

## Индукторы для закалки валков прокатных станов

ДЕМИДОВИЧ В.Б., ПЕРЕВАЛОВ Ю.Ю.

*Рассмотрены проектирование оборудования и вопросы технологии индукционной термообработки валков прокатных станов. Сформулированы необходимые условия для обеспечения качества термообработки: минимальные отклонения требуемой твердости по длине бочки и глубине закаленного слоя, отсутствие опасных термических и структурных напряжений, приводящих к разрушению вала, как в процессе термообработки, так и после. Разработаны компьютерные модели для решения этих задач. Рассматривается универсальный метод цифрового проектирования и управления тепловыми режимами в индукционных установках термообработки. Обосновывается использование галетных индукторов с выбором частоты тока при индукционной закалке.*

**Ключевые слова:** валки прокатных станов, индукционная закалка, численные модели, галетные индукторы, оптимальные проектирование и управление

Листовой прокат занимает существенную долю в металлургическом производстве. Качество поверхностей листовых сталей в значительной степени зависит от процесса их прокатки и последующей обработки (снятие окалины, травление) и, в первую очередь, от качества поверхностей рабочих и опорных валков прокатных станов. Основные требования, предъявляемые к валкам для проката таких сталей: высокое сопротивление к износу и циклическая термическая усталость, стойкость к образованию трещин и сколов поверхности, в особенности при высоких и неравномерно распределенных давлениях на поверхности бочки вала.

Попытки использования индукционного нагрева при термообработке валков прокатных станов начались почти 100 лет назад. Впервые индукционный нагрев для поверхностной закалки валков был применен в начале 1920-х гг. компанией Midvale Steel Company (USA) [1]. Однако из-за неразвитости техники индукционного нагрева и отсутствия понимания металлургических особенностей при его использовании полномасштабного внедрения долгие годы не происходило.

Широкое распространение поверхностная индукционная закалка получила только с середины 1930-х гг. в США и СССР [1, 2]. Усилиями русских и американских инженеров-исследователей удалось внедрить индукционную поверхностную закалку на автомобильных и танковых заводах. Вначале это были машиностроительные детали небольших размеров — втулки, штоки, оси, шестеренки и валы малого диаметра, коленчатые валы и пр. Высокая прочность поверхности и относительная вязкость основной массы металла позволяли снизить хрупкость и деформацию после индукционной поверхностной закалки деталей.

В СССР развитие этого метода для термообработки коленчатых валов в автомобильной промышленности и его научное обоснование были связаны с лабораторией В.П. Володина в Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ) (ныне Санкт-Петербургском электротехническом университете) и образованном в 1947 г. на базе этой лаборатории Всесоюзном научно-исследовательском институте токов высокой частоты (ВНИИТВЧ).

До появления компьютерной техники в ЛЭТИ применялись аналитические методы расчета индукторов под закалку [3, 4], проводились металлургические исследования [5, 6], позволяющие выявить особенности индукционного метода закалки. С появлением в 1970-е гг. доступной для научной и инженерной деятельности вычислительной техники стали быстро развиваться численные методы расчета и моделирования электромагнитных и температурных полей при индукционном нагреве, в том числе при закалке [7, 8].

Существующие способы индукционной закалки можно разделить на два типа: одновременная и непрерывно-последовательная [4]. Первый способ используется при закалке небольших деталей, второй — при закалке длинномерных и крупногабаритных изделий.

Индукционная закалка валков большого диаметра существенно отличается от закалки токами высокой частоты (ТВЧ). Исторически закалка валков и в СССР, и на Западе осуществлялась токами промышленной частоты (ТПЧ) 50/60 Гц. Глубина закалки при этом составляет десятки миллиметров и доходит до 100 мм в зависимости от прокаливаемости стали. В связи с этим можно выделить закалку ТПЧ как один из видов индукционной закалки. Сейчас именно закалка ТПЧ чаще всего

применяется при производстве валков. После закалки обычно следует процесс отпуска, цель которого – снижение хрупкости закаленного слоя валка.

