

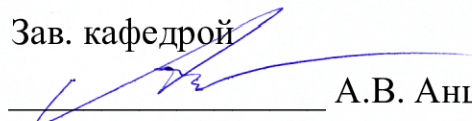
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Политехнический институт  
Кафедра «Машиностроение и материаловедение»

Утверждено на заседании кафедры  
«Машиностроение и материаловедение»  
«30» января 2023 г., протокол № 6

Зав. кафедрой

  
\_\_\_\_\_ А.В. Анцев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Диагностика металлических материалов,**  
**изделий и технологических процессов»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы магистратуры**

по направлению подготовки  
**22.04.02 Metallurgy**

с направленностью (профилем)  
**Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 220402-01-22

Тула 2023 г.

**Разработчик методических указаний**

Маркова Галина Викторовна проф. каф. МиМ, д.т.н., доцент  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



# Неметаллические включения и их роль в разрушении изделий

## 1. Цель работы

- 1.1. Изучить виды неметаллических включений в стали.
- 1.2. Дать количественную оценку загрязненности образцов стали.

## 2. Краткие теоретические сведения

В стали, кроме основных компонентов: железа, углерода и легирующих элементов вследствие технологических особенностей металлургического процесса производства, присутствуют и другие элементы - неметаллические при-

меси: кремний, сера, фосфор, кислород, азот, водород и другие. Они попадают в сталь вместе с шихтой, могут являться продуктами реакций, происходящих в процессе выплавки стали при раскислении, или могут быть частицами шлака и футеровки печи, увлекаемыми металлом во время плавки и разливки.

Некоторые из них при кристаллизации стали образуют самостоятельные соединения (фазы), отличающиеся по строению и свойствам от основных металлических фаз сплава. Эти фазы называют *неметаллическими включениями*. В зависимости от своего состава неметаллические включения образуются как в начале, так и в конце процесса кристаллизации жидкого металла. Как правило, включения концентрируются между первичными дендритами аустенита.

Неметаллические включения, содержащие серу, называются сульфидами, кремний – силикатами, кислород – оксидами, фосфор – фосфидами, азот – нитридами, углерод и азот – карбонитридами.

Неметаллические включения классифицируются по составу. Однако, такая классификация достаточно условна, т.к. включения являются комплексными и состоят из нескольких видов химических соединений, основными из которых являются следующие.

### 2.1. Виды неметаллических включений

#### 2.1.1. Сульфиды

Сера в стали присутствует в виде сульфидов  $FeS$ ,  $MnS$  или чаще всего в виде двойного сульфида железа и марганца  $(FeMn)S$  с различным соотношением  $Fe$  и  $Mn$ , При высоких содержаниях марганца в стали

( $Mn : S > 10:1$ ) сульфиды выделяются из расплава до начала кристаллизации твердого раствора и поэтому располагаются в литой стали беспорядочно. При недостаточном количестве марганца в стали сульфиды образуют с закисью железа ( $FeO$ ) легкоплавкую эвтектику  $(FeMn)S - (FeMn)O$ , которая кристаллизуется при  $\sim 950^\circ C$  и поэтому располагается, как правило, между первичными кристаллами аустенита, т.е. по границам зерен (рис.1,а). Если такой металл нагревать под горячую прокатку (до  $\sim 1200^\circ C$ ), эта эвтектика плавится, что вызывает разрушение металла во время деформации (*красноломкость металла*). Сульфиды  $(FeMn)S$  хорошо полируются, пластичны, легко деформируются при горячей механической

обработке и тем легче, чем больше в них содержание марганца. При вытягивании в направлении прокатки они образуют веретенообразную форму и частично

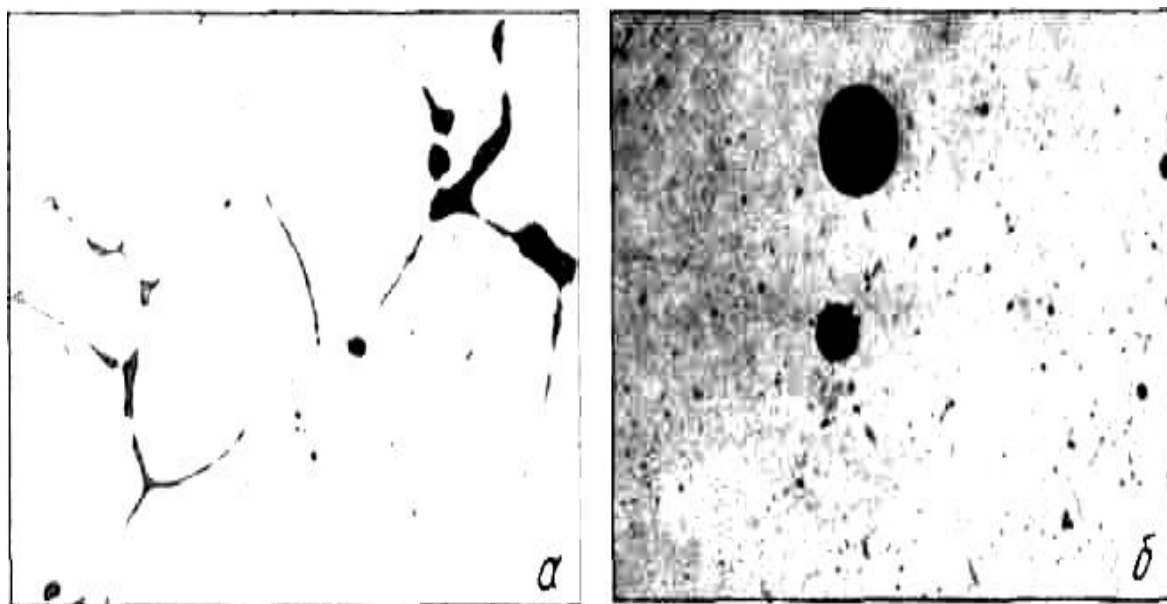


Рис. 1. Неметаллические включения в литой стали; нетравленные шлифы. x200: а – пограничное расположение легкоплавкой сульфидной эвтектики  $(FeMn)S - (FeMn)O$  в стали 45; б - оксиды шаровидной формы в образце стали с 0,2 % С

могут выкрашиваться. Окраска сульфидов  $FeS$ ,  $MnS$  - светло- желтая. Окраска двойного сульфида  $(FeMn)S$  зависит от содержания в нем железа и марганца. Преобладание в нем железа окрашивает его в светло-желтый цвет, с увеличением содержания марганца окраска меняется от голубовато-серого до темно-серого цвета.

