

Влияние технологии микролегирования стали титаном на степень его усвоения

Показана актуальность использования титана в качестве микролегирующего элемента при выплавке качественных сталей. В условиях ПАО «МК «Азовсталь» проанализирована динамика выплавки титаносодержащих сталей за последние 5 лет.

На основании анализа данных теоретических и экспериментальных исследований проанализирована технология микролегирования титаном различных марок стали, в том числе низкоуглеродистых трубных (X70-X80), среднеуглеродистых конструкционных (A514B) и низкокремнистых (B431).

Проанализированы степень усвоения титана и влияние на нее режимов раскисления. Показано, что с целью снижения угара титана и повышения качественных показателей низкоуглеродистой стали его ввод следует осуществлять после окончательного раскисления металла алюминием при содержании в металле не менее 0,022 % кислоторастворимого алюминия совместно с присадкой алюминия (при соотношении алюминия и титана не менее 0,8 ед.). При производстве средне- и высокоуглеродистой стали содержание кислоторастворимого алюминия в период ввода титана должно быть более 0,012 %, а соотношение алюминия и кальция не менее 1,2 ед. (Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.)

Ключевые слова: раскисление, микролегирование, модифицирование, титан, неметаллические включения, степень усвоения, нитриды, оксикарбонитриды.

Relevance of titan use as the microalloying element when smelting of high-quality steel is shown. In the conditions of PJSC «Azovstal Iron and Steel Works» dynamics of smelting of titaniferous steel over the last 5 years is analyzed.

Basing on the analysis of theoretical and experimental studies, technology of microalloying by titan of various steel grades, including low-carbon pipe steel (X70-X80), intermediate-carbon constructional (A514B) and low-silicon steel is analyzed (B431).

Recovery extent of titan and influence of deoxidation modes on it are analysed. It is shown that for the purpose of decrease in waste of titan and increase of qualitative indexes of low-carbon steel, its input should be performed after final deoxidation of metal by aluminum in case of content in metal at least 0,022 % of acidsoluble aluminum together with aluminum additive (in case of ratio of aluminum and titan at least 0,8 pieces). In case of production of medium and high carbon steel, content of acid-soluble aluminum during titan introduction should be more than 0,012 %, and ratio of aluminum and calcium at least 1,2 pieces.

Key words: deoxidation, microalloying, modifying, titan, non-metallic inclusions, recovery extent, nitrides, oxycarbonitrides.

Стремление к снижению материало- и энергоемкости продукции привело к созданию низколегированных сталей, в которых высокие эксплуатационные свойства обеспечиваются за счет дисперсионного упрочнения карбидо- и нитридообразующими элементами [1–4]. Их влияние на качество стали связано с процессами, протекающими в твердой фазе. В сталях рядового сортамента основными элементами, обеспечивающими твердофазное упрочнение, является алюминий, марганец и кремний. В низколегированных сталях измельчение зерна достигается путем введения одного или нескольких микролегирующих элементов – титана, ниобия, ванадия.

Наиболее характерным следствием введения микролегирующих добавок является торможение рекристаллизации аустенита при контролируемой прокатке карбонитридами этих элементов. Последние, имея высокую температуру

плавления, закрепляют границы зерен аустенита и тем самым сдерживают их рост, т. е. обеспечивают формирование мелкого зерна феррита.

Считают, что повышение прочностных свойств стали происходит за счет дисперсионного упрочнения с выпадением из феррита при охлаждении мелких частиц карбонитридных фаз, сохраняющих ориентационную связь с матрицей железа. Управляя условиями растворения и выделения таких фаз, можно получить металл с требуемыми механическими свойствами.

Титан относится к наиболее сильным ферритообразующим элементам. Введение титана способствует повышению хладностойкости стали, дисперсионному упрочнению за счет получения мелкозернистой структуры стали и модифицирования неметаллических включений, в том числе сульфидов.

Поэтому в настоящее время титан преимущественно используют для микролегирования

и модифицирования низколегированных конструкционных, трубных, рельсовых и других сталей, к которым предъявляются повышенные требования по коррозионной стойкости и пластичности.

В трубных сталях третьего поколения (типа 09Г2СУ и 17Г1СУ) содержание титана составляет 0,08–0,18 %. Все чаще его применяют при производстве низкоуглеродистых коррозионно-стойких и чистых сталей. В этих сталях содержание титана составляет 0,02–0,04 %.