При индукционной термообработке валков прокатных станов используют непрерывно-последовательный метод. Деталь устанавливают в станок и зажимают в центрах, для обеспечения равномерности нагрева по периметру валок вращают с постоянной скоростью. Закалка происходит при поступательном перемещении валка со скоростью, начиная от долей миллиметра в секунду [9]. При таком способе движения в индуктор последовательно попадает один элемент валка за другим. За индуктором на некотором расстоянии расположен спрейер, который жестко связан с индуктором. Таким образом, нагревается и охлаждается вся поверхность бочки валка.

Преимущества указанного способа закалки: небольшая мощность источника питания; малая деформация закаливаемых деталей (одновременно нагреваются лишь отдельные небольшие ее участки); возможность закаливать определенную область валка (закаливается только бочка валка); возможность при соответствующей системе управления контролировать температуру нагретого металла, а также его охлаждение.

К основному недостатку способа можно отнести трудности достижения большой глубины закаленного слоя. Для ее увеличения необходимо увеличивать время нахождения нагреваемой зоны под индуктором, чтобы за счет теплопроводности возросла глубина прогрева. Это можно сделать за счет либо снижения скорости перемещения детали, либо увеличения длины индуктора, при этом необходимо помнить, что нельзя допускать перегрева поверхности валка. Снижение скорости перемещения может привести к появлению тепловой волны перед индуктором (что вызовет нестационарный режим нагрева) или к проблеме подсуживания стали в месте перехода от индуктора к спрейеру.

Валки прокатных станов изготавливаются из сталей с высокой прокаливаемостью. Они должны обладать высокой прочностью поверхностных слоев и равномерным распределением твердости по длине валка. Глубина рабочей зоны (закаленного слоя) выбирается на основании технологических требований, предъявляемых к валку прокатного стана, и должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить переточку валка.

Разработка оборудования и технологии индукционной термообработки представляет серьезную проблему, от решения которой зависят качество и экономические показатели получения валков прокатных станов и, в конечном итоге, проката.

**Критерии проектирования индукторов для закалки.** Проектирование оборудования и технология индукционной термообработки валков прокатных станов осуществляются с учетом следующих критериев:

1. Обеспечение качества термообработки. Необходимые условия: требуемая твердость по длине бочки и глубине закаленного слоя с минимальными отклонениями, отсутствие опасных термических и структурных напряжений, приводящих к разрушению валка как в процессе термообработки, так и после.

2. Энергоэффективность. Во многом определяется необходимым теплосодержанием металла бочки валка и тепловыми потерями в процессе нагрева перед закалкой.

3. Минимизация габаритов индукционного оборудования и его стоимости. Правильный выбор частоты тока современных источников питания позволяет решить эту проблему.

4. Производительность. При правильном проектировании и выборе оборудования этот показатель связан с энергоэффективностью. Максимальная энергоэффективность в этом случае обеспечивается минимальным временем термообработки, т. е. максимальной производительностью.

Высокая стоимость валков прокатных станов делает критерий обеспечения их качества преобладающим. Остальные критерии играют подчиненную роль и могут рассматриваться только после выполнения основного.

Большие габариты валков (длина – до нескольких метров) не позволяют проводить одновременную закалку по всей длине бочки из-за требуемой для этого значительной мощности и возникающих трудностей с одновременным охлаждением. Поэтому наиболее рационально использовать непрерывно-последовательную закалку с вертикальным расположением валка и вращением его вокруг оси. Общий вид такой установки изображен на рис. 1. Диаметр бочки валка  $D$  достигает 2 м, а длина  $L$  – 5 м. Рассматриваемая конструкция валка и блока индуктора(ов) со спрейером для закалки представлены на рис. 1 схематично.

