

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ В УСЛОВИЯХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Л. И. Шаповалова

Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод –  
управляющая компания холдинга» «Белорусская металлургическая компания»,  
г. Жлобин, Республика Беларусь

*Современные способы производства стали и сплавов не дают возможности получить металл, не содержащий неметаллических включений. Больше или меньшее количество включений существует в любой стали в соответствии с её составом и условиями производства. Особенно опасными для качества стали являются макровключения, которые играют определяющую роль при зарождении разрушения деталей и конструкций. Ультразвуковой контроль металлопродукции позволяет надежно и эффективно проверять качество металлопродукции. В качестве сравнительного испытания ультразвуковое испытание позволяет сделать вывод о внутренних несплошностях, с точки зрения их положения, протяженности, размеров и частоты. Наряду с синеломкостью этот вид испытания предоставляет возможность определения макроскопической степени чистоты стали, однако не позволяет получить информацию об истинных размерах включений и их химическом составе. В настоящее время в лаборатории металловедения проводится апробация программного обеспечения для оценки макровключений с целью последующего использования в контроле готовой металлопродукции, что позволит снизить эффект «человеческого фактора», возникающего при визуальном сравнении структуры металла с эталонными шкалами, и повысить точность измерений*

**Ключевые слова:** качество, металлографический контроль, неметаллические включения, исследование, ультразвуковой контроль, синий излом, анализ изображений

## METHODS FOR ASSESSING MACROSCOPIC INCLUSIONS IN STEEL IN METALLURGICAL PLANT

L. I. Shapovalova

Joint Stock Company «Byelorussian steel works – management company of  
«Byelorussian metallurgical company» holding»,  
Zhlobin, Republic of Belarus

*Modern methods for production of steel and alloys do not make it possible to obtain metal that does not contain non-metallic inclusions. More or less quantity of inclusions exists in any steel in accordance with its composition and production conditions. Particularly danger-*

ous for quality of steel are macroinclusions, which play decisive role in initiation of destruction of parts and structures. Ultrasonic testing of metal products allows you to check reliably and efficiently quality of metal products. As a comparative test, ultrasonic testing makes it possible to make a conclusion on internal discontinuities in terms of their position, extent, size and frequency. Along with blue fracture test, this type of test makes it possible to determine macroscopic degree of steel purity, but does not provide information about true sizes of inclusions and their chemical composition. Currently, Metallographic laboratory is testing software for evaluation of macro-inclusions with the aim of subsequent use in control of finished metal products, which will reduce effect of «human factor» that occurs when visually comparing the structure of metal with reference scales, and increase the accuracy of measurements.

**Key words:** quality, metallographic control, non-metallic inclusions, ultrasonic test, blue fracture, image analysis

e-mail: nmv.czl@bmz.gomel.by

## ВВЕДЕНИЕ

Постоянное повышение требований, предъявляемых к качеству металла, вызывает необходимость совершенствования контроля качества продукции. К настоящему времени для анализа неметаллических включений разработаны и широко используются различные методы, позволяющие с большой точностью определить состав, структуру и содержание неметаллических включений в стали и сплавах как с выделением их из металла, так и в твердом металле.

К неметаллическим включениям относят химические соединения, образующиеся в процессе производства сталей – при выплавке, разливке.

Они существенно влияют на качество стали и их свойства, в зависимости от природы соединений, их количества, формы, размера и характера распределения.

Все неметаллические включения делят на 2 группы:

1) эндогенные – соединения, образующиеся в результате химических реакций, в процессе выплавки, раскисления, разливки и кристаллизации слитка;

2) экзогенные – частицы соединений, попавшие в жидкую сталь извне, из шихты, футеровки и т. д.

Оба вида включений могут взаимодействовать друг с другом, образуя комплексные соединения сложного состава.

По геометрической форме включения могут быть глобулярные (шарообразные), неправильные (чаще всего остроугольные), строчечные (нитеобразные), плёночные (обычно располагающиеся по границам зёрен) и точечные.

