

На правах рукописи

Малыхина Ольга Юрьевна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА СТРУКТУРУ И  
СВОЙСТВА КОВАННОЙ СТАЛИ 150ХНМ**

Специальность: 05.16.01. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2007 г.

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью  
«Территориальная компания «ОМЗ-Ижора»

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки и техники РФ

доктор технических наук

профессор

Солнцев Юрий Порфирьевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук,

профессор

Шахназаров Юрий Варданович

Кандидат технических наук,

доцент

Белецкий Вадим Григорьевич

Ведущая организация

Научно-производственное объединение  
«Центральный научно-исследовательский  
институт технологии машиностроения»

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_\_\_ ч. на заседании  
диссертационного совета Д 212.229.14 в Государственном образовательном  
учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский  
государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-  
Петербург, ул. Политехническая, д. 29, хим. Корпус, ауд. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
ГОУ «СПбГПУ»

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.14

Доктор технических наук,

профессор

Кондратьев С.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Условием технического прогресса в металлургии является удовлетворение растущих потребностей рынка в качественной металлопродукции. Связанная с этим непрерывная интенсификация процессов прокатного производства создает все более напряженные условия эксплуатации валков тяжело нагруженных станов.

Различные условия работы валков определяют разнообразие материалов и способов изготовления. Широкое применение в прокатном производстве находят стальные валки из высокоуглеродистых марок, к которым относится заэвтектоидная ледебуритная сталь типа 150ХНМ, известная как «адамит». По эксплуатационным характеристикам валки из этой стали превосходят кованные валки из сталей с более низким содержанием углерода, а также чугунные валки.

Традиционно валки из стали типа 150ХНМ изготавливают методом центробежного литья, однако, в силу выраженной химической и структурной неоднородности литой материал имеет повышенную хрупкость. Поэтому предпочтительным является кованный вариант, т.к. в этом случае металл более изотропен и имеет меньшее количество металлургических дефектов, что повышает его сопротивление термической усталости и, соответственно, эксплуатационную стойкость инструмента.

Несмотря на трудности изготовления кованных валков из высокоуглеродистых сталей, в российской и зарубежной практике признается их высокое качество по сравнению с литыми валками, и внедряются технологии изготовления поковок из валковых сталей, содержащих до 2% углерода. Однако промышленное производство крупных поковок (массой более 5 т) из стали 150ХНМ до 2000 г. в России не было освоено.

Таким образом, внедрение крупногабаритного кованого инструмента из стали 150ХНМ весьма актуально, является продолжением общей тенденции применения высокоуглеродистых сталей в кованом исполнении и

способствует повышению эксплуатационной стойкости валков. Для реализации этой задачи в условиях металлургического производства ОАО «Ижорские заводы» (в настоящее время это ООО «ОМЗ-Спецсталь») была разработана технология изготовления крупных поковок из стали 150ХНМ, включая технологию термической обработки, способную обеспечить высокое качество, надежность и долговечность валкового инструмента горячего деформирования. Разработка этой технологии в условиях России выполнялась впервые.

**Цель работы.** Целью работы являлась разработка технологии термической обработки крупных поковок из стали 150ХНМ, исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства ковальной стали 150ХНМ.

В соответствии с указанной целью в работе были поставлены следующие задачи:

- исследование структурных превращений при охлаждении ковальной стали 150ХНМ после нагрева до различных температур;
- оценка склонности ковальной стали 150ХНМ к росту зерна при нагреве;
- исследование влияния параметров предварительной и основной термической обработки на структуру и твердость ковальной стали 150ХНМ;
- изготовление и термическая обработка по разработанной технологии опытно-промышленной партии валкового инструмента горячего деформирования с оценкой его качества и служебных свойств;
- установление особенностей структуры и свойств металла крупногабаритных опытно-промышленных поковок из стали 150ХНМ, полученных в результате термической обработки по разработанной технологии.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Установлены закономерности структурных превращений, происходящих в ковальной стали 150ХНМ при нагреве и охлаждении в

диапазоне от 1000°С до комнатной температуры. Определены критические точки кованой стали 150ХНМ:  $A_{с1Н}$  и  $A_{с1К}$ . Установлены диапазоны скоростей охлаждения для различных механизмов превращения переохлажденного аустенита.

2. Исследованы закономерности роста аустенитного зерна кованой стали 150ХНМ при нагреве в диапазоне температур 700-1080°С.

3. Установлена предельно допустимая температура нагрева стали 150ХНМ для технологических операций, исключая ее пережог.

4. Исследовано влияние температурно-временных параметров термической обработки по режиму аустенитизации, нормализации, отжига и отпуска на структуру и свойства кованой стали 150ХНМ.

5. Разработаны типовые схемы предварительной и основной термической обработки поковок из заэвтектоидной стали 150ХНМ.

#### **Практическая значимость работы.**

Разработана технология предварительной и основной термической обработки крупных поковок из стали 150ХНМ применительно к изготовлению инструмента горячего деформирования тяжело нагруженных прокатных станов. Режим основной термической обработки защищен патентом RU 2235137 С2, 12.09.2002г.

По результатам проведенных исследований разработаны технические условия ТУ 4120-012-05764417-2000 «Поковки бандажей из стали 150ХНМ (опытная партия)».

Применение разработанных режимов термической обработки позволяет обеспечить необходимые структуру и свойства кованой стали 150ХНМ, способствующие увеличению эксплуатационной стойкости инструмента в среднем на 26% по сравнению с литыми валками.

