

УДК 621.74:669.1

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-79-85

## ТЕРМОВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ МАРКИ 150ХНМ

Ефимов А.В., Чернов В.П.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

### Аннотация

**Постановка задачи (актуальность работы):** термическая обработка металлических изделий является неотъемлемой частью технологического процесса любого машиностроительного предприятия. Она может являться как промежуточной операцией в производственном цикле, так и основной конечной операцией при создании деталей машин. Это энергетически затратная операция, требующая немалых ресурсов. **Цель работы:** изучение оптимальных режимов термовременной обработки для изделий из различных марок сталей. Термовременная обработка также является одним из видов термической обработки металлов. Представляет собой кратковременное тепловое воздействие на металл при невысоких температурах, улучшая его механические характеристики при небольших энергетических затратах вследствие кратковременного воздействия. Задачей данных исследований является поиск рациональных режимов термовременной обработки для отливок из стали марки 150ХНМ. **Используемые методы:** для анализа химического состава стали применялся спектральный метод определения содержания химических элементов. Для термического анализа отливок – метод дифференциальной сканирующей калориметрии. **Новизна:** среднеуглеродистая валковая сталь данной марки подвергается очень сложной и энергоемкой термической обработке. Термовременная обработка позволяет упростить режимы термической обработки отливок и снизить энергетические затраты. Сталь марки 150ХНМ является заэвтектоидной, используется для изготовления кованых и литых валков горячей прокатки, а также применяется для изготовления валков холодной прокатки. Режим термической обработки для данной марки стали состоит из предварительного тройного отжига и окончательной термической обработки по режиму двойной нормализации с высоким отпуском. Существенным недостатком данной стали после прохождения такой термической обработки является невысокая твердость металла. Это связано с низкой скоростью охлаждения после аустенизации, процесса, аналогичного закаливанию углеродистых сталей, состоящего из нагрева до 1050–1100°C, кратковременного (в течение 10 мин) выдерживания при этой температуре и последующего быстрого охлаждения. **Результат:** проведенные эксперименты показали, что, используя термовременную обработку для данной марки, можно повысить твердость металла, не прибегая к сложным и энергозатратным режимам термической обработки. **Практическая значимость:** получены исходные данные для проведения режимов термовременной обработки для отливок из марки 150ХНМ.

**Ключевые слова:** сталь, термовременная обработка, структура, твердость, износстойкость, температура, нагрев, охлаждение.

### Введение

Термическая обработка металлов в твердом состоянии представляет собой целую совокупность различных нагревов, а также охлаждений и выдержек при различных температурах. Данная операция является неотъемлемым обязательным звеном технологического процесса производства полуфабрикатов и деталей машин [1]. На металлургических и машиностроительных заводах термическая обработка выступает как промежуточная операция технологического цикла, так и конечная операция для придания определенного комплекса механических свойств. Термическая обработка стали включает в себя нагрев деталей или изделий до опреде-

ленной температуры, выдержку при этой температуре определенное время и последующее охлаждение [2]. Применяя различные режимы термической обработки, т. е. изменяя температуру, длительность нагрева, время выдержки изделия в нагретом состоянии и скорость охлаждения, получают желаемую структуру стали, а следовательно, ее свойства. Термическая (тепловая) обработка – самый распространенный в современной технике способ изменения свойств металла. На металлургических и машиностроительных заводах термическая обработка является одним из важнейших звеньев технологического процесса производства полуфабрикатов и деталей машин [3, 4]. Термообработку применяют как промежуточную операцию для улучшения технологических свойств металла (обрабатывающей давлением, резанием и др.), так и оконча-