Вместе с тем титан обладает достаточно высокой раскислительной способностью [5]. По своей раскислительной способности он располагается между алюминием и кремнием. При температуре 1600 °С и содержании титана в металле около 0,01 % в равновесии с ним будет находиться $(4 - 8) \cdot 10^{-3}$ % кислорода. При аналогичном содержании алюминия равновесное содержание кислорода будет значительно меньше – $1 \cdot 10^{-3}$ %. Согласно экспериментальным данным фактическое содержание кислорода в период внепечной обработки выше и составляет около 0,040 %. Поэтому микролегирующее и модифицирующее действие титана зависит от технологии раскисления, в том числе режима ввода основных раскислителей.

В условиях ПАО «МК «Азовсталь» проанализирована динамика выплавки титаносодержащих сталей за последние пять лет. Объемы выплавки этих сталей в условиях комбината снижаются. В 2008 г. с использованием титана выплавлено более 1,1 млн т стали (26 % от общего объема производства). В 2013 г. производство титаносодержащих сталей сократилось и составило около 350 тыс. т (4,7 % от общего объема производства). Это связано с дефицитом титаносодержащих ферросплавов (отечественный поставщик Запорожский титаномagneиный комбинат практически не работает), высокой стоимостью титана по сравнению с алюминием (в 1,8–2,6 раз больше), а также изменением сортамента стали, в котором доля высококачественного металла постепенно уменьшается.

Анализ сортамента титаносодержащих сталей в 2012–2014 гг. показал, что основная продукция комбината представлена трубной и конструкционной низколегированной сталью. Выборочно по заказам с использованием титана комбинат производит низкокремнистую сталь и судосталь. При отсутствии условий глубокого обезуглероживания (верхняя продувка) на комбинате титан используют для связывания углерода и азота в прочные карбиды и нитриды титана, которые имеют высокую температуру плавления (2950 и 3150 °С соответственно для нитридов и карбидов титана) и прочность.

При разработке оптимальной технологии раскисления этих сталей в условиях 350-т конвертеров комбината был проанализирован отечественный и зарубежный опыт микролегирования, в том числе механизм дисперсионного упрочнения металла нитридообразующими элементами (алюминием и титаном).

Свойства готовой стали во многом зависят от условий образования нитридов алюминия, (950–1200 °С), выделение которых до рекристаллизации положительно влияет на структуру проката.

Одним из факторов, обеспечивающих подавление выделения нитрида алюминия в процессе прокатки, является оптимизация содержания азота и кислоторастворимого алюминия $[Al]_k / [N]$. Так, например, в условиях «Северстали», при производстве низкоуглеродистой автолистовой стали (микролегированной ниобием и титаном в количествах 0,002 % каждого), содержащей 0,004 % азота, отношение $[Al]_k / [N]$ должно составлять не менее 8 ед. [6].

При таком соотношении компонентов в условиях комбината «Азовсталь» и содержании азота в металле на повалке конвертера 0,002–0,004 % концентрация $[Al]_k$ должна составлять 0,016–0,032 %. Однако, как показали результаты анализа качества металла текущего производства, такое содержание алюминия не всегда гарантирует стабильность прочностных характеристик металла, а при более высоком содержании алюминия он может оказать негативное влияние на процесс непрерывной разливки стали.

Кроме того, в процессе выпуска в металл дополнительно поступает 0,002–0,004 % азота. Это значительно повышает склонность стали к старению и требует ввода более сильных нитридообразующих элементов.

Титан, обладая более сильным сродством к азоту, чем алюминий, образует при кристаллизации стабильные нитриды, температура выделения которых существенно выше температуры выделения нитридов алюминия.

Оптимальная температура выделения нитридов титана при выплавке трубных сталей составляет 1400–1500 °С. Как правило, они выделяются в процессе кристаллизации, когда отсутствуют естественные условия их удаления. Они практически не могут быть растворимы в аустените при нагреве под прокатку. Их влияние на качество стали заключается в контроле размера зерна.

Эффект микролегирования и модифицирования титаном зависит от состава стали и технологии раскисления, в том числе от содержания кислоторастворимого алюминия.

Алюминий, как более слабый нитридообразующий элемент, активизирует способность титана образовывать дисперсные карбонитриды. При содержании алюминия менее 0,015 % раскислительная способность титана достаточно велика (до 0,03–0,04 % Ti), а скорость образования нитридов незначительна. С ростом содержания титана могут возникать условия, когда нитрид алюминия при горячей прокатке образовываться не будет.

Введение в сталь более сильного, чем алюминий, нитридообразующего элемента – титана – в результате образования мелкозернистых нитридов обеспечивает такие эффекты, как измельчение зерна, упрочнение стали без снижения пластических свойств. Эти эффекты давно используют в производственной практике.