В легированной стали могут встречаться сульфиды титана, хрома и других элементов. Эти сульфиды более хрупки, не деформируются, легко выкрашиваются и окрашены в бледно-розовый цвет с ярким блеском.

Сернистые соединения в виде крупных включений снижают способность стали к глубокой вытяжке.

Сульфиды по ГОСТ 1778-70 обозначаются буквой С и оцениваются по пятибальной шкале.

Сульфидные включения снижают механические свойства.

Сера является вредной примесью и её содержание должно быть сведено к минимуму: содержание серы в стали ограничивается пределами - 0,025-0,035%.

### 2.1.2. Оксиды.

Оксиды образуются при раскислении стали еще в жидком металле, и имеют поэтому, как правило, шаровидную форму (рис.1,б).

В недостаточно раскисленной стали (сильно окисленном металле из-за малого содержания других элементов, связывающих кислород) встречается только закись железа  $FeO$  (вюстит). Под микроскопом включения закиси железа имеют вид округлых глобул серого цвета с бледно-коричневым оттенком по краям.

Обычно в хорошо раскисленной стали встречаются оксиды кремния  $SiO_2$ , марганца  $MnO$ , алюминия  $Al_2O_3$ , и их соединения – силикаты (соединения с другими оксидами) или шпинели (соединения с  $Al_2O_3$ ).

Оксиды кремния  $SiO_2$  под микроскопом имеют вид шариков черного цвета с блестящей точкой в центре и отсветом в ореоле. Они не пластичны, плохо полируются, легко выкрашиваются. Оксиды алюминия  $Al_2O_3$  наиболее часто встречаются в стали, так как алюминий широко применяется в качестве раскислителя металла. Оксид алюминия весьма тугоплавок (температура плавления  $2050^\circ C$ ), обладает высокой твердостью, плохо полируется, не деформируется, при прокатке легко выкрашивается.

Оксиды строчечные (ОС) – включения мелких частиц, обычно корунда и шпинели, расположенные группами в виде строчек. В шкале ГОСТа 1778-70 приведены две разновидности строчек: из более мелких кристаллов и более крупных, но в меньшем количестве.

Оксиды точечные (ОТ) – кристаллы простых или сложных оксидов (корунд, шпинель и др.), рассредоточенные по всей плоскости шлифа.

### 2.1.3. Силикаты

Силикаты – наиболее часто встречающиеся в стали неметаллические включения. Они имеют сложный состав и в большинстве случаев представля-

ют собой растворы или механические смеси кремнистых соединений с оксидами других элементов переменного состава.

Наиболее часто встречаются в стали силикат железа – фаялит ( $2FeO \cdot SiO_2$ ) и силикат марганца ( $2MnO \cdot SiO_2$ ), в состав которых входят в некоторых случаях кальций, алюминий (алюмосиликаты) и др.

При рассмотрении силикатов железа и марганца в отраженном свете (светлом поле) под микроскопом наблюдается характерная окраска, позволяющая отличить их от других видов неметаллических включений. Гло-

булярные силикаты в недеформированной стали выглядят темно-серыми с блестящей точкой в центре и блестящим отсветом в ореоле.

При наблюдении в темном поле силикаты прозрачны из-за своей аморфной (стеклообразной) структуры и имеют темно-желтый цвет.

При рассмотрении силикатов железа и марганца в недеформированной стали в поляризованном свете под микроскопом они

выглядят светлыми стекловидными, изотропными и имеют характерный оптический «крест» с концентрическими кольцами. Силикаты в горячекатаной стали также проявляют эффект «креста». Силикаты с высоким содержанием оксидов железа и марганца имеют темно-серый цвет с коричневым оттенком и не имеют оптического «креста».

Силикаты железа и марганца  $FeO \cdot SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$  пластичны, легко деформируются и вытягиваются при прокатке, хорошо полируются, не выкрашиваются.

Силикаты кальция и алюмосиликаты непластичны, не деформируются, плохо полируются, легко выкрашиваются. Окрашены в темно-серый цвет.

Пятибалльная шкала ГОСТа 1778-70 классифицирует:

1. Силикаты хрупкие (СХ), - расположенные вдоль направления деформации, сплошные или прерывистые строчки кристаллических включений (силикаты, алюминаты, шпинели и оксиды), частично сцементированные пластинчатыми стекловидными силикатами, вытянутыми вдоль направления деформации.

Имеются три разновидности эталонов СХ с различной степенью вытяжки и размерами кристаллов.

2. Силикаты пластичные (СП) – вытянутые вдоль направления деформации пластично деформированные силикаты.

В шкале ГОСТа имеются две разновидности СП, различающиеся степенью вытяжки.

3. Силикаты недеформирующиеся (СН) – недеформирующиеся единичные или групповые округлые (глобулярные) или неправильной формы включения силикатов, силикатных стекол, алюминатов, отдельные крупные кристаллы корунда, шпинели и др.

#### 2.1.4. Шпинели

Имеют сложный состав и представляют собой растворы или механические смеси соединения  $Al_2O_3$  с оксидами других элементов переменного состава. Шпинели имеют высокую температуру кристаллизации и выделяются в жидкой стали в виде ограниченных кристаллов. В зависимости от состава шпинели меняют свою окраску.

#### 2.1.5. Нитриды

Азот оказывает вредное влияние на свойства стали: увеличивает склонность стали к старению, резко повышает временное сопротивление разрыву при растяжении и предел текучести, уменьшает пластичность и ухудшает вытяжные свойства штамповых сталей.

Азот образует неметаллические включения: нитриды - соединения с железом ( $Fe_4N$  и др.), алюминием ( $AlN$ ), примесными металлами.

В легированной стали могут встречаться нитриды титана ( $TiN$ ), ниобия ( $NbN$ ) и других элементов.



В стали образуются также сложные соединения металлов с азотом и углеродом одновременно- карбонитриды.

ГОСТ 1778-70 классифицирует:

Нитриды строчечные (НС), которые имеют две разновидности строчек:

- 1) единичная строчка с высокой плотностью включений;
- 2) несколько коротких строчек желто-розовых кристаллов нитридов и карбонитридов титана.

По пятибальной шкале оцениваются бледно-розовые включения нитридов и карбонитридов ниобия.

Нитриды точечные (НТ) – произвольно распределенные по шлифу включения нитридов или карбонитридов титана, а также нитридов и карбонитридов ниобия.

Нитриды алюминия (НА) – мелкие кристаллы нитридов алюминия.

Шкала имеет две разновидности: строчки и произвольно расположенные по шлифу кристаллы нитрида алюминия.

