

Н.Ю. Калиниченко, С.Е. Маркович, С.А. Калиниченко, Харьков, Украина

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ СОТС И НАНОМАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ В ТЕХНОЛОГИИ ПЛАНЕТАРНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В роботі проводиться огляд сучасних тенденцій застосування змащувально-охолоджувальних технологічних рідин (ЗОТР) з додаванням деяких домішок і наномодифікаторів при обробці деталей авіаційних двигунів із важко оброблювальних матеріалів. Наведені практичні результати застосування модифікованих ЗОТР, проведено опис механізму структуризації, а також обладнання для підготовки, активації і подачі ЗОТР у зону різання.

Ключові слова: змащувально-охолоджувальна технологічна рідина (ЗОТР), поверхнево-активна речовина (ПАВ), наночастка, присадка, планетарне шліфування, глибоке шліфування, абразивна обробка

В работе проводится обзор современных тенденций применения смазывающе-охладжающих технологических средств (СОТС) с добавлением различных добавок и наномодификаторов при обработке деталей авиационных двигателей из труднообрабатываемых материалов. Представлены практические результаты применения модифицированных СОТС, описан механизм структуризации, а так же оборудование для подготовки, активации и подачи СОТС в зону резания.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), поверхностно-активные вещества (ПАВ), наночастица, присадка, планетарное шлифование, глубинное шлифование, абразивная обработка.

This paper represents review of modern trends in application of coolant fluids with addition of different additive nano particles during machining process of aviation parts, made of hard material. Results of modified coolant fluids practical application are presented. Mechanism of structurization of modified coolant fluids is described, as well as equipment for its preparation, activation and supply.

Keywords: cooling fluids, surfactant species, nanoparticle, addition agent, planetary grinding, creep-feed grinding, abrasive machining

Введение

В авиационном машиностроении к конструкционным материалам, используемым в авиационном двигателестроении предъявляются высокие эксплуатационные требования. Для достижения требуемой точности и показателей качества, увеличения износостойкости контактирующих поверхностей и снижения сил резания при абразивной обработке планетарно - шлифовальной головкой применяют различные СОТС, подаваемые в зону контакта.

Постановка задачи и цель исследования

Основная цель подачи СОТС в зону резания заключается в осуществлении смазывающего, моющего, охлаждающего и диспергирующего действия. Современные тенденции развития составов СОТС направлены преимущественно на реализацию в зоне резания жидкостного трения, т.е. скольжение поверхностей трения заготовок с абразивным инструментом заменяются

скольжением жидкости со своими реологическими свойствами. Однако в реальных условиях сплошность пленки всегда нарушается хотя бы в момент остановки и запуска процесса резания. В этом случае трение переходит в режим граничного.

Решение проблемы

В работе [1] проводились эксперименты с применением четырех видов СОТС: синтетическая жидкость Simtech 500 (5-% концентрации на водной основе), керосин, соевое масло и рабочая жидкость CANMIST (высокоочищенное масло на жироспиртовой основе). В качестве наномодификатора применялись нано - и микрочастицы дисульфида молибдена MoS₂ (рис.1) [1] величиной не более 100 нм совместно с эмульгаторами триглицеридом (на основе рапсового масла) и лецитином. В таблице 1 представлены составы экспериментальных СОТС [1].

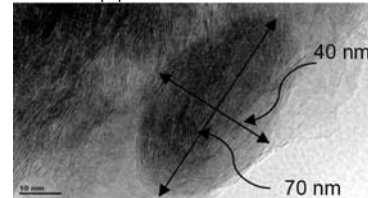


Рисунок 1 – Частица дисульфида молибдена MoS₂

Таблица 1 – Составы применяемых в экспериментах СОЖ

| | Базовая СОТС | Количество MoS ₂ , % | Эмульгатор Лецитин, % |
|----------------------|----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| | Керосин | Без добавок | – |
| Низкой концентрации | | 2 | 10 |
| Высокой концентрации | | 8 | 40 |
| Соевое масло | Без добавок | – | – |
| | Низкой концентрации | 2 | 10 |
| | Высокой концентрации | 8 | 40 |
| Simtech | Без добавок | – | – |
| | Низкой концентрации | 2 | 10 |
| | Высокой концентрации | 8 | 40 |

