

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74.042

Юмабаев А.А., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Троянов А.В., Чернов В.П., Дубровин В.К.

ОЦЕНКА ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛИТЫХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКАХ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. В статье рассмотрено решение практической задачи по управления температурным градиентом в прокатном валке в процессе термической обработки с целью прогнозирования и предотвращения разрушения изделия в термической печи. Представлен комплекс технологических мероприятий для устранения трещинообразования в прокатном валке из высокохромистого чугуна. Рассмотрено влияние утепления торцов прокатного валка в процессе термической обработки на градиент температур. Представлены результаты прогноза максимального градиента температур в зависимости от параметров утепления: вариант расположения утеплителя на торце изделия в области примыкания шейки валка к его бочке, а также толщины теплоизоляции. Расчётным путём показано наиболее оптимальное утепление торца прокатного валка, приводящее к уменьшению градиента температур по сечению изделия. Также показано, какой вариант утепления не оказывает значительного влияния на градиент температур.

Ключевые слова: прокатный валок, рабочий слой, градиент температур, термическая обработка, трещинообразование

Введение

Прокатный валок является одним из важнейших элементов прокатного стана. Валки влияют на параметры процесса прокатки и его стабильность, на производительность прокатного стана. Тепловой режим работы валков влияет на ход процесса прокатки, а также на все процессы и явления в очаге деформации [1].

Прокатные валки изготавливают из кованных или литых заготовок. Полученные заготовки, независимо от их способа изготовления, проходят следующие обязательные технологические этапы: механическая обработка заготовок на металлообрабатывающих станках до чистовых размеров, термическая обработка, технический контроль и дефектовка [2].

Особое место в производстве валков занимают литые валки, изготовленные из чугуна. Такие валки получают заливкой в стационарные формы (с «промывкой» или «полупромывкой»), а также центробежным способом. С помощью этих способов возможно получать двухслойные валки из различных материалов, например рабочий слой из легированного чугуна, а сердцевина – из высокопрочного. Такой способ заливки валков позволяет обеспечить получение заданных и необходимых эксплуатационных свойств. Однако стационарный способ заливки валков имеет свои недостатки, такие как: различие в химическом составе по сечению валка, неравномерность толщины рабочего слоя, перерасход графитизатора и легирующих элементов. Из-за обозначенных недостатков стационарного способа литья валков более предпочтительным и рентабельным по изготовлению является способ центробежного литья валков. Под воздействием центробежной силы происходит равномерное распределение расплава во вращающемся кокиле. Макроструктура рабочего слоя получается более плотная. С помощью центробежного способа литья получают

цилиндрические заготовки для рабочего слоя валков из сплавов типа HiCr-Steel-CE, HSS, Semi-HSS, HiCr, HiCr-CE, HiCr-Steel и т.д. [3–5].

Стоит отметить тот факт, что более 40% рабочих прокатных валков (далее ПВ) приобретались за рубежом. В последние годы в связи с нестабильной ситуацией остро встал вопрос о переходе металлургических предприятий на отечественную продукцию. В связи с этим появились новые требования по повышению качества валков из-закратно возросшего спроса на них у отечественных потребителей. Учитывая, что на территории Российской Федерации имеется всего два крупнейших завода по производству валков – это Магнитогорский и Кушвинский заводы прокатных валков, совокупная мощность которых является недостаточной для покрытия всей потребности в ПВ у отечественных потребителей, острым вопросом является повышение производительности указанных предприятий за счёт снижения количества бракованных изделий.

Следует отметить, что подавляющее количество брака в виде трещинообразования происходит по вине несоблюдения технологии, а также нарушения режима термической обработки прокатных валков. Именно термическая обработка является важнейшим этапом, так как она непосредственно влияет на технические и эксплуатационные характеристики готового изделия [6].

Неверно подобранный режим термической обработки, помимо снижения механических характеристик рабочего слоя изделия, может привести к нарушению сплошности и, как следствие, к его разрушению при эксплуатации [7].

Напряжения, возникающие после термообработки, обусловлены перепадом температурного поля по сечению отливки валка. Особенно это ярко проявляется на чугунных прокатных валках исполнения HiCr. Учитывая, что валок изготавливают трехслойным (рабочий слой, промежуточный и сердцевина), уровень напряжений зависит от коэффициентов термического расширения, механических характеристик материалов слоёв валка, а также от их теплового состояния [8].

