

УДК 669.14.018.29:621.785.012

©Хлестов В.М.<sup>1</sup>, Якушечкина Л.И.<sup>2</sup>, Фролова З.В.<sup>3</sup>, Щеглова А.М.<sup>4</sup>**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СКОРОСТНОГО НАГРЕВА НА РОСТ АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА И УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ**

Исследованиям подвергалась сталь марки М76 после различных режимов термической обработки. Оценивался рост аустенитного зерна, а так же влияние величины зерна на ударную вязкость. Повышение температуры скоростного нагрева от 900 до 1040°С укрупняет аустенитное зерно рельсовой стали и уменьшает её вязкость.

**Ключевые слова:** граница аустенитного зерна, нагрев ТВЧ, копровые испытания, ударная вязкость, оптимальное зерно аустенита, температура нагрева, рост аустенитного зерна.

*Хлестов В.М., Якушечкина Л.И., Фролова З.В., Щеглова Г.М. Вплив температури швидкісного нагріву на зростання аустенітного зерна і ударної в'язкості рейкової сталі. Досліджувалася марка сталі М76 після різних режимів нагріву. Оцінювали зростання аустенітного зерна, а також вплив величі зерна на ударну в'язкість. Підвищення температури швидкісного нагріву від 900 до 1040°С укрупнює аустенітні зерно рейкової сталі і зменшує її в'язкість.*

**Ключові слова:** межа аустенітного зерна, нагрів СВЧ, копрові випробування, ударна в'язкість, оптимальне зерно аустеніту, температура нагріву, зростання аустенітного зерна.

*V.M. Khlestov, L.I. Yakushechkina, Z.V. Frolova, G.M. Shcheglova. Effect of temperature rapid heating of austenitic grain growth and impact strength of rail steel. The influence of substantial surface overheating of rails upon the formation of large austenite grain was shown in the article, leading to insufficient yield strength. Also investigated was the influence of heating rate upon yield strength. Raising the temperature of heating speed from 900 to 1040°С enlarges austenitic grain rail steel and reduces its viscosity.*

**Keywords:** austenite grain boundary, heating HDTV, hoisting the test, resilience, optimum grain austenite, heating temperature, the growth of austenite grains.

**Постановка проблемы.** На Мариупольском металлургическом комбинате ММК «Азов-сталь» рельсы (их головки) упрочняют поверхностной закалкой. Используемый при этом индукционный нагрев частотой 2400 Гц не обеспечивает оптимальной глубины проникновения тока, поэтому прогрев поверхностного слоя на необходимую толщину ( $\geq 11$ мм) осуществляется за счёт значительного перегрева поверхности (до 1000-1050°С), что неизбежно приводит к огрублению микроструктуры и ухудшению вязкости.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Разработчики режима поверхностной закалки рельсов, используемого на МК «Азовсталь», в работах [1,2] рассмотрели многие аспекты совершенствования термоупрочнения рельсов с нагрева ТВЧ. Однако, они не исследовали и не проанализировали особенности роста аустенитного зерна в результате перегрева поверхности головки рельса до 1040-1070°С [1] и влияние этого перегрева на ударную вязкость термоупрочнённой рельсовой стали. А необходимость этого очевидна: до 20-30% рельсов отсортировывается по недостаточной вязкости.

**Цель статьи.** Детально исследовать и проанализировать рост аустенитного зерна в рель-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>4</sup> инженер, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

совой стали при нагреве по режиму, имитирующему производственный, и влияние размера аустенитного зерна на ударную вязкость термоупрочнённой стали М76.

**Изложение основного материала.** В качестве материала исследования использовались образцы из рельсовой стали М76, химический состав которой приведен в таблице 1.

Для того, чтобы изучить рост зерна аустенита в рельсах, моделировали нагрев ТВЧ при поверхностной закалке головки рельса, который применяется на ММК «Азовсталь».

Для этого использовали образцы рельсовой стали толщиной 3 мм, которые нагревали до температур 900, 950, 1000, 1040°C в трубчатой печи за 70-75 с, что практически соответствует времени нагрева рельсов на ММК «Азовсталь». Использовались по два образца для нагрева до каждой температуры.