По степени пластичности включения разделяют на пластичные, которые при деформации хорошо изменяют свою форму и вытягиваются в строчки (сульфидные, пластичные силикаты), и хрупкие, которые при аналогичной обработке не вытягиваются, а дробятся (глинозём, кремнезём и т. д.).

По химическому составу принцип классификации включений основан на содержании одного из трех элементов, являющихся вредными примесями в стали: серы (сульфиды), азота (нитриды) и кислорода (оксиды) [1, 2].

## АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Неметаллические включения ухудшают не только механические (прочность, пластичность), но и другие свойства стали (магнитную проницаемость, электропроводность и др.), т. к. нарушают сплошность металла и образуют полости, в которых концентриру-

ются напряжения в металле. Наличие крупных неметаллических включений влияет на усталостные свойства изделий из сталей, а значит, и на эксплуатационные свойства.

Включения в стали могут иметь весьма различные размеры от дисперсных включений, неразличимых в микроскоп, до крупных включений, видимых невооруженным глазом и имеющих иногда протяженность в несколько десятков миллиметров. Поэтому следует различать макровключения и микровключения. К макровключениям можно отнести включения размером 0,8 мм и более, соответственно, включения размером менее 0,8 мм, являются микровключениями [3, 4].

Многие исследователи считают [5], что тип включений не влияет на механические свойства стали. Определяющим фактором считают критический размер включений, который установлен для многих материалов. По-видимому, для каждой стали, существует критический размер включений, зависящий от типа включений, стали и предъявляемых к ней свойств. Более крупные включения опасны для стали, независимо от их состава. Микровключения, размер которых меньше критического, не ведут себя как дефекты.

### **Цель работы**

Рассмотреть существующие методы оценки макровключений в стали, применяемые в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (далее – БМЗ, предприятие).

### **Задачи исследования**

Внедрить использование программного обеспечения для определения загрязненности металла макровключениями.

## **МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Ультразвуковой контроль**

Ультразвуковая дефектоскопия – метод, предложенный С. Я. Соколовым в 1928 году и основанный на исследовании процесса распространения ультразвуковых колебаний с частотой 0,5–25 МГц в контролируемых изделиях с помощью специального оборудования – ультразвукового преобразователя и дефектоскопа.

Ультразвуковая дефектоскопия самый распространенный и универсальный метод неразрушающего контроля, представляющий собой совокупность методов неразрушающего контроля, использующих для нахождения дефектов в изделиях ультразвуковые волны. При помощи дефектоскопов получают информацию в виде световых, звуковых, электрических и других сигналов о качестве контролируемых деталей, узлов и т. д. Полученные данные затем анализируются, выясняются формы дефектов, размер, глубина залегания, и другие характеристики.

Одним из способов ультразвукового контроля макровключений является метод погружения в иммерсионной ванне (рис. 1) для оценки степени макроскопической чистоты проката. Бак ультразвуковой установки оснащен двумя моторизованными осями X и Y, а также одной осью Z с моторизованным приводом и позволяет выполнять контроль цилиндрических, плоских и кольцевых деталей. С помощью опционального вращательного механизма, который может быть реализован в виде вращающегося диска, роликовой опоры или передней и задней бабок, может выполняться контроль цилиндрических деталей. В качестве ультразвукового устройства используется многоканальный дефектоскоп. Программирование прибора, а также весь процесс испытания осуществляется через персональный компьютер. Испытание производится с использованием обычного погружного датчика. В качестве контактной среды используется вода, которая находится в резервуаре. Исследуемые детали помещаются в наполненный водой резервуар таким образом, чтобы проверяемые зоны полностью оказались в воде.