Азот является вредной примесью, его содержание в стали должно быть сведено к минимуму. В качественных сталях для холодной штамповки содержание азота снижают до 0,008%, что обеспечивается выплавкой стали в вакуумных печах.

#### 2.1.6. Фосфор и фосфиды

Фосфор практически нерастворим в цементите и слабо растворим в аустените (~1,2 масс.%) и феррите (~3,6 масс.%) стали. Поэтому при кристаллизации стали фосфор концентрируется в жидком расплаве. В твердом состоянии фосфор увеличивает свою сегрегацию. И если его содержание в местах скопления достигает ~ 3,6 % , здесь возможно выделение фосфидов  $Fe_3P$ .

Фосфор повышает прочность и вызывает охрупчивание, снижает пластичность и способность стали к пластической деформации (вытяжке).

Поэтому фосфор является вредной примесью. и его содержание в стали должно быть сведено к минимуму. В малоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки содержание фосфора ограничивается пределами 0,02—0,03%, а в электротехнической стали - 0,01—0,02%.

Виды неметаллических включений, их характеристики и свойства приведены в таблицах 1 и 2.

### ***2.2. Методы оценки неметаллических включений в стали***

С помощью светового микроскопа различимы неметаллические включения размером более 1-2 мкм. Тип неметаллических включений определяют обычно по их расположению, форме, окраске, прозрачности в светлом и темном полях и оптической анизотропии при освещении поляризованным светом. Наблюдают неметаллические включения на тщательно подготовленных нетравленных микрошлифах.

Современные методы локального анализа с применением электронного зонда позволяют быстро определить состав отдельных включений размером до 1 мкм.

Количественную оценку неметаллических включений металлографии -

ческим методом можно провести:

1) подсчетом содержания включений в металле в объемных или массовых процентах путем измерения суммарной площади или протяженности включений на шлифе обычным методом количественного металлографического анализа;

2) экспрессным методом путём сравнения структуры шлифа с эталонами стандартной шкалы ГОСТа 1778-70 «Сталь. Металлографический метод определения неметаллических включений».

Контроль стали на загрязненность неметаллическими включениями проводят по методикам ГОСТа 1778-70. Стандартом предусмотрены четыре метода: Метод III – сравнение с эталонными шкалами (для испытания деформированного металла);

**Таблица 1. Виды неметаллических включений, их характеристики и свойства**

Элемент	Фаза, ее наименование	Цвет	Механические свойства	Расположение в металле		Степень вредности
				в литом	в деформированном	
<b>S</b>	Сульфиды <i>FeS, MnS</i>  <i>(FeMn)S</i>	Светло-желтые  Темно-серые	Пластичные	В междендритных прослойках по границам зерен	Вдоль направления прокатки  Веретенообразные	Красноломкость  Концентраторы напряжений
<b>P</b>	Фосфиды <i>Fe<sub>3</sub>P</i> в местах ликвации фосфора	Фосфор растворяется в феррите до 3,6%. Резко при этом снижается его пластичность	Хрупкие	Случайно расположенные глобулы	Строчка вдоль направления прокатки	Хладноломкость
<b>N</b>	Нитриды <i>TiN · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>  Карбонитриды	Желто-розовые  Светло-желтые	Хрупкие	Кристаллы правильной формы	Одиночные группы цепочек	Хрупкость, концентраторы напряжений



<b>Si</b>	Силикаты $CaO \cdot SiO_2$ $Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Темно-серые	Хрупкие	Случайные глобулы	Строчка вдоль направления прокатки	Концентра-торы напряжений
	Силикаты $FeO \cdot SiO_2$ Силикаты $MnO \cdot SiO_2$	Темно-серые с коричневым оттенком	Пластичные	Случайные глобулы	Вытягиваются вдоль направления прокатки	Концентра-торы напряжений
<b>O</b>	Простые и сложные оксиды $FeO \cdot Al_2O_3$ $MnO \cdot Al_2O_3$	Темно-серые	Хрупкие	Шаровидной формы беспорядочно расположенные	Строчка вдоль направления прокатки	Концентра-торы напряжений, Хрупкость

Метод К - подсчет количества включений (для исследования деформированного и литого металла);

Метод П - подсчет количества и содержания включений в объемных процентах (для литого и деформированного металла);

Метод Л - линейный подсчет включений (для отливок).

**Таблица 2. Характеристики и свойства неметаллических включений**

№ пп	Включение	Химическая формула	Морфология	Расположение	Полируемость	Твердость, HV	Пластичность
<b>1</b>	<b>Оксид алюминия</b>	$Al_2O_3$	Мелкие зерна неправильной формы, реже-крупные, иногда - шестиугольные	Группами, скоплениями, после деформации - строчками	Плохая, выкрашиваются, образуют "хвосты"	Очень высокая	Не деформируются
<b>2</b>	<b>Силикаты Fe или Mn</b>	$nFeO \cdot mMnO \cdot pSiO_2$	Глобулярная	Хаотическое	Хорошая	Сравнительно высокая, зависит от состава	Хорошая
<b>3</b>	<b>Кварцевое стекло</b>	$SiO_2$	Глобулярная	Хаотическое	Плохая, выкрашиваются	-700 HV	Не деформируются
<b>4</b>	<b>Сульфиды</b>	$FeS$ , $MnS$	Глобулы или эвтектики	Внутри и по границам зерен	Хорошая	-	Легко деформируются

<b>5</b>	<b>Нитрид титана</b>	TiN	Кристаллы правильной формы: квадраты, прямоугольники	Группами, после деформации – цепочки	Плохая, выкрашиваются	Высокая	Не деформируются
<b>6</b>	<b>Нитрид алюминия</b>	AlN	Шестиугольники, прямоугольники, треугольники	Группами	Плохая	856 HV	Не деформируются
<b>7</b>	<b>Сульфид титана</b>	TiS	Мелкие, прямоугольной формы	Группами, после деформации - строчками	Плохая	-	Не деформируются

