

**Выводы.** Теоретическим и экспериментальным путем выполнен анализ энергетической и технологической эффективности использования режима загрузки металлизированных окатышей через полые электроды в ванну дуговой сталеплавильной печи и предложено уравнение для определения скорости загрузки окатышей в дуговую печь в зависимости от значений текущих параметров теплоэнергетического состояния сталеплавильной ванны. Установлено, что подача ЖМО в зону высокотемпературных электрических дуг приводит к ускорению нагрева и плавления металлизированного сырья, а следовательно к ускорению процессов электроплавки стали в дуговой печи [2, 7] и повышению производительности агрегата.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меркер Э.Э. и др.: Пат. 236009 РФ. Способ электроплавки стали. 07.09.2005; Пат. 2374582 РФ. Дуговая печь для выплавки стали. 25.11.2009.

2. Сазонов А.В., Меркер Э.Э., Черменёв Е.А. // Бюл. ин-та «Черметинформация». Черная металлургия. 2011. № 8. С. 62 – 64.
3. Кожухов А.А., Карпенко Г.А., Меркер Э.Э., Сазонов А.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 7. С. 13 – 15.
4. Ткачев А.С., Кожухов А.А., Меркер Э.Э., Сазонов А.В. Расчет тепловых потоков излучения дуг в ДСП при работе на полых электродах. // В сб. тр. «Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии». – Новокузнецк: СибГИУ, 2011. С. 304 – 311.
5. Сазонов А.В. Исследование процесса плавки окатышей при дуговом нагреве в печи с полыми электродами с целью энергосбережения. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 2009. – 32 с.
6. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.
7. Меркер Э.Э., Федина В.В., Кочетов и др. // Электрометаллургия 2003. № 9. С. 43 – 45.

© 2012 г. Э.Э. Меркер, Е.А. Черменёв, А.В. Сазонов  
Поступила 4 февраля 2012 г.

УДК 669.046.:62-83:531.3

*Е.Ю. Карнова, Ю.И. Карнов, А.С. Леонченко*

Волгоградский государственный технический университет

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО СТАЛИ 20Л

Термообработка стальных отливок, традиционно выполняемая литейщиками, относится к штатным операциям литейного производства. И хотя именно термическая обработка формирует окончательную структуру и свойства стальных отливок, ответственность за многочисленные случаи несоответствия ударной вязкости стали 20Л требованиям ГОСТ 977, как правило, возлагается на нестабильность процессов плавки, раскисления, рафинирования и другие операции и почти никогда на термическую обработку. Этому во многом способствует тот факт, что нормализация, при отсутствии явных нарушений технологического процесса, надежно обеспечивает устранение видманштеттова феррита и формирует практически идентичные феррито-перлитные структуры, казалось бы, не дающие оснований для проведения каких-либо коррекций режимов. На самом деле это далеко не однозначно.

Авторы попытались проанализировать влияние нерегулируемых параметров нормализации, в частности скорости нагрева отливок, на изменение ударной вязкости стали 20Л. Анализ выполняли на основе развитых в работах [1, 2] представлений о видманштеттовом феррите, как о пересыщенном  $\alpha$ -твердом растворе, способном к отпуску с выделением избыточных фаз.

Образцы для определения ударной вязкости вырезали из треновидных проб, один комплект которых под-

вергали ускоренному, а другой – замедленному нагреву до аустенитного состояния.

Термическая обработка, провоцирующая усиление отрицательной наследственности видманштетта, проводилась в лабораторных условиях с использованием камерных термических печей СНОЛ–1.6, 2.5. по режиму, представленному на рис. 1 (кривая 2).

С целью осуществления медленного нагрева заготовок до температуры аустенизации (910 °С) образцы загружались в холодную печь и осуществлялся их ступенчатый нагрев с двумя изотермическими выдержками в течение 15 мин при температуре 350 и 550 °С.

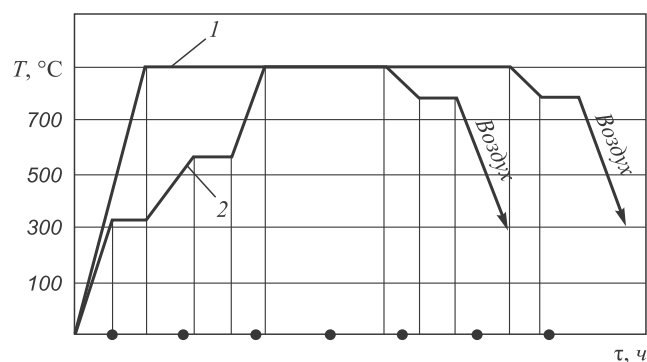


Рис. 1. Термическая обработка с ускоренным (1) и замедленным (2) режимами нагрева до аустенитного состояния

