

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Михалкина И.В., Ступак А.А., Осипова О.А., Рудь К.И., Элиджарова К.С.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗОНЫ С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ В СТЕНКЕ ОТЛИВКИ ИЗ СТАЛИ 150XHM ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

**Аннотация.** В работе рассмотрен вопрос моделирования геометрии и расположения слоя металла с требуемыми эксплуатационными характеристиками для отливки из стали 150XHM. Математический расчет проведен с использованием численного решения задачи теплопроводности методом конечных разностей. Исследование проведено на плоской стенке отливки при ее кристаллизации и охлаждении в металлической форме. Исследовали влияние теплофизических свойств отливки и формы на размер и положение зоны с высокими эксплуатационными характеристиками. Качество требуемого слоя определялось требуемыми скоростями охлаждения, составляющими 3–7°C в температурном интервале кристаллизации 1383–1223°C и со скоростями охлаждения 0,6–2°C в области образования карбидов в интервале температур 607–801°C. Величины рассматриваемых скоростей охлаждения определялись из литературных данных. Установлено, что повышение теплопроводности как отливки, так и стенки стальной формы (кокиля) приводит к экстремальному росту величины слоя с высокими эксплуатационными свойствами с максимумами при 40 Вт/мК и 25 Вт/мК соответственно. Влияние объемной теплоемкости  $C_v$  отливки выражено уменьшением зоны высоких скоростей с формированием максимального значения величины зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами, равной 12,7 мм. При этом рост объемной теплоемкости формы увеличивает зону высоких скоростей при максимальном значении размера слоя с требуемыми эксплуатационными характеристиками, равной 13,2 мм.

**Ключевые слова:** скорость охлаждения, теплофизические свойства, литейная форма, эксплуатационные свойства, сталь 150XHM

### Введение

Литейное производство является основной заготовительной базой машиностроения. К фасонным литым изделиям зачастую предъявляются высокие требования, выполнение которых невозможно без тщательной проработки технологического процесса. Следует отметить, что высокие эксплуатационные свойства отливок в первую очередь зависят от микроstructures в литом состоянии. Структурообразование литого изделия зависит от химического состава сплава, а также от его скорости кристаллизации и охлаждения в литейной форме. Немалое значение на формирование необходимой микроstructures и, как следствие, получение высокого уровня свойств оказывает интенсивность теплообмена, протекающего между литейной формой и изделием.

В работах [1-3] был рассмотрен процесс кристаллизации сплава и связанный с ним процесс формирования микроstructures при охлаждении изделия. Объектом исследования была валковая сталь марки 150XHM, имеющая следующий химический состав, мас. %: С 1,5; Si 0,4; Mn 0,8; S 0,02; P 0,04; Cr 1,1; Ni 1,1; Mo 0,35. Была установлена взаимосвязь микроstructures с требуемым уровнем эксплуатационных свойств. Анализ данных зависимостей позволил определить, что благоприятная первичная литая структура, обеспечивающая получение высоких требуемых эксплуатационных свойств, формируется при скоро-

стях охлаждения 3–7°C в температурном интервале кристаллизации 1383–1223°C и со скоростями охлаждения 0,6–2°C в области образования карбидов в интервале температур 607–801°C. Микроstructure стали марки 150XHM в литом состоянии, сформировавшаяся при скорости охлаждения 5,98 °C/c в температурном интервале кристаллизации, представлена на рис. 1.

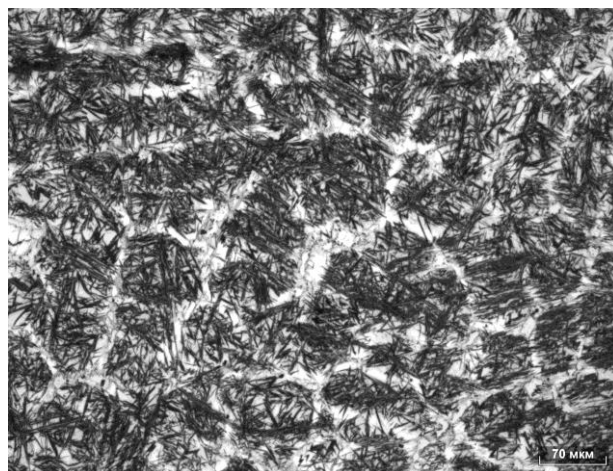


Рис. 1. Микроstructure стали марки 150XHM в литом состоянии, сформировавшаяся при скорости охлаждения в температурном интервале кристаллизации 5,98 °C/c ( $\times 200$ )

