

УДК 669.17

Куницина Н.Г., Шаповалов А.Н.

О РАЦИОНАЛЬНОЙ ГЛУБИНЕ УДАЛЕНИЯ ФОСФОРА ИЗ СТАЛИ

Аннотация. Принято считать, что фосфор в стали является вредной примесью, повышающей склонность стали к хрупкому разрушению при отрицательных температурах. В данной работе было изучено влияние фосфора на механические свойства листового проката из низкоуглеродистой стали марки 10ХСНД. Для проведения исследования были взяты результаты оценки ударной вязкости (по методу КСУ при температуре -60°C) листового проката разной толщины. Для наиболее точных результатов были взяты наименьшие, средние и наибольшие значения (из полученного интервала) ударной вязкости для листов металла толщиной от 10 до 32 мм. Установлено, что влияние фосфора на ударную вязкость определяется толщиной листового проката. При толщине листового проката до 20 мм наблюдается положительная динамика ударной вязкости с увеличением содержания фосфора до 0,011-0,013%. При производстве проката с толщиной более 20 мм влияние фосфора на ударную вязкость листового проката отрицательно. Даны рекомендации по оптимальному содержанию фосфора в прокате из низкоуглеродистых марок стали, а также выполнен прогноз изменения показателей выплавки стали на примере дуговой сталеплавильной печи (ДСП).

Ключевые слова: листовый прокат, толщина листового проката, содержание фосфора, ударная вязкость

Введение

Известно, что затвердевание стали сопровождается значительной ликвацией фосфора, что вызывает неоднородность структуры и ухудшение свойств стали, особенно ударной вязкости [1-3]. При этом устранить проявления ликвации фосфора в стали практически невозможно, вследствие низкой скорости его диффузии в твердом железе [3-5]. Поэтому, во избежание локального охрупчивания металлопродукции, стремятся максимально возможно снизить содержание фосфора в стали. Минимальный уровень фосфора в стали имеет особое значение для условий непрерывной разливки, что связано с особенностями структуры непрерывнолитых заготовок с характерным дефектом в виде осевой химической неоднородности [6-11]. Поэтому, учитывая широкое распространение непрерывной разливки в технологии массового производства стального проката, содержание фосфора в разливаемой стали снижают до уровня не более 0,015%.

Вместе с тем известно, что удаление фосфора сопряжено с увеличением издержек производства, поскольку требует наличия высокоосновного окислительного шлака [12-17]. Формирование такого шлака возможно только при проведении окислительного рафинирования до содержания углерода менее 0,1 %. Такой режим ведения плавки приводит к увеличению выхода шлака, снижению выхода годного и стойкости футеровки печи, а также увеличению расхода раскислителей вследствие повышения растворимости кислорода в металле [16-20]. Поэтому актуальным остается вопрос рационального уровня содержания фосфора в стали, как с точки зрения издержек производства, так и с точки зрения механических свойств листового проката.

Целью настоящей работы является исследование влияния фосфора на ударную вязкость стального листового проката и разработка рекомендаций по совершенствованию технологии дефосфорации стали.

Методика исследования

В работе было проведено исследование влияния фосфора на ударную вязкость (по методу КСУ при температуре -60°C) листового горячекатаного проката из стали марки 10ХСНД по результатам обработки данных 200 плавов. Анализируемый массив данных относится к листовому прокату, получаемому на стане 2800 горячей прокатки, из слябовой заготовки толщиной 190 мм. Для получения результатов в удобной для анализа форме были построены графики зависимостей ударной вязкости металла от содержания фосфора для разных толщин листового проката. Учитывая разнообразие факторов, влияющих на механические свойства стали, для адекватной оценки влияния фосфора на ударную вязкость металлопроката имеющиеся производственные данные предварительно разбили на три группы по величине ударной вязкости. Таким образом, при проведении анализа оценивали влияние фосфора на минимальные, средние и максимальные значения ударной вязкости (для различных толщин проката – 10-14, 16-20 и 25-32 мм).

Результаты исследования и их обсуждение

Взаимосвязь ударной вязкости листового проката толщиной 10-14 мм и содержания фосфора представлена на рис. 1.