Таблица 1

Химический состав рельсовой стали М76, в % по массе

Марка стали	C,%	Mn,%	Si,%	P,%	S,%	Al,%
М76	0,78	0,90	0,28	0,017	0,025	0,012

После нагрева образцы закаливали в соленой воде, чтобы зафиксировать то аустенитное зерно, которое сформировалось к моменту окончания нагрева.

Для изучения микроструктуры, ударной вязкости и измерения твердости рельсов исследуемой стали из головки вырезались пробы, отобранные на расстоянии не менее 200мм от торца рельса. Из них изготавливали образцы размером 10×10×55 мм, на которых проводили испытания на ударный изгиб при 20°C и при -60°C. Испытание при -60°C не предусмотрены ДСТУ 4344-2004. Они проводились для того, чтобы выяснить как влияет размер аустенитного зерна на вязкость термоупрочнённой рельсовой стали при -60°C и, следовательно, на сопротивление излому при копровых испытаниях.

Границы аустенитных зерен выявляли травлением реактивом, состоящим из насыщенного водного раствора пикриновой кислоты с добавлением 0,5-1,0% поверхностно-активного вещества (шампуни). Чтобы надежно определить средний размер аустенитного зерна на микрофотографиях образцов подсчитали общее количество зерен аустенита, приходящихся на 0,18 мм<sup>2</sup> поверхности шлифа. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Влияние температуры скоростного нагрева на рост зерна аустенита рельсовой стали М76

Температура нагрева, °C	900	950	1000	1040
Средняя площадь зерна, мкм <sup>2</sup>	304	420	603	1129
Номер зерна	9	8	8	7

Из таблицы 2 видно, что величина зерна аустенита существенно зависит от температуры нагрева. С повышением температуры нагрева увеличивается размер аустенитных зерен, особенно после 1000°C.

На рисунке 1 показано аустенитное зерно стали М76 после нагрева до различных температур. При нагреве до 900°C наблюдаются самые мелкие и самые равномерные зёрна аустенита (рис. 1,а) средняя площадь которых составляет 304 мкм<sup>2</sup>. Самое крупное зерно аустенита формируется при нагреве до температуры 1040°C (рис. 1,г).

Важно отметить, что с повышением температуры нагрева происходит неравномерный рост зерен аустенита. Особенно четко эту неоднородность можно наблюдать на рисунках 1,в и 1,г, когда нагрев, моделирующий индукционный, осуществлялся до температур 1000 и 1040°C. Отдельные зерна аустенита при нагреве до 1000°C выросли до 4 номера, а при нагреве образцов до температуры 1040°C зерно аустенита дополнительно существенно укрупнилось, а отдельные зерна выросли до 3 номера.

Так как температура нагрева рельсовой стали значительно влияет на размер аустенитного

зерна, то можно предположить, что этот фактор может существенно повлиять на ударную вязкость. В связи с этим по режиму, моделирующему производственный, были упрочнены 26 заготовок. Их твердость (321-361 НВ) соответствовала требованиям ДСТУ 4344-2004. Микроструктура (рис. 2) троосто-сорбит закалки. Размеры сорбитных колоний в образцах, закаленных от 900°C, в 2,0-2,5 раза меньше, чем в закаленных от 1040°C, что предопределено, очевидно, более мелким зерном аустенита в первых.