**Апробация работы.** Материалы, составляющие основное содержание работы, докладывались на 5 конференциях: на научно-практической

конференции молодых специалистов "Ижора-2000", г. Санкт-Петербург, 2000 г.; на VIII научно-технической конференций «Прочность материалов и конструкций при низких температурах», г. Санкт-Петербург, 2002г.; на XI и XII международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов», г. Санкт-Петербург, 2005г. и 2006г.; на 7-ой международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике», г. Санкт-Петербург, 2006г; на научно-технических советах ОАО «Ижорские заводы» и ООО «Территориальная компания «ОМЗ-Ижора».

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, включая 1 патент на изобретение, список которых приведен в конце автореферата.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав и выводов. Содержание работы изложено на 137 страницах, содержит 53 рисунка, 17 таблиц. Список литературы включает 122 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов работы.

**В первой главе** дан обзор имеющихся в литературе данных, посвященных условиям работы валков горячего деформирования, принципам легирования и особенностям химического состава валковых сталей, а также режимам термической обработки кованных и литых заготовок из высокоуглеродистых сталей различных марок.

Показано, что условия работы валков сортовых станов характеризуются значительными ударными нагрузками, высокими скоростями прокатки и усилиями в сочетании с теплосменами, что предъявляет высокие требования к свойствам валков – износо- и термостойкости, сопротивлению выкрашивания

и прочности. Для изготовления валков широко применяются заэвтектоидные стали, легированные хромом, никелем и молибденом, с содержанием углерода от 1,0 до 2,0%, обеспечивающие карбидо-перлитную структуру рабочего слоя. К этой группе материалов относится сталь 150ХНМ, которая традиционно используется в литом варианте для изготовления бандажей или крупногабаритных валков. Однако широкое использование литых валков из заэвтектоидных сталей ограничено, прежде всего, вследствие их повышенной хрупкости, что является причиной преждевременного выхода из строя. Поэтому одним из способов повышения качества валкового инструмента является переход на кованный вариант изготовления.

Показано, что химический состав материала стальных валков неоднозначно влияет на их служебные свойства. Увеличение содержания углерода приводит к возрастанию прочности, твердости и износостойкости материала валков, однако увеличенное содержания углерода усиливает неоднородность распределения цементита, повышая хрупкость материала. Хром, никель, и молибден вводят в стальные валки для получения мелкозернистой дисперсной структуры, а также для упрочнения структурных составляющих валковой стали. Однако, превышение содержания этих элементов сверх оптимального уровня отрицательно влияет на качество металла, повышая его склонность к обезуглероживанию и графитизации.

Для получения необходимой твердости и структуры кованые валки горячей прокатки подвергают сложной термической обработке, которая состоит из двух этапов: предварительной термической обработки, проводимой непосредственно послековки, и основной термической обработки. Предварительная термическая обработка поковок выполняет несколько функций, основными из которых являются снижение содержания водорода в металле и подготовка поковки к последующей механической обработке. Режимы основной термической обработки заэвтектоидных сталей предусматривают реализацию эффекта перекристаллизации для измельчения

зерна и повышения дисперсности структуры, а также глобуляризацию цементитной составляющей.

Показано, что в отечественной литературе отсутствуют сведения об изготовлении крупных кованных валков из стали типа 150ХНМ, в связи с чем возникла необходимость разработки технологии изготовления крупногабаритного кованого инструмента из стали 150ХНМ, включая технологию термической обработки.

**Во второй главе** описаны состав исследуемого материала, способ его получения и методики исследования. В настоящей работе для исследования был использован металл опытно-промышленной поковки типа «кольцо». Химический состав металла поковки: 1,60% углерода, 1,02% хрома, 0,94% никеля, 0,27% молибдена, суммарное содержание серы и фосфора составляет 0,013%.

Металл был выплавлен в электродуговой печи емкостью 12 т с основной футеровкой. Температура металла перед выпуском составляла 1565°C, в начале разливки - 1490°C. Из выплавленной стали был отлит кузнечный слиток массой 12,0 т. Из слитка за 4 выноса была откована поковка типа «кольцо» массой 8,0 т со следующими габаритами:  $\varnothing$ нар. 1610 мм,  $\varnothing$ внутр. 670 мм, высота 610 мм. Температура металла при нагреве под ковку составила 1050-1070°C. Уков в результате осадки  $K_{ос}$  составил 3,0, уков в результате раскатки  $K_{раск}$  составил 1,2. По окончанииковки была выполнена предварительная термическая обработка поковки по режиму, состоящему из охлаждения в печи, нормализации при 1040°C и отжига при 690°C с медленным комбинированным охлаждением.

Для отработки режимов предварительной термической обработки ковальной стали 150ХНМ использовалась проба, отобранная во времяковки от подприбыльной части слитка. Для отработки режимов основной термической обработки ковальной стали 150ХНМ использовалось пробное кольцо сечением



100x100мм, отобранное от поковки после ее предварительной термической обработки.

Определение твердости металла при лабораторных исследованиях выполнялось методом Бринелля по ГОСТ 9012-59 на твердомере типа ТШ-2-У4.2 с диаметром шарика 10 мм. При лабораторных исследованиях также определялась микротвердость металла и его структурных составляющих с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 50 и 200 г в соответствии с ГОСТ 9450-76. Определение твердости на опытно-промышленных поковках было выполнено методом Полюди с помощью переносного твердомера ударного действия. Для оценки механических свойств металла поковки были выполнены испытания на растяжение при температуре 20°C образцов ГОСТ 1497-84 тип III №6.

