



УДК 669.21

Поступила 05.10.2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛИТЫХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ 170XHM

Б. Б. ЗАРИЦКИЙ, А. С. САВИНОВ, Е. В. СКРИПКИН, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия, пр. Ленина, 38. E-mail: zaritskii.mg@yandex.ru
А. Н. АПРАКИН, ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков», г. Магнитогорск, Россия
К. С. ЭЛИДЖАРОВА, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия, пр. Ленина, 38

Рассмотрен вопрос по рационализации режимов термической обработки прокатных валков из заэвтектоидной стали 170XHM. Отмечено, что для условий ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков» такое решение без значительных финансовых затрат приведет к частичному решению проблемы лимитирующего звена по печам термической обработки, задействованных в технологическом цикле производства монометаллических прокатных валков из стали 170XHM.

Показано, что для решения поставленной задачи произведена адаптация математического аппарата, обеспечивающая прогнозирование теплового состояния бочки прокатного валка в процессе ее термообработки. Численное решение задачи теплопроводности методом конечных разностей в радиальных координатах позволило существенным образом уменьшить машинное время расчета цикла термической обработки, как следствие, привело к возможности увеличения количества пассивных экспериментов, направленных на рационализацию времени отжига прокатных валков.

Представлены данные по изменению теплофизических свойств материала стали 170XHM в температурном интервале 20–1100 °С, применяемые в качестве условия однозначности при прогнозировании теплового состояния прокатного валка, находящегося в рабочей зоне термической печи.

Полученные теоретические решения и экспериментальные данные положены в основу алгоритмов программы оценки теплового и напряженного состояния бочки прокатного валка TermoRoll V1.1.

Показано, что решение разработанного программного продукта позволило сократить время термической обработки валков из стали 170XHM на 7–12,3% в зависимости от диаметра бочки валка, кроме того, предложенные решения применены при проектировании технологического цикла термической обработки крупногабаритных валков диаметрами до 1450 мм.

Ключевые слова. Прокатный валок, заэвтектоидная сталь, компьютерное моделирование, рациональные режимы.

DETERMINATION OF RATIONAL MODES FOR HEAT TREATMENT OF CAST ROLLS MADE OF 170XHM GRADE OF HYPEREUTECTOID STEEL

B. B. ZARITSKY, A. S. SAVINOV, E. V. SKRIPKIN, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia, 38, Lenina ave. E-mail: zaritskii.mg@yandex.ru
A. N. APRAKIN, CJSC “Magnitogorsk Plant of Rolling Rolls”, Magnitogorsk, Russia
K. S. ELIDZHAROVA, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia, 38, Lenina ave.

The paper considers the issue of rationalizing the modes of heat treatment of rolls made of 170XHM grade of hypereutectoid steel. It is noted that for the conditions of CJSC Magnitogorsk Plant of Rolling Rolls, such a decision, without significant financial costs, will lead to a partial solution of the problem of the limiting link for heat treatment furnaces involved in the technological cycle of production of monometallic rolls.

It is shown that in order to solve the problem posed, an adaptation of the mathematical apparatus was carried out, which ensures the prediction of the thermal state of the mill roll barrel in the process of its heat treatment. The numerical solution of the problem of thermal conductivity by the method of finite differences in radial coordinates made it possible to significantly reduce the machine time for calculating the heat treatment cycle, as a result, led to the possibility of increasing the number of passive experiments aimed at rationalizing the time of annealing of the rolls.

The paper presents data on the change in the thermophysical properties of the 170XHM steel material in the temperature range 20–1100 °C used as a condition for unambiguity in predicting the thermal state of a rolling roll located in the working zone of a thermal furnace.

The obtained theoretical solutions and experimental data has formed the basis for the algorithms of the program for evaluating the thermal and stress state of the roll barrel TermoRoll V1.1.

It is shown that the solution of the developed software product made it possible to reduce the time of heat treatment of rolls made of 170KhNM steel by 7–12.3%, depending on the diameter of the roll barrel, in addition, the proposed solutions were applied in the design of the technological cycle of heat treatment of large rolls with diameters up to 1450 mm.

