

УДК 621.785; 621.941.1

## **О ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТРЕБОВАНИЯХ К ПРУТКАМ ИЗ СТАЛИ 10864 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ**

**Головкин П.А., к.т.н.**

АО «Плутон», 105120, Россия, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д.11.

[p.golovkin@pluton.msk.ru](mailto:p.golovkin@pluton.msk.ru); тел.: (495) 730-36-19

### **ON ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR 10864 STEEL RODS FOR MANUFACTURING PARTS OF ELECTROVACUUM DEVICES**

**P.A. Golovkin, Ph.D. in Engineering Science**

Pluton JSC, 105120, Russia, Moscow, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya st.

[p.golovkin@pluton.msk.ru](mailto:p.golovkin@pluton.msk.ru); tel: (495) 730-36-19

#### **Аннотация**

С учётом применения в деталях рабочей зоны электровакуумных приборов, и на основании анализа типичных дефектов материала прутков из стали 10864 вакуумной выплавки, обосновываются дополнительные требования к его качеству, отсутствующие в действующих нормативных документах на поставку указанных прутков.

#### **Abstract**

Taking into account the use of electrovacuum devices in the details of the working area, and on the basis of an analysis of typical defects in the material of bars made of vacuum-melted steel 10864, additional requirements for its quality are substantiated, which are absent in the current regulatory documents for the supply of these bars.

*Ключевые слова: электровакуумные приборы, сталь, прутки, дополнительные требования, дефекты, химический состав, структура, зерно, включения, флокены.*

*Key words: vacuum devices, steel, rods, additional requirements, defects, chemical composition, structure, grain, inclusions, flocks.*

#### **Общие положения**

Нелегированные специальные стали 10864 вакуумного переплава 10864-ВИ (03-ВИ) [1] и 10864-ВД (03-ВД) [2] является распространённым материалом в конструкции электровакуумных приборов, и должна обеспечивать не только паспортные магнитные характеристики, но и вакуумную плотность, механическую прочность, и малый уровень остаточного газовыделения. В противном случае работа электровакуумного прибора может быть нарушена [3].

Производственная практика АО «Плутон» и анализ нормативных документов на эту сталь показывает в них множество упущений в части требований к обеспечивающим указанным свойства характеристикам. Так, ТУ [1, 2] оговаривают проверку макроструктуры стали на отсутствие усадочной раковины и рыхлости, а также пузырей, трещин, расслоений, шлаковых включений и флокенов, только без применения увеличительных приборов. В ТУ [1, 2] присутствует также ссылка на ГОСТ 10243 [4] в части недопустимости дефектов, превышающих 1 балл по классификации этого стандарта, но при этом перечень контролируемых дефектов сокращён до приведённого выше. Для справки: в изготавливаемой в соответствии с ГОСТ 11036 [5] сортовой нелегированной электротехнической стали открытой плавки, заявленной как материал для применения в магнитных цепях электрических аппаратов и приборов, допускается 2 балл указанных дефектов [4].

Что касается химического состава, то ожидаемо, требования к нему выше для материала вакуумной выплавки [1, 2], чем для открытой [5]. Однако сопоставление документов на стали группы 10864, и близкую к ним по составу углеродистую сталь обыкновенного качества СтЗпс, поставляемую по ГОСТ 380 [6], показывает, что при изготовлении последней, регламентируется большее количество позиций по примесям, нежели в сталях специального применения. Очень спорное решение.

Химический состав сталей приведён в таблице 1. Из таблицы видно, что только ГОСТ 380 [6] оговаривает предельное содержание в стали СтЗпс никеля, хрома и мышьяка, однако на стали группы 10864 он не распространяется. В то же время, в документах на эти стали об указанных примесях указаний нет, равно как нет указаний на ограничения к содержанию примесей висмута, селена и теллура, а также сурьмы, свинца и олова [7, 8].

Таблица 1.

Химический состав стали марок СтЗпс и 10864, %<sub>масс.</sub> не более.

