



УДК 669.187.25:669.01

РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОВАННЫХ ЧЕРНОВЫХ ОСЕЙ ИЗ ЭЛЕКТРОСТАЛИ EA1N (35Г)

**М. И. Гасик, А. С. Сальников,
О. В. Пересащенко, В. В. Лоза**

Обобщены и проанализированы результаты исследования процессов и качества металла на всех стадиях сквозной технологической схемы, а также данные опытно-промышленного освоения производства кованых профильных заготовок для осей вагонов железнодорожного транспорта (черновых осей), включая выплавку в ДСП-60 электростали EA1N (35Г), рафинирование (печь-ковш, вакууматор), разливку по изложницам (развес слитка 4,8 и 6,7 т), прокатку, ковку и термическую обработку (нормализация, отпуск) профильных заготовок. Приведены результаты технологического и исследовательского контроля размерного фактора, количества неметаллических включений и механических свойств металла черновых осей, а также анализ в аспекте соответствия их свойств требованиям UIC* 811-1 OR и EN 13261-2003.

The results of investigation of processes and quality of metal at all stages of end-to-end technological chart, as well as data of experimental-industrial mastering the production of forged profiled billets for axles of cars of railway transport (roughing axles), including melting of electric steel EA1N (35G) in DSP-60, refining (furnace-ladle, vacuum degasser), pouring into moulds (ingot weights of 4.8 and 6.7 t), rolling, forging and heat treatment (normalization, tempering) of profiled billets are generalized and analyzed. Results of technological and research control of a dimensional factor, amount of non-metallic inclusions and mechanical properties of metal of roughing axles, as well as analysis as to conformity of their properties to the requirements of UIC* 811-1 OR and EN 13261-2003 are given.

Ключевые слова: электросталь; черновые оси; выплавка; внепечная обработка; разливка стали; слиток; прокатанная и кованая заготовка; термообработка; механические свойства; неметаллические включения

Актуальность работы и постановка задачи исследования. Промышленный сектор Украины, России, других стран СНГ и Европы характеризуется развитой транспортной инфраструктурой. Из девяти Критских транспортных коридоров три железнодорожных (Берлин–Львов–Киев; Триест–Львов; Хельсинки–Киев–Одесса) пройдут по территории Украины. Протяженность стальных магистралей общего пользования составляет в Украине 22,7, России — 124 тыс. км. Обеспечение безопасности подвижного состава на стальных магистралях Украины, стран СНГ и дальнего зарубежья представ-

ляет одну из главных первоочередных задач. В настоящее время перед железнодорожным транспортом поставлены масштабные задачи технического перевооружения, дальнейшего увеличения провозной и пропускной способности железных дорог. Их решение во многом связано с производством металла повышенной прочности, а также фасонных профилей проката и поковок высокого качества с минимальными потерями металла при механической обработке заготовок. Это в полной мере относится и к производству кованых профильных заготовок для осей вагонов подвижного состава железных дорог.

ОАО «Днепроспецсталь» профильные заготовки осей для экспорта, в том числе в Российскую Федерацию, производят из электростали EA1N (35Г). Металл товарных осей должен удовлетворять по комплексу механических свойств и загряз-

*UIC — Международный союз железных дорог.

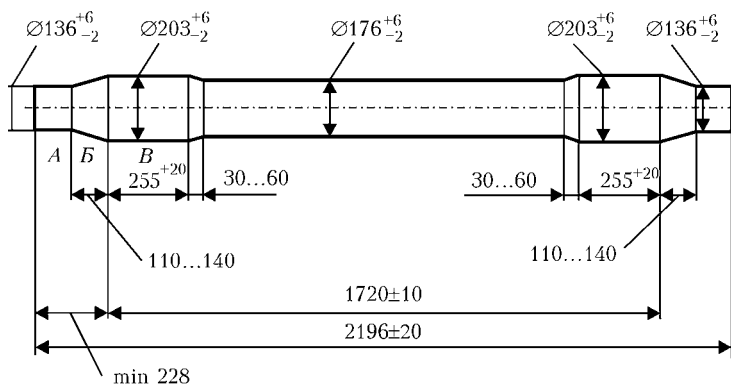


Схема типовой кованой профильной заготовки для осей вагонов подвижного состава железных дорог: А – шейка оси; В – подступичная часть оси; В – ступица

Производство кованных профильных заготовок для осей представляет собой сложный многоступенчатый процесс, включающий выплавку электростали в дуговых основных печах, рафинирование жидкого металла (полупродукта в электропечи-ковше), вакуумирование стали в ковшевом вакууматоре, разливку стали сифоном по изложницам, прокатку слитков на осевые заготовки круглого сечения для последующейковки, ковку и термическую обработку черновых осей, которые по качественным характеристикам должны соответствовать требованиям отечественных и зарубежных стандартов.