Эксперименты проводились на плоскошлифовальном станке Chevalier Model Smart-B818 электрокорундовым кругом 32A46-HVBER, скорость круга 30 м/с, глубина резания 0,010 мм, продольная подача 2400 мм/мин, материал заготовки – ковкий чугун 100-70-02, твердостью 48...52 HRC. В результате проведенных экспериментов, с помощью профилометра Taylor Hobson Taylorsurf были определены зависимости: шероховатость обработанной поверхности вдоль и поперек направления обработки и коэффициент шлифования K_ш от процентного содержания нано- и микрочастиц в общем объеме СОТС, а так же от концентрации самой СОТС (рис. 2, 3, 4, 5) [1].

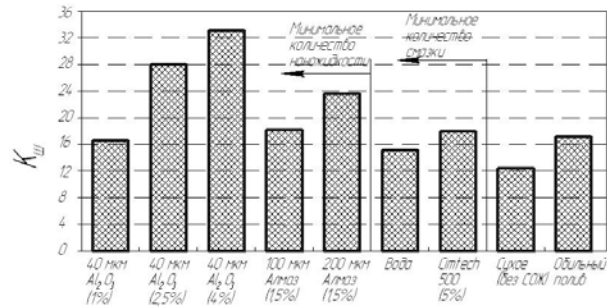


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента шлифования от содержания нано- микрочастиц в СОТС

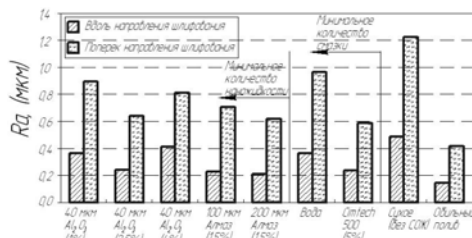


Рисунок 3 – Результаты полученных шероховатостей в продольном и поперечном направлениях от концентрации нано- и микрочастиц в СОТС

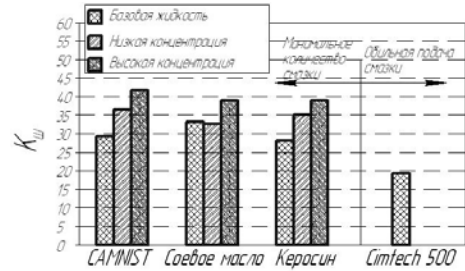


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента шлифования от концентрации СОТС и способа ее подачи

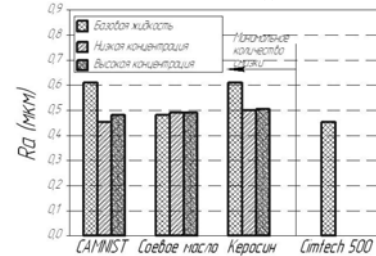


Рисунок 5 – Результаты полученных шероховатостей от концентрации СОТС и способа ее подачи

В исследовательской работе [2] в качестве добавок к СОЖ предлагаются серо-, хлор-, фосфор и азотсодержащие органические соединения. Большое внимание уделяется применению присадок алкилфенольного типа, например, 2,6-ди-третбутил-4-метилфенол (нонол), 4,4-метиленис (4-метил-6-трет.бутилфенол) - НГ-2246 и т.д., а также различным серосодержащим присадкам. Среди алкилзамещенных фенолов эффективным функциональным действием, в особенности, ингибирующим, обладают экранированные фенолы. Серосодержащие присадки представляют интерес благодаря сочетанию антиокислительных, противозадирных и антикоррозионных свойств с хорошей растворимостью в масле. В своей работе автор [2] предлагает в качестве присадки к масляным СОЖ использовать синтетизованную на основе доступных промышленных продуктов (фенол, стирол) присадку - 4-гидрокси-3,5-ди-α-метилбензилмеркаптофенол. Синтетизованное соединение обладает вы-

сокими ингибирующими, причем ингибирующий эффект проявляется уже при низких концентрациях в маслах (0,1-1%), а также антикоррозионными свойствами.