© Юмабаев А.А., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Троянов А.В., Чернов В.П., Дубровин В.К., 2024

Косвенный анализ напряженно-деформированного состояния можно провести через величину температурных градиентов, возникающих по радиусу бочки вала.

Целью работы является прогнозирование НДС в прокатных валах в процессе их термической обработки через расчёт температурных градиентов.

Основная часть

С целью анализа и выявления напряженно-деформированного состояния был применен математический аппарат расчета теплового состояния вала. Адаптацией под данный профиль занимался научный коллектив Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. В результате был получен программный продукт (Therma Roll), задачей которого является вычисление теплового поля вала по его объему с учетом изменения теплофизических характеристик в зависимости от вида и температуры материала [9, 10]. Проведенный анализ теплового состояния прокатного вала указывает на возникшие максимумы градиентов температурного поля в точках 2 и 3 (рис. 1).

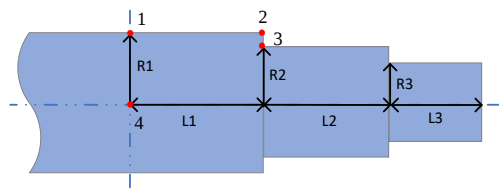


Рис. 1. Представление вала в математической модели (точками обозначены зоны контроля температурных параметров)

Температурные градиенты являются основным источником возникающих в теле вала температурных напряжений, ведущих к его разрушению. Также наибольшее значение градиента наблюдается в точках 1-3. В точке 3 наблюдается значительная величина градиента в момент резкого изменения температуры печи, что приводит к увеличению градиента.

Уменьшение величины градиента в точке 3 за счет реализации технологических мероприятий способствует уменьшению термонапряжений, приводящих к возникновению трещин в районе примыкания бандажа к стальной сердцевине вала (рис. 2).

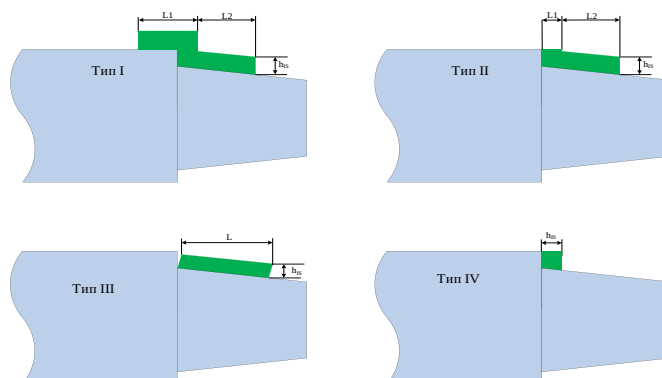


Рис. 3. Варианты расположения утеплителя на торцах бочки вала

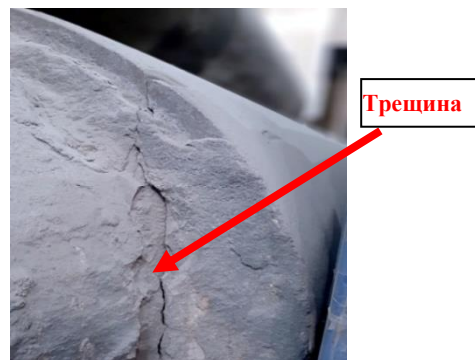


Рис. 2. Трещина, возникшая на боковой грани в точке 3

Одним из эффективных способов снижения величины термонапряжений в точках 2 и 3 без изменения температурного графика режима термической обработки является применение утеплителя. В настоящее время уже применяется утепление шеек валков, однако эффективность такого способа утепления остаётся спорной.

В данном исследовании рассматривались четыре варианта (типа) расположения теплоизоляционного материала на торце бочки вала, которые могут быть реализованы на практике (рис. 3).

Теплопроводность $L = 0,05 \text{ Вт / (м}^2 \text{ град)}$, теплоемкость $C = 1000 \text{ Дж / (кг град)}$, плотность $0,1 \text{ т/м}^3$.

В ходе моделирования исследовалось влияние толщины используемого теплоизоляционного материала $h_{из}$ равного 18, 25, 36, 50, 100 мм, на тепловое поле в теле отливки. Для вариантов с перехлестывающей через ребро изоляцией длина перехлеста составляла 0,25 м.

Первый вариант моделирования проводился для режима термообработки вала. В точках 2 и 3 с расположением утеплителя «Тип 1» все последующие эксперименты также будут проводиться для аналогичного режима и точек, контролировалась температура и величина градиента в характерных точках и определялось максимальное значение этой величины.

