

«... процессы затвердевания, получившие производственное воплощение, многое выиграли бы в темпах при должном использовании результатов научно-исследовательских работ. При этом отнюдь не исключается и то, что эмпиризм на фундаменте ясно понимаемых научных основ и накопленного опыта часто оказывается лучшим путем, подсказываемым всем богатым наследием прошлого.»

*Брюс Чалмерс**

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ И РАЗЛИВКИ СТАЛИ EA1N ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ОСЕЙ

**А.И. Панченко¹, С.Г. Кийко¹, М.И. Гасик², А.С. Сальников¹, Г.В. Левченко³,
А.П. Горобец², Ю.С. Пройдак², Ю.В. Климчик⁴**

¹ЧАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь».
69008, г. Запорожье, шоссе Южное, 81. E-mail: info@dss.com

²Национальная металлургическая академия Украины.
49005, г. Днепр, пр. Гагарина, 4. E-mail: tehnospilavy@ua.fm

³Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.
49050, г. Днепр, площадь Академика Стародубова, 1. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

⁴ООО «МЗ Днепросталь».
49081, г. Днепр, ул. Столетова, 21. E-mail: office@interpipe.dp.ua

Обобщены проблемные вопросы совершенствования технологии производства и качества осевой стали EA1N в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 31334–2007, гармонизированного с положениями европейских стандартов EN 13260 и EN 13261 для производства осей тяговых и прицепных вагонов. Изложены особенности сквозных технологических схем производства на украинских предприятиях черновых осей в нормализованном состоянии, способов выплавки стали, параметров обработки металла на УКП с вакуумированием и без вакуумирования, разливы металла в изложницы и на МНЛЗ. Проанализированы маршрутные схемы изготовления железнодорожных осей из электростали (слитки, круглые заготовки МНЛЗ), блюмов кислородно-конвертерной стали. Охарактеризованы несплошности структуры исходных заготовок, результаты УЗК центральной пористости исходных заготовок и способы ее устранения в процессе деформационных переделов при ковке и прокатке осевых заготовок, отмечены программные направления повышения качества железнодорожных осей до уровня, обеспечивающего их эксплуатацию при нагрузке 27...30 т. Библиогр. 14, табл. 6, рис. 1.

Ключевые слова: железнодорожные оси; электросталь; стандарт; технология выплавки; внепечная обработка; разливы; слитки; непрерывно-литая заготовка; блюмы; деформационный передел; термообработка

Производство железнодорожных осей на ЧАО «Днепрспецсталь». На ЧАО «Днепрспецсталь» организовано крупносерийное производство кованых профильных заготовок для осей прицепного состава и локомотивных осей из электростали [1, 2]. В соответствии с требованиями ГОСТ 31334–2007 и европейского стандарта EN 13261:2009** сталь марки EA1N имеет следующий химический состав, мас. % (не более): С — 0,40; Mn — 1,20; Si — 0,50; S — 0,02; P — 0,020; Ni — 0,30; Cr — 0,30; Mo — 0,08; V — 0,06.

Маршрутная технологическая схема выплавки стали EA1N на заводе «Днепрспецсталь» вклю-

чала следующие стадии: выплавку стали EA1N (аналог стали 35Г) в дуговой электросталеплавильной печи ДСП-60, внепечную обработку на установке ковш-печь (УКП), вакуумирование металла в камерном вакууматоре, разливы электростали в изложницы массой слитков 4,8 и 6,5 т, нагрев слитков с горячего посада и деформационный передел в два этапа. На первом этапе слитки подвергали прокатке на обжимном заготовительном стане 1050/950, а на втором — ковке с получением заготовки диаметром 240...300 мм в зависимости от размеров профильных товарных осей.

*Брюс Чалмерс. *Теория затвердевания*. Пер. с англ. Москва, Металлургия, 1968.

**Межгосударственный стандарт ГОСТ 31334–2007. «Оси для подвижного состава железнодорожной колеи 1520 мм. Технические условия», EN 13261:2009 «Рельсовый транспорт. Колесные пары и тележки. Оси. Требования к изделию».

Таблица 1. Механические свойства кованных черновых осей опытных плавок стали EA1N согласно требованиям EN 13261 [2]

Место отбора проб	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), МПа	Временное сопротивление (σ_b), МПа	Относительное удлинение (δ), %	Работа удара KU^* , Дж	
				L	Q
Шейка оси:					
подповерхностная зона	353	607	26,5	52	42
1/2 радиуса	350	643	22,5	48	40
центральная зона	358	628	24,0	—»—	30
Подступичная часть:					
подповерхностная зона	378	621	27,0	52	42
1/2 радиуса	—»—	627	—»—	47	33
центральная зона	431	618	24,0	44	31

* L и Q — соответственно продольное и поперечное направления вырезки образцов для контроля работы удара; приведены средние значения для образцов при 20 °С.

