

ПОЛУЧЕНИЕ АЗОТИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СВС-МЕТАЛЛУРГИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ОСВОЕНИЮ АРКТИКИ

Д.М. Икорников*, В.И. Юхвид, Д.Е. Андреев, В.Н. Санин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*denis-ikornikov@yandex.ru

Одной из важных задач освоение Арктики является создание новых сталей и технологий их получения. Для решения задачи наиболее перспективным направлением является экономно легированные хладостойкие стали с высокой прочностью, работающие при температуре ниже -30°C . Основными легирующими элементами в стали являются Cr, Mn, Ni. Дополнительно, в состав хладостойких сталей могут быть введены небольшие добавки Si, Mo, V и др., существенно повышающие прочность стали при низких температурах [1, 2]. Наиболее сильно сталь охрупчивают примеси S и P, а также C, поэтому для практики большой интерес представляют низкоуглеродистые легированные стали с малым содержанием S и P.

Было установлено, что введение добавок азота в сталь уменьшает хрупкость и увеличивают хладостойкость. Растворимость азота в стали при атмосферном давлении не превышает 0,3 масс. %. Коррозионностойкие стали мартенситного (с содержанием азота – до 0,1%) и аустенито-мартенситного классов (с содержанием азота – до 0,15%) выплавляют в открытых индукционных или дуговых печах при атмосферном давлении. Для получения более высокого содержания азота разработано новое оборудование, позволяющее проводить плавку под давлением азота [3, 4]. Для введения азота в сталь используют, как правило, газообразный азот или азотсодержащую лигатуру (нитриды металлов или азотированные ферросплавы). Известен подход, использующий алюминотермию под давлением азота и добавками азотсодержащей лигатуры [5]. Для экспериментальных исследований был разработан базовый состав, целевым продуктом химического превращения которого является легированная сталь (таблица 1).

Таблица 1. Расчетный состав базовой смеси (БС) и стали из него

Базовая смесь, масс. %							Состав стали, масс. %					
Fe ₂ O ₃	Al	MnO ₂	NiO	MoO ₃	V ₂ O ₅	SiO ₂	Fe	Mn	Ni	Mo	V	Si
51.3	25.7	14.7	6.8	0.7	0.3	0.5	70.0	18.3	10.0	1.0	0.3	0.4

Для получения азотированной стали в базовую смесь вводили добавку, включающую комбинацию Cr₂N и Cr: БС + X (Cr) + Y (Cr₂N). Вариация соотношения масс Cr₂N и Cr позволяла изменять содержание азота в стали, сохраняя содержание хрома постоянным.

В экспериментах было изучено влияние перегрузки на горение смеси – Fe₂O₃/MnO/NiO/MoO₃/V₂O₅/SiO₂/Al/Cr целевым продуктом химического превращения которой является сталь легированная Cr, Mn, Ni, Mo, V и Si. Исследование показало, что при 1g горение сопровождается сильным разбросом смеси, а перегрузка подавляет разброс. Продукты горения сталь и шлак имеют литой вид.

При a = 1g они плохо разделяются, а при a = 50g – разделены на 2 слоя и практически не имеют сцепления. В дальнейшем все эксперименты проводили при перегрузке a = 50g. Было показано, что во всех изученных интервалах концентраций Cr и Cr₂N смеси сохраняют способность к горению, η₁ и η₂ слабо изменяются, а продукты горения хорошо разделяются.

В основной серии экспериментах было изучено влияние содержания Cr₂N на интегральный химический и фазовый составы стали (рис. 1 и 2), структуру стали рис. 3.

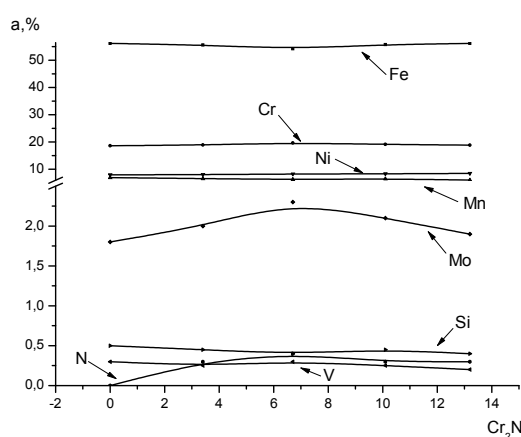


Рис. 1. Влияние содержания Cr₂N на интегральный химический состав стали. Исходная смесь: X (Fe₂O₃/MnO/NiO/MoO₃/V₂O₅/SiO₂/Al) + Y Cr+ Z Cr₂N, где α Cr₂N = m(Cr₂N) / m(Cr₂N) + m(Cr) 100%