Для оценки эксплуатационно-технологических свойств исследуемый состав СОЖ ИХП-76 был испытан на станке ЗА64Д при шлифовании образцов из стали ШХ-15 и Р9Ф5 абразивным кругом ПП 150 × 12 × 32 характеристики 24А25С12К5. режим обработки: скорость вращения шлифовального круга - 40 м/с, время шлифования - 30 с. Оценку эффективности СОЖ определяли по критериям: съем металла (в мм³), износ круга (в мм³) и шероховатость обработанной поверхности Ra (в мкм).

Наличие прижога на шлифованной поверхности и оценка состояния поверхности круга производилась с помощью микроскопа МБС-2. Результаты испытаний представлена в (табл. 2) [2].

Таблица 2 – Лабораторные экспресс-испытания СОЖ

| Сталь | СОЖ | Нагрузка P _н , МПа | Съем металла Q _с , мм ³ | Износ круга Q _к , мм ³ | Режущая способность круга v _р , м/с | Расход абразивного инструм., г/мин | Кэф-т шлифования К | Касательная составляющая сила F _т , Н | Шероховатость поверхности R _а , мкм |
|-------|--------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Р9Ф5 | ИХП-76 | 0,2 | 1,25 | 3,29 | 0,32 | 0,24 | 1,35 | 3,1 | 0,124 |
| | | 0,1 | 1,12 | 2,20 | 0,29 | 0,16 | 1,82 | 2,4 | 0,085 |
| | УК-РИ-НОЛ-14 | 0,2 | 1,19 | 3,84 | 0,31 | 0,28 | 1,11 | 3,1 | |
| | | 0,1 | 1,10 | 2,93 | 0,28 | 0,21 | 1,33 | 2,7 | 0,120 |
| | МР-10 | 0,2 | 1,22 | 2,47 | 0,32 | 0,18 | 1,76 | 2,9 | 0,115 |
| | | 0,1 | 1,15 | 2,23 | 0,30 | 0,16 | 1,84 | 2,5 | 0,085 |
| ШХ-15 | ИХП-76 | 0,4 | 4,82 | 5,62 | 1,30 | 0,41 | 3,18 | 8,0 | 0,145 |
| | | 0,3 | 4,63 | 5,62 | 1,25 | 0,40 | 3,12 | 6,4 | 0,125 |
| | УК-РИ-НОЛ-14 | 0,4 | 5,10 | 5,62 | 1,37 | 0,41 | 3,30 | 7,8 | |
| | | 0,3 | 4,71 | 5,75 | 1,27 | 0,42 | 2,96 | 4,9 | 0,160 |
| | МР-10 | 0,4 | 4,90 | 4,93 | 1,32 | 0,36 | 3,62 | 8,1 | 0,210 |
| | | 0,3 | 3,98 | 4,65 | 1,07 | 0,34 | 3,08 | 5,5 | 0,165 |

На основании выше приведенного, можно сформулировать решение каких задач для конкретного способа абразивной обработки должна способствовать модификация СОТС. Так, в условиях гидродинамического режима изменение объемных реологических свойств в сторону увеличения вязкости нежелательно, т.к. это повлечет за собой потерю расходуемой мощности. В то же время желательно изменение реологии в тонком приповерхностном слое

для увеличения устойчивости масляной пленки к деформационным изменениям в условиях растущего механического воздействия.

Согласно [3], введение антизадириной присадки существенно меняет качество трущейся поверхности. Это связано со способностью поверхностно-активных веществ (ПАВ) снижать время приработки в новом трибосостоянии и формировать в нем защитный расклинивающий слой. Однако с ростом нагрузки работоспособность ПАВ резко падает в силу его десорбции с трущихся поверхностей и возможной деструкции. Наличие наномодификатора позволяет в значительной степени повысить эффективную способность ПАВ, благодаря должной ориентировке ПАВ в сольватной оболочке и способности удерживать полимерные молекулы в зоне трибоконтакта, а так же способности н.м. к диссипации энергетических потоков в общий объем СОТС по фрактальной сетке, что существенно снижает деструктивные явления, как в масляной среде, так и в приповерхностных слоях трущихся поверхностей.

