

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО СПЛАВА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Клочко О.Ю., Обыхвист Д.О.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

Для обоснования и разработки эффективных параметров термической обработки для валков листовых станов горячей прокатки из хромсодержащих легированных чугунов предложен комплексный подход в оценке их структурообразования на основе использования специальных методик при исследовании особенностей фазового состава оптико-математическим методом.

Методический подход по оценке влияния режимов термической обработки, включал создание комплексного анализа прогнозирования структурообразования и уровня твердости (требования НТД) высоколегированных хромсодержащих сплавов путем построения компьютерных математических моделей, основанных на методе конечных элементов. Моделирование проводили на базе вычислительного эксперимента, с применением статистических методов на основе данных, включающих как стандартные исследования металлографических структур, так и измерения твердости и уровня коэрцитивной силы. Для анализа использовали инновационный метод оптико-математического описания металлографических изображений, позволяющий прогнозировать в изменения структурного состояния, в том числе, и в локальных областях гетерогенного сплава с малой долей формируемых нестехиометрических карбидов при распаде остаточного аустенита (типа Me_xC_y).

Разработаны критерии, наиболее полно характеризующие структурное и энергетическое состояние системы, позволяющие с высокой точностью прогнозировать структурно-фазовый состав, уровень твердости гетерогенного сплава, достигаемые при предложенном подходе моделирования режимов ТО.

Применение такого подхода позволяет прогнозировать фазовый состав и оценивать локальную неоднородность, а также структурное состояние сложных гетерогенных сплавов. Осуществить такую оценку удалось на основе моделирования изменения энергетического состояния системы, учитывающего протекающие диффузионные процессы, не прибегая к применению разрушающих методов исследований. Использование предложенных моделей позволяет разрабатывать новые высокотехнологичные процессы повышения уровня эксплуатационных свойств, одновременно способствуя сокращению сроков и снижению материальных и трудовых затрат при постановке на производство новых технологических процессов.

Ключевые слова: *прогнозирование, термическая обработка, структурное состояние, гетерогенный сплав, металлографическое изображение, уровень свойств*

Актуальность

Известно, что уровень служебных свойств конструкционных материалов определяется, в первую очередь, их структурным строением. Однако, учет реального изменения структурного состояния изделия в процессе его изготовления и эксплуатации затруднен, так как металлографические методы анализа требуют разрушения деталей [1].

Чисто экспериментальный путь исследований уже не удовлетворяет требованиям современного материаловедения. В широком плане актуальная проблема повышения уровня служебных свойств конструкционных материалов, контроля их качества может эффективно решаться путем создания и использования методики прогнозирования структурообразования, учитывающей изменение энергетических состояний системы, вследствие протекающих диффузионных процессов в результате различных внешних воздействий, таких как термическая обработка.

Новый подход должен базироваться на комплексном использовании методов классического металловедения, расчетно-аналитических исследованиях металлографического изображения структуры, соединенных с компьютерным моделированием технологических процессов изготовления изделия, позволяющих прогнозировать структурное состояние и уровень служебных свойств материала.

В настоящей работе объектом прогнозирования были выбраны высокохромистые чугуны, образующие рабочий слой центробежнолитых листовых валков станов горячей прокатки. Для них важны такие характеристики, как твердость, фазовый состав, неоднородность структурного состояния рабочего слоя, влияющие на эксплуатационную стойкость изделия. Одним из существенных недостатков таких материалов, является неустойчивость их свойств при эксплуатации из-за наличия значительной доли остаточного аустенита (30-60%), поскольку режим термоциклических нагрузок вызывает его превращение, с изменением линейных размеров структурных составляющих, что сопровождается ростом напряжений и разрушением рабочего слоя.

Анализ последних исследований

Проблема повышения качества и свойств рабочего слоя таких изделий, помимо выбора оптимального химического состава, включает в себя обязательное применение последующей термической обработки [2,3]. В технологическом цикле изготовления прокатных валков с рабочим слоем из высокохромистого чугуна термообработку используют в качестве окончательной операции для уменьшения локальной неоднородности структуры и дестабилизации остаточного аустенита, вследствие интенсификации диффузионных процессов, выделения вторичных дисперсных спецкарбидов и достижения регламентированной твердости.