Литая структура стали марки 150ХНМ состоит из остаточного аустенита, мартенсита, а также карбидов, располагающихся по границам действительного зерна. Карбидная фаза представлена цементитом, в котором содержатся хром (от 2,9 до 16,6 %) и молибден (от 1,46 до 5,13 %). Количество остаточного аустенита не превышает 1 %.

### Математическое моделирование и обсуждение результатов

С целью изучения влияния теплофизических свойств системы «отливка-форма» на получение изделия с требуемыми эксплуатационными свойствами было проведено математическое моделирование скоростей охлаждения стенки литого изделия. Моделирование проводилось с применением программы «Расчет температурных полей системы «отливка-форма»» [4-6]. Рассматривалось влияние таких параметров, как теплопроводность и объемная теплоёмкость отливки и формы на геометрию и расположение зоны отливки с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Исследуемые образцы представляли собой отливку в виде пластины с толщиной стенки  $\delta_{отл} = 50$  мм. Теплофизические характеристики стали марки 150ХНМ: теплопроводность  $\lambda = 38,5$  Вт/м·К; теплоёмкость  $C = 853$  Дж/кг; плотность  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>; теплота кристаллизации  $Q_{крист} = 222,74$  Дж/кг; температура ликвидус  $T_{л} = 1383^{\circ}\text{C}$ ; температура солидус  $T_{с} = 1223^{\circ}\text{C}$ ; температура заливки  $T_{зал} = 1413^{\circ}\text{C}$ . В качестве формообразующей среды принимаем металлическую форму со следующими характеристиками:  $\lambda = 28$  Вт/м·К;  $C = 650$  Дж/кг;  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\delta_{ф} = 100$  мм; начальная температура  $T_{нач} = 20^{\circ}\text{C}$ .

Учитывая, что условием формирования зоны с требуемыми эксплуатационными характеристиками является скорость охлаждения материала, очевидно, что в зависимости от толщины стенки литой заготовки могут формироваться как зоны переохлажденного сплава, так и зоны со скоростями охлаждения ниже требуемых. Схема формирования зон стенки отливки в зависимости от скоростей охлаждения сплава при кристаллизации и охлаждении сплава в форме представлена на рис. 2.

При высоких скоростях охлаждения формируется зона величиной  $h_{в}$ , при низких скоростях охлаждения – величиной  $h_{н}$  и со скоростями охлаждения, при которых образуется микроструктура, позволяющая получить требуемые эксплуатационные свойства, составляет  $h_{треб}$ .

Было изучено влияние изменения теплопроводности отливки на геометрию, расположение и размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами (рис. 3 а, б). Рассматриваемый интервал варьирования теплопроводности отливки находился в пределах 25–50 Вт/мК.