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

Затем было исследовано соответствие уровня механических свойств по сечению кованных черновых осей из стали EA1N, изготовленных по разработанной технологии [1, 2], требованиям европейского стандарта EN 13261. Металл опытных плавок прошел испытания на растяжение и ударный изгиб согласно всем требованиям указанного стандарта.

Для сравнения уровня механических свойств по сечению кованных осей из стали EA1N в состоянии поставки испытаны образцы из проб от шейки и подступичной части черновых осей опытных плавок (табл. 1).

Анализ данных табл. 1 показывает, что механические свойства кованных черновых осей в подступичной части соответствуют всем требованиям стандарта EN 13261. Это свидетельствует о том, что временной режим нормализации разработан оптимально для наибольшего сечения оси.

Размер действительного зерна в черновых осях из стали EA1N согласно требованиям зарубежных стандартов оценивали по ASTM E 112 в попереч-

ном направлении на головках образцов, прошедших испытания на разрыв, и он должен быть не менее 5-го номера. Микроструктура стали EA1N после нормализации соответствовала требованиям стандарта EN 13261 и представляла феррито-перлитную структуру. Размер действительного зерна соответствовал 7...9 номерам.

Разработана и испытана новая технология производства кованных профильных заготовок для осей вагонов железнодорожных составов (кованных черновых осей), позволяющая получать из слитка стали EA1N профильные заготовки [3], соответствующие повышенным требованиям зарубежных стандартов EN 13261 и UIC 811-1OR (табл. 2).

Действующая на ЧАО «Днепроспецсталь» сквозная технологическая схема производства профилированных осевых заготовок из слитков характеризуется повышенным удельным расходом металла. С целью установления возможности снижения расхода металла проведены опытно-промышленные исследования по изготовлению железнодорожных осей из непрерывно-литой заготовки (НЛЗ) вакуумированной электростали марки 45 сечением 450×450 мм, разлитой на МНЛЗ на ПАО «СМНПО им. М. Фрунзе» [2].

Прокатанные заготовки на обжимном заготовительном стане 1050/950 были раскатаны на заготовки длиной 2800 мм и массой 4,33 т. Прокатку заготовок вели по разработанной схеме, которая

Таблица 2. Механические свойства железнодорожных осей из стали EA1N после нормализации согласно требованиям зарубежных стандартов

Стандарт	Временное сопротивление (σ_b), МПа	Предел текучести (σ_t), МПа	Относительное удлинение (δ), %	Работа удара KU^* , Дж	
				L	Q
Не менее					
UIC 811-1 OR	550...650	320	22	25	10
EN 13261	520...650	300	—»—	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 — соответственно продольное и поперечное направления вырезки образцов для контроля работы удара; приведены средние значения для трех образцов при 20 °С.

должна обеспечивать в каждом проходе «проработку» поперечного сечения раската на всю высоту.

В результате прокатки пяти непрерывно-литых заготовок получены 15 двукратных заготовок диаметром 240 мм и длиной 3,43 м. При проведении УЗК трех двукратных штанг эхосигнал превышал допустимый уровень и расположен был в центре сечения проката (заготовки). Металлографическими исследованиями установлено, что дефект, выявленный при УЗК, идентифицируется как осевая пористость исходной заготовки, не заварившаяся в процессе деформации [2].

Для улучшения «проработки» осевой части раската и заваривания внутренних несплошностей разработан ступенчатый режим нагрева заготовок перед прокаткой, обеспечивающий более высокую температуру в центральных слоях нагреваемой заготовки [2].

Выявленная УЗК осевая ликвация в непрерывно-литых заготовках соответствовала 3-му баллу по ГОСТ 10234–75, что указывает на необходимость ее уменьшения в металле для производства осевых заготовок железнодорожных осей.

Производство железнодорожных осей на ПАО «ДМКД». На ПАО «ДМКД» железнодорожные оси производятся из стали EA1N, которая выплавляется в кислородном конвертере (250 т) и разливается на МНЛЗ с получением заготовок (блюмов) сечением 335×400 мм. Металл подвергается внепечной обработке на УКП, но не вакуумируется из-за отсутствия в технологической схеме производства стали вакууматора. Непрерывно-литые заготовки подвергаются прокатке и получают осевые заготовки диаметром 218 мм. Механические свойства металла опытных осей соответствуют требованиям зарубежного стандарта M101 и ГОСТ 31334 [3, 4].

Противофлоккенную обработку осей после деформации производят в колодцах замедленного охлаждения. В этой связи представляет интерес рассмотрение результатов ретроспективных фундаментальных исследований кинетики и механизма противофлоккенной обработки железа [5]. Противофлоккенная обработка осей взаимосвязана с изучением процессов диффузии водорода в α -железе. В монографии [5] диффузия водорода проанализирована в аспекте использования двух экспериментальных методов, а именно, проницаемости и измерения скорости удаления водорода из сплошных железных цилиндров. Последний метод наиболее полно соответствует процессу

противофлоккенной обработки железнодорожных осей, который проводится при 500...600 °С.