Таблица 1. Химический состав стали для черновых осей вагонов железных дорог по отечественным и зарубежным стандартам

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

ненности неметаллическими включениями нормам Международного союза железных дорог UIC 811–1 OR и стандарта EN 13261–2003.

Подвижной грузовой состав эксплуатируется при нагрузке на ось вагона 228 кН (23,25 т). Путем повышения качества металла цельнокатаных колес и кованных осей необходимо довести нагрузку на ось до 245 кН (24,99 т) [1]. Возрастающие удельные нагрузки в расчете на колесную пару и увеличение скорости движения поездов предъявляют более высокие требования к физико-механическим свойствам металла для цельнокатаных колес и осей грузовых вагонов.

Целью настоящей научно-исследовательской работы является теоретическое обоснование, разработка и промышленное освоение сквозной технологической схемы процесса производства черновых осей из электростали марки EA1N (аналога марки 35Г), получение комплекса показателей сдаточного и исследовательского контроля, полностью соответствующего требованиям стандартов UIC 811-1 OR и EN 13261.

Требования к качеству кованных черновых осей. В ОАО «Днепроспецсталь» имеется многолетний научно-обоснованный опыт производства кованных профильных заготовок для осей (колесных пар)

Таблица 2. Требования зарубежных стандартов к механическим свойствам железнодорожных осей из стали EA1N после нормализации

Стандарт	Временное сопротивление R_m , Н/мм ²	Предел текучести R_e , Н/мм ²	Относительное удлинение A, %	Работа удара* KU (среднее значение для трех образцов при 20 °C), Дж	
				L	Q
UIC 811-1 OR	550... 650	320	22	25	10
EN 13261	–	–	–	30	25
Не менее					

* 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.

Таблица 3. Требования зарубежных стандартов к чистоте стали EA1N по неметаллическим включениям

Стандарт	Средний балл неметаллических включений по ISO 4967 (метод А), не более									
	Сульфиды А		Оксиды В		Силикаты С		Глобулы D		B+C+D	
	Тонкие	Толстые	Тонкие	Толстые	Тонкие	Толстые	Тонкие	Толстые	Тонкие	Толстые
UIC 811-1 OR	3,0	2,0	2,5	2,0	2,5	2,0	2,5	2,0	–	–
EN 13261	2,0	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	4,0	3,0

подвижного состава грузовых вагонов железных дорог Украины, стран СНГ. Черновые оси производят из осевой стали ОС, которые по качеству соответствуют требованиям ГОСТ 4728–89 и ГОСТ 30272–96. Для стран дальнего зарубежья аналогичные по геометрии и форме черновые оси (рисунок) изготавливают из стали марки EA1N в соответствии с нормами UIC 811-1 OR и EN 13261. Как следует из данных, приведенных в табл. 1, сталь EA1N по химическому составу аналогична или близка к стали 35Г (ГОСТ 4543–71).

Особенностью зарубежных стандартов являются более жесткие требования по химическому составу, механическим свойствам (табл. 2) и чистоте стали по неметаллическим включениям (табл. 3), что обусловило необходимость научного обоснования новых технологических решений на стадии выплавки и внепечной обработки, а также создания новых режимов термообработки черновых осей.

Одной из основных трудноразрешимых задач при выполнении экспортных поставок осей было обеспечение жестких требований стандарта EN 13261 по загрязненности стали неметаллическими включениями. В соответствии с требованиями стандарта UIC 811-1 OR, все виды неметаллических включений не должны превышать 2,5... 3,0 (для тонких) и 2,0 (для толстых) балла при контроле по ISO 4967, метод А. Вместе с тем, согласно новым требованиям стандарта EN 13261, загрязненность металла по этим включениям не должна превышать соответственно 2,0 и 1,5 балла.

В процессе освоения сквозной технологии производства кованых профильных заготовок для осей вагонов требовалось решить и вторую очень сложную задачу получения металла с необходимым уровнем механических свойств.

Согласно действующей технологии, на первом этапе исследований выплавляли сталь EA1N и получили кованые черновые оси. Загрязненность металла неметаллическими включениями исследовали на образцах из осевых заготовок – проката слитков массой 4,8 и 6,7 т на круглый профиль сечением 225... 250 мм (в зависимости от требований потребителей к размерам черновых осей) и из кованых черновых осей. Оценку загрязненности металла производили в баллах по шкале ISO 4967. Результаты исследования обобщены в табл. 4.

Как следует из данных табл. 4, максимальный и средний баллы толстых сульфидных $A_{тл}$ и оксидных $B_{тл}$ включений составили соответственно 2,0 и 1,8. На основании этих данных пришли к выводу, что действующая технология не обеспечивает выполнение требований зарубежных стандартов при оценке загрязненности (шкалы ISO 4967) по толстым сульфидным $A_{тл}$ и оксидным $B_{тл}$ включениям, которые не должны превышать 1,5 балла.