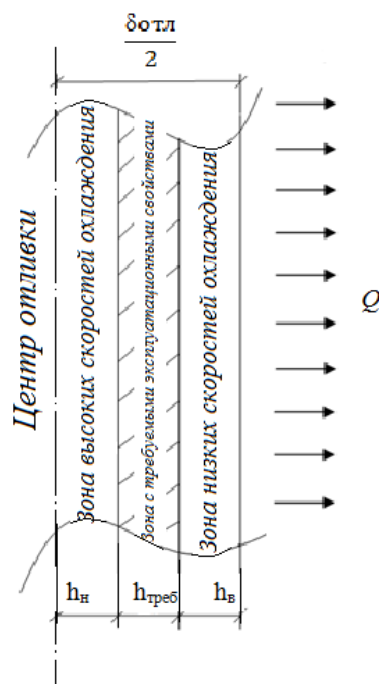
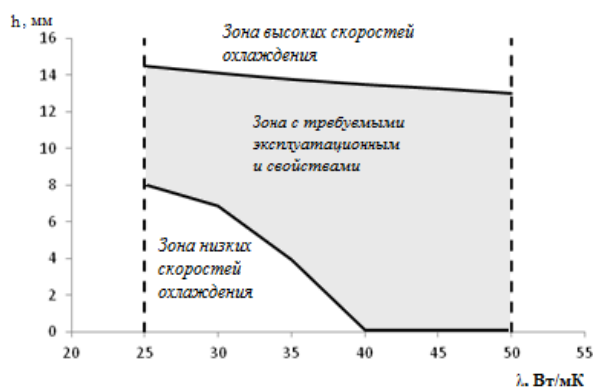
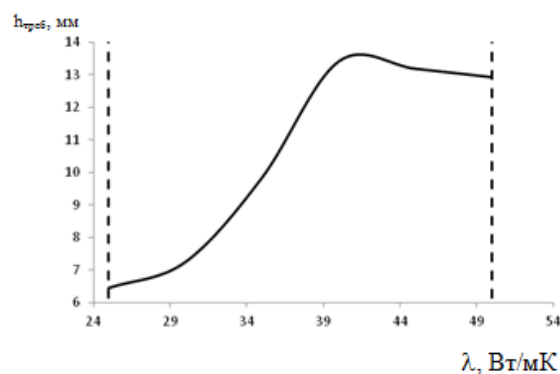


Рис. 2. Схема формирования зон отливки в зависимости от скоростей охлаждения сплава при кристаллизации и охлаждении сплава в форме



а



б

Рис. 3. Влияние теплопроводности отливки на: а – геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами; б – размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами

На рис. 3, а – б, сплошными линиями обозначена зона, формирующаяся в температурном интервале кристаллизации при выполнении требуемых значений скоростей охлаждения. Штриховыми линиями (рис. 3–б) обозначена область, обеспечивающая требуемое условие скорости охлаждения сплава для карбидообразования с требуемой морфологией.

Анализ зависимости, представленной на рис. 3, а, показал, что увеличение теплопроводности отливки ускоряет отвод тепла центра стенки литой заготовки. Это, в свою очередь, приводит к увеличению зоны быстрого переохлаждения и смещению зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами к центру отливки.

Увеличение теплопроводности материала отливки расширяет зону с требуемыми эксплуатационными свойствами  $h_{\text{треб}}$  за счёт ускорения отвода тепла от центра отливки. Зона со скоростью охлаждения ниже требуемой – уменьшается.

Размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами  $h_{\text{треб}}$  увеличивается с повышением теплопроводности отливки до значений 40 Вт/мК (рис. 3, б). При данном значении теплопроводности размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами максимален и составляет 13,41 мм. Увеличение теплопроводности свыше 40 Вт/мК приводит к увеличению переохлаждённой зоны и, как следствие, снижению величины требуемого слоя. Скорости охлаждения, обеспечивающие условия для образования карбидов с требуемой морфологией, находились на всей протяженности исследуемого интервала.

Следующим этапом работы было рассмотрено влияние теплопроводности формы на геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами (рис. 4). Исследования проводились в интервале изменения теплопроводности 15–45 Вт/мК.

При увеличении теплопроводности происходит интенсификация теплоотвода от стенки отливки и, как следствие, увеличение переохлаждённой зоны высоких скоростей. При этом снижается зона низких скоростей, переходя в центр стенки отливки при 25 Вт/мК. Рост зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами происходит при увеличении теплопроводности до 25 Вт/мК. Максимум размера зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами составляет 14,2 мм. Увеличение теплопроводности свыше 25 Вт/мК приводит к повышению зоны высоких скоростей охлаждения и, как следствие, к уменьшению зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Представляет интерес исследование влияния теплоёмкости отливки и формы на геометрию, размер и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами (рис. 5.). В ходе исследования рассматривали объёмную теплоёмкость  $C_v$ , выраженную произведением теплоёмкости на плотность материала. Исследования проводились в интервале  $C_v$ , равной 33–111 МДж/м<sup>3</sup>.