При разработке режимов термической обработки, в первую очередь, стремятся достичь заданных эксплуатационных свойств изделий при обеспечении унификации и технологичности их конструкции. Немаловажная задача при этом - сокращение сроков и снижение материальных и трудовых затрат при постановке на производство новых изделий, обеспечение высокой эффективности производства и улучшение качества продукции. Однако, при разработке таких процессов на производстве зачастую приходится изготавливать опытные образцы и добиваться необходимых свойств экспериментальным путем, что не только увеличивает время для определения необходимого режима термической обработки, но и приводит к значительному удорожанию продукции. Особенно остро этот вопрос встает при поиске оптимальных параметров термической обработки для таких массивных, как двухслойные листовые валки станов горячей прокатки, из-за длительности процесса, связанного с низкими скоростями нагрева отливок.

Именно поэтому в современном производстве весьма актуальным является применение компьютерного моделирования термической обработки, основанное на физических процессах, позволяющих прогнозировать качественные показатели и эксплуатационные свойства изделия. В связи с этим, важной и востребованной задачей является создание методики прогнозирования структурообразования и уровня механических свойств металлических сплавов.

Формулирование цели исследования

Целью данной работы является разработка методики прогнозирования и оценки структурного состояния и уровня механических свойств гетерогенного сплава, в результате воздействия термической обработки, построением компьютерных математических моделей, основанных на методе конечных элементов.

Методический подход в проведении исследований

Методический подход по оценке влияния режимов термической обработки, включал создание комплексного анализа прогнозирования структурообразования и уровня твердости (требования НТД) высоколегированных хромсодержащих сплавов путем построения компьютерных математических моделей, основанных на методе конечных элементов.

Разработку процесса моделирования проводили на базе вычислительного эксперимента, с применением статистических методов на основе экспериментально полученных данных, включающих как стандартные исследования металлографических структур, так и измерения твердости и уровня коэрцитивной силы.

Разработку оптимальных режимов процесса термической обработки проводили на пробах, отобранных от рабочего слоя высокохромистых двухслойных листовых валков для станов «1700» и «2000» горячей прокатки исполнения ЛПХ17Нд (легированные до 17%Cr и до 1,5%Ni со спецкарбидами Me_7C_3 , Me_6C_{23} и Me_xC_y в основе). При анализе учитывали их показатели: твердости (от 57HS до 77HS) и коэрцитивной силы (от 18.2 до 45.6 А/см) рабочего слоя до и после термической обработки. Анализировали металлографические изображения 76 образцов, отобранных от рабочего слоя этих валков, как в литом, так и в термообработанном состоянии.

Исследование металлографических изображений, отличающихся параметрами термической обработки, проводили по разработанному методу оптико-математического анализа [4], с применением гидродинамических аналогий к процессам структурообразования, основанного на изменении энергетического состояния системы, и позволяющий прогнозировать изменения структурного состояния, в том числе, и в локальных областях гетерогенного сплава с малой долей формируемых нестехиометрических карбидов при распаде остаточного аустенита (типа Me_xC_y).

Результаты исследований

В данном исследовании, при разработке модели процесса термической обработки изделий из высокохромистого чугуна, были изучены факторы, оказывающие значительное влияние на структуру сплава во время данного этапа изготовления изделия. При этом оценивали роль на стабильность отдельных фаз и всей структуры сплава наследственных факторов, выражаемых через характеристики, описывающие структурообразование литого состояния. Последующая эксплуатационная стойкость таких изделий, как массивные двухслойные валки прокатных станов, во многом определяется тем, насколько точно и адекватно учитываются все существенные особенности, характеризующие состояние структуры металла рабочего слоя, поскольку их габариты делают невозможным постоянный сплошной контроль.

Основываясь на накопленном опыте проведенных ранее исследований [5-11], разработаны критерии (P_i), наиболее полно характеризующие структурное и энергетическое состояние системы, позволяющие прогнозировать структурно-фазовый

