

А.И.Бабаченко, Е.Г.Дёмина, А.В.Кныш, А.Н.Хулин, Ж.А.Дементьева

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА И СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА НА РОСТ ЗЁРЕН АУСТЕНИТА В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁС

Институт чёрной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Исследовали влияние температуры нагрева и содержания углерода на рост зёрен аустенита в углеродистых сталях для производства железнодорожных колёс. Установлено, что температура начала интенсивного роста зёрен аустенита для стали марки ER 7 (0,4–0,5%С) составляет ~ 1000°C, для стали марки 2 (0,5–0,6%С) – ~ 1100°C. Можно рекомендовать температуру нагрева колёсных заготовок под горячую деформацию на уровне 1230 ± 10°C

Ключевые слова: заготовка для железнодорожных колёс, углеродистая сталь, температура нагрева, зерно аустенита

Современное состояние вопроса. Существенным этапом в формировании механических свойств железнодорожных колёс является операция нагрева исходных заготовок под деформацию. Основное значение этой операции заключается в передаче металлу необходимого запаса пластичности для формообразования и выравнивания состава стали. С повышением температуры нагрева увеличивается пластичность металла, более интенсивно протекает процесс выравнивания состава в осях и межосных участках дендритов. Однако повышение однородности стали вследствие гомогенизации и, соответственно, рост характеристик механических свойств металла и уменьшение их анизотропии сопровождается отрицательными сторонами – с ростом температуры и времени выдержки увеличивается величина зерна и степень пограничной адсорбции примесей, что отрицательно сказывается на уровне пластичности и вязкости.

В работе [1] было определено, что по сечению непрерывнолитых заготовок Ø 450 мм из углеродистых сталей средний размер зёрен аустенита изменяется ~ 2 раза и составляет в поверхностных слоях $D_{\text{исх.}} = 850$ мкм, в центральных слоях – $D_{\text{исх.}} = 1800$ и 1650 мкм для стали ER 7 и марки 2 соответственно.

Цель работы данного исследования заключалась в установлении влияния температуры нагрева под горячую деформацию и содержания углерода на рост зёрен аустенита в углеродистых сталях для производства железнодорожных колёс.

Материал и методика исследования. Материал исследования – образцы 30×15×15 мм, вырезанные в поверхностных и центральных слоях непрерывнолитых заготовок Ø450 мм, из стали ER 7 (0,4–0,5%С) и стали марки 2 (0,5–0,6%С). Химический состав исследованных сталей представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемых углеродистых сталей

Марка стали	Содержание основных элементов, % масс.				
	C	Mn	Si	P	S
2 по ГОСТ 10791 – 2011	0,57	0,73	0,29	0,011	0,005
Требования ГОСТ 10791 – 2011	0,55–0,63	0,50–0,90	0,22–0,45	≤ 0,030	≤ 0,025
ER 7 по EN 13262 (D)	0,48	0,73	0,29	0,008	0,005
Требования EN 13262 (D)	≤ 0,52	≤ 0,80	≤ 0,40	≤ 0,020	≤ 0,015

Нагрев исходных колёсных заготовок перед горячей деформацией в колесопрокатных цехах производят в кольцевых методических печах с вращающимся подом в течение 6 часов до 1260–1280⁰C. Для моделирования процесса нагрева заготовок в кольцевой печи в лабораторных условиях образцы нагревали до температур 810–1300⁰C в печи СНОЛ–1.1.2,5/14 со скоростью нагрева 5⁰C/мин. Температуру в печи измеряли Pt – Pt 10%Rh термпарой и милливольтметром МПП–254 М. Время выдержки рассчитывали 1,5 мин. на 1 мм сечения. Структурное состояние аустенита фиксирования закалкой образцов в 10-% водном растворе NaCl.