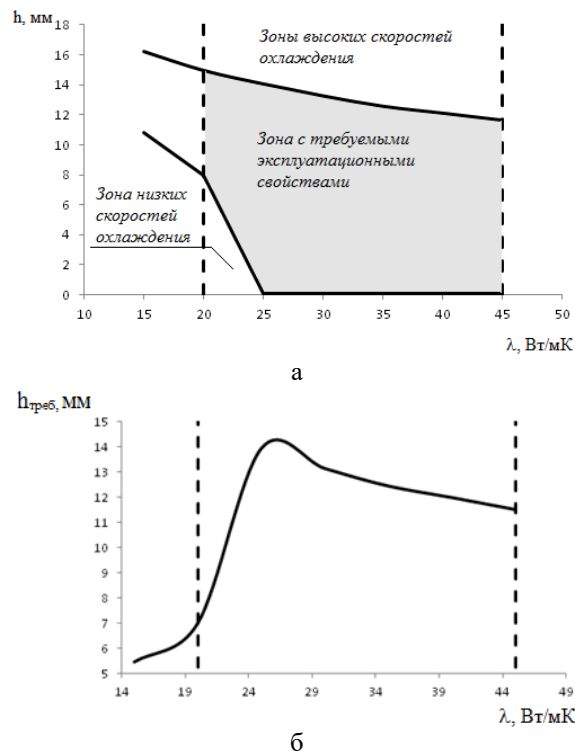


Рис. 4. Влияние теплопроводности формы на: а – геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами; б – размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами

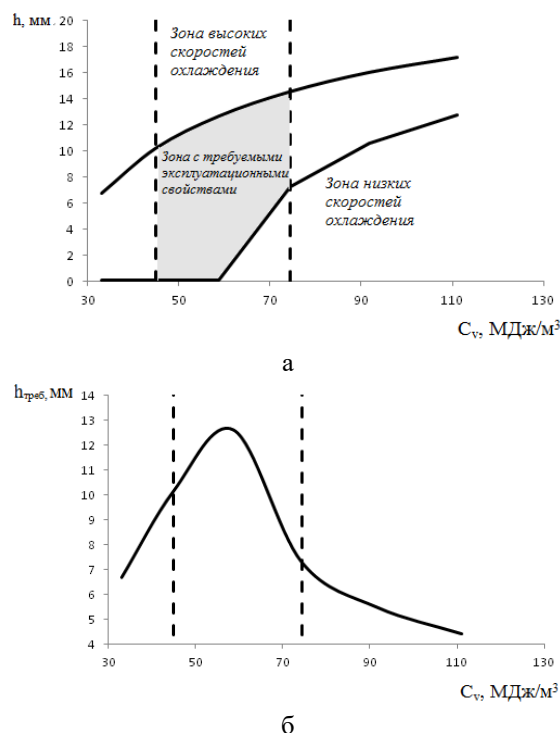


Рис. 5. Влияние объёмной теплоемкости отливки на: а – геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами; б – размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами

Анализ представленных зависимостей показал, что увеличение объёмной теплоёмкости отливки приводит к уменьшению размера зоны высоких скоростей (см. рис. 5, а). Это связано с увеличением запаса тепла в отливке. С другой стороны, это увеличение приводит к росту зоны с низкими скоростями охлаждения. При этом начало появления такой зоны фиксируется при величине 58 МДж/м<sup>3</sup>. Данному значению объёмной теплоёмкости соответствует максимальное значение величины зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами, равное 12,7 мм.

Исследования показали, что область образования карбидов с требуемой морфологией соответствует изменению объёмной теплоёмкости стенки отливки в пределах 44,94 - 74,34 МДж/м<sup>3</sup> (см. рис. 5, б).