Известны работы по изучению влияния температуры на коэффициент диффузии водорода. Приведенные в монографии [5] значения коэффициента диффузии водорода ($D(H, \alpha\text{-Fe})$) вычислены по уравнению, полученному Геллером и Суном:

$$D(H, \alpha\text{-Fe}) = 0,22 \exp(-12100/RT) \text{ мм}^2\text{с}^{-1}.$$

В табл. 3 приведены коэффициенты диффузии водорода и для сравнения углерода и азота в железе. Из таблицы следует, что коэффициент $D(H)$ при повышении температуры от 20 до 300 °С изменяется на порядок, а при дальнейшем увеличении температуры повышается, но в пределах одного порядка.

Известно, что водород — особый элемент среди неметаллов (H, C, N, O), образующий растворы внедрения. Коэффициент диффузии водорода в железе при 20 °С в 10^{12} раз больше коэффициентов диффузии углерода или азота. Дж.Д. Фаст [5] объясняет это тем, что атом водорода «... движется от одного междоузлия к другому в виде протона, диаметр которого в 10^5 раз меньше диаметра атома или иона углерода или азота». Рассматривая далее механизм диффузии водорода, автор работы [5] не исключает возможность того, что водород в междоузлиях присутствует как атом (атомный радиус 0,046 нм), а движется как протон и, что внутри металла существует простое равновесие $H \rightleftharpoons p + e$, где p и e — протон и электрон соответственно. Электролитический перенос водорода происходит в направлении отрицательного электрода при пропускании тока.

Е.В. Джонсоном и М.Л. Хиллом [6] предложены два уравнения для вычисления коэффициентов диффузии. Первое уравнение для температуры ниже 200 °С

$$D(H, \alpha\text{-Fe}) = 12 \exp(-32700/RT) \text{ мм}^2/\text{с}^{-1},$$

а второе — для температуры выше 200 °С

$$D(H, \alpha\text{-Fe}) = 0,14 \exp(-13400/RT) \text{ мм}^2/\text{с}^{-1}.$$

Таблица 3. Влияние температуры на значения коэффициентов диффузии водорода $D(H)$, углерода $D(C)$ и азота $D(N)$ в α -железе

Температура, °С	Коэффициенты диффузии, мм ² /с ⁻¹		
	$D(H)$	$D(C)$	$D(N)$
20	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-15}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$
100	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-12}$	$8,3 \cdot 10^{-12}$
200	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$
300	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$5,3 \cdot 10^{-8}$
400	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$
500	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$
700	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$
900	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$

Обсуждая приведенные два уравнения, Дж.Д. Фаст [5] предположил, что «...при $t < 200$ °С скорость удаления водорода определяется не скоростью диффузии, а скоростью каких-то других процессов». Тогда уравнение расчета коэффициента диффузии при температуре ниже 200 °С является кажущимся.

Дж.Д. Фаст приводит два объяснения аномально быстрого уменьшения скорости удаления водорода выше 200 °С. Объяснение выявленной зависимости аномально существенного уменьшения скорости удаления водорода ниже 200 °С состоит в том, что при $t < 200$ °С не только скорость проникновения, но и скорость дегазации определяется скоростью поверхностной реакции.

Вторая часть диффундирующего водорода задерживается в несовершенствах и оба объяснения дополняют друг друга.

Излагая роль поверхностных реакций в процессах удаления и проникновения водорода, автор [5] отмечает, что удаление растворенного в железе водорода в вакуум состоит из 4-х последовательных стадий: диффузии атомов водорода или протонов в объеме металла; перехода этих частиц из растворенного в адсорбированное состояние на поверхности; удаления адсорбированных молекул водорода на поверхность; удаления адсорбированных молекул.

Интересно отметить, что в работах, выполненных Р.М. Хадсоном [7], научно обосновано и экспериментально установлено, что водород быстрее удаляется из стали, помещенной в воду, чем в атмосферу сухого азота.

Влияние режимов деформации слитков, непрерывно-литых блюмов, круглых заготовок на микроструктуру железнодорожных осей. Исследование влияния режимов более интенсивного обжата слитков на блюминге показало, что оно повышает микроплотность дендритной структуры металла оси, обеспечивает образцам осевой стали однородность и мелкозернистость [8]. В работах [3, 4], посвященных изучению причин отбраковки черновых осей из непрерывно-литых блюмов, отмечено, что причиной несплошности структуры оси являются дефекты центральной зоны, ликвационные процессы и пористость, наследуемые от непрерывно-литых заготовок.