Микроструктуру образцов выявляли травлением в 4-% спиртовом растворе азотной кислоты (HNO₃) – ниталь. Металлографический анализ выполнен на световых микроскопах «Axiovert 200 M MAT» и «Neophot 32» производства фирмы «Carl Zeiss». Подсчёт размеров зёрен выполнен методом секущих в программе «AxioVision 4.6.3» в полуавтоматическом режиме.

Размер зёрен аустенита определяли либо по выделившейся по границам сетке троостита (рис.1,а), либо по длине мартенситных игл (рис.1,б). Мартенсит имеет характерное игольчатое строение. Размер игл (кристаллов) определяется размером исходного аустенитного зерна (первые иглы мартенсита проходят через все зерно). Поэтому, чем мельче исходное зерно аустенита, тем мельче кристаллы мартенсита [2].

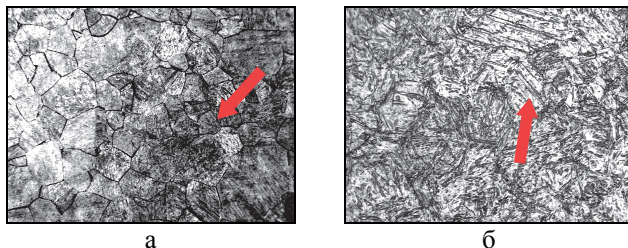


Рис.1. Микроструктура углеродистой стали ER 7 после закалки: а – структура мартенсита с выделениями троостита на границах зёрен, × 50; б – мартенсит линзообразный, × 500

Результаты исследований. Микроструктура образцов углеродистых сталей ER 7 и марки 2 после нагрева до температур 810–1300⁰C показана на рис. 2 и 3.

Образцы, вырезанные из поверхностных слоёв НЛЗ Ø450 мм.
Исходный размер зерна D исх. = 850 мкм

810–900 ⁰ С	1000 ⁰ С	1100 ⁰ С
1200 ⁰ С	1300 ⁰ С	

Образцы, вырезанные из центральных слоёв НЛЗ Ø 450 мм.
Исходный размер зерна D исх. = 1800 мкм

810–900 ⁰ С	1000 ⁰ С	1100 ⁰ С
1200 ⁰ С	1300 ⁰ С	

Рис.2. Микроструктура образцов стали ER 7 после нагрева, × 400

Образцы, вырезанные из поверхностных слоёв НЛЗ Ø 450 мм.

Исходный размер зерна D исх. = 850 мкм

810–900 ⁰ С	1000 ⁰ С	1100 ⁰ С
1200 ⁰ С	1300 ⁰ С	

Образцы, вырезанные из центральных слоёв НЛЗ Ø 450 мм.