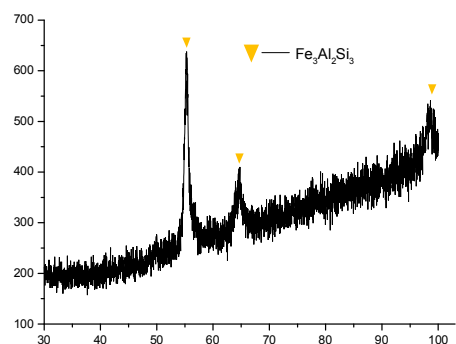


Рис. 2. Рентгенограмма стали. Исходная смесь: БС – 88,3; X – 5,0; Y – 6,7

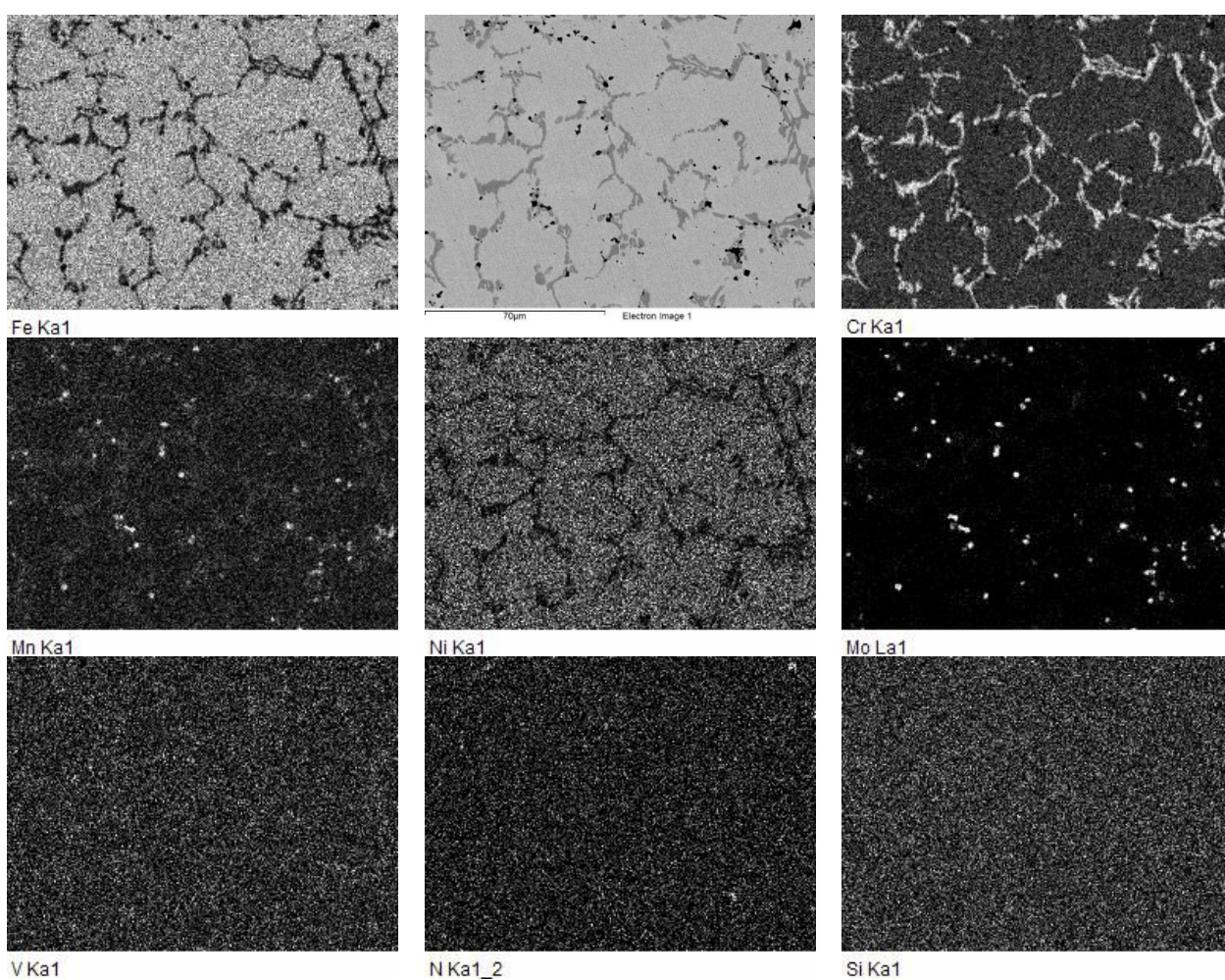


Рис. 3. Карта распределения основных элементов в стали. Исходная смесь: БС – 88,3; X – 5,0; Y – 6,7

