

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.744.3

Зарицкий Б.Б., Савинов А.С., Фочина К., Рудь К.И., Нефедьев А.А., Дубский Г.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 170 ХНМ

Аннотация. В современных условиях мировой экономики и сложившихся отношениях с другими странами (санкции и ограничения поставок сырья, оборудования, запчастей и лицензий для программных продуктов) возникла необходимость освоения новых видов прокатных валков. В связи с тем, что изготовление валков очень энерго- и ресурсозатратное производство возникла необходимость создания, с помощью математических аппаратов, программного продукта, позволяющего прогнозировать протекания технологических процессов и подобрать на стадии проектирования технологических условий наиболее подходящие и менее затратные режимы термической обработки.

Моделирование термонапряженного состояния [1, 2] невозможно без качественного прогнозирования температурного поля прокатного валка в процессе его термической обработки [3]. Для успешного применения существующих методов математического анализа теплового состояния исследуемого объекта требуется качественное определение температурных зависимостей условий однозначности (теплопроводности и теплоёмкости) при решении задачи теплопроводности существующими численными методами. При этом для качественного прогнозирования температурных полей прокатного валка требуется исследование теплофизических характеристик как в первоначальном (литом) состоянии, так и после термической обработки материала литой заготовки.

Ключевые слова: прокатный валок, математический анализ, теплопроводность, теплоёмкость, напряженное состояние, температурные поля

Исследование теплофизических характеристик в литом состоянии

Эффективность работы литейного предприятия является его рентабельность, на которую в значительной мере оказывает влияние себестоимость выпускаемой продукции. Это в полной мере относится к производству прокатных валков. Следует отметить, что при изготовлении данного вида изделия на себестоимость оказывает значительное влияние длительность процесса термической обработки, в ходе которого обеспечивается заданная микроструктура, а следовательно, и механические свойства прокатного валка. Вследствие значительной металлоёмкости прокатных валков затрачиваемое время на их термообработку является определяющим фактором формирования себестоимости. Это связано с тем, что такие длительные технологические циклы отжига изделий приводят к тому, что зачастую печи термической обработки являются лимитирующим звеном в увеличении количества выпускаемой продукции.

Данную проблему возможно решить путем оптимизации существующих режимов термической обработки, для чего требуется построение качественно математического аппарата, обеспечивающего про-

гнозирование теплового состояния прокатного валка в процессе его термической обработки.

Данная задача может быть решена путем численного решения задачи теплопроводности одним из существующих методов. Однако применение данных методик сопряжено с наличием условий однозначности, нахождение которых является составной частью задачи о прогнозировании температурных полей в процессе отжига.

В данной работе рассмотрено получение условий однозначности для валковой стали 170ХНМ.

Проведение эксперимента по определению физико-механических свойств среднеуглеродистой легированной стали 170ХНМ производилось при помощи усовершенствованной высокотемпературной вакуумной установки ИМАШ 20-75, в которой реализованы импульсный и периодический методы измерения комплекса теплофизических свойств в широком температурном диапазоне.

Полученные экспериментальные значения теплопроводности стали 170ХНМ в литом состоянии могут быть описаны кривой на рис. 1.

Формула расчета теплопроводности стали 170ХНМ в литом состоянии:

$$\lambda = \frac{(1 - \tanh(50(t - 750))) \cdot (40,7 - 9,6 \cdot 10^{-7} T^{2,5} + 3 \cdot 10^{-8} T^3)}{2} + \frac{(1 + \tanh(50(t - 750))) \cdot (-2,443 \cdot 10^{-9} T^4 + 9,3115 \cdot 10^{-6} T^3 - 1,3101 \cdot T^2 + 8,06T - 1791,8)}{2} \quad (1)$$

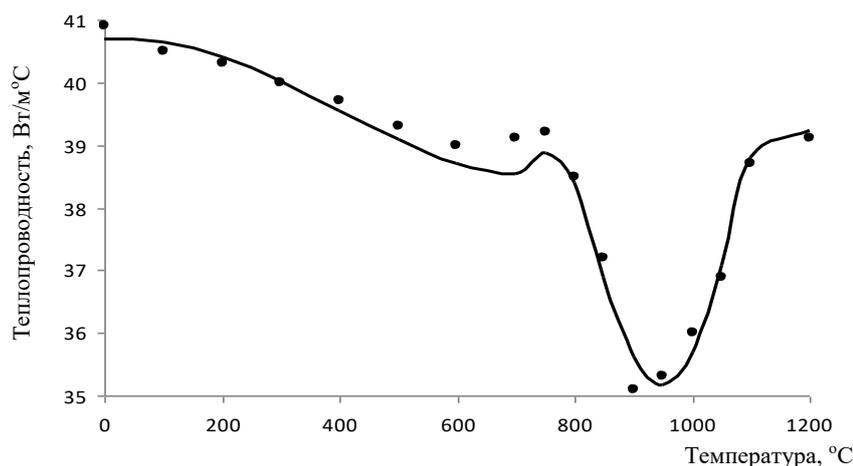


Рис. 1. Зависимость теплопроводности стали 170XHM в литом состоянии от температуры