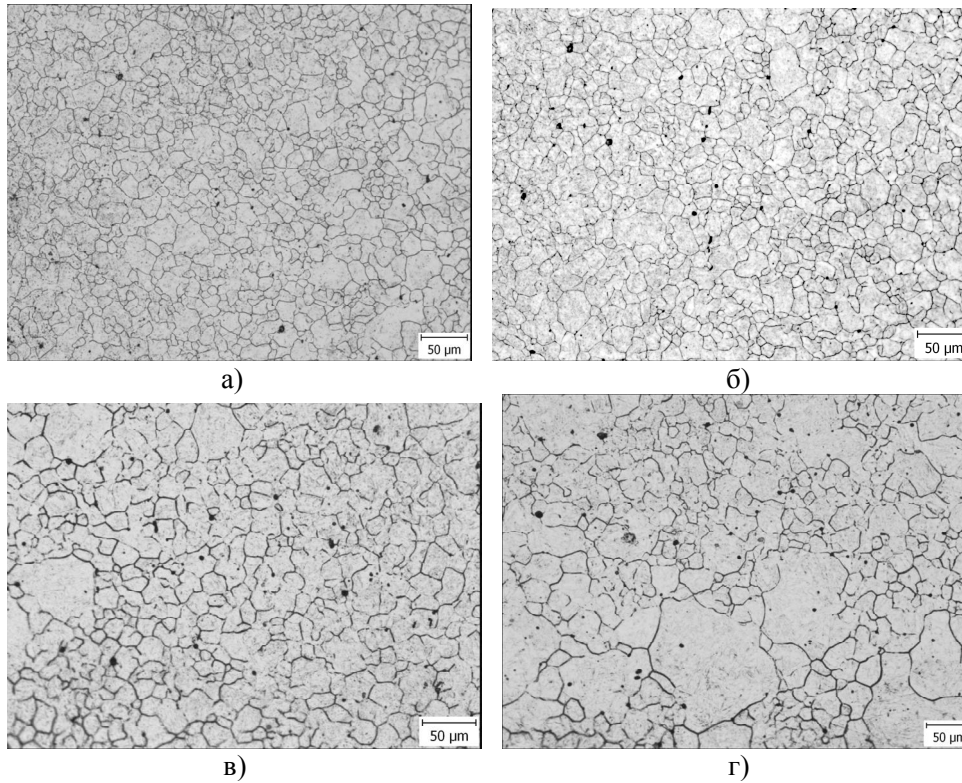


Рис. 1 – Аустенитное зерно стали М76 после нагрева до различных температур,  $\times 240$ : а – 900°C; б – 950°C; в – 1000°C; г – 1040°C

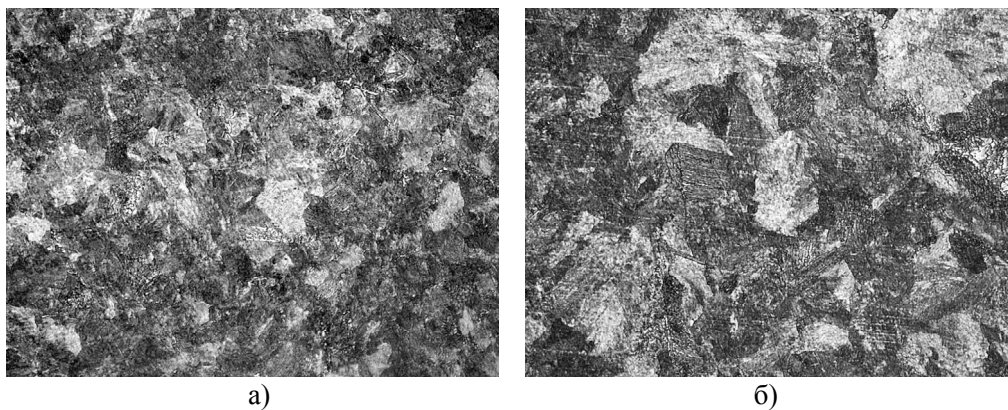


Рис. 2 – Микроструктура стали М76, термоупрочнённой на троосто-сорбит после скоростного нагрева на 900°C (а) и 1020°C (б)  $\times 1000$

На термоупрочнённых заготовках ударных образцов сделали надрезы Менаже и провели испытания на ударную вязкость. Поскольку ДСТУ 4344-2004 предусматривает лишь испытания при +20°C, то основная часть образцов была испытана именно при этой температуре. В тоже время, по 3 образца испытали при -60°C, поскольку копровые испытания, являющиеся также

ударными, проводятся при  $-60^{\circ}\text{C}$ . Результаты, полученные при испытаниях, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Влияние температуры нагрева на ударную вязкость стали М76

Температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$	Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ср.
900	+20	33	40	29	28	29	51	33	31	21	41	33,6
1020		15	28	41	33	30	20	25	31	13	48	28,4
900	-60	14	24	14								17,3
1020		8,8	7,5	7,5								7,9