На основании полученных опытных данных, известных свойств н.м. и ПАВ которым относится антизадириная присадка С-5А возможно представить механизм, действия наноструктурированного СОТС, который поэтапно отражен на (рис. 6) [3].

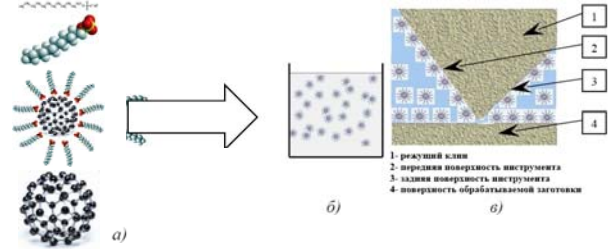


Рисунок 6 – Стадийный механизм наноструктуризации СОТС: а) формирование сольватной оболочки из полимера б) частицы н.м. сорбируют молекулы полимера предотвращая образование мицелл; в) сетка из частиц н.м. на поверхности детали и инструмента

Структуризация СОТС позволяет реализовать желаемые реологические режимы. В табл. 3 представлен обзор применяемых наночастиц для модификации СОТС [1].

Таблица 3 – Общий литературный обзор иностранных изданий изменения теплопроводности СОТС модифицированных наночастицами

| Частица | Базовая жидкость | Средний размер частицы, нм | Доля в общем объеме, % | Прирост теплопроводности, % | |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| СОТС с металлическими наночастицами | Cu | Этиленгликоль | 10 | 0,3 | 40 |
| | Cu | Вода | 100 | 7,5 | 78 |
| | Fe | Этиленгликоль | 10 | 0,55 | 18 |
| | Au | Вода | 10 - 20 | 0,026 | 21 |
| | Ag | Вода | 60 - 80 | 0,001 | 17 |
| СОТС с неметаллическими наночастицами | Al ₂ O ₃ | Вода | 13 | 4,3 | 30 |
| | Al ₂ O ₃ | Вода | 33 | 4,3 | 15 |
| | Al ₂ O ₃ | Вода | 68 | 5 | 21 |
| | CuO | Вода | 36 | 5 | 60 |
| | CuO | Вода | 36 | 2,3 | 12 |
| | CuO | Вода | 50 | 0,4 | 17 |
| | SiC | Вода | 26 | 4,2 | 16 |
| | TiO ₂ | Вода | 15 | 5 | 30 |
| | МУН ⁽¹⁾ | Синтетическое масло | Ø25×50 | 1 | 150% |
| | МУН | Децен/Этиленгликоль/Вода | Ø15×30 | 1 | 20 / 13 / 7 |
| МУН | Вода | Ø100×70 | 0,6 | 38 | |

(¹) многостенная углеродная нанотрубка

Следует отметить важную роль подготовки СОТС. Равномерное распределение по всему объему составных частей СОТС в значительной степени влияет на сам процесс обработки и на качество будущей поверхности. В работе [5] описывается получение гомогенных мелкодисперсных эмульсий нужного состава с минимальной трудоемкостью и малыми энергозатратами. В качестве исполнительной установки было предложено использование роторного двухкамерного диспергатора для кавитационной обработки жидких рабочих сред. Второе направление – активация СОЖ методами гидродинамической кавитации. Для этого используются специальные устройства непосредственно в станках. Автор [6] предложил способ повышения физико-химической активности СОТС за счет кавитационных насадок, закрепляемых на подающих шлангах (рис. 7) [6].

В результате проведенных экспериментов по обработке шлифованием жаропрочных сплавов с применением такой насадки наблюдалось снижение шероховатости на 0,2...0,3 мкм и остаточных напряжений на 60...90 МПа.

