

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА КАЧЕСТВО МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ МАРКИ 4130

В. С. Путеев, О. В. Рожкова,
И. О. Писаренко, А. Г. Щеглов

ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»
(г. Жлобин, Республика Беларусь)

В статье представлены результаты освоения производства стали марки 4130 с оптимальным химическим составом и качественными характеристиками, соответствующими требованиям потребителей нефтегазовой отрасли. Исследованиями химического состава и морфологии неметаллических включений установлена природа их образования, разработаны технологические параметры выплавки и разливки стали для получения готовых горячекатаных бесшовных труб с требуемыми механическими и технологическими свойствами. Путем соблюдения оптимальных диапазонов остаточного содержания кальция в стали минимизированы эрозия огнеупорных материалов промежуточного ковша и выпадение докристаллизационных и кристаллизационных эндогенных включений. Микролегирование стали ниобием на финишной стадии внепечной обработки обеспечило выполнение требований по размеру аустенитного зерна, с учетом минимального содержания алюминия в стали.

Ключевые слова: металл, внепечная обработка, раскисление, модифицирование, непрерывнолитая заготовка, неметаллические включения, средний размер зерна, микроструктура, химический состав, аустенитное зерно, вторичное окисление, микролегирование.

Усложнение условий добычи и транспортировки углеводородов обуславливает постоянное повышение требований нефтегазовой промышленности к уровню трубной продукции в части улучшения технологических свойств и качественных характеристик непрерывнолитых заготовок, исходной продукции для производства бесшовных труб. Получение высоких прочностных характеристик бесшовных труб напрямую зависит от количества, состава и плотности неметаллических включений (НВ).

В соответствии с классификацией, предложенной В.И. Явойским, различают первичные НВ, возникающие при вводе раскислителей и модификаторов в расплав, вторичные НВ, связанные охлаждением жидкой стали до температуры ликвидус, и третичные, образующиеся в результате снижения температуры и ликвации элементов [1]. Изготовление изделий, их разрушение всегда сопровождается процессами пластической деформации. Поэтому значительную роль в формировании свойств стали играет способность включений деформироваться. Неметаллические включения разделяют на хрупкие, слабо деформирующиеся и пластичные (рис. 1) [2].

В статье рассмотрен финишный этап освоения стали марки 4130. В ходе проведения работы были реализованы следующие мероприятия:

проведены исследования химического состава и морфологии НВ;

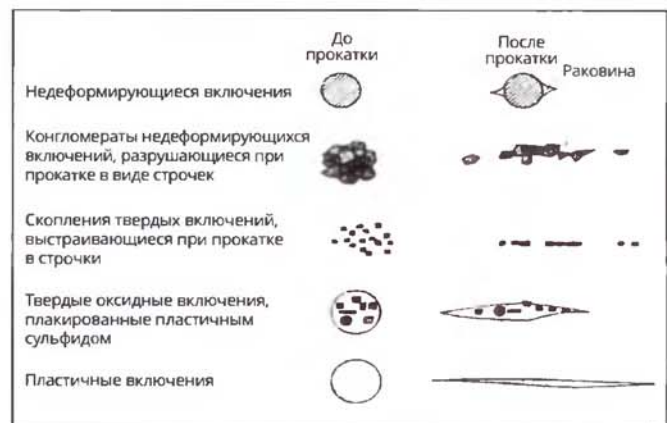


Рис. 1. Схема трансформации неметаллических включений при пластической деформации

подобран оптимальный химический состав для получения качественных характеристик готовых труб;

выполнено микролегирование стали ниобием на финишной стадии внепечной обработки.

Основная часть. Определение загрязненности НВ образцов труб опытных плавок стали 4130 проводили с помощью инвертированного микроскопа Nikon SMZ800, согласно ASTM E 45 метод А, по наилучшему полю сравнению со шкалами стандарта. Требования к загрязненности НВ труб стали 4130 представлены в табл. 1.

