

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО И ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

М. И. Гасик, Ю. С. Пройдак

Национальная металлургическая академия Украины.
49005, г. Днепр, пр. Гагарина, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Обобщены и проанализированы результаты впервые проведенных кафедрой электрометаллургии НМетА Украины и заводом «Днепроспецсталь» опытно-промышленных масштабных работ по повышению качества колесной стали способами электрошлакового и вакуумно-дугового переплава. Приведены маршрутная схема получения расходных электродов из мартеповской (печь 250 т) и электропечной (ДСП 30 т) стали, характеристики установок для электрошлакового (ОКБ-905, ОКБ-1065) и вакуумно-дугового (ДСВ-63) переплавов. Рассмотрены физико-химические процессы и механизмы повышения качества колесной стали при электрошлаковом переплаве. Приведены и обобщены результаты испытаний механических свойств металла цельнокатаных колес, произведенных из слитков стали после электрошлакового и вакуумно-дугового переплавов. Рассмотрены направления работ по повышению качества осевой стали марки EA1N для железнодорожных осей, производимых в настоящее время из непрерывно-литых блюмов кислородно-конвертерной стали и слитков электропечи, подвергающихся прокатке с последующей ковкой. Обобщены вопросы проведения опытно-промышленных исследований по дальнейшему повышению качества железнодорожных осей, полученных из слитков электрошлакового и вакуумно-дугового переплавов. Библиогр. 20, табл. 11, ил. 4.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; вакуумно-дуговой переплав; металл; качество; кристаллизатор; свойства; цельнокатаные колеса; железнодорожные оси

Возрастание удельной нагрузки и увеличение скорости движения поездов предъявляют все более высокие требования к физико-механическим свойствам металла и цельнокатаным колесам. Введенный в 1982 г. стандарт (ГОСТ 10791–81 «Колеса цельнокатаные») регламентировал химический состав колесной стали, в том числе и ванадийсодержащей марки, некоторые режимы, технологические параметры производства и свойства цельнокатаных колес. Следует особо отметить, что этим стандартом регламентированы показатели, которые в настоящее время гарантированно обеспечиваются металлургическими заводами. С января 1991 г. введен в действие новый ГОСТ 10791–89, который предусматривал обязательную внепечную обработку — продувку инертными газами, ужесточение требований по среднему баллу неметаллических включений, контроль напряженного состояния, отмену испытаний на прогиб дисков и ряд требований к качеству поверхности колеса (антикоррозионное покрытие, зачистку и т.д.).

Качество цельнокатаных колес для железнодорожного транспорта в текущее время должно соответствовать нормам сдаточного контроля по ГОСТ 10791-2011, ТУ У 27.1-23365475-663:2011. Ниже приведены результаты проведенных в разные годы работ по дальнейшему повышению каче-

ства колесной стали способами электрошлакового (ЭШП) и вакуумно-дугового переплава (ВДП).

Получение электродов и технология рафинирующих переплавов. В работах [1–3] исследовано влияние степени десульфурации металла, изменения концентрации примесей цветных металлов, количества и состава неметаллических включений на свойства колесной стали при ЭШП. Электрошлаковому и вакуумно-дуговому переплаву подвергали электроды, изготовленные из электропечного и мартеповского металла (рис. 1). Для ЭШП и ВДП применяли расходные электроды, получаемые отливкой их в специальные изложницы с последующей прокаткой или ковкой. Одним из наиболее перспективных способов изготовления расходных электродов является отливка их на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) или машине полунепрерывного литья заготовок (МПНЛЗ). Это позволяло существенно снизить расходные коэффициенты металла. В проведенных опытах расходные электроды колесной стали, выплавленной в 30-тонной электропечи, получали на заводе «Днепроспецсталь» на МПНЛЗ.

Металл на МПНЛЗ разливали в два ручья: первый ручей — кристаллизатор сечением 370×370 мм для ЭШП и второй — кристаллизатор диаметром 405 мм для ВДП. Из мартеповского металла электроды для ВДП изготавливали спо-

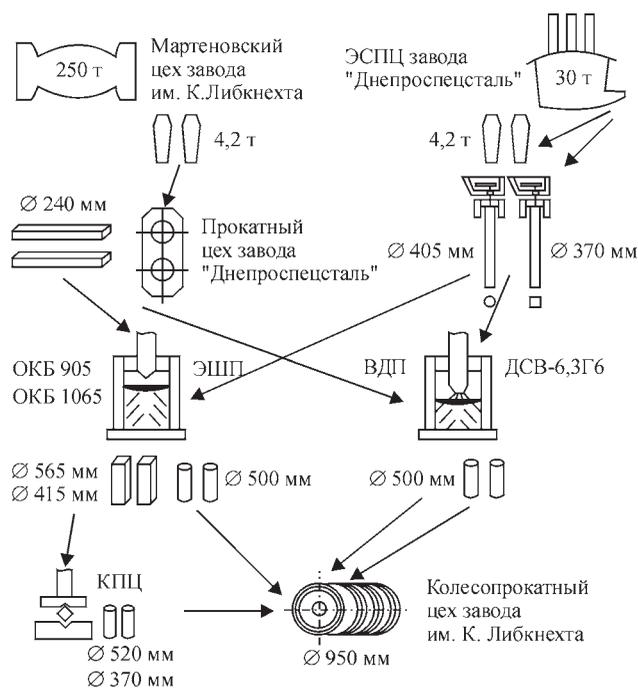


Рис. 1. Технологическая схема выплавки, разливки и рафинирования колесной стали

сособомковки слитков до диаметра 405 мм, а для ЭШП — путем прокатки до сечения 240×240 мм. Электрошлаковый переплав электродов из мартеновской стали (М) производили на установке ОКБ-905 (две плавки), а электродуговой (ОД) — на установке ОКБ-1065 (три плавки). В обоих случаях использовали стандартный флюс АНФ-6 состава, %: CaF₂ 65; Al₂O₃ 30; CaO 35; SiO₂ 0,40; MnO 0,64; Fe₂O₃ 0,46. Переплав вели по 1-й группе, где за основу взята существующая технология переплава углеродистой стали.

С целью исключения обжатия квадратных слитков ЭШП сечением 565×565 и 415×415 мм в кузнечном цехе до круглого сечения диаметром 520 и 380 мм (требования технологии изготовления колес) исследована технология получения слитков ЭШП круглого сечения, для чего использовали кристаллизатор ВДП диаметром 500 мм. ЭШП производили на установке ОКБ-1056 с наведением жидкой ванны расходуемым электродом. При переплаве отклонений от технологии не было, однако отсутствие у кристаллизатора конусности

вызвало ряд трудностей при извлечении из него слитка. Некоторые технологические параметры плавки приведены в табл. 1.