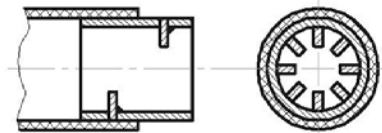


Рисунок 7 – Насадка для создания эффекта кавитации

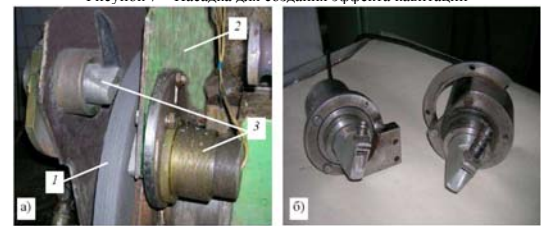


Рисунок 8 – Ультразвуковая техника подачи СОЖ в зону шлифования: а – фрагмент шлифовальной бабки круглошлифовального станка со смонтированными на ней насадками для подачи СОЖ; б – насадки для подачи СОЖ

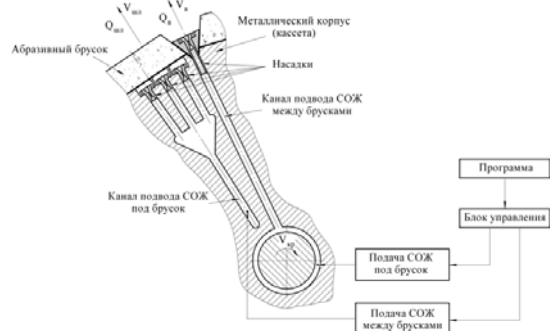


Рисунок 9 – Подвод СОЖ по каналам шлифовального круга [9]

**КИНЕТИКА СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
ПРИ ОТПУСКЕ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 15X5M**

Використовуючи кількісні характеристики зображень мікроструктур і методи комп'ютерної металознавства, були запропоновані комплексні показники інтерфейсу структурного стану, що базуються на термодинаміці фазово-структурних перетворень. Виконано розрахунок енергії активації процесу розкладання мартенситу гарту при відпуску з використанням запропонованих показників інтерфейсу структурного стану і наведений порівняльний аналіз цієї кінетичної характеристики, розрахованої за класичною методикою уширення дифракційної рентгенівської лінії.

Используя количественные характеристики изображений микроструктур и методы компьютерной металлографии, были предложены комплексные показатели интерфейса структурного состояния, базирующиеся на термодинамике фазово-структурных превращений. Выполнен расчет энергии активации процесса разложения мартенсита закалки при отпуске с использованием предложенных показателей интерфейса структурного состояния и приведен сравнительный анализ этой кинетической характеристики, рассчитанной по классической методике уширения дифракционной рентгеновской линии.

Using the quantitative characteristics of the images of microstructures and methods of computer metallography have been proposed performance interface integrated structural state based on the thermodynamics of the phase-structural transformations. The calculation of the activation energy of decomposition of martensite during tempering hardening using the proposed indicators of the structural state of the interface and the comparative analysis of the kinetic characteristics calculated by the classical method of broadening of X-ray diffraction lines.

Термическая обработка сталей и сплавов формирует структурное состояние материала, обеспечивающее его физико-механические и эксплуатационные свойства. Превращения при термической обработке связаны с разложением одних структур и образованием других. Из всех термических структурных превращений не многие поддаются строгому количественному описанию, к числу таковых можно отнести разложение аустенита на феррит и цементит при охлаждении, который можно представить в виде С-образной диаграммы. С-образные диаграммы строятся на основе кинетических кривых разложения аустенита, количественно описываемых по концентрации ферритно-цементитной фазы, магнитным характеристикам, dilatометрии и другим показателям [8, 9]. Сложность количественного описания кинетики структурных изменений объясняется отсутствием надежных количественных показателей структурного состояния материала, которые бы легко фиксировались в процессе обработки.