тельную операцию для придания металлу такого комплекса механических, физических и химических свойств, который обеспечивает необходимые служебные характеристики изделия. Чем ответственнее конструкция, тем, как правило, больший удельный вес в ней занимает термически обработанный металл [5]. При нагревах и охлаждениях в металле возникают изменения структуры, которые обуславливают полезные или вредные изменения механических, физических и химических свойств и влияют на его поведение при обработке и службе. По глубине и разнообразию структурных изменений, создаваемых термообработкой, с ней не могут сравняться механические или какие-либо другие внешние воздействия на металл. Среди основных видов термической обработки следует отметить следующие несколько операций. Отжиг (гомогенизация и нормализация). Целью является получение однородной зёренной микроструктуры и растворение включений. Последующее охлаждение является медленным, препятствующим образованию неравновесных структур типа мартенсита. Закалку проводят с повышенной скоростью охлаждения с целью получения неравновесных структур типа мартенсита. Критическая скорость охлаждения, необходимая для закалки, зависит от материала. Отпуск необходим для снятия внутренних напряжений, внесённых при закалке. Материал становится более пластичным при некотором уменьшении прочности. Дисперсионное твердение (старение). После проведения отжига проводится нагрев на более низкую температуру с целью выделения частиц упрочняющей фазы. Иногда проводится ступенчатое старение при нескольких температурах с целью выделения нескольких видов упрочняющих частиц. Термическая обработка придаёт стальным изделиям определенные механические свойства: высокую твердость, повысив этим сопротивление износу, меньшую хрупкость для улучшения обработки или повышения ударной вязкости и т. д. Это достигается нагревом и последующим охлаждением стали по строго определенному температурному режиму. В результате в нужном направлении изменяется структура стали, которая и определяет ее механические свойства. Термообработка позволяет улучшить характеристики металлов, продлив тем самым срок эксплуатации деталей, уменьшить массу и габариты металлических изделий, увеличить значения допустимых напряжений. Целью дан-

ного исследования является разработка параметров термовременной обработки для отливок в твердом виде как одной из современных видов термической обработки стали [6, 7].

### **Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки**

Для определения основных параметров термовременной обработки для отливок из стали марки 150ХНМ использовался термический и химический анализ образцов стали. Из готовой стали отбирали образец для определения химического состава на эмиссионном спектрометре «SPECTROMAX» фирмы «SPECTRO».

Одним из методов термического анализа, позволяющим фиксировать температурные интервалы фазовых превращений и получать информацию о значении критических точек в металлах и сплавах, является дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК).

Исследования проводились на приборе синхронного термического анализа STA (inptiter 449 F3) фирмы «NETZSCH». Прибор предназначен для одновременного проведения дифференциальной сканирующей калориметрии и термogravиметрического анализа (ТГ). При анализе в одной системе за одно определение измеряются изменение массы (ТГ) и тепловые эффекты (ДСК) исследуемого образца. Для проведения исследований тигли – один с образцом стали, другой пустой (контрольный) – устанавливаются в трубчатой печи вертикально на держателе образца. После установки и герметичного закрытия печь нагревается со скоростью 20°C/мин до температуры 1000°C в атмосфере инертного газа (аргона). Материал, из которого изготовлен тигель с образцом и контрольный тигель, – оксид алюминия.

Изменения в ходе исследований тепловых потоков между двумя тиглями регистрируются и анализируются с помощью программного обеспечения. Полученные данные сравниваются с контрольным тиглем, материал которого во время исследований не претерпевает химических или фазовых превращений. При этом определяют вид реакции (экзотермические или эндотермические) и фазовые превращения, которые приводят к изменениям теплового потока в тигле с образцом [8, 9].

Термограмма стали 150ХНМ представлена на рис. 1.

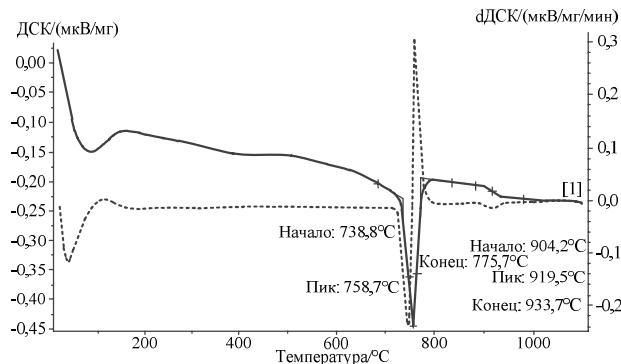


Рис. 1. Термограмма стали 150ХНМ

В диапазоне температур от 738 до 775°C имеется область, которая характеризуется периодом зарождения новой фазы. При этом происходит растворение уже имеющихся карбидов и зарождение центров кристаллизации новой фазы (аустенита). Минимальный пик при 759°C характеризует максимальную скорость образования центров кристаллизации.