Keywords. Roll, hypereutectoid steel, computer simulation, rational modes.

Введение

Магнитогорский завод прокатных валков (ЗАО «МЗПВ») – сравнительно молодое основанное в 2004 г. динамично развивающееся предприятие, обеспечивающее оснастку прокатные станы как на предприятиях России, так и за рубежом. Годовой выпуск металлопродукции данного предприятия составляет порядка 16 тыс. т в год (рис. 1). Следует отметить, что за прошлые восемь лет тоннаж выпущенной продукции увеличился почти в 1,5 раза. Достаточно хороший показатель по соотношению цена-качество обеспечил предприятию широкую известность на отечественных и зарубежных рынках. Востребованность продукции ЗАО «МЗПВ» подтверждается тем, что даже в период общемирового спада производства 2020 г., связанного с действием COVID-19, мощности предприятия были полностью загружены и спада производства на нем не произошло. Лимитирующим звеном в технологической цепочке производства прокатных валков на ЗАО «МЗПВ» являются термические печи, отжиг валков в которых с момента посадки до выхода из печи может достигать 500 ч и более. Как следствие, это приводит к невозможности увеличения выхода готовой продукции. Решение данной проблемы возможно за счет значительных капитальных вложений в строительство новых печей, а также созданием производственных площадок и инфраструктуры под них либо рационализацией режимов термической обработки прокатных валков с целью уменьшения времени их выдержки в термической печи, что требует только затрат на НИОКР.

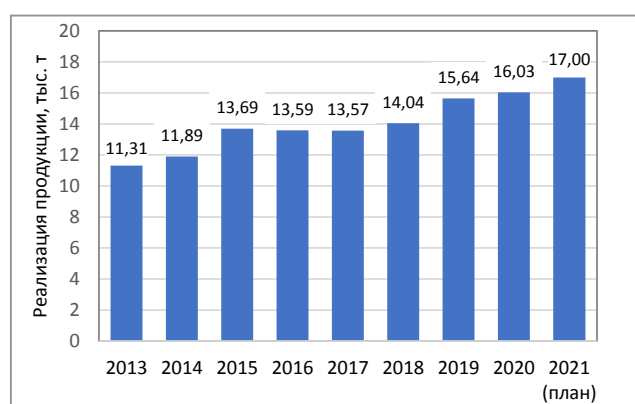


Рис. 1. Реализация продукции ЗАО «МЗПВ», тыс. т

Теоретическая часть

Специалистами ЗАО «МЗПВ» совместно с ФГБОУ ВО МГТУ им. Г.И. Носова была проведена работа по рационализации режимов термической обработки прокатных валков. Первоначально исследован материал валковой заэвтектоидной стали 170ХНМ, используемой для значительной части выпускаемой продукции. Номенклатура прокатных валков на момент создания технического задания приведена в табл. 1.

Анализ времени, затраченного на термообработку монометаллических валков из данного материала, показал, что время, затраченное на термообработку изделия, варьируется от 58,7 до 60,1 % от всего технологического цикла изготовления изделия.

Таблица 1. Номенклатура прокатных валков, изготавливаемых на ЗАО «МЗПВ»

Типоразмеры, мм				Процент от времени изготовления, затраченный на термообработку
чистовой		в отливке		
диаметр	длина бочки	диаметр	длина бочки	
736	1200	800	1350	58,7–60,1
744	1200	800	1350	
745	1200	800	1350	
870	1200	930	1300	
850	1700	970	1850	
853	1700	970	1850	
860	1700	970	1850	
869	1200	970	1300	
885	1700	970	1800	
934	1200	1030	1350	
938	1200	1030	1350	
944	1200	1030	1350	
950	1200	1030	1350	
1022	1900	1095	2080	

Уменьшение времени отжига может привести к возникновению существенных термических напряжений и, как следствие, к нарушению сплошности тела отливки. Было проведено термоаналитическое исследование материала стали 170ХНМ (рис. 2), которое показало значительную величину экзотермического эффекта в зоне аустенического превращения.