Металлографические исследования выполнялись на оптическом микроскопе «Olympus VX-51M» при увеличениях от 50 до 1500 крат. Оценка микроструктуры ковальной стали 150ХНМ выполнялась методом сравнения со шкалами ГОСТ 8233-56: дисперсность перлита – шкала №1 и №2, сплошность карбидной сетки – шкала №5, степень карбидной ликвации – шкала №6Б. Кроме перечисленных характеристик также определялась величина действительного зерна по ГОСТ 5639-82 методом сравнения с эталонной шкалой №1.

Дилатометрический анализ выполнялся с помощью дилатометра ЛК-02 на образцах диаметром 2 мм длиной 12 мм. Для определения критических температур превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  образец нагревался со скоростью 3,0°C/мин. Для построения термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита образцы нагревались со скоростью 1,0°C/с до температуры 910°C и 1000°C и охлаждались до комнатной температуры с различной скоростью от 0,04 до 30,0°C/с. По завершении охлаждения с помощью микроструктурного

анализа и замера микротвердости структурных составляющих был определен характер образовавшихся продуктов превращения.

Исследование влияния температуры нагрева на величину зерна стали выполнялось методом высокотемпературной металлографии с помощью установки «НМ-4» на образцах диаметром 12 мм и высотой 10 мм. Образцы нагревались в вакуумной камере при остаточном давлении  $10^{-5}$  Па со скоростью 6-8°C/мин.

Измерение остаточных напряжений было выполнено методом рентгеноструктурного анализа на металле проб, отрезанных от торца поковки в трех зонах - вблизи наружной поверхности, в середине сечения и вблизи внутренней поверхности. На дифрактометре ДРОН-2 производилась запись дифрактограммы, в результате анализа которой определялись значения тангенциальных напряжений  $\sigma_{\tau}$ .

**В третьей главе** представлены результаты исследований структурных изменений, происходящих в ковальной стали 150ХНМ при нагреве и охлаждении, включая исследование влияния температуры нагрева на зеренную структуру и на кинетику превращения переохлажденного аустенита.

Дилатометрическим методом установлено, что критические точки для ковальной стали 150ХНМ составляют:  $A_{c1H}=721^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c1K}=748^{\circ}\text{C}$ . Мартенситное превращение начинается при температуре не выше  $115^{\circ}\text{C}$  и завершается при температуре ниже комнатной. Согласно литературным данным  $A_{cm}\approx 980^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 1 представлены термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита ковальной стали 150ХНМ после нагрева до температуры 910 и  $1000^{\circ}\text{C}$ . Установлено, что при охлаждении ковальной стали 150ХНМ от температуры  $910^{\circ}\text{C}$  в интервале скоростей охлаждения 0,04-0,30°C/с превращение аустенита проходит по диффузионному механизму с

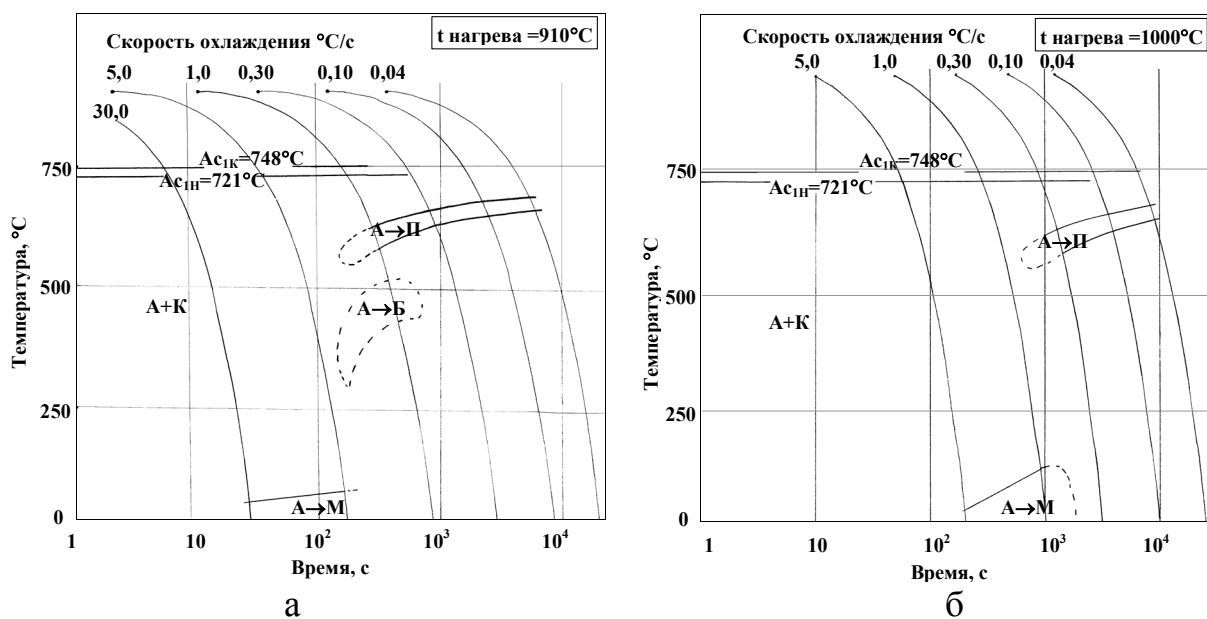


Рис. 1. Термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита кованой стали 150XNM. Температура нагрева 910°С (а) и 1000°С (б).

образованием перлита. В интервале скоростей охлаждения 0,30-5,0°С/с превращение аустенита может проходить по диффузионному, промежуточному или бездиффузионному механизму.