состав, уровень твердости гетерогенного сплава, достигаемые при предложенном подходе моделирования режимов ТО. Наиболее важными характеристиками, учитывающими фазовый состав, являются: степень неоднородности структуры, в том числе локальная, характерная для выявленных фаз и дислокационной структуре, коэрцитивная сила, а также твердость. Согласно различным методикам, при помощи которых оценивали такие показатели, было предложено разделить их на 4 группы, три из которых относятся к теоретическим величинам, оцениваемым при помощи оптико-математического анализа, и одна – касается характеристик, выявленных экспериментально методами неразрушающего контроля. Для достоверности результатов, характеристики, получаемые при помощи оптико-математического анализа, оценивали с использованием различных методик исследования структурного состояния сплава, основанного на физических аналогиях. Для получения адекватных математических моделей, близких к реальному процессу термической обработки, вычислительный эксперимент проводили, оценивая статистически значимое количество функций, описывающих такие характеристики. Было предложено оценить 4 условных группы: I – характеристики, P_{1-78} , вычисляемые путем применения гидродинамических аналогий к процессам структурообразования; II - P_{79-95} , вычисляемые по аналогии распределения бозе-частиц по микросостояниям; III - P_{96-106} , описывающие неоднородность по изменчивости условных цветов в различных комбинациях сочетаний (для фрагмента 3×3 пикселя); IV - $P_{107-109}$, описывающие механические, физические и технологические свойства.

Для этих характеристик были построены корреляционные зависимости от исследуемых режимов термообработки. При расчете использовали усредненные (приведенные) параметры. Рассчитаны их значимость и парные, а также множественные коэффициенты корреляции. Для исключения переполнения разрядной сетки компьютера, вследствие значительного числа рассчитываемых характеристик, проводили коррекцию коэффициентов при факторах для каждой корреляционной зависимости, путем умножения или деления на задаваемую в каждом случае определенную величину. Далее, рассчитанные таким образом коэффициенты, были использованы при построении моделей процесса термообработки. Для задания конкретной структуры при построении таких корреляционных зависимостей, использовали фактор наследственности структурного состояния сплава, учитывающий его состояние в литом виде (1):

$$H_i = \frac{P_{i_{\text{ТО}}}}{P_{i_{\text{л}}}}, \quad (1)$$

где H_i - фактор наследственности металла для i -й характеристики; $P_{i_{\text{л}}}$ -величина оцениваемой характеристики в литом состоянии; $P_{i_{\text{ТО}}}$ - величина оцениваемой характеристики после каждого исследуемого режима термообработки.

Ввод показателя наследственности, практически для всех исследуемых факторов, повысил коэффициент корреляции при моделировании, в среднем на 9.8%. Учет этого показателя позволяет, не изменяя коэффициентов корреляции, при производстве новых изделий, прогнозировать уровень их механических свойств и структурную неоднородность после ТО.

Применение разработанных характеристик, описывающих структурное и энергетическое состояние системы, в процессе математического моделирования, позволило выбрать оптимальные режимы для технологического процесса термообработки, наиболее полно учитывающие протекающие диффузионные процессы, которые обеспечивали бы формирование заданной структуры сплава и повышение эксплуатационной стойкости изделия.

Построение моделей технологического процесса термической обработки проводили в несколько этапов.

На начальном этапе, при помощи разработанной обобщенной методики, было проведено унифицирование различных временных, температурных параметров и скоростей параметров процесса. Применение в дальнейшем таких приведенных (усредненных) значений, значительно упростило задачу по формированию исходных данных и уменьшило затраты времени на разработку обоснованных параметров инновационных технологий.

Известно, что высокотемпературная термообработка эффективно позволяет обеспечивать регламентируемые показатели твердости и надежно контролировать состав микроструктуры, обеспечивая высокую дестабилизацию аустенита [12]. Однако, при твердости, превышающей 80HNS, достичь полного распада аустенита, даже при такой обработке, не представляется возможным [13]. Кроме того, такая технологическая операция не может быть применена для массивных двухслойных отливок прокатных валков с разнородным материалом (рабочего слоя из высокохромистого и сердцевины из серого чугунов), из-за угрозы дополнительной графитизации сердцевины, а также трещин валка. Ранее проведенными исследованиями установлено, что наиболее приемлемым для таких изделий является низкотемпературный циклический отжиг в интервалах температур магнитного превращения карбидных фаз сплава. Учитывая это, при моделировании, за основу были приняты 18 экспериментальных режимов низкотемпературного отжига, осуществляемых в производственных условиях

На втором этапе моделирования проводили вычислительный эксперимент, задачей которого был анализ факторов, оказывающих наибольшее влияние на структуру и свойства сплава в результате термической обработки с последующим выбором наиболее значимых факторов для дальнейшего построения модели.

На этапе вычислительного эксперимента, был проведен качественный и количественный анализ гетерогенного сплава разработанным методом оптико-математического анализа и методами стандартного исследования металлографической структуры.

