

Е.Г.Дёмина, С.А.Здоровец, В.И.Сухомлин*, Ж.З.Чехута

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИИ СЛИТКА ОСЕВОЙ СТАЛИ НА ПОВЫШЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ОСЕЙ

*Институт чёрной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины
* Днепродзержинский государственный технический университет*

Исследовано влияние режимов деформации слитка осевой стали на блюминге на структуру нормализованных осей. Показано, что для осей, изготовленных по опытному режиму прокатки, характерно увеличение плотности дендритной структуры на 40,0%, уменьшение размера действительного зерна на 20,0% и повышение уровня ударной вязкости на 30%.

слиток осевой стали, блюминг, режим прокатки, деформация, плотность дендритной структуры, размер зерна, ударная вязкость

Состояние вопроса и постановка задачи.

Оси колёсных пар являются одними из ответственных деталей железнодорожного подвижного состава, от исправной работы которых зависит безопасность движения поездов, а их замена представляет собой серьёзную экономическую и технологическую задачу. В процессе эксплуатации железнодорожные оси работают под воздействием больших статических и динамических нагрузок. Повышение ударной вязкости является гарантией их длительной безаварийной эксплуатации, особенно в условиях пониженных температур.

Известно, что ударная вязкость является хорошим показателем качества материала. Она характеризует способность материала выдерживать резкие нагрузки и максимально релаксировать возникающие напряжения, зависит от структурного состояния стали (например, от величины зерна, фазового состава, неметаллических включений и т.д.).

В работах [1–3] показано положительное влияние интенсификации режимов деформации слитка осевой стали на блюминге на повышение плотности дендритной структуры, и, как следствие, на улучшение прорабатываемости центральных слоёв заготовки и уменьшение размера действительного зерна готовых осей. Эта тенденция сохраняется на протяжении всего цикла производства железнодорожных осей.

Представляло интерес определить, как на изменение параметров дендритной структуры в осевых заготовках отреагирует структурно-чувствительная характеристика – ударная вязкость. В связи с этим, цель данной работы заключалась в исследовании влияния режимов деформации на блюминге слитка осевой стали на структуру и ударную вязкость железнодорожных осей.

Материал исследований – образцы осевой стали горизонта А производства Днепровского металлургического комбината (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав исследуемых плавок

№ плавки	Содержание элементов, % масс.								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al
1	0,49	0,85	0,21	0,021	0,019	0,01	0,02	0,03	0,02
2	0,50	0,86	0,21	0,020	0,018	0,01	0,01	0,01	–

Методика исследований.

Деформацию слитков, получаемых из изложницы 8.4 С1:1, с геометрическими размерами $\frac{800 \times 712}{695 \times 608} \times 2770$ мм, на блюминге 1150 при

производстве заготовок 290×290 мм проводили по двум режимам. Слиток плавки № 1 прокатывали на блюминге по серийному режиму обжатий (1) за 15 проходов, слиток плавки № 2 – по опытному режиму (2) с увеличением величины абсолютных обжатий в отдельных проходах и уменьшением количества проходов до 11 (Режим деформации разработан под руководством д.т.н. Ершова С.В.). Дальнейшие деформационные и термические обработки: прокатка на трубозаготовочном стане в клети 900, охлаждение в неотапливаемых колодцах, прокатка на стане 250, первая и вторая нормализации, – для заготовок обеих плавок выполнены без изменений по стандартным режимам в соответствии с ТИ 230 – СП 371 – 06.

Образцы типа I для испытания на ударный изгиб вырезали из подступичной части осей Ø 230 мм на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса в соответствии с ДСТУ ГОСТ 31334:2009. Значения ударной вязкости определены по ГОСТ 9454.

Металлографические исследования выполнены на микроскопе «Axiovert 200 M MAT» производства фирмы «Carl Zeiss», количественный анализ выполнен в программе «AxioVision 4.6.3». Микроструктуру образцов оценивали в соответствии с требованиями ГОСТ 5639 и ASTM E 112, неметаллические включения – по ГОСТ 1778. Химическую неоднородность кремния выявляли травлением в горячем растворе пикрата натрия.