Повышение температуры нагрева от 910 до 1000°С приводит к подавлению бейнитного превращения, к повышению стабильности аустенита и к увеличению твердости продуктов превращения. В результате критическая скорость закалки снижается от 5,0°С/с до 1,0°С/с, а зона диффузионного превращения смещается в область более низких температур: от 690-590°С до 670-570°С соответственно.

Увеличение температуры нагрева в диапазоне 910-1000°С и скорости охлаждения в диапазоне 0,04-1,0°С/с способствует повышению твердости продуктов превращения аустенита (рис. 2), что связано как с увеличением степени легирования ферритной фазы перлитной составляющей, так и с изменением механизма превращения. В результате превращения аустенита в диффузионной области происходит формирование структуры с твердостью до

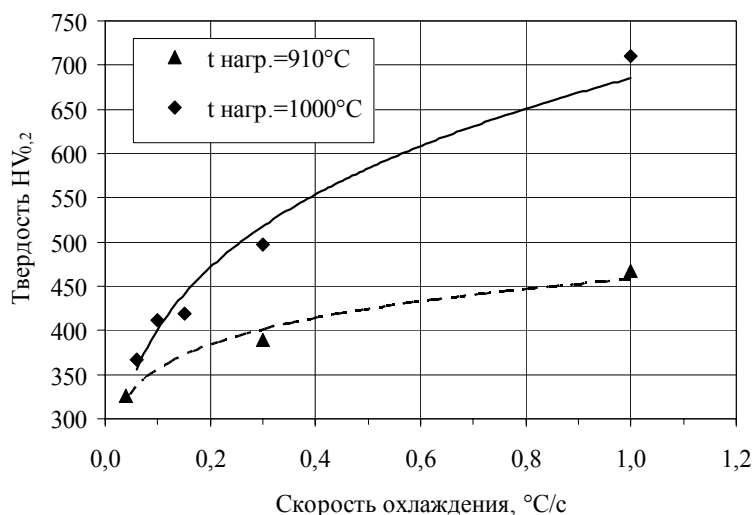


Рис. 2. Влияние температуры нагрева и скорости охлаждения на твердость ковальной стали 150ХНМ.

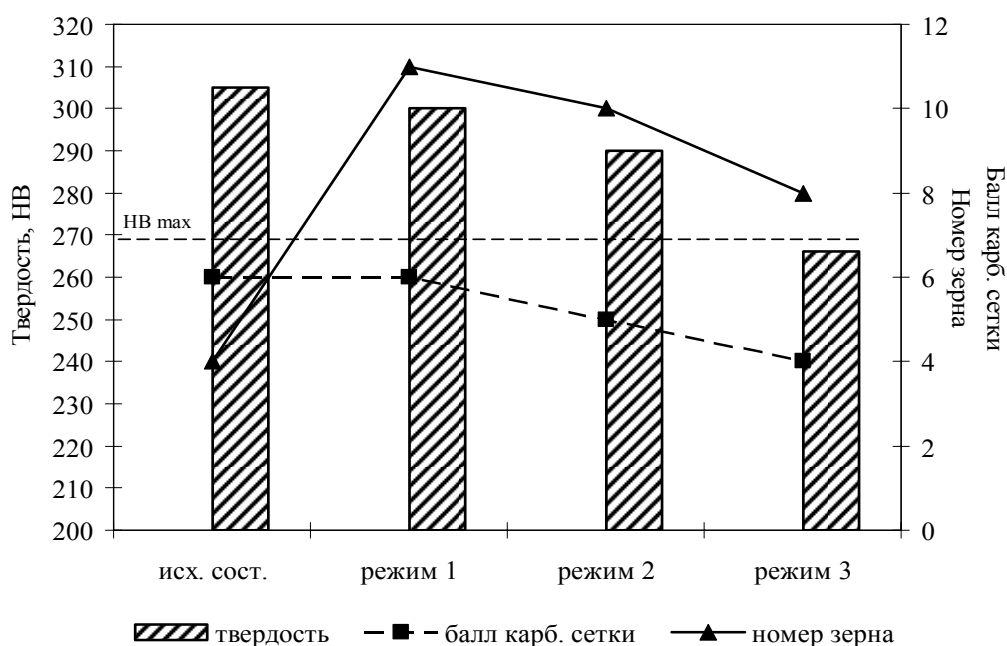
500HV<sub>0,02</sub>, в результате превращения аустенита в бездиффузионной области происходит формирование структуры с твердостью до 700 HV<sub>0,02</sub>.

Методом высокотемпературной металлографии установлено, что ковальная сталь 150ХНМ не склонна к значительному росту зерна при нагреве в диапазоне температур 700-1080°C. При температуре 1080°C начинается оплавление границ зерен аустенита на участках, прилегающих к эвтектическому цементиту (пережог).

Таким образом, для ковальной стали 150ХНМ оптимальный диапазон температур нагрева для технологических операций, включая термическую обработку, ограничивается сверху температурой пережога 1080°C. С целью исключения при термической обработке возможности превращения аустенита по промежуточному или бездиффузионному механизму, скорость охлаждения не должна превышать 0,3°C/c, а температура охлаждения должна быть не ниже 115°C.

**В четвертой главе** представлены данные по разработке технологии термической обработки поковок из стали 150ХНМ и установлению влияния параметров предварительной и основной термической обработки на структуру и свойства металла.