Необходимая мощность индукторов зависит от диаметра и длины бочки валка. Возможно использование одноиндукторной и двухиндукторной схем питания. Во втором случае необходимы два преобразователя частоты. Это усложняет общую схему питания, но повышает гибкость в управлении нагревом и дает возможность осуществлять выдержку металла в определенном диапазоне температур и увеличить время для улучшения свойств металла, например, растворения карбидной сетки.

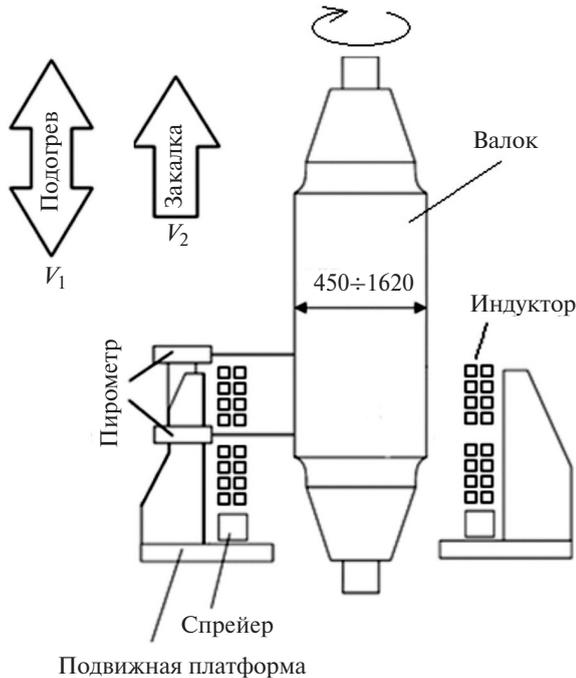


Рис. 1. Схема индукционной закалки крупногабаритных валков

**Требования к температурному полю при закалке вала.** Для получения требуемого распределения твердости и нужной структуры металла непосредственно перед интенсивным водяным охлаждением необходимое распределение температуры для большинства валковых сталей по сечению на толщине зоны закалки вала должно находиться в определенном температурном интервале, например (рис. 2):

$$T_{\max} > T > T_{\text{сз}}, \quad (1)$$

где  $T_{\max}$  – температура, превышать которую при нагреве нежелательно из-за быстрого роста зерна;  $T_{\text{сз}}$  – температура нагрева для получения закалки на мартенсит при критической скорости охлаждения.

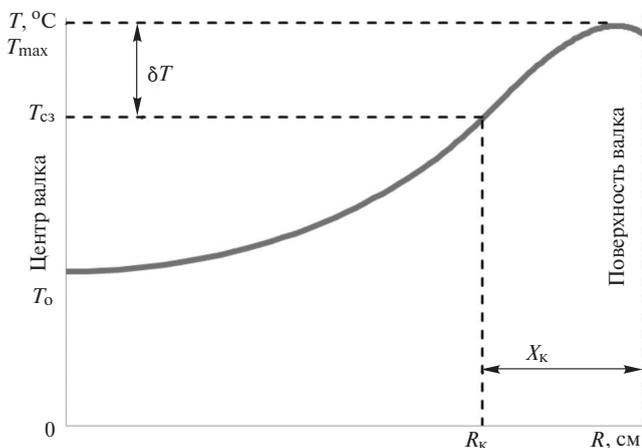


Рис. 2. Требуемое распределение температуры по сечению вала перед интенсивным охлаждением водой

Однако достижение требуемой твердости по глубине закалки и длине бочки вала – только одна часть решения проблемы получения валков хорошего качества.

Необходимо исключить разрушения вала как в процессе закалки, так и после.

Распределение температуры по сечению вала сильно влияет как на термические напряжения в процессе нагрева перед закалкой, так и на остаточные термические напряжения после закалки. Необходимо также учитывать время и интенсивность охлаждения во избежание самоотпуска. Поэтому определение требуемого распределения температуры по радиусу вала после индукционного нагрева является сложной задачей, от которой зависит качество термообработки.