Химический состав стали (масс. %): С – 1,45; Si – 0,29; Mn – 0,65; P – 0,018; S – 0,015; Cr – 0,995; Ni – 1,05; Cu – 0,13; V – 0,016; W – 0,011; Al – 0,03; Mo – 0,18; Nb – 0,003. Прибор SPECTROMAX позволяет определить содержание всех химических элементов, нормируемых в металлургии, включая следовые содержания углерода, фосфора, серы и азота. Калибровочные модули разработаны для наиболее важных матричных элементов, таких как Fe, Al, Cu, Ni, Co, Ti, Mg, Zn, Sn и Pb. Калибровки включают в себя полный диапазон элементов.

Анализ структурных составляющих производился на микроскопе фирмы «ТЕХОМЕТ» при различных увеличениях. Микроструктура стали марки 150ХНМ в исходном (литом) состоянии представляет смесь тонкодисперсного перлита и цементита, располагающегося по границам зерен в виде сетки с участками грубого игольчатого строения. Средняя твердость стали составляет 300–340 НВ.

Структура состоит из перлитной матрицы и вторичного цементита, выделившегося по границам дендритных ветвей и первичных зерен аустенита в виде сетки и грубых пластин, растущих от пограничной сетки внутрь дендритных ветвей. В междупетвиях дендритов образуются участки эвтектического карбида. Вдоль сетки и пластин вторичного карбида образуется ферритная оболочка. В зависимости от скорости охлаждения ниже точки  $A_1$  эвтектоидный аустенит превращается либо в пластинчатый, либо частично в пластинчатый, а частично в зернистый перлит (рис. 2).

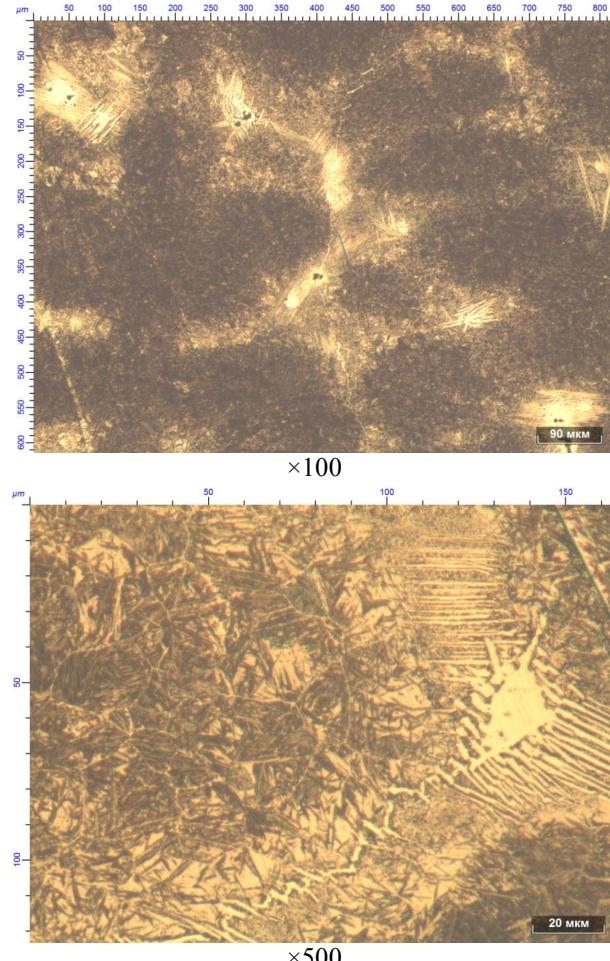


Рис. 2. Структура литой стали 150ХНМ

Термовременная выдержка производилась в печи сопротивления «Накал» модели ПЛ 20/12,5 мощностью 3 кВт и максимальной температурой 1350°C.

В предварительно нагретую до температуры 760°C печь помещали два образца стали. При заданной температуре образцы выдерживались в печи в течение 19 мин. Данное время выдержки рассчитывается в зависимости от толщины стенки отливки. После термической обработки первый образец охлаждался в воде, второй образец спокойно охлаждался на воздухе до комнатной температуры. Первый испытуемый образец стали имеет твердость в литом состоянии 38 HRC, второй образец – 35 HRC. Пройдя первый цикл термовременной обработки, твердость первого составила 55 HRC, твердость второго 30 HRC. Значительно повысилась твердость первого образца, охлажденного в воде, в то время как твердость второго образца, охлаждаемого на воздухе, понизилась. Произошла перекристаллизация структуры первого образца стали. Выявилась новая мелкодисперсная фаза (рис. 3, 4).