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Для оценки тесноты связи экспериментальных данных с полученными линиями регрессии использовали корреляционное отношение η [9, 10], которое применяется для нелинейных математических зависимостей

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{yx}^2}{\sigma_{\bar{y}}^2}}; \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad (2)$$

где σ_{yx} – дисперсия точек относительно линии регрессии;

$\sigma_{\bar{y}}$ – дисперсия относительно средней линии.

Величина корреляционного отношения составляет 0,98, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение между экспериментальными и расчетными данными определяли по формуле

$$\varepsilon = \left| \frac{\lambda_{\text{эксп}} - \lambda_{\text{расч}}}{\lambda_{\text{эксп}}} \right| \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{эксп}}$ и $\lambda_{\text{расч}}$ – экспериментальные и расчетные значения теплопроводности соответственно, Вт/м·°С.

Среднее относительное отклонение составляет $\varepsilon_{\text{ср}}=0,58\%$, что значительно ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи F -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило $F_{\text{расч}}=1,035$, что меньше критического $F_{\text{крит}}=2,384$, взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения теплопроводности стали в литом состоянии может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

Изменение теплоемкости в литом состоянии может быть описано кривой на рис. 2.

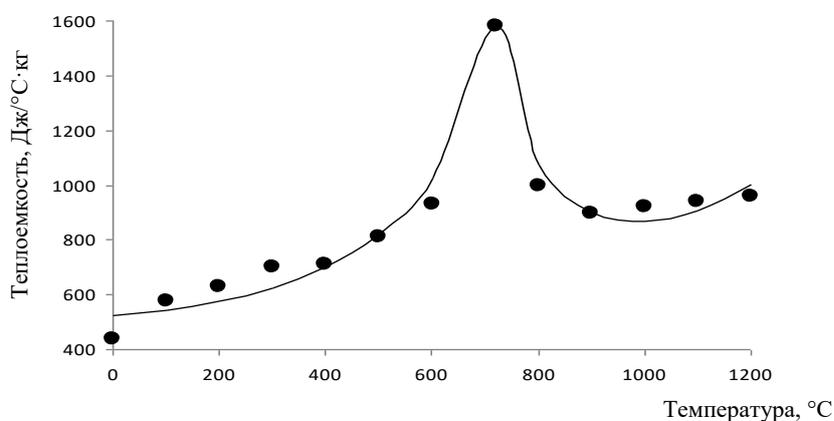


Рис. 2. Зависимость теплоемкости стали 170XHM в литом состоянии от температуры

Формула расчета теплоемкости стали 170ХНМ в литом состоянии:

$$C_p = \frac{1 - \tanh(50(t - 720))}{2 \cdot (1,9 \cdot 10^{-3} - 4,6 \cdot 10^{-7}t - 1,8 \cdot 10^{-9}t^2)} + \frac{(1 + \tanh(50(t - 720)))t}{2 \cdot (-17,54 - 1,66 \cdot 10^{-2}t - 1,116 \cdot \sqrt{t})}. \quad (4)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,97, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет $\varepsilon_{\text{ср}} = 6,08\%$, что ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи F -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило $F_{\text{расч}} = 1,061$, что меньше критического $F_{\text{крит}} = 2,787$, взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения теплоемкости стали в литом состоянии может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного вала под воздействием температурных деформаций.

Полученные зависимости могут быть использованы для расчёта теплового состояния прокатного вала в процессе термической обработки до теплового удара после растворения карбидов в температурной области 900–970°C. Для последующего анализа теплового состояния вала требуется определение теплофизических характеристик стали 170ХНМ в термообработанном состоянии.

Исследование теплофизических характеристик в термообработанном состоянии

Были проведены эксперименты по измерению теплофизических свойств материала 170ХНМ после термообработки. Образцы вырезаны из кольцевой пробы, прошедшей термообработку вместе с прокатными валками.

Изменение теплопроводности после термообработки может быть описано следующей кривой рис. 3.