За основу расчетов принимали значения характеристик (P_i), рассчитанных для прототипных структур. В результате выполнения этапа выбраны характеристики, используемые на последующем этапе моделирования в качестве критериев оптимальности, с точки зрения получения в результате ТО, минимальной неоднородности и регламентированной твердости, структуры сплава. В качестве критерия оптимальности был принят фактор наследственности по твердости и неоднородности структуры. На основании проведенных исследований, установлено, что в процессе термической обработки наибольшее влияние на твердость оказывают, в порядке убывания, такие характеристики, как: степень дисперсности фаз (до 56%); описывающие неоднородность структуры по изменчивости условных цветов в сочетаниях (до 16); функции мощности диссипации энергии (до 9%); показатель коэрцитивной силы (3%). Низкие показатели последних факторов в данном случае могут быть связаны с более узкими пределами статистической выборки, что соответствует стабильности процесса производства изделий, а также с зоной отбора проб - торцевого кольца от валка, характеризующегося наибольшей скоростью кристаллизации в двух направлениях.

На третьем этапе - проводили математическое моделирование режимов термической обработки, где в качестве параметров использовали данные, полученные при выполнении предыдущего этапа, и построены модели формируемых при такой обработке микроструктур [14,15].

В процессе были построены модели для 1000 параметров режимов термической обработки, дестабилизирующего низкотемпературного отжига, для валкового высокохромистого чугуна. Путем решения оптимизационной задачи для функций,

характеризующих твердость (P_{107}), фазовый состав сплава: доли аустенита (P_{72}) и игольчатых структур (P_{68}), а также структурную неоднородность в виде изменчивости [16] сочетания условных цветов (P_{99} и P_{100}), а также мощности диссипации энергии [17] при изменении дислокационной структуры (P_{106}), установлено, что наибольшим значения для выбранных характеристик P_{68} , P_{99} , P_{100} , P_{106} , описывающих степень неоднородности структуры исследуемых сплавов после термической обработки, соответствует 3-х ступенчатый высокотемпературный режим нагрева (аустенизации) с быстрым охлаждением (типа нормализации): нагрев до $T=920^{\circ}\text{C}$, с 2-я ступенями технологических остановок при нагреве: $269,5^{\circ}\text{C}$ и 600°C , общее время режима $\tau=25,5\text{ч}$, время только нагрева и охлаждения $\tau_2=13,2\text{ч}$ (приведенные параметры $T=439,6^{\circ}\text{C}$, $T_2=596,5^{\circ}\text{C}$, $\tau=25,5\text{ч}$, $\tau_2=13,2\text{ч}$), рис.1.

Однако, такой режим термической обработки не приемлем для двухслойных валков из разнородного металла, а также при таком режиме ТО происходит снижение уровня твердости характеристики P_{107} ниже заданного значения (коэффициент корреляции с литым состоянием $< 0,9$).

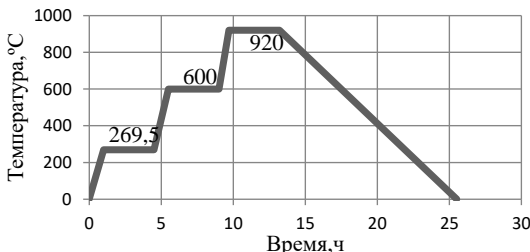


Рис.1. Схема режима ТО, в результате которой получены максимальные значения характеристик, описывающих степень неоднородности структуры исследуемых сплавов после термической обработки

Оптимальным, с точки зрения компромиссного решения, учитывающего рассмотренные характеристики, является низкотемпературный режим (рис.2), включающий в себя 3 цикла нагрева до температур 350°C , 500°C , 500°C и охлаждения после 1- и 2-го циклов до 170°C , а после третьего – до комнатной температуры (приведенные расчетные параметры соответствовали $T=337,6^{\circ}\text{C}$, $T_2=343,1^{\circ}\text{C}$, $\tau=42,6\text{ч}$, $\tau_2=17,7\text{ч}$).