Однако решить эту проблему, используя только накопленный опыт индукционной закалки валков на промышленной частоте, невозможно. Последние десятилетия характеризуются появлением новых тиристорных и транзисторных источников питания с цифровым управлением технологическим процессом, что дает возможность обеспечивать лучшее качество термообработки. Экспериментальные исследования чрезвычайно затратны, и при наличии широкой номенклатуры валков с разными значениями диаметра и длины бочки их практически невозможно реализовать. Поэтому главную роль при проектировании установок и разработке системы управления играет моделирование технологического процесса.

**Цифровые модели процесса закалки.** Разработаны базовые модели индукционной термообработки валков прокатных станов [8]. Они основаны на моделировании протекающих при термообработке физических процессов, таких как теплопроводность, теплообмен, электромагнитные явления, фазовые превращения и напряженное состояние. Для моделирования используются численные методы конечных элементов (МКЭ), методы интегральных уравнений (МИУ) и их комбинации. В комплексные модели также включены модели источников питания. Поэтому можно анализировать вопросы согласования источников питания с индукторами, изменения частоты тока в процессе термообработки. Разработана также база данных тепло- и электрофизических свойств металлов, используемых при изготовлении валков прокатных станов. Этот инструмент чрезвычайно эффективен как при проектировании индукционного оборудования, так и разработке технологии и системы управления комплексом.

Технология достижения требуемого распределения температуры по радиусу во многом определя-

ется диаметром закаливаемого изделия и маркой стали. Непрерывно-последовательная закалка за один проход успешно реализуется для изделий с относительно небольшим диаметром. Для каждой марки стали существует свой диаметр, выше которого за один проход не удаётся осуществлять закалку на требуемую глубину. Например, чтобы прогреть валок диаметром бочки 1200 мм на глубину 100 мм до температуры 750 °С необходимо несколько часов (рис. 4) независимо от частоты тока. При непрерывно-последовательной закалке скорость относительного перемещения индуктора относительно валка составляет сотые доли миллиметра в секунду, что приводит к существенному снижению температуры на поверхности при достижении зоны спрейера. А если учесть, что для снижения остаточных напряжений необходимо нагреть середину валка до 500÷600 °С, реализация такой технологии за один проход окажется практически невозможной.

Эту ситуацию может несколько изменить так называемая двухчастотная закалка. Можно сократить время прогрева на требуемую глубину, однако проблема прогрева середины валка останется.

Таким образом, для закалки валков с большим диаметром необходим предварительный подогрев. Он может осуществляться в отдельной печи или непосредственно на самой установке индукционного нагрева путем многократного возвратно-поступательного движения валка или индуктора. Возможна комбинация подогрева в печи и индукторе, что, как показывает анализ, наиболее экономично и эффективно. После достижения необходимого уровня подогрева осуществляется закалочный проход, который может проходить на частоте, отличной от частоты тока при подогреве.

**Выбор частоты тока и конструкции индуктора.** В установках индукционной термообработки индуктор является важнейшей и неотъемлемой частью установки и технологии в целом. Частота тока и состав оборудования, входящего в установку индукционной закалки, сильно влияют на конструкцию индуктора. При вертикальном исполнении станка для закалки крупногабаритных валков индукторы могут находиться или на подвижных платформах, которые движутся вдоль поверхности бочки валка, или на стационарных платформах, а сами валки движутся, проходя через индукторы. Схема движения валка при неподвижных индукторах используется для закалки относительно небольших валков с малыми диаметрами. Достоинство схемы заключается в возможности установки в непосредственной близости от индуктора и при жесткой связи с ним закалочного трансформатора и исполь-

зовании упрощенной конструкции индукторов в виде одновитковых колец.

