

Литература

1. Подъячев Б.П., Бикбаева Т.В., Амузинский В.А. Как мы искали Тамгинский железный завод // Наука и техника в Якутии. – 2003. – №1. – С. 54–59.
2. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Петров П.П. Исследование физико-механических основ создания высокопрочных и хладостойких сплавов северного исполнения с применением местной комплексно-легированной РЗМ железомарганцевой руды // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – №9. – С. 51–58.
3. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Петров П.П. Разработка высокопрочных и хладостойких сплавов с применением руд Ленского рудного поля // Сб. докладов II Межд. науч. конф. «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов» (24–25 ноября 2011 г., Орск). – М.: Машиностроение, 2012. – Т. 1. – С. 444–453.
4. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Москвитин С.Г. и др. Перспективы создания высокопрочных, хладостойких сталей из природно-легирующей руды Ленского рудного поля // Химическая технология. – 2010. – Т. 11, №12. – С. 755–760.
5. Ермаков Б.С., Солнцев Ю.П. Низкотемпературные свойства легируемых сплавов системы Fe–Mn // Прочность материалов и конструкций при низких температурах: – СПб.: СПбГУНИПТ, 2003. – С. 31–36.
6. Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С., Поваров Д.В. Материалы и надежность низкотемпературных конструкций. – СПб.: Химиздат, 2007. – 168 с.
7. Слепцов О.И., Лебедев М.П., Петров П.П., Москвитин С.Г. Разработка сталей северного исполнения на основе железомарганцевой руды Ленского рудного поля // Материалы выездной сессии научного Совета РАН по научным основам химической технологии «Современные проблемы химической технологии» (20–22 октября 2009 г., Новосибирск). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – С. 48–49.
8. Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Петров П.П. Возможность применения руд Ленского рудного поля при разработке новых хладостойких сталей // Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций. – СПб.: СПбГУНИПТ, 2011. – С. 40–48.

Поступила в редакцию 24.07.2015

УДК 621.777 : 539.538 : 620.186

Особенности триборазрушения гетерогенных структур системы «субмикронная ферритная матрица, армированная нано- и микрокарбидами»

С.П. Яковлева, С.Н. Махарова

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Проведены экспериментальные исследования износостойкости и трибодеструкции при трении скольжения низколегированной стали до и после объемного наноструктурирования с применением холодного (при комнатной температуре) равноканального углового прессования. На различных этапах трибонагружения изучен с применением методов оптической и растровой электронной микроскопии, профилометрии и расчета автокорреляционных функций шероховатости поверхностей трения процесс изнашивания стали в крупнозернистом и наноструктурированном состояниях. Показано, что образование в ней гетерогенной структуры системы «субмикронная ферритная матрица – наноразмерная карбидная фаза» обеспечило кратное увеличение износостойкости. Выявлены особенности контактного разрушения, определяющие рост износостойкости стали при измельчении структуры и указывающие на существенные различия в природе формирования трибологической прочности металла в зависимости от уровня дисперсности структурных элементов.

ЯКОВЛЕВА Софья Петровна – д.т.н., проф., зав. отделом, spyakovleva@yandex.ru; МАХАРОВА Сусанна Николаевна – к.т.н., в.н.с., snmachar@yandex.ru.