Ускорение превращения аустенита путем добавок алюминия и титана используют для создания стали различных марок, в том числе пониженной прокаливаемости. При этом наибольшие трудности при освоении новых марок титаносодержащих сталей возникают с подбором оптимальных концентраций титана.

Исходя из стехиометрического соотношения титана и азота $Ti/N = 3,4$, минимальная концентрация титана, необходимая для нейтрализации остаточного азота в стали в условиях комбината «МК «Азовсталь» должна составлять 0,016–0,028 %. При этом следует отметить, что часть титана поступает с шихтовыми материалами. В металле на повалке конвертера может содержаться до 0,005 % титана. Остальное количество титана вводит в сталь в период внепечной обработки. В зависимости от режима ввода раскислителей часть титана расходуется на раскисление и образование карбидов титана.

При выплавке углеродистых сталей расход титана повышается. В углеродистой стали возможно образование карбида титана TiC с температурой плавления 3150 °С. Он имеет высокую твердость (28 ГПа) и широкую область гомогенности. В системе $TiC-TiN$ наблюдается непрерывный ряд твердых растворов – карбонитридов. Влияние титана на структуру углеродистой низколегированной стали связано с образованием сложных карбонитридов титана.

При выплавке низкоуглеродистых автолитовых сталей высокое содержание титана (аналогично алюминию) может оказывать негативное влияние на процесс непрерывной разливки стали. Затруднения в процессе непрерывной разливки стали связаны с интенсивным образованием неметаллических включений из карбонитридов и оксикарбонитридов титана. Последние закрепляются на поверхности погружа-

емых стаканов, перекрывают сечение каналов и вынуждают прекращать разливку.

Во избежание этого при выплавке титаносодержащих сталей, как правило, используют двойную стабилизацию: азот связывают титаном, а углерод ниобием (ванадием). Нитриды и карбиды ниобия (ванадия) полностью растворимы в аустените и поэтому не оказывают влияния на размер зерна аустенита при высокотемпературном нагреве. Температура выделения карбидов около 800 °С. Частицы, сформировавшиеся при такой низкой температуре, имеют меньшие размеры и упрочняют сталь по механизму дисперсионного твердения.

Совместное микролегирование обеспечивает более сильное измельчение зерна, чем микролегирование ниобием и ванадием без титана. Оптимальное содержание ниобия для низкоуглеродистых автолитовых сталей (0,07–0,08 % углерода, около 0,06 % ванадия и 0,015 % титана) с пределом текучести более 460–500 Н/мм² в условиях «Северстали» составляет 0,024 % [5].

Содержание в различных марках стали микролегирующих элементов титана, ниобия и ванадия строго регламентируется и составляет предмет отдельных (металлографических) исследований. Основная задача металлургов состоит в разработке оптимальной технологии внепечной обработки конкретных марок стали, обеспечивающих максимальную экономию используемых материалов.

Учитывая более высокую стоимость (в 1,8–2,6 раз больше) и меньшую раскислительную способность титана по сравнению с алюминием, практический интерес представляет влияние технологии и режимов раскисления на расход и степень усвоения титана.

В металлургии накоплен достаточный опыт раскисления титаносодержащих сталей. Отечественный и зарубежный опыт производства титаносодержащих сталей показывает, что оптимальным режимом загрузки титана является совместный ввод титана с алюминием с одновременным модифицированием кальцием ($FeCa$, $SiCa$). При этом следует учитывать, что высокий расход алюминия при совместном вводе может за счет выделения тепла снизить степень усвоения титана – отношение расхода Al и Ti в период микролегирования должно быть оптимальным.

Большое влияние на степень усвоения титана оказывает температура расплава. С увеличением температуры при прочих равных условиях угар титана повышается. По данным промышленных испытаний, в процессе выдержки расплава с температурой 1620 °С часть ранее образовавшихся нитридов титана окисляется, а

степень усвоения титана невелика и составляет 20–40 %. Вместе с тем раскисление металла при низкой температуре (около 1540 °С) обеспечивает более высокую степень усвоения титана – 65–85 % [6].

Поэтому титан необходимо вводить в хорошо раскисленный металл после окончательного раскисления алюминием, желательнее с более сильными раскислителями. Например, ШЗМ (Са) или РЗМ (Се) [7]. При этом присадки ниобия (ванадия) производят после раскисления алюминием при содержании последнего в металле менее 0,040 %, а присадки титана – в конце доводки в отсутствие нагрева металла при оптимальной температуре ванны.