### Продолжение таблицы 2

№ п/п	Отражающая способность	Оптические свойства			Химические свойства
		в светлом поле	в темном поле	В поляризованном свете	
<b>1</b>	Низкая	От темно-серого до черного с фиолетовым отливом	Прозрачные, бледно-желтого цвета	Прозрачны, слабо анизотропны, особенно мелкие	Стандартные реактивы не действуют
<b>2</b>	Низкая	Темно-серый с кольцевым отсветом и блестящей точкой в середине	Прозрачные, янтарно-желтого цвета	Стекловидны, изотропны, эффект "темного креста"	-
<b>3</b>	Низкая	Черный с блестящей точкой в центре и кольцевыми отсветами	Ярко светятся, очень прозрачны	Эффект "черного креста"	Вытравливаются 20% р-ром HF в спирте и 5% раствором CuSO <sub>4</sub>
<b>4</b>	Средняя	От серо-голубого (FeS) до светло-желтого в зависимости от содержания Mn	Непрозрачны	Изотропны	3% р-р H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (выделяются пузырьки H <sub>2</sub> S), или 10% раствор HCl, или 20% раствор HF, или 10% раствор хромовой кислоты

5	Высокая	От светло-желтого до розового	Непрозрачны, окаймлены светящейся линией	Изотропны, непрозрачны	Стандартные реактивы не действуют
6	Низкая	Темно-серый	Прозрачны, цвет бледно-желтый	Сильно анизотропны	Стандартные реактивы не действуют
7	Высокая	Бледно-розовый	Непрозрачны, окаймлены светящейся линией	Сильно анизотропны – 4 положения погашения, Цвет-бледно-розовый	5% водный раствор CuSO <sub>4</sub>

### ***2.3. Методика определения загрязненности стали неметаллическими включениями***

Ниже описан метод определения загрязненности деформированного металла неметаллическими включениями путем сравнения с эталонными шкалами (метод Ш) по ГОСТу 1778-70, обычно используемый для контроля качества углеродистых и легированных сталей ответственного назначения.

Контроль по методу Ш предназначен для оценки загрязненности следующими видами неметаллических включений: оксидами (с точечным и строчечным расположением), силикатами (хрупкими, пластичными и недеформирующимися), сульфидами, нитридами алюминия и другими нитридами и карбонитридами (со строчечным и точечным расположением).

Стандарт определяет порядок отбора образцов из металла разного сечения и профиля. В нем указано расположение поверхности шлифов относительно главных осей изделия и суммарная площадь поверхности, на которой производится анализ неметаллических включений. В ГОСТе отмечено, что способ вырезки образца не должен вносить изменений в структуру металла.

Например, неметаллические включения в деформированных заготовках (катаных или кованных прутках) определяют на образцах, вырезанных вдоль волокон материала. Шлифы вырезаются холодным способом площадью не более 6 см<sup>2</sup>. Включения рассматривают в микроскопе при увеличении микроскопа  $\times 100 \pm 10$  для каждого вида включений отдельно на предварительно закаленных нетравленных шлифах.

Оценка загрязненности стали после электрошлакового и вакуумно-дугового переплавов ведется при просмотре шлифов с помощью микроскопа при увеличении  $\times 170-210$ .

Вид включений, подлежащих оценке и допустимый балл, оговаривается в технической документации на поставку металлопродукции.

Контроль проводят путем просмотра и сравнения с эталонными шкалами всей площади поверхности тщательно отполированных и нетравленных шлифов для каждого вида включений отдельно.

Оценку загрязненности неметаллическими включениями чаще всего получают по максимальной загрязненности каждого шлифа (максимальный балл). Оценку загрязненности плавки выводят из оценок загрязненности отдельных шлифов. В разных вариантах метода Ш используют разные приемы оценки загрязненности плавки. Например, в варианте Ш 1 загрязненность плавки оценивается средним арифметическим из максимальных оценок каждого образца для каждого вида включений.

Таким образом, неметаллические включения загрязняют сталь. Обладая низким уровнем механических свойств, они существенно понижают технологические и эксплуатационные свойства стали. Эти фазы являются вредными и нежелательными. Количество их в стали строго контролируется: оно не должно превышать 3-5% по объему.

### **3. Материалы, приборы, оборудование**

Для лабораторной работы необходима коллекция нетравленных закаленных шлифов с наиболее распространенными характерными неметаллическими включениями.

Изучение коллекции студенты проводят на металлографическом микроскопе МИМ-7 с набором оптики.

### **4. Порядок выполнения работы**

4.1. Ознакомиться с теоретическими сведениями.

4.2. Получить коллекцию нетравленных шлифов стали с наличием неметаллических включений: сульфидов, оксидов, силикатов, нитридов.

4.3. Внимательно исследовать под микроскопом все шлифы при увеличении  $\times 100$  по всему сечению образцов.

4.4. В каждом шлифе сравнить наихудший по включениям участок со стандартной шкалой ГОСТа 1778-70. Дать оценку загрязненности металла каждого шлифа.

4.5. Просмотреть шлифы и зарисовать неметаллические включения, дать описание их формы, характерных особенностей распределения в плоскости шлифа, цвета, природы, свойств и других признаков.

## **5. Указания по оформлению отчета**

5.1. Цель работы.

5.2. Краткое изложение теории процесса образования неметаллических включений, их классификация, их влияние на свойства стали; способы количественной оценки неметаллических включений.

5.3. Рисунки исследованных сталей с неметаллическими включениями: сульфидами, оксидами, силикатами, нитридами.

5.4. Описание характерных признаков и свойств изученных неметаллических включений.

5.5. Выводы о влиянии неметаллических включений на свойства стали и об их допустимом количестве в металлах и сплавах.

## **6. Контрольные вопросы**

1. Где располагаются неметаллические включения: на осях дендритов, в межосных пространствах или равномерно по телу первичных зерен?

2. От чего зависит расположение неметаллических включений в объеме слитка?

3. Почему неметаллические включения исследуют на нетравленых микрошлифах?

4. Какие неметаллические включения обычно встречаются в стали?

5. Как располагаются сульфиды и оксиды в микроструктуре литой стали?

6. Какие из неметаллических включений пластичнее: сульфиды или оксиды?

7. Какие разновидности сульфидов встречаются в стали и каковы их признаки: цвет, механические свойства, расположение в металле (литом и деформированном), степень вредности?

8. Какие разновидности силикатов могут быть в стали, каковы их признаки: цвет, механические свойства, расположение в металле (литом и деформированном), степень вредности?

9. Какой отличительный признак силикатов наблюдается при их рассмотрении в поляризованном свете микроскопа?

10. Какие оксиды образуются в стали и какова природа их образования?

11. Каковы характерные признаки оксидов: цвет, механические свойства, расположение в металле (литом и деформированном), степень вредности?

12. Какие нитриды образуются в стали и какова природа их образования?

13. Как фосфор влияет на свойства стали?
14. Какие примеси растворимы в стали и какие образуют самостоятельные фазы?
15. Какие элементы ликвируют в стальном слитке сильнее других?
16. Как располагаются сульфиды марганца в горячедеформированной стали?