Вакуумно-дуговой переплав колесного металла электродуговой и мартеновской выплавки производили на установке ДСВ-6,3Г6 в кристаллизатор диаметром 500 мм. Рабочее давление в плавильном пространстве не превышало 1,33·10⁻³ ГПа, величина тока равнялась 9,5 кА. С целью уменьшения угара марганца усадочную раковину выводили с подачей в печь аргона. Технологические параметры плавки приведены в табл. 2.

Головная часть слитков ЭШП и ВДП, извлеченных из кристаллизаторов, имела температуру до 800 °С. Для предотвращения образования трещин слитки помещали в футерованные неотапливаемые колодцы, где они медленно охлаждались до 150...200 °С. Слитки ЭШП сечением 565×565 и 415×415 мм перековывали в кузнечно-прессовом цехе на круглые диаметром 520 и 380 мм соответственно.

Качество металла ЭШП. При переплаве электродов колесной стали мартеновской и электродуговой выплавки с использованием флюса АНФ-6 и аргона в количестве 6,6...8,6 м³/т угар марганца и кремния был практически полностью исключен. В то же время при переплаве стали без применения защитной атмосферы (плавки 1Ш и 3Ш) угар марганца и кремния составил 8 и 16 % соответственно (табл. 3).

При ЭШП происходит интенсивная десульфурация металла, в результате которой содержание серы в слитках снижается на 66 % (плавки 1Ш, 3Ш) по сравнению с ее содержанием в расходных электродах. При входе участка электрода в зону термического влияния на стадии его расплавления наступает диссоциация сульфидных включений. Вследствие высокого температурного и концентрационного градиента в этой зоне имеет место диффузия серы из расходного электрода в пленку жидкого металла. В высокотемпературной зоне расходного электрода еще до стадии его плавления в результате перераспределения содержание серы снижается до ее концентрации в лунке жидкого металла. Удаление серы из капель

Таблица 1. Технологические параметры ЭШП колесной стали мартеновской (М) и открытой электродуговой (ОД) выплавки [1, 2]

Плавка	Металл	Установка	Масса слитка, т	Сечение кристаллизатора, мм	Расход флюса, кг/т	Скорость наплавления, кг/мин	Расход инертного газа, м ³ /т	Расход электроэнергии, кВт·ч/т
1Ш	ОД	ОКБ-1065	4,160	565×565	45,5	8,65	—	1463
2Ш	—»—	—»—	3,600	—»—	55,5	8,67	8,67	1471
3Ш	—»—	—»—	4,060	Ø500	41,0	7,8	—	1522
4Ш	М	ОКБ-905	2,350	415×415	36,0	6,65	6,65	1710
5Ш	—»—	—»—	3,300	—»—	37,0	6,70	6,72	1573

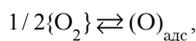
Т а б л и ц а 2. Технологические параметры ВДП колесной стали мартеновской (М) и открытой электродуговой (ОД) выплавки

Плавка	Металл	Установка	Масса слитка, т	Натекание, л·мкм/с	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	Угар, кг	Скорость наплавления, кг/мин
1ВД	ОД	ДСВ-6,3Г6	3,660	48	1042	5,0	5,20
2ВД	-»-	-»-	3,800	47	1054	2,0	5,50
3ВД	М	-»-	2,900	46	1030	2,6	5,68

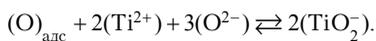
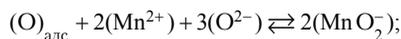
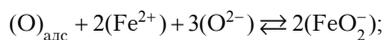
электродного металла в процессе нахождения их в межэлектродной области протекает подобно обессериванию эмульгированного металла при внепечной обработке стали синтетическим шлаком. Содержание серы в отработанных шлаках существенно не изменялось, а в некоторых случаях снижалось благодаря окислению ее на поверхности шлаковой ванны по реакции



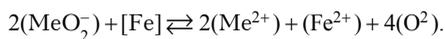
Одним из источников поступления кислорода при ЭШП являются окислы, образующиеся на поверхности электрода в процессе переплава. За основу можно принять механизм окисления шлаковой ванны и передачи кислорода жидкому металлу [3, 4]. На поверхности шлаковой ванны происходит адсорбция кислорода



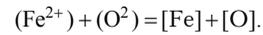
которая сопровождается ионизацией атомов кислорода и окислением присутствующих в шлаке катионов железа, марганца, титана и других низшей валентности до катионов высшей валентности:



Анионы FeO_2^- и TiO_2^- диффундируют через шлак к металлу. На границе шлак–металл анионы трехвалентных металлов восстанавливаются до двухвалентных:

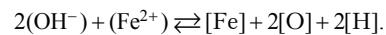
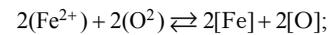
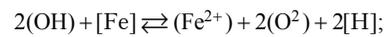
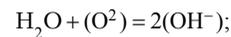


Часть ионов Fe^{2+} и O^{2-} , обменявшись зарядами, переходят в металл:



Таким образом, при наличии в шлаке окислов элементов с переменной валентностью, последние могут быть передатчиками кислорода из атмосферы в металл.

Возможна также транспортировка кислорода из газовой фазы в металл в результате растворения в шлаке водяных паров:



При этом в металл поступает не только кислород, но и водород.

Фактическое содержание кислорода в металле ЭШП, приведенное в табл. 4, показывает, что в металле ЭШП электродуговой и мартеновской выплавки снижение кислорода в среднем составило 38 и 55 % соответственно.

Предполагая, что в жидкой металлической ванне окисидные включения отсутствуют, можно заключить, что в процессе кристаллизации слитка ЭШП в нем образуются эндогенные включения. Химический состав и количество этих включений определяются активностью раскислителей, присутствующих в металле, и количеством растворенного в металле кислорода. В случае получения металла ЭШП особой чистоты по кислороду и, следовательно, по оксидным включениям, можно использовать при ЭШП кислые шлаки.

Т а б л и ц а 3. Химический состав колесной стали мартеновской (М) и электродуговой (ОД) выплавки в процессе ЭШП, %

Плавка	Металл	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	ОД	0,55	0,73	0,33	0,011	0,012	0,13	0,04
1Ш	ОД+ЭШП	0,57	0,68	0,28	-»-	0,004	0,11	0-»-
2Ш	ОД+ЭШП	-»-	0,73	0,32	0,010	0,008	0,13	0,03
3Ш	ОД+ЭШП	0,55	0,65	0,26	-»-	0,004	0,12	0,04
	М	0,59	0,76	-»-	-»-	0,027	0,11	0,15
4Ш	М+ЭШП	0,56	0,73	0,25	-»-	0,015	-»-	0,10
	М	0,57	0,75	0,37	0,013	0,021	0,13	0,16
5Ш	М+ЭШП	-»-	0,72	0,34	-»-	0,012	-»-	0,13

Таблица 4. Содержание кислорода и азота в колесной стали ЭШП, %

Плавка	Металл	Кислород	Азот
	ОД	0,0043	0,0104
1Ш	ОД+ЭШП	0,0024	0,0100
2Ш	ОД+ЭШП	0,0030	0,0102
3Ш	ОД+ЭШП	0,0022	0,0098
	М	0,0077	0,0022
4Ш	М+ЭШП	0,0031	0,0020
5Ш	М+ЭШП	0,0038	0,0021

Расчетами, проведенными с использованием математической модели, показано, что с точки зрения уменьшения перехода водорода из атмосферы в слиток ЭШП при прочих равных условиях предпочтения заслуживают печи с круглым кристаллизатором. Поэтому в промышленных плавках был опробован ЭШП заготовок с использованием круглого кристаллизатора диаметром 500 мм.

