

## Определение балла зерна стали Ст3, подвергшейся процессу графитизации и последующей термической обработки

© Е. А. Гусева, А. А. Иваненко, Д. А. Данилов

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты анализа различных способов получения сталей с графитовыми включениями. Проведена оценка принципиальной возможности получения включений графита в низкоуглеродистых сталях, установлены наиболее оптимальные режимы термической обработки, в частности, отжига, для образцов стали, подвергшихся цементации. Отжиг проводился при разных температурах от 900 °С до 1000 °С. Продолжительность выдержки варьировалась от одного до трех часов. Установлено влияние режимов отжига на размер зерна поверхностного слоя, подвергшегося цементации. Значительный рост зерна происходит, и при увеличении продолжительности выдержки, и при повышении температуры. В статье представлены структуры образцов стали Ст3 после проведения отжига при разных температурах. Описаны способы определения балла зерна, который определяли визуальным методом сопоставления наблюдаемых под микроскопом зерен при кратности увеличения  $\times 100$  с эталонными. Наблюдался резкий рост зерна при температурах 950 °С и 1000 °С, заметно превышающих точку  $A_{c3}$ , что характерно для сталей наследственнокрупнозернистых, к которым относится исследуемая сталь Ст3. Установлено, что повышение температуры оказывает значительно большее влияние на рост зерна по сравнению с увеличением продолжительности выдержки.

**Ключевые слова:** графитизированные стали, отжиг, микроструктура, величина (балл) зерна, рост зерна

## Grain-size determination of steel St3, which has undergone the process of graphitization and subsequent heat treatment

© Elena A. Guseva, Alexei A. Ivanenko, Daniel A. Danilov

*Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation*

**Abstract.** The article presents the results of the analysis of various methods for producing steels with graphite inclusions. The article assesses the fundamental possibility of obtaining graphite inclusions in low-carbon steels, and establishes the most optimal modes of heat treatment, in particular, annealing, for steel samples that have undergone carburizing. Annealing was carried out at various temperatures: 900 °C, 950°C, 1000 °C. The duration of exposure varied from one hour to three hours. The article has found that the annealing mode affects the grain size of the surface layer subjected to carburization. Noticeable grain growth occurs both with an increase in the duration of exposure and with an increase in temperature. The article presents the structures of St3 steel samples after annealing at different temperatures. The article describes methods for determining the grain score, which was determined by a visual method of comparing grains observed under a microscope at a magnification of  $\times 100$  with reference ones. There is a sharp grain growth at temperatures of 950 °C and 1000 °C, which are noticeably higher than the  $A_{c3}$  point, which is typical for hereditary coarse-grained steels, which include the St3 steel under study. The article has found that an increase in temperature has a much greater effect on grain growth compared to an increase in the duration of exposure.

**Keywords:** graphitized steels, annealing, microstructure, grain size (score), grain growth

Графитизированные стали обладают рядом существенных преимуществ, главное из которых – повышенное сопротивление износу. Такие стали находят применение для изготовления фрикционных передач, а также изделий, работающих в условиях повышенного трения и пр. Процесс графитизации стали достаточно хорошо изучен. В литературе описаны различные методы, способствующие получению включений графита в стальных изделиях [1–5]. Процесс графитизации

легко проходит в заэвтектоидных сталях, в которых содержание углерода достаточно большое. Для доэвтектоидных сталей применяют дополнительные способы, например, цементацию, приводящую к увеличению содержания углерода в поверхностных слоях. Последующий отжиг, формирующий графитовые включения на поверхности, может привести к привлекательному сочетанию свойств – прочностные свойства сталей дополняются хорошими антифрикционными

свойствами чугуна.

В настоящей работе в качестве объекта исследования использовалась низкоуглеродистая сталь, предварительно прошедшая плазменную цементацию. Этот способ науглероживания приводит к заметному повышению содержания углерода на поверхности стального изделия. Целью работы является изучение влияния последующей термообработки на формирование структуры цементованного слоя с включениями графита.

Последующая термообработка представляла собой отжиг образцов, подвергнутых плазменной цементации. Была поставлена задача оценки принципиальной возможности получения графитовых включений, установления наиболее рациональных режимов отжига цементованных образцов и влияние режимов отжига на размер зерна у цементованного слоя. Представляет интерес возможность графитизации поверхностных слоев стали, подвергшейся плазменной цементации. В работах [6–9] доказана возможность насыщения поверхности стали углеродом до концентраций, соответствующих составу чугунов, при этом ее структура соответствовала структуре белых чугунов.