Измерения микротвёрдости выполнены на ПМТ–3 при нагрузке на индентор 10 Г по ГОСТ 9450. Определение механических характеристик проводили по стандартной методике испытаний на растяжение (ГОСТ 1497–84).

Анализ изломов ударных образцов выполнен на растровом электронном микроскопе РЭМ 200 в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 20,0 кV.

Изложение основных материалов исследования.

Анализ изменения параметров дендритной структуры осевой заготовки 290×290 мм в зависимости от режима обжатий слитка на блюминге выполнен в работе [2]. Показано, что, по сравнению с

серийным режимом деформации слитка, после прокатки слитка по опытному режиму обжатий размеры дендритной структуры в поверхностных слоях и на расстоянии $\frac{1}{4}$ толщины уменьшились на 15,0 %, в центральных слоях – на 25,0 %. При этом плотность дендритной структуры (количество дендритов на единицу площади), в среднем по сечению, повысилась 40,0 %.

В работе [1] сделан вывод, что наиболее сильное влияние на параметры дендритной структуры осевой стали оказывает прокатка слитка на блюминге. Дальнейшие деформационно–термические обработки существенного влияния на параметры дендритной структуры не оказывают.

Рассмотрим влияние режимов деформации слитка на блюминге на структуру готовых осей. На рис.1 показано распределение химической микронеоднородности кремния и марганца, наследуемой от дендритной ликвации: тёмные, ликвационные полосы – это «бывшие» междендритные пространства, светлые полосы без видимой ликвации – «бывшие» дендритные ветви. Результаты металлографического анализа элементов «бывшей» дендритной структуры, выполненного на образцах $\frac{1}{2}$ радиуса подступичной части $\varnothing 230$ мм осей после второй нормализации, представлены в табл.2. Определено, что объёмные доли ликвационных полос и полос без ликвации остаются практически постоянными независимо от режима деформации. Уменьшение размеров дендритных ветвей и междендритных пространств на 18,0 % и повышение их плотности на 44,0 % характерно для структуры осей, полученных по опытному режиму деформации. Эти данные хорошо согласуются с результатами работы [2], небольшое расхождение которых объясняется деформацией на трубозаготовочном стане и на стане 250.



серийный режим



опытный режим

Рис.1. Химическая неоднородность кремния и марганца в структуре железнодорожных осей (подступичная часть $\varnothing 230$ мм, $\frac{1}{2}$ радиуса) после II–ой нормализации, $\times 50$.

Таблица 2. Результаты металлографического анализа элементов дендритной структуры железнодорожных осей (подступичная часть, $\frac{1}{2}$ радиуса)

Режим	Объемная доля участков, %		Средний размер участков, мкм		Плотность в объеме сплава участков, $1/\text{мм}^2$	
	без ликвации	ликвационных	без ликвации	ликвационных	без ликвации	ликвационных
серийный	64,2	35,2	90,1	78,0	197,5	149,8
опытный	62,8	37,2	71,9	66,8	309,3	212,3

Проанализируем, как различное распределение химической неоднородности кремния и марганца повлияло на феррито–перлитную структуру нормализованных осей (рис.2 и табл.3)

Таблица 3. Результаты металлографического анализа феррито–перлитной структуры железнодорожных осей (подступичная часть, $\frac{1}{2}$ радиуса)

Режим	Полосы без ликвации				Ликвационные полосы			
	Объемная доля, %		$C^{(1)}$, %	Номер зерна перлита ²⁾ , мкм	Объемная доля, %		$C^{(1)}$, %	Номер зерна перлит а ²⁾ , мкм
	феррит	перлит			феррит	перлит		
серийный	69,5	30,5	0,24	6,8	44,3	55,7	0,44	8,0
опытный	53,2	46,8	0,38	7,8	40,0	60,0	0,48	8,1

Примечания: 1). Содержание углерода в анализируемых полосах оценено качественно. 2). Номер действительного зерна определен по ASTM E112.