Стандарт, марка стали	Углерод	Марганец	Кремний	Фосфор	Сера	Медь	Кислород	Азот	Хром	Никель	Мышьяк
ГОСТ 380 СтЗпс	0,14... 0,22	0,40... 0,65	0,17... 0,37	0,050	0,050	0,30	–	0,012	0,35	0,35	0,080
ГОСТ 11036 10864	0,035	0,3	0,3	0,020	0,030	0,3	–	–	–	–	–
ТУ 14-1-896 10864-ВИ	0,025	0,15	0,15	0,010	0,010	0,20	0,004	0,010	–	–	–
ТУ 14-1683 10864-ВД	0,025	0,15	0,15	0,010	0,010	0,20	0,003	0,007	–	–	–

Это тем более странно, что эти вещества, а в особенности их соединения, обладают низкими температурами плавления и высоким уровнем равновесного давления паров в условиях вакуума рабочей зоны приборов [9], составляющем  $10^{-5}$  ат [3]. С учётом того, что отдельные участки стальных деталей в условиях работы приборов могут разогреваться до температуры 200...300 °С, формально качественный материал может оказаться не пригодным для их изготовления. Некоторые свойства присущим сталям примесей приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Некоторые характеристики, свойственные примесям сталям группы 10864

Элемент	Сера	Свинец	Олово	Сурьма	Висмут	Селен	Теллур
Температура плавления, °С	119,3	327,4	231	630,5	327,5	221	722
Температура кипения, °С	444,6	1749	2630	1634	1564	685	990
Температура насыщения пара, °К, при вакууме $10^{-5}$ ат.	271,4	655,6	1015	572,3	543,4	371,8	466,3
Температура насыщения пара при давлении 1 ат., °К	508,3	1418	2119	1195	1185	691,1	889,1

Производственная практика показывает, что следует признавать непригодным для использования в деталях рабочей зоны электровакуумных приборов с некоторыми перечисленными ниже дефектами, которые можно обнаружить как без применения увеличительных приборов на макрошлифах прутков, так и с применением микроскопов с кратностью увеличения  $200\times$ . Среди визуально различимых при макроанализе материала прутков дефектов следует выделить «светлое кольцо» и «светлое (серое) пятно», определение которым даёт ГОСТ 10243 [4]. Пример макроструктуры прутка с выраженным светлым кольцом представлен на рисунке 1.

Одной из причин образования дефекта является разрыв скоростей деформации в процессе горячей прокатки прутка при неправильно выбранных её режимах. Другой причиной образования в прутке области светлого кольца является такой дефект исходного слитка, как ликвационный круг [4], который при недостаточной гомогенизации и проковке может перейти в материал прутка. Опасность дефекта состоит в том, материал в зоне светлого кольца отличается рыхлостью и пониженной вакуумной плотностью, а кроме того, ввиду формируемых при прокатке прутка напряжений растяжения, может содержать слаборастворимые легкоплавкие примеси в количестве, превышающем предельно допустимое по ТУ [1, 2].

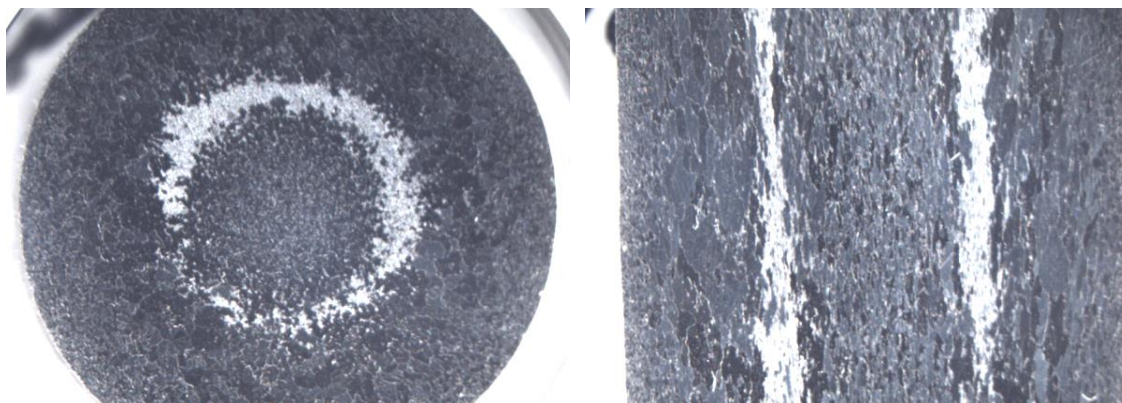


Рис. 1. Светлое кольцо в протравленном шлифе прутка, 4<sup>×</sup>.