Формула расчета теплопроводности стали 170ХНМ после термообработки:

$$\lambda = \left(\frac{1 - \tanh(50(t - 800))}{2} \cdot 34,9 \cdot t^{0,03} \cdot e^{-5,9 \cdot 10^{-4} \cdot t} \right) + \frac{1 + \tanh(50(t - 800))}{2} \cdot \left(128,4 - 0,0443 \cdot t - \frac{52131}{t} \right). \quad (5)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,99, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет $\varepsilon_{\text{ср}} = 0,77\%$, что значительно ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи F -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило $F_{\text{расч}} = 1,005$, что меньше критического $F_{\text{крит}} = 2,942$, взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения теплопроводности стали после термообработки может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного вала под воздействием температурных деформаций.

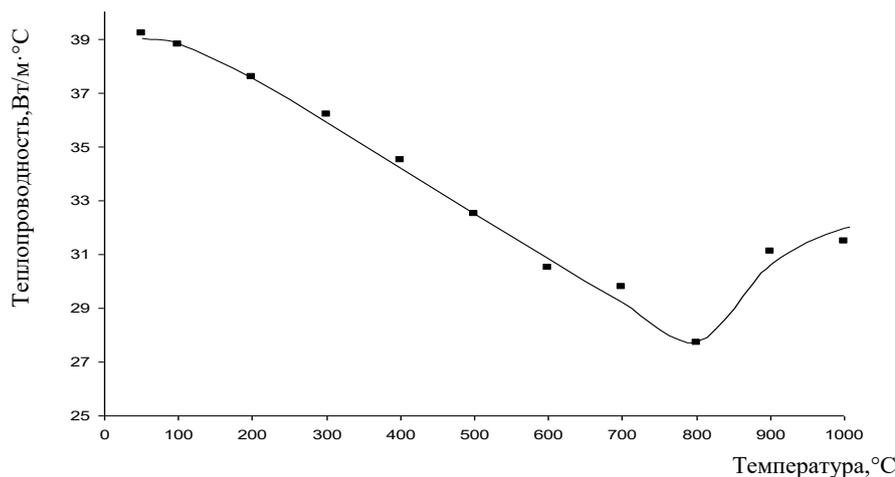


Рис. 3. Зависимость теплопроводности стали 170ХНМ после термообработки от температуры

Изменение теплоемкости после термообработки может быть описано кривой на рис. 4.

Формула расчета теплоемкости стали 170ХНМ после термообработки:

$$C_p = \frac{(1 - \tanh(50(t - 750)))535,43}{2(1 + 3,24 \cdot 10^{-4}t - 1,42 \cdot 10^{-6}t^2)} + \frac{(1 + \tanh(50(t - 750)))e^{-57,66 + \frac{8,58 \cdot 10^3}{t} + 8,137 \ln t}}{2}. \quad (6)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,96, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет $\varepsilon_{\text{ср}}=4,7\%$, что ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи F -критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило $F_{\text{расч}}=1,203$, что меньше критического $F_{\text{крит}}=23,16$, взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения теплоемкости стали после термообработки может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

Изменение температуропроводности после термообработки может быть описано кривой на рис. 5.

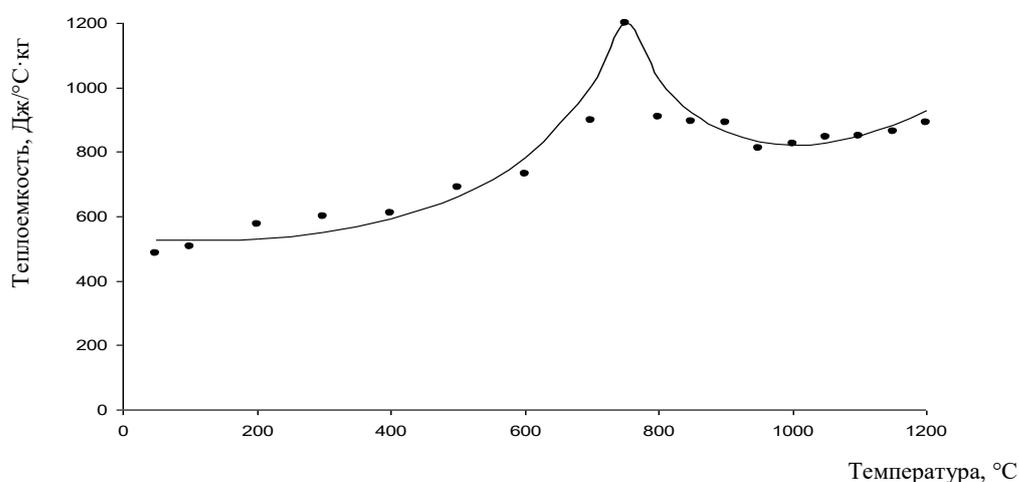


Рис. 4. Зависимость теплоемкости стали 170ХНМ после термообработки от температуры