Физико-химическое обоснование опытной технологии выплавки стали EA1N (35Г). При разработке новой технологии производства электростали для кованых черновых осей исходили из основных положений физико-химических процессов выплавки и накопленного на ОАО «Днепропетцсталь» научно-обоснованного промышленного опыта освоения производства стали новых марок с повышенными требованиями по неметаллическим включениям.

Установлено, что при прочих равных условиях количество, вид и размер неметаллических включений зависит прежде всего от вида и количества применяемых раскислителей, степени усвоения и их остаточной массовой доли в готовой металлопродукции.

Кроме того, определенное влияние на процесс формирования и удаления неметаллических включений

Таблица 4. Оценка загрязненности стали EA1N (35Г) по шкалам ISO 4967

Количество плавков, шт.	Место отбора проб	Баллы неметаллических включений			Количество плавков, не соответствующих по неметаллическим включениям, шт. / %
		$A_{тл}$ (сульфидные)	$B_{тл}$ (оксидные)	$D_{тл}$ (глобулярные)	
7	Катаная осевая заготовка	1,0... 2,0	1,0... 1,8	1,0... 1,0	5,0
		1,60	1,19	1,0	71,4
6	Кованая черновая ось	1,3... 2,0	1,0... 1,9	1,0... 1,2	2,0
		1,60	1,24	1,0	33,3

Примечание. В числителе указан разбег, в знаменателе – средние баллы.



ний оказывают вид применяемых ферросплавов, содержание в них нерегламентированных стандартами примесных элементов, последовательность ввода их в металл-полупродукт, выпускаемый из дуговой печи в ковш с применением твердошлаковых смесей и на стадиях обработки его на установке печь-ковш (УПК) и вакууматоре.

Так, например, научно обоснована и подтверждена промышленным опытом технология получения подшипниковой стали ШХ15СГ-В и других марок этого сортамента, обеспечивающая выход годного сортопроката с первого сдаточного контроля от 70...72 до 92...95 % путем исключения применения ферросилиция ФС65 с содержанием 0,4...0,6 % кальция и 1,5...2,5 % алюминия, а также высокоуглеродистого ферромарганца ФМн78А, заменив эти ферросплавы ферросиликомарганцем МнС17 и стабилизировав рациональные пределы остаточного содержания в стали кальция и алюминия [2, 3].

Так называемые первичные неметаллические включения на основе оксидных фаз образуются в жидком металле при вводе элементов-раскислителей на всех этапах предварительного раскисления (легирувания активными элементами), а также в УПК и на стадии вакуумирования.

Остаточные равновесные содержания (активности) растворенного в жидкой стали кислорода обусловлены концентрацией сильных элементов раскислителей (кальция, алюминия, титана и др.) и соответствующей температурой жидкого металла.

Из-за экзотермичности реакций раскисления стали при понижении температуры и соответственном повышении при этом активности растворенных кислорода и элементов-раскислителей образуются вторичные неметаллические включения, которые, как и первичные, могут в большей или меньшей мере всплывать и ассимилироваться ковшевым шлаком.

Наиболее вероятными и характерными представителями неметаллических включений являются продукты реакций взаимодействия кислорода и элементов-раскислителей при кристаллизации металла в двухфазной зоне ликвидус–солидус (жидко-твердое состояние). Металлургическая система в жидком состоянии вблизи равновесия однозначно реагирует на не слишком сильное возмущение, возвращаясь к состоянию равновесия.

Согласно работе [4], в таких условиях вполне адекватной является модель изолированной замкнутой системы, термодинамическое состояние которой является состоянием максимального хаоса. В открытых системах для состояний, далеких от равновесия (что имеет место при кристаллизации стали в изложнице, кристаллизаторах МНЛЗ), возникают эффекты согласования, когда частицы как бы устанавливаются связь на макроскопических расстояниях через макроскопические интервалы времени.

В результате согласованного взаимодействия подсистем, какими могут быть и жидкая сталь, раскисленная различными элементами с их остаточными содержаниями, с растворенными кислородом,

азотом, водородом, серой и др., происходят процессы упорядочения, возникновения из «хаоса» определенных структур, их преобразования и усложнения [4].

В данном аспекте повышение чистоты стали по неметаллическим включениям определенных видов, размеров и количества может быть достигнуто при создании научно обоснованной предыстории каждой из стадий процессов при выплавке, рафинировании и разливке (кристаллизации стали с регламентированным остаточным содержанием кислорода (серы) и активных элементов-раскислителей, а также их определенными соотношениями).

В этой связи теоретический и практический интерес представляют данные о влиянии элементов-раскислителей (кальций, алюминий, углерод) на активность кислорода, растворенного в этих системах.