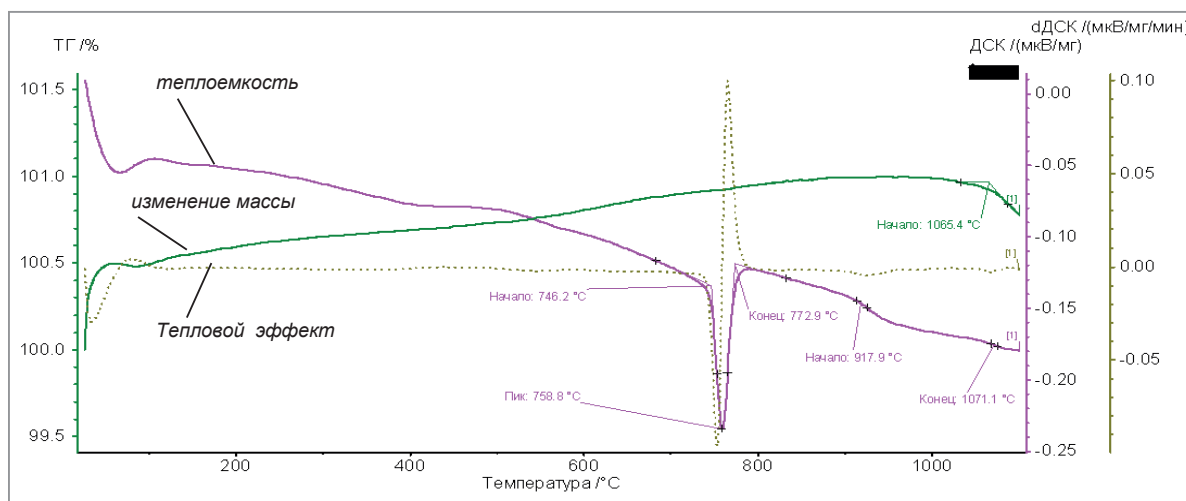


Рис. 2. Термограмма нагрева стали марки 170ХНМ

На всем остальном протяжении кривой, вплоть до нагрева 1100 °C, значительных тепловых эффектов не наблюдалось. Данный тепловой эффект впоследствии был учтен при расчете теплового состояния прокатного вала в процессе его термообработки.

Для прогнозирования теплового поля исследуемого изделия в зоне термической печи использовали разностный метод решения задачи теплопроводности в радиальных координатах [1, 2]. Данный метод был выбран с целью ускорения процесса принятия аналитического решения по изменению режима термической обработки. Аналогичные решения, основанные на применении метода конечных элементов, требуют значительно больше машинного времени, что, несмотря на их большую точность, являлось менее привлекательным для исследования поставленной проблемы. В расчете в качестве условий однозначности использовали температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности материала 170ХНМ (рис. 3). При этом температуру изменения теплофизических характеристик определяли как в литом состоянии, так и после первого пика нагрева термической обработки, во время которого происходит растворение карбидов.

Полученные данные закладывали в математический аппарат расчета теплового состояния бочки прокатного вала при его нахождении в рабочей зоне термической печи. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по нагреву вала с диаметром бочки 970 мм из стали 170ХНМ, а также температурное задание на нагрев в литом состоянии показаны на рис. 4, 5.

В целях сохранения конфиденциальности численных значений температурных режимов температуры на графиках отображены в условных единицах.

Как видно из рис. 4, совпадение расчетной и экспериментальной кривой достаточно велико, что позволило сделать вывод о возможности использования этих алгоритмов для прогнозирования теплового состояния прокатного вала при его термообработке.

Оценку динамики силового взаимодействия внутренних слоев бочки прокатного вала, связанных с температурным градиентом, возникающим при термоциклическом изменении температуры рабочего пространства печи, осуществляли по возникающим внутренним деформациям, методика расчета которых детально описана в [3, 4]

Данные алгоритмы были использованы для создания программы TermoRollv1.1, которая позволяет оценивать температурное состояние бочки прокатного вала в процессе ее термообработки, прогнозировать температурные градиенты и деформации по радиусу (рис. 6, а, б).