Ранее установлено, что деформационно–термические обработки не способны устранить химическую неоднородность кремния и марганца, образовавшуюся в результате кристаллизации слитка. Значения коэффициентов дендритной ликвации марганца и кремния для осевой стали составляют $K_d^{Mn} = 0,75$ и $K_d^{Si} = 0,65$ [1]. Повышенное содержание этих элементов в ликвационных полосах (марганца ~ 1,0 %, кремния ~ 0,5 %) приводит, во–первых, к увеличению объёмной доли перлита, во–вторых, к уменьшению размера его зерен (рис. 2), по сравнению этими характеристиками в полосах без видимой ликвации. Причем, как и для осей, изготовленных по опытному режиму, так и для серийных осей размер действительного зерна практически одинаковый (табл. 3).

На основании расчётов термодинамических активностей углерода, марганца и кремния, выполненных в работе [4], показано, что оптимальное отношение содержаний марганца и кремния в стали, при котором выравнивается термодинамическая активность углерода в растворе – $a_C^0 = a_C^{(Mn)} = a_C^{(Si)}$, составляет 1,5–2,0 раза. Благодаря дендритной ликвации и низкой диффузионной подвижности марганца и кремния, в ликвационных участках исследуемой стали отношение

содержаний данных элементов является оптимальным. В данных микрообъемах марганец, понижая коэффициент активности углерода, способствует увеличению его концентрации. В тоже время кремний повышает коэффициент активности углерода и приводит к тому, что последний, скопившись в ликвационных полосах, будет стремиться покинуть их и переместиться в полосы, обеднённые кремнием. В результате рост перлитных зёрен в участках, обогащённых марганцем и кремнием, тормозится. Поэтому в этих микрообъемах находятся перлитные зёрна с наименьшими размерами, они располагаются равномерно и изолированно друг от друга в окружении феррита.

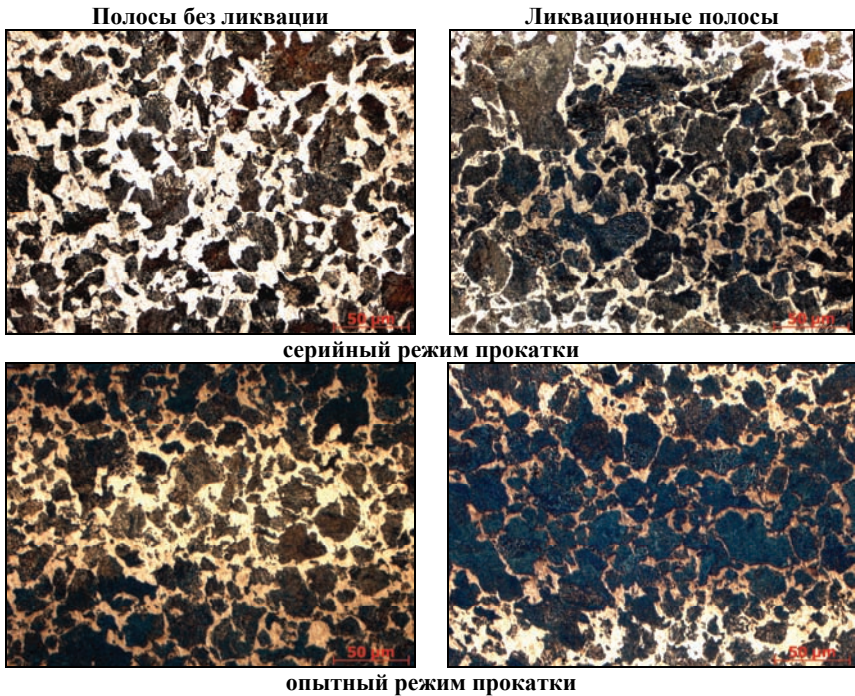


Рис.2. Микроструктура железнодорожных осей (подступичная часть \varnothing 230 мм, $\frac{1}{2}$ радиуса) после II-ой нормализации, \times 500