## **7. Рекомендуемый библиографический список**

1. ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металлографический метод определения неметаллических включений».
2. Геллер Ю. А., Рахштадт А. Г. Материаловедение (Лабораторные работы и задачи). -М.: Металлургия, 1983. - 237 с.
3. Гуляев А. П. Чистая сталь. -М.: Металлургия, 1975. - 286 с.
4. Лившиц Б. Г. Металлография. -М.: Металлургия, 1990. -240 с.
5. Практическая металлография/ Р.И. Малинина и др. - М.: Интермет Инжиниринг, 2002.-240 с.: ил.
6. Баранова Л. В., Демина Э. Л. Металлографическое травление металлов и сплавов: Справочник. - М.: Металлургия, 1986. - 256 с.

## **Дефектные структуры в стали**

## **1. Цель работы**

Изучение наиболее часто встречающихся в практике дефектов микроструктур, причин их образования, возможностей предотвращения и исправления.

## **2. Краткие теоретические сведения о дефектах микроструктуры сплавов**

К дефектным относят структуры, формирование которых приводит к снижению комплекса свойств. Дефектными считаются как некоторые равновесные структуры, так и структуры, сформированные при термическом или механическом воздействии.

### **2.1. Равновесные дефектные структуры**

#### **2.1.1. Пограничные выделения цементита**

Пограничные выделения цементита наблюдается в низко- и высокоуглеродистых сплавах системы Fe-Fe<sub>3</sub>C.

При медленном охлаждении сплавов цементит выделяется из твердых растворов – феррита или аустенита по причине уменьшения растворимости углерода в них в соответствии с метастабильной диаграммой состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C. Цементит третичный выделяется из феррита, и обычно располагается в виде фрагментов тонких пленок по границам и включений на стыках ферритных зерен в техническом железе и малоуглеродистых сталях. Вторичный цементит выделяется из аустенита, и располагается вдоль всей поверхности границ его зерен, образуя “цементитную сетку”, (а в объеме сплава – оболочки) в высокоуглеродистых заэвтектоидных сталях.

Количество избыточного цементита увеличивается в структуре сплавов при увеличении содержания в них углерода.

Несмотря на незначительное количество третичного цементита в структуре (около 0,3-0,5%), он придает сплавам большую хрупкость, сущест-

венно ухудшая их деформируемость. Выделение вторичного цементита в виде сетки придает инструментальным сталям повышенную твердость, хрупкость и низкую ударную вязкость, ухудшая их эксплуатационные свойства.

Выделение твердого и хрупкого цементита по границам зерен – значительный дефект структуры.

Во избежание выделения цементита третичного по границам ферритных зерен низкоуглеродистые сплавы необходимо охлаждать ускоренно (на воздухе).

Для устранения пограничного выделения цементита вторичного в заэвтектоидных сталях, улучшения обрабатываемости и повышения вязких свойств сплавов необходимо цементит перевести в зерна глобулярной формы, разрозненно и равномерно расположенные в структуре стали. Для этого прово-



дят специальную термическую обработку – нормализационный отжиг с нагревом выше температур:  $A_3$  (линия GS) – техническое железо и доэвтектоидные стали или  $A_{cm}$  (линия SE) – заэвтектоидные стали и охлаждением на воздухе.

### 2.1.2. Дендритная структура

Это – структура отожженного после литья сплава, частично имеющая тем не менее дендритное строение, когда в межосных пространствах дендритов расположены равноосные зерна другой структурной составляющей. Такое строение свидетельствует о недостаточном отжиге литого сплава с сильно выраженной и неустраненной отжигом остаточной дендритной ликвации.

Такая структура может образовываться после гомогенизирующего отжига в металлах и сплавах с сильной «наследственностью» литой структуры, которая обуславливается присутствующими в металле нерастворимыми примесями и неравномерным распределением компонентов сплава по сечению слитка (отливки) и отражает первичную структуру сплава.

Например, в стали после недостаточного отжига и вторичных фазовых превращений при охлаждении межосные пространства превращаются в феррит, в котором растворен ликвировавший фосфор, наряду с которым здесь же сосредоточены неметаллические включения, а оси дендрита, обогащенные углеродом, превращаются в перлит;. Таким образом, перлитные участки образуют как бы сетку или петли, внутри которых находятся целые группы ферритных зерен (рис.1).

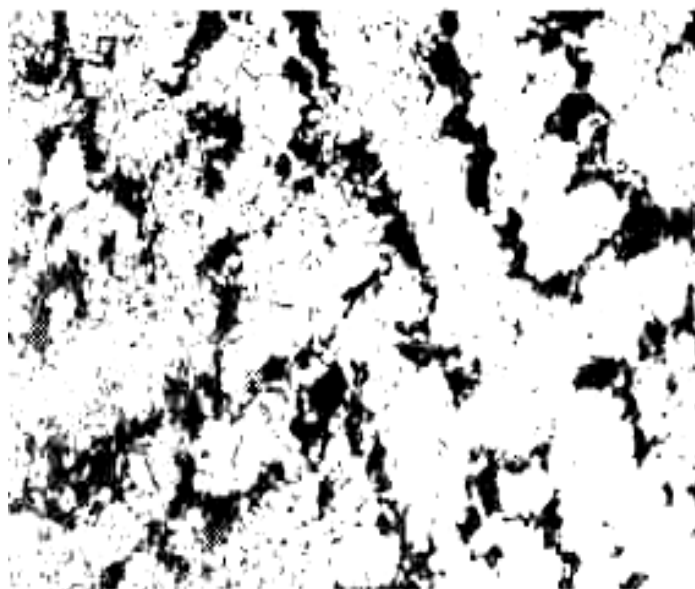


Рис.1. Неустраненная дендритная ликвация в отливке стали 35,  $\times 100$

Дендритная ликвация, неустраненная отжигом, понижает пластичность стали и сплавов, что ухудшает их деформируемость, а также

понижает температуру солидус сплава, и тогда при быстром нагреве под закалку или обработку давлением изделие может частично оплавиться в местах с неравновесно образовавшейся легкоплавкой эвтектикой.

Структура сетчатого перлита в стали и дендритная структура сплавов считается дефектной. Она исправима повторным длительным гомогенизирующим отжигом.