Плазменная поверхностная обработка относится к методам поверхностного упрочнения, с использованием высококонцентрированных источников энергии с удельной мощностью более  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. С этой целью применялся плазматрон Мультиплаз 3500. Поверхность насыщалась атомами углерода в результате бомбардировки ионами углерода, образующимися в прикатодной области тлеющего разряда. В качестве плазмообразующего вещества были предложены несколько составов, содержащих спирт, бензол, воду и их смеси, и был установлен оптимальный состав плазмообразующей смеси. Источником углерода являлась графитовая обмазка, наносимая предварительно на образцы, в состав которой входил порошок графита, жидкое стекло, смазочно-охлаждающие жидкости и вода. В результате процесса плазменной цементации идет образование атомарного углерода в большом количестве, и при разнице температуры он легко проникает (диффундирует) в поверхностные слои металла.

При одновременном воздействии графитовой обмазки, нанесенной на поверхность металла, и действия плазменной дуги может возникать такое состояние, при котором на поверхности наблюдается тонкий слой от оплавления (режим микроплавления). Появляется большое количество цементита, и концентрация углерода в слое оказывается намного больше концентрации, полученной насыщением в твердой фазе. При микроплавлении максимальная глубина 107–190 мкм, углерод неравномерно распределяется по глубине цементации, что приводит к образованию различных типов микроструктуры. При макроплавлении глубина цементации значительно повышается, может достигать 3 мм и больше, углерод более равномерно распределяется по объему оплавленного металла.

Цементированный слой состоит из двух зон. Первая характеризуется значительным пересыщением по углероду, ее структура отвечает структуре белого чугуна. Во второй зоне концентрация углерода постепенно приближается к исходной концентрации.

Проведены серии экспериментов по обработке образцов стали после плазменной цементации, целью которых было получение графитовых включений в поверхностном слое.

Последующая термообработка представляла собой отжиг образцов.

Отжиг проводился при различных температурах: 900 °С, 950 °С, 1000 °С. Продолжительность выдержки составляла час, два и три часа.

Заметный рост зерна происходит в обоих случаях: при повышении температуры отжига и при увеличении продолжительности времени выдержки. Микроструктура образцов стали Ст3 предоставлена на рисунке.

Размеры зерен влияют на механические свойства сплавов стальных изделий и их коррозионную стойкость [10–11]. Величина или балл зерна сильно зависит от предшествующих операций. Большое влияние на размер зерна будет оказывать температура нагрева при различных видах обработки, продолжительность выдержки, а также склонность данной стали к росту зерна при нагреве (различают наследственно крупно-

зернистую сталь и наследственно мелкозернистую сталь).

Увеличение размеров действительного зерна приводит к изменению свойств: понижаются характеристики, отвечающие за прочность, за твердость, а также уменьшается показатель относительного удлинения. Увеличение размера зерна сильно влияет на ударную вязкость – она значительно понижается, работа, затрачиваемая на распространения трещины уменьшается, при этом порог хладноломкости  $t_{50}$  повышается. Все это приводит к понижению надежности. При крупном зерне сталь плохо деформируется и предрасположена к образованию трещин после термической обработки (закалки).

Границы зерен можно выявлять следующими способами: при помощи процесса цементации; при травлении границ зерен; для сталей эвтектоидных и заэвтектоидных возможно обнаружение границ по цементитной сетке; для сталей доэвтектоидных выявление по ферритной сетке после проведения термической обработки нормализации; окисление; вакуумное термическое травление.

Способ выявления границ зерен зависит от химического состава стали, а также от проблем и приоритетов исследования.

Для определения балла зерна сталей и сплавов металлографическим методом используют ГОСТ 5639-82 [12]. Для определения балла зерна цветных сплавов используют ГОСТ 21073.0-75 [13]. Возможно определение балла зерна компьютерным способом [14].