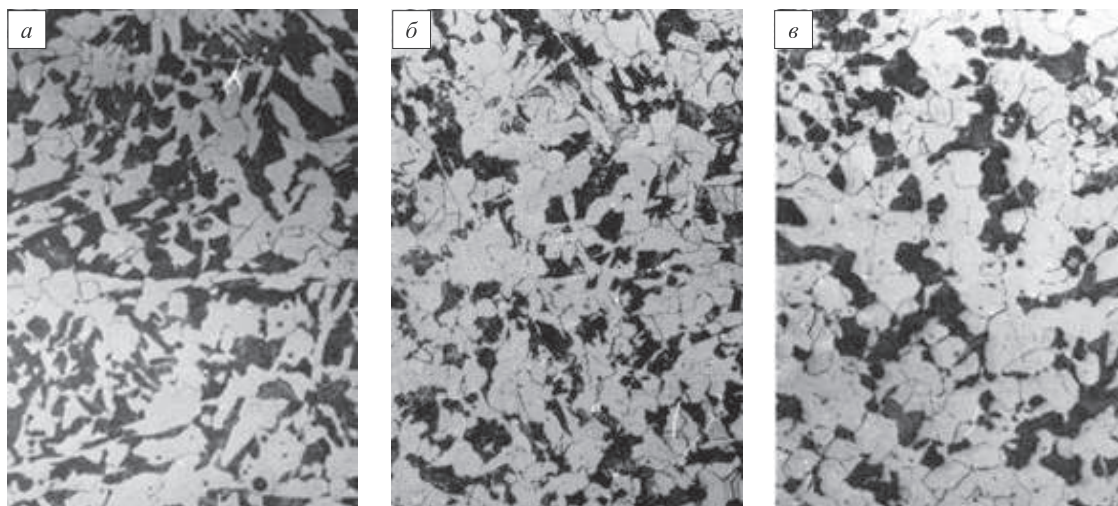


Рис. 2. Структуры образцов, последовательно отобранных на стадии изотермической выдержки,  $\times 100$ :  
 а – время выдержки 10 мин, непревращенный видманштетт – 15 %; б – время выдержки 20 мин, непревращенный видманштетт – 5 %;  
 в – время выдержки 30 мин, полная фазовая перекристаллизация

Минимально необходимая продолжительность аустенитизации определялась металлографическим анализом пробных образцов по моменту полного исчезновения в нормализованной стали непревращенного видманштетта (рис. 2).

Общая продолжительность термической обработки оставалась постоянной в опытах с замедленным и ускоренным нагревом заготовок.

В экспериментах с ускоренным нагревом заготовок образцы помещались в разогретую до 910 °С печь и через 20 мин достигали изотермической выдержки, т.е. интервал 300 – 600 °С преодолевается всего за 5 – 6 мин, что практически исключало возможность коагуляции карбидных выделений (рис. 1, кривая 1).

При сохранении неизменным общего времени при ускоренном нагреве продолжительность аустенитизации увеличилась почти на 35 мин, однако это не препятствовало поставленной цели эксперимента.

После термообработки стали по обоим режимам готовили ударные образцы с возможностью исследования на них деформационного рельефа.

Химический состав стали и значения ударной вязкости, полученные при различных режимах нормализации, приведены в таблице.

Как и следовало ожидать, нормализация стали, независимо от ее химического состава, при замедленном охлаждении во всех случаях приводит к меньшей ударной вязкости. Напротив, ускоренный нагрев отливок обеспечивает существенно большие ее значения. Исследования подтвердили, что при более медленном нагреве заготовок до аустенитной области объективно создаются наиболее выгодные условия для коагуляции избыточных выделений карбидов из видманштеттова феррита при его отпуске. Ранее было показано [2], что наиболее интенсивно процессы коагуляции избыточных карбидов протекают в интервале 350 – 550 °С.

При этом морфологические особенности включений видманштеттова феррита (плоские границы) придают таким карбидным скоплениям самые невыгодные, с точки зрения прочности, вытянутые двумерные формы. Дальнейший нагрев стали и изотермическая выдержка при максимальной температуре нормализации далеко не всегда приводят к полному растворению этих карбидных образований в аустените, особенно при медленном нагреве отливок до аустенитного состояния.

Как установлено [3], область гомогенности цементита, характеризующаяся снижением растворимости С при повышении температуры, имеет существенно разную термодинамическую активность углерода  $a_C^{Fe_3C}$  для стехиометрической и нестехиометрической концентрации в ней С. Другими словами, цементит стехиометрического состава, т.е. содержащий 6,67 % С, имеет максимальную термодинамическую активность С и поэтому, как наиболее метастабильное соединение, легко растворяется в аустените. Цементит, частично теряющий атомы С в углеродной подрешетке, например при

**Химический состав и ударная вязкость стали, полученная при различных режимах нормализации**

Содержание, % по массе			Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	
С	Si	Mn	замедленный нагрев	ускоренный нагрев
0,19	0,25	0,89	41	58
			38	55
			40	56
0,23	0,28	0,69	36,3	54
			35	55
			37,5	54
0,22	0,30	0,59	37,5	61
			40	60
			43	60

медленном его нагреве, напротив, имеет минимальную термодинамическую активность С и значительно труднее растворяется в аустените (по данным работы [3]). Вследствие этого, при медленном нагреве отливок реализуются наиболее неблагоприятные для стали условия: с одной стороны, укрупняются карбидные включения в результате коагуляции, а их полное растворение при нормализации становится проблематичным, с другой стороны, равновесное изменение состава карбидной фазы по линии  $KF$  (рис. 3) приводит к большей термостабильности таких карбидов из-за снижения в них  $a_C^{Fe,C}$ , дополнительно затрудняющей их растворение в аустените.