Зная объёмную долю перлита, можно качественно охарактеризовать распределение углерода между ликвационными участками и участками без видимой ликвации (табл. 3). Участки, обогащённые марганцем и кремнием, в среднем соответствуют стали, содержащей 0,44 % углерода (для серийного режима) и 0,48 % углерода (для опытного режима). Плотность анализируемых полос в микроструктуре опытных осей выше и при одинаковой длине диффузионного пробега углерода микрообъёмы без

видимой ликвации будут обогащаться углеродом в большей степени, чем аналогичные участки в микроструктуре серийных осей. В результате полосы без ликвации отличаются меньшим количеством перлита, которое, в среднем, отвечает стали с 0,24 % углерода (для серийного режима) и с 0,38 % углерода (для опытного режима), т.е. распределение углерода в микроструктуре осей после опытного режима прокатки становится более равномерным по сравнению с микроструктурой осей, изготовленных по существующему режиму.

Размер зёрен перлита становится на 20,0 % меньше и в участках без видимой ликвации микроструктуры опытных осей, по сравнению с аналогичными участками микроструктуры осей серийного производства. Чтобы объяснить эту закономерность, воспользуемся данными о содержании углерода в анализируемых микрообъёмах (табл. 3). Окончательной термической обработкой железнодорожных осей является нормализация, температура нагрева которой составляет $840 \pm 20^\circ \text{C}$. Степень переохлаждения аустенита от этой температуры до температур начала полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и распада аустенита на ферритокарбидную смесь $\gamma \rightarrow \alpha + \text{K}$ (перлит) будет различна для ликвационных и безликвационных слоёв, возрастая при повышении содержания углерода. Согласно [5], на начальном этапе увеличения степени переохлаждения, понижающей свободную энергию металла, уменьшается критический размер зародышей новой фазы, а их количество растёт. Вероятно, поэтому в ликвационных полосах структуры нормализованной осевой стали чаще всего наблюдаются зёрна перлита с наименьшими размерами, в полосах без видимой ликвации структуры опытных осей происходит незначительное увеличение их размеров (рис. 2). Для этих же микрообъёмов структуры осей серийного производства характерны наиболее крупные зёрна.

Таким образом, с помощью опытного режима прокатки слитка на блюминге элементы дендритной структуры приобрели более плотное расположение, сформирован благоприятный фон химической микронеоднородности кремния, марганца и углерода, что в конечном итоге позволило получить более однородную и мелкозернистую феррито–перлитную структуру железнодорожных осей, по сравнению с микроструктурой осей, произведенных по существующему режиму.

Рассмотрим, как повышение плотности дендритной структуры повлияло на распределение микротвёрдости в структуре осевой стали после II–ой нормализации. Значения микротвёрдости исследуемых образцов представлено в табл. 4. В начале, определили, как изменяются значения микротвёрдости феррита и перлита в ликвационных полосах и в полосах без ликвации. Уровень микротвёрдости феррита и перлита в участках, обогащённых кремнием и марганцем, становится выше на 50,0 и 35,0 % соответственно. Теперь, зная объёмную долю этих фаз в

ликвационных полосах и в полосах без видимой ликвации, рассчитаем аддитивную микротвёрдость для каждой из полос [6]:

$$H_{\mu \phi-n} = H_{\mu n} * V_n + H_{\mu \phi} * V_{\phi} \quad (1),$$

где H_n , H_{ϕ} – микротвёрдость феррита и перлита, Н/мм²;

V_n , V_{ϕ} – объемная доля феррита и перлита в ликвационных и безликвационных полосах, %.

Аддитивную микротвёрдость образцов осевой стали с учётом ликвации (табл. 2) рассчитывали по формуле:

$$H_{\mu a-b} = H_{\mu a} * V_a + H_{\mu b} * V_b \quad (2),$$

где H_a , H_b – микротвёрдость ликвационной полосы и полосы без ликвации, Н/мм²; V_a , V_b – объёмные доли полос в осевой стали.