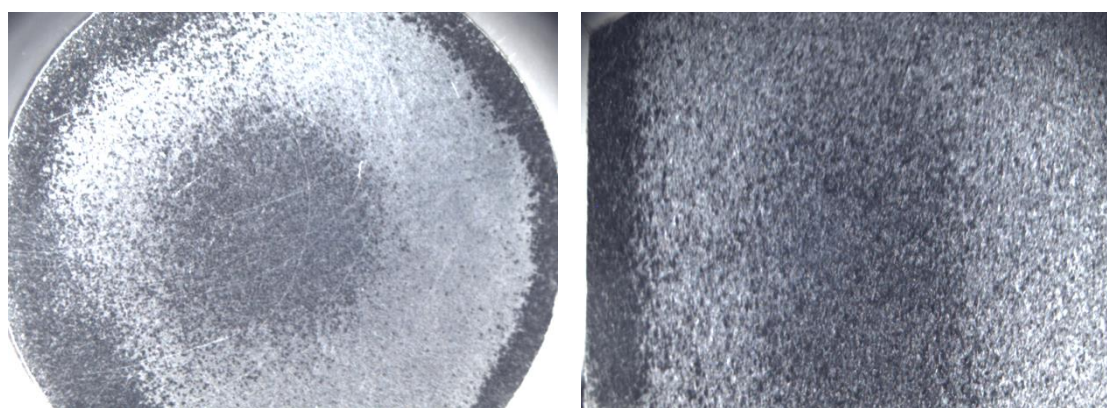


Рис. 2. Светлое (серое) пятно в поперечном кольце в поперечном (слева) и продольном (справа) протравленном шлифе прутка, 4<sup>×</sup>

Дефект типа светлого пятна является разновидностью светлого кольца, и показан на рисунке 2. Причины возникновения дефекта близки к таковым для светлых пятен, усугублённым недостаточным удалением подприбыльной части исходного слитка [4]. Опасность дефекта для качества электровакуумного прибора аналогичная.

Для описания сути дефектов светлое кольцо и светлое пятно на уровне микроструктуры материала необходимо вновь указать на природу их образования – разрыв скоростей деформации ввиду неправильно выбранных обжатиях при прокатке прутка [10], усугубляемые исходной неоднородностью химического состава недостаточно проработанного материала исходного слитка. Тогда формируемые в зоне разрыва скоростей деформации напряжения растяжения вовлекают в зону разрыва скоростей деформации [10] разного рода примеси и способствуют образованию крупнозернистой структуры прутка с заполняемыми примесями микропустотами у тройных стыков зёрен.

Примеры стекловидных включений у тройных стыков зёрен, и межзёренных прослоек малорастворимых легкоплавких примесей, показаны на рисунках 3 и 4. Следует отметить, что малорастворимые легкоплавкие примеси в сталях 10864 электровакуумного передела представлены в основном висмутом, селеном, теллуром, сурьмой и мышьяком, которые, как указано выше, не нашли своего отражения в ГОСТ [5] и ТУ [1, 2] на её изготовление. Таким образом, дефекты типа светлое кольцо и светлое пятно не являются обязательным свидетельством неприемлемого загрязнения материала прутком вредными примесями, но могут его сопровождать.

Стандартное определение такого дефекта, как стекловидные плёночные включения, отсутствует, и описано только в литературе [11]. От неметаллических включений, описываемых ГОСТ 1778 [12], отличаются сложным составом, которые последний никак не классифицирует. Располагаются по границам и у тройных стыков зёрен. Внешне схожи с межзёренными прослойками малорастворимых в железе легкоплавких фаз – селена, теллура, висмута и т.п., а также их соединений.

Следует отметить, что стандартного определения такого дефекта стали, как прослойки малорастворимых легкоплавких примесей по границам зерен, или эвтектические прослойки, также не существует. Тонкие прослойки селена, теллура, висмута и других малорастворимых в железе элементов с низкими температурами плавления, а также их соединений, температуры плавления которых, как правило, ещё ниже, внешне схожи со стекловидными плёночными включениями, но располагаются преимущественно не только у тройных стыков зёрен, но и по их границам.

Важно отметить, что ввиду локального расположения, при проведении химического анализа на содержание вредных примесей, их превышение над установленными предельными нормами часто не подтверждается. Это усугубляет угрозу для работы готовых приборов, поскольку температуры плавления легкоплавких примесей и их соединений сравнимы с температурой нагрева деталей рабочей зоны приборов, и испарение и сублимация примесей могут привести к их выходу из строя.

Однако, легкоплавкие примеси могут быть и более равномерно распределены по сечению прутка, если переходят в материал исходного слитка из тигля, ранее применявшегося для плавки автоматных сталей, где селен добавляется для облегчения их обработки резанием, поскольку ослабляет в материале межзёренные связи [7, 8].

В целом, формируемые при неправильных режимах прокатки прутков зоны разрыва скоростей деформации [10] усугубляют разброс химического состава стали в части, что и проявляется в виде разнотекстурности, как это показано на рисунке 5.