Исследование остаточных напряжений в полюбработанных железнодорожных осях. Традиционная технология термической обработки железнодорожных осей производится в режиме «одностадийная нормализация» и последующий «высокий отпуск», а модернизированный авторами работы [9] режим термообработки также включает одностадийную нормализацию, но с управ-

лением замедленного охлаждения (самоотпуска) осей в специальных колодцах (температура обработки осей 300...500 °С).

В промышленных опытах ПАО «ДМКД» и ДНУЗТ им. Академика В. Лазаряна было изучено влияние инновационного режима термообработки железнодорожных осей, прошедших правку при температуре ее завершения не ниже 600 °С.

Разработанный опытный режим термообработки осей после нормализации отличался от традиционного тем, что оси охлаждали по управляемому температурно-временному режиму (самоотпуску) в специальных колодцах. Опытные и традиционно термически обработанные полуоси с наклеенными транзисторами, расположенными в зоне шейки оси и на подступичной части, подвергали определению математически ожидаемых остаточных напряжений и стандартного различия величины остаточных напряжений. Сравнительная оценка результатов определения значений позволила авторам [8] отдать предпочтение технологии нормализации с регулируемым охлаждением осей.

Производство электростали EA1N, непрерывно-литых заготовок круглого сечения и железнодорожных осей на МЗ «Днепросталь» и НТЗ «Интерпайпсталь». Железнодорожные оси, как и цельнокатаные колеса [10] на НТЗ «Интерпайпсталь» производят из исходных непрерывно-литых заготовок диаметром 470 мм [3, 4]. Осевые заготовки получают на МЗ «Днепросталь» по маршрутной технологии: выплавка металла полупродукта в ДСП-190 с эркерным выпуском его в сталеразливочный ковш (160 т); раскисление и науглероживание; легирование металла в ковше с периклазоуглеродистой футеровкой; формирование шлака из ТШМ (известь, плавиковый шпат) с последующим рафинированием стали на УКП; вакуумирование и разливка металла на 4-ручьева МНЛЗ. Деформационный передел заготовок диаметром 470 мм прокаткой производят в трубопрокатном цехе НТЗ «Интерпайпсталь» с получением черновых осей, подвергаемых термической (нормализации) и механической обработке.

В процессе работы проведены сравнительные исследования качества осевых заготовок и черновых железнодорожных осей, изготовленных из НЛЗ диаметром 470 мм производства МЗ «Днепросталь» и сечением 335×400 мм производства ПАО «ДМКД». Образцы подбирали близкие по химическому составу (табл. 4). Следует отметить, что осевая сталь производства МЗ «Днепросталь» прошла обработку в жидком состоянии в вакууматоре, а при разливке проводили электромагнитное перемешивание стали.

Необходимо отметить, что в целом технологии производства железнодорожных осей были идентичны. Осевой металл МЗ «Днепросталь» после

Таблица 4. Химический состав исследуемых заготовок осевого металла марки EA1N, мас. %

Исходная заготовка	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al
НЛЗ диаметром 470 мм, МЗ «Днепросталь»*	0,49	0,84	0,20	0,003	0,0013	0,11	0,13	0,15	0,021
НЛЗ сечением 335×400 мм, ПАО «ДМКД»	0,47	0,67	0,25	0,005	0,0110	0,03	0,01	0,02	0,023

[H] = 1,5...1,8 ppm.

деформации также проходил обязательную противодиффузионную обработку, несмотря на обработку стали в вакууматоре и относительно низкое содержание водорода. Данная обработка прежде всего необходима не столько для удаления водорода из заготовок, сколько для снятия внутренних напряжений, которые могли бы способствовать возникновению внутренних дефектов и снижению прозвучиваемости при ультразвуковом контроле готовых осей.

При проведении исследования анализировали изменение макроструктуры осевого металла, особенности его формирования и изменение параметров дендритной и зеренной структуры в осевых заготовках и черновых нормализованных железнодорожных осях.

Несмотря на то, что макроструктура как осевых заготовок, так и готовых осей всех плавок удовлетворительная и соответствует нормативно-технологической документации, вместе с тем для каждой заготовки она имеет ряд особенностей [3, 4].

Результаты определения механических свойств металла черновых осей из круглой заготовки диаметром 470 мм МЗ «Днепросталь» и блюмов 335×400 мм ПАО «ДМКД» приведены в табл. 5. Анализ механических свойств железнодорожных осей показал, что металл черновых осей, представленных для исследования, соответствует требованиям как зарубежного стандарта (M101), так и отечественного (ГОСТ 31334). Наибольшими прочностными свойствами обладают оси, изготовленные из круглой НЛЗ, что объясняется образованием в этих осях мелкозернистой структуры. Однако пластические свойства, хотя и соответствуют требованиям стандартов, являются относительно низкими (табл. 5).