Исходный размер зерна D исх. = 1650 мкм

810–900 ⁰ С	1000 ⁰ С	1100 ⁰ С
1200 ⁰ С	1300 ⁰ С	

Рис.3. Микроструктура образцов стали марки 2 после нагрева, × 400

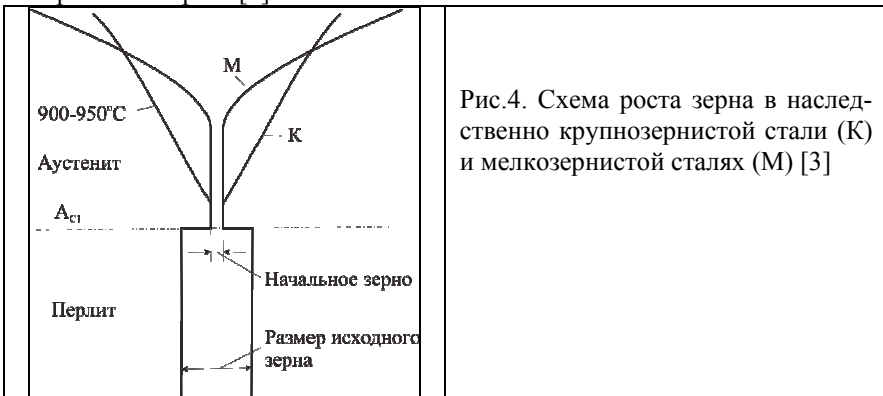
В доэвтектоидных сталях ER7 и марки 2, содержащих 0,40–0,65% С и имеющей исходную феррито-перлитную структуру при температуре 20⁰С, при нагреве до температуры Ас₁ растворяется немного цементита. При нагреве выше температуры эвтектоидного равновесия происходит аустенитизация перлита. Образование первых зёрен аустенита в углеродистой стали происходит путём возникновения его зародышей на границах раздела фаз феррит/цементит и последующего их роста за счёт этих фаз. В процессе превращения сначала исчезает феррит, а затем уже цементит. Так как эта межфазная граница весьма разветвлена, то превращение начинается с образования множества мелких зёрен. После растворения цементитных частиц концентрация углерода в различных участках аустенита неодинаковая: в местах, где был феррит, она пониженная, в участках, где находился цементит, она повышенная. После первого этапа аустенитизации перлита сталь имеет аустенито-ферритную структуру. Во время нагрева до температуры Ас₃ феррит в результате полиморфного превращения α↔γ превращается в аустенит. С повышением температуры нагрева выше Ас₃ процесс аустенитизации в доэвтектоидной стали полностью завершается [3].

Поскольку количество зародышей аустенита всегда велико, к моменту окончания аустенитизации сталь имеет мелкозернистую структуру. Размер этих зёрен характеризует так называемую величину начального зерна аустенита (рис.4). Немедленно вслед за образованием аустенита начинается рост его зёрен (по Д.К.Чернову – «грануляция»), заключающийся в слиянии и поглощении мелких зёрен более крупными, т. е. наступает собирательная рекристаллизация аустенита. Рост зерна – самопроизвольно протекающий процесс, так как при этом уменьшается суммарная поверхность зёрен (уменьшается поверхностная энергия), высокая температура обеспечивает лишь достаточную его скорость. Рассматриваемый обычно действительный размер зерна аустенита оказывается большим при более высокой температуре.

В результате нагрева до температуры 810⁰С (Ас₃ = 785, 780, 760⁰С для стали с содержанием углерода 0,44, 0,53 и 0,55% масс.) образуются мел-

кие начальные зёрна аустенита, размер которых составляет для стали ER 7 и марки 2 в образцах, вырезанных в поверхностных слоях и центральных слоях НЛЗ, – 30 мкм (рис.5). В интервале температур 810–900°C размер зёрен аустенита увеличивается незначительно. Наследственной связи размера зёрен аустенита с размером исходных зёрен аустенита в микроструктуре непрерывнолитых заготовок не наблюдается.

Отсутствие наследственной связи можно объяснить следующим образом. Как показано в работе В.Д.Садовского [4], образование аустенита при нагреве может проходить по двум конкурирующим механизмам фазовых превращений: кристаллографически неупорядоченному и упорядоченному. При неупорядоченном механизме образования аустенита полиморфное $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращение сопровождается перекристаллизацией, т.е. изменением величины и ориентации вновь образующихся зёрен γ -фазы по отношению к исходной α -фазе. При упорядоченном механизме переход не сопровождается перекристаллизацией, которая протекает при более высоких температурах вследствие первичной рекристаллизации наклёпанного при сдвиговом превращении аустенита. Главным фактором, определяющим возможность того или иного механизма перекристаллизации, является тип исходной структуры, а точнее её кристаллографическая упорядоченность. При исходной неупорядоченной (равновесной) структуре (ферритокарбидная смесь – ФКС) имеет место только неупорядоченный механизм перекристаллизации. При исходной упорядоченной (неравновесной) структуре (мартенсит, бейнит, видманштетт) может наблюдаться тот или другой механизм перекристаллизации. В этом случае реализация одного из них будет определяться содержанием легирующих элементов в стали и скоростью нагрева [5].