## ***2.2. Дефектные структуры, сформированные при механическом воздействии***

### ***2.2.1. Полосчатая структура***

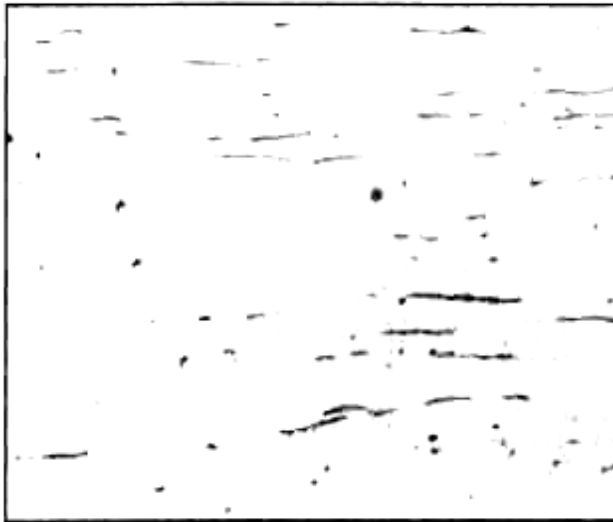
Это - структура горячедеформированной стали, в которой структурные составляющие - феррит и перлит располагаются не равномерно по объему, а раздельно более или менее широкими чередующимися участками (полосами).

Горячую пластическую деформацию углеродистых сталей проводят в аустенитном состоянии, прекращая деформацию при 850...900 °С.

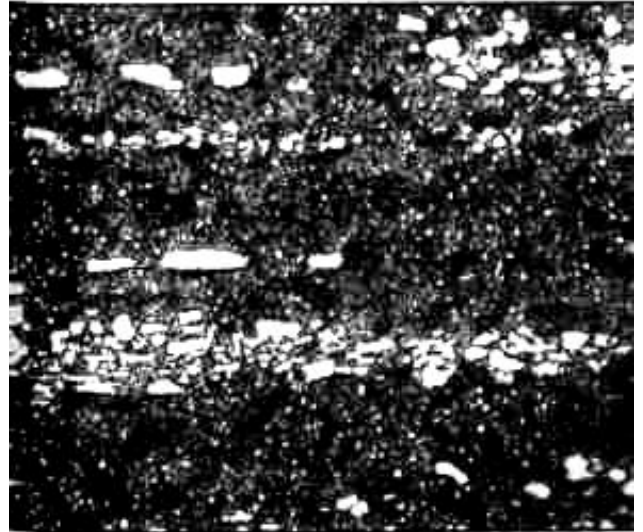
Полосчатая структура образуется в низко - и среднеуглеродистых горячедеформированных доэвтектоидных конструкционных сталях по следующим основным причинам:

1. неравномерное загрязнение стали неметаллическими включениями, серой и фосфором и сильно выраженная первичная дендритная ликвация исходной литой стали, которая не устраняется ни нагревом, ни горячей пластической деформацией. Из-за этого горячедеформированный металл «наследует» особенности макро- и микроструктуры литого металла, связанные с неоднородностью его химического состава. При горячей обработке давлением зерна аустенита вытягиваются вдоль направления течения металла. Неметаллические включения, расположенные на границах этих зерен, вытягиваются в том же направлении, сохраняя свою сплошность, если они пластичны (например, сульфиды марганца, окси сульфиды) - рис.2,а, либо образуют цепочки, если включения недеформируемы - рис.2,б. Приграничные с аустенитом зоны, обогащенные растворенным фосфором, также ориентируются в направлении течения металла. Несмотря на то, что деформированные зерна аустенита во время горячей деформации испытывают рекристаллизацию, в металле сохраняется преимущественная ориентация неметаллических включений и участков, обогащенных фосфором (из-за его низкой диффузионной подвижности) и обедненных углеродом. Феррит, зарождаясь на вытянутых включениях и в приграничных с аустенитом зонах, образует скопления своих вытянутых зерен (полос) – рис.3.

2. режим термической обработки. При медленном охлаждении от температуры аустенитизации вытянутые оси дендритов, обогащенные углеродом, превращаются в перлитные полосы, а в межосных пространствах по зонам ликвации образуются ферритные зерна, вытянутые по направлению деформации.



а



б

Рис 2. Неметаллические включения в деформированной стали. Нетравленные шлифы,  $\times 100$ : а – вытянутые пластичные включения; б – цепочки недеформируемых включений



Рис.3. Полосчатая микроструктура стали 35 после горячей деформации,  $\times 100$

3. нарушение режима техпроцесса горячего деформирования, когда температура окончания обработки давлением лежит в интервале температур  $A_{r3}$  (линия GS) -  $A_{r1}$  (линия PSK), т. е. в двухфазной области Ф + А,

Полосчатость обуславливает нежелательную значительную анизотропию механических и других свойств: худшие прочность, пластичность и вяз-

кость в поперечном и высотном направлении по сравнению с основным направлением деформации. В некоторых случаях эту анизотропию удастся использовать, конструируя изделие так, чтобы при эксплуатации было задействовано именно направление с наивысшими свойствами.

Соблюдение температурного режима деформирования и повышение скорости охлаждения после деформации препятствует образованию полос феррита и перлита.

Исправить такую структуру можно диффузионным отжигом.

Однако, полосчатость, вызванная неметаллическими включениями, отжигом не исправляется.

Ослабить склонность к образованию полосчатой структуры можно путём уменьшения содержания фосфора и серы в стали.

#### 2.2.2. Строчечная структура (карбидная ликвация)

Это - структура деформированной стали, состоящая из перлита и карбидов. Причем карбиды располагаются не равномерно по объему матрицы, а чередующимися строчками. Такое скопление карбидов называют карбидной ликвацией.

Строчечная структура образуется в горячедеформированных заэвтектоидных углеродистых сталях и особенно в легированных сталях ледебуритного класса (например, в быстрорежущих), содержащих много вторичных и эвтектических карбидов.

Причиной формирования строчечной структуры является наследственность литой структуры (дендридная ликвация), в результате которой может появиться карбидная эвтектика. Даже при высокотемпературных нагревах под горячую обработку давлением в структуре сохраняются грубые скопления нерастворимых в аустените и недеформируемых эвтектических карбидов, которые в процессе пластической деформации располагаются в мягком пластичном аустените в виде строчек.

Строчечность обуславливает нежелательную значительную анизотропию механических и других свойств стали. Карбидная ликвация снижает стойкость инструмента и увеличивает его хрупкость. В изделиях с такой структурой выкрашиваются лезвия инструментов и трущиеся поверхности деталей.

Уменьшить строчечность можно длительными повторными высокотемпературными диффузионными отжигами. Однако, полностью исправить такую структуру не удастся.