Размещение же на подвижной платформе громоздких закалочных трансформаторов крайне затруднительно. Индукторы должны быть высоковольтными, чтобы уменьшить токи в гибких подводящих кабелях. Это означает, что для согласования с высоковольтным напряжением преобразователей частоты индукторы должны быть многовитковыми. При этом ток в короткой сети (водоохлаждаемые кабели от конденсаторной батареи до индукторов) в этом случае существенно уменьшается и не превышает обычно 4 кА при мощности преобразователя до 1600 кВт.

Перед закалкой практически всей номенклатуры валков с большим диаметром нагрев проходит в две стадии: нагрев в печи и/или предварительный подогрев за несколько проходов индукторов на одной частоте и последний проход индукторов непосредственно перед закалкой с частотой тока, задаваемой в зависимости от глубины закалки. Для достижения требуемого распределения температуры по радиусу наиболее важен последний проход. Обеспечить необходимое распределение температуры по радиусу можно за счет выбора соответствующей частоты тока и режимов нагрева (мощность, скорость движения). Рекомендуются выбирать такую частоту тока, чтобы глубина проникновения тока в «горячую» сталь равнялась или была больше глубины закалки. Из таблицы видно, что при глубокой закалке целесообразно выбирать значение частоты в диапазоне 50÷175 Гц.

**Глубина проникновения (мм) тока в сталь на разных частотах**

Частота, Гц	Сталь, 20 °С	Сталь, 900 °С
50	6,79	76,5
75	5,54	62,5
100	4,80	54,0
150	3,90	44,0
200	3,40	38,0
300	2,80	31,2
400	2,40	27,0
500	2,10	24,0
1000	1,50	17,0

На стадии подогрева также желательно выбирать низкие значения частоты. Однако в «холодную» сталь (до температуры ниже точки Кюри) глубина проникновения более чем на порядок меньше глубины проникновения в «горячую» сталь и мало влияет на распределение температуры по

радиусу. Целесообразно руководствоваться такими факторами, как габариты конденсаторной батареи, надежность и стоимость оборудования, удобство согласования с индуктором. Выбор частоты на этапе подогрева связан с особенностями технологического процесса. На этапе подогрева блок «индуктор–спрейер» совершает «покачивания» (возвратно-поступательное движение) — вверх и вниз.

Поскольку индуктор со спрейером и шланги вместе с токоподводящим кабелем находятся на подвижной платформе, имеет смысл уменьшать их массогабаритные показатели. Обычно подогрев (и закалка) в предыдущих поколениях установок осуществлялся на промышленной частоте 50/60 Гц, а любое повышение частоты приводит к уменьшению массы и габаритов установок. Еще одним аргументом в пользу отказа от частоты 50 Гц при подогреве является тот факт, что значение распределения температуры по радиусу валка практически не отличается при использовании частоты тока 100 и 50 Гц при той же мощности. Поэтому для снижения массогабаритных показателей оборудования и его стоимости при подогреве валков можно рекомендовать частоту 100 Гц.

Частота тока начинает оказывать большее влияние при нагреве валка под закалку. На закалочном проходе целесообразно изменять значение частоты в соответствии с требованиями к глубине закаленного слоя.

При установке валков массой до 60 т в вертикальном положении блок индукторов и спрейера находится в станке в крайнем нижнем положении, что накладывает ограничения по высоте (длине) индукторов. Требование по сокращению высоты (длины) индукторов приводит к многослойности конструкции, которую удобно реализовывать в виде галетных индукторов (рис. 3). В большинстве случаев достаточно использовать два слоя. Галеты включаются последовательно и параллельно и