Выявить такие двумерные карбидные образования в стали довольно сложно, но их можно зафиксировать при нагружении стали благодаря мощной концентрации ими напряжений. И действительно, на предварительно полированных поверхностях ударных образцов, в непосредственной близости от зоны разрушения, систематически возникал деформационный рельеф, не оставляющий сомнений в его связи с расположением уже исчезнувших включений видманштеттова феррита (рис. 4). При этом подобный рельеф проявлялся только

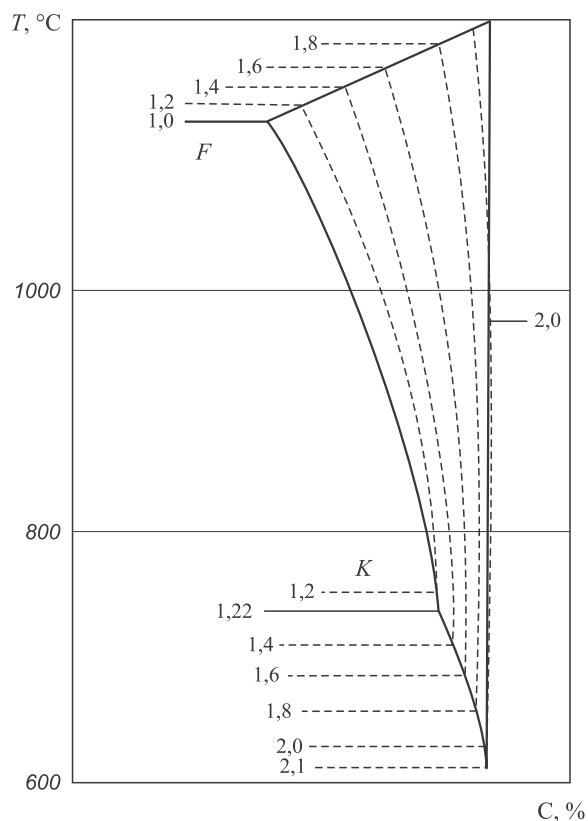


Рис. 3. Область гомогенности цементита в системе Fe-Fe<sub>3</sub>C с линиями изоактивности С

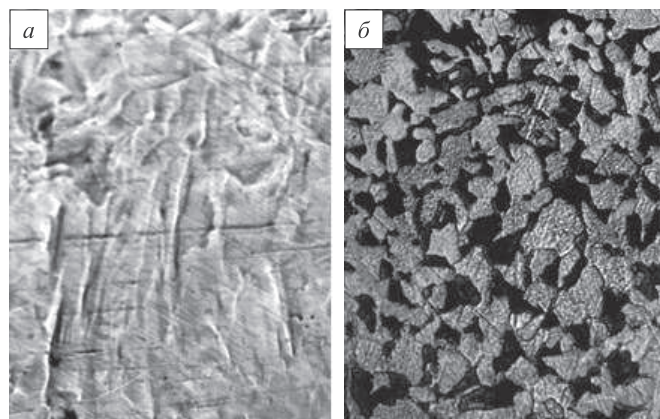


Рис. 4. Деформационное проявление наследственности видманштеттова феррита в нормализованной стали 20Л,  $\times 400$ :  
а – деформационный рельеф по границам бывших пластин;  
б – микроструктура этого же участка образца

в образцах, подвергнутых замедленному нагреву, и не фиксировался в ускоренно нагретых образцах.

Сам факт появления деформационного рельефа свидетельствует о неравномерности пластической деформации и максимальном течении металла в районе концентраторов напряжений. В рассмотренном случае образование борозд, повторяющих уже не существующие границы видманштеттовых включений феррита (рис. 4, а), однозначно показывает, что именно в этих местах материал первым достигает предельного по прочности состояния и разрушается.

Таким образом, полная перекристаллизация стали  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ , уничтожающая литую структуру видманштеттова феррита, может при неблагоприятных режимах термообработки сохранить в ней плоские карбидные скопления, не позволяющие достигнуть регламентированных ГОСТом значений ударной вязкости даже при самых современных технологиях выплавки и раскисления этой стали. Определенных успехов можно добиться ускоренными режимами нагрева, препятствующими коагуляции карбидной фазы и одновременно повышающими метастабильность самих карбидов, гарантируя их растворение при изотермической выдержке отливок в аустенитной области.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпова Е.Ю. //МиТОМ. 1998. № 1. С. 20 – 23.
2. Ильинский В.А. //Литейное производство. 1997. № 4 – 5. С. 19.
3. Жуков А.А. Геометрическая термодинамика сплавов железа. – М.: Металлургия, 1979. – 228 с.

© 2012 г. Е.Ю. Карпова, Ю.И. Карпов, А.С. Леонченко  
Поступила 7 марта 2012 г.