Из приведенных данных следует, что при нагреве, моделирующем нагрев ТВЧ на оптимальную температуру, ударная вязкость получается более высокой. Так, среднее значение ударной вязкости в этом случае составляет  $33,6 \text{ Дж/см}^2$ , а после нагрева на  $1020^{\circ}\text{C}$  –  $28,4 \text{ Дж/см}^2$ , что почти на 20% ниже. Очень важным показателем является более высокая стабильность ударной вязкости после термоупрочнения с нагревом до  $900^{\circ}\text{C}$ . Из десяти испытаний получен только один неудовлетворительный результат ( $21 \text{ Дж/см}^2$ ). Тогда как после термоупрочнения с нагревом  $1020^{\circ}\text{C}$ , из десяти испытаний неудовлетворительными оказались три результата ( $13 \text{ Дж/см}^2$ ,  $15 \text{ Дж/см}^2$ ,  $20 \text{ Дж/см}^2$ ). При испытаниях при  $-60^{\circ}\text{C}$  преимущества закалки от  $900^{\circ}\text{C}$  проявляется в большей мере. Таким образом, оптимизация температуры нагрева ТВЧ головки рельсов должно привести к существенному улучшению микроструктуры термоупрочнённого слоя и его вязкости, а также к уменьшению отсортировки рельсов. К сожалению, авторы работ [1, 2], подробно расследовавшие оптимизацию многих параметров термоупрочнения рельсов на МК «Азовсталь», совершенно не затронули роль температурно-временного параметра, а ведь именно этот параметр, в первую очередь, предопределяет качество термоупрочнённого слоя при его нагреве ТВЧ [3].

Рассмотренные в данной работе результаты позволяют заключить, что необходима корректировка режима термоупрочнения рельсов, используемого на МК «Азовсталь», которая позволит снизить величину перегрева головки рельсов без уменьшения глубины прогрева. Например, уменьшение частоты тока от 2400 Гц до 1000 Гц приведёт к увеличению глубины проникновения тока в 1,6 раза и тем самым позволит уменьшить перегрев, поскольку прогрев упрочняемого слоя будет происходить не за счет теплопроводности, а за счёт проникновения тока на большую глубину, чем при нагреве током частотой 2400 Гц.

### Выводы

1. Повышение температуры нагрева от  $900$  до  $1040^{\circ}\text{C}$  рельсовой стали М76, моделирующего нагрев головки рельса, приводит к росту аустенитного зерна от №9 до №7, а отдельных зёрен от №8 до №3.
2. Наиболее крупные зёрна аустенита при нагреве на  $1000$  и  $1040^{\circ}\text{C}$  образуют отдельные зоны, в которых преобладают конгломераты крупных зёрен.
3. Ударная вязкость термоупрочнённой на троосто-сорбитную структуру стали М76 существенно ухудшается при повышении температуры скоростного нагрева от  $900$  до  $1040^{\circ}\text{C}$ . При этом также возрастает нестабильность ударной вязкости.
4. Применяемый на МК «Азовсталь» режим нагрева ТВЧ при термоупрочнении рельсов необходимо совершенствовать в направлении оптимизации температуры и времени нагрева ТВЧ, а также частоты тока, используемой при нагреве.

### Список использованных источников:

1. Технологические и физические особенности высокочастотной закалки рельсов / Д.В. Сталинский, А.С. Рудюк, В.Е. Сапожков, Д.К. Нестеров // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 1. – С. 92-98.
2. Разработка оптимальных режимов поверхностной закалки головки рельсов с нагрева токами высокой частоты / Д.В. Сталинский, А.С. Рудюк, В.Е. Сапожков и др. // *Металлургиче-*

ская и горнорудная промышленность. – 2009. – №5. – С. 65-70.

3. Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов / И.Н. Кидин. – М. : Metallurgiya, 1969. – 376 с.

**Bibliography:**

1. Technological and physical characteristics of high-frequency hardening rails / D.V. Stalin, A.S. Rudiuk, V.E. Sapozhnikov, D.C. Nesterov // Metallurgical and Mining Industry. – 2008. – № 1. – P. 92-98. (Rus)
2. Development of optimum modes of surface hardening rail heads with heating by high frequency / D.V. Stalin, A.S. Rudiuk, V.E. Sapozhnikov, etc. // Metallurgical and Mining Industry. – 2009. – № 5. – P. 65-70. (Rus)
3. Kidin I.N. Physical principles of electro-thermal processing of metals and alloys / I.N. Kidin. – Moscow : Metallurgiya, 1969. – 376 p. (Rus)

Рецензент: В.Г. Ефременко  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 12.03.2012