При нагреве образцов углеродистых сталей ER 7 и марки 2 выше критических точек происходит полиморфное превращение. При этом зародыши аустенита всегда образуются по сдвиговому механизму, причём данный процесс совпадает с рекристаллизацией наклёпанного при фазо-

вом превращении аустенита. Поэтому при переходе через критическую точку образуется мелкое зерно аустенита. Процессы фазового перехода и рекристаллизации при таком механизме совпадают.

Таким образом, при нагреве образцов, вырезанных в поверхностных и центральных слоях непрерывнолитых заготовок Ø450 мм из углеродистых сталей ER 7 и марки 2, со скоростью 5°C / мин. до температур 810–900°C влияние разницы более чем в 2 раза исходного размера зёрен аустенита и литой неупорядоченной структуры перлита и избыточного феррита (с соотношением фаз 95%/5% соответственно) полностью нивелируется.

Дальнейший нагрев образцов в аустенитной области будет приводить к росту зерна аустенита (собираетельной рекристаллизации). Причём интенсивный рост зёрен аустенита в стали марки ER 7 начинает наблюдаться при температуре 1000°C, в то время как для стали марки 2 – при более высокой 1100°C (рис.5). Вероятно, в этом случае проявляется влияние углерода, как примесного элемента. Повышение его содержания в углеродистой стали марки 2 замедляет процесс роста зёрен аустенита до температуры нагрева 1100°C.

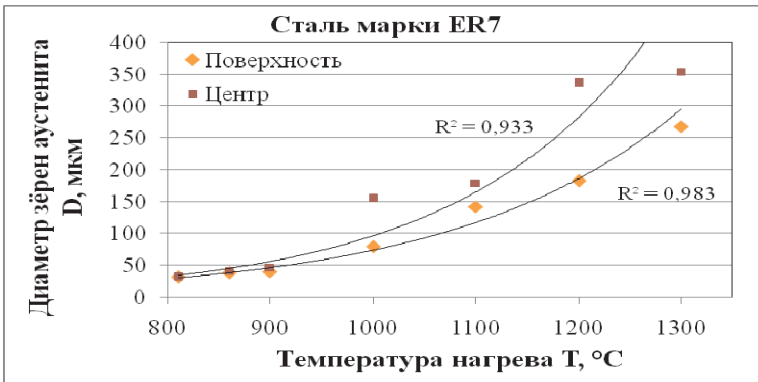
Начиная от температур 1000 и 1100°C для сталей ER 7 и марки 2 соответственно и до температуры 1300°C, в микроструктуре аустенита наблюдается разница в росте зёрен в образцах, вырезанных из поверхностных и центральных слоев (рис.5,а,б). Причём более крупными зёрнами аустенита отличаются образцы, которые были вырезаны из центральных слоёв НЛЗ обеих сталей. Это связано с тем, что центральные слои НЛЗ обогащены легирующими и примесными элементами, вследствие их ликвации при кристаллизации стали. Повышенное содержание марганца способствует увеличению концентрации углерода в данных микрообъёмах и избирательному росту отдельных зёрен. Однако, не смотря на более интенсивное увеличение размеров отдельных зёрен аустенита, их рост протекает по нормальному механизму собираетельной рекристаллизации.

При температуре нагрева выше 1200°C интенсивность роста зёрен увеличивается, а влияние углерода ослабевает. При температуре нагрева 1300°C зёрна аустенита достигают максимальных размеров – порядка 300 мкм (рис.5). Понижение температуры нагрева образцов углеродистых сталей даже на 50°C позволяет уменьшить средний размер зёрен аустенита на 30 и 20 % для углеродистых сталей ER 7 и марки 2 соответственно. Это является целесообразным при нагреве колёсных заготовок под горячую деформацию в промышленных условиях.