С учетом вышеизложенного на комбинате разработана оптимальная схема микролегирования титаносодержащих сталей. В табл. 1 представлен средний химический состав наиболее востребованных титаносодержащих сталей, в том числе низкоуглеродистой трубной (Х70), среднеуглеродистой конструкционной (А514В) и низкокремнистой (В431). Указанные марки стали выбрали не случайно.

Низкоуглеродистая легированная молибденом трубная сталь Х70 (аналог 09Г2ФБ), с содержанием серы 0,002–0,003 % – трубная малоперлитная сталь четвертого поколения со структурой нижнего бейнита. Она используется для изготовления труб большого диаметра в северном исполнении с временным сопротивлением не менее 600 МПа.

Среднеуглеродистая сталь А514В жаропрочная безникелевая сталь с пределом текучести

700 МПа. Она широко используется в строительстве и машиностроении при производстве изделий ответственного назначения. Это особый вид металла, который имеет не только высокую прочность, но и низкое содержание примесей внедрения, в том числе азота менее 0,010 % и серы 0,002–0,008 %.

Сталь В431 для глубокой вытяжки используется в автомобилестроении. Представляет собой класс наиболее востребованной низкокремнистой стали.

На комбинате используют низкомарганцовистый чугуны с содержанием (% масс.): 0,2–0,3 [Mn], 0,5–0,8 [Si], 0,008–0,032 [S]. Температура чугуна – 1280–1320 °С.

В зависимости от состава металлошихты продолжительность продувки составляет 14–18 мин. В конце продувки в металле содержится (% масс.): 0,04–0,45 [C], менее 0,1 [Mn], 0,002–0,004 [N] и [S]. Температура металла на выпуске – 1620–1660 °С. Окисленность металла – 0,08–0,10 %. В шлаке содержится 14–18 % окислов железа. Основанная масса раскислителей вводится в сталеразливочный ковш (СК). Затем металл подается на УПК, где продолжается процесс его раскисления базовыми раскислителями. Расход раскислителей в период внепечной обработки представлен в табл. 2.

Технологии раскисления и легирования этих сталей имеют существенные отличия. При раскислении стали Х70 ввод титаносодержащих материалов осуществляется в период вакуумирования. Микролегирование ниобием и ванадием производят на 1–4-й минуте обработки на

Таблица 1

Средний химический состав титаносодержащих сталей

Марка стали	Содержание элемента, %													
	C	Mn	Si	Al	Ti	Nb	V	Cu	Mo	Cr	Ni	S	P	B
Х70	0,08	1,59	0,20	0,028	0,015	0,038	0,067	0,04	0,12	0,05	0,14	0,002	0,011	<0,005
А514В	0,20	0,94	0,24	0,027	0,015	0,010	0,054	0,04	0,16	0,53	0,03	0,006	0,012	0,015
В431	0,08	1,49	0,025	0,034	0,029	0,039	0,057	0,04	0,006	0,02	0,14	0,009	0,013	<0,005

Таблица 2

Удельный расход элементов при раскислении титаносодержащих сталей

Марка стали	Расход чистых элементов, кг*						
	Mn	Si	Al	V	Nb	Ti	Cr
Х70	5054,8 / 4894,5	947,8 / 806,95	640,7 / 325,5	216 / 0	124 / 0	95,8 / 0	–
А514В	3343 / 3114	1238 / 994	337,6 / 77,8	200 / 0	–	109 / 0	1560 / 1560
В431	5439 / 5107	65 / 65	857 / 478	214 / –	137,2 / –	171 / –	–
Удельный расход элементов, кг/0,01% (кг/т стали)							
Х70	33,2 / 15,52	47,3 / 2,91	228,8 / 1,98	32,2 / 0,66	32,6 / 0,38	63,8 / 0,29	–
А514В	38 / 9,43	51,6 / 6,5	125,1 / 0,92	37,0 / 0,56	–	72,7 / 0,31	32,5 / 4,4
В431	38 / 16,3	26 / 0,19	252 / 2,56	37,5 / 0,64	35,2 / 0,41	59,0 / 0,51	–

*Числитель – общий расход элементов раскислителей. Знаменатель – расход в стальковше

УКП до начала нагрева ванны. В конце обработки вводят CaC_2 из расчета 1,5 кг/т стали. Микролегируют титаном, как правило, производят на вакууматоре после присадок алюминия совместно с FeCa из расчета 110–112 кг на плавку. Соотношение расхода алюминия и титана, вводимых одновременно, – 0,8–1,2 ед. Температура металла в период присадки титана составляет 1570–1580 °С, содержание $[\text{Al}]_k$ – 0,012–0,030 %.

