

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 669.18; 621.385

Головкин П.А.

## О ПРИМЕСИ ВИСМУТА В ПРУТКАХ ИЗ СТАЛИ 10864

**Аннотация.** На примере разрушения прутков из стали вакуумной плавки с установленным значением коэрцитивной силы 10864 разбираются требования технических условий (ТУ), определяющих их свойства и химический состав. Раскрывается один из механизмов попадания висмута в электротехническую сталь вакуумной плавки.

Показано, что требования ТУ на поставку стали 10864 вакуумного перепада не содержат требований к предельно-му содержанию в ней ряда примесей, в частности висмута. А это значит, что при проверке химического состава материала прутков с взятием торцевых проб в соответствии с ГОСТ 7565 такие примеси могут быть не выявлены просто потому, что на их содержание в соответствии с ТУ его не проверяют.

Также указано, что требования ТУ и ссылочных документов не позволяют предъявлять поставщику материал с прослойками висмута, если они обнаружены с применением увеличительных приборов, и ещё не привели к образованию трещин, что приводит к необходимости внесения дополнительных требований к химическому составу и структуре материала прутков из стали 10864 вакуумной плавки в договоры на их поставку.

**Ключевые слова:** сталь, прутки, детали, электровакуумные приборы, температура, примеси, висмут, проверка макроплотности

**Общие положения.****Целевые и нормативные требования к стали 10864**

Электротехнические стали вакуумного перепада с установленным значением коэрцитивной силы 10864-ВИ (03-ВИ) по ТУ 14-1-896 [1] и 10864-ВД (03-ВД) по ТУ 14-1-1683 [2] являются распространённым материалом электровакуумных приборов (далее – ЭВП) и должны обеспечивать не только заданные магнитные характеристики, но и вакуумную плотность, механическую прочность, и малый уровень остаточного газовыделения, без чего работа ЭВП может быть нарушена [3].

Химический состав стали 10864 согласно ТУ, приведены в табл. 1. Для сравнения в таблице приведены также требования к химическому составу поставляемой по ГОСТ 11036 [4] электротехнической стали открытой плавки, заявленной этим стандартом как материал для применения в магнитных цепях электрических аппаратов и приборов. Некоторые свойства присущих сталям примесей, за исключением серы, не прописанных в указанных документах, по

данным источника [5] приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что материал прутков может иметь самые разные комбинации вредных для работы ЭВП примесей, содержание которых при этом даже не обязан отслеживать их изготовитель. Вообще удивляет то, что указанные документы не устанавливают предельно допустимое содержание даже тех примесей, которые прописаны, например, в ГОСТ 380 [6] на углеродистую сталь обыкновенного качества открытой плавки, из которой изготавливают, в частности, самую распространённую строительную арматуру периодического профиля. Так, ГОСТ 380 указывает для стали марки Ст3 допустимое содержание хрома, никеля и мышьяка, которые для почти идентичной по химическому составу стали 10864 не прописаны.

Касательно деталей рабочей зоны ЭВП необходимо обратить внимание на возможное наличие в стали 10864 таких не указанных в ТУ и ГОСТ 11036 малорастворимых и легкоплавких примесей, как висмут, селен и теллур.

Таблица 1

Химический состав стали 10864, мас. %, не более

Стандарт, марка стали	Углерод	Марганец	Кремний	Фосфор	Сера	Медь	Кислород	Азот
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

Некоторые свойства примесей в нелегированной электротехнической стали

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

Особую опасность представляет примесь висмута. Его отличие от примесей селена и теллура состоит в том, что если температуры кипения селена и теллура много ниже температуры плавления электротехнической стали и лежат примерно в рамках температур её горячей обработки, как это показано в табл. 2, то температура кипения висмута превышает её, составляя 1564°С против 1538°С [5].

Это значит, что в то время, как при отжиге исходного слитка и его дальнейшего передела в прутки, примеси селена и теллура образовали бы браковочные признаки в виде распределённой пористости и флокенов, наличие прослоек висмута не дают основания для возврата материала поставщику.