Таблица 1. Требования к загрязненности стали 4130 неметаллическими включениями

Неметаллические включения, ASTM E 45, уровень интенсивности							
Тип А тонкое сечение	Тип А толстое сечение	Тип В тонкое сечение	Тип В толстое сечение	Тип С тонкое сечение	Тип С толстое сечение	Тип D тонкое сечение	Тип D толстое сечение
0	0	1,0	0,5	0,5	0	1,0	1,0

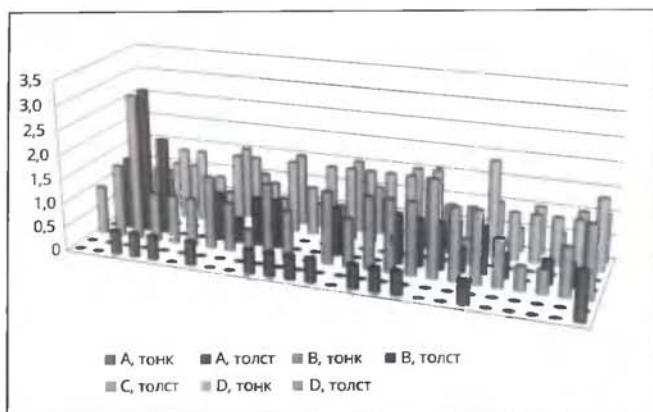


Рис. 2. Распределение неметаллических включений в соответствии с ASTM E 45 в трубах из стали 4130

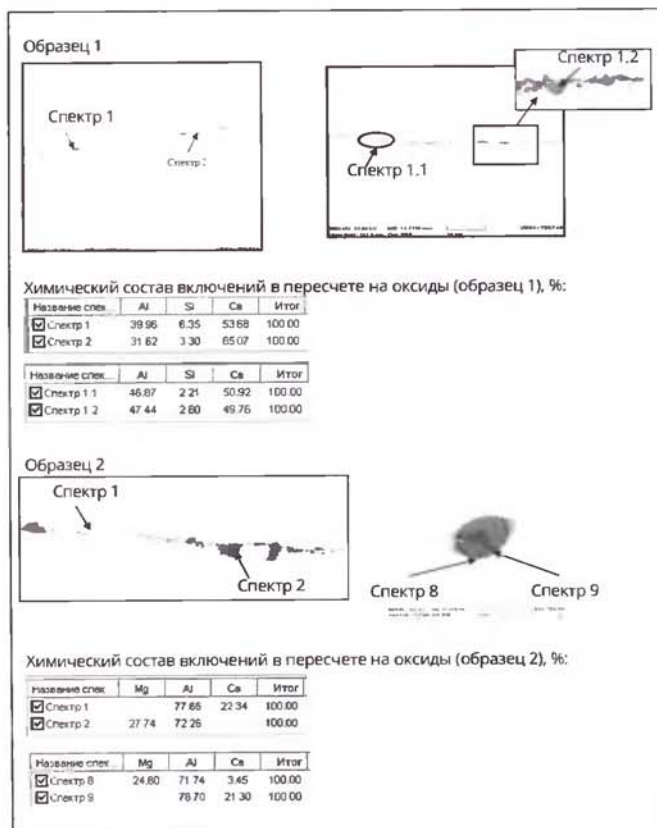


Рис. 3. Химический состав НВ в пересчете на оксиды

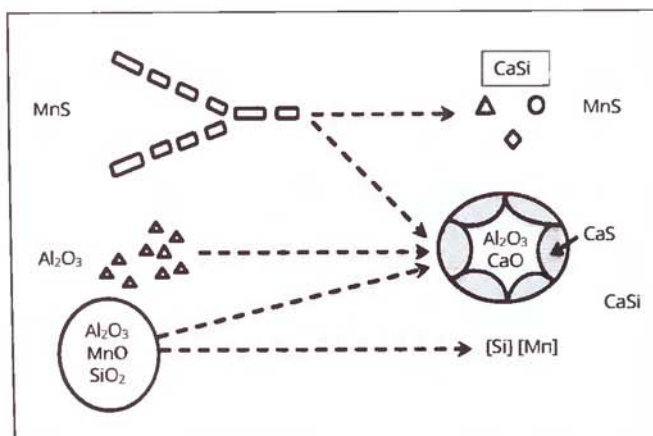


Рис. 4. Схема модификации НВ при обработке металла кальцием

Результаты оценки загрязненности НВ образцов труб представлены на рис. 2.

Из представленных данных видно, что часть проб не соответствует требованиям по степени загрязненности включениями вида В (оксиды строчечные) и D (глобули).

Для анализа причин образования включений определяли их химический состав на РЭМ с РМА. Большинство проанализированных включений имеют схожий химический состав и представлены на рис. 3.

Изучение результатов исследования химического состава и морфологии НВ позволило определить природу образования НВ:

алюминат кальция $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, образовался в результате модифицирования стали кальцием по классической схеме, представленной на рис. 4.

магнезиальная шпинель $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$, источник магния – результат восстановления кальцием из огнеупорной футеровки, содержащей оксид магния.