С использованием данной программы производили расчеты термических режимов обработки прокатных валков из стали 170ХНМ, при этом время одного расчетного цикла не превышало 8–12 мин и значительно зависело от выбранного шага по времени, использованного в расчетах. Такая незначительная величина занятого машинного времени позволяет проводить достаточно значительное число

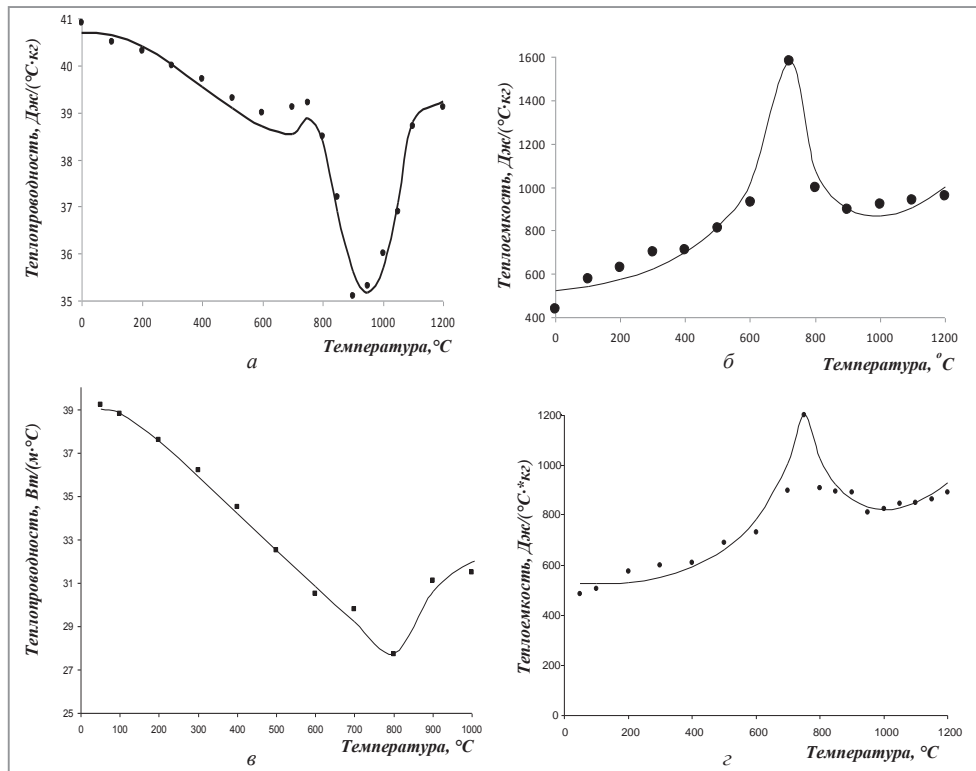


Рис. 3. Температурное изменение теплофизических свойств стали 170ХНМ:
а, б – в литом состоянии; в, г – после растворения карбидов

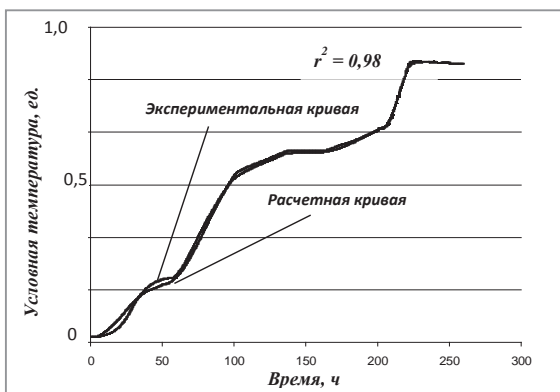


Рис. 4. Сравнение расчетной и экспериментальной кривой, полученной при нагреве вала с диаметром бочки 970 мм из стали 170ХНМ