В структуре второго образца стали, прошедшего спокойное охлаждение на воздухе до комнатной температуры, особых изменений не выявлено. Далее те же самые образцы прошли аналогично второй цикл термовременной обработки при тех же равных условиях. В обоих случаях произошло укрупнение структуры, как в первом, так и во втором образцах.

Первый образец имеет твердость 63–64 HRC. Происходит дальнейшая перекристаллизация, рост зерна. Выявились новая фаза пластинчатого перлита. Второй образец имеет более мелкую, слегка иную структуру. На данном этапе твердость второго образца повысилась до 39–41 HRC. Структура представлена на рис. 5, 6.

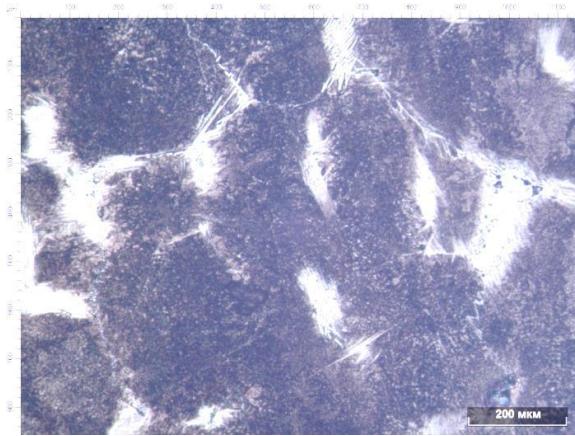


Рис. 3. Структура первого образца после первого цикла

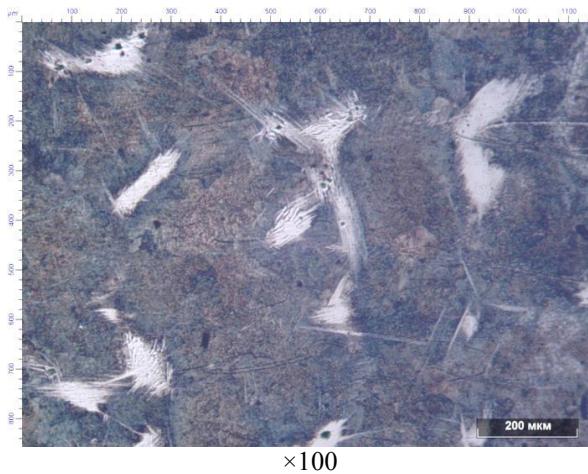


Рис. 4. Структура второго образца после первого цикла

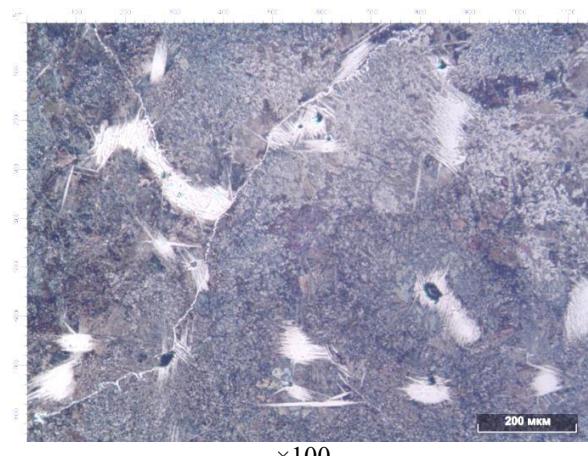
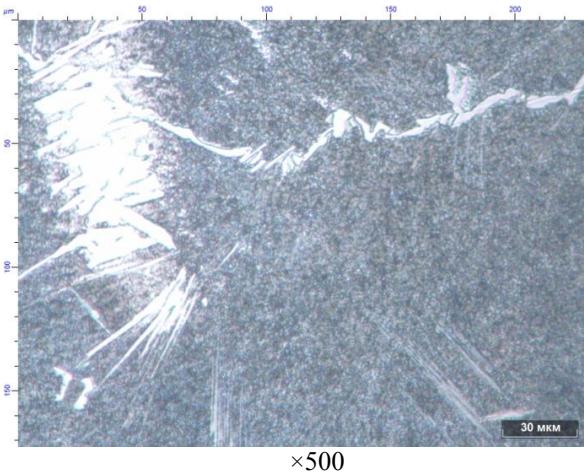
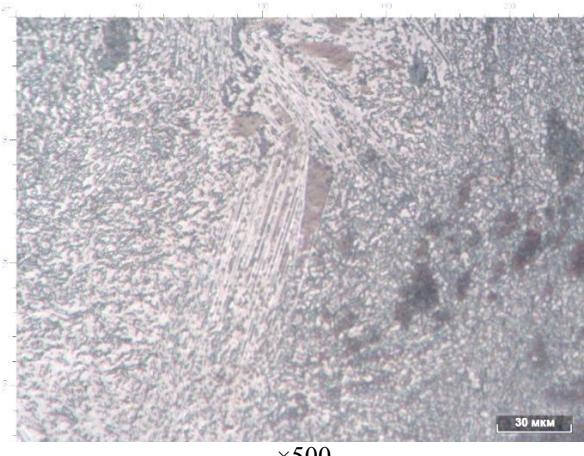