Таблица 5. Механические свойства черновых осей производства МЗ «Днепросталь» и ПАО «ДМКД» [3]

Исходная заготовка	Место отбора проб	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
НЛЗ диаметром 470 мм, МЗ «Днепросталь»	Шейка	442	737	27,0	48	–
	Подступица	425	745	26,0	48	55
	–»–	420	730	20,5	47	54
НЛЗ сечением 335×400 мм, ПАО «ДМКД»	–»–	375	670	24,5	52	66
	–»–	410	675	29,0	55	70
M101*	Шейка	345	608	22,0	37	–
	–»–	330	630 и более	19,0	–	Среднее — 44, минимальное — 34
ГОСТ31334*	Подступица	325	650 и более	18,0	–	Среднее — 34, минимальное — 29

*Требования нормативной документации (значения не менее).

При изготовлении металлопроката ответственного назначения, в частности железнодорожных осей, уделяется много внимания вопросу обеспечения сплошности внутреннего строения. Для этого нормируется степень проработки осевого металла, в нормативно-технической документации используется такой показатель, как степень укова. Дополнительно в данной работе для оценки проработки структуры проведен анализ изменения параметров дендритной ликвации на всех этапах производства железнодорожных осей.

Учитывая, что непрерывно-литой металл производства МЗ «Днепросталь» подвергался интенсивному электромагнитному перемешиванию, вполне логичным является тот факт, что первичная дендритная структура металла круглой заготовки отличается более высокой плотностью, зона столбчатой ликвации подроблена и менее протяженная в сравнении с НЛЗ производства ПАО «ДМКД». Особенно заметно отличие дендритной структуры в поверхностных слоях НЛЗ. Плотность элементов структуры металла производства ПАО «ДМКД» составила менее 100 мм², в то время как в заготовках, изготовленных на МЗ «Днепросталь», это значение составило 135,3 мм².

Значения степеней укова исследуемого осевого металла, независимо от производителя исходной НЛЗ, близки и удовлетворяют требованиям нормативной документации (табл. 6).

Однако при анализе распределения первичной дендритной структуры на срединных слоях сечения обнаружена более низкая плотность элементов дендритной структуры как готовых осей, так и осевых заготовок, прокатанных из круглой НЛЗ,

Таблица 6. Степень укова проката заготовок на различных этапах производства железнодорожных осей [3, 4]

Исходная заготовка	Этапы производства	Место отбора проб	Степень укова
НЛЗ диаметром 470 мм, МЗ «Днепрсталь»	Трубно-заготовочный стан	Осевая заготовка диаметром 250 мм	3,53
	Осепрокатный стан 250	Шейка оси диаметром 180 мм	6,82
НЛЗ сечением 335×400 мм, ПАО «ДМКД»	Трубно-заготовочный стан	Осевая заготовка диаметром 218 мм	3,59
	Осепрокатный стан 250	Подступица оси диаметром 180 мм	5,27

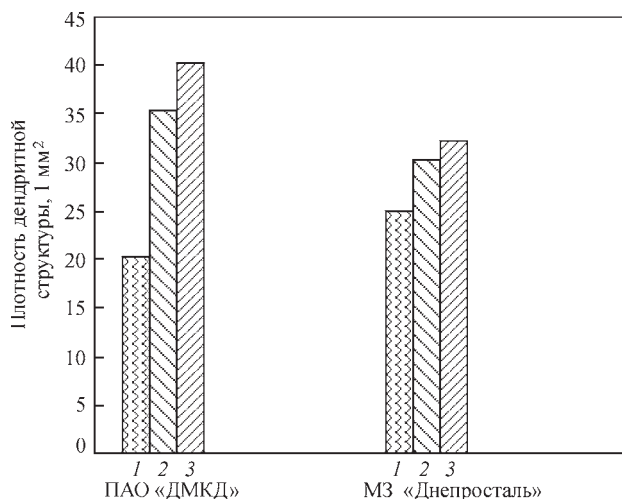


Рис. 1. Плотность элементов дендритной структуры в зависимости от производства заготовок: 1 — исходная НЛЗ; 2 — осевая; 3 — с нормализованной осью

в сравнении с осями и заготовками, полученными из непрерывно-литого бляма (рис. 1).

Таким образом, неравномерность распределения ферритно-перлитной составляющей, существенная разнородность структуры и низкая плотность элементов дендритного строения свидетельствуют о недостаточной проработке внутренних зон заготовки.