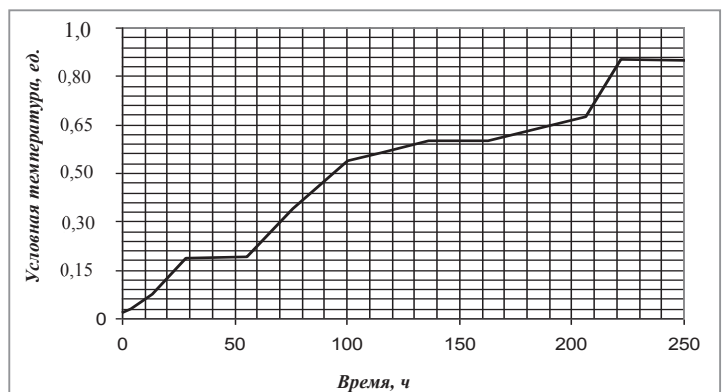
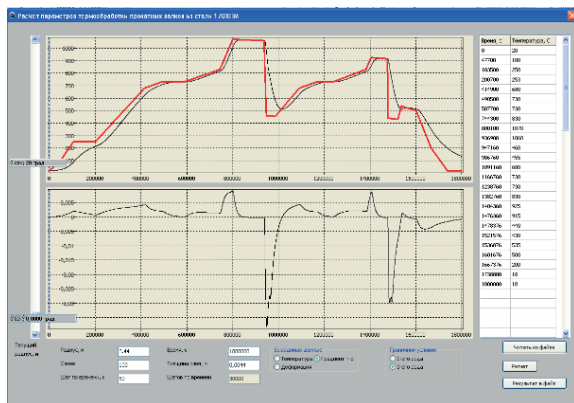
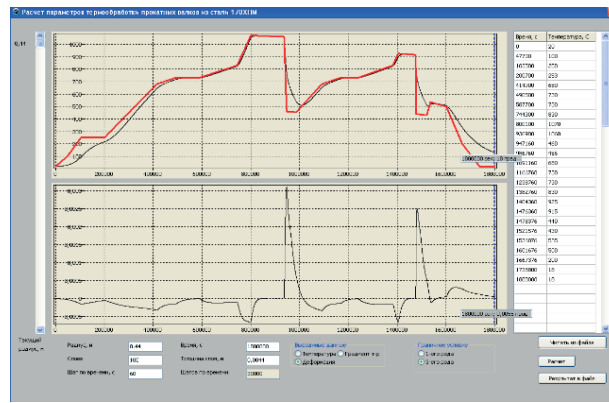


Рис. 5. Задание на нагрев прокатного вала с диаметром бочки 970 мм из стали 170ХНМ



а



б

Рис.6. Окно программы ThermoRollv1.1: а – продольная деформация слоев бочки прокатного вала; б – температурный градиент

пассивных экспериментов, что приводит к весьма удовлетворительному качеству полученных результатов. На рис. 7 показан первоначальный измененный режим термической обработки прокатного вала из стали 170ХНМ с диаметром бочки 1095 мм в отливке. Расчет проводили с помощью программы TermoRollv1.1.