Микролегируют стали А514В – в конце доводки на УПК. К особенностям технологии раскисления и микролегирования этой стали следует отнести использование для предварительного раскисления металла и шлака в сталеразливочном ковше (СК) углеродсодержащих материалов – угля (АО и АКО) и карбида кальция в количестве – 1,0–1,2 и 0,8–1,0 кг/т стали, соответственно. Это позволяет за период раскисления в СК повысить содержание углерода в металле до 0,1–0,15 % и одновременно снизить его окисленность, что является предпосылкой существенного снижения расхода алюминия на плавку. В период обработки на УКП также используют в среднем 0,23 кг/т стали уголь АО. Температура перед началом обработки составляет 1520–1560 °С. В металле содержится 0,004–0,006 % $[\text{Al}]_k$ и около 0,94 % $[\text{Mn}]$.

Микролегируют стали В431 титаном производится в конце доводки на УПК после глубокого раскисления марганецсодержащими ферросплавами и алюминием. Для получения требуемых свойств и структуры готового металла содержание в нем $[\text{Al}]_k$ и титана значительно выше, чем в других марках стали. Это накладывает отпечаток на технологию раскисления и легирования. Глубокое раскисление металла в СК проводят марганецсодержащими ферросплавами и гранулированным алюминием.

Затем металл подают на УКП. Согласно расчетам, равновесное содержание кислорода в этих условиях в металле – $(1-3) \cdot 10^{-3}$ % – значительно меньше равновесных концентраций кислорода с ванадием и ниобием. Поэтому ванадий (иногда часть ниобия) вводят в металл до начала нагрева и раскисления, а титан – в полностью раскисленный металл в конце обработки при температуре около 1570 °С. Совместно с титаном вводят феррониобий и алюминиевую катанку. При этом соотношение расходов алюминия и титана, вводимых одновременно, составляет 0,6–1,4 (в среднем 0,84). Кальций и бор для микролегирования не используют. В период микролегирования нагрев металла не производится.

О степени усвоения элементов раскислителей судили по их удельному расходу из расчета на 0,01 % их усвоения металлом. Это позволило исключить влияние на данный показатель раз-

личных факторов, в том числе: типа стали, состава металлошхты, технологии разливки (серийность МНЛЗ) и др. Во избежание этого при расчете стандартной степени усвоения титана (%) делали поправку на средний выход жидкой стали в данной серии плавов.

За период исследования были проанализированы более 100 плавов текущего производства. В качестве титаносодержащих материалов использовали ФТи70 в составе порошковой проволоки согласно ГОСТ 4761, содержащий от 71–72,5 % Ti и 3–5 % Al. Поставщик – ХМФ ММКИ.

Гистограмма частотного распределения плавов по степени усвоения титана представлена на рис. 1. Как следует из приведенных данных, степень усвоения титана в зависимости от состава стали, технологии и режимов раскисления изменяется в широких пределах – (30–82 %), а удельный расход титана изменяется в диапазоне 43–118 кг/0,01 %. При этом на 73,3 % от общего массива плавов степень усвоения титана составляла 44–75 %.

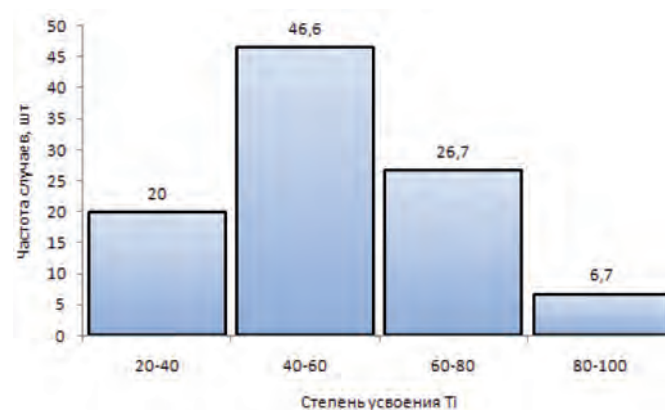


Рис. 1. Гистограмма частотного распределения плавов по степени усвоения титана

Высокий удельный расход титана – более 100 кг / 0,01 % – и, соответственно, наиболее низкая степень его усвоения (31–36 %) были зафиксированы только при выплавке среднеуглеродистой стали А514В, при раскислении которой в СК использовали углеродсодержащие материалы. Более детальный анализ этих плавов показал, что высокий угар титана обусловлен двумя факторами.