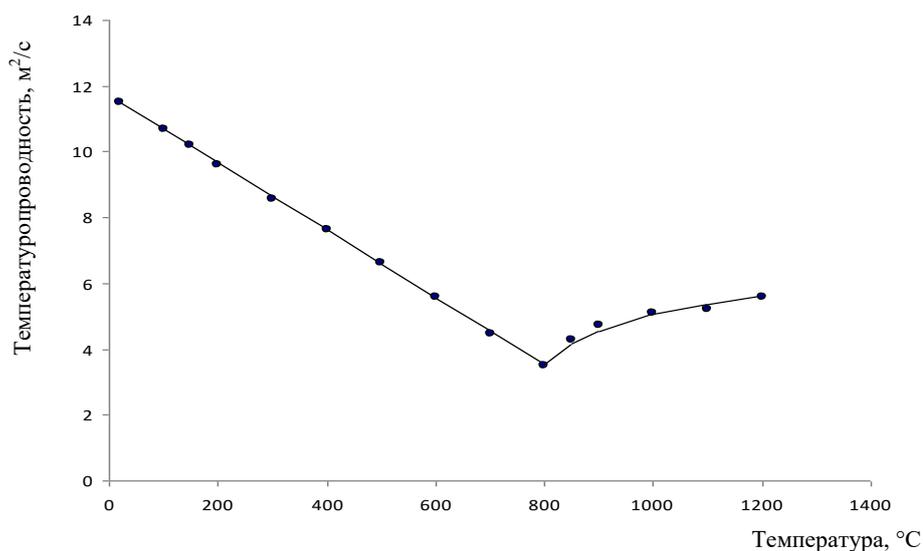


Рис. 5. Зависимость температуропроводности стали 170ХНМ после термообработки от температуры

Формула расчета температуропроводности стали 170ХНМ после термообработки:

$$a = \frac{1 - \tanh(50(t - 800))}{2} \cdot (-1,03 \cdot 10^{-2} \cdot (t - 1141)) + \frac{1 + \tanh(50(t - 800))}{2} \cdot \ln(-450 + 0,606 \cdot t). \quad (7)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,99, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет $\varepsilon_{\text{ср}}=1,15\%$, что ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи *F*-критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило $F_{\text{расч}}=1,015$, что меньше критического $F_{\text{крит}}=2,553$, взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения температуропроводности стали после термообработки может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

Изменение электропроводности после термообработки может быть описано кривой на рис. 6.

Формула расчета электропроводности стали 170ХНМ после термообработки:

$$\rho = 47,8 + 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot t^5. \quad (8)$$

Проверку адекватности полученной модели осуществляли с использованием корреляционного отношения.

Величина корреляционного отношения составляет 0,99, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Среднее относительное отклонение составляет $\varepsilon_{\text{ср}}=2,36\%$, что ниже допустимых в технических расчетах 15%.

Возможность применения данной модели оценивали при помощи *F*-критерия Фишера, расчетное значение которого для рассматриваемых условий составило $F_{\text{расч}}=1,060$, что меньше критического $F_{\text{крит}}=2,005$, взятого при уровне значимости 0,05. Откуда, исходя из проведенных исследований, температурного изменения электропроводности стали после термообработки может быть использовано в инженерных расчетах при определении напряженного состояния материала прокатного валка под воздействием температурных деформаций.

Таким образом, в результате проведенной работы получены температурные зависимости теплофизических характеристик материала, которые могут быть использованы в МКР для обеспечения точного прогнозирования теплового состояния валка из стали 170ХНМ в процессе его термообработки.

Список источников

1. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Варламова Д.В. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы // Черные металлы. 2011. Спец. вып. С. 36-38.
2. Температурные поля системы отливка – литейная форма в условиях неравновесной кристаллизации комплекснолегированных сплавов / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, Е.В. Сеницкий, А.С. Савинов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 28–31.