Было установлено, что с ростом содержания Cr_2N в исходной смеси (Y) содержание азота в стали вначале возрастает до 0,3 – 0,4 масс. %, а далее не меняется (рис. 1). Следует

отметить, что содержание N для $Y \geq 3,4$ и Mn для $0 \leq Y \leq 13,3$ в стали, полученное в экспериментах (рис. 1), существенно меньше расчетных значений таб. 2. Содержание всех других элементов в стали изменяется слабо и близко к расчетным значениям. По данным рентгенофазового анализа сталь имеет решетку γ -Fe (рис. 2). Смещение пиков и их уширение свидетельствует о растворении легирующих элементов в γ -Fe.

Исходя из представлений, разработанных ранее при исследовании СВС-металлургии можно представить следующую динамику процессов получения азотированной стали. Во фронте горения смеси $Fe_2O_3/MnO/NiO/MoO_3/V_2O_5/SiO_2/Al/Cr/Cr_2N$ протекает химическое превращение. Продуктами химического превращения являются сталь Fe/Cr/Mn/Ni/Mo/V/Si/N и шлак (Al_2O_3). Высокий тепловой эффект реакции позволяет реализовать температуру горения, превышающую температуру плавления стали и шлака. Из расплава продуктов горения формируется двухфазный расплав, в котором шлак образует сплошную среду, а сталь в виде капель распределена в нем. По мере перемещения фронта горения высота слоя расплава увеличивается. В слое формируется градиент температуры. По этой причине под воздействием гравитации (или перегрузки) развивается гравитационная конвекция. Скорость конвективного движения определяется числом Грасгофа. Согласно критерию, с увеличением градиента температуры и величины перегрузки скорость конвективного движения возрастает. Конвективное движение над фронтом горения приводит к интенсивному перемешиванию расплава, увеличению полноты химического превращения исходной смеси и формированию однородного состава продуктов горения (капель стали и шлака).

После завершения горения, интенсивность конвективного движения снижается и осуществляется гравитационная сепарация продуктов горения. В оптимальных условиях полнота гравитационной сепарации близка к расчетной и после охлаждения и кристаллизации формируется двухслойный продукт, сталь и шлак.

Литература

- [1] Yu.A. Shulte. Khladnostoikie stali. M.: Metallurgiya. (1970) 223 p. (in Russian) [Ю.А. Шульте. Хладнотойкие стали. М.: Metallurgiya. 1970. 223 с.]
- [2] V.P. Larionov, V.R. Kuzmin, O.I. Sleptsov, A.M. Bolshakova et al. Khladostoičnost materialov i elementov konstruktsii: Rezultaty i perspektivy. Prochnost, resurs i diagnostika elementov metallokonstruktsii. N.: Nauka. (2005). 290 p. (in Russian) [В.П. Ларионов, В.Р.Кузьмин,

О.И.Слепцов, А.М.Большаков и др. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: Результаты и перспективы. Прочность, ресурс и диагностика элементов металлоконструкций. Новосибирск: Наука. 2005. 290 с.]

- [3] S.A. Krylov, A.G. Evgenov, A.I. Scherbakov, A.A. Makarov. Trudy VIAM. **41**(5), 1 (2016). (in Russian) [С.А. Крылов, А.Г. [Евгенов](#), А.И. [Щербаков](#), А.А. Макаров. [Труды ВИАМ](#). **41**(5), 1 (2016).]
- [4] Ts.V. Rashev. Vysokoazotistye stali: Metallurgiya pod davleniem. Sofia: Prof. Marin Drinov (1995) 272 p. (in Russian) [Ц.В. Рашев. Высокоазотистые стали. Metallurgiya pod davleniem. Sofia: Prof. Marin Drinov. (1995) 272 с.]
- [5] I.V. Sapagina, G.A. Dorofeev, M.I. Mokrushina, B.E. Pushkarev, V.I. Ladyanov. Letters on Materials. **7**(2), 137 (2017). (in Russian) [И.В. Сапегина, Г.А. Дорофеев, М.И. Мокрушина, Б.Е. Пушкарев, В.И. Ладьянов. Письма о материалах. **7**(2), 137 (2017).]