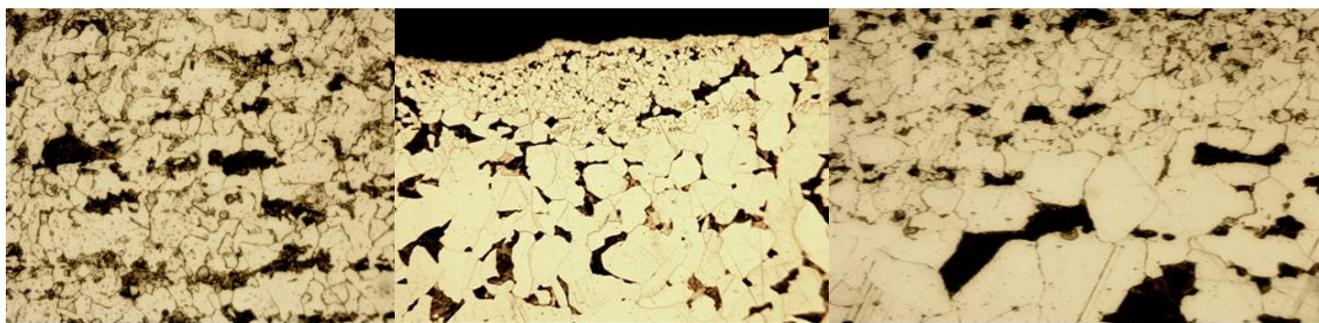
При использовании металлографии площадь исследуемого образца должна составлять более одного см<sup>2</sup>. Границы зерен определяют методом травления. Зернами металлов считают кристаллы, сформировавшиеся

отдельно и друг от друга, они разделены границами. Границей зерен является поверхность, которая разделяет кристаллические решетки. Эта поверхность, в свою очередь, различается ориентацией в пространстве. Зерна подразделяются на равноосные и неравноосные, вместе с зернами считают двойники.

Метод травления заключается в выявлении границ зерен при помощи раствора пикриновой кислоты в воде. Раствор пикриновой кислоты должен быть свежеприготовленным. Предварительно стали подвергают нормализации. Время выдержки составляет от одного до трех часов. Температура обработки в подавляющем большинстве случаев выше, чем температура, требуемая для закалки, на 20–30 °С. Для лучшего выявления границ зерен сталь могут подвергнуть отпуску.

Метод цементации применим для низкоуглеродистых сталей, которые и подвергаются процессу цементации. Образцы подвергают цементации. При этом требуется, чтобы объем карбюризатора был в 30 раз больше, чем объем образцов. Выдерживают не менее восьми часов, скорость охлаждения зависит от химического состава стали. После процесса цементации образец разрезают пополам и протравливают.

Метод окисления применим практически для всех видов сталей. В данном методе сетка оксидов помогает выявить границы кристаллитов. Процесс подготовки образцов заключается в их нагреве в атмосфере защитных газов до определенной температуры. Для того чтобы прошел процесс окисления, в печь подается воздух. Температура при этом не уменьшается. Образцы охлаждают в воде и подвергают травлению.



а б в  
Рис. Микроструктура стали Ст3, выдержка час: а – 900 °С; б – 950 °С; в – 1000 °С

Для образования цементитной или ферритной сетки образцы нагревают, а затем охлаждают до 650 °С, применяя разные скорости охлаждения. Скорость охлаждения образцов зависит от химического состава. Потом образцы разрезают и готовят микрошлифы. По микроструктуре определяют величину кристаллита. Этот метод называется сетка феррита или цементита.

Для определения роста зерен аустенита применяется метод вакуумного термического травления. Способ основан на испарении металла по границам зерен при высоких температурах. Величина зерна определяется различными способами. Баллом зерна или его величиной считается средняя величина отдельных сечений зерен, рассматриваемых при микроструктурном анализе металлов в плоскости исследуемого микрошлифа. Перечислим основные способы определения балла зерна:

- сопоставление наблюдаемых под микроскопом зерен с эталонными. Эталоны шкал приведены в ГОСТе 5639-82;
  - подсчет количества зерен, приходящихся на единицу исследуемой поверхности;
  - измерение хорд при помощи микроскопа.
- Данные способы применяют только тогда,

когда зерна имеют равноосную форму или близкую к ней.

В данной работе балл зерна определили визуальным методом сопоставления наблюдаемых под микроскопом зерен при кратности увеличения  $\times 100$  с эталонными. Результаты наблюдений представлены в таблице.

**Таблица.** Величины (балл) зерна стали в зависимости от температуры и продолжительности отжига

Температура °С → Продолжительность выдержки, час. ↓	Без нагрева	900	950	1000
0	8			
1		8	3	3
2		8	3	2
3		7	2	2

### Выводы

При температурах 950 °С и 1000 °С наблюдался резкий рост зерна, заметно превышающих точку  $A_{c3}$ , что характерно для сталей наследственно крупнозернистых, к которым относится исследуемая сталь Ст3. Установлено, что повышение температуры оказывает значительно большее влияние на рост зерна по сравнению с увеличением продолжительности выдержки.