Определение остаточных концентраций водорода методом вакуум-плавления в образцах, вырезанных из диска колеса, подтвердило эффективность использования кристаллизаторов круглого сечения. Содержание водорода в металле ЭШП в кристаллизаторе диаметром 500 мм составило $2,3 \cdot 10^{-5}$ % (плавка 3Ш), а при ЭШП в кристаллизаторе сечением 565×565 и 415×415 мм — $5,5 \cdot 10^{-5}$ и $6,8 \cdot 10^{-5}$ % соответственно.

Поведение азота при ЭШП зависит от исходного содержания его в металле, формы, в которой он присутствует в стали, а также от состава применяемого флюса, режима ЭШП и т. д. В условиях ЭШП среднеуглеродистой колесной стали на флюсе АНФ-6 (система $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$) возможно образование в шлаке ионов CN^- и перенос азота из газовой фазы в металл. Приведенные в табл. 4 результаты исследования содержания газов подтверждают, что в процессе ЭШП содержание азота снижается на 30 %.

Металлографические исследования показали, что в исходном металле мартеновской и электродуговой выплавки неметаллические включения представлены, в основном, сульфидами и оксидами. Сульфиды MnS и $(\text{Mn}_x\text{Fe}_{1-x})\text{S}$ округлой формы, размером 5...10 мкм. Кислородные включения в электропечном металле присутствуют в виде Al_2O_3 , а также шпинели MgOAl_2O_3 сложного состава. В мартеновской колесной стали включения представ-

Таблица 5. Содержание мышьяка и меди в колесной стали ЭШП и ВДП исходного мартеновского металла, %

Плавка	Металл	As	Cu
	Исходный	0,004	0,14
4Ш	М+ЭШП	->-	->-
5Ш	М+ЭШП	->-	0,10
3В	М+ВДП	0,002	0,06

лены силикатами марганца MnOSiO_2 и 2MnOSiO_2 , шпинели сложного состава $(\text{Al, Cr})_2\text{O}_3$ и стекловидной составляющей. В стали после ЭШП основным видом включений в металле, независимо от способа выплавки, являются оксисульфиды размером 5...15 мкм, которые представлены сульфидами сложного состава и оксидами типа Al_2O_3 , шпинели AlOAl_2O_3 и более сложного состава.

Результаты оценки неметаллических включений по ГОСТ 1778-70 показали, что наиболее чистый металл получен по технологии — открытая дуговая печь + электрошлаковый переплав.

Качество металла ВДП. Для обеспечения процессов рафинирования металла при ВДП необходимы низкое давление в кристаллизаторе печи, высокая температура и относительно небольшая скорость оплавления электрода. Как известно, удаление включений при рафинирующем переплаве в вакууме может происходить двумя путями: всплыванием их или выносом на поверхность потоками металла и диссоциацией вещества включений с последующим удалением из металла одного или обоих элементов, образующих включения, в виде газообразных соединений CO , N_2 и др.

Исследования показали, что в металле ВДП мартеновских заготовок меньше, по сравнению с металлом ЭШП, примесей цветных металлов. Так, концентрация мышьяка и меди в металле ВДП исходной мартеновской плавки снизилась на 50 и 57 % соответственно (табл. 5).

Представляет практический интерес физико-химический анализ процессов испарения примесей цветных металлов при ВДП. Как известно, в процессе ВДП рафинирование стали идет за счет испарения примесей, включая и цветные. Скорость испарения примесей из расплава описывается уравнением Лэнгмюра:

$$I_i = \alpha_i (7,754) v_i N_i P_i^0 (M_i / T)^{1/2} A_p,$$

где α_i — коэффициент испарения примеси; v_i — коэффициент активности примеси; N_i — атомная доля примеси; P_i^0 — давление пара чистой примеси; M_i — атомный вес; T — температура; A_p — поверхность ванны жидкого металла.

Расчетами [5] и промышленными испытаниями на установках ВДП, ДСВ-6, ЗГ6 установлено, что при ВДП такие примеси, как мышьяк, удаляются более интенсивно, чем медь.

Наряду с положительным эффектом рафинирования при ВДП наблюдаются и отрицательные явления. Испарение компонентов, имеющих высокую упругость паров, может приводить к снижению легирующих элементов, как, например, марганца, магния, кальция, селена и др. Скорость перехода компонентов из расплава в газовую фазу

Таблица 6. Химический состав колесной стали мартеновской (М) и электродуговой (ОД) выплавки при ВДП, %

Плавка	Металл	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	ОД	0,55	0,73	0,33	0,011	0,012	0,13	0,04
1ВД	ОД+ВДП	->-	0,64	0,32	0,013	->-	->-	->-
2ВД	ОД+ВДП	0,52	0,56	0,33	0,014	->-	0,14	->-
	М	0,57	0,75	0,37	0,013	0,021	0,013	0,16
3ВД	М+ВДП	0,52	0,63	0,36	0,014	0,019	0,012	0,14

в условиях вакуума определяется массопереносом компонента из расплава к поверхности раздела металл–газ собственно испарением (десорбцией).

Авторы работы [6] изучили влияние технологических параметров ВДП на снижение угара (испарения) марганца, а также на изменение содержания других элементов и распределение примесей. При использовании уравнения Лэнгмюра, зависимости скорости испарения марганца от содержания марганца в металле, а также данных статистической обработки с использованием парной корреляции получено следующее уравнение для оценки угара марганца:

$$[\text{Mn}] = \frac{0,029([\text{Mn}] - 0,45)S}{V},$$

где S — площадь кристаллизатора, мм²; V — скорость плавления, г/с.

Прогнозировать угар марганца при различных условиях кристаллизации можно также с помощью уравнения, связывающего концентрацию марганца в исходном и переплавленном металле со скоростью плавки и размерами электрода и слитка [7]:

$$\ln \frac{[\text{Mn}]_a}{[\text{Mn}]_c} = K_{\text{Mn}} \frac{1}{W_n} \frac{F_3}{F_k},$$

где $[\text{Mn}]_a$ и $[\text{Mn}]_c$ — концентрация марганца в электроде и слитке соответственно, %; K — коэффициент испарения, см/с; W_n — скорость наплавления, кг/мин; F_3 — площадь зазора между электродом и кристаллизатором, мм²; F_k — площадь кристаллизатора, мм².

Сделан вывод, что процесс испарения марганца при ВДП частично лимитируется диффузией атомов через пограничный слой у поверхности раздела металл–газ.

Таким образом, с целью уменьшения угара марганца необходимо при переплаве сокращать зазор между электродом и кристаллизатором, увеличивать силу тока, применять инертный газ, поток которого в вакуумной системе должен регулироваться для поддержания давления в зоне дуги выше упругости пара марганца, но в пределах, применяемых для ВДП. В связи с этим ВДП колесной стали производили при отношении диаметра электрода и кристаллизатора 0,80, плавки заканчивали на рабочем режиме 9,5 кА с использованием инертной атмосферы.

Исследование химического состава металла ВДП показало, что содержание кремния, хрома, никеля, алюминия практически не изменяется (табл. 6).

Как известно, на скорость поглощения или удаления азота в тигле вакуумной индукционной печи оказывает существенное влияние присутствие в металле поверхностно-активных элементов — кислорода и серы. Полагают, что такое влияние связано с уменьшением числа вакансий на границе раздела фаз вследствие обогащения границ этими элементами. Анализ данных подтверждает зависимость степени деазотации от концентрации серы в металле. Так, например, при содержании серы в исходном мартеновском металле 0,021 % степень деазотации составляет 18 %, а при содержании серы в электропечном металле 0,012 — 40 % (табл. 7).

Отсюда можно предположить, что переход атомов азота через поверхность раздела металл–газовая фаза может лимитировать весь процесс удаления азота при ВДП.

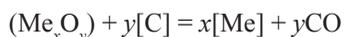
Исследование поведения водорода как при ВДП, так и при ЭШП сопряжено с трудностями отбора проб. Поэтому детально этот вопрос не рассматривался. На основании результатов, полученных при анализе поведения марганца и азота, сделаны некоторые выводы относительно удаления водорода. Согласно данным работы [8] принимаем константу скорости удаления водорода в 6–7 раз больше, чем азота, т. е. $(1...2) \cdot 10^{-2}$ см/с. При этом подразумевается, что в результате переплава в вакуумной дуговой печи содержание водорода должно снизиться, по сравнению с исходным, более чем на порядок, что и наблюдается в действительности.

Переплав металла в вакуумной дуговой печи сопровождается эффективным удалением кислорода, количество которого обусловлено, главным образом, присутствием в стали продуктов реакций раскисления и вторичного окисления металла.

Таблица 7. Содержание кислорода, азота и серы в колесной стали при ВДП, %

Плавка	Металл	N	O	S
	ОД	0,0104	0,0043	0,012
1ВД	ОД+ВДП	0,0062	0,0024	->-
2ВД	ОД+ВДП	0,0059	0,0021	->-
	М	0,0022	0,0077	0,021
3ВД	М+ВДП	0,0018	0,0023	0,019

Рафинирование металла от кислорода происходит следующим образом [9]: частичное раскисление стали углеродом при взаимодействии его с кислородом легко растворимых окислов в пленке жидкого металла на торце электрода по реакции



и значительное выделение кислородных включений на поверхность расплава. Наиболее вероятным местом полного протекания процессов удаления кислорода является поверхность жидкого металла.

Исследования природы сульфидных включений показали, что они образуются из зародышей, возникающих на границе раздела фаз. Включения больших размеров (4,5...40,0 мкм) образуются в объеме пересыщенной жидкой фазы. Начало выделения сульфидных включений обусловлено не только концентрацией серы, но и повышением ее активности вследствие ликвации углерода.

Загрязненность исходного металла мартеновской и электродуговой выплавки, а также ВДП исследовали по ГОСТ 1778–70 методом подсчета включений определенного балла, находящихся в поле зрения. В основном в металле ВДП присутствуют сульфидные и оксидные включения, а силикатные настолько дисперсны, что не могут быть оценены по применяемой шкале.

Флокеночувствительность металла опытных колес определяли на всех плавках. Исследования показали, что все колеса обладают противифлокенным иммунитетом.

Механические свойства металла ЭШП и ВДП.

Глубокое рафинирование металла от неметаллических включений и газов в ходе переплавных процессов, уменьшение дендритной и химической неоднородности обеспечивают получение слитка с плотной макроструктурой, повышение уровня и сокращение разброса механических свойств стали.

Неметаллические включения влияют на величину зерна и определяют состояние их границ, а

также выступают в роли концентраторов напряжений в металле. Исследования [10] по определению неоднородности напряжений вокруг включений методом замера микротермоэлектродвижущей силы на границе металл–включение и рентгенографические исследования напряжений II рода показали, что наибольшие значения напряжений получены вокруг недеформирующихся включений глинозема и высокоглиноземистых алюмосиликатов неправильной формы. Максимум напряжений вокруг отдельных включений соответствует наиболее остроугольным участкам поверхности включения. Величина напряжений вокруг пластичных включений зависит от их размеров.

Экспериментами установлено (табл. 8), что благодаря направленной кристаллизации металла в процессе ЭШП и ВДП, способствующей измельчению и более равномерному распределению неметаллических включений, колесная сталь, наряду с повышенными прочностными свойствами, имеет значительно больший запас пластичности, что хорошо согласуется с данными работы [11].

Одной из основных характеристик колесной стали является величина ударной вязкости, которая, как уже отмечалось, при 20 °С должна составлять не менее 0,2 МДж/м².

Исследование изменения величины ударной вязкости (a_v) металла диска колес в зависимости от температуры производили на образцах размером 10×10×55 мм с надрезом типа I по ГОСТ 9454–60 на маятниковом копре ударного действия. Образцы вырезали из диска в месте перехода его в ступицу в радиальном направлении.

Результаты проведенных исследований показали (рис. 2), что металл ЭШП, по сравнению с обычным, имеет в два раза большее значение ударной вязкости как при положительных, так и отрицательных температурах.

Величина a_v металла ВДП, содержащего в своем составе сульфидов в два раза больше, чем металл ЭШП, при 20 °С имеет меньшее значение (0,4

Таблица 8. Механические свойства колес диаметром 950 мм, изготовленных из металла мартеновской (М) и электродуговой (ОД) выплавки, а также рафинирующих электропереплавов

Металл	Плавка	Номер колеса	σ_v , МПа	δ , %	ψ , %	Твердость, НВ
				Не менее		
ГОСТ 10791–81			911...1107	8	14	255
Исходный электропечной						
ОД+ЭШП	1Ш	643	927	11,62	23,37	262
ОД+ЭШП	2Ш	632	1010	17,4	38,0	277
ОД+ЭШП	3Ш	630	990	17,2	41,0	270
ОД+ВДП	1ВД	637	1000	17,0	39,0	277
ОД+ВДП	2ВД	642	1020	17,0	44,0	272
Исходный мартеновский						
М+ЭШП	4Ш	624	1000	17,5	39,0	273
М+ЭШП	5Ш	626	990	17,0	40,0	268
М+ВДП	3ВД	633	1010	18,0	39,0	280

и 0,52 МДж/м² соответственно), однако в области -60 °С достигает 0,22 МДж/м².

Минимальным значением в области -60 °С характеризуется и металл обычной мартеновской плавки, что вызвано повышенным содержанием в нем газов, примесей, цветных металлов, серы, а также неметаллических включений.

Для определения склонности стали к хладноломкости применяли метод, основанный на визуальной оценке доли волокнистой или кристаллической составляющей в изломе. При этом кристаллическое строение излома соответствовало хрупкому разрушению, а волокнистое — вязкому.

Характер излома исследовали на сканирующем (растровом) электронном стереомикроскопе. При исследованиях использовали стандартные ударные образцы, испытываемые при температурах, °С: 20 (*а, г, ж*), -20 (*б, д, з*) и -60 (*в, е, и*) (рис. 3).

При 20 °С в изломе образцов наблюдались участки «чашечного» вязкого излома поверхности. Однако наряду с вязким изломом в образце мартеновской стали (*а, б, в*) имеются участки с типично хрупким рельефом. Переход в область отрицательных температур характеризуется кри-

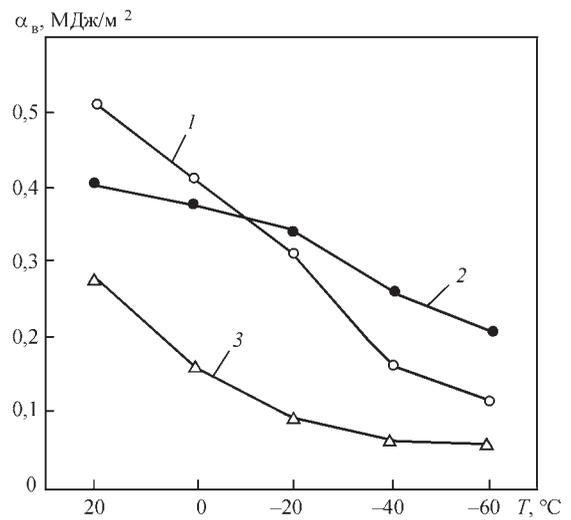


Рис. 2. Изменение ударной вязкости металла диска колес из стали ЭШП (1), ВДП (2) и исходного мартеновского металла (3) в интервале температур 20...-60 °С

сталлическим изломом, в котором в металле ВДП (*г, д, е*) и ЭШП (*ж, з, и*) вместе с элементами хрупкого излома наблюдаются участки, свидетельствующие о вязком характере разрушения стали. По мере снижения температуры микрорельеф волок-

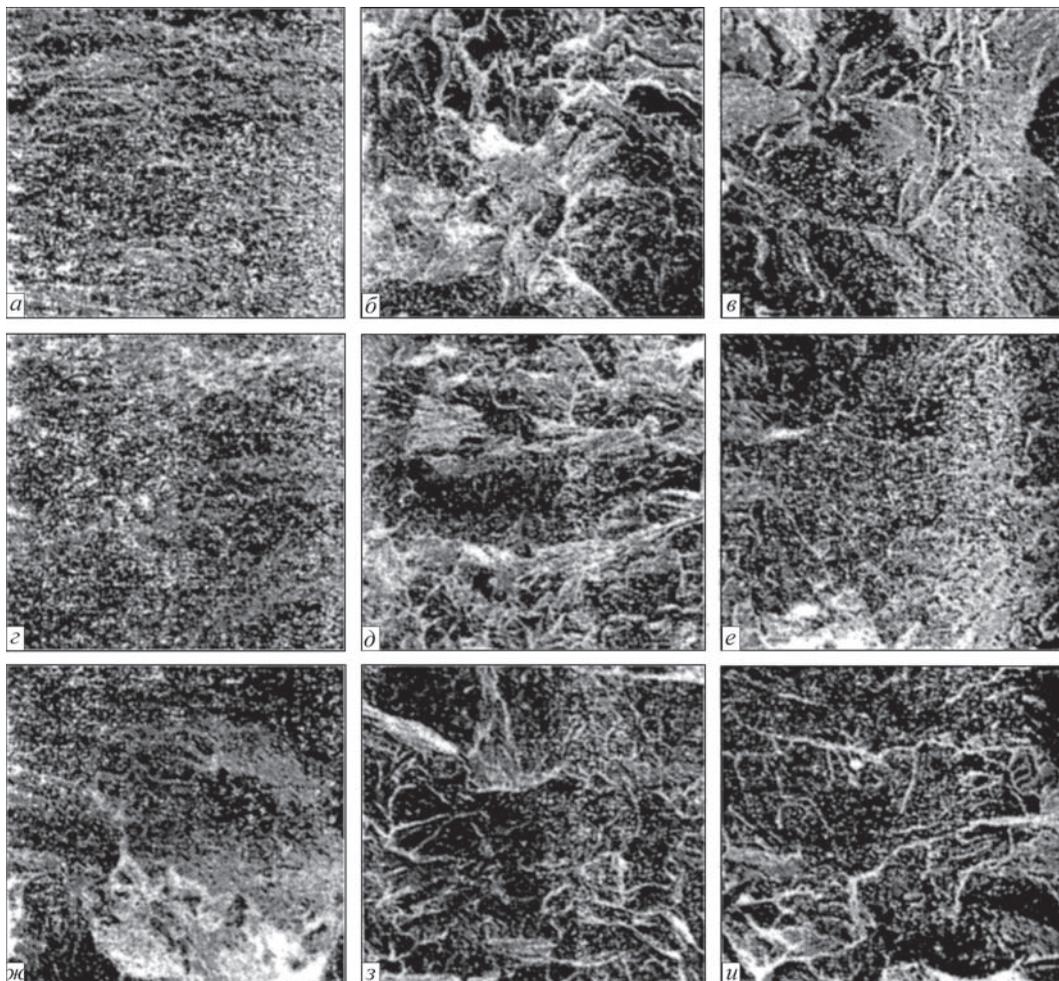


Рис. 3. Характер разрушения металла колесной стали мартеновской выплавки (*а, б, в*), рафинирующих переплавов ВДП (*г, д, е*) и ЭШП (*ж, з, и*) в интервале температур 20...-60 °С

нистой структуры уменьшается и практически исчезает в металле мартеновской выплавки.

За критерий склонности стали к хрупкому разрушению принята критическая температура хрупкости [12]. В результате ВДП произошло снижение критической температуры хрупкости металла всех плавок на 20 °С независимо от исходного металла и направления вырезки образцов, что имеет большое практическое значение.

Согласно данным работы [13] снижение ударной вязкости свидетельствует об уменьшении работы зарождения трещины с увеличением в стали сульфидов, что объясняется действием сульфидов как локализаторов напряжений и источников микротрещин. Однако результаты исследований показали, что металл ВДП, имеющий в своем составе сульфидов в два раза больше, чем металл ЭШП, имеет более высокие значения ударной вязкости. Поэтому влияние неметаллических включений (сульфидов) на характеристики разрушения колесной стали определяется не столько их общим содержанием, сколько их формой, размером и распределением.

Таким образом, в результате проведенных опытно-промышленных исследований по влиянию рафинирующих переплавов (ЭШП и ВДП) расходуемых электродов из металла мартеновской и электродуговой выплавки на качество колесной стали установлено существенное повышение качества металла и готовых колес за счет десульфурации стали, изменения концентрации примесей цветных металлов, количества и состава неметаллических включений, а также условий кристаллизации.

Современное состояние технологии выплавки осевой стали и задачи повышения ее качества.

Актуальной задачей железнодорожного транспорта является дальнейшее увеличение пропускной способности железных дорог длиной общего назначения 22,7 км, что в значительной мере требует существенного повышения качества металла и конструктивной прочности не только цельнокатанных колес, но и железнодорожных осей [14–17]. В настоящее время подвижной грузовой состав экс-

плуатируется при нагрузке на ось вагона до 228 кН (23,25 т) и 245 кН (24,99 т) [18]. На научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 2010), посвященной решению задач повышения качества металла для железнодорожного транспорта, обсуждались и вопросы решения проблемных задач повышения нагрузки на ось колесной пары до 287 кН (29,3 т).

Несмотря на то, что черновые оси производства завода «Днепроспецсталь» сертифицированы Ассоциацией американских железных дорог и Регистром сертификации на Федеральном железнодорожном транспорте [19], решение проблемной задачи повышения нагрузки на ось колесной пары обуславливает необходимость разработки научно-обоснованных подходов к проведению опытно-промышленных экспериментов и созданию прорывных технологий выплавки электростали и производства железнодорожных осей высшего уровня качества.

Запорожский электрометаллургический завод «Днепроспецсталь» имеет большой промышленный опыт в достижении высоких результатов выплавки электростали осевого сортамента EA1N (35Г) и производства железнодорожных осей по сквозной технологической схеме, включающей: выплавку металла полупродукта в ДСП-60, внепечное рафинирование осевой стали на установке УПК, эффективную разливку стали EA1N по изложницам (развес слитков 4,8 и 6,7 т), прокатку слитков, ковку и термическую обработку (нормализация, отпуск) профильных заготовок. Металл черновых осей подвергают технологическому и исследовательскому контролю размерного фактора, количества и природы неметаллических включений и механических свойств черновых осей. Результаты испытаний обрабатываются и анализируются в аспекте соответствия их свойств требованиям европейского стандарта EN 13261:2009*. В соответствии с этим стандартом сталь марки EA1N имеет химический состав, приведенный в табл. 9. Железнодорожные оси по механическим

Таблица 9. Химический состав сталей для черновых осей вагонов железных дорог по отечественным и зарубежным стандартам, мас. %

Стандарт, марка стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	V	Ni
				Не более						
Сталь 45 ГОСТ 1050–88	0,42...0,50	0,17...0,37	0,50...0,80	0,035	0,040	0,25	0,30	–	–	0,30
ОС ГОСТ 4728–96	–»–	0,15...0,35	0,60...0,90	0,040	–»–	0,30	0,25	–	–	–»–
Сталь 35 ГОСТ 4543-71	0,35...0,40	0,17...0,37	0,70...1,00	0,035	0,035	–»–	0,30	0,15	0,05	–»–
EA1N EN 13261	0,40	0,50	1,20	0,020	0,020	–»–	–»–	0,08	0,06	–»–
EA1N UIC 811-1 OR	0,37	0,46	1,12	0,040	0,040	–»–	–»–	0,05	0,05	–»–

*EN 13261:2009 «Рельсовый транспорт. Колесные пары и тележки. Оси. Требования к изделию».

Таблица 10. Механические свойства железнодорожных осей после нормализации

Стандарт	Временное сопротивление, σ_b , МПа	Предел текучести, σ_r , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Работа удара* KU , Дж	
				L	Q
UIC 811-1 OR	550...650	320	22	25	10
EN 13261	—	—	—	30	25

*Типы образцов для проведения испытаний на ударный изгиб по ГОСТ 9454–78: тип 1 — по UIC 811-1 OR, тип 8 — по EN 13261; L и Q означают соответственно продольное и поперечное направления вырезки образцов для контроля работы удара; приведены средние значения для трех образцов при 20 °С.

Таблица 11. Оценка загрязненности стали EA1N (35Г) по шкалам ISO 4967

Количество плавок, шт.	Место отбора проб	Тип неметаллических включений, балл		Количество не соответствующих плавок по неметаллическим включениям, %
		$A_{тл}$ (сульфиды)	$B_{тл}$ (оксиды)	
10	Кованые черновые оси	$\frac{1,0...1,5}{1,32}$	$\frac{1,0...1,5}{1,12}$	0
20	Катаная осевая заготовка	$\frac{1,0...1,5}{1,31}$	$\frac{1,0...1,5}{1,26}$	0

Примечание. В числителе указан разбег значений, в знаменателе — средние баллы.

свойствам металла должны соответствовать нормам стандарта UIC 811-1 OR и европейского стандарта EN 13261 (табл. 10).

Прокатный передел слитков стали EA1N. В соответствии с разработанной на ПАО «Днепро-спецсталь» технологической маршрутной схемой производства черновых осей слитки горячим всадом передаются в прокатный цех на нагревательные колодцы стана 1050/950. Слитки прокатываются по спецификации кузнечного цеха на круглые заготовки. Катаные заготовки подвергаются 100%-ному ультразвуковому контролю.

Ковка профильных заготовок для железнодорожных осей. Ковка заготовок производится на радиально-ковочной машине РКМ-1000 в автоматическом режиме. С нормализационного нагрева производится правка черновых осей на установке M17280 с последующим охлаждением на воздухе. Основные размеры профильной заготовки представлены на рис. 4.

Исследование загрязненности кованых профильных заготовок осей неметаллическими включениями. Результаты контроля загрязненности стали EA1N (35Г) неметаллическими включениями, проведенного на образцах от осевых заготовок и кованых черновых осей, показаны в табл. 11.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что, в сравнении с действующей технологией конечного раскисления, по которой металл раскисляли только алюминием и силикокальцием, новая технология позволяет получать металл по неметаллическим включениям, соответствующий требованиям зарубежного стандарта EN 13261. Су-

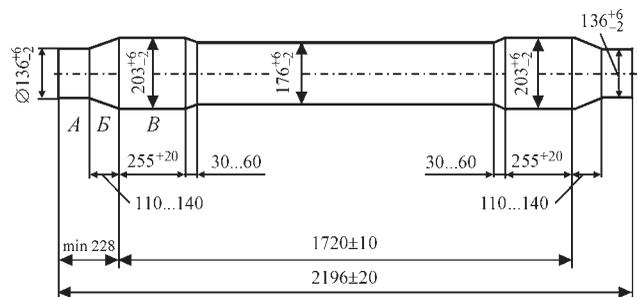


Рис. 4. Схема типовой кованой профильной заготовки для осей вагонов подвижного состава железных дорог: A — шейка оси; B — подступичная часть оси; B — ступица

ществено снижены средние баллы как оксидных ($B_{тл}$), так и сульфидных ($A_{тл}$) включений. При этом уменьшены значения средних баллов сульфидных включений на 0,3, что при уровне 1,5 балла является существенным.

Обеспечение чистоты металла осевых заготовок по неметаллическим включениям в соответствии с требованиями стандартов UIC 811-1 OR и EN 13261 и, прежде всего, по сульфидным ($A_{тл}$) и оксидным ($B_{тл}$) включениям толстой серии (при оценке ISO 4967) достигнуто за счет снижения содержания серы в металле не более чем до 0,008 % и отработки режимов комплексного раскисления и микролегирования металла титаном на стадии внепечного рафинирования его на УПК и вакууматоре.

Выводы

1. Выполнен технологический аудит действующей сквозной технологии производства кованых профильных заготовок из стали EA1N (35Г) для осей

вагонов подвижного состава железных дорог в аспекте возможности получения осей, стабильно удовлетворяющих требования (нормы) стандартов Международного союза железных дорог стандартов UIC 811-1 OR и EN 13261. Анализ данных по стали EA1N (35Г) показал, что действовавшая технология производства стали не в полной мере обеспечивала получение черновых осей как по показателям механических свойств, так и по загрязненности неметаллическими включениями.

2. Требуемое временное сопротивление черновых осей из стали EA1N (35Г) достигнуто благодаря регламентированному содержанию углерода и марганца, а также соблюдению разработанных режимов термообработки.

3. В результате проведенных исследований показаны возможные перспективы дальнейшего поиска технологических решений по производству черновых осей железнодорожного состава из непрерывнолитой заготовки вакуумированной стали. При этом решение весьма актуальной задачи повышения нагрузки на ось колесной пары может быть получено путем теоретических разработок в сочетании с опытно-промышленными исследованиями влияния переплавных процессов осевого металла способами ЭШП и ВДП.

Список литературы

1. Узлов И. Г., Гасик М. И., Есаулов А. Т. и др. (1985) *Колесная сталь*. Киев, Техника.
2. Узлов И. Г., Шнееров Я. А., Гасик М. И. и др. (1979) Разработка технологии выплавки колесной стали в электропечах. *Бюллетень ЦНИИ ЧМ*, **23**, 31–35.
3. Гасик М. И., Прождак Ю. С., Горобец А. П. (1986) ЭШП — эффективная технология повышения качества колесного и подшипникового металла. *Электрошлаковая технология*. Патон Б.Е. и др. (ред.). Киев, Наукова думка, сс. 27–31.
4. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. (1970) *Электрошлаковый переплав*. Москва, Metallurgy.
5. Andreini R. J., Foster J. S. (1979) Kinetics of solute removal during electronbeam and vacuum arc melting. *J. Vac. and Metal*, **6**, 1055–1059.
6. Поволоцкий Д. Я., Кофман Ю. В., Сергеев А. Б. (1978) Влияние вакуумного дугового переплава сталей и сплавов на состав металла и распределение элементов в слитке. *Известия вузов. Черная металлургия*, **6**, 65–66.
7. Швед Ф. И., Сергеев А. Б., Карякин А. П. и др. (1973) Поведение марганца при вакуумно-дуговом переплаве стали. *Сб. тр. всесоюзной конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали»*, Челябинск, **116**, сс. 105–114.
8. Линчевский Б. В. (1970) *Вакуумная металлургия стали и сплавов*. Москва, Metallurgy.
9. Чуйко Н. М., Лоза В. В. (1975) Удаление кислорода из стали при вакуумном дуговом переплаве. *Известия АН СССР. Металлы*, **1**, 7–14.
10. Шильников Г. Ю., Зимин Г. Г., Бережко Б. И. и др. (1973) Изменение в строении и свойствах стали марки 12Х1МФ, обусловленное вакуумным дуговым переплавом. *Сб. тр. всесоюзной конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали»*, Челябинск, **116**, сс. 145–151.

11. Ахматов Ю. С., Лисняк А. Г., Перков О. Н. и др. (1978) Влияние вакуумирования колесной стали на ее свойства. *Термическая обработка металлов*, **7**, 41–42.
12. Мирошниченко Н. Г., Кузьмичев М. В., Борисова Ж. А. (1977) Взаимосвязь характеристик стали при динамических и статических испытаниях. *Там же*, **5**, 82–86.
13. Овсянников Б. М., Ладько В. Г. (1973) Зависимость вязкости разрушения конструкционных сталей от химического состава и структуры. *Специальные стали и сплавы*, **2**, 116–125.
14. Левченко Г. В., Балахова Т. В., Мосьпам В. В. и др. (2016) Обеспечение качества железнодорожных осей, изготовленных из непрерывнолитых заготовок различного сечения. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **1**, 29–33.
15. Левченко Г. В., Демина Е. Г., Воробей С. А. и др. (2009) Оценка деформированного состояния металла по изменению дендритной структуры. *Там же*, **5**, 72–75.
16. Левченко Г. В., Ершов С. В., Демина Е. Г. и др. (2008) Трансформация дендритной структуры на всех этапах производства железнодорожных осей. *Там же*, **2**, 74–76.
17. Левченко Г. В., Ершов С. В., Демина Е. Г. и др. (2008) Влияние режимов деформации слитка на трансформацию дендритной структуры заготовок для производства железнодорожных осей. *Сб. науч. тр. «Информационная технология в обработке давлением»*, 27.
18. Гасик М. И., Сальников А. С., Пересащенко О. В., Лоза В. В. (2009) Разработка и промышленное освоение сквозной технологии производства кованных черновых осей из электростали EA1N (35Г). *Современная электрометаллургия*, **4**, 40–48.
19. Тумко А. Н., Логозинский И. Н., Пересащенко О. В. и др. (2010) Исследование технологических схем производства профильных осевых заготовок для подвижного состава железных дорог. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **4**, 40–43.