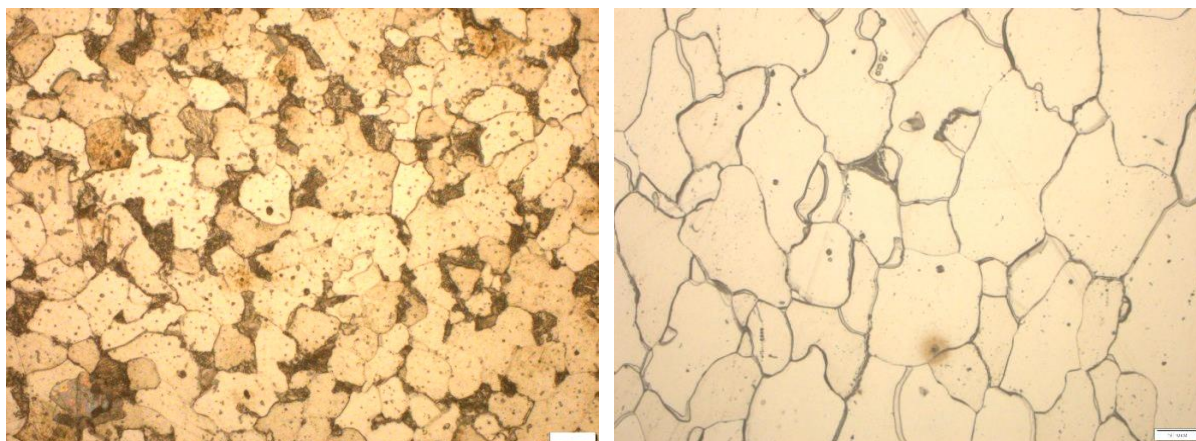


Рис. 3. Множественные (слева) и единичные (справа) стекловидные включения у тройных стыков зёрен в продольном шлифе прутка, 100<sup>×</sup>.

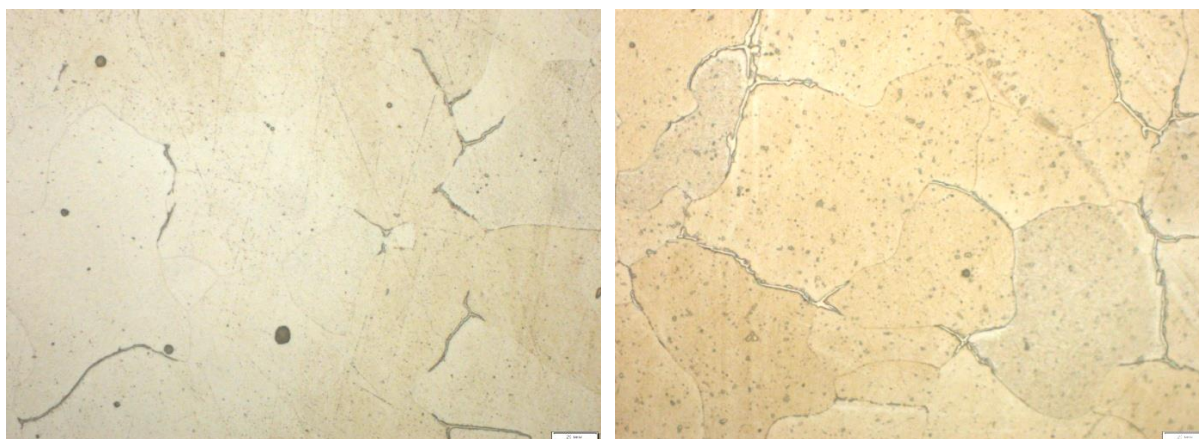


Рис. 4. Прослойки малорастворимых легкоплавких примесей по границам зерен, 200<sup>×</sup>.

Эта разнотернистость и определяет зрительное обнаружение светлых пятен и колец, и потому является верным признаком колебания химического состава материала прутка, однако ни ТУ [1, 2], ни ГОСТ [1] на прутки из стали 10864 как вакуумной, так и открытой выплавки, её не оговаривают. Производственная практика показывает, что для использования в деталях рабочей зоны электровакуумных приборов следует применять сталь с разностью размеров зерна не более, чем на 2 балла согласно ГОСТ 5639 [13], при этом сами размеры зерна не имеют решающего значения.

Отдельно следует остановиться на описании опасности различных неметаллических включений в предназначенных для изготовления деталей рабочей зоны электровакуумных приборов деталей.