### Список источников

1. Колмыков В. И., Летов С. С., Переверзев В. М. Графитизация в кремнистых сталях при цементации // Материалы и упрочняющие технологии: сборник материалов X юбилейной Российской научно-технической конференции с Международным участием, посвященной 40-летию образования Курского государственного технического университета (Курск, 15–17 декабря 2003 г.). Курск: Курский государственный технический университет, 2003. С. 124–127.
2. Савченко В. А., Волчок В. П. Структурообразование графитизированных сталей // Литье и металлургия. 2007. № 4. С. 89–91.
3. Гвоздев А. Е., Маляров А. В., Тихонова И. В., Сергеев Н. Н., Калинин А. А., Старикова К. Н. Поведение химического соединения  $Fe_3C$  при термоциклических воздействиях // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов VI Международной конференции. (Москва, 10–13 ноября 2015 г.). М.: ИМЕТ РАН, 2015. С. 23–24.
4. Гвоздев А. Е., Маляров А. В., Тихонова И. В., Сергеев Н. Н., Калинин А. А. Зарождение и рост графитовых включений при эксплуатации паропроводов из стали марки 20 // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов VI Международной конференции (Москва, 10–13 ноября 2015 г.). М.: ИМЕТ РАН, 2015. С. 238–239.
5. Guseva E. A., Konstantinova M. V., Kargapoltsev S. K., Gozbenko V. E., Sivtsov A. V., Karlina A. I. and Shtayger M. G. Methods of graphitized steels obtaining. To cite this article: Guseva E. A. et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1353 012063.
6. Балановский А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
7. Балановский А. Е., Ву В. Г. Плазменная поверхностная цементация с использованием графитового покрытия // Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 2. С. 175–179.
8. Гусева Е. А., Хусанов А. И. Использование высоких технологий в процессах диффузионного насыщения поверхности металлических изделий // Перспективы развития технологии углеводородных и минеральных ресурсов: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с Международным участием (Иркутск, 26–27 апреля 2018 г.). Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2018. С. 31–33.
9. Konstantinova M. V., Balanovskiy A. E., Gozbenko V. E., Kargapoltsev S. K., Karlina A. I., Shtayger M. G., Guseva E. A. and Kuznetsov B. O. Application of plasma surface quenching to reduce rail side wear. IOP Confer-

ence Series: Materials Science and Engineering IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 560 012146.

10. Акимов И. В. Повышение механических свойств литой графитизированной стали // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2015. № 3 (57). С. 129–133.

11. Гусева Е. А., Константинова М. В., Гусев А. О. Пути повышения надежности промышленного оборудования // Вестник ИргТУ. 2013 № 10. С. 218–224.

12. ГОСТ 5639-82 – Стали и сплавы. Методы выяв-

ления и определения величины зерна. М.: Изд-во Стандартов. 2003. 17 с.

13. ГОСТ 21073.0-75 ГОСТ 21073.4 – 75 Металлы цветные. Определение величины зерна. Общие требования – Введ.1975-08-15 М.: Изд-во Стандартов. 1975. 16 с.

14. Анисович А. Г., Румянцева И. Н., Бислюк Л. В. Определение балла зерна компьютерными методами // Литье и металлургия. 2010. № 3. С. 100–104.

#### Информация об авторах / Information about the Authors

**Елена Александровна Гусева,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры материаловедения, сварочных  
и аддитивных технологий,  
Институт авиационного машиностроения и транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
el.guseva@rambler.ru

**Elena A. Guseva,**

Cand. Sci. (Technics),  
Associate Professor,  
Department of Materials Science, Welding  
and Additive Technologies,  
Institute of Aircraft Engineering and Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
el.guseva@rambler.ru

**Алексей Александрович Иваненко,**

студент группы МТ620-1,  
кафедра материаловедения, сварочных  
и аддитивных технологий,  
Институт авиационного машиностроения и транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
ivanenko.alexey02@mail.ru

**Alexei A. Ivanenko,**

Student,  
Department of Materials Science, Welding  
and Additive Technologies,  
Institute of Aircraft Engineering and Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
ivanenko.alexey02@mail.ru

**Даниил Александрович Данилов,**

студент группы МТ620-1,  
кафедра материаловедения, сварочных  
и аддитивных технологий,  
Институт авиационного машиностроения и транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
danil090701@mail.ru

**Daniel A. Danilov,**

Student,  
Department of Materials Science, Welding  
and Additive Technologies,  
Institute of Aircraft Engineering and Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
danil090701@mail.ru