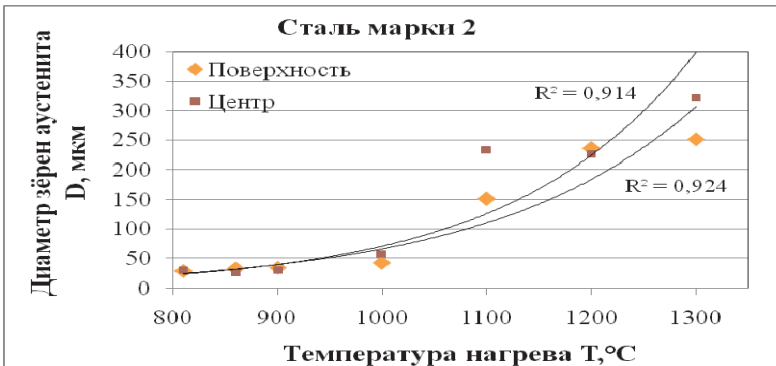
Для исследования влияния температуры нагрева исходных заготовок был проведен опыт по изготовлению колёс с нагревом исходных заготовок по двум режимам: первый режим до температуры 1260°C, второй – до температуры 1170°C [6]. В первом случае в ободе горячекатаного колеса образовались крупные зёрна 0–2 балла. Во втором случае – 2–5 балла. То есть при пониженной температуре нагрева под деформацию снижается степень развития процесса собираетельной рекристаллизации деформиро-

ванного аустенита. Более низкая температура нагрева по второму режиму исходных заготовок, более низкая температура конца деформации и процессов рекристаллизации обеспечили более мелкое зерно в микроструктуре горячекатаных колёс.

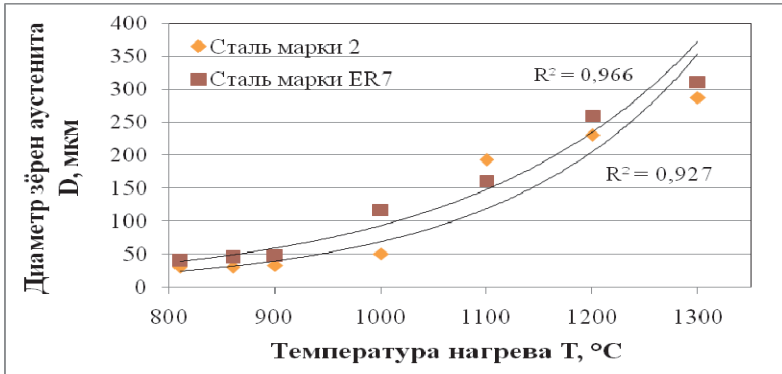
Показано, что снижение температуры нагрева колёсных заготовок под горячую деформацию на 50°C позволило улучшить качество заготовки: улучшилось отделение окалины с поверхности, уменьшились, и даже полностью исчезли, отпечатки на торцевых поверхностях от клещей машины выгрузки заготовок из печи. С понижением температуры прочностные свойства несколько снижаются, а пластические – сильно возрастают, в том числе и ударная вязкость диска. Положительный эффект от снижения температуры нагрева заготовок под деформацию выразился в повышении уровня пластических характеристик и ударной вязкости металла обода. Рост относительного сужения составил 64%, относительного удлинения – 16%, ударной вязкости – 9% [6].



а



б



В

Рис.5. Влияние температуры нагрева на рост зёрен аустенита в углеродистых сталях марки ER 7 и марки 2

Таким образом, по результатам данного эксперимента можно сделать вывод, что оптимальной является температура нагрева исходных заготовок под горячую пластическую деформацию $1230 \pm 10^\circ\text{C}$, т. е. на 50°C ниже, чем температура нагрева заготовок по действующей в условиях производства ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» технологии.

Выводы:

1. Установлено, что при нагреве образцов непрерывнолитых заготовок $\varnothing 450$ мм из углеродистых сталей (0,4–0,6% C) со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$. влияние исходной неупорядоченной структуры (95% перлита и 5% феррита) и разнотерности (разница в среднем размере зёрен аустенита в поверхностных и центральных слоях заготовки более чем в два раза) полностью нивелируется во всём температурном интервале ($810\text{--}1300^\circ\text{C}$).