### **3. Материалы, приборы, оборудование**

Для выполнения лабораторной работы необходима коллекция шлифов сплавов и стали с наиболее распространенными характерными дефектными микроструктурами: в литом и перегретом состояниях, после пережога и

обезуглероживания, с пограничным выделением цементита, с дендритной, полосчатой и строчечной структурами Атлас микроструктур металлических материалов [1].

Изучение коллекции шлифов студенты проводят на металлографических микроскопах МИМ-7 с набором оптики для получения различных увеличений.

#### **4. Порядок выполнения работы**

4.1. Получить коллекцию лабораторных шлифов с дефектными микро- структурами: перегревом, пережогом, обезуглероживанием, с цементитной сеткой, дендритной структурой, полосчатой и строчечной структурой.

4.2. Все микрошлифы внимательно изучить под микроскопом при различных увеличениях. Установить отличительные признаки дефектных структур и причины их возникновения.

4.3. Определить микроструктуру каждого образца, зарисовать ее и кратко описать, указав характерные особенности расположения и форму структурных составляющих. Результаты представить в форме таблицы.

Таблица Результаты изучения образцов с дефектами микроструктуры

№ Об- разца	Зарисовка Микро- структуры	Структурные составляющие	Фазы в сплаве	Техническое название и Химический состав сплава	Условия наблюдения: увеличение, апертура, травитель

#### **5. Содержание отчета**

5.1. Цель работы.

5.2. Краткое изложение теоретических сведений, описание характерных признаков и свойств различных дефектных структур. Указание причин их образования и возможности их предотвращения и исправления.

5.3. Рисунки всех дефектных структур с указанием структурных составляющих и описанием объектов исследования.

5.4. Выводы по работе о причинах обнаружения и возможном влиянии особенностей дефектов структуры на механические свойства стали.

#### **6. Контрольные вопросы**

1. Результатом какого процесса является образование игольчатой «видманштеттовой» структуры в стали?

2. Каким образом можно исправить структуру с пограничными выделениями цементита?

3. Для каких сплавов характерна полосчатая структура?

4. Чем обусловлено образование обезуглероженного слоя на поверхности деталей?

5. Каким образом можно исправить строчечную структуру стали?

6. Почему полосчатость считается дефектной структурой?

7. Какую природу имеют карбиды в сталях со строчечной структурой?
8. Что является причиной пережога?
9. Какими свойствами характеризуется сталь со структурой пережога?
10. Каким образом можно исправить структуру стали с дендридным строением?
11. За счет чего улучшаются свойства стали со структурой пограничного цементита после нормализации?

## **7. Рекомендуемый список литературы**

1. Атлас микроструктур металлических материалов. В трёх частях. Часть 1. Особенности кристаллизации и структурообразования металлов и сплавов. Учебное пособие. В.Я. Котенева, Г.В. Маркова.- Тула; ТулГУ, 2008. - 100 с, 97 ил.
2. Материаловедение /Б.Н. Арзамасов и др.-М.:Машиностроение, 1986.-384 с.
3. Технология термической обработки стали. Пер. с нем.- М.: Металлургия, 1981.- 608 с.
4. Теория термической обработки металлов /Новиков И.И. - М.: Металлургия, 1986.-480 с.
5. Практическая металлография/ Р.И. Малинина и др. - М.: Интермет Инжиниринг, 2002.-240 с.: ил.
6. Микроструктура металлических сплавов: Лаб. Практикум/ Р.И. Малинина, В.Ю. Введенский и др.; Под ред. Р.И. Малининой и В.Ю. Введенского. - М.: МИСиС, 2007. - 198 с.

# Дефекты структуры термического происхождения

## 1. Цель работы

Изучение наиболее часто встречающихся в практике дефектов микроструктур, причин их образования, возможностей предотвращения и исправления.

## 2. Краткие теоретические сведения о дефектах Термической и химико-термической обработки

К дефектным относят структуры, формирование которых приводит к снижению комплекса свойств. Дефектными считаются как некоторые равновесные структуры, так и структуры, сформированные при термическом или механическом воздействии.

### 2.1. Структура литой и перегретой стали (видманштеттова структура<sup>1</sup>)

Характерным признаком видманштеттовой структуры является крупнозернистость и ориентированное направленное расположение пластин феррита в доэвтектоидной или цементитных игл в заэвтектоидной стали относительно зерен другой структурной составляющей сталей – перлита.

Такая структура может образовываться в ускоренно охлаждаемых сталь-

ных заготовках после их нагрева до высоких температур (доэвтектоидная сталь - выше  $A_3$ , заэвтектоидная сталь - выше  $A_{cm}$ ) и длительного пребывания в однофазной области аустенита или в деталях и изделиях, продолжительно работающих при высокой температуре (изложницах, ящиках для цементации, деталях паровых котлов и т. д.), т.е. в перегретой стали; а также в крупных стальных отливках и сварных соединениях.

В перегретых сталях структура заготовок или изделий перед охлаждени-

ем – крупнозернистый аустенит. Такую же структуру имеют после окончания кристаллизации массивные слитки и отливки. Ускоренное охлаждение (большой градиент температуры) создает условия для протекания фазовых превращений:  $A \rightarrow \Phi$  в доэвтектоидной и  $A \rightarrow \text{Ц}_{II}$  в заэвтектоидной стали по принципу размерного и структурного соответствия, когда зародыши феррита или цементита возникают на границах зерен аустенита и развиваются по определенным кристаллографическим плоскостям, т.к. в этом случае закономерная ориентировка новых фаз способна уменьшить энергию некогерентной границы между ними и исходной фазой – аустенитом. Избыточный феррит в доэвтектоидной стали выделяется не только на границах, но и внутри крупных зерен аустенита, т.к. мест для зарождения его кристаллов на границах особенно мало. При этом пластины, возникшие внутри аустенитных зерен, лежат вдоль плоскостей  $\{111\}$  решетки аустенита.



Сталь с видманшеттовой структурой ввиду ее крупнозернистости и пластинчатого ориентированного строения структурных составляющих имеет низкие механические свойства, главным образом низкую ударную вязкость, что повышает опасность хрупкого разрушения.

Видманшеттовую структуру можно и необходимо устранить нормализацией: повторным оптимальным нагревом на  $50...70\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше температур  $A_3$  (линия GS) - доэвтектоидные стали или  $A_{cm}$  (линия SE) - заэвтектоидные стали и охлаждением на воздухе. В зависимости от целесообразности заэвтектоидные стали подвергают взамен нормализации сфероидизирующему отжигу при  $760...790\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

<sup>1</sup>А.Р. Видманшеттен – австрийский ученый, описавший в 1808 г. эту структуру в железных метеоритах.