Расположение и геометрия величины зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами в зависимости от изменения объёма теплоёмкости стенки формы представлен на рис. 6.

Область требуемого карбидообразования соответствует изменению объёмной теплоёмкости стенки формы, находящейся выше в пределах 44,85 МДж/м<sup>3</sup>.

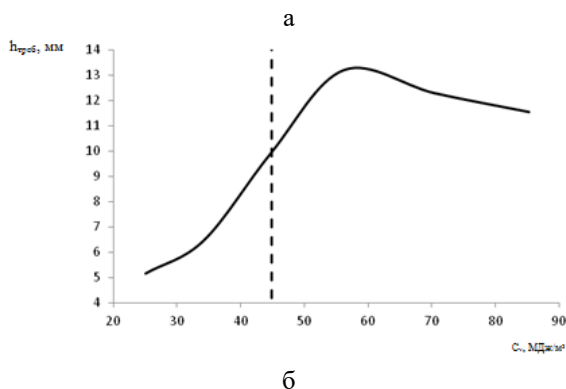
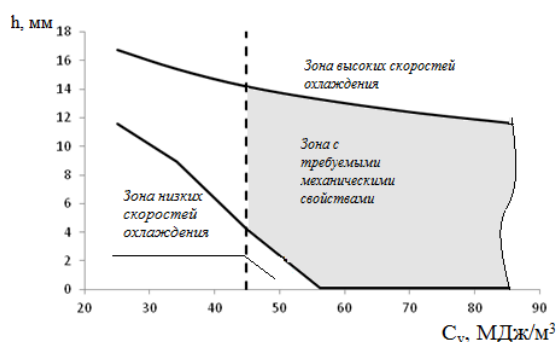


Рис. 6. Влияние объёмной теплоёмкости материала формы на:

- а – геометрию и расположение зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами; б – размер зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами

Установлено, что при низкой теплоёмкости материала формы образуется достаточно узкая зона с требуемыми эксплуатационными свойствами литой заготовки, которая расширяется с увеличением объёмной теплоёмкости материала формы.

Это связано с тем, что при низкой теплоёмкости материала формы требуется незначительное количество тепла от стенки отливки, затраченное на ее нагрев. После чего потеря тепла от стенок отливки происходит за счет излучения с поверхности металлической формы в окружающую среду.

Теплоотвод из стенки отливки в форме осуществляется теплопередачей. При этом тепло расходуется в основном на прогрев стенки кокиля. Как следствие, на графике (рис. 6, а) наблюдается увеличение зоны высоких скоростей и уменьшение области низких скоростей. При этом величина зоны с требуемыми эксплуатационными свойствами достигает своего максимума, равного 13,2 мм при значении объёмной теплоёмкости материала формы 56,22 МДж/м<sup>3</sup>.

### Заключение

1. Проведен анализ и представлены графические зависимости влияния теплофизических характеристик отливки и материала формы на формирование зоны с высокими эксплуатационными свойствами в отливке из стали 150ХНМ.

2. Получена количественная оценка влияния теплофизических характеристик отливки и материала формы на геометрию и расположение зоны с требуемыми высокими эксплуатационными свойствами отливки из стали 150ХНМ.

3. Разработан подход, направленный на расширение теории управления эксплуатационными свойствами отливки из стали 150ХНМ за счет ее структурообразования.

### Список источников

1. Исследование процесса формирования литой структуры валковой стали / Н.А. Феоктистов, К.Н. Вдовин, А.С. Савинов, Е.В. Скрипкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 7 (242). С. 36-40.
2. Оценка влияния углерода на эксплуатационные свойства и микроструктуру валковой стали/ Н.А. Феоктистов, В.П. Чернов, А.С. Савинов, Д.А. Горленко, И.В. Михалкина // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 7 (254). С. 35-40.
3. Каипов В.Р., Феоктистов Н.А., Савинов А.С. Оценка влияния углерода на свойства заэвтектоидных валковых сталей // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. тез. докл. 79-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. Т.1. С. 107.
4. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Варламова Д.В. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы // Черные металлы. 2011. Спец. вып. С. 36-38.
5. Савинов А.С. Расчет теплоемкости затвердевающей стенки отливки // Теория и технология ме-

таллургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2011. Вып. 11. С. 130–133.