С одной стороны – недостаточной раскисленностью металла в период микролегирования титаном, о чем свидетельствует низкое содержание в металле перед вводом титана кислоторастворимого алюминия ($[\text{Al}]_k$ менее 0,008 %), и недостаточным расходом алюминия в последующий период обработки (менее 70 % от массы титана).

С другой стороны – формированием в период доводки на УПК жидкоподвижных шлаков

с относительно высоким содержанием CaF_2 . На плавках с высоким угаром титана, как правило, использовали недостаточное количество извести (менее 2,8 кг/т стали) при расходе плавикового шпата более 1,4 кг/т стали.

Следует отметить, что негативное влияние плавикового шпата на формирование шлакового покрытия при производстве титаносодержащих (нержавеющих) сталей ранее отмечалось в работе [8]. По мнению авторов, переход на известково-глиноземистые шлаки, за счет снижения поступления кислорода из атмосферы агрегата, может существенно повысить степень усвоения титана (на 6–12 %) без увеличения расхода алюминия.

Если исключить из обработки указанный массив плавов, то диапазон изменения удельного расхода титана для исследуемых типов стали независимо от технологии внепечной обработки будет примерно одинаков. Для стали X70 удельный расход титана составит 48–79, стали A514B – 43–66, низкокремнистой B431 – 50–70 кг/на 0,01 %. Степень усвоения титана для указанных марок сталей составит, соответственно, 40–68 % (X70), 52–75 % (A514B) и 50–67 % (B431).

Следует отметить, что средняя степень усвоения титана, вводимого в период вакуумирования при раскислении трубной стали, была на 10–15 % ниже степени усвоения титана при производстве низкокремнистых сталей, в которых микролегирование производили на УПК. Возможно, это связано с более высоким содержанием в низкокремнистой стали кислоторастворимого алюминия или недостаточным остаточным давлением в вакууматоре (~25 мм рт. ст.).

Анализ полученных результатов показал, что основными факторами, влияющими на сте-

пень усвоения титана, являются – степень раскисленности ванны перед вводом титаносодержащих материалов, а также соотношение расходов алюминия и титана, вводимых одновременно. Влияние раскисленности металла в период микролегирования на степень усвоения титана представлено на рис. 2. На рис. 3 показана зависимость этого показателя от расхода алюминия, вводимого в период микролегирования.

Как следует из представленных данных, при микролегировании низколегированной стали характер влияния степени раскисленности металла перед вводом титаносодержащих материалов на степень усвоения титана практически одинаков для различных марок стали. Что касается численных величин, то они различны для низко- и среднеуглеродистой металла. При микролегировании низкоуглеродистых сталей наиболее высокая степень усвоения титана достигается при содержании в металле кислоторастворимого алюминия более 0,022 %. При этом соотношение расхода алюминия, вводимого в металл одновременно с титаном, должно составлять не менее 0,8 ед. от расхода титана.

При микролегировании среднеуглеродистой стали аналогичная степень усвоения обеспечивается при содержании кислоторастворимого алюминия более 0,012 % но, при более высоком соотношении расходов алюминия и титана – не менее 1,2 ед.

При правильной организации микролегирования не зависимо от марки стали степень усвоения титана 60–75 % обеспечивается при содержании в конечном металле более 0,032 % $[\text{Al}]_k$ (рис. 4).