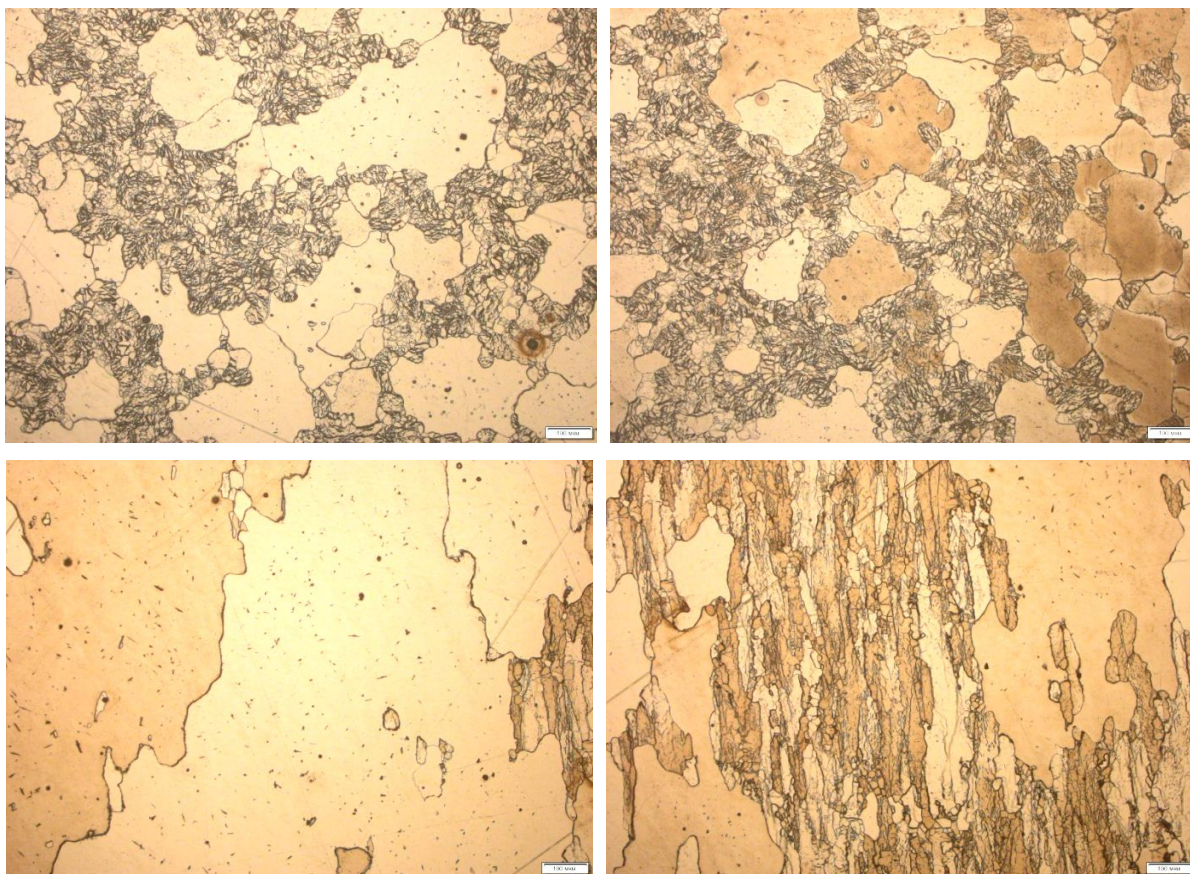


Рис. 5. Разнозернистость в поперечном (вверху) и продольном (внизу) шлифе, 100<sup>×</sup>.

Помимо проверки продольных шлифов материала прутков на отсутствие неметаллических включений по методике ГОСТ 1778 [12], они могут быть обнаружены при анализе поперечных шлифов, как без травления, так и после него. С учётом значительного объёма проверок материала на размер зерна, обнаружение неметаллических включений при исследовании поперечных шлифов позволяет сократить трудоёмкость входного контроля стали, однако не допускается действующими стандартами, на что дополнительно будет указано ниже.

Твёрдые (хрупкие, недеформирующиеся) неметаллические включения, описание и предельное допустимое содержание которых в сталях определяется 1778 [12], не могут быть полностью обрамлены окружающим металлическим материалом. Поэтому, в зависимости от балла загрязнения, сопровождаются одиночными или групповыми дефектами типа флокенов и раковин, определение которым даёт ГОСТ 10243 [4]. Это определяет опасность дефекта с точки зрения чистоты рабочей зоны готовых изделий, даже если природа самих включений не подразумевает их испарения и активной сублимации в пределах рабочих температур электровакуумных приборов [3].