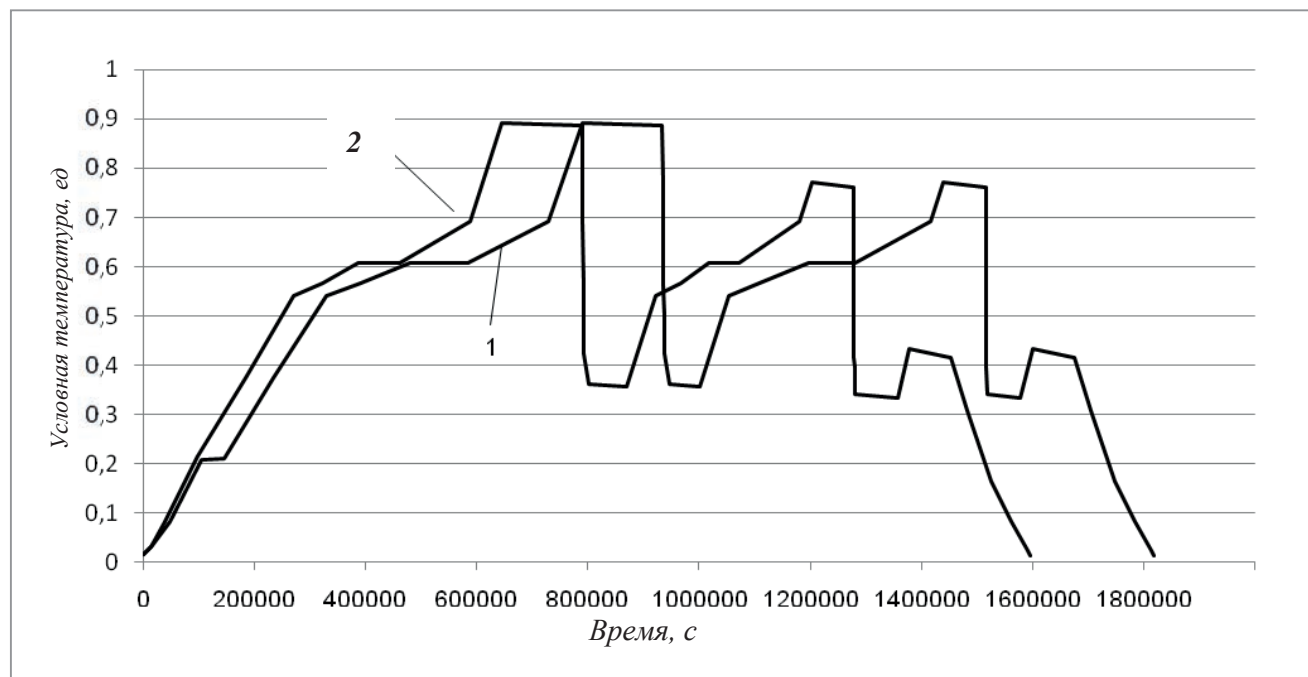


Рис. 7. Режимы термической обработки прокатного вала размером 1095x2080 мм из стали 170ХНМ:
 1 – базовый режим термической обработки прокатного вала;
 2 – режим термической обработки прокатного вала после оптимизации

Как видно из рисунка, в результате проведенных исследований удалось снизить время, затраченное на термообработку, на 12,3%. Используя представленные инструменты, на ЗАО «МЗПВ» были изменены режимы термической обработки и для других типоразмеров прокатных валков из стали 170ХНМ.

Данные по сокращению времени термической обработки приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сокращение времени термообработки

Типоразмеры, мм				Сокращение времени на термообработку, %
чистовой		в отливке		
диаметр	длина бочки	диаметр	длина бочки	
736	1200	800	1350	7
744	1200	800	1350	
745	1200	800	1350	
870	1200	930	1300	11,6
850	1700	970	1850	10,2
853	1700	970	1850	
860	1700	970	1850	
869	1200	970	1300	
885	1700	970	1800	11,8
934	1200	1030	1350	
938	1200	1030	1350	
944	1200	1030	1350	
950	1200	1030	1350	12,3
1022	1900	1095	2080	

Лабораторией ЗАО «МЗПВ» было выполнено исследование по изменению микроструктуры прокатных валков из стали 170ХНМ в сравнении с существующими показателями. Полученные данные приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение микроструктуры стали 170ХНМ до и после изменения режима термической обработки

Типоразмеры, мм				Микроструктура (средний показатель)					Твердость (средний показатель)	Микроструктура (средний показатель после изменения)					Твердость (средний показатель)
чистовой		в отливке		ГОСТ 8233-56 шкала 1	ГОСТ 8233-56 шкала 2	ГОСТ 8233-56 шкала 5	ГОСТ 8233-56 шкала 6	ГОСТ 5639-82 шкала 1		ГОСТ 8233-56 шкала 1	ГОСТ 8233-56 шкала 2	ГОСТ 8233-56 шкала 5	ГОСТ 8233-56 шкала 6	ГОСТ 5639-82 шкала 1	
диаметр	длина бочки	диаметр	длина бочки	пластинчатый перлит	зернистый перлит	карбидная сетка	карбидная неоднородность	величина зерна	ГОСТ 9012-59	пластинчатый перлит	зернистый перлит	карбидная сетка	карбидная неоднородность	величина зерна	ГОСТ 9012-59
736	1200	800	1350	1–4 балл	1–4 балл	4,5 балл	4,5 балл	5–9 номер	315–325 НВ	1–4 балл	1–4 балл	4 балл	4 балл	7–8 номер	320–345 НВ
744	1200	800	1350												
745	1200	800	1350												
870	1200	930	1300												
850	1700	970	1850												
853	1700	970	1850												
860	1700	970	1850												
869	1200	970	1300												
885	1700	970	1800	1–4 балл	1–4 балл	4,5 балл	4,5,6 балл	5–9 номер	315–325 НВ	1–4 балл	1–4 балл	4 балл	4,5 балл	6–7 номер	320–345 НВ
934	1200	1030	1350												
938	1200	1030	1350												
944	1200	1030	1350												
950	1200	1030	1350												
1022	1900	1095	2080												