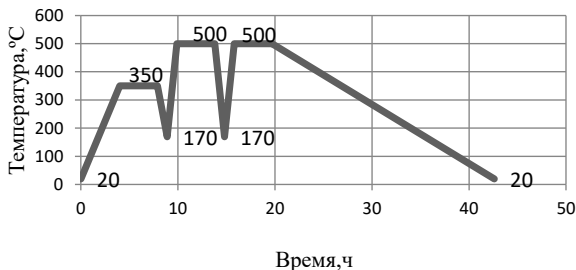


Рис.2. Рекомендуемая схема режима ТО, обеспечивающая получение оптимальных параметров, характеризующих структурное состояние сплава и твердости

В результате проведения такой ТО достигаются оптимальные характеристики структурного состояния анализируемого высокохромистого чугуна, с учетом фактора наследственности, которые обеспечивают интервал значений: твердости (P_{107}) от 63.4HS до 69.2HS (среднее – 67.5HS), наблюдается незначительное ее уменьшение (~ на 1-1.5%) по сравнению с литым состоянием; доли игольчатых структур (P_{68}), которая возрастает от 14.3% до 19.4% (среднее – 16.9%); а остаточного аустенита (P_{72}) – не превышает 1.8%; изменчивости сочетания условных цветов на фрагменте изображения размером 3×3 пикселя (P_{99} и P_{100}) - от 3.6 до 7.9 (среднее – 5.4 пикселя) и от 0.6 до 1.8 (среднее – 1.3 пикселя) соответственно; мощности диссипации энергии (P_{106}), существенно возрастающей от 397.3 до 1215.0 (среднее – 709.0).

Полученные оптимальные температурные параметры (нагрев до 350°C и 500°C) подтверждены промышленным режимом такой низкотемпературной циклической обработкой валков [3], эффект достигнут в результате нагрева в областях магнитных превращений легированного цементита и спецкарбидов хрома. В этом случае зафиксирован полный распад остаточного аустенита и значительное уменьшение степени неоднородности структуры. Это свидетельствует о научной и промышленной ценности данного метода моделирования.

На четвертом этапе осуществляли проверку адекватности разработанных математических моделей на соответствие реальным экспериментальным данным процессам термической обработки.

При этом исследовали тесноту связи характеристик (P_i), полученных на основе использования структур-прототипов валковых высокохромистых чугунов, подвергшихся термической обработке в условиях производства по экспериментальным режимам с характеристиками, рассчитанными при построении математических моделей. Анализ проводили сопоставлением результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными путем построения между ними корреляционных зависимостей. Для оценки степени влияния отжига на структурное состояние системы в обоих случаях, рассчитывали отношение коэффициентов анизотропии (2) их состояния в сплаве:

Построены корреляционные зависимости для полученных моделей, рассчитаны отношения коэффициентов множественной корреляции (R''_{mn}) и анизотропии структурного состояния сплава:

$$\alpha'' = \frac{R''_{mn}}{R'_{mn}}, \quad (2)$$

где α'' – коэффициент анизотропии для i -й характеристики; значение коэффициента множественной корреляции: R'_{mn} – между аргументами функций, характеризующих структурное состояние сплава и параметрами экспериментальных режимов термообработки; R''_{mn} – то же самое, и параметрами моделируемых режимов термообработки.

Анализ полученных данных показывает, в среднем, эффект снижения корреляционных коэффициентов в предложенных моделях, по сравнению с - экспериментальными. Это можно объяснить не полным учетом характеристик, описывающих структурное состояние сплава.

Установлено, что сходимость результатов удовлетворительная, поскольку совпадение значений аргументов функций, характеризующих структурное состояние сплава после воздействия ТО по режимам, рассмотренным в результате математического моделирования и экспериментальным, в среднем, составляет 75-78%. Поэтому можно предположить, что помимо наследственности литого состояния, существенное влияние на структурное состояние сплава после ТО, принадлежит диффузионным процессам.

Практические рекомендации

Использование разработанных математических моделей, учитывающих изменения энергетического состояния системы, вследствие протекающих диффузионных процессов, позволяет:

– прогнозировать фазовый состав и оценивать локальную неоднородность, а также структурное состояние сложных гетерогенных сплавов, не прибегая к применению разрушающих методов исследований;

– разрабатывать новые высокотехнологичные процессы повышения уровня эксплуатационных свойств изделий, работающих в сложнапряженных условиях, одновременно способствуя сокращению сроков и снижению материальных и трудовых затрат при их постановке на производство.

Выводы

Для обоснования и разработки эффективных параметров термической обработки для валков листовых станов горячей прокатки из легированных чугунов, в результате проведенных исследований, была разработана и успешно опробована методика комплексного анализа прогнозирования структурообразования и требуемого уровня твердости хромсодержащих сплавов, включающая построение компьютерных математических моделей, основанных на методе конечных элементов, учитывающих изменения энергетического состояния системы при протекании диффузионных процессов.