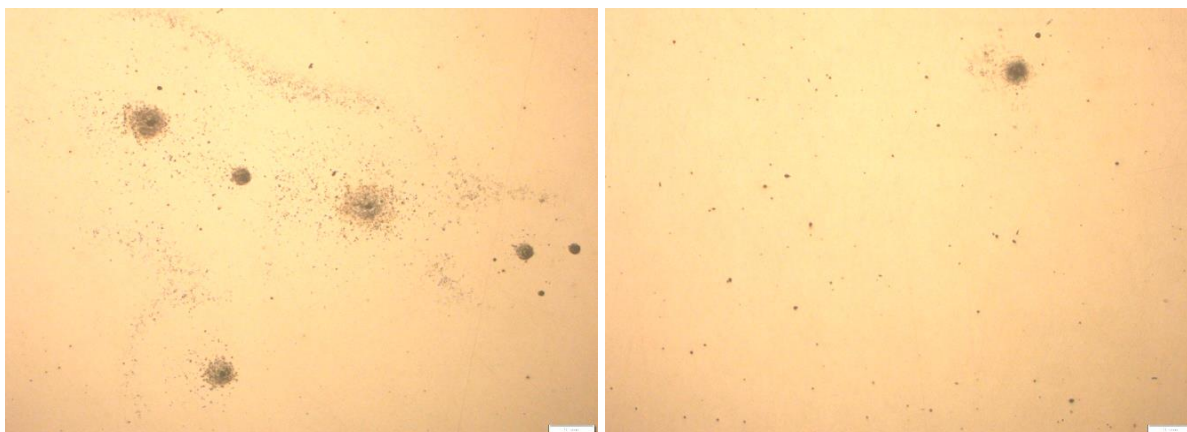


Рис. 6. Пример металлических включений и флоконов в поперечном шлифе прутка, 50<sup>×</sup>.

Касаемо применяемого в статье понятийного аппарата следует указать, что в отличие от ряда металлов и сплавов, для сталей термин «поры» не используются, хотя и имеют место термины «центральная пористость», и «точечная пористость» определяемые ГОСТ 30242 [14]. Взамен термина «пора» используется применяемый для оценки качества макроструктуры стали термин «флокен». При этом утверждённая методика оценки повреждённости микроструктуры стали флоконами отсутствует, и наличие дефектов, обнаружение которых требует применения увеличительных приборов, не рассматривается, в какой бы степени насыщена ими она не была.

В отличие от твёрдых, пластичные неметаллические включения, определение которым также даёт ГОСТ 1778 [12], в сталях обычно плотно включены в матрицу окружающего материала, однако также сопровождаются флоконами, определение которых прописано уже в ГОСТ 10243 [4]. Пример таких включений и флоконов в поперечном не протравленном шлифе стали 10864-ВИ, представлен на рисунке 6.

Некоторые флоконы проявляют себя неожиданным образом: на рисунке 7 видно, как из вскрывшихся флоконов вытекает попавшая туда при приготовления шлифов жидкость, образуя окисленные пятна. Вид множественных флоконов в протравленном продольном шлифе прутка также показан на рисунке 8. Это очень опасный дефект с позиции соблюдения вакуумной чистоты рабочей зоны приборов.

Сложность правоприменения действующих нормативных документов на стали 10864-ВИ и 10864-ВД также состоит в том, что ГОСТ 1778 [12] не позволяет расценивать обнаруженные с применением увеличительных приборов дефекты как существующие. Соответственно, их нельзя предъявлять организациям – поставщикам для возврата непригодного к целевому использованию в составе приборов материала.