Цифрами на рис. 4 обозначены расчетные кривые, полученные: 1 – без утеплителя; 2 – с утеплителем толщиной 18 мм; 3 – 25 мм; 4 – 36 мм; 5 – 50 мм.

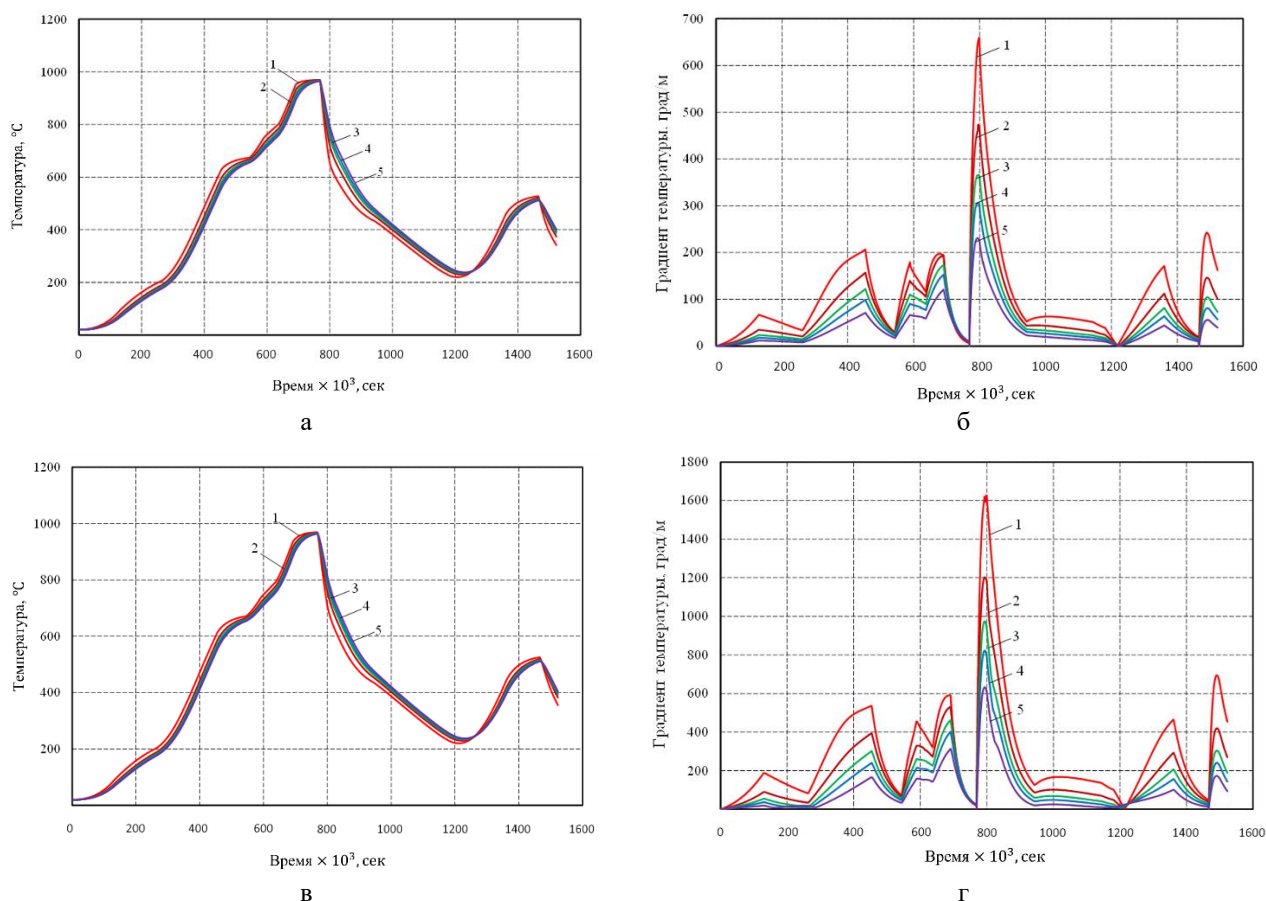


Рис. 4. Изменение температуры и градиента в точке 2 (а, б) и 3 (в, г) при закалке вала с различной толщиной утеплителя (кроме точки 1)

Анализ полученных данных показывает, что варианты утепления «Тип 1» дает существенный результат и влияет на величину градиента температур в точках 2 и 3, это можно отчетливо увидеть на графиках, приведенных на рис. 5.