Моделирование проводили на базе вычислительного эксперимента, с применением статистических методов на основе данных, включающих, как стандартные исследования металлографических структур, так и измерения твердости и уровня коэрцитивной силы. Для анализа использовали инновационный метод оптико-математического описания металлографических изображений, позволяющий прогнозировать в изменения структурного состояния, в том числе, и в локальных областях гетерогенного сплава с малой долей формируемых нестехиометрических карбидов при распаде остаточного аустенита (типа Me_xC_y).

Список использованных источников

1. ASTM E3-11(2017), Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
2. Производство и применение прокатных валков. Справочник: под ред. проф. Скобло Т.С. /Т.С. Скобло, А.И.Сидашенко, Н.М.Александрова, Е.Л. Белкин, В.М. Власовец, О.Ю. Ключко, А.Д. Мартыненко //Харьков: ЦД №1, 2013. – 572с.
3. Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers / T.S. Skoblo, O.Yu. Klochko, A.I.Sidashenko, R. G. Sokolov // ISSN 0967-0912, *Steel in Translation*. - Springer US: - Vol. 43. No 9, 2013. – P.p. 603-606.
4. Скобло Т.С. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна /Т.С.Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л. Белкин //Заводская лаборатория. Диагностика материалов.–2012, № 6 (78).–С.35-42.
5. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L. Structure of high-chromium cast iron // *Steel in Translation*. - March 2012, Volume 42, Issue 3, pp. 261–268.
6. Оценка структурообразования при деформации в малоуглеродистых сталях /Т.С.Скобло, Г.Я. Безлюдько, А. И. Сидашенко, О.Ю. Ключко, Е. Л. Белкин, А.Ю. Марченко // *Сталь*. – №9, 2014. – С.65-70.
7. Скобло Т.С. Математическая оценка особенностей структурообразования

высоколегированных чугунов / Т.С.Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л. Белкин // *Материаловедение*. – М.: Наука и технологии, 2014, №8. – С.6-11.

8. Скобло Т.С. Разработка методов оценки структуры рельсов, закаленных ТВЧ / Т.С.Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л.Белкин, А.И. Сидашенко, Н. М.Александрова // *Сталь*. – №3, 2014. – С.74-82.

9. Оценка степени неоднородности карбидов гетерогенных сплавов методом оптико-математического анализа при помощи изменчивости условных цветов / Т.С.Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л. Белкин [и др.] // *Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка*. - Випуск 168, 2016. – С.174-186.

10. Ключко О.Ю. Применение методов оптико-математического анализа оценки дисперсности структуры высокоуглеродистых сплавов /О.Ю.Ключко // *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів* [Наук. журнал].- №6. – Х.: 2016.- С. 112-117.

11. Effective Technological Process of Crystallization of Turning Rollers' Massive Castings: Development and Analysis / Tamara Skoblo, Oksana Klochko, Efim Belkin, Aleksandr Sidashenko // *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy (IJMPEM)*.- NY, U.S.A., Vol.2, Issue3, May2017, PP.34-39.

12. Скобло Т.С. Повышение качества прокатных валков из высокохромистого чугуна высокотемпературной термической обработкой / Т.С.Скобло, Е.Н. Вишнякова, Н.М. Мажарова // *Металловед. и терм. обраб. мет.*-1990.-№10.-С.7-9.

13. J.-P. Breyer and W. Gisèle, “Metallurgy of High Chromium-Molybdenum White Iron and Steel Rolls,” In: R. B. Corbett, Ed., *Rolls for the Metalworking Industries*, Warendale, Pittsburgh, 2002, pp. 29-40.

14. Ключко О.Ю. Методика моделирования структуры металлов с помощью перестановки пикселей изображения. /Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. //Технічний сервіс АПК, техніка та технологія у сільськогосподарському машинобудуванні: *Вісник ХНТУСГ*, вип.115. – Харків. - 2011. – С.10-21.

15. Ключко О.Ю. Математичне моделювання металографічного зображення за допомогою рішення граничних задач для рівняння Лапласа // *Математичне моделювання*. - №1(38), 2018.- С124-133.

16. Исследование структуры высокохромистых чугунов / Т.С.Скобло, О.Ю.Ключко, Е.Л.Белкин, А.И.Сидашенко // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2017. - №5 (Том 83). – С.27-38.