Рис. 5. Структура первого образца после второго цикла



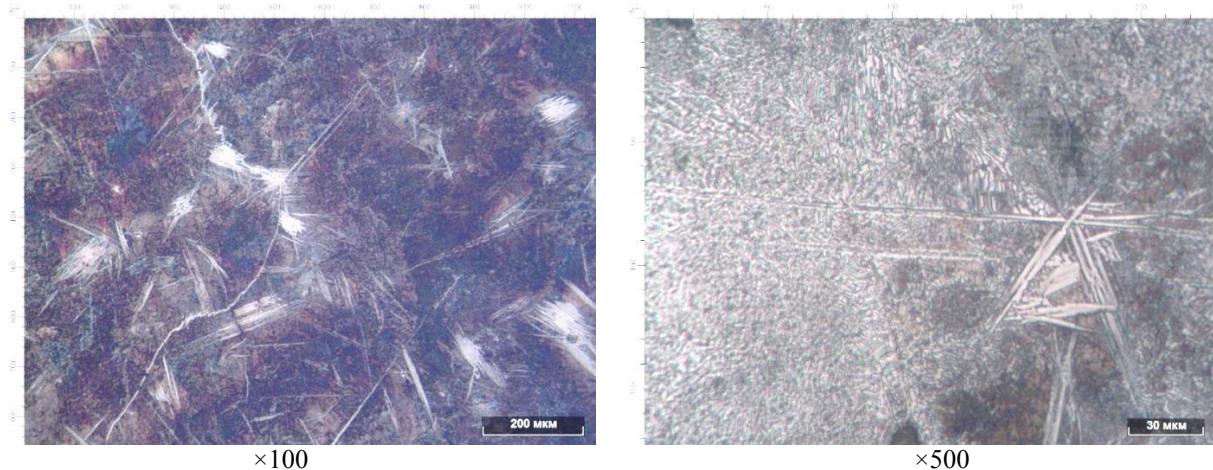


Рис. 6. Структура второго образца после второго цикла

### Результаты исследований

Для сравнения механических характеристик был взят образец той же марки стали, прошедший стандартную закалку при 1150°C с охлаждением в воде. Данный образец имеет твердость 64 HRC. Структура данного образца представлена на рис. 7.