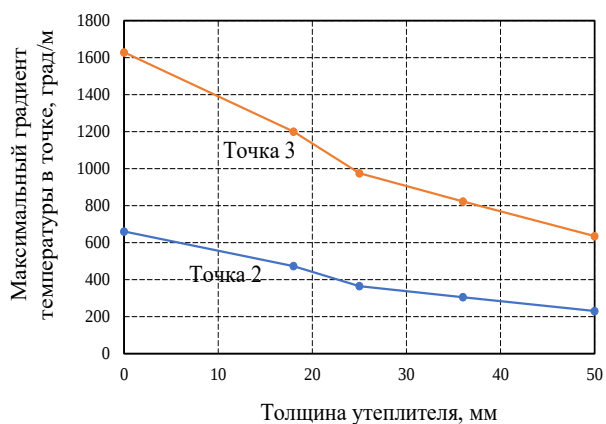


Рис. 5. Изменение величины максимального градиента температуры в точках 2 и 3 в зависимости от толщины утеплителя

Исходя из данных, представленных на рис. 5, видно, что использование утеплителя толщиной 50 мм приводит к тому, что величина градиента в точке 3 становится соизмеримой с величиной градиента в точке 1. Исходя из этого, можно предположить, что термонапряжения в точке 3 снизятся до приемлемых значений, не приводящих к разрушению вала.

Аналогичная серия экспериментальных моделирований была проведена для оставшихся трех типов расположения утеплителя. В результате этого были получены зависимости максимальной величины градиента температур в характерных точках 2 и 3 в зависимости от толщин утеплителя.

Полученные результаты были скомпонованы в виде графика для большей наглядности и приведены ниже на рис. 6. Также для удобства сравнения в дополнение был приведен график с утеплителем «Тип 1».

Полученные в ходе эксперимента результаты указывают на то, что не все варианты утепления торца бочки прокатного вала одинаково эффективны в процессе снижения градиента температур в точках 2 и 3.