В работе [5] исследовали активность кислорода и соответствующих элементов-раскислителей в жидкой стали при их взаимном влиянии. Установлен ряд следующих зависимостей для расчета активности кислорода и элементов-раскислителей (при 1600 °С):

$$\lg a_{[O]} = \lg [O] - 0,2[O] - 3,9[Al] - 3,24[Ca] - 0,45 [C];$$

$$\lg a_{[Al]} = \lg [Al] - 0,045[Al] - 0,047[Ca] - 6,6[O] + 0,09[C];$$

$$\lg a_{[Ca]} = \lg [Ca] - 0,07[Ca] - 0,072[Al] - 0,34[O] - 8,1[C];$$

$$\lg a_{[C]} = \lg [C] - 0,22[C] + 0,043[Al] - 0,097[Ca] - 0,34[C].$$

Рассчитаем активности элементов по приведенным уравнениям для среднего химического состава стали ЕА1N (0,28 % С, 0,32 % Si, 0,90 % Mn) при содержании активных элементов-раскислителей, по опытным данным, 0,030 % Al, 0,002 % Ca, 0,002 % [O]. Установлено, что при 1600 °С активность этих элементов равняется

$$a_{[O]} = 0,0011; a_{[Al]} = 0,031; a_{[Ca]} = 0,000011; a_{[C]} = 0,196.$$

Совместное раскисляющее действие кальция и алюминия в стали проявляется в областях равновесия металла с жидким шлаком, моно-, би- и гексаалюминатом кальция $CaO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot 2Al_2O_3$ и $CaO \cdot 6Al_2O_3$. Следует заметить, что равновесие герценита $FeO \cdot Al_2O_3$ или корунда может быть только с алюминием.

Углерод в осевой стали несколько снижает активность кислорода, растворенного в жидкой стали. Для достижения одного и того же содержания кислорода в стали при понижении в ней концентрации углерода необходимо поддерживать более высокие остаточные содержания растворенных алюминия и кальция или вводить дополнительный элемент-раскислитель.

Термодинамика реакций взаимодействия титана с растворенными в железе кислородом и азотом. Титан, растворенный в жидком железе, в зависимости от термодинамических условий, может взаимодействовать с растворенными в нем кислородом и



азотом с образованием оксидной или нитридной фазы. В системе Ti–O известен ряд оксидов: TiO ($t_{пл} = 1737\text{ }^\circ\text{C}$), Ti₂O₃ ($t_{пл} = 2137\text{ }^\circ\text{C}$), Ti₃O₅ ($t_{пл} = 2177\text{ }^\circ\text{C}$) и TiO₂ ($t_{пл} = 1855\text{ }^\circ\text{C}$). Зависимости изменения энергии Гиббса реакций образования соответствующего оксида из чистых веществ от температуры приведены ниже:

$$\begin{aligned} \text{Ti} + 1/2 \text{O}_2 &= \text{TiO}_2; \\ \Delta G_T^0 &= -502018 + 82,89T \text{ [Дж/моль]}; \\ 2\text{Ti} + 3/2 \text{O}_2 &= \text{Ti}_2\text{O}_3; \\ \Delta G_T^0 &= -1449720 + 235,58T \text{ [Дж/моль]}; \\ 3\text{Ti} + 5/2 \text{O}_2 &= \text{Ti}_3\text{O}_5; \\ \Delta G_T^0 &= -2330350 + 48,34T \text{ [Дж/моль]}; \\ \text{Ti} + \text{O}_2 &= \text{TiO}_2; \\ \Delta G_T^0 &= -934230 + 173,68T \text{ [Дж/моль]}. \end{aligned}$$

Состав и количество оксидной фазы титана в стали определяется рядом факторов и прежде всего содержанием титана и остаточной концентраций растворенного в металле кислорода [6]. При содержании в стали растворенного титана до 0,04 % формируется фаза TiO₂; при 0,05... 0,14 % – Ti₃O₅; свыше 0,15 до 4,86 % – фаза Ti₂O₃. Термодинамическая прочность оксидов титана, рассчитанная для условия $\Delta G_T^0 = 0$, повышается в ряду TiO₂ → Ti₃O₅ → Ti₂O₃ → TiO. Для оксида TiO температура, при которой $\Delta G_T^0 = 0$, равна 6050 К. Титан по раскислительной способности уступает алюминию ($e_{\text{O}}^{\text{Ti}} = 1,8$; $e_{\text{O}}^{\text{Al}} = -6,6$ [7]). Микролегирование стали титаном проводили после раскисления ее алюминием, кальцием. Титан, как и алюминий, образует с кислородом тугоплавкие оксиды ($t_{пл} \text{ Al}_2\text{O}_3 = 2053\text{ }^\circ\text{C}$).

При совместном раскислении стали алюминием и титаном могут образовываться твердые растворы титана (Ti₂³⁺O₃) и алюминия (Al₂³⁺O₃). Замещение иона алюминия ($r_{\text{Al}^{3+}} = 0,057\text{ нм}$) ионом титана ($r_{\text{Ti}^{3+}} = 0,069\text{ нм}$) сопровождается увеличением межплоскостного расстояния d_{002} твердого раствора. Экспериментально установлено, что каждой температуре соответствует определенное значение концентраций Ti₂O₃ в α-Al₂O₃, которое рекомендуется рассчитывать по полученной в работе [8] зависимости

$$\lg X_{\text{Ti}_2\text{O}_3} = -\frac{4320}{T} + 2,56,$$

где $X_{\text{Ti}_2\text{O}_3}$ – мольная доля Ti₂O₃ в α-Al₂O₃.