17. Ключко О.Ю. Оценка оптико-математическим методом локальной неоднородности высокоуглеродистых сплавов, образованной в результате РТО /О.Ю.Ключко //Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: *Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка*. – Вип. 183, 2017. – С.20-30.

Анотація

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ СТРУКТУРНОГО СТАНУ ГЕТЕРОГЕННОГО СПЛАВУ ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ

Ключко О.Ю., Обихвіст Д.О.

Для обґрунтування і розробки ефективних параметрів термічної обробки для валків листових станів гарячої прокатки з хромовмісних легованих чавунів запропоновано комплексний підхід в оцінці їх структуроутворення на основі використання спеціальних методик при дослідженні особливостей фазового складу оптико-математичним методом.

Методичний підхід щодо оцінки впливу режимів термічної обробки, включає створення комплексного аналізу прогнозування структуроутворення і рівня твердості (вимоги НТД) високолегованих хромовмісних сплавів шляхом побудови комп'ютерних математичних моделей, заснованих на методі кінцевих елементів. Моделювання проводили на базі обчислювального експерименту, із застосуванням статистичних методів на основі даних, що включали як стандартні дослідження металографічних структур, так і вимірювання твердості і рівня коерцитивної сили. Для аналізу використовували інноваційний метод оптико-математичного опису металографічних зображень, що дозволив прогнозувати зміни структурного стану, в тому числі, і в локальних областях гетерогенного сплаву з малою часткою формованих нестехіометричних карбідів при розпаді аустеніту (типу Me_xC_y).

Розроблено критерії, які найбільш повно характеризують структурний і енергетичний стан системи, та дозволяють з високою точністю прогнозувати структурно-фазовий склад, рівень твердості гетерогенного сплаву, що досягаються при запропонованому підході моделювання режимів термообробці.

Застосування такого підходу дозволяє прогнозувати фазовий склад і оцінювати локальну не-однорідність, а також структурний стан складних гетерогенних сплавів. Здійснити таку оцінку вдалося на основі моделювання зміни енергетичного стану системи, яке враховує дифузійні процеси, не вдаючись до застосування руйнівних методів досліджень. Використання запропонованих моделей дозволяє розробляти нові високотехнологічні процеси підвищення рівня експлуатаційних властивостей, одночасно сприяючи скороченню термінів і зниження матеріальних і трудових витрат при постановці на виробництво нових технологічних процесів.

Ключові слова: прогнозування, термічна обробка, структурний стан, гетерогенний сплав, металографічне зображення, рівень властивостей

Abstract

DEVELOPMENT OF PREDICTING METHODS FOR THE STRUCTURAL STATE OF HETEROGENEOUS ALLOY IN THE PROCESS OF HEAT TREATMENT

O.Klochko, D.Obyhvest

In order to justify and develop the effective heat treatment parameters of hot rolling mill rolls made of chrome-containing alloyed irons, an integrated approach is proposed. Our method helps one to estimate the rolls structure formation and is based on the research techniques studying the characteristics of the phase composition by an optical-mathematical method.

The methodical approach of estimation the influence of heat treatment regimes includes creation of a comprehensive analysis of the prediction of structure formation and hardness level of high-alloyed chromium-containing alloys. To do so, we develop the computer models based on the finite element method. The simulation has been carried out on the basis of computational experiment, using statistical methods based on data that include both standard studies of metallographic structures, and measurements of hardness and level of coercive force. For the analysis, an innovative method of optical-mathematical description of metallographic images has been used which allows one to predict changes in the structural state, including those situated in local areas of heterogeneous alloy with a small proportion of nonstoichiometric carbides formed during decomposition of residual austenite (e.g., Me_xC_y).

In our paper we develop the criteria that fully characterize both the structural and energetic states of the system. This makes it possible to very accurately predict the structure-phase

composition, the level of hardness of the heterogeneous alloy, that are achieved with the proposed approach of modeling the heat treatment regimes.

The use of this approach allows one to predict the phase composition, to estimate the local heterogeneity level and the structural state of complex heterogeneous alloys on the basis of modeling the changes in the system energy state, taking into account only the diffusion processes, without applying the destructive research methods. The proposed models help to develop the new high-tech processes of improvement of the operational properties level and in-parallel help to reduce the time, material and labor costs when putting into production the new technological processes.

Keywords: *predictive modelling, heat treatment, structural state, heterogeneous alloy, metallographic image, properties level*