References

1. Uzlov, I.G., Gasik, M.I., Esaulov, A.T. et al. (1985) *Wheel steel*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
2. Uzlov, I.G., Shneerov, Ya.A., Gasik, M.I. et al. (1979) Development of technology of wheel steel melting in electric furnaces. *Bulleten TsNII ChM*, **23**, 31–35 [in Russian].
3. Gasik, M.I., Projdak, Yu.S., Gorobets, A.P. (1986) ESR – efficient technology in increase of quality of wheel and bearing metal. In: *Electroslag technology*. Ed. by B.E. Paton et al. Kiev, Naukova Dumka, 27–31 [in Russian].
4. Latash, Yu.V., Medovar, B.I. (1970) *Electroslag remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. Andreini, R.J., Foster, J.S. (1979) Kinetics of solute removal during electron beam and vacuum arc melting. *J. Vac. and Metal*, **6**, 1055–1059.
6. Povolotsky, D.Ya., Kofman, Yu.V., Sergeev, A.B. (1978) Influence of vacuum arc remelting of steels and alloys on composition of metal and distribution of elements in ingot. *Izv. Vuzov, Chyorn. Metallurgiya*, **6**, 65–66 [in Russian].
7. Shved, F.I., Sergeev, A.B., Karyakin, A.P. et al. (1973) Behavior of manganese in vacuum arc remelting of steel. In: *Proc. of All-Union Conf. on Current Problems of Electrometallurgy of Steel, Chelyabinsk*, **116**, 105–114 [in Russian].
8. Linchevsky, B.V. (1970) *Vacuum metallurgy of steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
9. Chujko, N.M., Loza, V.V. (1975) Removal of oxygen from steel in vacuum arc remelting. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgy*, **1**, 7–14 [in Russian].

10. Shilnikov, G.Yu., Zimin, G.G., Berezhko, B.I. et al. (1973) Change in structure and properties of steel of 12Kh1MF grade, caused by vacuum arc remelting. In: *Proc. of All-Union Conf. on Current Problems of Electrometallurgy of Steel, Chelyabinsk*, **116**, 145–151 [in Russian].
11. Akhmatov, Yu.S., Lisnyak, A.G., Perkov, O.N. et al. (1978) Influence of vacuumizing of wheel steel on its properties. *Termich. Obrabotka Metallov*, **7**, 41–42 [in Russian].
12. Miroshnichenko, N.G., Kuzmichev, M.V., Borisova, Zh.A. (1977) Interrelation of steel characteristics in dynamic and static tests. *Ibid.*, **5**, 82–86 [in Russian].
13. Ovsyannikov, B.M., Ladko, V.G. (1973) Relationship between fracture toughness of structural steels and chemical composition and structure. *Spetsialnye Stali i Splyvy*, **2**, 116–125 [in Russian].
14. Levchenko, G.V., Balakhova, T.V., Mospam, V.V. et al. (2016) Quality assurance of railway axles produced from continuous casting billets of different section. *Metallurg. i Gornorudnaya Promyshlennost*, **1**, 29–33 [in Russian].
15. Levchenko, G.V., Demina, E.G., Vorobej, S.A. et al. (2009) Evaluation of strained state of metal on change of dendritic structure. *Ibid.*, **5**, 72–75 [in Russian].
16. Levchenko, G.V., Ershov, S.V., Demina, E.G. et al. (2008) Transformation of dendritic structure at all stages of manufacture of railway axles. *Ibid.*, **2**, 74–76 [in Russian].
17. Levchenko, G.V., Ershov, S.V., Demina, E.G. et al. (2008) Influence of modes of ingot deformation on dendritic structure transformation of billets for manufacture of railway axles. In: *Information technology in pressure treatment: Transact.*, **27** [in Russian].
18. Gasik, M.I., Salnikov, A.S., Peresadenko, O.V., Loza, V.V. (2009) Development and industrial mastering of end-to-end technology of production of forged roughing axles of electric steel EA1N (35G). *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 40–48 [in Russian].
19. Tumko, A.N., Logozinsky, I.N., Peresadenko, O.V. et al. (2010) Investigation of technological schemes in manufacture of profile axle billets for railway rolling stocks. *Metallurg. i Gornorudnaya Promyshlennost*, **4**, 40–43 [in Russian].

**ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО І ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВІВ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ МЕТАЛУ СУЦІЛЬНОКАТАНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС**

М. І. Гасік, Ю. С. Пройдак

Національна металургійна академія України.

49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Узагальнені та проаналізовані результати вперше проведених кафедрою електрометалургії НМетА України і заводом «Дніпроспецсталь» дослідно-промислових масштабних робіт з підвищення якості колісної сталі способами електрошлакового і вакуумно-дугового переплаву. Наведені маршрутна схема отримання витратних електродів з мартенівської (піч 250 т) і електропічної (ДСП 30 т) сталей, характеристики установок для електрошлакового (ОКБ-905, ОКБ-1065) та вакуумно-дугового (ДСВ-63) переплавів. Розглянуто фізико-хімічні процеси і механізми підвищення якості колісної сталі при електрошлаковому переплаві. Наведено і узагальнено результати випробувань механічних властивостей металу суцільнокатаних коліс, вироблених із зливків сталі після електрошлакового і вакуумно-дугового переплавів. Розглянуто напрямки робіт з підвищення якості осьової сталі марки EA1N для залізничних осей, вироблених в даний час з безперервно-литих блоків киснево-конвертерної сталі і зливків електросталі, що піддаються прокатці з подальшим куванням. Узагальнено питання проведення дослідно-промислових досліджень щодо подальшого підвищення якості залізничних осей, отриманих з зливків електрошлакового і вакуумно-дугового переплавів. Бібліогр. 20, табл. 11, іл. 4.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; вакуумно-дуговий переплав; метал; якість; кристалізатор; властивості; суцільнокатані колеса; залізничні осі

**APPLICATION OF ELECTRIC SLAG AND VACUUM-ARC REMELTS TO IMPROVE THE QUALITY
OF THE METAL OF THE ALL-ROLLED RAILWAY WHEELS**

M.I. Gasik, Yu.S. Projdak

National metallurgical academy of Ukraine.

4 Gagarina Ave., 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

The results of experimental-industrial large-scale works on improving the quality of wheel steel by the methods of electric slag and vacuum arc melting, for the first time carried out by the Department of Electrometallurgy of the National metallurgical academy of Ukraine and the Dnepropetsstal plant, were summarized and analyzed. The route scale for producing consumable electrodes from open-hearth (250 t furnace) and electric furnace (30 t EAF) steel, the characteristics of installations for electroslag (OKB-905, OKB-1065) and vacuum-arc (DSV-63) remelts are presented. The physical and chemical processes and mechanisms for improving the quality of wheel steel during electroslag remelting are considered. The results of tests of mechanical properties of metal of all-rolled wheels produced from steel ingots after electroslag and vacuum-arc remelting are presented and summarized. The directions of works on improving the quality of the axial steel of grade EA1N for railway axes currently produced from continuously-cast blooms of oxygen-converting steel and electric steel ingots subjected to rolling with the following forging are considered. The problems of conducting experimental-industrial studies on further improvement of the quality of railway axes produced from electroslag and vacuum-arc remelting ingots, are summarized. Ref. 20, Tabl. 11, Fig. 4.

Key words: electroslag remelting; vacuum arc remelting; metal; quality; mold; properties; all-rolled wheels; railway axes

Поступила 20.06.2018