Задачей предварительной термической обработки (ПТО) ковanej стали 150XHM является релаксация напряжений послековки, удаление водорода, повышение обрабатываемости резанием за счет формирования структуры зернистого перлита и глобулярного избыточного цементита, твердость которой не превышает 269HB. Выполненные режимы ПТО состояли из аустенитизации при температуре выше  $A_{сm}$  с охлаждением на воздухе до температуры 650-700°C и дальнейшим охлаждением в печи до 250-300°C и из сфероидизирующего отжига при температуре, близкой к  $A_{с1}$ , с медленным комбинированным охлаждением. Температура аустенитизации варьировалась в интервале от 1020 до 1060°C, температура отжига изменялась в интервале от 690°C (ниже  $A_{с1H}$ ) до 740°C (выше  $A_{с1H}$ ). Влияние выполненных режимов на твердость и характеристики структуры ковanej стали 150XHM представлены на рис.3.



Вариант ПТО	t аустенитизации, °C	t отжига, °C
Режим 1	1020	690
Режим 2	1040	720
Режим 3	1060	740

Рис. 3. Влияние режимов ПТО на твердость и характеристики структуры ковanej стали 150XHM.

Установлено, что после ПТО по опробованным режимам микроструктура металла состоит из перлита преимущественно зернистой морфологии и избыточного цементита. Повышение температуры аустенитизации от 1020 до 1060°C способствует ликвидации грубой карбидной сетки и снижению карбидной неоднородности за счет более полного растворения цементита, однако вызывает рост зерна от номера G<sub>11</sub> до G<sub>8</sub> и снижение дисперсности перлита. Повышение температуры отжига от 690 до 740°C приводит к снижению твердости от 300 до 266 НВ, к увеличению доли зернистого перлита и к уменьшению цементитной сетки от 6 до 4 балла за счет более выраженной сфероидизации цементита.

Разработанная технология ПТО поковок из стали 150ХНМ включает аустенитизацию с нагревом до температуры 1040-1050°C и комбинированным охлаждением на воздухе и в печи, а также сфероидизирующий отжиг при температуре 730-740°C с медленным комбинированным охлаждением в печи. В результате металл приобретает микроструктуру зернистого перлита и глобулярного избыточного цементита, твердость которой не превышает 269 НВ. Это обеспечивает удовлетворительную технологичность металла при механической обработке.

Задачей основной термической обработки (ОТО) ковальной стали 150ХНМ является формирование в рабочем слое однородной структуры, состоящей из мелкодисперсного пластинчатого или сорбитообразного перлита и равномерно распределенных включений цементита. Требуемый уровень твердости составляет 300-360НВ. Выполненные режимы ОТО ковальной стали 150ХНМ состояли из 2 циклов нормализации от температуры, превышающей температуру A<sub>c1</sub>, с охлаждением ниже A<sub>r1</sub> и из отпуска для снятия напряжений. При этом температура первой нормализации была постоянной и составляла 1040°C. Варьировались параметры нормализации второго цикла – температура нагрева, время выдержки и скорость

охлаждения (табл. 1), а также параметры отпуска. Некоторые режимы включали промежуточную нормализацию с температурой нагрева 830°C, т.е. состояли из 3 циклов нормализации и отпуска.

Табл. 1 – Твердость и карбидная сетка в структуре ковanej стали 150XHM после термической обработки с различными параметрами нормализации последнего цикла.

№ режима	Варьируемый параметр	t норм., °C	τ выд., ч	V охл., °C/c	Твердость* <sup>1)</sup> , НВ	Карбидная сетка, балл
1	Температура нормализации	830	6	0,23	311 / 290	2
2		920			379 / 331	4
3	Время выдержки	920	2,5	0,23	346 / —	3
4			5,5		377 / —	4
5	Скорость охлаждения	920	6	0,13	— / 309	4
6				0,23	— / 316	4
Требования					300-360	≤ 4

Примечание: \*<sup>1)</sup> в числителе - твердость после нормализации, в знаменателе - твердость после нормализации и отпуска.

После всех выполненных режимов ОТО металл имел мелкозернистую структуру дисперсного перлита и избыточного цементита в виде разорванной сетки по границам зерен. Установлено, что применение трех циклов нормализации позволяет получить более дисперсную перлитную составляющую и более разорванную цементитную сетку по сравнению с двукратной нормализацией. Повышение температуры нагрева на нормализации последнего (перед отпуском) цикла, увеличение продолжительности выдержки и скорости охлаждения способствуют повышению твердости. Установлена необходимая продолжительность выдержки при нормализации в диапазоне 2,5÷3,5 минут на миллиметр сечения в зависимости от типа садки и места расположения поковки в печи.

В результате исследования влияния параметров отпуска (температуры нагрева в диапазоне 500-650°C и времени выдержки в диапазоне 2-16 ч) на

твердость стали построена диаграмма, позволяющая назначать режим отпуска в зависимости от требуемого уровня свойств (рис. 4).