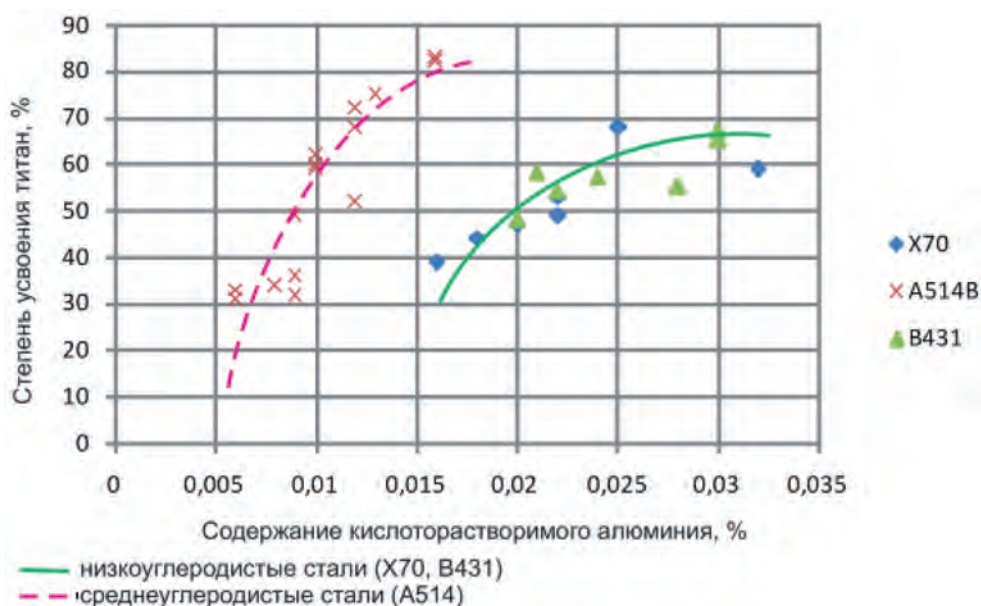


Рис. 2. Влияние раскисленности металла перед микролегированием на степень усвоения титана

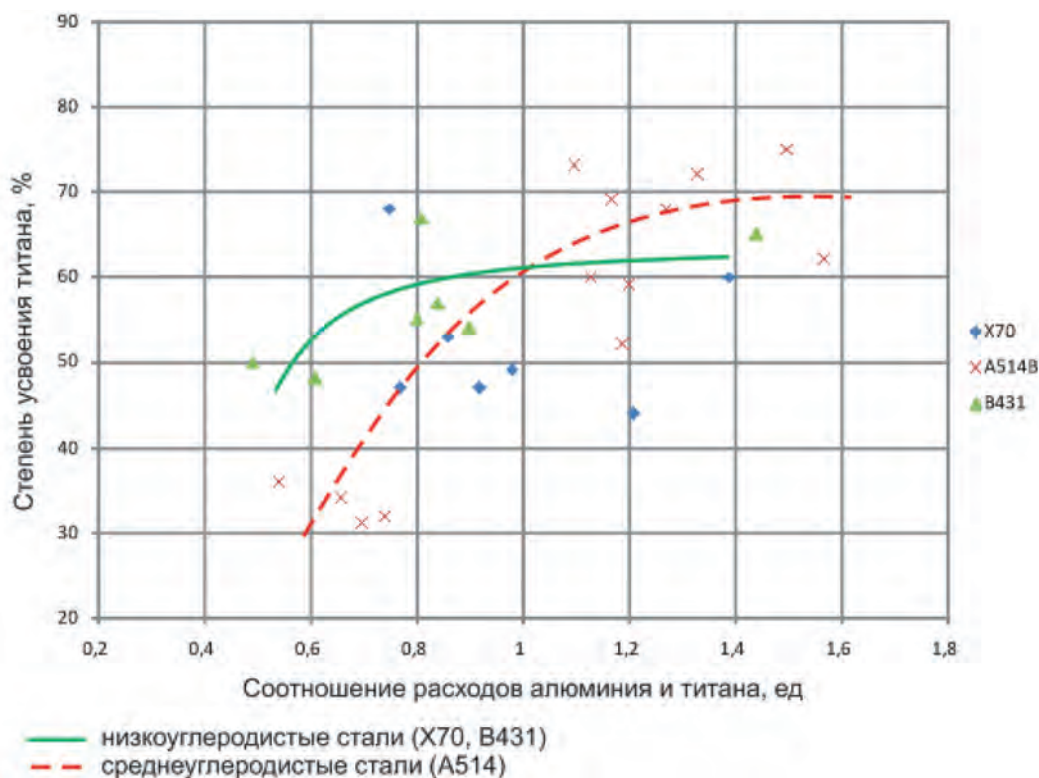


Рис. 3. Влияние соотношения расхода вводимых одновременно алюминия и титана на удельный расход титана