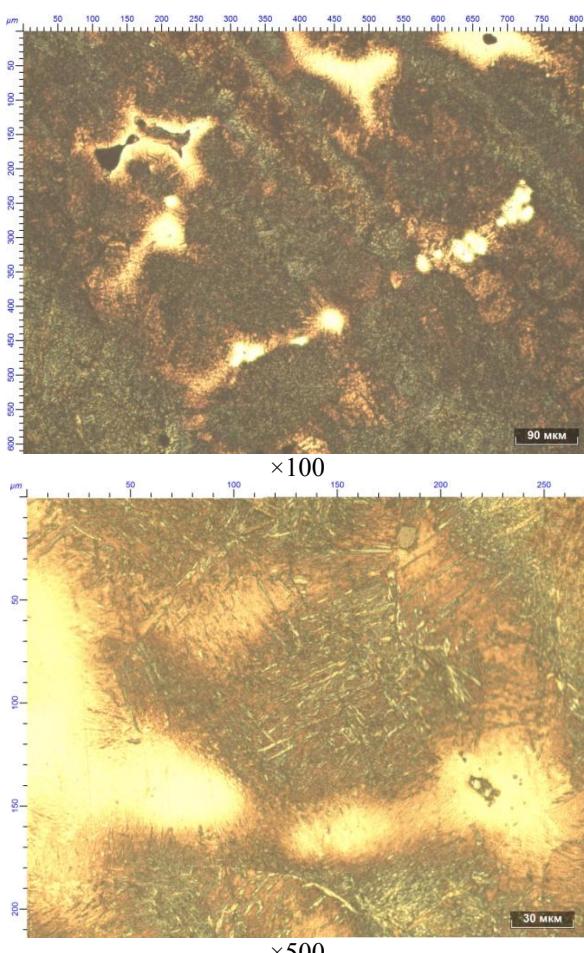


Рис. 7. Структура образца, прошедшего закалку при 1150°C

В таблице приведены данные механических свойств, твердости и абразивной износостойкости образцов, прошедших различные режимы обработки. Испытания по износостойкости проводились в соответствии с ГОСТ 23.2080-079 [10].

### Механические свойства

Образец	Твердость, HRC	Ки
Литой	38–39	0,44
(ТВО) охл. воздух	39–41	0,36
(ТВО) охл. в воде	63–64	0,69
Закалочный	61–64	0,70

Исходя из полученных результатов испытаний, можно сделать вывод о том, что образец стали 150ХНМ, прошедший термовременную обработку с охлаждением в воде, имеет аналогичные механические свойства твердости и износостойкости, как у образца стали, который прошел стандартную закалку. Закалочный образец имеет грубую игольчатую разнородную структуру. В отличие от него образец, прошедший термовременную обработку, имеет совсем иную зернистую равномерную структуру. Данная структура состоит из равномерно упорядоченных зерен округлой формы по их краям. Теоретически такая структура предполагает более высокие механические свойства стали, способность стали сопротивляться различным переменным нагрузкам. Термовременная обработка стали позволяет значительно упростить и сократить режим термической обработки стали марки 150ХНМ.

### Заключение

При использовании проведенных исследований были разработаны определенные параметры режима термовременной обработки в твердом виде для отливок из стали марки 150ХНМ.

Термовременная обработка позволяет в значительной степени сократить и упростить режимы термической обработки и снизить энергетические затраты на термообработку стальных отливок. При этом твердость сохраняется на том же уровне, а структура становится более равномерной, что позволяет получать более высокие механические свойства отливок из данной марки стали. Происходит рекристаллизация и упорядочевание зерен металла. Такая структура способствует повышению твердости и износостойкости стали, которые практически не уступают тем, которые получают при стандартной закалке.

#### Список литературы

1. Будагянц Н.А., Карский В.Е. Литые прокатные валки. М.: Металлургия, 1983. 245 с.
2. Образование горячих трещин в низколегированной стали: исследование критических режимов / Брунелли К., Бруски С., Джотти А., Ленчина Р., Дабала М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №1. С. 79–87.
3. Влияние режимов термовременной выдержки на структуру и свойства стальных отливок / Емельянов А.А., Чернов В.П., Ефимов А.В., Данилюк К.А // Литейные процессы / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2010. С. 12–16.
4. Пат. 2540241 Российская Федерация. Сталь для изготовления кованых прокатных валков / А.Г. Орлов, Е.Н Шестакова, Г.А. Орлов, А.И. Потапов. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения» Уральского отделения Российской академии наук; заявл. 2012; опубл. 2014.
5. Гудцов Н.Т., Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Маталловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник. М.: Металлургиздат, 1956. С. 1204.
6. Гуляев А.П. Маталловедение. М.: Металлургия, 1978. 648 с.
7. Свойства и стойкость валков из заэвтектоидной стали / Т.С. Скобло, В.А. Воронина, Н.И. Сандлер и др. // БНТИ ЧМ. 1971. Вып. 3(647). С.35–37.
8. Повышение износостойкости стали 150ХНМ высокртеппературной закалкой / Филиппов М.А., Гервасьев М.А., Худорожкова Ю.В., Юрьевских В.В., Легчило В.В., Гаранин Н.А.; ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина». Екатеринбург, 2010. 115 с.
9. Ефимов А.В., Чернов В.П. Изменение структуры литой стали при термовременной обработке // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 125 с.
10. Коршунов Л.Г. Изнашивание металлов при трении // Маталловедение и термическая обработка стали / под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1991. Т. 1, кн. 2. С. 289–424.