Расчёты показали, что при содержании порядка 1,0 % марганца и 0,5 % кремния микротвёрдость ликвационных полос повышается на 50,0 %. В целом, уровень аддитивной микротвёрдости осевой стали остаётся постоянным – 2500 Н/мм².

Таблица 4. Микротвёрдость образцов осей после II-ой нормализации (подступичная часть, 1/2 радиуса)

Режим	H μ феррита в полосах, Н/мм ²				H μ перлита в полосах, Н/мм ²			
	без лик- вации	с ликва- цией	Δ H μ	Δ H μ , %	без лик- вации	с ликва- цией	Δ H μ	Δ H μ , %
серийный	1597,6	2367,7	770,1	48,2	2324,5	3147,5	823,0	35,4
опытный	1644,7	2445,2	800,5	49,0	2389,3	3138,4	749,1	31,3
Режим	Аддитивная микротвёрдость с учётом фазового состава: (%) феррита и перлита, Н/мм ²							
	полосы без ликвации		ликвационной полосы		Δ H μ ,		Δ H μ , %	
серийный	1819,8		2792,9		973,1		53,5	
опытный	1993,4		2861,1		867,7		43,5	
Режим	Аддитивная микротвёрдость с учётом ликвации (%), Н/мм ²							
					2429,6			
					2538,3			

На рис. 3 показано распределение микротвёрдости в структуре осей серийного и опытного режима деформации в зависимости от размера дендритной структуры (цена деления оси абсцисс соответствует сумме средних размеров ликвационных полос и полос без ликвации). На одинаковой длине линии измерения (~ 0,85 мм) с уменьшением размеров дендритной структуры увеличивается частота чередования более твёрдых, следовательно, более прочных ликвационных слоёв и слоёв без видимой ликвации. В работе [7] установлено, что при частом чередовании слоёв с

различным уровнем микротвёрдости одновременно повышается уровень относительного удлинения, запаса прочности (σ_B/σ_T) и энергии разрушения. Железнодорожные оси работают в условиях длительных знакопеременных нагрузок, поэтому увеличение чередования твёрдых и мягких слоёв в их структуре, по мнению авторов, позволит повысить усталостную прочность.

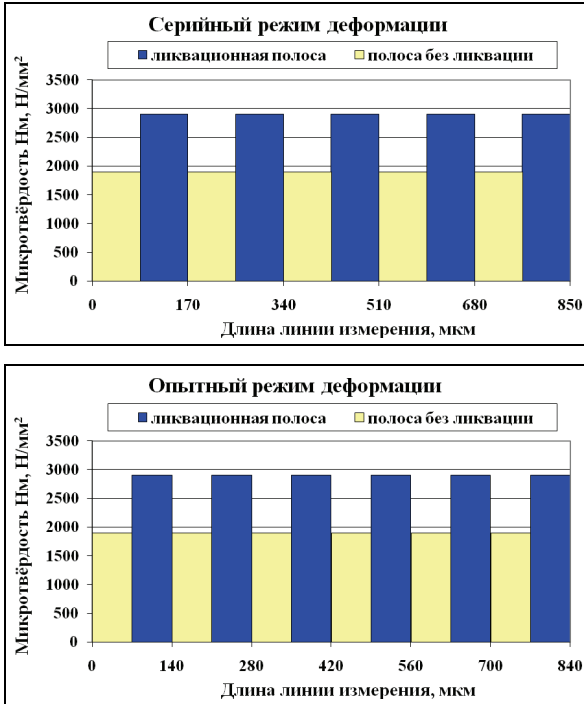


Рис. 3. Распределение аддитивной микротвёрдости в структуре осевой стали (подступичная часть $\varnothing 230$ мм, $\frac{1}{2}$ радиуса) после II-ой нормализации

Результаты механических испытаний образцов подступичной части опытных и серийных осей представлены в табл. 5. Показано, что повышение плотности дендритной структуры не повлияло как на общий уровень микротвёрдости, так и на характеристики механических свойств после испытаний на растяжение. Но при фактически одинаковом уровне характеристик прочности и пластичности образцов осей опытного и серийного режимов производства, для образцов осей опытной партии характерно увеличение ударной вязкости, в среднем, на 30,0 %.