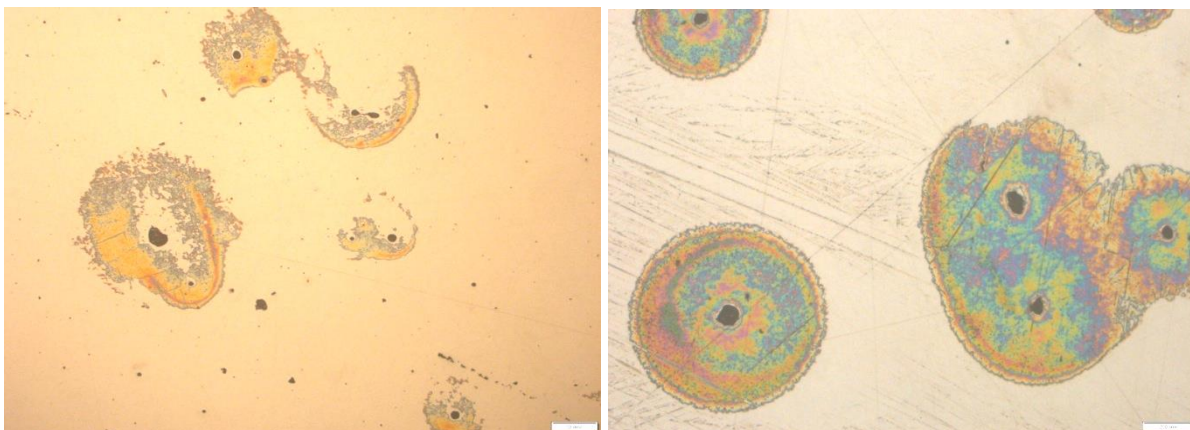


Рис. 7. Поперечный шлиф поражённого порами и флокенами материала прутка.  
Видны окисленные пятна от вытекающего из флокенов травителя, 4<sup>×</sup>.

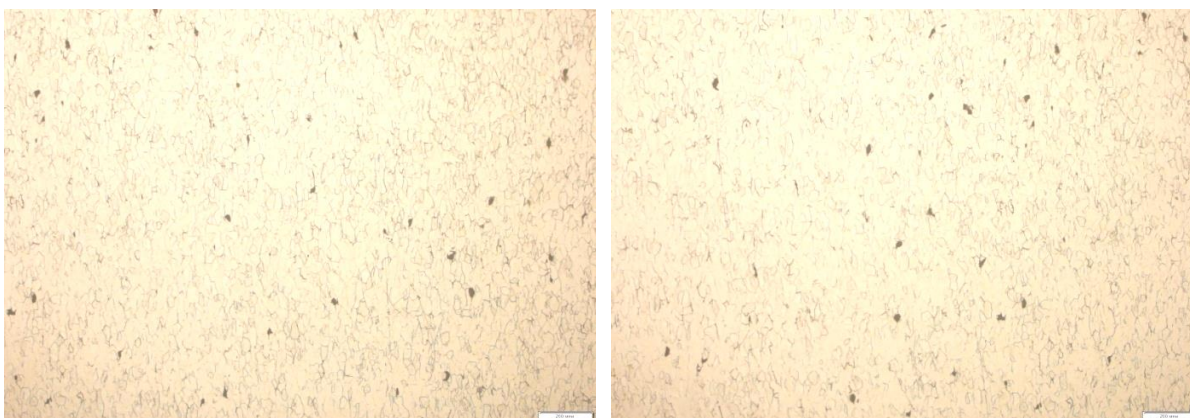


Рис. 8. Множественные флокены в продольном шлифе прутка, 50<sup>×</sup>.

Так, несмотря на недопустимость применения поражённого такими дефектами материала для изготовления деталей рабочей зоны электровакуумных приборов, ТУ [1, 2] рассматривают в качестве дефектов исключительно флокены, обнаруживаемые без применения увеличительных приборов. Это не только позволяет недобросовестным поставщикам предлагать на рынке по сути непригодный для целевого использования товар, но и вносит изрядную долю субъективности в оценку его качества, даже если дефекты визуально различимы, по принципу «не вижу». Дополнительную сложность составляет доказательство того, что обнаруженный объект является именно флокеном, ведь применять для уточнения его природы увеличительные приборы не допускается.

Для разрешения этого обстоятельства, необходимо введение в методики входного контроля материала прутков из сталей группы 10864 применения увеличительных приборов с кратностью до 200<sup>×</sup>. Также следует предусмотреть наряду с контролем макроструктуры контроль микроструктуры материала прутков на продольных или поперечных образцах, приготовленных по методике ГОСТ 5639 [13].

## **Выводы**

1. Несмотря на приведённые в самих названиях ТУ и ГОСТ на прутки из стали марки 10864 открытой и вакуумной выплавки указания на их целевое применение для изготовления деталей электровакуумных приборов, в их содержании имеют место существенные упущения с точки зрения получения необходимых свойств их материала.

2. Требования к химическому составу сталей группы 10864 не учитывают опасности наличия в них примесей таких малорастворимых легкоплавких веществ, как висмут, селен, теллур, сурьма, свинец и олово, а также их соединений, обладающих температурами плавления, сравнимыми с температурой разогрева поверхности деталей рабочей зоны электровакуумных приборов. С учётом высокого уровня равновесного содержания паров и склонности к сублимации этих веществ, такое упущение может привести к загрязнению вакуумной зоны готовых приборов и выходу их из строя, поскольку формально качественный материал прутков может оказаться не пригодным для изготовления деталей рабочей зоны электровакуумных СВЧ-приборов.