Материал поступил в редакцию 03.10.16.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2017-15-1-79-85

## TRANSIENT HEAT TREATMENT OF 150KhNM STEEL CASTINGS

Andrey V. Efimov – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Unspok@mail.ru

Viktor P. Chernov – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

#### Abstract

**Problem Statement (Relevance):** Heat treatment of metal products is an integral part of any machine building process. Heat treatment can either be an intermediate operation in the production cycle or the main final operation in machine part manufacturing process. Heat treatment is an energy consuming operation that requires considerable resources. **Objectives:** This research aims to study the optimum transient heat treatment modes for products made from various steel grades. Transient heat treatment is another type of heat treatment applicable to metals when metal is exposed to low heat for a short period of time resulting in enhanced mechanical properties at low energy costs. The objective of this research is to identify the optimum transient heat treatment modes for 150KhNM steel castings. **Methods Applied:** Spectroscopy was applied to analyse the chemical composition of the steel. Differential scanning calorimetry was applied

for the thermal analysis of the steel castings. **Originality:** The heat treatment technique applied to medium-carbon roller steel of the above grade is quite complex and energy-intensive. Transient heat treatment provides a simpler heat treatment operation enabling to reduce the energy costs. 150KhNM is a hypereutectoid steel grade used for the manufacture of forged and cast rolls for hot rolling mills, as well as for cold rolling mill rolls. The heat treatment process applied to the 150KhNM steel includes preliminary triple annealing followed by final double normalizing and high-temperature tempering. A significant drawback of the steel after the heat treatment procedure described above includes the resultant low hardness caused by the low cooling rate after austenitization. Austenitization is a process similar to quench hardening of carbon steel when steel is heated to 1050–1100 °C followed by a short-term soaking (for 10 min.) and subsequent rapid cooling. **Findings:** The results of the experi-

ments show that transient heat treatment applied to the 150KhNM steel can result in an increased hardness while saving the need for complex and energy-intensive heat treatment operations. **Practical Relevance:** As a result of the research, initial data were obtained for transient heat treatment modes applicable to 150KhNM steel castings.

**Keywords:** Steel, transient heat treatment, structure, hardness, wear resistance, temperature, heating, cooling.

### References

1. Budagjants N.A., Karsskiy V.E., *Litue prokatnue valki* [Cast rolls for rolling mills]. Moscow: Metallugiya, 1983, 245 p.
2. Brunelli K., Bruschi S., A. Giotti A., Lencina R., Dabala M. Hot cracking in low alloy steel: A study of critical conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, no. 1, pp. 79–87.
3. Emelyanov A.A., Chernov V.P., Efimov A.V., Daniilyuk K.A. The effect of short-term soaking on the structure and properties of steel castings. *Casting processes*. Ed. by V.M. Kolokoltsev. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2010, pp. 12–16.
4. Orlov A.G., Shestakova E.N., Orlov G.A., Potapov A.I. *Stal' dlya izgotovleniya prokatnykh valkov* [Steel to produce forged rolling mill rolls]. Patent RF, no. 2540241, 2014.
5. Gudtsov N.T., Bernstein M.L., Rahstadt A.G. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali i chугuna* [Metal science and heat treatment of steel and cast iron]. Moscow: Metallurgizdat, 1956, 1204 p.
6. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metallurgy]. Moscow: Metallurgy, 1978, 648 p.
7. Skoblo T.S., Voronina V.A., Sandler N.I. et al. The properties and durability of hypereutectoid steel rolls. BNTI ChM, 1971, vol. 3 (647), pp. 35–37.
8. Filippov M.A., Gervasiev M.A., Khudorozhkova Yu.V., Yurovskikh V.V., Legchilo V.V., Gagarin N.A. *Povushenie iznosostoykosti stali 150HNM vysokotemperaturnoy zakalkoy* [Increasing the wear resistance of 150KhNM steel by high-temperature quenching]. Yekaterinburg, 2010, 115 p.
9. Efimov A.V., Chernov V.P. Changes in the structure of cast steel during transient heat treatment. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*. [Important problems of contemporary science, technology and education]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2016, pp. 125–126.
10. Korshunov L.G. *Iznashивание металлов при трении* [Wear in metals caused by friction]. Moscow: Metallurgy, 1991, vol. 1, в. 2, pp. 289–424.

Received 03/10/16

### Образец для цитирования

Ефимов А.В., Чернов В.П. Термовременная обработка отливок из стали марки 150ХНМ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №1. С. 79–85. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-79-85

### For citation

Efimov A.V., Chernov V.P. Transient heat treatment of 150KhNM steel castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 79–85. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-79-85