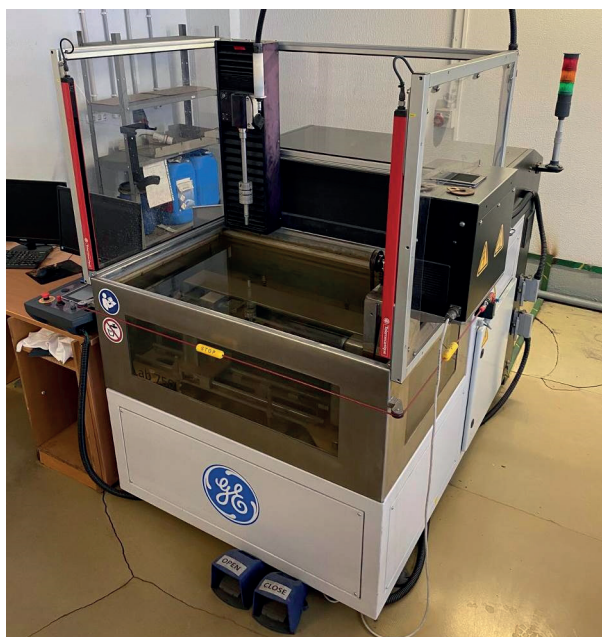


Рис. 1. Ультразвуковая установка UTS-750

Для данного метода контроля требуется тщательная подготовка поверхности проверяемого изделия, чтобы между ней и прибором не было малейшего воздушного зазора. Образцы для исследований должны быть обработаны на токарном станке или отшлифованы. Поверхность образца должна быть обработанной до состояния шероховатости не хуже  $Ra = 2$  мкм. После обработки диаметр образца должен составлять не менее 95 % исходного диаметра. Не допускается проведение испытаний на необработанных или зачищенных прутках.

После ультразвукового испытания в иммерсионной ванне, выявленные включения, превышающие допустимые, отмечаются на поверхности проб (рис. 2). Выявление неметаллических включений с целью дальнейшего их исследования проводится путем последовательного снятия слоя металла на плоскошлифовальном станке с шагом 0,5 мм, начиная от точек, отмеченных на поверхности пробы.



Рис. 2. Внешний вид проб после исследования на ультразвуковой установке UTS-750

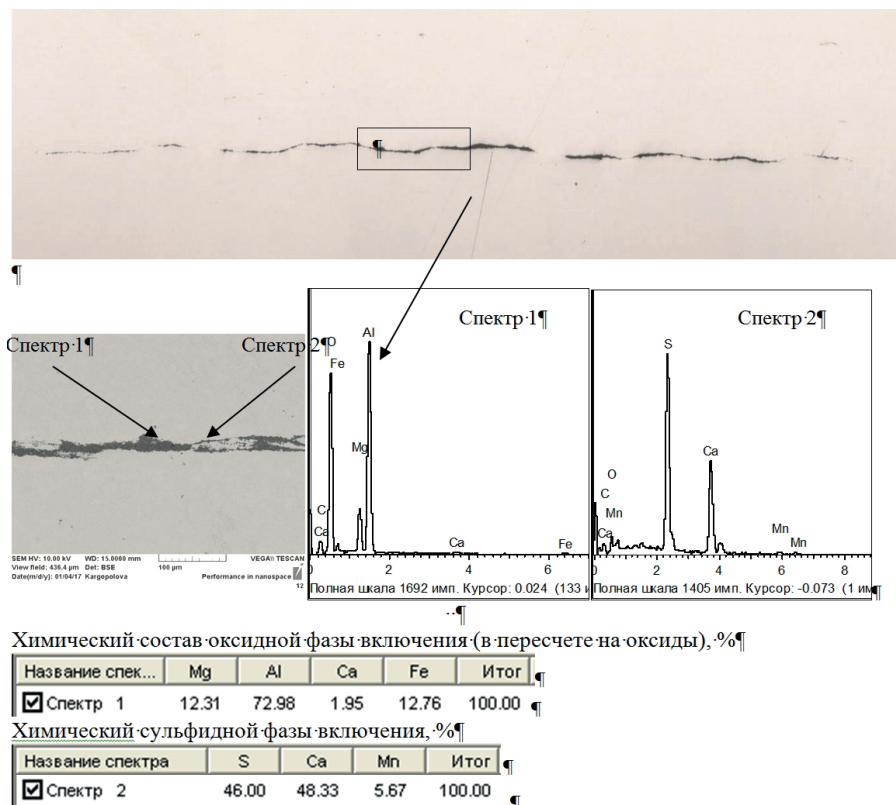


Рис. 3. Микровключение, выявленное после исследования пробы на ультразвуковой установке UTS-750