Здесь следует обратить внимание на ряд упущений в ТУ на сталь 10864 вакуумной плавки в части требований к химической чистоте и структуре материала прутков. Так, ТУ предусматривают проверку макроструктуры прутков на отсутствие усадочной раковины и рыхлости, а также пузырей, трещин, расслоений, шлаковых включений и флокенов, определение которым даёт ГОСТ 10243 [7]. Количество этих дефектов не должно превышать 1 балла, но только по методике указанного документа обнаружены они должны быть без применения увеличительных приборов. А это значит, что ТУ не позволяют расценивать обнаруженные с применением увеличительных приборов дефекты как существующие, и формально их нельзя предъявлять поставщикам для возврата непригодного к использованию в составе ЭВП материала, если только иное отдельно не прописано в договоре на его поставку. К тому же стандартного определения такого дефекта стали, как прослойки малорастворимых легкоплавких примесей, или эвтектические прослойки, в ГОСТ 10243 и других государственных и отраслевых документах в настоящее время нет, а это означает дополнительные сложности в спорах с поставщиками непригодного материала. Ведь тонкие прослойки малорастворимых фаз – это не синоним трещин или расслоений, поскольку трещина по прослойкам может ещё не развиться, а расслоения могут иметь, например, диффузионную природу, как это описано в работе [8], не считая уже того, что по ТУ 14-1-896, ТУ 14-1-1683 и ГОСТ 11036 висмут не указан в перечне недопустимых примесей.

В то же время висмут плавится при температуре 271,4°С [5], что много меньше величины возможного рабочего разогрева частей деталей ЭВП, достигающего 400 °С [9], и тем более температур пайки-сборки узлов ЭВП и его откочки [3], когда испарение и остаточное газовыделение висмута нарушает вакуумную чистоту ЭВП. Более того, по прослойкам висмута могут образоваться трещины в материале стальных деталей, полностью выводя ЭВП из строя. Пример таких трещин в материале полученных из прутка деталей показан на рис. 1. Поэтому, хотя определяющий метод отбора проб для определения химического состава стали по ГОСТ 7565 [10] и предусматривает проверку материала прутков диаметром до 50 мм включительно, с использованием сплошных поперечных образцов, примеси висмута могут быть не обнаружены.

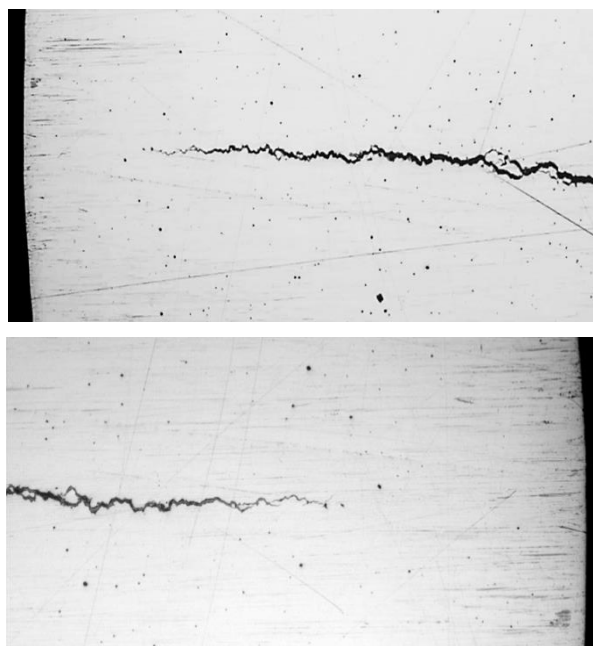


Рис. 1. Трещины в поперечном шлифе прутка без его травления,  $\times 100$

Если требования ТУ на материал не предусматривают его проверки на содержание висмута, то незачем его возможное содержание и проверять. Тем более, что даже будучи обнаруженным, повышенное содержание висмута само по себе формально не будет

считаться браковочным признаком, поскольку не нарушит требований ТУ.

### Возможные причины появления висмута в стали 10864

У не связанных непосредственно с производством материалов специалистов может возникнуть вопрос: откуда может появиться висмут в электротехнической стали вакуумной плавки? Одной из вероятных причин при использовании индукционной вакуумной плавки может быть следующая.

Используемые при изготовлении слитков стали 10864-ВИ обычно сильно загружены выплавкой других самых разных материалов – медных, медноникелевых и прецизионных сплавов, припоев и других, часто чередующихся в порядке, определяемом не технологическими их особенностями, а первоочередностью выполнения поступающих заказов на материал. Поэтому привычны случаи, когда в начале дня в одной и той же печи последовательно выплавляют материалы, где основные компоненты первых являются вредными примесями в последующих. При этом тигель печи, как правило, меняют лишь в связи с его полным физическим износом. Это значит, что этот тигель каждый раз загрязняется составляющими тех сплавов, которые в нём готовят, и механическая зачистка его рабочей поверхности не позволяет полностью удалить проникающие в его глубину вещества, особенно из донной, трудно зачищаемой его части. Для того чтобы уменьшить перенос через тигель частиц компонентов предыдущей дорогостоящей плавки в следующую, обычно применяют «промывку» тигля – плавку в нём менее дорогого материала.