2. Определено, что температура начала интенсивного роста зёрен аустенита (начало собирательной рекристаллизации) для стали марки ER 7 (0,4–0,5% C) составляет $\sim 1000^\circ\text{C}$, для стали марки 2 (0,5–0,6% C) – $\sim 1100^\circ\text{C}$. При температуре нагрева выше 1200°C интенсивность роста зёрен увеличивается, а влияние содержания углерода, как сдерживающего фактора, ослабевает.

3. На основании результатов выполненного эксперимента по влиянию температуры нагрева на рост зёрен аустенита в углеродистых сталях (0,4–0,6% C) можно рекомендовать температуру нагрева колёсных заготовок под горячую деформацию $1230 \pm 10^\circ\text{C}$, т. е. на 50°C ниже, чем температура нагрева заготовок по действующей в условиях производства ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» технологии. Это позволит улучшить качество колёсных заготовок и готовых колёс.

1. *Особенности* структурообразования углеродистых и низколегированных сталей в процессе охлаждения слитка и непрерывнолитых заготовок / А.И.Бабаченко, Е.Г.Дёмина, А. В.Кныш и др. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. науч. трудов. ПДАСА. 2015. – Вып.81 – С.37-43.
2. *Основы* термической обработки сталей (конспект лекций) для самостоятельной работы студентов очного и заочного факультетов. Уральский государственный лесотехнический университет. Кафедра технологии металлов. Блюм Э.Э., Потехин Б.А., Резников В.Г. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://tmetall.narod.ru/mater/materpos/konspekt1.html>.
3. *Гуляев А.П.* Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 646 с.
4. *Садовский В.Д.* Структурная наследственность в стали. – М.: Металлургия, 1973. – 208 с.
5. *Теоретические* основы легирования. [Электронный ресурс]. Пятифан. Режим доступа: <http://5fan.ru/wiewjob.php?id=7339>.
6. *Исследование* формообразования, особенностей структурообразования и формирования комплекса свойств в цельнокатаных колёсах, бандажах и осях при их производстве из непрерывнолитых заготовок [Текст]: отчёт о НИР Институт чёрной металлургии НАН Украины; рук. Узлов И.Г., Лохматов А.П., Перков О.Н., исполн. Моисеева Л. А., Тарасова В.А. [и др.]. – Днепропетровск, 1994. – 81 с.

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

О.І.Бабаченко, К.Г.Дьоміна, А.В.Книш, А.М.Хулін, Ж.А.Дементьєва

Вплив температури нагріву та вмісту вуглецю на ріст зерен аустеніту в вуглецевих сталях для виробництва залізничних коліс

Встановлено вплив температури нагріву під гарячу деформацію та вмісту вуглецю на зростання зерен аустеніту в вуглецевих сталях для виробництва залізничних коліс. Визначено, що температура початку інтенсивного зростання зерен аустеніту (збиральної рекристалізації) для сталі марки ER 7 (0,4–0,5%С) складає ~ 1000°C, для сталі марки 2 (0,5–0,6%С) – ~ 1100°C.

Ключові слова: вуглецева сталь, температура нагріву, зерно аустеніту, колісна заготівка

A.I.Babachenko, K.G.Domina, A.V.Knysh, A.N.Khulin, Zh.A.Dementeva

The effect of heating temperature and carbon content on the growth of austenite grains in carbon steels for manufacture of railway wheels

The effect of heating temperature for the heat deformation and the carbon content on the growth of austenite grains in carbon steels for the railway wheels production has been established. It has defined that the temperature of the beginning of intense growth of austenite grains (collective recrystallization) for steel ER 7 (0,4–0,5%С) is about 1000°C, for steel grade 2 (0,5–0,6%С) is about 1100°C.

Keywords: carbon steel, the heating temperature, the austenite grains, the workpiece wheels