Полученные данные хорошо согласуются с результатами работы [8], в которой показано, что применение опытной технологии горячей пластической деформации колёсной заготовки не оказывает

существенного влияния на предел прочности, относительное удлинение и относительное сужение. В то же время изменение схемы деформации колёсной заготовки на прессе 50 МН независимо от её диаметра, положительно влияет на ударную вязкость образцов, вырезанных из обода, повышая её значения на 12–13 %.

Таблица 5. Механические свойства образцов осей после II–ой нормализации (подступичная часть, $\frac{1}{2}$ радиуса)

Режим	Вре- менное сопроти- вление σ_v , Н/мм ²	Предел теку- чести σ_T , Н/мм ²	Относи- тельное удлине- ние δ_5 , %	Ударная вязкость при 20° С КСУ, Дж/см ²	
				среднее арифметическое значение по 4–м образцам	минимальное значение для отдельных образцов
серийный	674	387	27	34,5	30,5
опытный	675	363	24,5	44,5	42,5
требования ДСТУ ГОСТ 31334:2009*)	650 и более	325	18	не менее 34,0	29,0

*) Нормы по пределу текучести факультативны.

Количество и распределение неметаллических включений в исследуемых образцах обеих плавок одинаковое и составляет 2–ой балл (ГОСТ 1778). Поэтому влияние этого фактора на уровень ударной вязкости исключено.

Макростроение изломов ударных образцов железнодорожных осей характеризуется зернистым внешним видом (рис.4). Плоские грани расколотых кристаллических зерен придают металлический блеск хрупкому излому.

Электронномикроскопическое исследование показало, что поверхности изломов ударных образцов имеют хрупкий внутризёрненный характер разрушения [9]. Смешанное микростроение изломов состоит из фасеток скола (по размерам соответствующим размеру действительного зерна) с ручьистым узором, фасеток квазискола (с размерами в несколько раз меньше, чем размеры зёрен) и участков вязкого разрушения (рис.4). Определено, что в структуре изломов ударных образцов осей серийного производства после II–й нормализации доля вязкой составляющей равна 15,0 %. В структуре изломов ударных образцов нормализованных опытных осей её количество увеличивается до 25,0 %. Увеличение доли вязкой составляющей может быть объяснено уменьшением размера зёрен перлита (табл.3) и, следовательно, более равномерным распределением вязкой фазы – феррита в микроструктуре опытных осей.

Таким образом, увеличение ударной вязкости, как структурно–чувствительной характеристики, образцов нормализованных опытных осей напрямую связано с уменьшением размера действительного зерна и

повышением плотности элементов дендритной и однородности зёрненной структуры.