Часто бывает, что таковым и выступает электротехническая сталь, и если перед ней в печи готовили, например, припой, содержащий висмут, то он вполне мог перейти в расплав «промывки», которую нерадивые производители, помня об описанных выше упущениях в ТУ, заявляют как качественный, химически чистый материал.

Работа с поставщиками показывает, что далее события могут развиваться следующим образом. Стремясь понизить производственные издержки, производитель материала стремится снять с полученного слитка минимальный поверхностный слой при зачистке и отрезать минимальную прибыльную и прилегающую к ней часть слитка. Что же касается донной части слитка, то часто её вообще не отделяют от слитка, руководствуясь при этом признаком неразрушения слитка при его проковке или прокатке, обычно даже без проведения гомогенизационного отжига, как это описано в работе [8].

Между тем, как более тяжёлый элемент, висмут, плотность которого при 293 К составляет  $9780 \text{ кг/м}^3$  при плотности железа, равной  $7874 \text{ кг/м}^3$ , располагается преимущественно в нижней части исходного расплава и полученного слитка. Соответственно, за-

грязнённая висмутом часть слитка могла быть относительно небольшой и легко отделена от него, не говоря уже о том, что её можно было бы связать и вывести в шлак добавкой мишметалла по ТУ 48-4-280 [11] или других присадок, как это рекомендовано в работе [8]. Всё это делается (или не делается) для сохранения наибольшей возможной товарной массы материала и минимального расхода времени и энергоносителей. Если же при дальнейшей проковке или прокатке частей слитка происходит их частичное разрушение, от них отрезают только непосредственно явно разрушившуюся часть, остальной же материал подвергается дальнейшему переделу.

Далее предназначенный для изготовления прутков такой материал обычно поступает на поперечно-винтовую прокатку [12] либо ротационную ковку [13], как наиболее универсальные способы получения их небольших партий. И в этом случае, в соответствии с перемещением деформационных фронтов в материале заготовки, примеси повторяют в нём путь полей наибольших растягивающих напряжений. Таким образом и образуются расположенные в меридиональном относительно направлении прокатки/ковки прутков прослойки висмута, причём, повторяя ход полей деформации и напряжений, относительно оси симметрии прутка они расположены веретенообразно, винтом. Важно, что при этом во внешних слоях снаружи прутка может не содержать примесей висмута и, соответственно, признаков разрушения металлического материала.

Именно этот случай и показан на фотографиях рис. 1, где вызванные меридиональной прослойкой висмута трещины тем шире, чем выше образованные неравномерной деформацией при поперечно-винтовой прокатке и ротационной ковке растягивающие напряжения в материале прутка.

На рис. 2 показаны трещины в протравленном поперечном шлифе прутка из стали марки 10864-ВИ. Хорошо видно, что разрушение носит зернограничный характер, и трещины имеют на своей поверхности (показаны стрелками), следы эвтектики. При этом основной материал прутка отличается необходимой вязкостью, о чём свидетельствует наличие перемычек – утяжин в местах прохождения трещин, и не будь в нём примеси висмута, в результате сформированных поперечно-винтовой прокаткой или ротационной ковкой напряжений, он не разрушился бы.

В завершение следует указать, что ввиду практической нереализуемости внесения изменений в определяющих химический состав стали 10864 вакуумной плавки ТУ, для обоснования его возможной отбраковки по признаку наличия примесей висмута, предприятиям-потребителям этого материала следует оговаривать соответствующий браковочный признак в составе дополнительных требований в договорах на его поставку.