Известно, что при температуре 1600 °С при контакте оксида магния, входящего в состав футеровки, с жидкой сталью слой расплава, контактирующий с футеровкой, может обогащаться магнием до концентрации 0,0028 % [3]. Повышение его концентрации до десятитысячных долей процента достаточно для образования магнезиальной шпинели либо по гомогенному механизму, либо в результате взаимодействия растворенного магния с попадающими в этот слой включениями корунда, образовавшимися при раскислении.

Раскисление стали алюминием обеспечивает требуемую низкую концентрацию кислорода, но образующиеся при этом остроугольные продукты, такие как корунд и шпинели, служат концентраторами напряжений и способствуют образованию микротрещин, охрупчивающих металлическую матрицу и снижающих свойства готовых труб [4]. Корундовые включения размером более 10 мкм – продукты раскисления стали алюминием, которые достаточно быстро всплывают и удаляются в шлак. Для удаления мелких корундовых включений проводится модифицирование стали кальцием. Кальций, являясь энергичным раскислителем, образует с глиноземом алюминат, которые при массовой доле кальция от 40 до 60 % и температуре разлива стали находятся в жидком виде. В процессе всплытия такие включения укрупняются (сливаются), а также при наличии вторичного окисления насыщаются глиноземом вследствие коагуляции корундовых включений.

Для образования благоприятных алюминатов кальция необходимо соблюдать оптимальное соотношение $[\text{Ca}]/[\text{Al}]$. При увеличении содержания кальция в стали увеличивается доля CaO в составе оксидных включений и снижается температура плавления включений вплоть до 1360 °С за счет увеличения доли жидкой фазы в составе включения. Это приводит к значительному облегчению процессов коалесценции включений, их укрупнению и удалению [5]. Однако при перенасыщенности расплава продуктами моди-

Таблица 2. Результаты оценки загрязненности НВ образцов труб опытной плавки

№ образца	А тонкие, макс	А толстые, макс	В тонкие, макс	В толстые, макс	С тонкие, макс	С толстые, макс	Д тонкие, макс	Д толстые, макс
1	0	0	1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	0	0	1	0,5
3	0	0	0	0,5	0	0	1	1
4	0	0	1	0	0	0	1	1
5	0	0	1	0,5	0	0	1	1
6	0	0	0	0	0	0	1	0,5

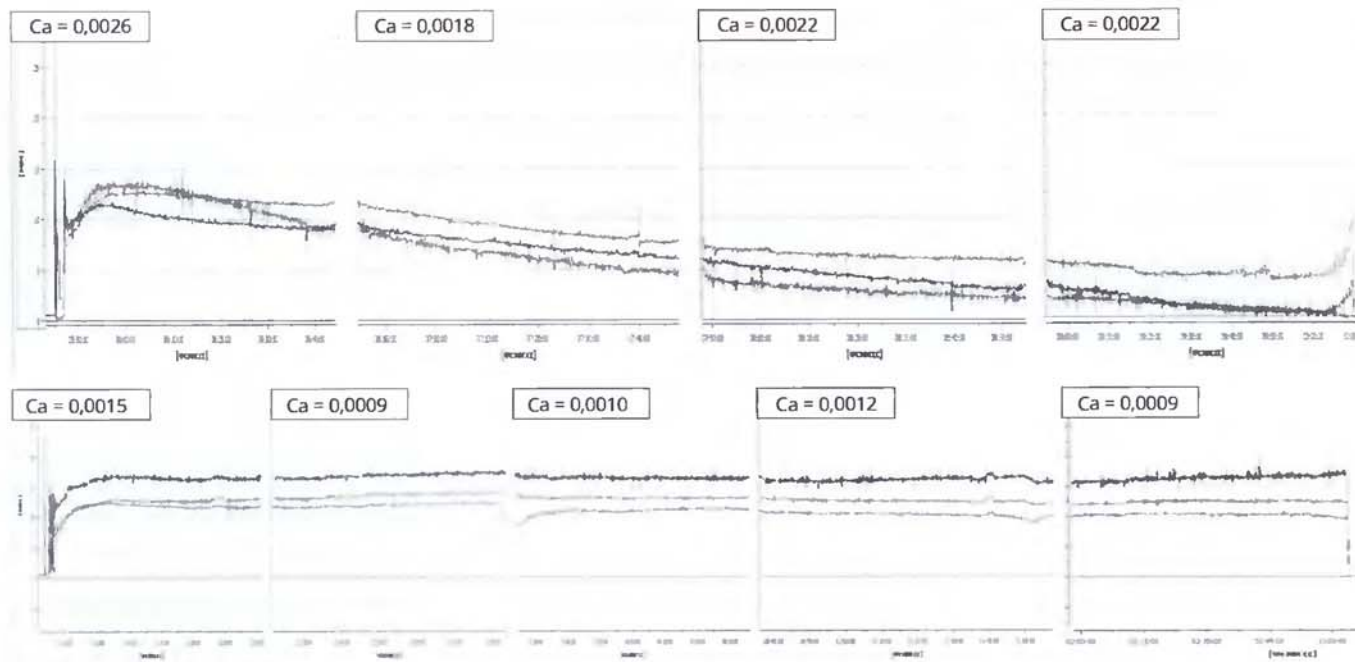


Рис. 5. Тренды позиции стопоров при разном содержании остаточного кальция

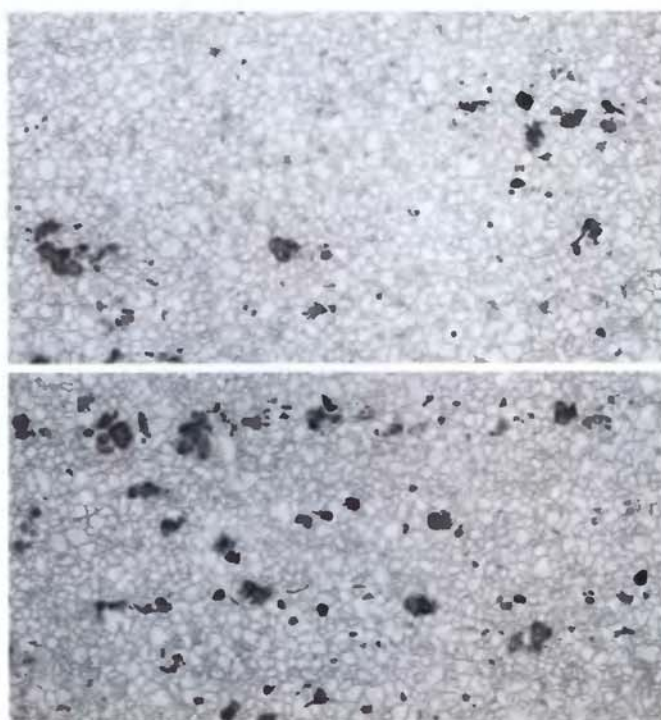


Рис. 6. Размер аустенитного зерна в стали с ограниченным содержанием алюминия, $\times 100$

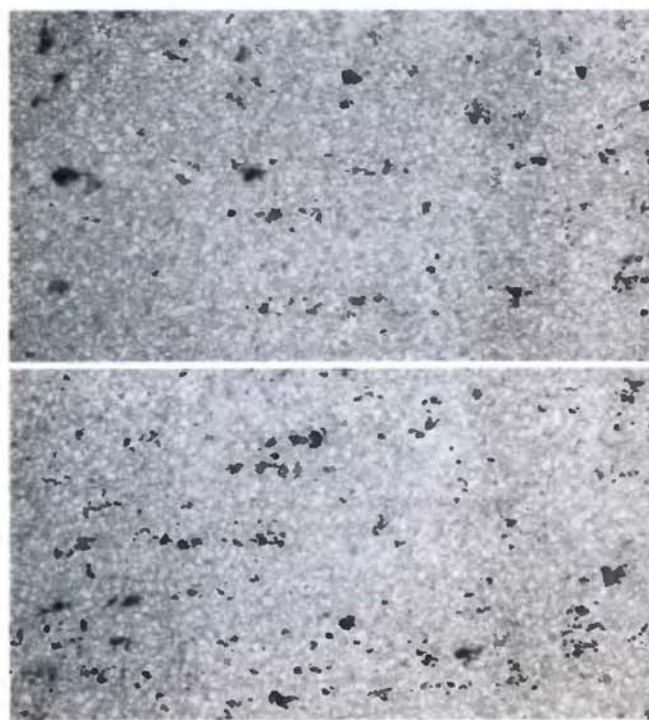


Рис. 7. Размер аустенитного зерна в стали, модифицированной ниобием, $\times 100$

фицирования может происходить размытие металлопроводки промежуточных ковшей, в частности головки стопора. В соответствии с практическими данными и анализом изменения позиции стопоров при разливке стали 4130 было отмечено, что при содержании остаточного кальция более 20 ppm происходит постепенное понижение позиции стопоров на всех ручьях, что говорит об эрозии огнеупорного изделия в течение разливки серии плавков. При последующем производстве установлено целевое содержание остаточного содержания Ca \leq 15 ppm, что позволило стабилизировать позицию стопоров. На рис. 5 представлены тренды разливки двух серий плавков стали 4130, до и после введения целевого содержания остаточного кальция в стали.

Таким образом, дальнейшее производство стали 4130 проводилось при соблюдении условий $[Ca]/[Al] \geq 0,085$ и обеспечении содержания остаточного $[Ca] \leq 15$ ppm. Результаты оценки загрязненности НВ образцов труб опытных плавков, соответствующих приведенным выше условиям, представлены в табл. 2.

Из представленных данных видно, что загрязненность неметаллическими включениями соответствует требованиям потребителя.

Однако при контроле размера аустенитного зерна согласно ASTM E112 выявили, что ограничение содержания алюминия привело к укрупнению зерна. При оценке среднего размера зерна определили укрупнение на 0,5-1 балл, размер зерна соответствует баллу 7; 7,5.

Мелкое зерно образуется в стали, содержащей повышенное количество азота в виде нитрида алюминия. Влияние дисперсных нитридов алюминия на измельчение зерна можно объяснить тем, что они препятствуют собирательной рекристаллизации, осуществляемой путем перемещения границ зерен в результате самодиффузии железа. Выделяющиеся по границам зерен аустенита высокодисперсные нитриды алюминия играют роль барьеров, тормозящих диффузию между кристаллами [6]. Снижение содержания алюминия сократило количество высокодисперсных нитридов алюминия и привело к росту аустенитного зерна (рис. 6).

Следующий этап работы заключался в обеспечении минимизации доли оксидных неметаллических включений CaO · Al₂O₃, Al₂O₃ · MgO и получении требуемой величины зерна.

Как известно, малые добавки ниобия в углеродистой и легированной сталях уменьшают размер зерна. Для полного измельчения зерна в низкоуглеродистой стали достаточно около 0,15 % и в среднеуглероди-

стой — около 0,2 % ниобия. Присутствие хрома и молибдена снижает требуемое количество, а повышение содержания углерода увеличивает количество ниобия, необходимое для эффективного измельчения зерна. Тот факт, что температура укрупнения зерна ниобиевых сталей высокая, создает преимущество во время термической обработки, так как область температур закалки, в которой может быть сохранено мелкое зерно, при этом расширяется [7].

Микролегирование проводили введением ниобия на финишной стадии внепечной обработки в диапазоне содержания 0,010-0,015 %. Металлографические исследования образцов трубной стали показали эффективность микролегирования ниобием в виде измельчения зерна. Размер аустенитного зерна соответствует баллу 8; 8,5 шкалы ASTM E112 (рис. 7).

ВЫВОДЫ

1. В процессе производства стали 4130 определено оптимальное соотношение $[Ca]/[Al]$ для образования благоприятных алюминатов кальция и, соответственно, снижения уровня загрязненности стали неметаллическими включениями.

2. Микролегирование стали ниобием на финишной стадии внепечной обработки в диапазоне содержания 0,010-0,015 % позволило получить размер аустенитного зерна, равного баллу 8; 8,5, с учетом минимального содержания алюминия в стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Окенко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. — М.: Металлургия, 1980. — 173 с.
2. Brooksbank D., Andrews K.W. Stress fields around inclusions and their relation to mechanical properties // Journal of the Iron and Steel Institute. 1972. 210 (4). P. 246 — 255.
3. Martin A., Brandaleze E. Study about downgrading variables by inclusionary cleanliness in the ladle furnace at ternium sidear // Conference 7th Clean Steel Conference Proceedings. — Balatonfured, Hungary, June 2007. P. 203 — 211.
4. Шпис Х.И. Поведение неметаллических включений в стали при кристаллизации и деформации. — М.: Металлургия, 1971. — 125 с.
5. Карья Я., Не Вани Х., Хицун В. и др. Характеристика износа огнеупоров при разливке сталей, раскисленных кальцием // Металлургический завод и технология. 1994. С. 24 — 28.
6. Зубарев А.Г. Теория и технология производства стали для МНЛЗ. — М.: Металлургия, 1986. — 232 с.
7. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугунах и сталях / пер. с англ. В.А. Мчедлишвили и В.В. Ховрина; под ред. С.М. Винарова. — М.: Металлургиздат, 1961. — 459 с.

Статья поступила 04.06.2024