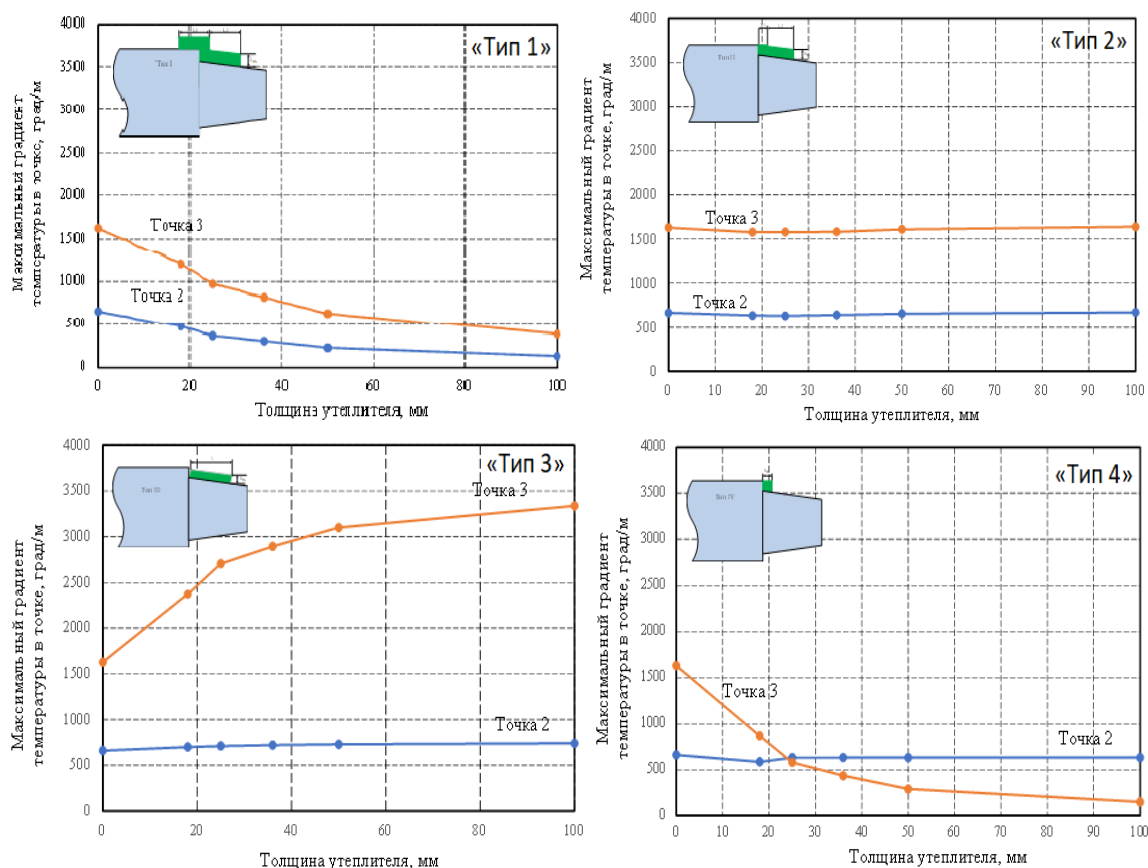


Рис. 6. Изменения максимального градиента температур в точках 2 и 3 в зависимости от толщины утеплителя с разными его типами

В свою очередь, некоторые из них показали обратный результат. Так, например, вариант утепления «Тип 2» практически не влияет на величину градиентов температур в обозначенных точках.

Стоит отметить результаты, полученные с вариантом утепления «Тип 1» и «Тип 4», показавшие высокую эффективность в процессе снижения градиента температур.

Так, вариант утепления «Тип 1» приводит к значительному уменьшению величины градиентов температур в точке 2 и 3, а вариант утепления «Тип 4» существенно снижает градиент температур в точке 3, напротив, в точке 2 эта величина остаётся практически неизменной.

Еще стоит отметить тот факт, что при использовании изоляционного материала с коэффициентом температуропроводности равным $5 \cdot 10^{-7}$, наиболее эффективная толщина изоляции составляет 50 мм. При дальнейшем увеличении толщины изоляции её эффективность по уменьшению градиентов температуры при использовании схемы изоляции «Тип 1» снижается. График соотношения теплового потока и толщины изоляции, указывающий на это, приведен на рис. 7. Цифрами показаны графики зависимостей при разных значениях температуропроводности: 1 – $5 \cdot 10^{-6}$ м²/с; 2 – 10^{-7} м²/с; 3 – $5 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

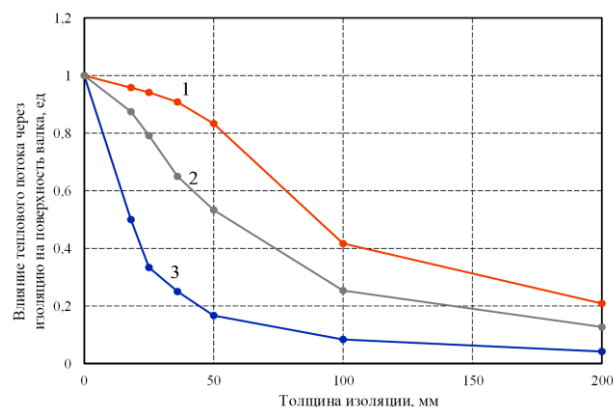


Рис. 7. Величина степени влияния теплового потока на поверхность вала через изоляционный материал в зависимости от толщины и температуропроводности теплоизоляционного материала

Закключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что снижение градиента температур в характерных точках возможно за счет утепления торцов бочки и шейки вала.

Стоит отметить то, что выбранная схема утепления существенно влияет на величину изменения гра-

диента температур, и эта величина зависит от толщины используемого теплоизоляционного материала.

В свою очередь, существуют варианты утепления («Тип 2» и «Тип 3»), реализованные по схемам утепления «Тип 2» и «Тип 3», которые не влияют на величину градиента в характерных точках или даже приводят к его увеличению.

Напротив, варианты утепления по схемам «Тип 1» и «Тип 4» показывают удовлетворительные результаты по снижению величины градиента температур в характерных 2 и 3 точках отливки вала. Это еще раз доказывает эффективность метода снижения термических напряжений, возникающих в результате образования градиента температур.

Список источников

1. Прокатные валки: монография / К.Н. Вдовин, Р.Х. Гималетдинов, В.М. Колокольцев, С.В. Цыбров. Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2005. 543 с. ISBN 5-89514-598-1.
2. Вдовин К.Н., Колокольцев В.М. Производство отливок из чугуна: учебное пособие. Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2010. 234 с.
3. Основные этапы разработки технологии производства рабочих валков для чистовых клетей станов горячей прокатки / А.А. Гулаков, И.Х. Тухватулин, В.М. Колокольцев, М.Г. Потапов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. Т. 10. № 1. С. 36-40.
4. Развитие производства листопрокатных валков из прогрессивных материалов на Кушвинском заводе прокатных валков / Р.Х. Гималетдинов, А.А. Гулаков, И.Х. Тухватулин [и др.] // Металлург. 2021. № 2. С. 36-41.
5. Мирзоян Г.С., Цыбров С.В. Производство композитных сортопрокатных валков методом центробежного литья // Производство проката. 2010. №3. С. 38–40.
6. Применение компьютерного моделирования для оценки напряженного состояния литого прокатного вала / Н.А. Феоктистов, А.А. Юмабаев, Е.В. Скрипкин, А.В. Монастырский // Литейное производство. 2024. № 2. С. 27-33.
7. Формирование напряжений изгиба в бочке биметаллического прокатного вала при его термообработке / Б.Б. Зарицкий, А.С. Савинов, Н.А. Феоктистов [и др.] // Теория и технология металлургического производства. 2021. № 3(38). С. 30-34.
8. Прокатные валки / К.Н. Вдовин, Д.В. Куряев, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 335 с. EDN VNR YQD.
9. Предотвращение образования трещин в бочке прокатного вала исполнения NiCr / Н. А. Феоктистов, А. С. Савинов, А. А. Юмабаев, А. В. Монастырский // Литейщик России. 2024. № 4. С. 26-31.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665854 Российская Федерация. Termo roll V.1.1 : № 2024664422 : заявл. 25.06.2024 : опубл. 08.07.2024 / А. С. Савинов, Н. А. Феоктистов, Б. Б. Зарицкий [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Сведения об авторах

Юмабаев Азамат Аслямович – старший преподаватель кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: yumabaev.azamat95@gmail.com.

Савинов Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, директор института металлургии, машиностроения и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: savinov_nis@mail.ru.

Феоктистов Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: fna87@mail.ru.

Скрипкин Евгений Викторович – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: skripkin-86@yandex.ru.

Троянов Андрей Вадимович – студент кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: andrey.troyanov.00@bk.ru.

Чернов Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tchernov42@mail.ru.

Дубровин Виталий Константинович – доктор технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: vkdubr@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EVALUATION OF THE TEMPERATURE GRADIENT IN CAST ROLLING ROLLS DURING HEAT TREATMENT

Yumabayev Azamat A. – Assistant professor of the Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yumabaev.azamat95@gmail.com.

Savinov Alexander S. – D. Sc. (Eng.), Professor, Metallurgy, Head of Mechanical Engineering and Materials Processing Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: savinov_nis@mail.ru.

Feoktistov Nikolay A. – PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru.

Skripkin Evgeniy V. – graduate student Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: skripkin-86@yandex.ru.

Troyanov Andrey V. – student of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andrey.troyanov.00@bk.ru.

Chernov Viktor P. – D. Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov42@mail.ru.

Dubrovin Vitaly K. – D. Sc. (Eng.), Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: vkdubr@mail.ru.

Abstracts. The article discusses the solution to a practical problem of controlling the temperature gradient in a rolling roll during heat treatment in order to predict and prevent the destruction of the product in a thermal furnace. A set of technological measures is presented to eliminate cracking in a rolling roll made of high-chromium cast iron. The effect of insulation of the ends of a rolling roll during heat treatment on the temperature gradient is considered. The results of the forecast of the maximum temperature gradient depending on the insulation parameters are presented: the option of placing the insulation at the end of the product in the area where the roll neck adjoins its barrel, as well as the thickness of the thermal insulation. Calculation shows the most optimal insulation of the end of the rolling roll, leading to a decrease in the temperature gradient across the cross section of the product. It is also shown which insulation option does not have a significant effect on the temperature gradient.

Keywords: rolling roll, working layer, temperature gradient, heat treatment, cracking

Ссылка на статью:

Оценка градиента температуры в литых прокатных валках в процессе термической обработки / Юмабаев А.А., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Скрипкин Е.В., Троянов А.В., Чернов В.П., Дубровин В.К. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 34-39.

Yumabayev A.A., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Skripkin E.V., Troyanov A.V., Chernov V.P., Dubrovin V.K. Evaluation of the temperature gradient in cast rolling rolls during heat treatment. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 34-39.