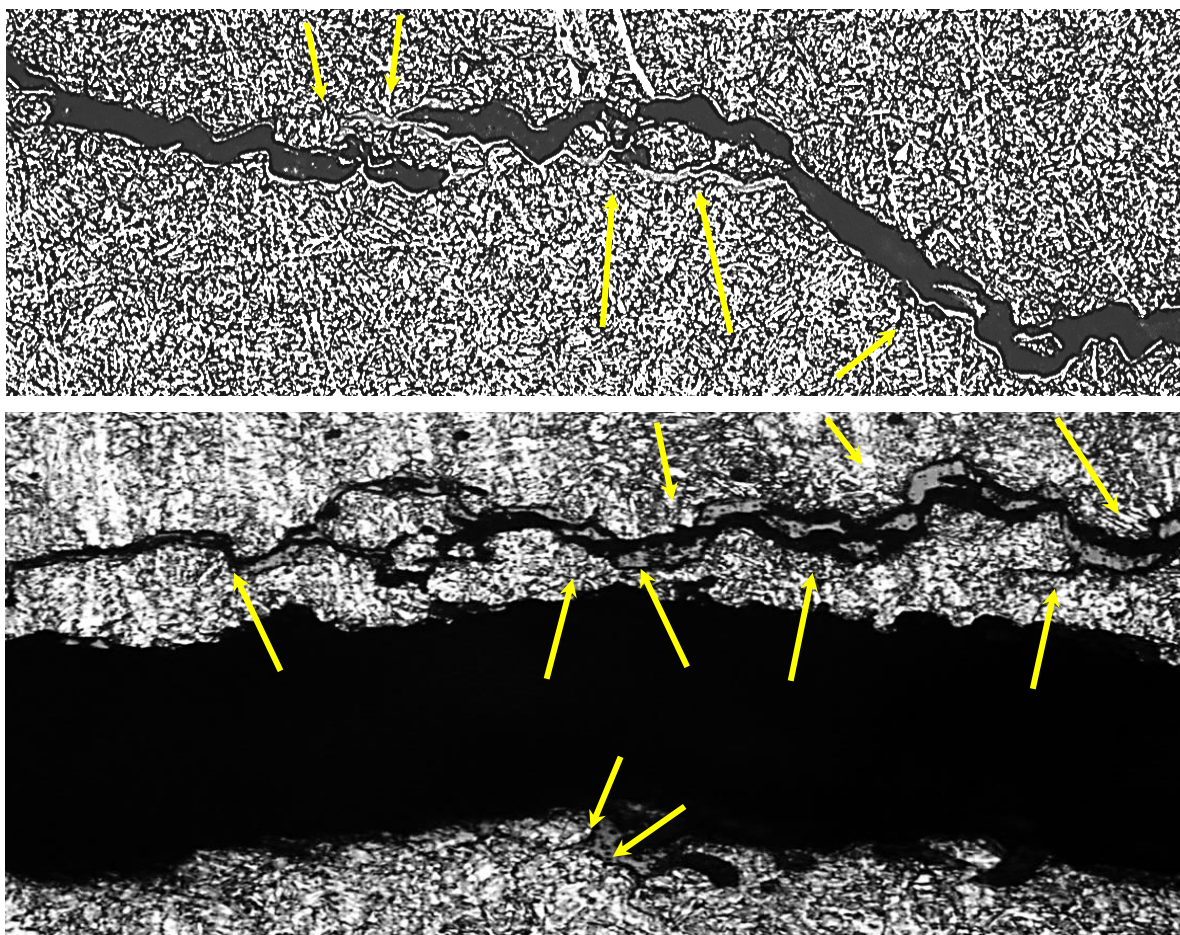


Рис. 2. Поперечный шлиф материала в местах расположения трещин после его травления,  $\times 200$  (вверху) и  $\times 400$  (внизу)

### Выводы

1. В определяющих химический состав стали марки 10864 вакуумной индукционной выплавки и электродугового переплава ТУ 14-1-896 и ТУ 14-1-1683 имеют место существенные для изготовления деталей рабочей зоны ЭВП упущения, именно: отсутствуют требования к предельно допустимому содержанию таких легкоплавких и при этом малорастворимых примесей, как селен, теллур и висмут, представляющих существенную угрозу для вакуумной чистоты рабочей зоны ЭВП. Поэтому даже проведение анализа химического состава материала прутков с соблюдением требований ГОСТ 7565 не может гарантировать его пригодность для изготовления деталей ЭВП, в особенности их рабочей зоны.

2. Действующая методика определяющего методы испытаний и оценки макроструктуры стали ГОСТ 10243 не предусматривает проверку качества материала прутков с применением увеличительных приборов, что может привести к попаданию в детали ЭВП материала с малозаметными прослойками по границам его зёрен висмута, которые могут привести к его дальнейшему разрушению и выходу прибора из строя.