6. Расчет температурного поля системы «отливка-форма»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А.С. Савинов,

С.М. Андреев, А.С. Тубольцева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU). № 2012616405; опубл. 13.07.12, ОБПБТ № 4 (I ч.). С. 97.

#### Сведения об авторах

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

**Михалкина Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [miv.mgtu@mail.ru](mailto:miv.mgtu@mail.ru)

**Ступак Александра Алексеевна** – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [aleksandra.stupak@mail.ru](mailto:aleksandra.stupak@mail.ru)

**Осипова Ольга Александровна** – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [ocipova\\_1977@mail.ru](mailto:ocipova_1977@mail.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](mailto:koks1690@mail.ru)

**Элиджарова Ксения Святославовна** – магистрант кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: [darkelfie4ka@mail.ru](mailto:darkelfie4ka@mail.ru)

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### FORECASTING THE GEOMETRY AND LOCATION OF THE HIGH-PERFORMANCE ZONE IN THE WALL

**Feoktistov Nikolay A.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the department of foundry and material science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [fna87@mail.ru](mailto:fna87@mail.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](mailto:savinov_nis@mail.ru)

**Mikhalkina Irina V.** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor of cast process and material science department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [miv.mgtu@mail.ru](mailto:miv.mgtu@mail.ru)

**Stupak Aleksandra. A.** – senior lecturer of the Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [aleksandra.stupak@mail.ru](mailto:aleksandra.stupak@mail.ru)

**Osipova Olga A.** – senior lecturer of the Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [ocipova\\_1977@mail.ru](mailto:ocipova_1977@mail.ru)

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

**Elidzharova Ksenia S.** – student of machines and Technologies of processing by pressure and Engineering Technologies Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [darkelfie4ka@mail.ru](mailto:darkelfie4ka@mail.ru)

**Abstract.** The article considers the issue of modeling the geometry and location of the metal layer with the required performance characteristics for casting from steel 150KhNM. Mathematical calculation was carried out using the numerical solution of the heat conduction problem by the finite difference method. The study was carried out on a flat wall of the casting during its crystallization and cooling in a metal mold.

The influence of the thermophysical properties of the casting and the mold on the size and position of the zone with high performance characteristics was studied. The quality of the required layer was determined by the required cooling rates of 3-7 °C in the crystallization temperature range of 1383-1223 °C and with cooling rates of 0.6 - 2 °C in the region of carbide formation - in the temperature range of 607 - 801 °C. The values of the considered cooling rates were determined from the literature data. It has been established that an increase in the thermal conductivity of both the casting and the wall of the steel mold (mould mold) leads to an extreme increase in the size of the layer with high performance properties with maxima at 40 W/mK and 25 W/mK, respectively.

The influence of the volumetric heat capacity  $C_v$  of the casting is expressed by a decrease in the zone of high speeds with the formation of the maximum value of the zone with the required operational properties, equal to 12.7 mm.

At the same time, an increase in the volumetric heat capacity of the mold increases the zone of high speeds at the maximum value of the layer size with the required performance characteristics, equal to 13.2 mm.

**Keywords:** rate of cooling, thermophysical properties, casting mold, operational properties, steel 150KhNM.

---

Ссылка на статью:

Прогнозирование геометрии и расположения зоны с высокими эксплуатационными свойствами в стенке отливки из стали 150ХНМ при изменении тепловых условий ее формирования / Н.А. Феоктистов, А.С. Савинов, И.В. Михалкина, А.А. Ступак, О.А. Осипова, К.И. Рудь, К.С. Элиджарова // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 31-36.  
Feoktistov N.A., Savinov A.S., Mikhalkina I.V., Stupak A.A., Osipova O.A., Rud K.I., Elidzharova K.S. Forecasting the geometry and location of the high-performance zone in the wall. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 31-36.