Программные направления повышения качества железнодорожных осей, обеспечивающие их эксплуатацию при осевой нагрузке 30 т. Свыше 50 лет железнодорожные вагоны в СНГ эксплуатировались на тележках модели 18-100, изначально спроектированной для осевой нагрузки 21,5 т. За истекшее время осевая нагрузка увеличена до 23,5 т без внесения каких-либо серьезных изменений в конструкцию тележки [11]. Последовательно разрабатываются и реализуются программы по созданию тележек и вагонов с осевой нагрузкой 25 т для скоростей движения 120 км/ч и осевой нагрузкой 30 т для скоростей движения 90 км/ч только на отдельных направлениях железных дорог.

В настоящее время на ЧАО «Днепрспецсталь» разработаны оптимальные технологические маршруты и, в соответствии с запросами потребителей, осваивается производство новых типоразмеров черновых осей для подвижного состава железных дорог. Приемка опытной партии осей осуществлена межведомственной комиссией

«Укрзалізниці», которая по положительным результатам приемки дала разрешение на серийное производство черновых осей новых типоразмеров.

Разрабатываются требования к вагонам подвижных составов железных дорог и пути стальных магистралей при повышении осевых нагрузок до 27 т и выше [12]. Для допустимых осевых нагрузок 27 т возможно использовать тележки со статическим прогибом осей 50...60 мм. Увеличение осевой нагрузки до 29 т потребует создания новых автосцепов и тележек со статическим прогибом не менее 90 мм [12]. В целом, движение колесной пары грузового вагона описывается 19-тью степенями свободы, а сам грузовой вагон, если не упрощать механическую систему — 98-мью [12, 13].

Определение циклической вязкости разрушения оси колесной пары. Количественным показателем сопротивления развитию трещины является циклическая вязкость разрушения K_{fc} (критический коэффициент интенсивности напряжений) [14]. Коэффициент напряжений K_1 характеризует поле напряжений у вершины трещины. Он увеличивается по мере роста трещины и, когда его значение достигает критического K_{fc} , происходит разрушение. Значение показателя K_{fc} для случая поверхностной трещины определяется по формуле

$$K_{fc} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi b_{кр}} F_1 \left(\frac{b_{кр}}{D} \right),$$

где σ_{\max} — максимальное напряжение цикла; $b_{кр}$ — глубина усталостной трещины, из-за которой произошло разрушение; $F_1(b_{кр}/D)$ — поправочный коэффициент.

Испытания проводили на специальном стенде ZDM-200. Образцы осей испытывали на изгиб при нагрузке по схеме балки на двух опорах с приложением нагрузки к подступичной части оси. Рассчитанные по экспериментальным данным значения коэффициента K_{fc} соответствовали требованиям нормативной документации и составили 200...206 МПа·м^{1/2} [14].

Выводы

1. Обобщенные и проанализированные результаты научно-исследовательских работ, опытно-промышленных разработок и масштабного промышленного

ленного производства железнодорожных осей из стали EAIN свидетельствуют о полном соответствии их качества требованиям европейского стандарта EN 132618 2009. Рассмотрены программные направления и задачи повышения качества железнодорожных осей с осевой нагрузкой 27...30 т для отдельных направлений транспортировки руды, угля и др. материалов.

2. Необходимо продолжить научно-исследовательские работы и опытно-промышленные эксперименты по повышению качества исходных непрерывно-литых заготовок, режимов деформации и термической обработки железнодорожных осей.