3. Исключение попадания в состав стали 10864 легкоплавких примесей может быть обеспечено соблюдением простой технологической дисциплины при приготовлении исходного расплава и обработке слитков: недопущение использования очищающей тигель «промывки», необходимая очистка расплава добавлением в него мишметалла либо других присадок, удаление в необходимом количестве прибыльной и донной части слитка и т.д.

4. Предприятиям-потребителям стали 10864 следует оговаривать с организациями-поставщиками наличие в ней примеси висмута как браковочный признак с указанием методик его выявления в составе дополнительных требований в договорах на его поставку.

### Список литературы

1. ТУ 14-1-896-74. Прутки горячекатаные и кованные 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. Технология производства электровакуумных приборов: термовакuumная обработка. Эксперимен-

- тальное сопровождение технологического процесса: учебное пособие / под ред. И.П. Ли, Ю.В. Панфилова. М.: Изд-во МГТУ им. М.Э. Баумана, 2022. 119 с.: ил.
4. ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электротехническая нелегированная. М.: Изд-во стандартов, 1975. 5 с.: ил.
  5. Физические величины. Справочник / коллектив авторов по ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.: ил.
  6. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. М.: Стандартинформ, 2009. 13 с.: изм.
  7. ГОСТ 10243-75. Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры. М.: Изд-во стандартов, 1975. 48 с.: ил.
  8. Головкин П.А. О важности проведения подстуживания расплава при индукционной плавке и гомогенизации слитка под прокатку листов и лент из прецизионного сплава 29НК-ВИ // Труды 30-й Всероссийской научн.-техн. конф. с межд. участием «Вакуумная техника и технологии – 2023», Секция «Вакуумные технологии», 20–22 июня 2023 г. С-Пб.: ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева, 2023. С. 72-78.
  9. Коваленко В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. М.: Советское радио, 1975. 216 с.
  10. ГОСТ 7565-81. Чугун, сталь и сплавы. Метод отбора проб для определения химического состава. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.; изм.
  11. ТУ 48-4-280-91. Мишметалл МЦ50ЖЗ и МЦ50Ж6. Технические условия / Иртышский химико-металлургический завод. 56 с.
  12. Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgia, 1983. 269 с.: ил.
  13. Головкин П.А. Получение прутков из сплава НММц 38-2В методом ротационнойковки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 5. С. 221–226.

#### Сведения об авторах

**Головкин Павел Александрович** – кандидат технических наук, АО «Плутон», г. Москва, Россия. E-mail: [p.golovkin@pluton.msk.ru](mailto:p.golovkin@pluton.msk.ru)

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### ON BISMUTH IMPURITY IN COLD-FORMED STEEL BARS WITH THE SET COERCIVITY VALUE "10864"

**Golovkin Pavel A.** – Ph.D. in Engineering Science, Pluton JSC, Moscow, Russia. E-mail: [p.golovkin@pluton.msk.ru](mailto:p.golovkin@pluton.msk.ru);

**Abstract.** On the example of fracture of bars from vacuum melting steel with the established value of coercive force “10864” the requirements of technical specifications defining their properties and chemical composition are analysed. One of the mechanisms of bismuth ingress into vacuum melting electrical steel is revealed. One of the mechanisms of bismuth ingress into vacuum melting electrical steel is revealed.

It is shown that the requirements of technical specifications for the supply of “10864” vacuum melting steel do not contain requirements for the maximum content of a number of impurities, in particular, bismuth. This means that when checking the chemical composition of the material of bars with end samples in accordance with the state standard of the Russian Federation № 7565, such impurities may not be detected simply because their content in accordance with the technical specifications, it is not checked.

It is also stated that the requirements of technical specifications and reference documents do not allow the supplier to present the material with layers of bismuth, if they are detected with the use of magnifying devices, and have not yet led to the formation of cracks, which leads to the need to introduce additional requirements for the chemical composition and structure of the material of bars from steel “10864” vacuum melting in contracts for the supply of material.

**Keywords:** steel, bars, parts, electrovacuum devices, temperature, impurities, bismuth, macrostructure inspection.

---

Ссылка на статью:

Головкин П.А. О примеси висмута в прутках из стали 10864 // Теория и технология металлургического производства. 2023. №4(47). С. 26-30.  
Golovkin P.A. On bismuth impurity in cold-formed steel bars with the set coercivity value "10864". *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2023, vol. 47, no. 4, pp. 26-30.