### Макроскопический метод. Метод «синего излома»

Для определения степени загрязненности металла макровключениями в металлографических лабораториях БМЗ используются макроскопические методы, в рамках которых неметаллические включения видны невооруженным глазом или с помощью лупы, кратность увеличения которой не превышает  $\times 10$ . При этом учитываются только те включения, длина которых равна 1 мм или больше.

Неметаллические включения, выявленные с помощью макроскопических методов, выглядят как строчки.

Параметрами, характеризующими неметаллические включения, являются их общее количество, а также их длина или толщина. Что касается типа, никаких различий между включениями нет.

Одним из таких методов, является метод «синего излома», основанный на определении общего количества и распределения неметаллических включений, видимых на поверхности продольного излома.

Образец для испытания представляет собой срез, толщина (например, от 5 до 20 мм) которого зависит от размеров изделий; при этом толщина измеряется параллельно продольному направлению, а отбор среза проводится посредством горячей или холодной резки. В общем, рекомендуемая толщина составляет 10 мм.

После нормализации, если это требуется, образец для испытаний должен находиться в одном из следующих состояний:

- образец должен быть нагрет горячим воздухом так, чтобы на момент начала испытания металл находился на уровне температуры синеломкости (от 300 до 350 °С), или
- образец должен находиться в изломленном состоянии при температуре охлаж-

дающего воздуха, а два образца должны в последствии нагреваться до температуры синего излома.

Рекомендуется выточить канавку глубиной около 5 мм в центре на одной из главных сторон (рис. 4). Эта канавка нужна для того, чтобы способствовать излому испытуемого образца.

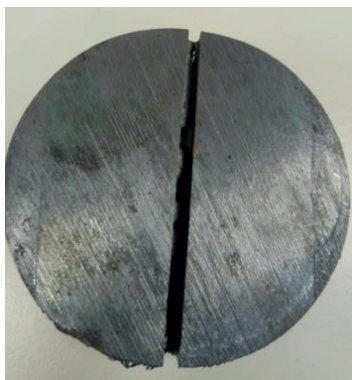


Рис. 4. Образец для испытания методом «синего излома»

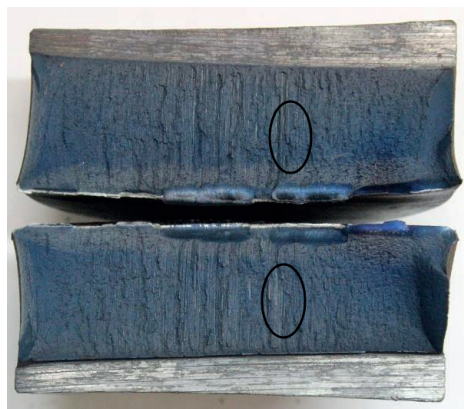


Рис. 5. Макровключения в изломе

Оценка макровключений, имеющих вид серых матовых строчек (рис. 5), проводится в зависимости от требований потребителя.

Например, в соответствии с ISO 3763 проводится количественная (посредством подсчета включений, с учетом их длины и толщины) или качественная (посредством сравнения с серией из 10 контрольных диаграмм) оценка неметаллических включений.

В соответствии с SEP 1584 и ГОСТ Р 56299 рассчитывается коэффициент загрязненности стали, показывающий долю площади излома, занятой неметаллическими включениями и являющийся числовой мерой содержания включений в стали.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Повышение требований к качеству готовой продукции является постоянным стимулом совершенствования инструментов и методов оценки неметаллических включений в стали.