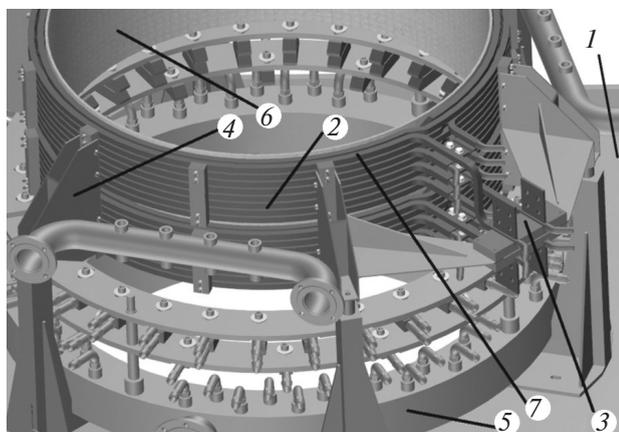


Рис. 3. Устройство блока «индуктор–спрейер»: 1 – основание; 2 – галетный индуктор; 3 – колодки и шпунты подключения воды; 4 – фиксаторы индуктора; 5 – спрейер; 6 – футеровка

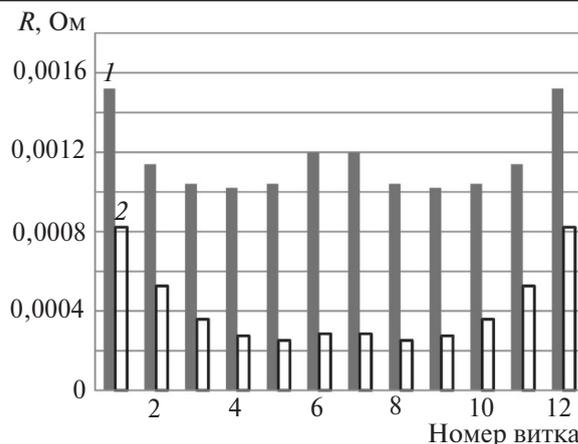


Рис. 4. Активное сопротивление индуктора из трубки 30×30×5 мм на частоте 100 Гц, диаметр валка 1200 мм, нагрузка магнитная: 1 – внутренний слой; 2 – внешний слой

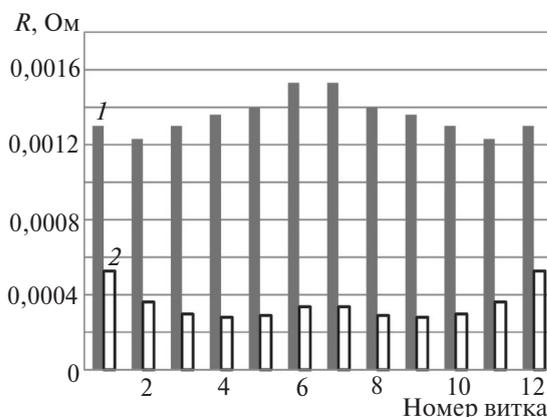


Рис. 5. Активное сопротивление индуктора из трубки 30×30×5 мм на частоте 100 Гц, диаметр валка 1400 мм, нагрузка магнитная: 1 – внутренний слой; 2 – внешний слой

обеспечивают высокую гибкость при согласовании индукторов с источниками питания.

Преимущество галетного индуктора в следующем: как минимум в два раза сокращается (высота) длина индуктора; индукторы набираются из отдельных галет, что удобно при ремонте; возможность выбора поперечного сечения медных трубок для снижения электрических потерь в индукторах; возможность согласования нагрузки с источником питания изменением числа галет в индукторе.

На рис. 4 и 5 представлено активное сопротивление индуктора из галет, выполненного из медной трубки 30×30×5, внутренний диаметр индуктора равен 1430 мм, частота источника питания 100 Гц при температуре поверхности валка ниже точки Кюри (рис. 4) и выше точки Кюри (рис. 5). Заметно, как сильно изменилось сопротивление каждого отдельного витка при переходе через точку Кюри, когда нагрузка стала немагнитной.

Также сильно меняется индуктивность индуктора в процессе нагрева под закалку, что приводит к дрейфу частоты тока при питании от полупроводниковых преобразователей частоты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muehlbauer A. History of Induction Heating and Melting. Vulkan Verlag, 2008.
2. Володин В.П. Поверхностная закалка индукционным способом. М.: Metallurgizdat, 1939, 244 с.
3. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974, 264 с.
4. Шамов А.Н., Бодажков В.А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. Л.: Машиностроение, 1974, 280 с.
5. Кидин И.Н. Термическая обработка при индукционном нагреве. М.: Metallurgizdat, 1950, 316 с.
6. Головин Г.Ф., Замятнин М.М. Высокочастотная термическая обработка. Вопросы металловедения и технологии, 3-е изд. Л.: Машиностроение, 1990, 239 с.
7. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988, 280 с.
8. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013, 160 с.
9. Вдовин К.Н., Гималетдинов Р.Х., Колокольцев В.М., Цыборов С.В. Прокатные валки: Монография. Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет, 2005, 543 с.

[24.12.2018]

Elektrichestvo, 2019, No. 3, pp. 65–70

DOI:10.24160/0013-5380-2019-3-65-70

## Inductors for Quenching Rolling Mill Rollers

DEMIDOVICH Viktor B. (St. Petersburg State Electrical Engineering University «LETI», St. Petersburg, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

PEREVALOV Yuriy Yu. (LLC «INTERM», St. Petersburg, Russia) – Engineer-designer; Assistant of Department of St. Petersburg State Electrical Engineering University «LETI»

Matters concerned with designing the equipment of and technology for induction thermal treatment of rolling mill rollers. Conditions necessary for assuring the thermal treatment quality are formulated: deviations from the required hardness over the roller body length and over the hardened layer depth shall be kept to a minimum, and there shall be no dangerous thermal and structural stresses able to cause roller fracture either during and after its thermal treatment. Computer models for solving these problems are developed. A universal approach to computer-aided designing and controlling the thermal operation modes in induction thermal treatment installations is considered. The use of wafer-type inductors with selecting the current frequency for induction quenching is substantiated.

Key words: rolling mill rollers, induction quenching, numerical models, wafer-type inductors, optimal designing and control

## REFERENCES

1. Muehlbauer A. History of Induction Heating and Melting. Vulkan Verlag, 2008.
2. Volodin V.P. Poverkhnostnaya zakalka induktsionnym sposobom (Induction surface quenching). Moscow, Metallurgizdat, 1939, 244 p.
3. Slukhotskiy A.Ye., Ryskin S.Ye. Induktory dlya induktsionnogo nagreva (Inductors for induction heating). Leningrad, Energiya, 1974, 264.
4. Shamov A.N., Bodazhkov V.A. Proektirovaniye i ekspluatatsiya vysokochastotnykh ustanovok (Designing and operation of high-frequency installations). Leningrad, 1974, 280.
5. Kidin I.N. Termicheskaya obrabotka pri induktsionnom nagreve (Induction heating thermal treatment). Moscow, Metallurgizdat, 1950, 316 p.
6. Golovin G.F., Zamyatnin M.M. Vysokochastotnaya termicheskaya obrabotka. Voprosy metallovedeniya i tekhnologii (High-frequency thermal treatment. Metallurgical science and technology issues). 3d edit. Leningrad, Mashinostroeniye, 1990, 239 p.
7. Nemkov V.S., Demidovich V.B. Teoriya i raschet ustroystv induktsionnogo nagreva (The oryand design of induction heating devices). Leningrad, Energoatomizdat, 1988, 280 p.
8. Demidovich V.B., Chmilenko F.V. Komp'yuternoe modelirovaniye ustroystv induktsionnogo nagreva (Computer modeling of induction heating devices). St. Petersburg, Publ. of St. Petersburg State Electrical and Technical University, 2013, 160 p.
9. Vdovin K.N., Gimaletdinov R.Kh., Kolokol'tsev V.M., Styborov S.V. Prokatnye valki (Rolling rolls). Magnitogorsk, Publ. of Magnitogorsk State Technical University, 2005, 543 p.

[24.12.2018]