Как видно из таблицы, ускорение времени температурной обработки не привело к значительному изменению микроструктуры материала стали 170ХНМ, при этом производство прокатных валков по новым, рациональным режимам термической обработки не приводило к нарушению сплошности тела литой заготовки.

Полученные решения позволили разработать режим термической обработки для крупногабаритных валков с диаметром бочки до 1450 мм в отливке и длиной 2750 мм. Производство этих отливок успешно освоено на ЗАО «МЗПВ». Номенклатура и микроструктура данных отливок приведены в табл. 4

Таблица 4. Новая номенклатура крупногабаритных прокатных валков ЗАО «МЗПВ»

Типоразмеры, мм				Микроструктура (средний показатель)					Твердость (средний показатель)
чистовой		в литом состоянии		пластинчатый перлит	зернистый перлит	карбидная сетка	карбидная неоднородность	величина зерна	
диаметр	длина бочки	диаметр	длина бочки						
1004	1500	1100	1700	1–4 балл	1–4 балл	4 балл	4 балл	7–9 балл	320–340 НВ
1090	2600	1180	2750	1–4 балл	1–4 балл	4 балл	3,4 балл	6–8 балл	350–360 НВ
1340	2600	1450	2750	1–4 балл	1–4 балл	4 балл	4 балл	5–6 балл	345–365 НВ
1170	2570	1280	2750	1–4 балл	1–4 балл	4 балл	4 балл	4–5 балл	320–340 НВ
1187	2570	1280	2750	1–4 балл	1–4 балл	4 балл	4 балл	4–5 балл	320–345 НВ

Разработанный программный продукт в настоящее время активно используется технологами ЗАО «МЗПВ» и позволяет усиливать корректировку термических режимов валков из стали 170ХНМ, а также обеспечивать возможность создания рациональных режимов при освоении новой номенклатуры изделий.

Выводы

1. В результате проведенной работы адаптирован математический аппарат, обеспечивающий прогнозирование теплового состава бочки прокатного валка в процессе ее термообработки. Адекватность полученного математического аппарата подтверждена сравнением расчетных и экспериментальных данных, полученных в ходе промышленного эксперимента на ЗАО «МЗПВ».

2. Получены экспериментальные температурные зависимости теплофизических свойств стали 170ХНМ, что позволило сделать адекватную оценку теплового состояния прокатного валка при его нахождении в рабочем пространстве термической печи.

3. Разработана программа TermoRollv1.1, обеспечивающая анализ напряженного и теплового состояния прокатного валка в процессе его термообработки с минимумом затраченного машинного времени.

4. Проведена рационализация существующих на ЗАО «МЗПВ» режимов термической обработки прокатных валков с диаметром бочки от 736 до 1022 мм, сокращение времени отжига составило 7–12,3%. Сравнение микроструктуры стали 170ХНМ после существующих и ускоренных режимов термообработки показало незначительные изменения в сторону улучшения качества получаемых изделий.

5. Освоена новая номенклатура крупногабаритных валков из стали 170ХНМ с диаметром бочки от 1100 до 1450 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кузнецов, Г. В.** Разностные методы решения задач теплопроводности / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
2. **Арутюнов, В. А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учеб. для вузов / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
3. Расчет термонапряженного состояния нагрева стального цилиндрического объекта / В. М. Колокольцев, А. С. Савинов, С. М. Андреев, К. В. Ангольд // Вест. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. 2019. Т. 17. № 1. С. 37–45.
4. **Савинов А. С., Харченко М. В., Ангольд К. В., Рудь К. И.** Прогнозирование термонапряженного состояния цилиндрического объекта в процессе его термообработки // Теория и технология металлургического производства. 2019. № 2(29). С. 4–9.