Изображение микроструктуры с формальной точки зрения представляет геометрическое множество упорядоченных и неупорядоченных объектов,

Одним из эффективных способов подачи СОТС непосредственно в зону резания является его транспортирование через капиллярно-пористое пространство шлифовального круга за счет воздействия модулированных ультразвуковыми колебаниями (УЗК) (рис.8) [7]. Автором [7] установлено, что модулированные колебания наиболее эффективно снижают гидравлическое сопротивление СОЖ в капиллярно-пористом пространстве, способствуя многократному увеличению полезного расхода жидкости непосредственно через зону обработки без увеличения ее общего расхода и усиления тем самым охлаждающего действия СОЖ.

Другое конструктивное решение было предложено для прерывистого сборного шлифовального круга [8]. В предложенной системе подачи СОЖ в зону резания (рис. 9) используется подвод ее по радиальным каналам кассеты сборного шлифовального круга. На выходе канала установлены насадки, обеспечивающие активацию СОЖ за счет гидродинамической кавитации. В дальнейшем активированная СОЖ через поры шлифовального круга поступает на его периферию.

Выводы

В условиях граничного трения структуризация СОТС наномодификаторами может способствовать решению еще большего числа проблем связанных как с формированием приповерхностной смазочной пленки, так и с пластификацией металлической поверхности трения при обработке планетарной шлифовальной головкой. Оказание активного воздействия на зону трения с помощью наномодификации возможно в силу особых физико-химических свойств нано- и микрочастиц. Их сорбционная активность способствует равномерному распределению полимера, выполняющего ту или иную роль в СОТС [4]. При этом для достижения максимального эффекта рекомендуется комбинировать прилагаемые технологические пути бездефектного шлифования поверхностей деталей авиационных двигателей.

Список использованных источников: 1. Bin Shen Minimum quantity lubrication grinding using nanofluids: Дис. канд. техн. наук. – Michigan, USA: The University of Michigan, 2008. – 185 с. 2. Мамедова П.Ш. Разработка и исследование эффективной смазочно-охлаждающей жидкости для механической обработки металлов / П.Ш. Мамедова // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. – Вып. №1. – 2002 С.12-16. 3. Никитин В.А. Повышение износостойкости триботехнических узлов технологической системы при использовании наноструктурированных СОТС / В.А. Никитин, В.М. Петров, А.В. Федосов, Д.Г. Летенко // Инструмент и технологии. – 2008. – № 25. – С. 146-150. 4. Петров Ю.В. Применение наноструктурированных смазочно – охлаждающих технологических сред для механической обработки резанием композиционных материалов / Ю.В.Петров// Студенческая научная весна. Машиностроительные технологии. – 2010. – С.15-18. 5. Фесенко А.В. Повышение эффективности шлифования при гидродинамической обработке СОЖ / А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый // Машинобудування України очима молоді: прогресивні ідеї - наука - виробництво: збірник статей Десятої всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. 26 - 30 жовтня 2010 р. / Уклад.: В.В. Криворучко, В.О. Іванов. — Суми: СумДУ, 2010. — С. 117-122. 6. Бутенко В.И. Технологические средства, устройства и конструкции инструментов для бездефектного шлифования деталей машин / В.И. Бутенко, Е.С. Фоменко, А.Д. Кулиньский // Обработка материалов резанием. 2008. – №3 (45). – С.2-8. 7. Ковальнов В.Н. Повышение эффективности совмещенного шлифования с термической СОЖ путем термостабилизации зоны обработки / В.Н. Ковальнов// Дис. канд.техн. наук., специальность 05.03.01, 05.02.08 – Ульяновск: УГТУ, 2000. – 240 с. 8. Фесенко А.В. Повышение эффективности шлифования при активации и рациональном использовании СОЖ / А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый // Вестник Национального технического университета «ХПИ». 2010. – №41. – С.71-100.

Поступила в редколлегию 13.04.2012

несущих информацию об определенной структурной и фазовой составляющей. Совокупность геометрических объектов, максимально отображающих особенность структурной организации, можно отнести к интерфейсу структурного состояния. С развитием компьютерных технологий обработки изображений интерфейс структурного состояния поликристаллического материала может быть представлен с помощью набора числовых показателей, в частности, среднего размера кристаллита, суммарного количества всех зерен на единичной площади шлифа, фрактальной размерностью и т.п. [1, 2, 3]. Используя указанные показатели можно количественно описать структурные изменения при пластической деформации и термической обработке, и это открывает новые возможности для количественного анализа кинетики структурных превращений.