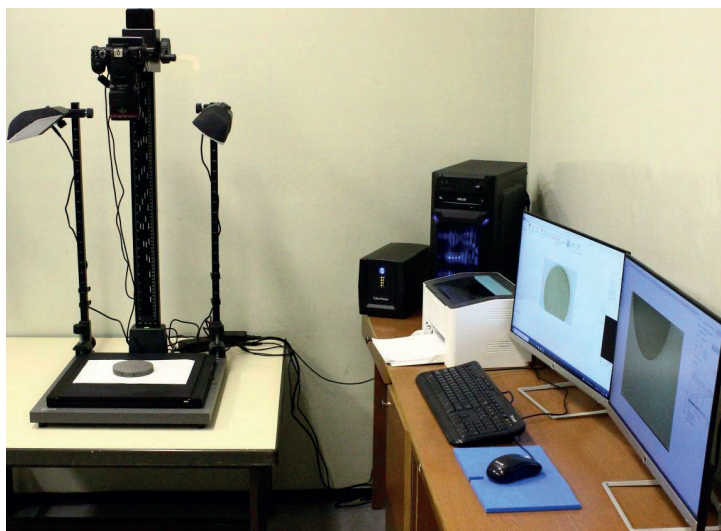


Рис. 6. Внешний вид комплекса программно-аппаратного анализа структуры поверхности твердых тел Thixomet

Так, в лаборатории металловедения БМЗ для оценки макровключений применяется система автоматического анализа изображений Thixomet MACRO (рис. 6), которая позволяет в автоматическом режиме провести оценку загрязненности стали неметаллическими включениями с выдачей отчета.

Весь цикл измерений включает следующие действия: визуальный поиск участка излома, загрязненного неметаллическими макровключениями, изготовление панорамы участка излома с наибольшим баллом загрязненности, найденным при

визуальном поиске, расчет границ включений (рис. 7) и подсчет их количества, измерение площади излома, обработку полученных данных и генерирование отчета [6].

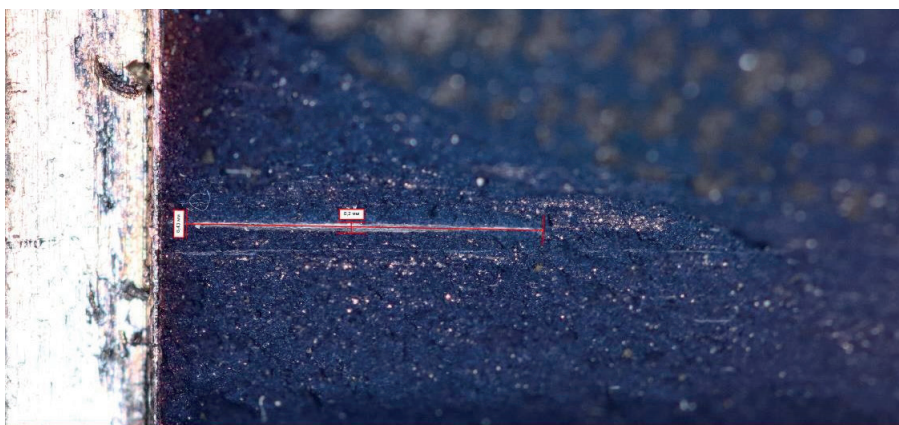


Рис. 7. Макровключение в «синем изломе»

SEP 1584 Испытание на синеломкость для определения макроскопических неметаллических включений в стали

Тип стали:   
 № плавки:   
 Номер партии:   
 Размер образца:  
 Сечение, мм<sup>2</sup>:   
 Степень деформации:   
 Температура разрыва, °С:

ОТЧЁТ

Марка стали:   
 № заказа:   
 Заказчик:   
 Толщина, мм:   
 Условия термической обработки:   
 Температура посевника, °С:

Результаты анализа:

| Образец                              | Метод оценки: |   |   |   |   |   |   |   |   | С |      |
|--------------------------------------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|------|
|                                      | Балл          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |
|                                      | 0             | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |      |
| 1                                    | -             | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - |      |
| Метод оценки:                        |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |      |
| Сумма длин всех включений, мм:       |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 4,54 |
| Суммарная площадь, мм <sup>2</sup> : |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 2000 |
| Показатель загрязненности:           |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 2,27 |

Анализ выполнил оператор

подпись

Рис. 8. Отчёт по оценке загрязненности стали макровключениями

Следует отметить, что отчёт формируется таким образом, что результат выдается одновременно для разных методов (максимальный балл, суммарная длина и площадь всех включений, подсчет коэффициента загрязненности), что существенно сокращает время испытаний и снижает влияние «человеческого фактора».

**Выводы:** Использование автоматизированных методов металлографического контроля позволяет снизить эффект «человеческого фактора», возникающего при визуальном сравнении структуры металла с эталонными шкалами, а также повысить точность измерений.

Панорамные методы исследования структуры материалов являются безальтернативным будущим современной металлографии и позволяют гармонизировать старые ГОСТы, основанные на стандартных шкалах, и современные нормы западных стран, основанные на автоматизированных методах анализа изображений.

В настоящее время программное обеспечение для оценки макровключений проходит апробацию в лаборатории металловедения с целью последующего использования в исследовании металлопродукции [7].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалева, А. А. Специальные стали и сплавы / А. А. Ковалева. – Сибирский федеральный университет : Красноярск. – 2007.– 232 с.
2. Кудрин, В. А. Внепечная обработка чугуна и стали / В. А. Кудрин. – М. : Металлургия, 1992. – 336 с.

3. Виноград, М. И. Включения в стали и ее свойства / М. И. Виноград. – Металлургиздат, 1963. – 252 с.
4. Дефекты стали. Справочник / С. М. Новокшенова и [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1984. – 200 с.
5. Бельченко, Г. И. Неметаллические включения и качество стали / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – К. : Техніка, 1980. – 167 с.
6. Разработка методики количественной оценки загрязненности низколегированных трубных сталей неметаллическими включениями с помощью автоматического анализа изображений / А. А. Казаков [и др.] // Черные металлы. – 2007. – № 7–8. – С. 31–37.
7. Перспективные материалы : учебное пособие / В. Н. Лясников [и др.]; под ред. Д. Л. Мерсона. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. – 422 с.

## REFERENCES

1. Kovaleva, A. A. Special steels and alloys / A. A. Kovaleva. – Siberian Federal University : Krasnoyarsk, 2007. – 232 p. (in Russian)
2. Kudrin, V. A. Out-of-furnace treatment of iron and steel / V. A. Kudrin. – М. : Metallurgy, 1992. – 336 p. (in Russian)
3. Vinograd, M. I. Inclusions in steel and its properties / M. I. Vinograd. – Metallurgizdat, 1963. – 252 p. (in Russian)
4. Steel defects / S. M. Novokshchenova [et al.]. – Moscow : Metallurgy, 1984. – 200 p. (in Russian)
5. Belchenko G. I. Non-metallic inclusions and steel quality / G. I. Belchenko, S. I. Gubenko. – К. : Technique, 1980. – 167 p. (in Russian)
6. Development of method for quantitative evaluation of contamination of low-alloyed pipe steel grades with non-metallic inclusions using automatic image analysis / A. A. Kazakov [et al.] // Ferrous metals. – 2007. – № 7–8. – Pp. 31–37. (in Russian)
7. Perspective materials : Tutorial / V. N. Lyasnikov [et al.]; Edition under rev. of D. L. Merson. – Tolyatti : TSU Publishing House, 2013. – 422 p. (in Russian)

*Статья поступила в редакцию 15.05.2023 г*