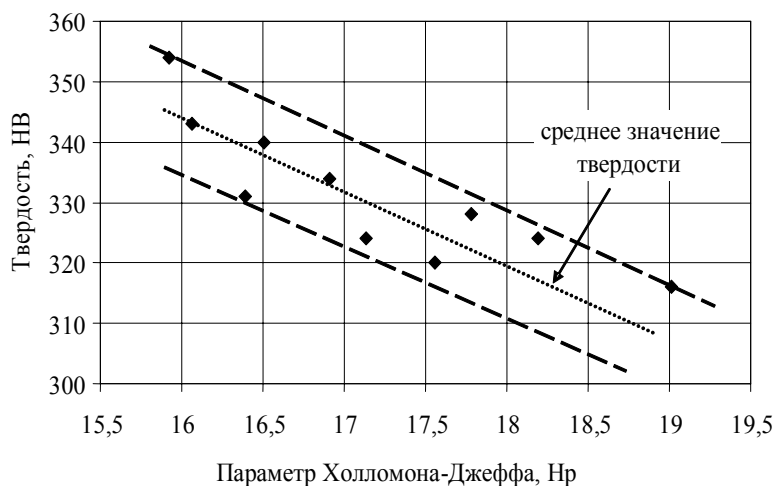


Рис. 4. Зависимость твердости кованой стали 150ХНМ от параметра Холломона-Джеффа.  $Hr = T \cdot (20 + \lg \tau) \cdot 10^{-3}$ , где  $T$  – температура отпуска в градусах Кельвина,  $\tau$  – время выдержки в ч.

Разработанная технология ОТО поковок из стали 150ХНМ включает три цикла нормализации от температур 1040-1050°C, 820-830°C и 910-920°C с охлаждением до температуры 450-500°C, а также отпуск при температуре 540-550°C с охлаждением со скоростью не более 20°C/ч. В результате металл приобретает микроструктуру, состоящую из мелкодисперсного пластинчатого перлита и равномерно распределенного избыточного цементита. Твердость находится на уровне 300-360НВ. Все это способствует обеспечению высоких эксплуатационных характеристик инструмента.

**В пятой главе** представлены данные по анализу влияния разработанных режимов термической обработки на структуру и свойства металла опытно-промышленных поковок, а также результаты исследования особенностей структуры металла крупногабаритных поковок.

Опробование и внедрение разработанной технологии предварительной и основной термической обработки кованой стали 150ХНМ осуществляли на металле 7 поковок типа «диск» ( $\varnothing$  1160мм, высота 625 мм), предназначенных



для изготовления инструмента «валок рабочий», и на металле 7 поковок типа «кольцо» ( $\varnothing$ нар. 1260-1610 мм,  $\varnothing$ внутр. 400-670мм, высота 490-610 мм), предназначенных для изготовления инструмента «валок кольцевой» и «бандаж». Масса поковок составляла 5,0-8,0 т.

В результате ПТО по разработанной технологии (рис. 5а) металл опытно-промышленных поковок приобрел микроструктуру, состоящую из перлита зернистой морфологии и избыточного цементита преимущественно глобулярной формы (рис. 5б). Твердость в поверхностном слое поковки находится на уровне 222-265 НВ, что обеспечивает удовлетворительную технологичность металла при механической обработке. По сечению поковки твердость достаточно равномерная, максимальная разница значений составляет 32 единицы НВ.

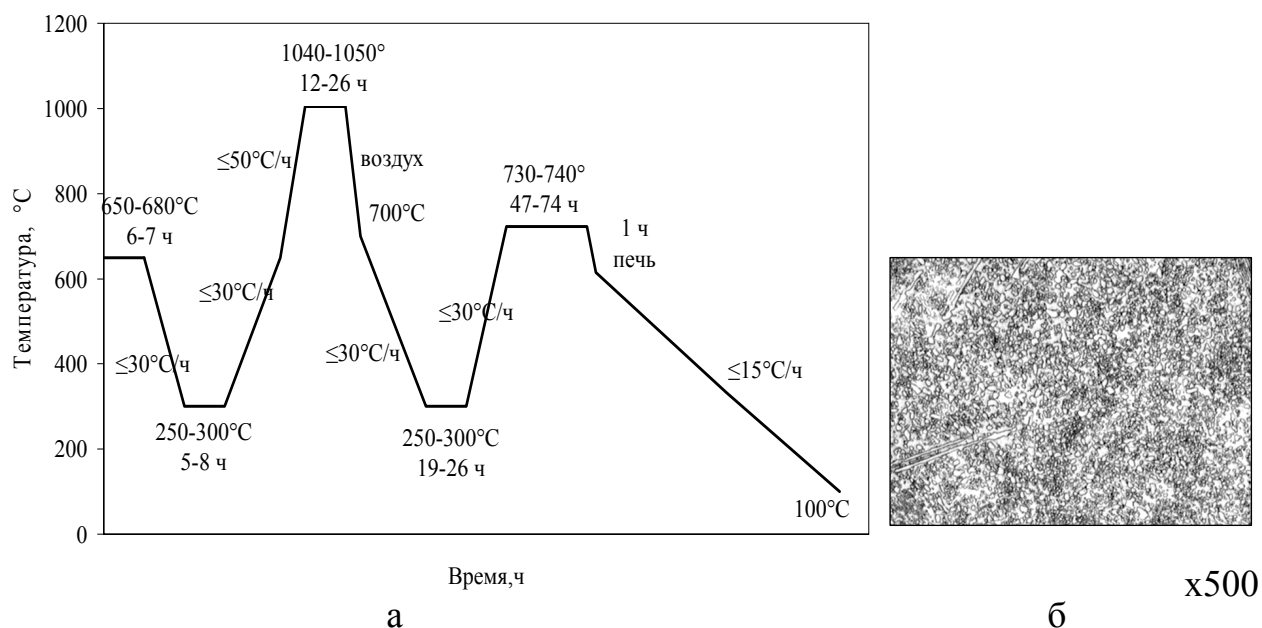


Рис. 5. Режим ПТО опытно-промышленных поковок из стали 150ХНМ (а) и сформированная в результате ПТО микроструктура металла рабочего слоя (б).

Показано, что после ПТО по режиму, отличающемуся от разработанного режима более низкой температурой охлаждения на воздухе и более низкой температурой отжига, цементит не имеет глобулярной формы, а

твердость составляет более 300НВ, что неблагоприятно с точки зрения технологичности металла при механической обработке. Полученные результаты подтверждают рациональность разработанного режима ПТО.

В результате ОТО по разработанной технологии (рис. 6а) металл рабочей зоны глубиной до 50 мм от поверхности опытно-промышленных поковок приобрел однородную мелкодисперсную микроструктуру (рис. 6б) и твердость 314-347 НВ. Формирование такой микроструктуры, уровень твердости, а также низкий уровень остаточных напряжений, составляющий не более 11% от величины предела текучести, обеспечили высокую эксплуатационную стойкость и надежность инструмента, что подтверждает рациональность разработанного режима.

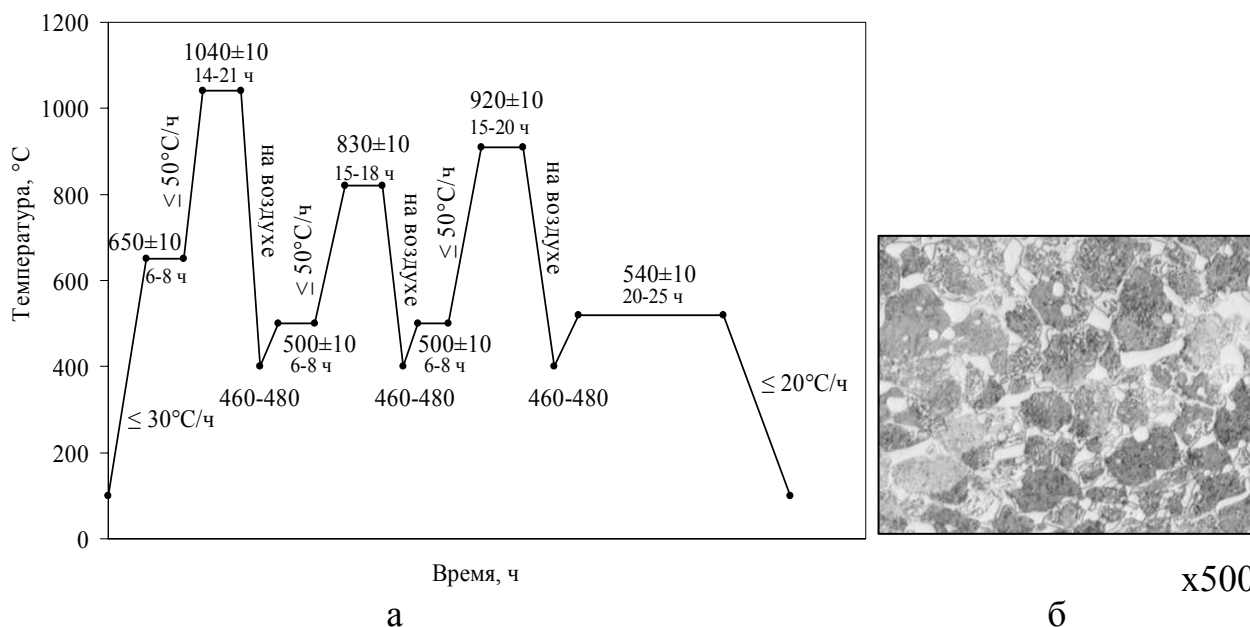


Рис. 6. Режим ОТО опытно-промышленных поковок из стали 150ХНМ (а) и сформированная в результате ОТО микроструктура металла рабочего слоя (б).

Показано, что мелкозернистая мелкодисперсная структура металла наблюдается по всему сечению поковки. При этом структура, обладающая незначительной карбидной неоднородностью (не более 3 балла), сохраняется на глубине до 100 мм от поверхности поковки.

Кованый инструмент горячего деформирования, изготовленный из указанных поковок и штатных поковок более позднего выпуска вплоть до 2006 г. с применением разработанной технологии термической обработки, показал высокую эксплуатационную стойкость, которая в среднем на 26% превышает стойкость инструмента, изготовленного методом центробежного литья.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. На основании опыта применения валков из высокоуглеродистых марок стали, к которым относится заэвтектоидная ледебуритная сталь типа 150ХНМ, показано, что по сравнению с литыми валками кованый металл обладает лучшими эксплуатационными характеристиками в силу его более выраженной изотропности и меньшей пораженности металлургическими дефектами. Сформулированы задачи работы по разработке режимов предварительной и основной термической обработки впервые произведенных в России крупных поковок из стали 150ХНМ, с целью обеспечения высоких эксплуатационных свойств инструмента горячего деформирования тяжело нагруженных станов.

2. В результате исследования кинетики превращения переохлажденного аустенита стали 150ХНМ установлено, что после нагрева до температуры 910°C в зависимости от скорости охлаждения превращение аустенита может проходить по диффузионному, промежуточному или бездиффузионному механизму. Повышение температуры нагрева до 1000°C приводит к подавлению бейнитного превращения и к повышению стабильности аустенита, что выражается в уменьшении критической скорости закалки, а также в смещении зоны диффузионного превращения в область более низких температур с увеличением твердости продуктов превращения. Определены критические точки  $A_{с1Н}$  и  $A_{с1К}$  для кованой стали 150ХНМ. Показано, что для реализации превращения переохлажденного аустенита по диффузионному

механизму скорость охлаждения при термической обработке не должна превышать  $0,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , а температура охлаждения должна быть не ниже  $115^{\circ}\text{C}$ .

3. В результате исследования изменений зеренной структуры при нагреве установлен верхний предел температур нагрева стали для технологических операций, ограничивающийся температурой пережога  $1080^{\circ}\text{C}$ .

4. В результате исследования влияния температурных параметров термической обработки на структуру и свойства ковanej стали 150XHM разработана технология предварительной термической обработки, состоящая из аустенитизации с нагревом до температуры  $1040-1050^{\circ}\text{C}$ , комбинированного охлаждения на воздухе и в печи, а также сфероидизирующего отжига при температуре  $730-750^{\circ}\text{C}$  с медленным комбинированным охлаждением в печи. Этот режим обеспечивает формирование благоприятной микроструктуры зернистого перлита и глобулярного избыточного цементита, а также равномерную твердость металла по сечению поковок. В поверхностных слоях твердость металла составляет  $222-265\text{HB}$ , что обеспечивает его удовлетворительную технологичность при механической обработке.

5. Выполнено исследование влияния различных параметров основной термической обработки на структуру и свойства ковanej стали 150XHM. Показано, что применение трех циклов нормализации позволяет получить более дисперсную перлитную составляющую и более разорванную цементитную сетку по сравнению с двукратной нормализацией. Установлено, что увеличение продолжительности выдержки и повышение скорости охлаждения на нормализации повышает уровень твердости. Определена необходимая продолжительность выдержки на нормализации в диапазоне  $2,5\div 3,5$  минут на миллиметр сечения. Построена диаграмма, позволяющая назначать режим отпуска в зависимости от требуемого уровня свойств.

6. Разработана технология основной термической обработки поковок из стали 150ХНМ, состоящая из трех циклов нормализации от температур 1040-1050°С, 820-830°С и 910-920°С, а также отпуска при температуре 540-550°С с охлаждением со скоростью не более 20°С/ч. Этот режим обеспечивает формирование в металле поверхностной рабочей зоны глубиной до 50мм однородной мелкодисперсной микроструктуры с твердостью 314-347НВ. После проведения основной термической обработки по разработанному режиму величина остаточных напряжений в поковке составляет не более 11% от величины предела текучести, что гарантирует надежную работу инструмента.

7. Исследованы особенности макро- и микроструктуры металла опытно-промышленных поковок массой 5,0-8,0 т в состоянии после разработанных режимов термической обработки. Установлено, что структура, обладающая незначительной карбидной неоднородностью, сохраняется на глубине до 100 мм, что гарантирует высокое качество инструмента.

8. Разработанные режимы предварительной и основной термической обработки крупногабаритных поковок из стали 150ХНМ внедрены в производство. Высокое качество и эксплуатационная стойкость подтверждены результатами эксплуатации изготовленного из них инструмента. Разработанная технология основной термической обработки стали типа 150ХНМ защищена патентом РФ RU 2235137 С2, 12.09.2002г.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ**

1. Козина (Малыхина), О.Ю. Разработка режима основной термообработки ковального бандажа из стали 150ХНМ / О.Ю.Козина, Т.И.Титова, Н.А.Шульган // Тезисы докладов научно-практической конференции молодых специалистов "Ижора-2000", С.Пб., Россия. – С.Пб., 2000. – С.31.
2. Малыхина, О.Ю. Формирование структуры при предварительной термообработке ковальной заэвтектидной стали типа 150ХНМ /

- О.Ю.Малыхина, Т.И.Титова, Н.А.Шульган // Сборник трудов VII и VIII научно-технических конференций «Прочность материалов и конструкций при низких температурах», С.Пб., Россия. – С.Пб., 2002. – С.141-147.
3. Патент RU 2235137 С2, МКИ<sup>7</sup> С21D9/38. Способ термической обработки кованных валков из заэвтектоидной стали типа 150ХНМ / В.А.Дурынин, Т.И.Титова, О.Ю.Малыхина и др. – №2002124424/02; заявлено 12.09.2002; опубл. 27.08.2004, Бюлл. №24. – 3 с.
  4. Влияние основной термообработки на структуру и свойства кованой стали типа 150ХНМ / О.Ю.Малыхина, Т.И.Титова, Н.А.Шульган, Ю.П.Солнцев // Сборник трудов XI международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов» С.Пб., Россия.– С.Пб., 2005. – С.98-103.
  5. Оптимизация технологии производства кованных заготовок из стали типа 150ХНМ повышенного уровня качества / В.А.Дурынин, С.Ю.Баландин, О.Ю.Малыхина и др. // Электрометаллургия. – 2005. – № 12. – С. 32-36.
  6. Малыхина, О.Ю. Термическая обработка и качество металла поковок из заэвтектоидной стали 150ХНМ / О.Ю.Малыхина, Т.И.Титова, Н.А.Шульган // Сборник трудов XII научно-технической международной конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов» С.Пб., Россия.– С.Пб., 2006. – С.145-152.
  7. Влияние основной термообработки на структуру и свойства кованой стали типа 150ХНМ / О.Ю.Малыхина, Т.И.Титова, Н.А.Шульган, Ю.П.Солнцев // Деформация и разрушение материалов. – 2006. – №8. – с.26-29.
  8. Малыхина, О.Ю. Кованая сталь 150ХНМ и ее термическая обработка / О.Ю.Малыхина, Т.И.Титова, Н.А.Шульган // Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике : докл. 7-й международной научно-технической конф., С.Пб., Россия, 10-11 окт. 2006. – С.Пб., 2006. – С.190-193.