## 2.2. Структура пережога

Пережог – сильное межкристаллитное окисление, а иногда и частичное оплавление металла и (или) примесей в виде легкоплавких эвтектик по границам зерен. Такая структура может образовываться в металлах и сплавах, нагреваемых до очень высоких температур, близких к началу плавления, под различные виды обработки давлением, ковку, прокатку, а также под различные виды термической обработки при перепадах температур в садке печи и неточности теплового контроля.

При этом происходит значительный рост зерна, в некоторых случаях - частичное оплавление металла и (или) примесей в виде легкоплавких эвтектик на границах зерен. В этих условиях происходит быстрое проникновение по оплавленным участкам компонентов атмосферы печи, приводящее к образованию с металлом и с примесями оксидов и газовых пузырей. Например, структура пережога стали - это аномально крупные скругленной формы зерна феррита или перлита и расположенная по их границам темно-серая сетка оксидов железа. Связь между отдельными зернами ослабевает и нарушается, что приводит к сильному снижению прочности и пластичности металла.

Грубозернистая, чрезвычайно хрупкая структура совершенно не пригодна для какого-либо применения, т.к. при последующей за нагревом обработке давлением, ковке, прокатке или под действием закалочных напряжений в металле возникают межкристаллитные трещины.

Пережог – это неисправимый и самый опасный брак. Структура пережога недопустима, исправление её невозможно, металл идет в переплавку. Поэтому пережог надо предотвращать, строго следя за соблюдением температурного режима в печи.

## 2.3. Обезуглероженный слой на поверхности изделия

В изделии с обезуглероженным слоем соотношение структурных составляющих, а значит и химический состав стали, на поверхности и внутри его резко отличаются.. Толщина обезуглероженного слоя может составлять

до 1-1,5 мм. Такая структура может образовываться в сталях, склонных к обезуглероживанию, во время аустенитизации при нагреве под различные виды термической обработки, под обработку давлением, ковку в печах без защитной атмосферы. Углерод таких сталей, особенно кремнистых, диффундирует из внутренних объемов к поверхности, где активно взаимодействует с кислородом атмосферы печи. Обедненный углеродом аустенит поверхности при охлаждении превращается в мягкий, пластичный феррит, резко снижающий твердость и прочность рабочих поверхностей изделий, что приводит к их быстрому износу и выходу из строя. В обезуглероженных местах на поверхности легко образуются повреждения в виде зародышевых усталостных трещин, обуславливающих при развитии конечное разрушение.

Обезуглероживание предотвращают, производя аустенитизацию в печах с защитной атмосферой с точной регулировкой состава защитного газа или в нейтральных соляных ваннах. Другим способом является нанесение на поверхность детали слоя вещества, предотвращающего взаимодействие углерода с кислородом воздуха. Для этого, в частности, используют омеднение.

Обезуглероженный слой на поверхности изделия можно восстановить цементацией в твердом карбюризаторе при температуре 900-950 °С в течение суток и более, доводя концентрацию углерода до среднего содержания его в стали.

### **3. Материалы, приборы, оборудование**

Для выполнения лабораторной работы необходима коллекция шлифов сплавов и стали с наиболее распространенными характерными дефектными микроструктурами: в литом и перегретом состояниях, после пережога и обезуглероживания, с пограничным выделением цементита, с дендритной, полосчатой и строчечной структурами Атлас микроструктур металлических материалов [1].

Изучение коллекции шлифов студенты проводят на металлографических микроскопах МИМ-7 с набором оптики для получения различных увеличений.

### **4. Порядок выполнения работы**

4.1. Получить коллекцию лабораторных шлифов с дефектными микро- структурами: перегревом, пережогом, обезуглероживанием, с цементитной сеткой, дендритной структурой, полосчатой и строчечной структурой.

4.2. Все микрошлифы внимательно изучить под микроскопом при различных увеличениях. Установить отличительные признаки дефектных структур и причины их возникновения.

4.3. Определить микроструктуру каждого образца, зарисовать ее и кратко описать, указав характерные особенности расположения и форму структурных составляющих. Результаты представить в форме таблицы.

**Таблица Результаты изучения образцов с дефектами микроструктуры**

№ образца	Записовка микроструктуры	Структурные составляющие	Фазы в сплаве	Техническое название и химический состав сплава	Условия наблюдения: увеличение, апертура, травитель

## **5. Содержание отчета**

5.1. Цель работы.

5.2. Краткое изложение теоретических сведений, описание характерных признаков и свойств различных дефектных структур. Указание причин их образования и возможности их предотвращения и исправления.

5.3. Рисунки всех дефектных структур с указанием структурных составляющих и описанием объектов исследования.

5.4. Выводы по работе о причинах обнаружения и возможном влиянии особенностей дефектов структуры на механические свойства стали.

## **6. Контрольные вопросы**

1. Результатом какого процесса является образование игольчатой «видманштеттовой» структуры в стали?
2. Каким образом можно исправить структуру с пограничными выделениями цементита?
3. Для каких сплавов характерна полосчатая структура?
4. Чем обусловлено образование обезуглероженного слоя на поверхности деталей?
5. Каким образом можно исправить строчечную структуру стали?
6. Почему полосчатость считается дефектной структурой?
7. Какую природу имеют карбиды в сталях со строчечной структурой?
8. Что является причиной пережога?
9. Какими свойствами характеризуется сталь со структурой пережога?
10. Каким образом можно исправить структуру стали с дендритным строением?
11. За счет чего улучшаются свойства стали со структурой пограничного цементита после нормализации?

## **7. Рекомендуемый список литературы**

1. Атлас микроструктур металлических материалов. В трёх частях. Часть 1. Особенности кристаллизации и структурообразования металлов и сплавов. Учебное пособие. В.Я. Котенева, Г.В. Маркова.- Тула; ТулГУ, 2008. - 100 с, 97 ил.

2. Материаловедение /Б.Н. Арзамасов и др.-М.:Машиностроение, 1986.-384 с.
3. Технология термической обработки стали. Пер. с нем.- М.: Металлургия, 1981.- 608 с.
4. Теория термической обработки металлов /Новиков И.И. - М.: Металлургия, 1986.-480 с.
5. Практическая металлография/ Р.И. Малинина и др. - М.: Интермет Инжиниринг, 2002.-240 с.: ил.
6. Микроструктура металлических сплавов: Лаб. Практикум/ Р.И. Малинина, В.Ю. Введенский и др.; Под ред. Р.И. Малининой и В.Ю. Введенского. - М.: МИСиС, 2007. - 198 с.