О структурных превращениях судят по изменению формы и размеров кристаллитов, а этот процесс определяется активностью миграции границ зерен. Структура границ зерен и раздела фаз во многом остается нераскрытой, но согласно общепризнанным представлениям она представляет комбинацию упорядоченно ориентированных дислокаций с аморфной фазой. Геометрические размеры и степень когерентности границы определяются углом разориентации смежных кристаллитов, от которых зависит их подвижность или скорость миграции. Изменение формы зерен и миграция границ при пластической деформации происходит преимущественно за счет скопления дислокаций, а при термическом воздействии за счет их переползания. Элементарным актом переползания дислокации является приставление к дислокации атома матрицы или примеси, в результате чего происходит увеличение разорванной экстраатомарной плоскости, что адекватно смещению дислокации на один шаг, равный параметру решетки [4]. Этот механизм носит диффузионный характер, поэтому с повышением температуры активность миграции границ возрастает.

В качестве количественного показателя для описания состояния границ зерен можно использовать суммарную длину периметра всех кристаллитов на единичной площади поверхности шлифа (удельная длина границ), тогда активность миграции границ можно оценить по скорости изменения их удельной длины. Современные технологии обработки изображений позволяют с помощью специальных программ легко определять этот параметр [5].

Удельная длина границ характеризует величину свободной энергии структурного состояния, которая аккумуляруется в виде поверхностной энергии границ раздела. Следовательно, чем выше удельная длина границ, тем больше величина свободной энергии. Удельную длину границ следует различать от плотности границ, которая рассчитывается как отношение периметра зерна к его площади в плоскости сечения шлифа [5]. Плотность границ характеризует структурно-энергетическое состояние отдельного зерна, а удельная

длина границы является одним из показателей структурного состояния материала в целом.

Удельная длина границ и плотность границ принимают высокие значения с уменьшением размера зерна и повышением степени развитости границы. Под развитостью границы понимают ее отклонение от прямой линии.

В статье представлены результаты исследований по структурным превращениям низкоуглеродистой жаростойкой стали 15X5M при закалке, отпуске и отжиге с использованием количественных показателей интерфейса структурного состояния.

Методика исследования.

Исследуемые образцы имели кубическую форму с размером ребра 10 мм из стали 15X5M. Нагрев образцов производили в муфельной печи СНОЛ. Режимы термообработки представлены в таблице 1.

Для идентификации микроструктуры травление шлифов производили 4% азотной кислотой в этиловом спирте. Микроструктуру исследуемых материалов определяли с помощью металлографического микроскопа Микро-200 при 400-х кратном увеличении. Оцифрованные фотографии обрабатывали программой Image.Pro.Plus.5.1. Обработка изображений предусматривала следующие процедуры: корректировку резкости, калибровку в соответствии с кратностью увеличения, снятие контрастной маски, выделение границ, определение длины периметра каждого объекта и расчет удельной длины границ.

Таблица 1 – Режимы термической обработки

| № п/п | Вид термообработки | Температура нагрева, °С | Время выдержки, т, мин | Охлаждающая среда | Микроструктура |
|-------|--------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|-----------------|
| 1 | Закалка | 880 | 15 | Вода | Мартенсит |
| 2 | Отжиг | 880 | 15 | В печи | Феррит и перлит |
| 3 | Отпуск | 650 | 15 30 60 120 | Вода | Троостит |
| 4 | Отпуск | 500 | 15 30 60 120 | Вода | Сорбит |

После снятия контрастной маски все микроструктурные объекты становятся светлыми или темными. Светлые объекты представляют остаточный аустенит в структуре закаленной стали и феррит в структуре отпущенной и отожженной стали. Разложение мартенсита при отпуске и отжиге заключается в выделении феррито-цементитной фазы разной степени дисперсности, который проявляется как темный объект. К темным объектам можно также