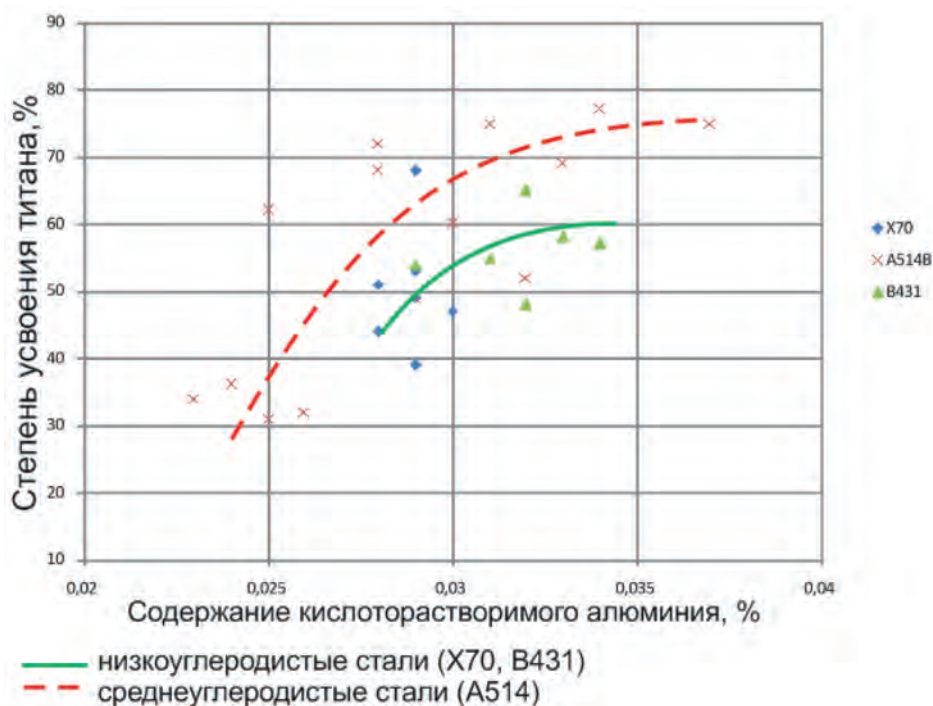


Рис. 4. Влияние раскисленности готового металла на степень усвоения титана

Выводы

В условиях «МК «Азовсталь» при использовании 70 % ферротитана для микролегирования стали в составе порошковой проволоки степень усвоения титана в зависимости от технологии внепечной обработки изменяется в широких пределах и составляет 30–82 %.

При этом удельный расход титана составляет 43–118 кг/0,01 %.

Микролегирование титаном следует проводить при относительно низких температурах на заключительных этапах внепечной обработки на УКП или в период вакуумирования на VD совместно с алюминием и феррокальцием (0,2–

0,25 кг/т стали). При этом в период микролегирования низкоуглеродистой стали содержание кислоторастворимого алюминия должно быть более 0,022 %, среднеуглеродистой стали – более 0,012 %. Расход алюминия, вводимого в период микролегирования титаном, должен обеспечить в готовом металле не менее 0,032 % [Al]_к. При выплавке низколегированной стали соотношение расходов алюминия и титана в период микролегирования должно быть более 0,8, среднеуглеродистой стали – более 1,2.

Значительное влияние на эффективность микролегирования титаном на УКП оказывает физическое состояние покровного шлака. Следует избегать формирования жидкоподвижных шлаков на основе плавикового шпата.

Библиографический список

1. Пилюшенко В. Л. Научные и технологические основы микролегирования стали / В. Л. Пилюшенко, В. А. Вихлевщук, С. В. Лепорский [и др.]. – М.: Металлургия, 1994. – 384 с.
2. Гольдштейн Я. Е. Модифицирования и микролегирования чугуна и стали / Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
3. Назюта Л. Ю. Раскислительная способность титана в жидком железе / Л. Ю. Назюта // Бюллетень НТИ. – 2015. – № 9. – С. 49–55.

4. Радионова И. Г. Особенности формирования структуры холоднокатаных сталей для автомобилестроения / И. Г. Радионова, П. А. Мишнев, Р. Р. Адагимов // Металлург. – 2012. – № 2. – С. 62–69.

5. Рыбкин Н. А. Разработка подходов к выбору оптимальных систем легирования и технологических параметров производства низколегированных сталей для автомобилестроения / Н. А. Рыбкин, И. Г. Родионова, Н. Г. Шапошников [и др.] // Металлург. – 2009. – № 8. – С. 50–56.

6. Глазов А. Н. Угар титана при выплавке нержавеющей стали / А. Н. Глазов, Н. Н. Краснорядцев // Черные металлы. – 1969. – № 5. – С. 32–33.

7. Логанов М. И. Влияние ввода раскислителей на содержание и свойства неметаллических включений / М. И. Логанов, Н. А. Полушкин, Ю. Д. Колмыков // Сталь. – 1976. – № 9. – С. 810–812.

8. Камардин В. А. Снижение потерь титана при легировании нержавеющей стали / В. А. Камардин, Г. М. Бородулин, Г. Л. Елинсон // Сталь. – 1968. – № 6. – С. 517–519.

Поступила 13.04.2016