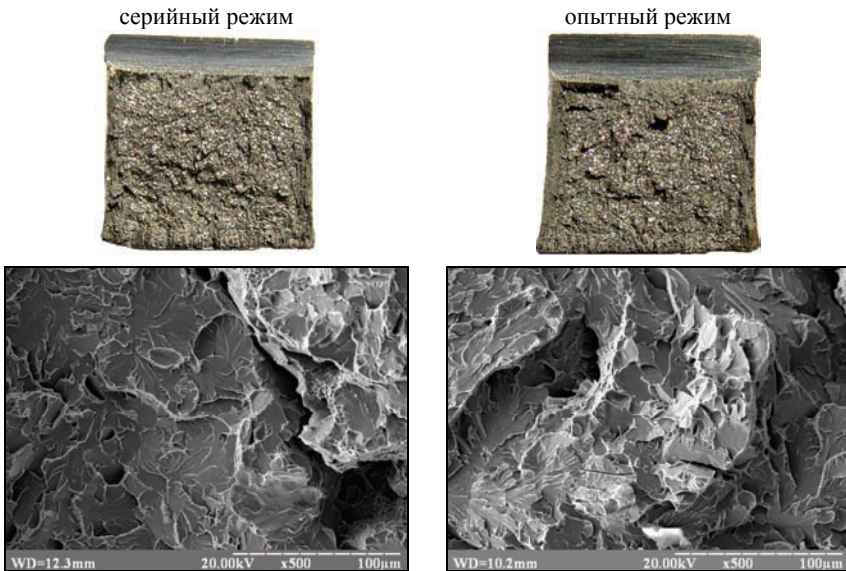


Рис.4. Макростроение ($\times 4$) и фрактограммы изломов ($\times 500$) ударных образцов железнодорожных осей (подступичная часть $\varnothing 230$ мм, $\frac{1}{2}$ радиуса) после П-ой нормализации

Выводы.

Показано, что опытный, более интенсивный режим обжатий слитка осевой стали на блюминге, повышая плотность дендритной структуры на 40,0 %, формирует фон равномерной химической неоднородности в структуре осей после окончательной термической обработки.

Установлено, что повышение плотности дендритной структуры приводит к равномерному распределению кремния, марганца и углерода в микроструктуре железнодорожных осей. Это обеспечивает формирование более однородной и мелкозернистой микроструктуры в осях, изготовленных по опытному режиму деформации, по сравнению с микроструктурой осей серийного производства.

Определено, что в образцах железнодорожных осей, изготовленных по опытному режиму деформации, уровень ударной вязкости повысился на 30 %, по сравнению с образцами осей, полученных по существующей технологии. Это повышает уровень надёжности и срок их безаварийной эксплуатации.

1. *Трансформация дендритной структуры на всех этапах производства железнодорожных осей* / Г.В.Левченко, С.В.Ершов, Е.Г.Дёмина и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 2. – С. 74–76.
2. *Влияние режимов деформации слитка на трансформацию дендритной структуры в заготовках для производства железнодорожных осей* / Г.В. Левченко, С.В. Ершов, Е.Г. Дёмина и др. // *Информационные технологии в обработке давлением: сб. науч. трудов*. – Краматорск, 2008. – С. 27.
3. *Дьоміна К.Г., Грицай Т.В.* Розробка оптимальних параметрів виробництва залізничних осей // *Металознавство та обробка металів*. – 2009. – № 1. – С. 52–57.
4. *Жуков А.А.* Термодинамические аспекты оптимизации состава комплекснолеированных сталей // *Основы литейных сплавов: труды XIV совещания по теории литейных процессов*. – М.: Наука, 1970. – С. 82–85.
5. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
6. *Григорович В.К.* Твёрдость и микротвёрдость металлов. – М.: Наука, 1976. – С. 142–147.
7. *Левченко Г.В., Дёмина Е.Г., Кныш А.В.* Влияние содержание кремния на формирование структуры волокнистого композита в арматурном прокате. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 1. – С. 83–87.
8. *Влияние* размеров колёсной заготовки и режимов её горячей пластической деформации на служебные свойства железнодорожных колёс. / И.Г.Узлов, А.И.Бабаченко, А.А.Кононенко, Ж.А.Дементьева // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. научн. тр. – 2006. – Вып. 13. – С.137–142.
9. *Изломы* конструкционных сталей / *Справ. под ред. Л. П. Герасимовой, А. А. Ежова, М. М. Маресьева*. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.

*Статья рекомендована к печати
докт техн.наук, проф. Г.В.Левченко*

Е.Г.Деміна, С.О.Здоровец, В.І.Сухомлин, Ж.З.Чехута

Вплив режимів деформації злитка осьової сталі на підвищення ударної в'язкості залізничних осей

Досліджено вплив режимів деформації злитка осьової сталі на блюмінгу на структуру нормалізованих осей. Показано, що осі, що виготовлені по дослідному режиму прокатки, характеризуються збільшенням щільності дендритної структури на 40,0%, зменшення розміру дійсного зерна на 20,0% і підвищенням рівня ударної в'язкості на 30%.