Список литературы

1. Гасик М.И., Сальников А.С., Пересащенко О.В., Ложа В.В. (2009) Разработка и промышленное освоение сквозной технологии производства кованых черновых осей из электростали EAIN (35Г). *Современная электрометаллургия*, **4**, 40–48.
2. 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.
3. Левченко Г.В., Балахонова Т.В., Нефедьева Е.Е. и др. (2016) Обеспечение качества железнодорожных осей, изготовленных из непрерывнолитых заготовок различного сечения. *Там же*, **1**, 29–33.
4. Левченко Г.В., Ершов С.В., Демина Е.Г. и др. (2018) Трансформация дендритной структуры на всех этапах производства железнодорожных осей. *Там же*, **2**, 74–76.
5. Фаст Дж.Д. (1975) Взаимодействие металлов с газами. Т. 2. *Кинетика и механизм реакций*. Москва, Metallurgiya.
6. Johnson E. W., Hill M.L. (1960) The diffusivity of hydrogen in alpha iron. *Transactions of the metallurgical society of AIME*, **218**(12), 1104–1112.
7. Hudson R.M., Riedy K.J., Stragand G.L. (1962) Influence of specimen geometry and surface roughness on hydrogen behavior in steel. *Corrosion*, **18**(2), 79–84.
8. Бондарев О.М., Горобец В.Л., Мямлин С.В. та ін. (2010) Порівняльні випробування з визначенням залікових напружень в напівоброблених осях. *Вісник ДНУЗТ ім. Академіка В. Лазаряна*, **34**, 16–21.
9. Демина Е.Г., Грицай Т.В., Нефедьева Е.Е., Мединский Г.А. (2010) Влияние режимов деформации слитка на однородность микроструктуры железнодорожных осей. *Тез. докл. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». 15–16 апреля 2010 г., Днепропетровск, ДНУЗТ*, сс. 281–282.
10. Есаулов Г.А., Гасик М.И., Прождак Ю.С., Горобец А.П. (2015) Промышленное освоение инновационной сквозной технологии производства цельнокатаных железнодорожных колес из непрерывнолитой заготовки. *Совершенствование производства стали, труб и железнодорожных колес*. Величко А.Г. и др. (ред.). Днепропетровск, ЧМП «Экономика», сс. 25–28.
11. Бороненко Ю.П., Орлова А.М. (2007) Разработка тележек грузовых вагонов с осевой нагрузкой 30 тс. *Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты*. Сб. науч. ст. ПГУПС, 5–12.
12. Бороненко Ю.П., Ромен Ю.С., Певзнер В.О. (2013) Основные требования к вагонам и пути повышения осевых нагрузок до 27 тс и выше. *Сб. тез. докл. Международ. науч.-техн. конф. «Подвижной состав XXI века»*, г. Санкт-Петербург, сс. 8–9.
13. Манашкин Л.А., Мямлин С.В., Приходько В.И., Жижко В.В. (2011) К вопросу о представлении движения колесной пары в задачах движения вагонов. *Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты*. Сб. науч. ст. ПГУПС, 45–52.
14. Рейдемейстер А.Г., Костенко Ю.А. (2015) Определение циклической вязкости разрушения оси колесной пары. *Тез. докл. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта», 14–15 мая 2015 г., Днепропетровск, ДНУЗТ*, сс. 49–50.

References

1. 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 EAIN (35G). *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 40–48 [in Russian].
2. Tumko, A.N., Logozinsky, I.N., Peresadenko, O.V. et al. (2010) Study of technological schemes of production of profile axle billets for railway rolling stock. *Metallurg. i Gornorudnaya Promyshlennost*, **4**, 40–43 [in Russian].
3. Levchenko, G.V., Balakhonova, T.V., Nefedieva, E.E. et al. (2016) Assurance of quality of railway axles made from continuous casting billets of different sections. *Ibid.*, **1**, 29–33 [in Russian].
4. Levchenko, G.V., Ershov, S.V., Demina, E.G. et al. (2018) Transformation of dendritic structure in all stages of production of railway axles. *Ibid.*, **2**, 74–76 [in Russian].
5. Fast, J.D. (1975) *Interaction of metals with gases*. Vol. 2: Kinetics and mechanism of reactions. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Johnson, E.W., Hill, M.L. (1960) The diffusivity of hydrogen in alpha iron. *Transact. Metallurg. Society of AIME*, **218**(12), 1104–1112.
7. Hudson, R.M., Riedy, K.J., Stragand, G.L. (1962) Influence of specimen geometry and surface roughness on hydrogen behavior in steel. *Corrosion*, **18**(2), 79–84.
8. Bondarev, O.M., Gorobets, V.L., Myamlin, S.V. et al. (2010) Comparative tests for determination of residual stresses in semifinished axles. *Visnyk DNUZT*, **34**, 16–21 [in Russian].
9. Demina, E.G., Gritsaj, T.V., Nefedieva, E.E., Medinsky, G.A. (2010) Influence of modes of ingot deformation on homogeneity of microstructure of railway axles. In: *Abstr. of Pap. of Sci.-Pract. Conf. on Problems and Perspectives of Development of Railway Transport (Ukraine, Dnepropetrovsk, 15–16 April, 2010)*. DNUZT, 281–282 [in Russian].
10. Esaulov, G.A., Gasik, M.I., Projdak, Yu.S., Gorobets, A.P. (2015) Industrial mastering of innovative end-to-end technology of production of railway all-rolled wheels from continuous casting billet. In: *Improvement of production of steel, pipes and railway wheels*. Ed. by A.G. Velichko et al. Dnepropetrovsk, ChMP Ekonomika, 25–28 [in Russian].
11. Boronenko, Yu.P., Orlova, A.M. (2007) Development of freight-car trucks with axial load of 30 ton-force. In: *Roll stock of 21st century: Ideas, requirements, projects*. *Transact. of St.-Petersburg State University of Railways*, 5–12 [in Russian].
12. Boronenko, Yu.P., Romen, Yu.S., Pevzner, V.O. (2013) Main requirements to cars and means of improvement of axial loads up to 27 thou and more. In: *Abstr. of Pap. of Int. Sci.-Techn. Conf. on Roll Stock of 21st century*. St.-Petersburg, 8–9 [in Russian].
13. Manashkin, L.A., Myamlin, S.V., Prikhodko, V.I., Zhizko, V.V. (2011) To problem of presentation of movement of wheel pair

in problems of cars movement. In: *Roll stock of 21st century: Ideas, requirements, projects. Transact. of St.-Petersburg State University of Railways*, 45–52 [in Russian].