Вблизи температуры плавления α-Al₂O₃ ($t_{пл} = 2053\text{ }^\circ\text{C}$) растворимость Ti₂O₃ в корунде достигает 5 мас. %. При наличии в стали кальция, алюминия и титана в продуктах реакций взаимодействия их с растворенным кислородом могут образовываться твердые растворы титана (точнее Ti₂O₃) в алюминатах кальция, предпочтительно в гексаалюминате CaO·6(Al_xTi_{1-x})₂O₃.

О взаимодействии титана с азотом, растворенным в стали. Растворенные в стали титан и азот при определенной активности (концентрации) их и температуре могут взаимодействовать с образованием термодинамически прочного соединения нитрида титана TiN по реакции, приведенной в работе [9]:



Константа равновесия этой реакции имеет вид

$$\lg K_{\text{Ti-N}} = \lg \frac{a_{\text{TiN}}}{a_{\text{Ti}} a_{\text{N}}} = \frac{1}{[\% \text{Ti}] f_{[\text{Ti}]} [\% \text{N}] f_{[\text{N}]}} = \frac{69190}{T} - 17,48,$$

а изменение энергии Гиббса в зависимости от температуры описывается выражением

$$\Delta G_T^\circ = -30740 + 80T \text{ [кДж/моль]}.$$

Условие $\Delta G_T^\circ = 0$ для реакции $\text{Ti} + 1/2\text{N}_2 = \text{TiN}$ выполняется при 4115 °C.

В конструкционной стали дуговой выплавки, обработанной в вакууме, содержание азота составляет 100... 120 ppm, кислорода – 18... 25 ppm. При соответствующих содержаниях азота в стали и температуре термодинамически вероятно образование нитрида титана.

При отсутствии в стали титана при определенных термодинамических условиях может образовываться нитрид алюминия AlN весьма тонкодисперсных размеров, который обычно идентифицируется электронной микроскопией. Взаимодействие растворенных в железе алюминия и азота, по данным работы [9], описывается реакцией



$$\lg K_{\text{Al-N}} = -\frac{12950}{T} + 5,59.$$

Образование нитрида AlN при 1600 °C в жидком железе до 1 % Al и давлении азота 80 кПа невозможно [9]. Следует полагать, что при достижении в микрокристаллизационных объемах металла содержания алюминия свыше 1 % и давления 80 кПа возможно образование AlN. Константа равновесия реакции образования AlN равна единице при 2589 °C, что намного ниже температуры для TiN 4115 °C. Согласно данным работы [7], минимальная концентрация титана, при которой образуется нитрид TiN в расплаве Fe–Ti–N при 1600 °C и $p_{\text{N}_2} = 1 \cdot 10^5$ Па, равна 0,07 мас. %. Вместе с тем в процессе кристаллизации электростали зародыши нитридов титана могут образовываться и при более низкой массовой доле титана.

Основные положения новой технологии выплавки стали EA1N (35Г). Сталь EA1N (35Г) для промышленного производства заготовок черновых осей выплавляли в основной дуговой печи ДСП-60 с окислительным периодом и применением кислорода. После дефосфорации стальной ванны и окисления углерода сталь-полупродукт раскисляли ферроси-



Таблица 5. Оценка загрязненности стали EA1N (35Г) по шкалам ISO 4967

Количество плавков, шт.	Место отбора проб	Баллы неметаллических включений типов		Количество не соответствующих плавков 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. 1. В числителе указан разбег значений, в знаменателе — средние баллы.

лицем ФС65, алюминием и обрабатывали в ковше твердошлаковыми смесями на основе извести и плавикового шпата. Последующую обработку металла производили на УПК и в вакууматоре. Перед передачей ковша с вакууматора на разливку проводили комплексное раскисление металла с использованием алюминия, титана и SiCa проволоки.

Для уменьшения загрязненности стали толстыми сульфидными включениями $A_{тл}$ до требуемого уровня (не более 1,5 балла) уменьшили массовую долю серы в конце рафинирования металла на УПК в 1,5 раза, в сравнении с выплавкой такой стали с допустимым уровнем сульфидов толстой серии не более 2,0 балла. Низкий уровень загрязненности стали толстыми оксидными включениями обеспечивали путем регламентации остаточной массовой доли алюминия, кальция и ввода дополнительного элемента титана [10].