3. Наличие в сталях группы 10864 неучтённых примесей может привести к их выделению по границам зёрен и у тройных стыков в виде плёночных прослоек и стрекловидных включений сложного состава соответственно. Эти включения не только понизят прочность стали, но и ухудшат её вакуумную плотность, а также – будут способствовать испарению и сублимации входящих в их состав легкоплавких веществ и их соединений в вакуумную зону готовых приборов, поскольку температуры разогрева материала обращённой к ней поверхности деталей могут быть сравнимы с температурами их плавления. Повышенный уровень равновесного давления паров в условиях вакуума рабочей зоны приборов усугубляет эту проблему.

4. Характер расположения включений и примесей по сечению горячекатаных прутков показывает, что их наибольшее содержание имеет место в местах так называемых светлых кругов и светлых пятен, определяемых в качестве дефектов ГОСТ 10243, но не рассматриваемых в качестве таковых ТУ и ГОСТ на стали группы 10864.

Это значит, что с учётом применения, светлые круги и светлые пятна должны быть признаны в сталях группы 10864, предназначенных для изготовления деталей рабочей зоны электровакуумных приборов, браковочным признаком.

5. С учётом того, что материал областей расположения светлых кругов и светлых пятен в сечении горячекатаных прутков из сталей группы 10864 отличается своей разнотернистостью, она также должна быть признана браковочным признаком при разности размеров зерна более 2 баллов по ГОСТ 5639. При этом физический размер зерна в материале прутка не имеет решающего значения.

6. Ввиду значительного объёма проверок материала на размер зерна и другие характеристики, в рамках взаимодействия с организациями – поставщиками, необходимо признать возможность обнаружения неметаллических включений в материале в процессе металлографических исследований, не описанных методиками ГОСТ 1778, но присутствующими в ГОСТ 5639.

7. Поскольку, даже визуальное обнаружение подобных дефектов не позволяет классифицировать их безусловно однозначным образом и отличать от не имеющих отношения к дефектам объектов, что существенно затрудняет процедуру забраковки непригодного для целевого назначения материала, и возврата его поставщикам. Для обнаружения флокенов и других дефектов, при проверке материала прутков их сталей группы 10864 должна быть предусмотрена возможность применения увеличительных приборов с увеличением до  $200\times$ , поскольку её отсутствие не позволяет расценивать обнаруженные таким образом дефекты как физически существующие.

#### **Библиографический список**

1. ТУ 14-1-896-74 «Прутки горячекатаные и кованые из нелегированной специальной стали марки 10864 (03-ВИ). Технические условия»;
2. ТУ 14-1-1683-2005 «Прутки из нелегированной специальной стали марки 10864-ВД (03-ВД). Технические условия»;
3. В.Ф. Коваленко / Теплофизические процессы и электровакуумные приборы / – М.: Советское радио, 1975. -216 с.
4. ГОСТ 10243-75 Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры / –М.: Издательство стандартов, 1975. -48 с.; ил.
5. ГОСТ 11036-75 Сталь сортовая электротехническая нелегированная. –М.: Издательство стандартов, 1975. -5 с.; ил.
6. ГОСТ 380-2005 Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки / –М.: Стандартинформ, 2009. -13 с.; изм.
7. А.В. Рябов, Д.Я. Поволоцкий, В.В. Рябов, др. / Влияние технологии легирования автоматной стали на усвоение висмута / –М.: МИСиС, Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. Номер 3, 2004. –С. 3...5.
8. Заславский А.Я. / Современные автоматные стали. Состав, включения, свойства / М-во образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Южно-Уральский гос. ун-т. / –Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2005. -205 с.
9. Физические величины. Справочник. / Коллектив авторов по ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова / –М.: Энергоатомиздат, 1991, -1231 с.; ил.

10. М.Я. Дзугутов / Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением / изд. 2-е / –М.: «Металлургия», 1974. -280 с.

11. М.И. Виноградова, Г.П. Громова. Влияние включений на пластичность стали при высоких температурах / Новые методы испытаний металлов. Металлографические исследования и механические испытания металлов / Сборник трудов ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина, вып. 32, часть 2 / –М.: «Металлургиздат», 1963. -208 с., прил.; С. 5...21.

12. ГОСТ 1778-70 Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений / –М.: Стандартинформ, 2011. -32 с.; изм.

13. ГОСТ 5639 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна / –М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. -20 с.; ил., изм.

14. ГОСТ 30242-97 Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определение / –М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. -11 с.