14. Rejdemejster, A.G., Kostenko, Yu.A. (2015) Determination of cyclic fracture toughness of axle of wheel pair. In: *Abstr.*

of Papers of Sci.-Pract. Conf. on Problems and Perspectives of Development of Railway Transport (Ukraine, Dnepropetrovsk, 14–15 May 2015, Dnepropetrovsk, DNUZT), 49–50 [in Russian].

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ І РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ EA1N ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ

О.І. Панченко¹, С.Г. Кийко¹, М.І. Гасік², А.С. Сальніков¹, Г.В. Левченко³,
А.П. Горобець², Ю.С. Проїдак², Ю.В. Клімчук⁴

¹ ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь».

69008, м. Запоріжжя, шосе Південне, 81. E-mail: info@dss.com

² Національна металургійна академія України.

49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4. E-mail: tehnosplavy@ua.fm

³ Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

49050, м. Дніпро, площа Академіка Стародубова, 1. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

⁴ ТОВ «МЗ «Дніпросталь».

49081, м. Дніпро, вул. Столетова, 21. E-mail: office@interpipe.dp.ua

Узагальнено проблемні питання вдосконалення технології виробництва і якості осьової сталі EA1N відповідно до вимог міждержавного стандарту ГОСТ 31334–2007, гармонізованого з положеннями європейських стандартів EN 13260 і EN 13261 для виробництва осей тягових і причіпних вагонів. Викладено особливості наскрізних технологічних схем виробництва на українських підприємствах чорнових осей в нормалізованому стані, способів виплавки сталі, параметрів обробки металу на УКП з вакуумуванням і без вакуумування, розливання металу у виливниці і на МБЛЗ. Проаналізовано маршрутні схеми виготовлення залізничних осей з електросталі (зливки, круглі заготовки МБЛЗ), блюмів киснево-конвертерної сталі. Охарактеризовані несутільності структури вихідних заготовок, результати УЗК центральної пористості вихідних заготовок і способи її усунення в процесі деформаційних переділів при куванні і прокатці осьових заготовок, відзначені програмні напрямки підвищення якості залізничних осей до рівня, що забезпечує їх експлуатацію при навантаженні 27...30 т. Бібліогр. 14, табл. 6, рис. 1.

Ключові слова: залізничні осі; електросталь; стандарт; технологія виплавки; позапічна обробка; розливання; зливки; безперервно-лита заготовка; блюми; деформаційний переділ; термообробка

MODERN TECHNOLOGIES OF MELTING AND CASTING OF STEEL EA1N FOR PRODUCTION OF RAILWAY AXLES

A.I. Panchenko¹, S.G. Kijko¹, M.I. Gasik², A.S. Salnikov¹, G.V. Levchenko³,
A.P. Gorobets², Yu.S. Projdak², Yu.V. Klimchuk⁴

¹ «Electrical Works «Dneprospetsstal».

Yuzhnoe shosse 81, 69008, Zaporozhye, Ukraine. E-mail: info@dss.com

² National Metallurgical Academy of Ukraine.

4 Gagarin Ave., 49005, Dniepr, Ukraine. E-mail: tehnosplav@ua.fm

³ Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institutr of the NAS of Ukraine.

1 Academician Starodubov Square, 49050, Dniepr, Ukraine. E-mail: office.isi@nasgovua

⁴ LCC «MZ Dneprospetsstal».

21 Stoletov Str., 49081, Dniepr, Ukraine. E-mail: office@interpipe.dp.ua

Problems of improving the technologies of production and quality of axle steel EA1N in appliance with requirements of the Interstate standard GOST 31334–2007, harmonized with provisions of European standards EN 13260 and EN 13261 were generalized for manufacture of axles of traction and trailer cars Peculiarities of end-to-end technological charts of production at the Ukrainian enterprises of roughing axles in a normalized state, methods of steel melting, parameters of metal treatment in furnace-ladle installation (FLI) with vacuum treatment and without it, metal casting into moulds and machines in continuous casting of billets (MCCB) are described. The flow charts of manufacture of railway axles of electric steel (ingots, round billets of MCCB), blooms of oxygen-converter steel were analyzed. Characterized are the discontinuities of structure of initial billets, results of UST of central porosity of initial billets and methods of its elimination in the process of deformational processing in forging and rolling of axial billets, program directions of improving the quality of railway axles up to the level, providing their service under the load of 27...30 t. Ref. 14, Tabl. 6, Fig. 1.

Key words: railway axles; electric steel; standard; melting technology; ladle treatment; casting; ingots; billet of continuous casting; blooms; deformational processing; heat treatment

Поступила в редакцію 31.07.2018