Разливка стали. Сталь опытных плавков разливали сифонным способом по изложницам с развесом слитков 4,8 и 6,7 т. Причем слиток 4,8 т обеспечивал раскрой заготовки под ковку при минимальных отходах, но из-за ограничения парка изложниц под слиток 4,8 т применяли изложницы под слиток 6,7 т. При подготовке состава (куста) использовали высокоглиноземистый сифонный припас поставки ОАО «Запорожжогнеупор». С целью уменьшения обрезки прибыльную часть металла в изложнице утепляли слабоэкзотермическими смесями.

Прокатный передел слитков. В соответствии с разработанной технологической сквозной схемой производства черновых осей слитки горячим всадом передавали в прокатный цех на нагревательные колодцы стана 1050/950. Прокатывали слитки по спецификациям кузнечного цеха на круглые заготовки. Прокат раскраивали пилами горячей резки на кратные мерные осевые заготовки, которые охлаждали в неоттапливаемых колодцах около 96 ч. После обточки катаных заготовок отбраковка по поверхностным дефектам в среднем составила 3,13 % (для слитков массой 4,8 т — 4,85 %, для слитков 6,7 т — 1,71 %). Отбраковка катаных заготовок по внутренним дефектам (100%-й ультразвуковой контроль) за период с ноября 2005 по сентябрь 2007 г. составила в среднем 1,98 % (от массы задаваемых слитков на прокатку — 2,31 % для слитков 4,8 т и 1,83 % — для слитков 6,7 т).

Ковка профильных заготовок для осей. Ковку профильных заготовок производили на радиально-ковочной машине РКМ-1000 в автоматическом режиме для обеспечения размеров осей в соответствии нормативными данными (рисунок). Послековки черновые оси охлаждали на воздухе с последующей передачей в печь на термообработку (нормализацию). С нормализационного нагрева производили правку черновых осей на установке М 17280 с последующим охлаждением на воздухе.

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. 5.

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

В процессе освоения новой технологии конечного раскисления стали 35Г возникла задача получения удовлетворительной макроструктуры черновых осей. При ультразвуковом контроле в единичных осях обнаружены небольшие скопления неметалли-

Таблица 6. Оценка загрязненности стали EA1N (35Г) по шкалам ISO 4967 от катаных осевых заготовок (числитель — разбег значений, знаменатель — средние баллы) при различной технологии присадки титана

Варианты присадки титана	Количество плавков, шт.	Баллы неметаллических включений	
		$A_{тл}$ (сульфиды)	$B_{тл}$ (оксиды)
После вакуумирования (начало освоения)	18	$\frac{1,0 - 1,5}{1,3}$	$\frac{0,5 - 1,5}{1,2}$
До вакуумирования (действующая технология)	17	$\frac{1,0 - 1,5}{1,2}$	$\frac{1,0 - 1,5}{1,03}$



Таблица 7. Сравнительные данные о значениях критических точек стали EA1N (35Г) в зависимости от содержания углерода и марганца

Плавка	Массовая доля элементов, %		Температура нагрева, °С	Скорость нагрева, °С/мин	A_{c_1} A_{c_3}		Скорость охлаждения, °С/мин	A_{r_3} A_{r_1}	
	С	Мп			°С			°С	
А	0,31	0,66	900	5	760	845	5	800	695
					765	845		795	690
					830	910		50	740
Б	0,34	0,83	1000	5	770	820	5	770	695

ческих включений. При их изучении на электронном микроскопе установлено наличие в них наряду с оксидами алюминия и кальция также оксидов титана. При массовой доле титана не более 0,03 % оксиды титана ранее не обнаруживали.

Можно предположить, что они привнесены в сталь в виде экзогенных включений. Титан, применяемый для раскисления металла, загрязнен кислородом в большей мере, чем вакуумированная сталь. Поэтому оксиды титана могли быть внесены вместе с титаном, который присаживался в расплав после вакуумирования перед передачей ковша на разливку, и при отсутствии обработки металла аргоном не удалялись в шлаковую фазу.

Для проверки этой гипотезы при последующей выплавке стали титан вводили в жидкий металл до вакуумирования. В процессе ультразвукового контроля кованных черновых осей из стали плавов по этой новой технологии встречавшиеся ранее дефекты в виде скоплений неметаллических включений не обнаружены. Изменение очередности присадки титана способствовало также уменьшению общей загрязненности стали неметаллическими включениями (табл. 6).

При одинаковых средних допустимых баллах сульфидов $A_{тл}$ и оксидов $B_{тл}$ получено снижение средних значений средних баллов, определенных на практически одинаковой сопоставимой серии плавов, выполненных с различной присадкой титана.

Исследование критических точек стали EA1N (35Г). В черновых осях первой опытной партии из стали EA1N (35Г) после нормализации по действующему для осевой стали марки ОС режиму были понижены прочностные характеристики вследствие содержания в стали новой марки углерода и марганца на нижнем допустимом пределе (согласно требованиям потребителей составляет соответственно 0,27 и 0,60 %) и недостаточной для подобного химического состава температурой нормализации.