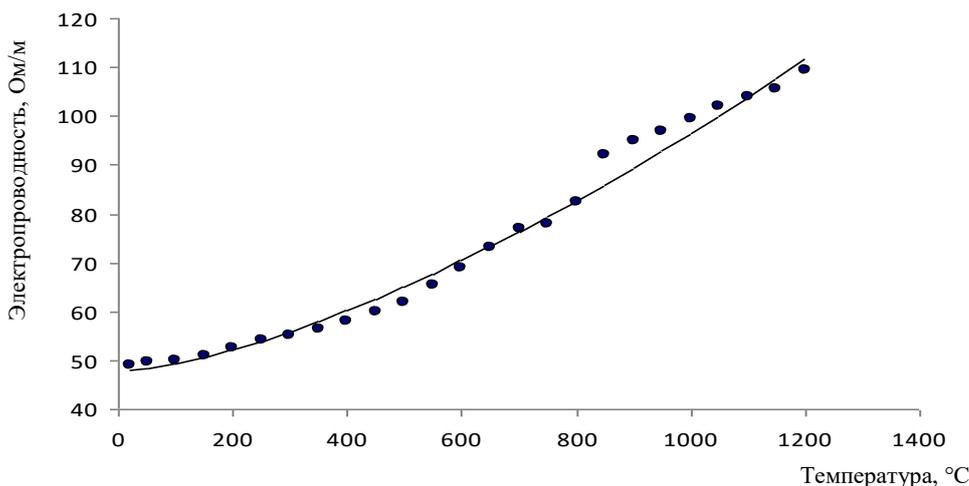


Рис. 6. Зависимость электропроводности стали 170ХНМ после термообработки от температуры

3. Савинов А.С., Андреев С.М., Тубольцева А.С. Программа расчета тепловых полей в литейных системах // Литейщик России. 2013. №3. С. 39-42.
4. Антошкина Е.Г., Смолко В.А. Процессы формирования прочности песчаных формовочных и стержневых смесей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2012. № 15 (274). С. 6–8.
5. Илларионов И.Е. Теоретические основы формирования физико-механических свойств песчано-глинистых смесей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 1(86). С. 233.
6. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Установка для исследования податливости формовочных смесей // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. С. 139-144.
7. Савинов А.С. Расчет теплоемкости затвердевающей стенки отливки // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2011. Вып. 11. С. 130–133.
8. Ангольд К.В. Исследование температурной зависимости теплоемкости стали 170ХНМ // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2018. № 17. С. 122–125.
9. Дунин-Барковский И.В., Смирнов Н.В. Теория вероятности и математическая статистика в технике. М.: Машиностроение, 1955. 431 с.
10. Справочник по теории вероятности и математической статистике/ В.С. Королук, Н.И. Потенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. М.: Наука, 1985. 640 с.

Сведения об авторах

Зарицкий Борис Борисович – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zaritskii.boris.borisovich@yandex.ru.

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

Фочина Каролина Владимировна – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия. E-mail: angoldk@bk.ru.

Рудь Ксения Игоревна – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: koks1690@mail.ru

Нефедьев Александр Алексеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. shuric_xp@mail.ru

Дубский Геннадий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. physics@magtu.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF 170HNM STEEL THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS

Zaritskii Boris B. – Senior Lecturer of department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaritskii.boris.borisovich@yandex.ru

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

Fochina Karolina V. – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: angoldk@bk.ru.

Rud Ksenia I. – postgraduate student of foundry and material science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: koks1690@mail.ru

Nefediev Alexander A. – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. shuric_xp@mail.ru

Dubsky Gennady A. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. physics@magtu.ru

Abstract. In the current conditions of the global economy and the established relations with other countries (sanctions and restrictions on the supply of raw materials, equipment, spare parts and licenses for software products), the need to develop new types of rolling rolls has arisen. The need to create a software product that allows predicting the course of technological processes and selecting the least expensive heat treatment modes at the design stage of technological conditions arose due to energy- and resource-intensive production.

Modeling of the thermal stress state [1, 2] is impossible without high-quality prediction of the rolls temperature field during its heat treatment [3]. For the successful application of existing methods of mathematical analysis of the thermal state of the study object, it is necessary to determine correctly the temperature dependencies of the uniqueness conditions (thermal conductivity and heat capacity) in the course of solving the problem of thermal conductivity using existing numerical methods. At the same time, for high-quality prediction of the temperature fields of the rolling roll, it is necessary to study the thermophysical characteristics both in the initial (cast) state and after heat treatment of the material of the cast billet. These studies will help to increase the accuracy of forecasting technological processes in production and expand the database of characteristics of 170 XHM steel.

Keywords: rolling roll, mathematical analysis, thermal conductivity, heat capacity, stress state, temperature fields.

Ссылка на статью:

Исследование теплофизических характеристик стали 170 ХНМ / Зарицкий Б.Б., Савинов А.С., Фочина К., Рудь К.И., Нефедьев А.А., Дубский Г.А. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №3(50). С. 21-27.
Zaritskii B.B., Savinov A.S., Fochina K.V., Rud K.I., Nefediev A.A., Dubsky G.A. Study of 170 HNM steel thermophysical characteristics. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 50, no. 3, pp. 21-27.