Из представленных на рис. 1 данных следует, что с повышением содержания фосфора (в исследованном диапазоне) наблюдается положительное его влияние на величину ударной вязкости для всех уровней. Причем максимальная степень влияния фосфора наблюдается для минимальных значений ударной вязкости, а максимальная адекватность полученного уравнения регрессии – для максимальных значений ударной вязкости.

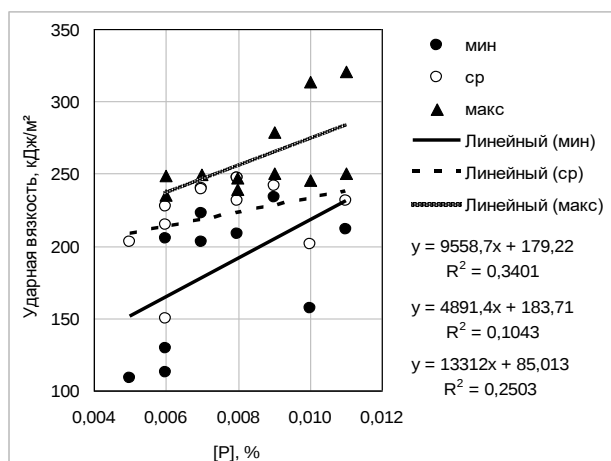


Рис. 1. Взаимосвязь ударной вязкости листового проката толщиной 10-14 мм из стали 10ХСНД и содержания фосфора

Выявленные тренды влияния фосфора можно объяснить особенностями кристаллического строения низкоуглеродистой стали, для которой углерод оказывает слабое влияние на кристаллическую решетку металла. В этих условиях атомы фосфора растворяются в металле с образованием твердого раствора, что способствует повышению ударной вязкости. Дополнительным фактором, предотвращающим вредное влияние фосфора, является умеренная толщина листового проката (10-14 мм), что обеспечивает хорошее прокаливание и получение равномерной структуры металла по толщине, предотвращая возможность образования фосфидов. Таким образом, для рассматриваемых условий производства снижение содержания фосфора менее 0,010%, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости, нецелесообразно.

Для листового проката толщиной 16-20 мм влияние содержания фосфора в интервале от 0,004 до 0,013% на ударную вязкость слабое (рис. 2). Однако и в этом случае наблюдается положительная динамика ударной вязкости с увеличением содержания фосфора в исследованном диапазоне. Причем максимальная степень влияния и адекватность полученной зависимости наблюдается для минимальных значений ударной вязкости, и наоборот.

Причиной такого влияния фосфора, вероятно, является полная его растворимость в низкоуглеродистой стали с образованием твердого раствора, что способствует повышению значений ударной вязкости. Кроме того, при толщине проката до 20 мм обеспечиваются более благоприятные условия для получения равномерной структуры металла по толщине (в сравнении с прокатом толщиной более 20 мм), что снижает вероятность образования фосфидов.

Таким образом, для листового проката из низкоуглеродистых марок стали при толщине проката до 20 мм снижение содержания фосфора менее 0,010%, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости, нецелесообразно.

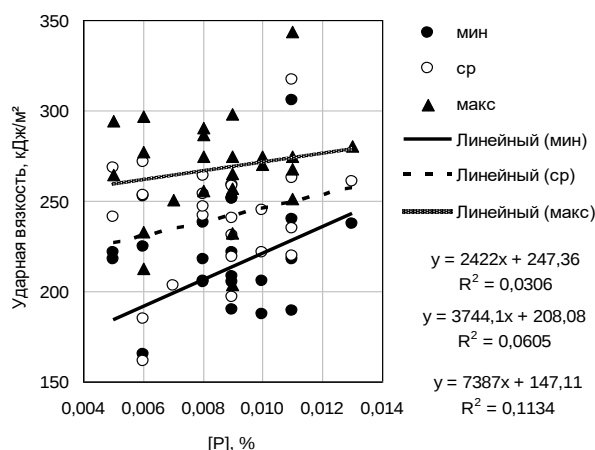


Рис. 2. Взаимосвязь ударной вязкости листового проката толщиной 16-20 мм из стали 10ХСНД и содержания фосфора

Однако с увеличением толщины листового проката условия его прокаливаемости ухудшаются, поэтому повышается вероятность образования фосфидов, способствующих снижению ударной вязкости стали при отрицательной температуре. Данная тенденция была получена при анализе влияния содержания фосфора на ударную вязкость листового проката толщиной 25-32 мм (рис. 3).