Температура нормализации должна быть выше точки A_{c_3} на 30... 50 °С. Критические точки плавов стали 35Г, полученные в результате исследований на dilatометре DL 1500, приведены в табл. 7. Из таблицы следует, что с повышением содержания углерода и марганца критические точки смещаются к более низким температурам. Соответственно изменяется и температура нормализации. Поэтому необ-

ходимо обосновать такие суженные пределы по химическому составу стали EA1N, которые гарантировали бы требуемые стабильные механические свойства при постоянной температуре нормализации.

Механические свойства кованных профильных заготовок для осей. Стандарт EN 13261 предусматривает отбор проб для проведения механических испытаний как в наибольшем сечении оси, т. е. в подступичной части, так и по согласованию с потребителем от консольной части шейки оси (технологического припуска). Кроме того, в EN 13261 при отборе проб от подступичной части оговариваются нормы временного сопротивления, текучести и относительного удлинения на трех расстояниях по сечению оси: строго на 1/2 радиуса, в подповерхностной зоне — больше или равно 0,95 значения, полученного на 1/2 радиуса, в центре — больше или равно 0,8 значения, полученного на 1/2 радиуса. Работа удара в центре на 0,8 меньше значений, полученных на 1/2 радиуса.

С целью обеспечения стабильности требуемых механических свойств на следующем этапе исследований решали задачу выплавки стали с суженными пределами по содержанию углерода и марганца и установления рациональной температуры нормализации кованных черновых осей.

Для определения механических свойств, согласно требованиям потребителей, образцы вырезали из технологического припуска шейки профильной заготовки на расстоянии половины радиуса плюс 10 мм от ее поверхности.

Для получения черновых осей из стали EA1N (35Г) на основании проведенных исследований обоснованы суженные пределы по содержанию углерода и марганца под верхний допустимый предел в марке стали (табл. 1). При дальнейшем производстве черновых осей с обеспечением рекомендуемых суженных пределов по химическому составу выполнены 27 плавов. При первичном контроле механических свойств 59 % плавов имели уровень временного сопротивления выше норм UIC 811-1 OR (табл. 8).

Для понижения прочностных характеристик после нормализации уже изготовленных осевых заготовок разработан режим отпуска (температура нагрева 680 °С), который гарантирует получение



Таблица 8. Сравнительные данные механических свойств опытных плавок стали EA1N (35Г) с содержанием углерода и марганца

Предел текучести $R_{0,2}$ %	Временное сопротивление R_m	Относительное удлинение A , %	Работа удара KU , Дж	
			L	Q
<i>Верхний допустимый предел</i>				
492...321 410	701...559 649	31,0...24,0 25,0	56...26 42	41...18 31
<i>Рекомендуемый</i>				
459...322 374	649...554 617	30,0...22,0 25,5	58,0...35,0 45,7	46,0...26,0 34,1

Таблица 9. Средние значения механических свойств кованных черновых осей опытных плавок стали EA1N (35Г) согласно требованиям EN13261

Предел текучести $R_{0,2}$ %, Н/мм	Временное сопротивление R_m Н/мм	Относительное удлинение A , %	Работа удара KU среднее значение для образцов при 20 °С, Дж	
			L	Q
<i>Шейка оси, подповерхностная зона</i>				
353	607	26,5	52	42
<i>1/2 радиуса</i>				
350	643	22,5	48	40
<i>Центральная зона</i>				
358	628	24	48	30
<i>Подступичная часть, подповерхностная зона</i>				
378	621	27	52	42
<i>1/2 радиуса</i>				
378	627	27	47	33
<i>Центральная зона</i>				
431	618	24	44	31

необходимого уровня механических свойств стали EA1N (35Г) [11].

По накопленным результатам механических испытаний черновых осей после нормализации при постоянной температуре 860 °С определены зависимости временного сопротивления от содержания углерода и марганца. В результате этого регламентирован оптимальный химический состав стали EA1N (35Г), гарантирующий получение требуемых прочностных характеристик. Результаты механических испытаний кованных черновых осей из стали EA1N (35Г) по 27 промышленным плавкам с рекомендуемым содержанием углерода и марганца приведены в табл. 8. Из них при первичном сдаточном контроле всего 7,4 % плавок имели механические свойства, не соответствующие требованиям стандартов.

Исследовано соответствие уровня механических свойств по сечению кованных черновых осей из стали EA1N (35Г), изготовленных по разработанной технологии, требованиям EN 13261. Опытные плавки прошли испытания на растяжение и ударный изгиб, согласно всем требованиям указанного стандарта.

Для сравнения уровня механических свойств по сечению кованных осей из стали EA1N (35Г) в состоянии поставки испытаны образцы из проб от шейки и подступичной части черновых осей опытных плавок (табл. 9).

Анализ данных табл. 9 показал, что механические свойства кованных черновых осей, полученных в подступичной части, соответствуют всем требованиям EN 13261 и на трех расстояниях находятся примерно на одном уровне. Это свидетельствует о том, что временной режим нормализации разработан оптимально для наибольшего сечения оси.

