

**Теория
металлургических
процессов**

Н. В. АНДРИАНОВ, К. В. ГРИГОРОВИЧ, Э. В. ИВАНОВ, В. В. ЭНДЕРС, РУП "БМЗ"

УДК 669.187

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ КОРДОВОЙ СТАЛИ**

Целью проводимой работы было определение причин возникновения в кордовом металле в процессе выплавки и внепечной обработки труднодеформируемых высокоглиноземистых оксидных неметаллических включений и оптимизация технологии производства высококачественной кордовой стали. Для достижения данной цели были проведены экспериментальные плавки кордовой стали по различным вариантам технологии с отбором проб металла на каждом переделе для последующих исследований. Различные варианты технологии предусматривали изменение таких важнейших параметров процесса, как режим продувки аргоном при внепечной обработке, содержание углерода в расплаве при ковшевой обработке металла, изменение основности и состава шлака в печи-ковше при внепечной обработке и состава шлака в процессе разлива металла.

В ЭСПЦ-2 РУП «БМЗ» были проведены экспериментальные плавки кордовой стали по вариантам стандартной технологии А–К с отбором проб металла на каждом переделе для последующих исследований. По всем вариантам отбирали по две пробы металла (пробы 61, 62, 71, 72, 81, 82, 83) с одновременным отбором проб шлака и замером окисленности металла датчиками «Селюх» на установке печь-ковш. Работу проводили на стали марки 70–80 корд.

Выплавку и внепечную обработку стали опытных партий проводили согласно действующим технологическим инструкциям с изменениями по каждому из приведенных вариантов.

Вариант А (плавки № 33258, 33259)

После слива плавки в ковш была исключена присадка кварцевого песка и произведена присадка плавикового шпата CaF_2 в следующих количествах: плавка № 33256 – 110 кг; плавка № 33257 – 202 кг (при данном варианте в печи-ковше был получен жидкоподвижный шлак); плавка № 33258 – 170 кг; плавка № 33259 – 170 кг.

Далее внепечную обработку проводили по стандартной технологии ТК 840-С-05-2001.

Вариант Б (плавки № 33396, 34078, 34079, 34080)

Было снижено количество присаживаемого кварцевого песка до 100 кг и увеличена доля плавикового шпата до 120 кг (плавка № 33396), получен весьма жидкоподвижный шлак. На плавках № 33078-3380 перед вакуумированием на шлак присаживали до 100 кг кварцевого песка и до 100 кг плавикового шпата. Визуально шлак получался «белый», достаточно подвижный. При наведении шлака порциями присаживали стандартную раскисляющую смесь в количестве до 170 кг/на плавку. Причем последняя порция смеси присаживалась до отдачи кварцевого песка и плавикового шпата.

Вариант В (плавки № 34138, 34139, 34140, 30738, 30739)

Перед вакуумированием на шлак присаживали по 200 кг кварцевого песка и 40–50 кг раскисляющей смеси. Визуально шлак получался «белый», достаточно подвижный. При наведении шлака порциями присаживали стандартную раскисляющую смесь в количестве до 200 кг/на плавку. Далее внепечную обработку проводили по стандартной технологии ТК 840-С-05-2001.

Вариант Г (плавки № 31293, 31294)

На выпуске стали из ДСП присаживали прокаленный кварцевый песок 250–300 кг и известь 200–250 кг в количестве, обеспечивающем выполнение соотношения $\text{SiO}_2/\text{CaO} = 1,0-1,5$. После усреднительной продувки металла аргоном на сталевозе ДСП-3 не менее 10 мин шлак скачивали до проблесков металла. Далее внепечную обработку проводили по стандартной технологии ТК 840-С-05-2001.

Вариант Д (плавки № 31295, 31296)

Содержание углерода в металле перед выпуском поддерживали 0,25–0,40%. На выпуске присаживали углерод из расчета 0,30–0,40% и FeSi75 не более 60 кг, известь – 300–400 кг и песок кварцевый – 250–300 кг в количестве, обеспечивающем выполнение соотношения $\text{SiO}_2/\text{CaO} =$

1,0–1,5. После усреднительной продувки не менее 10 мин шлак скачивали.

Внепечную обработку проводили в соответствии с требованиями ТК 840-С-05-2001 со следующими изменениями.

По прибытию плавки на установку печь-ковш наводили шлак основностью 2,5–3,0 и осуществляли продувку аргоном с расходом 70–110 л/мин без оголения зеркала металла. Перед передачей плавки на РН-вакууматор присаживали кварцевый песок в количестве 100 кг и плавиковый шпат в количестве 150 кг. Далее проводили плавку по стандартной технологии.

Вариант Е (плавки № 31540, 31541)

На выпуске из ДСП вместо плавикового шпата присаживали прокаленный кварцевый песок в количестве, обеспечивающем выполнение соотношения 1,0–1,5 (известь 200–250 кг, и кварцевый песок – 250–300 кг). В процессе выпуска присаживали науглероживатель из расчета получения содержания углерода в металле на 0,15–0,25 ниже марочного предела. Количество присаживаемого в последнюю очередь ферросилиция FeSi75 составляет 70–100 кг. Остальные материалы присаживаются в соответствии с требованиями ТК 840-С-05-2001. После усреднительной продувки металла аргоном не менее 10 мин шлак из ковша удаляется до проблесков металла. Далее внепечную обработку проводили по стандартной технологии ТК 840-С-05-2001.

Вариант Ж (плавки № 31571, 31572)

На выпуске присаживали известь в количестве 200–250 кг и песок кварцевый в количестве 250–300 кг из расчета обеспечения выполнения соотношения $\text{SiO}_2/\text{CaO} = 1,0–1,5$ (известь – 200–250 кг и кварцевый песок 250–300 кг). На выпуске присаживали углерод из расчета на 0,15–0,25 ниже марочного предела. Количество присаживаемого в последнюю очередь ферросилиция FeSi75 составляет 70–100 кг. Остальные материалы присаживаются в соответствии с требованиями ТК 840-С-05-2001. После усреднительной продувки металла аргоном не менее 10 мин шлак из ковша удаляется до проблесков металла.

Внепечную обработку стали проводили в соответствии с требованиями ТК 840-С-05-2001 со следующими изменениями.

После окончания вакуумирования и корректировки содержания углерода металл продувается аргоном не менее 10 мин без оголения зеркала металла.

За 10–15 мин до передачи плавки на МНЛЗ-3 присаживается известь в количестве 200–300 кг, обеспечивающем получение в ковше шлака основностью 2,5. После ошлакования присаживаемой извести плавка утепляется и передается на МНЛЗ.

Вариант И (плавки № 32569, 32570)

При выпуске стали из ДСП присаживается углерод из расчета получения в ковше 0,45–0,55%, FeSi75 в количестве 30–40 кг, извести – 300–400 кг и плавикового шпата – 50–80 кг. После выпуска металла проводится усреднительная продувка аргоном не менее 10 мин с расходом 70–110 л/мин (без оголения зеркала металла).

По прибытию плавки на установку печь-ковш наводят шлак основностью 2,5–3,0 и осуществляют продувку аргоном с расходом 70–110 л/мин (без оголения зеркала металла). Далее плавку проводят по технологии ТК 840-С-05-2001.

Вариант К (плавки № 32550, 32551, 32552)

Выплавка и внепечная обработка проводятся согласно действующим инструкциям ТИ 840-С-07-2000 и ТК 840-С-05-2001 со следующими изменениями.

После окончания вакуумирования и корректировки содержания углерода в металл с помощью трайп-аппарата вводят силикокальций проволокой с расходом 150 м. После этого металл перед отдачей на машину МНЛЗ-3 продувается аргоном не менее 10 мин без оголения зеркала.

Пробы отбирали после выпуска плавки из печи в ковш, после присадки шлакообразующих материалов на установке печь-ковш, после науглероживания в процессе вакуумирования на установке R-Н(71), в начале и середине разливки плавки на МНЛЗ-3, а также отбирали образцы катанки диаметром 5,5 мм от бунтов с начала и середины прокатки.

Металлографические исследования образцов кордовой стали опытных плавки

С помощью металлографического анализа изучали распределение оксидных неметаллических включений (НВ) по размерным группам и проводили качественную идентификацию основных типов НВ по химическому составу. Качественные и количественные металлографические исследования НВ в образцах катанки проводили на продольных шлифах.

Анализ осуществляли на оптическом микроскопе OLYMPUS PME-3: количественный подсчет включений – при увеличениях 200, качественный анализ – при увеличениях от 100 до 1000. Подсчет НВ в катанке выполняли на площади 37,3 мм² с помощью программы анализа изображения Inclusion Expert фирмы LECO. Для каждого оксидного неметаллического включения были измерены его площадь, длина и ширина и определены отношение длины к ширине и эквивалентный диаметр. В катанке недеформируемые НВ, представляющие наибольшую опасность, имеют округлую форму. В связи с этим эквивалентный диаметр ($D_3 = (4A/\pi)^{1/2}$, где A – площадь неметаллического включения) является наиболее наглядной характеристикой размера включения.

По результатам измерений были вычислены минимальное, средние и максимальное значения эквивалентного диаметра как одни из размерных показателей неметаллических включений, содержащихся в образце. Минимальное значение диаметра для всех образцов было одинаковым и равным 0,62 мкм, поскольку эта величина прямо зависит от используемого оптического увеличения микроскопа и возможностей анализатора изображения. Среднее значение диаметра для всех образцов составляет 2,1–3,2 мкм, что свидетельствует о преобладающем количестве мелких включений во всех исследованных образцах. Значение максимального диаметра было различным (от 5,67 до 15,2 мкм) для разных образцов и, следовательно, может служить характеристикой чистоты плавки. Для всех проанализированных образцов были построены гистограммы распределения неметаллических включений по размерным группам. Кроме того, для каждой размерной группы были определены доля (%) содержащихся в ней включений и плотность включений (шт/см²).

На рис. 1 приведено сравнение данных по плотности неметаллических включений в образцах катанки кордовой стали, полученных по результатам электронно-зондового микроанализа на сканирующем электронном микроскопе Camscap и количественной оптической металлографии на анализаторе изображений IA-32 LECO для различных вариантов технологии. Обращает на себя внимание весьма значительные качественные и количественные различия в результатах исследований. Результаты количественной оптической металлографии предпочтительны с точки зрения представительности — большей площади проанализированных шлифов и количества включений.

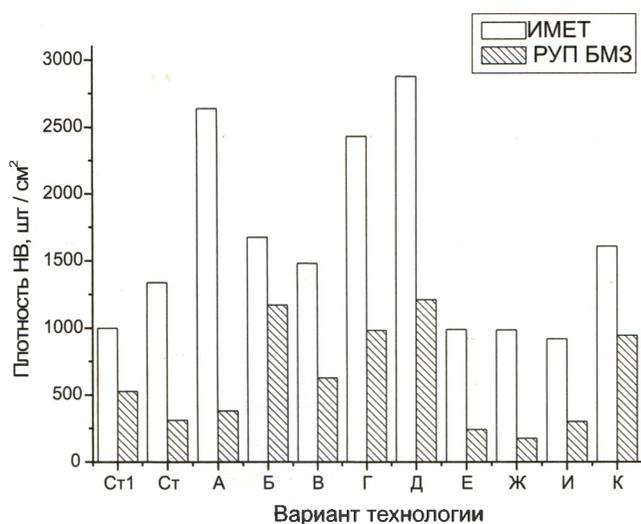


Рис.1. Сравнение данных по плотности неметаллических включений в образцах катанки кордовой стали, полученных по результатам электронно-зондового микроанализа и оптической металлографии для различных вариантов технологии

По данным электронной микроскопии на поперечных шлифах минимальная плотность включений получена по вариантам технологии (в порядке возрастания) Ж стандартный, Е, И, худшими вариантами оказались Б, Г, Д, К. По данным количественной оптической металлографии на продольных шлифах минимальная плотность включений получена на опытных плавках по вариантам Ж, Е, И стандартный. Максимальная плотность включений на вариантах А, Г, Д. Разброс значений плотности в пределах варианта А составляет 1061–4237 шт/см². В катанке опытных партий Г и Д нет существенного разброса значений плотности.

На рис. 2 показано распределение плотности неметаллических включений по размерным группам в кордовой катанке, выплавленной по различным вариантам технологии. Результаты представлены в порядке возрастания плотности крупных включений. Наименьшее среднее значение плотности включений по варианту наблюдается в катанке опытных партий И, Е, Ж.

Разброс значений плотности в пределах варианта И составляет 528–1311 шт/см², в пределах варианта Е — 684–1298, в пределах варианта Ж — 814–1178 шт/см².

Однако плотность неметаллических включений является параметром, неполностью характеризующим чистоту стали по неметаллическим включениям, поскольку не дает представления о количестве крупных недеформируемых включений и распределении включений по размерным группам.

На рис. 3 показаны данные по каждому из опытных вариантов плавки в виде отношения общей площади неметаллических включений к просмотренной площади шлифа для различных вариантов технологии.

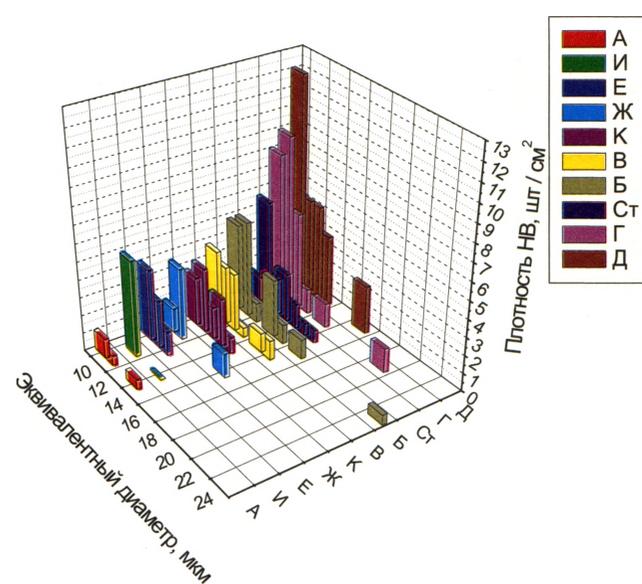


Рис.2. Распределение неметаллических включений по размерным группам, для различных вариантов технологии

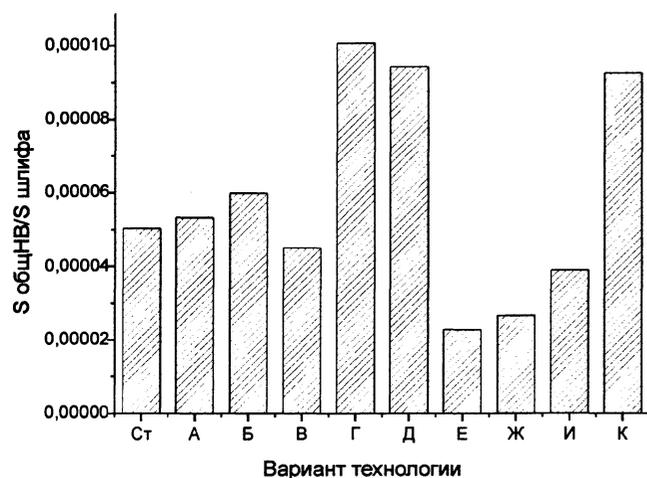


Рис. 3. Отношение площади обнаруженных неметаллических включений к просмотренной площади шлифа для различных вариантов технологии

По количеству неметаллических включений варианты технологии можно условно разделить на три группы по величине отношения $S_{\text{общНВ}} / S_{\text{шлифа}}$: 1) менее 40 – Е, Ж, И; 2) 40–60 – В, Ст, А, Б; 3) более 60 – К, Д, Г. Таким образом, наибольшее количество неметаллических включений в металле вариантов технологии Г, Д, К; варианты А, Б, В соответствуют стандартной технологии; минимальное количество неметаллических включений в катанке вариантов Е, Ж, И.

Величина общей площади найденных оксидных неметаллических включений, отнесенной к просмотренной площади шлифа, должна, согласно принципу Кавальери – Аккерна, соответствовать объемной доле включений. Этот показатель должен коррелировать с данными фракционного газового анализа о содержании кислорода во включениях (рис. 4). Максимальная объемная доля включений содержится в металле вариантов Г, Д и К, минимальная – в металле. По данным фракционного газового анализа, стандартная технология, варианты А, Г, Д и К дают весьма значительную объемную долю НВ, варианты Е, Ж, И – минимальную, что также соответствует данным количественной металлографии. Некоторое отличие результатов связано с тем, что на оптическом микроскопе подсчитываются только включения более 1 мкм и не видны вытянутые в тонкие строчки пластичные силикаты.

Как известно, обрывность кордовой проволоки при волочении и свивке зависит не только от общего количества неметаллических включений, но в большей степени от количества включений больше критического диаметра. В качестве данного параметра был выбран эквивалентный диаметр включений 8 мкм. На рис. 5 приведены данные количественной металлографии на анализаторе изображения IA-32 по подсчету НВ на продольных шлифах катанки опытных плавок по вариантам.

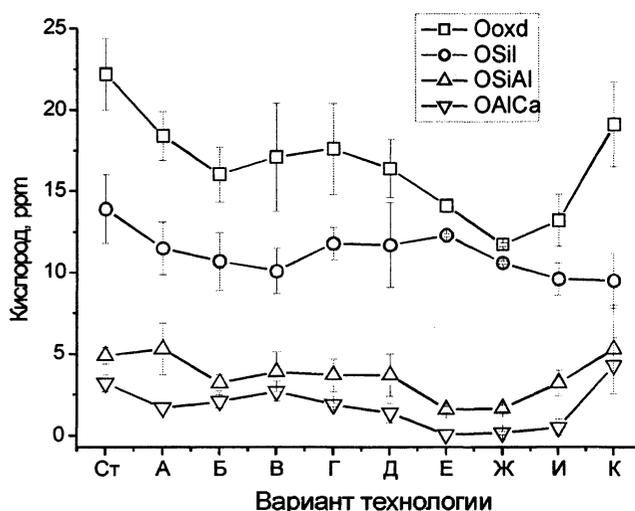


Рис. 4. Усредненные результаты фракционного газового анализа кислорода во включениях различных типов в кордовом металле разных вариантов выплавки с интервалами стандартных отклонений: Ooxd – кислород в оксидах; OSil – кислород в пластичных силикатах; OSiAl – кислород в пластичных алюмосиликатах; OAlCa – кислород в недеформируемых алюмосиликатах кальция

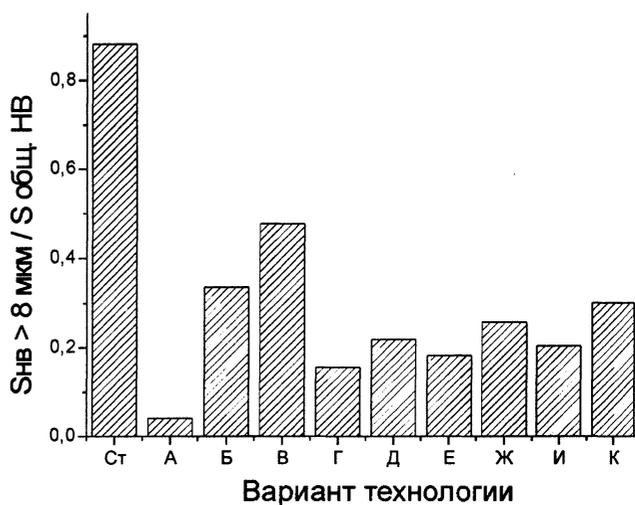


Рис. 5. Отношение площади обнаруженных неметаллических включений эквивалентного диаметра более 8 мкм к просмотренной площади шлифа для различных вариантов технологии

Результаты показывают, что максимальная доля крупных включений в металле, выплавленном по стандартной технологии. Максимальное значение плотности неметаллических включений размером более 8 мкм наблюдается в катанке опытных партий Г, Д, среднее значение – в катанке опытных партий К, В, Ст, Б, минимальное значение – в катанке опытных партий А, И, Ж, Е. Однако металл катанки, выплавленной по варианту технологии А, отличается достаточно высокой плотностью включений.

На рис. 6 приведено сравнение величин отношений площади обнаруженных неметаллических включений эквивалентного диаметра более 8 мкм к просмотренной площади шлифа для различных вариантов технологии с данными о деформируе-

мости крупных включений. По величине отношения $S_{НВ} > 8 \text{ мкм} / S_{\text{шлифа}}$ варианты технологии можно условно разделить на три группы: 1) менее 5 – А, Е, Ж, И, Б, В; 2) 5–9 – Г, К; 3) более 10 – Д, Ст. В катанке опытных партий И, Е, А средний размер крупных включений составляет 8,9–9,5 мкм, в катанке опытных партий К, Г, Д, В – 10,0–10,3, в катанке опытных партий Ж, Ст, Б – 10,5–10,7 мкм. Величину деформируемости НВ определяли как отношение длины НВ более 8 мкм к их высоте (Aspect Ratio). Деформируемость крупных неметаллических включений максимальна в варианте технологии А.

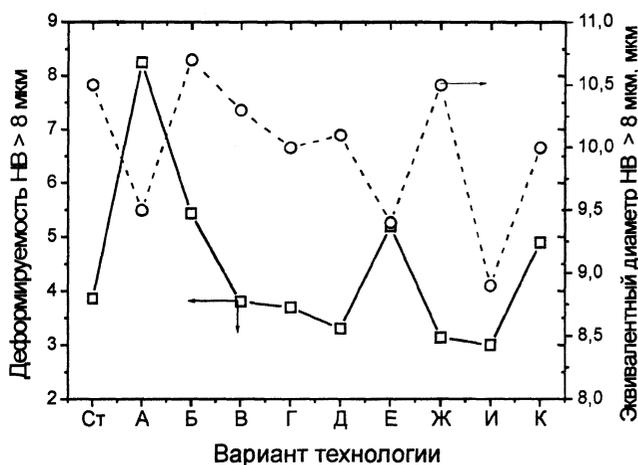


Рис. 6. Отношение площадей НВ > 8 мкм к просмотренной площади шлифа для различных вариантов технологии и величины деформируемости крупных включений

Интересно сравнить полученные металлографические данные с результатами анализа кордовой катанки производства «Nippon Steel» (Япония), отличающейся высокой технологичностью и качеством. На рис. 7, 8 показано сравнение данных по плотности неметаллических включений в металле лучших опытных вариантов с результатами металлографического анализа катанки производства «Nippon Steel» (Япония).

Из рисунков видно, что чистота кордовой стали, выплавленной по вариантам технологии Е, Ж, И по плотности неметаллических включений и объемной доле неметаллических включений в металле, вполне сопоставима с чистотой кордовой стали производства «Nippon Steel» (Япония).

Выводы

1. Качественный состав оксидных неметаллических включений и их количество формируются уже в процессе вакуумирования и в дальнейшем принципиальных изменений не претерпевают.

2. Базовая технология обеспечивает достижение плотности распределения оксидных включений в катанке порядка 420 шт/см² для частиц размером более 5 мкм и 60 шт/см² для частиц размером более 10 мкм. Показано, что оптическая

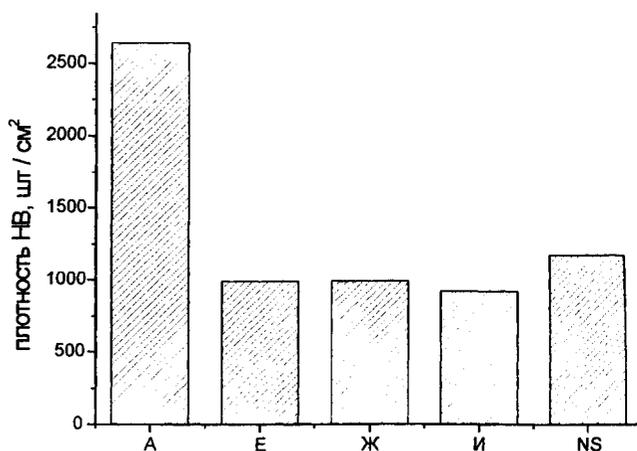


Рис. 7. Плотность неметаллических включений для различных вариантов технологии

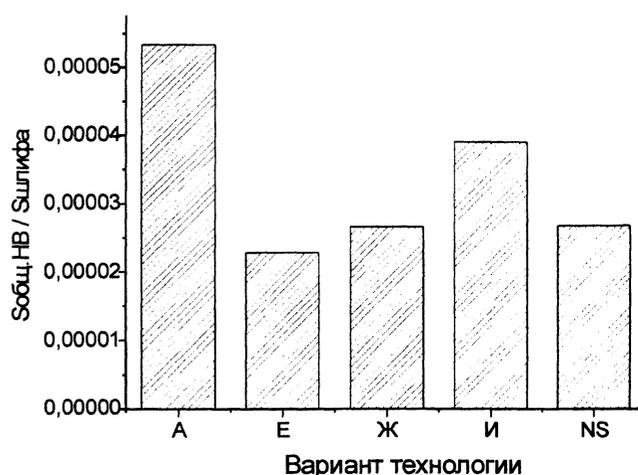


Рис. 8. Отношение площади обнаруженных неметаллических включений к просмотренной площади шлифа для различных вариантов технологии

металлография на продольных шлифах позволяет получать более достоверную картину о содержании неметаллических включений размером более 5 мкм в образцах катанки по сравнению с электронной микроскопией.

3. С целью оптимизации базовой стандартной технологии проведены экспериментальные плавки кордовой стали по различным вариантам технологии с отбором проб металла на каждом переделе для последующих исследований. Различные варианты технологии предусматривали изменение таких важнейших параметров процесса, как режим продувки аргоном при внепечной обработке, содержание углерода в расплаве при ковшевой обработке металла, изменение основности и состава шлака в печи-ковше при внепечной обработке и состава шлака в процессе разлива металла.

4. Установлено, что в основе технологии внепечной обработки кордовой стали должны быть заложены принципы вакуумирования недораскисленной стали и углеродного вакуумирования расплава до присадки сильных раскислителей.