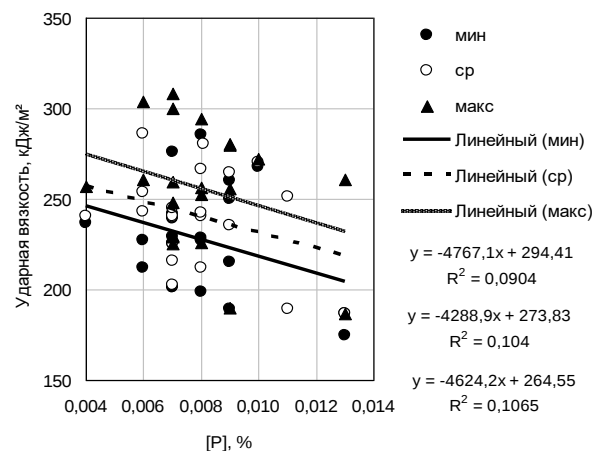


Рис. 3. Взаимосвязь ударной вязкости листового проката толщиной 25-32 мм из стали 10ХСНД и содержания фосфора

Характерной особенностью влияния содержания фосфора на ударную вязкость проката толщиной 25-32 мм является то, что степень этого влияния для различных уровней вязкости практически одинакова. При этом на всех графиках и уравнениях регрессии отчетливо наблюдается обратно пропорциональная динамика ударной вязкости от повышения содержания фосфора. Поэтому при производстве листового проката толщиной более 20 мм проведение глубокой дефосфорации с получением содержания фосфора менее 0,010% должно быть обязательным элементом

технологии, обеспечивающим достижение высоких механических свойств стали.

Таким образом, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости листового проката из низкоуглеродистых сталей целесообразно скорректировать технологию производства с учетом толщины проката:

- при производстве проката толщиной до 20 мм обеспечивать содержание фосфора в разливаемой стали на уровне 0,010–0,015%;
- при производстве проката толщиной более 20 мм обеспечивать содержание фосфора в разливаемой стали на уровне не более 0,010%.

С учетом неизбежного повышения содержания фосфора в стали от момента выплавки до разливки (из ферросплавов и шлака), которое в зависимости от степени легирования может достигать 0,005% [21–23], содержание фосфора в стальном полупродукте, выпускаемом из сталеплавильного агрегата, должно быть несколько меньше. Однако даже при максимальном увеличении содержания фосфора в процессе ковшевой обработки стали, при производстве проката толщиной менее 20 мм можно повысить верхний уровень содержания фосфора в стали до 0,010%.

Такое изменение требований к содержанию фосфора позволит улучшить показатели выплавки полупродукта: снизить основность шлака и расход флюсов, уменьшить потери металла со шлаком и повысить выход годного, а также завершать окислительное рафинирование при более высоком содержании углерода в результате снижения расхода кислорода.

Иллюстрация взаимосвязи указанных показателей выплавки стали с содержанием фосфора в стальном полупродукте на примере работы ДСП емкостью 120 т графически представлена на рис. 4–6.

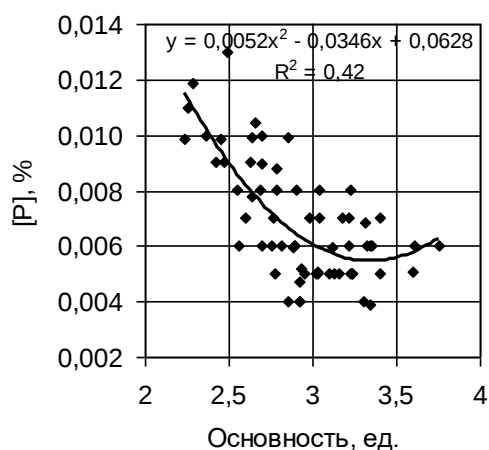


Рис. 4. Влияние основности шлака на содержание фосфора в полупродукте

Рассматривая влияние основности печного шлака на остаточное содержание фосфора (рис. 4), можно сделать вывод о том, что снижение требований к содержанию фосфора на выпуске с текущих 0,004–0,008 до 0,010 % позволяет уменьшить уровень основности

шлака с 2,5–3,5 до 2,4–2,6 ед. Такая корректировка основности шлака позволит как уменьшить расход извести, так и сократить количество шлака, а следовательно, и снизить потери железа с ним, то есть увеличить выход годного.

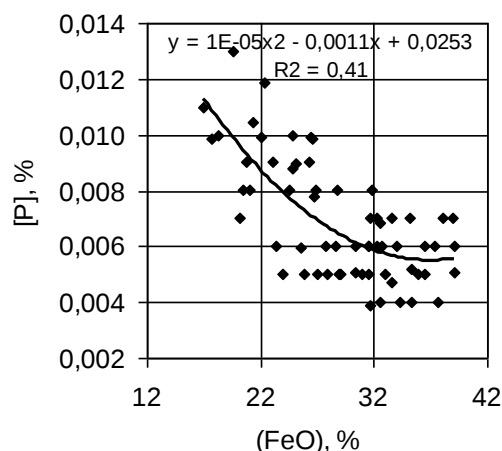


Рис. 5. Влияние окисленности шлака на содержание фосфора в полупродукте

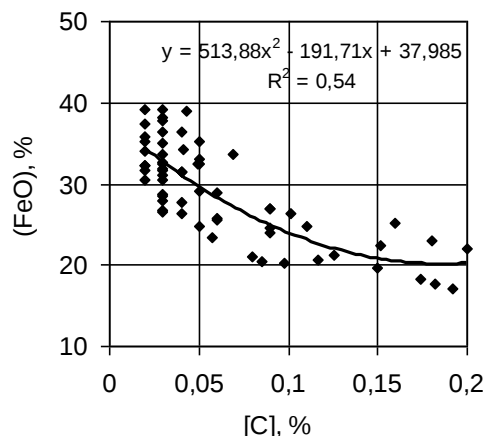


Рис. 6. Влияние остаточного содержания углерода в полупродукте на окисленность шлака

Другим вариантом корректировки технологии выплавки стального полупродукта с содержанием фосфора 0,010 % в ДСП является снижение окисленности шлака, традиционно оцениваемой по содержанию оксидов железа в шлаке. Влияние содержания FeO в шлаке на остаточное содержание фосфора в металле на выпуске из ДСП (см. рис. 5) позволяет сделать вывод о том, что для получения полупродукта с содержанием фосфора 0,010 % при постоянстве других факторов обеспечивается при окисленности шлака на уровне 15–20 % (по содержанию FeO).

Поскольку окисленность шлака напрямую зависит от остаточного содержания углерода, то для снижения содержания в шлаке оксидов железа с текущих 25–40% до рекомендуемых 15–20% необходимо завершать окислительное рафинирование при остаточном содержании углерода не менее 0,10% (см. рис. 6).

Результатом подобного изменения технологии (помимо содержания фосфора в металле) будет снижение расхода кислорода, количества шлака и потерь железа с ним, увеличение выхода годного и уменьшение расхода раскислителей и науглероживателей.

Возможен и промежуточный вариант корректировки технологии, предусматривающий одновременное снижение основности шлака при увеличении содержания остаточного углерода.

Указанные изменения в технологии позволят сократить издержки производства в результате улучшения показателей выплавки стального полупродукта в ДСП [24-26]: снизить основность шлака и расход флюсов, уменьшить потери металла со шлаком и повысить выход годного, а также завершать окислительное рафинирование при более высоком содержании углерода в результате снижения расхода кислорода.

Заключение

Для листового проката толщиной 10-20 мм из стали марки 10ХСНД с повышением содержания фосфора (в диапазоне 0,004-0,013%) наблюдается положительный тренд в его влиянии на величину ударной вязкости при температуре -60°C .

Выявленные закономерности влияния фосфора можно объяснить особенностями кристаллического строения низкоуглеродистой стали, для которой углерод оказывает слабое влияние на кристаллическую решетку металла. В этих условиях наиболее вероятно полное растворение атомов фосфора в металле с образованием твердого раствора, что способствует повышению значений ударной вязкости. Дополнительным фактором, предотвращающим вредное влияние фосфора, является умеренная толщина проката (10-20 мм), что обеспечивает хорошее прокаливание и получение равномерной структуры металла по толщине, предотвращая возможность образования фосфидов. Таким образом, для рассматриваемых условий производства листового проката из низкоуглеродистой стали марки 10ХСНД при толщине проката до 20 мм снижение содержания фосфора менее 0,010%, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости, нецелесообразно.

Для листового проката из стали 10ХСНД толщиной более 20 мм наблюдается отрицательное влияние содержания фосфора на ударную вязкость при температуре -60°C . Такая особенность влияния фосфора может объясняться тем, что с увеличением толщины листового проката условия его прокаливаемости ухудшаются, поэтому повышается вероятность образования фосфидов, способствующих снижению ударной вязкости стали при отрицательной температуре. Поэтому при производстве листового проката толщиной более 20 мм проведение глубокой дефосфорации с получением содержания фосфора менее 0,010% должно быть обязательным элементом технологии,

обеспечивающим достижение высоких механических свойств стали.

Таким образом, с точки зрения достижения высоких значений ударной вязкости листового проката из низкоуглеродистых сталей целесообразно скорректировать технологию производства с учетом толщины проката:

- при производстве проката толщиной до 20 мм обеспечивать содержание фосфора в разливаемой стали на уровне 0,010-0,015%;

- при производстве проката толщиной более 20 мм обеспечивать содержание фосфора в разливаемой стали на уровне не более 0,010%.

Такое изменение требований к содержанию фосфора позволит сократить издержки производства в результате улучшения показателей выплавки полупродукта: снизить основность шлака и расход флюсов, уменьшить потери металла со шлаком и повысить выход годного, а также завершать окислительное рафинирование при более высоком содержании углерода в результате снижения расхода кислорода.

Список источников

1. Гудремон Э.А. Специальные стали. 2-е изд. М.: Металлургия, 1966. 734 с.
2. Гольдштейн Я.Е. Низколегированные стали в машиностроении. М.: Металлургия, 1963. 229 с.
3. Берштейн М.Л., Рахштад А.Г. Металловедение и термическая обработка стали. 3-е изд. М.: Металлургия, 1983. 348 с.
4. Дрозин А.Д., Куркина Е.Ю. Математическая модель ликвации при охлаждении расплава железа с фосфором // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20. № 2. С. 5-11.
5. Кинетика сегрегации фосфора на границах зерен в низколегированной малоуглеродистой стали / Бокштейн Б.С., Ходан А.Н., Забусов О.О., Мальцев Д.А., Гурович Б.А. // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115. № 2. С. 156.
6. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. Киев: Техника, 1988. 253 с.
7. Куклев А.В., Соснин В.В., Поздняков В.А. О формировании осевой химической неоднородности в непрерывнолитых слябах // Сталь. 2003. № 8. С. 71-75.
8. Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н. Проблемы получения качественной слябовой заготовки на МНЛЗ №2 ОАО «Уральская Сталь» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2013. Т. 13. № 1. С. 68-73.
9. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Анализ влияния технологических параметров разлива стали на качество непрерывнолитого сляба и листового проката // Теория и технология металлургического производства. 2013. №1(13). С. 21-23.
10. Химическая неоднородность непрерывнолитого сляба из трубной особонизкосернистой стали / Крылова Е.А., Столяров А.М., Мошкунов В.В.,

- Потапова М.В. // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 1 (20). С. 20-22.
11. Глотова И.О., Дождиков В.И., Васютин А.Ю. Особенности распределения степени сегрегации химических элементов в непрерывнолитом слябе // Сталь. 2022. № 2. С. 7-11.
 12. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. 528 с.
 13. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. М.: Теплотехник, 2007. 527 с.
 14. Управление процессом дефосфорации стали при выплавке полупродукта в ДСП / Чичко А.А., Маточкин В.А., Соболев В.Ф., Чичко А.Н. // Электрометаллургия. 2008. № 9. С. 27-32.
 15. Анализ процесса дефосфорации при выплавке стали из металлized сырья с повышенным содержанием фосфора / Хассан А.И., Котельников Г.И., Семин А.Е., Мегахед Г. // Черные металлы. 2015. № 1 (997). С. 12-18.
 16. Совершенствование технологии производства стали с целью обеспечения содержания фосфора менее 0,005 % / Настюшкина А.В., Костин С.В., Шевченко Е.А., Шевченко А.А. // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 4 (23). С. 14-17.
 17. Балакина И.В. Совершенствование технологии дефосфорации стального полупродукта в гибкой модульной печи // Наука и производство Урала. 2024. Т. 20. С. 10-13.
 18. Влияние технологических параметров плавки на стойкость футеровки дуговой сталеплавильной печи в условиях АО «Уральская Сталь» / Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н., Дёма Р.Р., Колодин А.В. // Новые огнеупоры. 2019. №7. С.3-7.
 19. Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А., Басков С.Н. Совершенствование технологии предварительного раскисления стали в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2019. №8(1052). С.10-16.
 20. Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям / Куницын Г.А., Кузнецов М.С., Шаповалов А.Н., Бакин И.В. // Черные металлы. 2022. №5(1085). С.9-15.
 21. Ибраев И.К., Ибраева О.Т. Проблемы рефосфорации при выплавке стали // Электрометаллургия. 2012. № 12. С. 27-30.
 22. Анализ сквозной технологии производства листового проката статистическими методами / Шаповалов А.Н., Тутарова В.Д., Калитаев А.Н., Нефедов А.В. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2017. Вып. 2 (1406). С.52-58.
 23. Дашевский В.Я., Александров А.А., Леонтьев Л.И. Проблема фосфора при производстве марганцевых ферросплавов // Сталь. 2020. № 10. С. 23-27.
 24. Измайлова А.С., Шаповалов А.Н. Технологические возможности сокращения себестоимости продукции металлургических предприятий на современном этапе // Тренды и управление. 2017. № 2. С.132-147.
 25. Уманский А.А., Думова Л.В. Исследование комплексного влияния параметров выплавки рельсовой электростали на качество рельсовой продукции и технико-экономические показатели ее производства // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 11. С. 876-883.
 26. Коноваленко С.В., Морозов В.О. Оптимизация технологии выплавки стали в электросталеплавильном цехе // Сталь. 2021. № 2. С. 27-29.

Сведения об авторах

Куницына Наталья Геннадьевна – старший преподаватель кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС», Новотроицк, Россия. E-mail: n.kunicina@mail.ru.

Шаповалов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС», Новотроицк, Россия. E-mail: alshapo@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ON RATIONAL DEPTH OF PHOSPHORUS REMOVAL FROM STEEL

Kunicina Natalia G. – Senior Lecturer of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia. E-mail: n.kunicina@mail.ru.

Shapovalov Alexey N. – PhD (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Annotation. It is generally believed that phosphorus in steel is a harmful impurity that increases the tendency of steel to brittle fracture at subzero temperatures. In this paper the effect of phosphorus on the mechanical properties of sheet rolled from low-carbon steel grade 10XSND was studied. The results of impact toughness evaluation (by KCU method at -60°C) of sheet rolled products of different thicknesses were taken for the study. For the most accurate results were taken the lowest, average and highest values (from the obtained interval) of impact toughness for metal sheets with thickness from 10 to 32 mm. It was found that the effect of phosphorus on impact toughness is determined by the thickness of sheet metal. At thickness of rolled sheet up to 20 mm positive dynamics of impact toughness is observed with increase of phosphorus content up to 0,011-0,013%. For rolled products with a thickness of more than 20 mm, the effect of phosphorus on the impact strength of sheet metal is negative. Recommendations on optimal phosphorus content in rolled products from low-carbon steel grades are given, as well as the forecast of changes in steelmaking indicators on the example of electric arc furnace (EAF).

Keywords: sheet metal, sheet metal thickness, phosphorus content, impact toughness.

Ссылка на статью:

Куницина Н.Г., Шаповалов А.Н. О рациональной глубине удаления фосфора из стали // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 37-42.

Kunicina N.G., Shapovalov A.N. On rational depth of phosphorus removal from steel. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 37-42.