Размер действительного зерна в черновых осях из стали EA1N (35Г), согласно требованиям зарубежных стандартов, оценивается по ASTM E 112 в поперечном направлении на головках образцов, прошедших испытания на разрыв, и должен быть не менее 5-го номера. Микроструктура стали EA1N (35Г) после нормализации соответствует требованиям стандарта EN 13261 и представляет собой фер-

рито-перлитную структуру, размер действительно зерна составляет 7-9-й номера.

Итак, разработана новая технология производства кованных профильных заготовок для осей вагонов железнодорожных составов (кованных черновых осей), позволяющая получать сталь EA1N (35Г), соответствующую повышенным требованиям зарубежных стандартов EN 13261–2003 и UIC 811–1 OR.

Выводы

1. Выполнен технологический аудит действующей сквозной технологии производства кованных 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 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. Обеспечение чистоты металла осевых заготовок по неметаллическим включениям в соответствии с требованием стандартов UIC 811-1 OR и EN 13261 и прежде всего по сульфидным $A_{ТЛ}$ и оксидным $B_{ТЛ}$ включениям толстой серии (при оценке по 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 с обеспечением



оптимальных концентраций элементов-раскислителей в готовой металлопродукции.

4. Разработанная и промышленно освоенная новая технология включает регламентирование химического состава стали в пределах нормированного стандартами содержания элементов, внепечное рафинирование при обработке металла-полупродукта на УПК, раскисление алюминием и ферросиликокальцием в составе наполнителя порошковой проволоки, микролегирование титаном на вакууматоре и установление оптимального температурного режима нормализации кованных профильных заготовок для осей вагонов.

1. *Колесная сталь* / И. Г. Узлов, М. И. Гасик, А. Т. Есаулов и др. — Киев: Техника, 1985. — 168 с.
2. *Повышение качества подшипниковой стали ШХ15СГ-В по глобулярным неметаллическим включениям путем диверсификации применяемых ферросплавов, режимов раскисления и легирования металла* / М. И. Гасик, А. И. Панченко, Л. М. Скрипка и др. // *Сталь*. — 2009. — № 6. — С. 25–28.
3. *Разработка и освоение технологии раскисления и легирования подшипниковой стали ШХ15СГ-В ферросиликомарганцем MnC25* / А. И. Панченко, И. Н. Логозинский,

- А. С. Сальников и др. // *Современ. электрометаллургия*. — 2008. — № 3. — С. 47–57.
4. *Шеленин Л. А.* Вдали от равновесия. — М.: Знание, 1987. — 64 с.
5. *Михайлов Г. Г., Тюрин А. Г.* Раскислительная способность кальция и алюминия в жидкой стали // *Изв. АН СССР. Металлы*. — 1978. — № 5. — С. 16–21.
6. *Gwancin I., Kslazek E., Siliga Y.* Products of liquid Fe–O alloy deoxidation in titanium // *Zesz nauk., AGN*. — 1978. — № 715. — P. 307–333.
7. *Григорян В. А., Беляничков Л. Н., Стомахин А. Я.* Теоретические основы электросталеплавильных процессов. — М.: Металлургия, 1979. — 256 с.
8. *Порада А. Н., Гасик М. И.* Электрометаллургия неорганических материалов. — М.: Металлургия, 1990. — 232 с.
9. *Линчевский Б. В.* Теория металлургических процессов. — М.: Металлургия, 1995. — 346 с.
10. *Качество конструкционной электростали* / А. С. Сальников, С. С. Казаков, А. Н. Улитенко и др. — Запорожье: Палитра, 2004. — 134 с.
11. *Сальников А. С., Пересащенко О. В., Лоза В. В.* Ось вопроса — вопрос оси. О качестве кованных профильных заготовок для вагонных осей из стали 35Г, поставляемых по зарубежным стандартам // *Металлургический компас*. — 2007. — № 9. — С. 22–26.

Нац. металлург. акад. Украины, Днепропетровск
ОАО «Днепроспецсталь», Днепропетровск
Поступила 26.05.2009



ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН Украины

объявляет ежегодный набор по следующим специальностям:

ДОКТОРАНТУРА

- ☞ сварка и родственные процессы и технологии
- ☞ автоматизация процессов управления
- ☞ металловедение и термическая обработка металлов
- ☞ металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов
- ☞ диагностика материалов и конструкций

АСПИРАНТУРА

- ☞ сварка и родственные процессы и технологии
- ☞ автоматизация процессов
- ☞ металловедение и термическая обработка металлов
- ☞ металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов
- ☞ диагностика материалов и конструкций

Прием в аспирантуру проводится в сентябре месяце.
Контактный телефон: (044) 289-84-11.

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): www.paton.kiev.ua
Документы направлять по адресу: 03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11,
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю