УДК 669.35; 669.045.5; 669-1. УДК 621.73

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛЕНТ ИЗ НЕМАГНИТНОГО СПЛАВА ТИПА МОНЕЛЬ ВАКУУМНОЙ ВЫПЛАВКИ НММЦ 38-2В

Головкин П.А., к.т.н.

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

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

IMPROVING THE QUALITY OF NON-MAGNETIC ALLOY TAPES MONEL TYPE OF VACUUM MELTING NiCuMn 38-2W (abbreviated in Russian alphabet letters "НММЦ 38-2В")

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

Pluton JSC, 11, Nijnyaya Syromyatnicheskaya, 105120, Moscow, Russian Federation.

Phone: +7 (495) 730-36-19, p.golovkin@pluton.msk.ru

Аннотация

Одним из основных требований к применяемым в процессе изготовления электровакуумных СВЧ- приборов материалов, является их стабильная вакуумная плотность и минимальное остаточное газовыделение в рабочей зоне прибора. Показатели проникновения атмосферных газов и остаточного газовыделения, либо сублимации нежелательных и вредных примесей, должны быть достаточно ничтожны для того, чтобы обеспечить работоспособность приборов в течение не мене чем 15 лет с момента их изготовления и проверки на соответствие техническим требованиям.

На основе анализа природы характерных дефектов ленты из немагнитного сплава типа монель НММЦ 38-2В, с учётом анализа природы и причин появления характерных дефектов, которые могут плохо повлиять на надёжность и качество работы готовых СВЧ-приборов, обосновываются технологические решения, направленные на их исключение на этапах от приготовления исходного расплава до получения заготовки под холодную прокатку.

Обосновываются технологические решения в части раскисления, дегазации, модифицирования исходного расплава, а также термической обработки и ковки слитка в заготовку под прокатку ленты. Следует отдельно заметить, что в настоящее время практически отсутствуют доступные источники, в которых приводились бы результаты комплексных исследований попереходного влияния тех или иных принимаемых технологических решений на качество материала готового полуфабриката, применяемого для изготовления электровакуумных СВЧ-приборов.

Ключевые слова: электровакуумные СВЧ- приборы, надёжность, ресурс, сплав типа монель, рабочая зона прибора, вакуумная плавка, раскисление, дегазация, модифицирование. примеси, деформация слитка, кованая заготовка, отжиг, прокатка, дефекты, микроструктура, вакуумная плотность, остаточное газовыделение материала, сублимация вредных примесей.

Annotation

One of the main requirements for materials used in the manufacturing process of electrovacuum microwave devices is their stable vacuum density and minimal residual gas evolution in the working area of the device. Indicators of penetration of atmospheric gases and residual gas emission, or sublimation of undesirable and harmful impurities, must be negligible enough to ensure the operability of devices for at least 15 years from the date of their manufacture and verification for compliance with technical requirements.

Based on the analysis of the nature of characteristic defects of a tape made of a non-magnetic alloy of the NiCuMn 38-2W type, taking into account the analysis of the nature and causes of the appearance of characteristic defects that can adversely affect the reliability and quality of operation of finished microwave devices, technological solutions are substantiated aimed at eliminating them for stages from the preparation of the initial melt to the preparation of a billet for cold rolling. Technological solutions are substantiated in terms of deoxidation, degassing, modification of the initial melt, as well as heat treatment and forging of an ingot into a billet for strip rolling. It should be noted separately that at present there are practically no available sources that would provide the results of comprehensive studies of the transient influence of certain technological solutions taken on the quality of the material of the finished semi-finished product used for the manufacture of electrovacuum microwave devices.

Key words: electrovacuum microwave devices, reliability, service life, monel-type alloy, working area of the device, vacuum melting, deoxidation, degassing, modification. impurities, ingot deformation, forged billet, annealing, rolling, defects, microstructure, vacuum density, residual outgassing of material, sublimation of harmful impurities.

Общие положения

Электровакуумные приборы типа магнетронов и ламп бегущей волны, далее СВЧ-приборы, являют собой специфическую область радиоэлектронной аппаратуры, и их производство, в том числе, требует применения материалов специальной металлургии. В свою очередь, электровакуумные СВЧ-приборы входят в состав систем управления сложных и дорогостоящих конечных изделий различного назначения, напрямую определяя надёжность и эффективность их работы.

Технологически производство электровакуумных СВЧ- приборов отличается необратимостью сборочных операций, осуществляемых обычно путём сварки либо пайки-сборки, что накладывает особые требования к уровню технологической дисциплины и качеству используемых материалов. Для изготовления деталей рабочей зоны СВЧ- устройств широко используется лента из немагнитного никелемедного сплава вакуумной плавки НММц 38-2В, химический состав которого приведён в таблице 1 [2]. Сплав сочетает необходимую для применения в рабочей зоне СВЧ-приборов жаропрочность с относительно малой газовой проницаемостью и хорошей термической стабильностью ввиду отрицательной температуры точки Кюри [3].

Для гарантированного обеспечения работоспособности в течение 15 лет до начала использования, в рабочей зоне СВЧ-прибора должна обеспечиваться чистота вакуума не хуже $6{,}5\times10^{-5}$ Па [4]. Для этого необходимо обеспечить в применяемых материалах, химическую чистоту в части содержания вредных примесей [2], и вакуумную плотность [4] в части отсутствия пор и расслоений [5, 6]. Определение пор и расслоений как терминов, принимается в соответствии с [7 и 8].

Поскольку температура в рабочей зоне приборов может достигать нескольких сотен ^{0}С, а диффузия в металлическом материале удваивается с ростом температуры на каждые 10…15 ^{0}С [9], химическая чистота материала деталей становится непременным условием минимального остаточного газовыделения [10] и сублимации вредных примесей из металлического материала деталей [9, 11]. При этом важно, что перечень примесей, отрицательно влияющих на надёжность работы готовых приборов, оказывается гораздо шире перечня вредных примесей, определённых требованиями к химическому составу материала. Это обстоятельство предъявляет дополнительные требования к разработке технологии изготовления исходного полуфабриката в виде ленты, о чём применительно различных веществ, будет подробно написано далее.

Таблица 1.

Химический состав сплава НММц 38-2В, % [2]

Никель	Медь	Марганец	Углерод	Кремний	Магний	Цинк
Основа	36…39	1,4…2,2	0,07…0,15	≥0,06	≥0,03	≥0,002
Висмут	Фосфор	Мышьяк	Кислород	Водород	Азот	Σ примесей
≥0,002	≥0,005	≥0,002	≥0,005	≥0,002	≥0,005	≥0,17

Рис. 1. Примеры получаемых из холоднокатаной ленты заготовок и готовых деталей.

С другой стороны, сохранение необходимой глубины вакуума осложняется тем, что из ленты методом вытяжки и последующей механической обработки изготавливают детали с толщиной стенки в минимуме до 0,25…0,3 мм. Примеры таких заготовок и деталей рабочей зоны СВЧ- приборов представлены на рисунке 1.

<u>Требования, предъявляемые к материалу лент из сплава НММц 38-2В</u>

В настоящее время требования к лентам из сплава НММЦ 38-2В определяются Яе0.021.070 ТУ «Лента из сплава марки НММц 38-2В вакуумной плавки. Технические условия» [2]. Необходимо указать, что указанный сплав отсутствует в ГОСТ 5187 «Ленты из мельхиора, нейзильбера и монеля. Технические условия» [12], и потому формализации допустимых и не допустимых дефектов в них не является достаточной. Так, в соответствии с требованиями ТУ [2], контроль на отсутствие внешних дефектов производится в ленте проводится визуально без применения увеличительных приборов.

При этом металлографический, а также, и какой-либо другой контроль материала ленты на отсутствие внутренних дефектов не предусмотрен вовсе. Предусмотренные контроль механических свойств и показателей твёрдости применительно материала, используемого для изготовления деталей вакуумно-плотной рабочей зоны СВЧ- приборов, недостаточно информативны, и не дают гарантии требуемого качества проверяемых лент.

Это значит, что технологический процесс изготовления ленты должен быть пошагово проработан и построен таким образом, чтобы получить заведомо бездефектный её материал. Ниже описываются критические, но не указанные в качестве таковых в ТУ [2] для материала лент дефекты и их примерный вид, а также, приведены образцы качественного материала лент.

Типичные дефекты в материале холоднокатаных лент из сплава НММц 38-2В

Качественная структура материала холоднокатаной не отожжённой ленты толщиной 1,5 мм в продольном и поперечном относительно проката направлении после травления в соответствии с [13] представлена на рисунке 2. Структура аналогичной ленты толщиной 1,2 мм после отжига, в состоянии М, показана на рисунке 3.

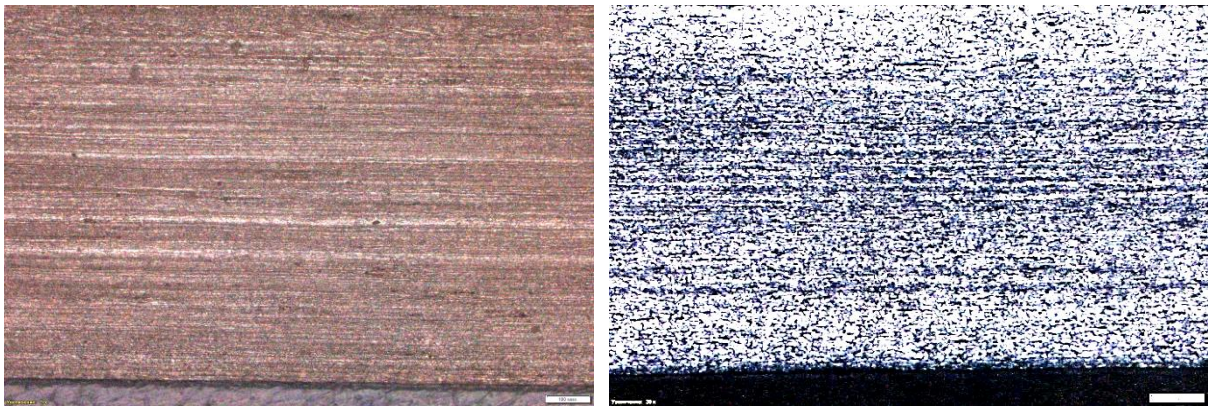

Рис. 2. Качественная структура холоднокатаной не отожжённой ленты в продольном (слева) и поперечном (справа) направлении, 50×.

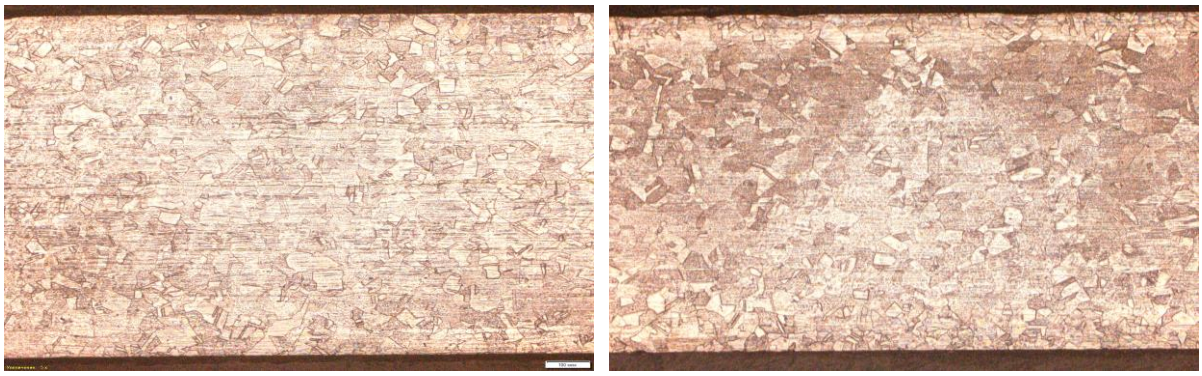

Рис. 3. Качественная структура холоднокатаной отожжённой ленты (состояние М) в продольном (слева) и поперечном (справа) направлении, 50×.

Видно, что и после отжига, в структуре материала лены сохраняются контуры старых границ [14] деформированных зёрен. В обоих случаях структура материала плотная, без признаков пор, расслоений и инородных включений, включая эвтектику.

Основными неприемлемыми дефектами в материале ленты являются скопления пор – группы пор (три или более), расположенных кучно с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из них [7], и равномерно распределённая пористость [15] – дефект в виде мелких полостей, расположенных по объёму материала ленты. Несмотря на схожие названия, эти дефекты имеют различное происхождение.

Скопления пор [7] обычно наблюдаются в центре поперечного сечения ленты, и являются следствием не устранённой центральной пористости слитка [15]. То есть, следствием недостаточной дегазации расплава перед разливкой в изложницу, возможно- недостаточной химической чистотой расплава, и всегда – отказом от ковки слитка перед прокаткой. Использование цилиндрических изложниц заметно усиливает дефектность материала слитка и готовой ленты. И наоборот, разливка в плоские изложницы за счёт усиления фронта кристаллизации расплава, улучшает её качество через уменьшение центральной пористости [15] исходного слитка.

В то же время, равномерно распределённая пористость [7], или пористость газовая [8], обычно является следствием перегрева материала слитка на этапе его горячей прокатки в заготовки под холодную прокатку ленты. Стремясь как можно быстрее осуществить горячую прокатку, исполнители зачастую превышают рекомендованный для сплавов типа монель температурный интервал горячей деформации [3], отчего имеющиеся примеси начинают себя проявлять.

А именно, по мере повышения температуры основного материала, они начинают сначала плавиться, собираясь по границам и у тройных стыков растущих зёрен, а затем и кипеть, превращаясь в газ и многократно увеличиваясь в объёме. Пример равномерно распределённой пористости в материале не отожжённой холоднокатаной ленты приведен на рисунке 4. Температуры плавления и кипения неизбежных в составе сплава НММц 38-2В примесей, максимальное содержание которых частично указано в требованиях на его химический состав (таблица 1), приведены в таблице 2.

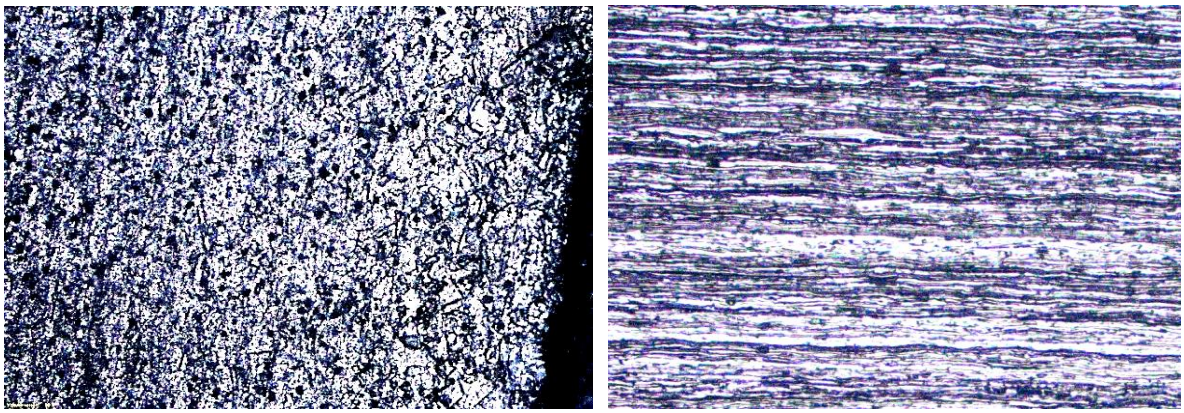

Рис. 4. Равномерно распределённая пористость в поперечном (слева) и продольном (справа) шлифе не отожжённой холоднокатаной ленты толщиной 1 мм, 200$^{\times}$.

Таблица 2.

Температуры плавления и кипения некоторых примесей в сплаве НММц 38-2В

Элемент	Магний	Цинк	Свинец	Висмут	Селен	Теллур
Температура кипения	1090	906,2	1749	1564	685	990
Температура плавления	650	419,6	327,4	327,5	221	722

Важно указать, что некоторые из приведённых в таблице 2 химических веществ образуют между собой ещё более легкоплавкие соединения [16], ослабляющие металлические связи в материале, и тем дополнительно усиливающие локализацию деформационных процессов во время прокатки и местный деформационный разогрев.

Так, температуры плавления эвтектик висмут-свинец BiPb и CuBi, составляющие 124 ^{0}C и 271,44 ^{0}C [17], входят в рамки рабочих температур деталей электровакуумных приборов, местами достигающей 350 ^{0}C и более [10].

То же относится и к вытесняемым на границы зёрен малорастворимым низкоплавким примесям Se и Te, образующих соответственно селенид и теллурид меди, с температурой конгруэнтного плавления теллурида меди CuTe 367 ^{0}C [18], и эвтектики SeTe от 220 до 453 ^{0}C [19]. Содержащиеся в никелемедной основе примеси и их эвтектики могут отличаться крайне малой растворимостью, образуя локальные скопления в зоне пор и границ зёрен. Так, концентрация резко ослабляющего металлические связи на границах зёрен висмута может достигать 20 % от их содержимого при массовом количестве в основном материале менее 3×10^{-4} % [17].

В данном ракурсе важно отметить следующее. В настоящее время на большинстве сохранившихся в РФ предприятий, производящих материалы для специальных отраслей промышленности, в одних и тех же печах плавки различных сплавов зачастую выполняются без смены тигля. Поэтому вредные для монеля примеси вполне могут перейти через тигль в его состав после приготовления сплавов, для которых они не являлись критичными.

Превышая рекомендованный температурный интервал горячей деформации, составляющий 930…830 ^{0}C [5, 6], с учётом существенных обжатий при прокатке, в особенности, цилиндрических слитков, исполнители работ неизбежно вызывают кипение находящихся в материале примесей и не удаляемую при дальнейшей прокатке распределённую газовую пористость. Возникающие поры моментально заполняются малорастворимыми легкоплавкими фазами и различного рода эвтектикой.

Так образуются области с пониженным сопротивлением материала заготовки деформациям, и последние резко локализуются в зонах разрыва деформационных скоростей [20], провоцируя ещё большие деформационный разогрев и уровень растягивающих напряжений. В результате близко расположенные распределённые поры образуют сначала цепочки пор [7], а затем сливаются в расслоения [8]. Пример переходящих в расслоения протяжённых полостей [7] и цепочек пор в продольном шлифе отожжённой холоднокатаной ленты приведён на рисунке 5.

Как дефект, расслоение представляет собой нарушение сплошности металла, ориентированного вдоль направления деформации [8]. С учётом огромной суммарной деформации исходной заготовки при прокатке в одном направлении, расслоение является одним из самых распространённых и самых опасных, с точки зрения сохранения вакуумной плотности материала ленты, дефектом.

Но даже и в случае удержания температуры материала заготовки в рекомендуемых пределах [5, 6], имеющиеся примеси могут спровоцировать появление эвтектических прослоек по границам зёрен, путём объединения образующих надрывы материала ленты в виде хаотично расположенных флокенов [15], как это показано на рисунках 6 и 7. Наиболее явно расслоения проявляются в середине поперечного сечения ленты, где суммарная величина обжатия при прокатке, в особенности цилиндрической заготовки, максимальна, и сопровождается повышенной загрязнённостью материала ленты. При этом расслоение в краевых участках поперечного сечения ленты может быть менее заметно, или даже отсутствовать, проявляя свои зачатки в виде сконцентрированных старых границ [14] зёрен.

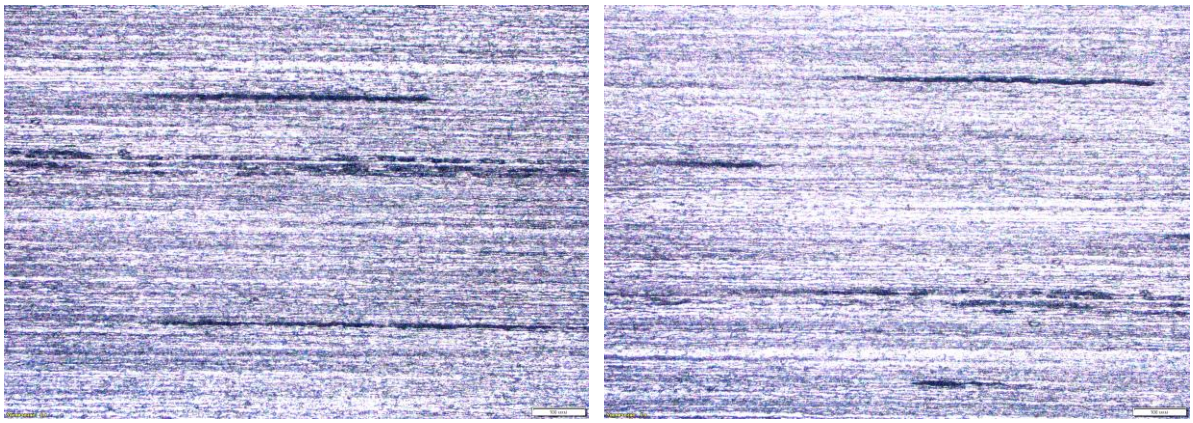

Рис. 5. Переходящие в расслоения протяжённые газовые поры на продольном шлифе отожжённой холоднокатаной ленты толщиной 1 мм после травления, 100×.

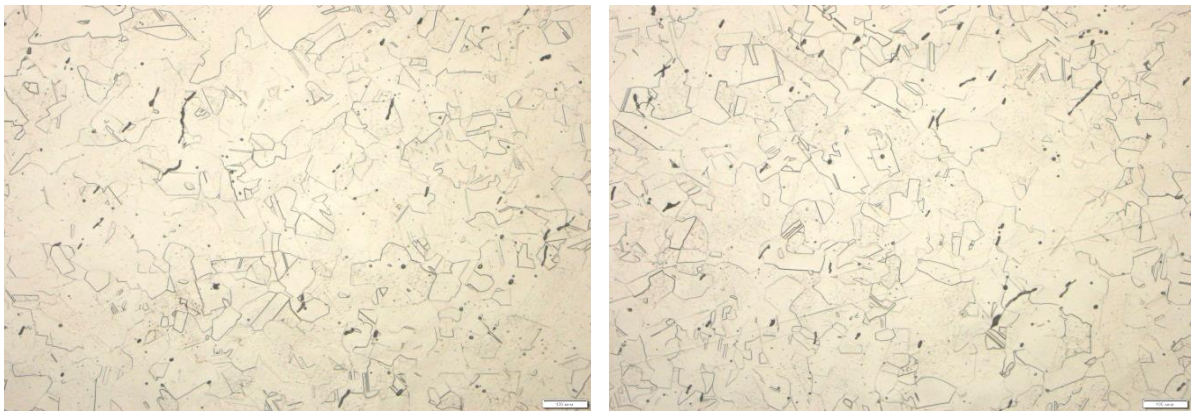

Рис. 6. Эвтектика флокенов в поперечном шлифе перегретого материала ленты, 100×.

Контроль материала на отсутствие расслоений целесообразно производить на непротравленных шлифах. Примеры расслоений в не протравленном продольном шлифе ленты приведены на рисунке 8. Понятно, что расслоение тем более развито и явно, чем большая температура имела место в очаге локализованных сдвиговых деформаций [6, 20], и чем более загрязнён примесями был материал исходного слитка [5, 6]. Поэтому в случае перегрева материала заготовки, даже малое количество слабо растворимых в никелемедной основе сплава примесей висмута, селена, теллура и их соединений, могут стать критичными для качества ленты.

Выводя за рамки статьи другие типичные дефекты, и в первую очередь водородную хрупкость, далее можно приступить к обоснованию технологических рекомендаций для повышения качества материала лент из сплава НММц 38-2В.

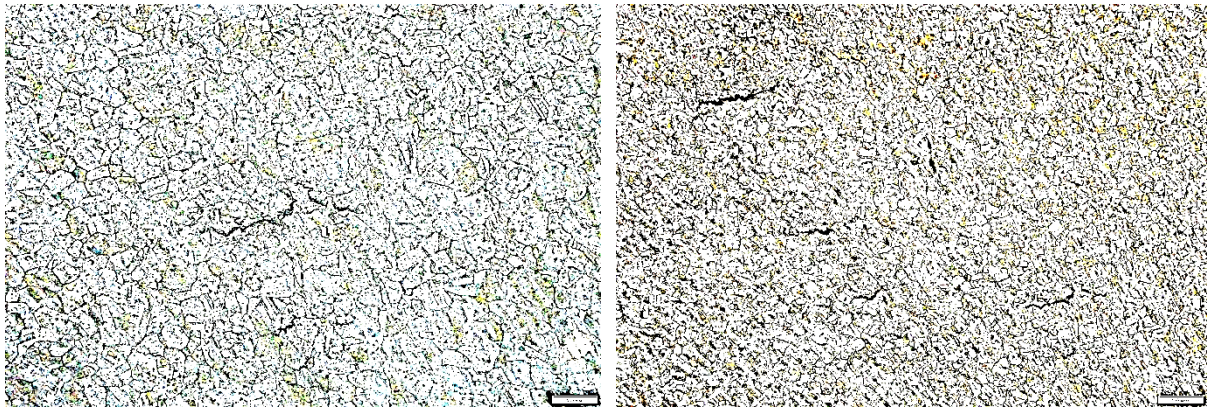

Рис. 7. Флокены в поперечном шлифе перегретого материала ленты, сформированные на базе скоплений эвтектических фаз, представленных на рисунке 5, 100$^{\times}$.

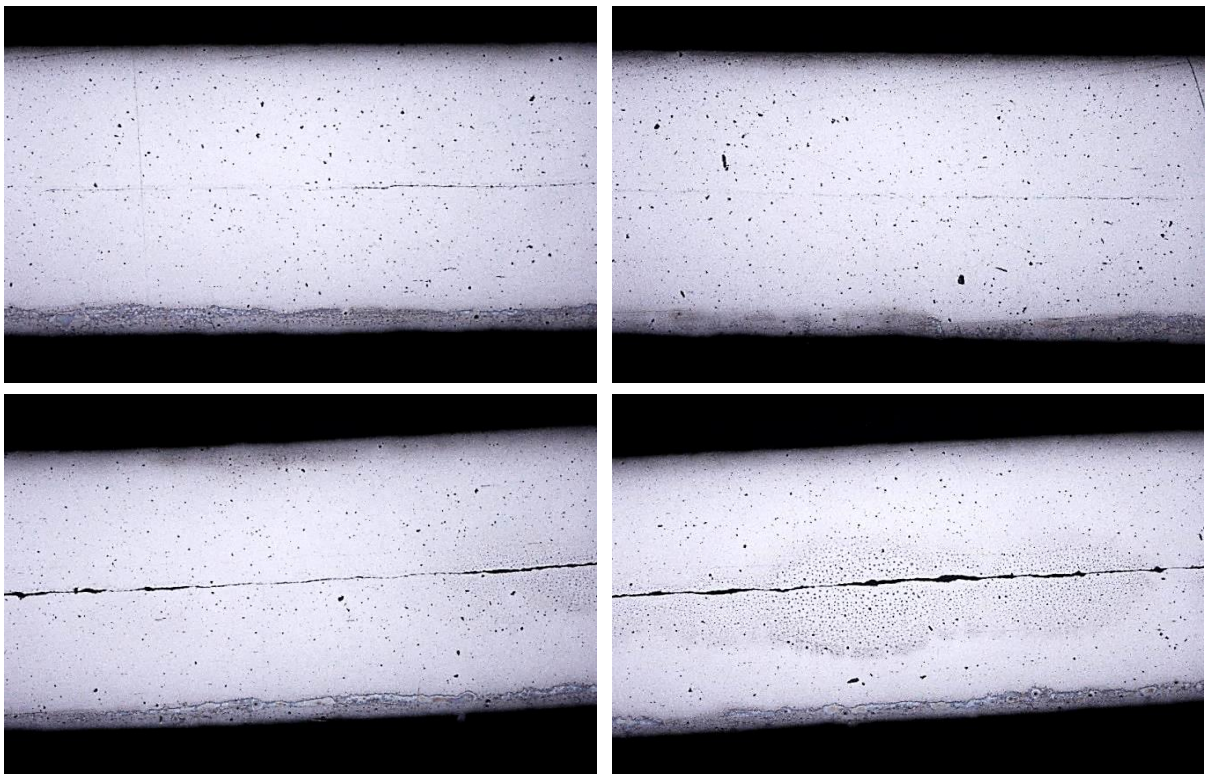

Рис. 8. Расслоения на продольном шлифе ленты толщиной 0,7 мм без травления, 50$^{\times}$. Образцы с краёв поперечного сечения ленты (вверху) и из её середины (внизу).

<u>Рекомендуемые технологические решения для приготовления слитка.</u>

Известно, что даже при использовании закрытой индукционной плавки с глубиной вакуума не хуже 10^{-4} Па [21], как это предусмотрено для приготовления расплава будущего слитка, для недопущения образования газовых пор в процессе падения растворимости [22] при кристаллизации, расплав должен быть подвергнут дегазации, включая раскисление и подстуживание [7].

Вводимый в расплав в количестве 0,07…0,15 % [2] от массы расплава углерод частично связывает и выводит в всплывающий шлак растворённые в расплаве газы и примеси, уменьшая риск развития в слитке газовой пористости. Добавка 0,015…0,02 % от массы расплава [5, 6] модификаторов первого рода в виде смеси на основе лантана и цезия, известной как мишметалл, активизирует появление центров кристаллизации металлического материала при его заливке в изложницу, уменьшая ликвационную химическую неоднородность слитка и его пористость.

В качестве дополнительных раскислителей, и при этом эффективных модификаторов второго рода [23, 24], могут быть применены церий, бор или цирконий в количестве 0,01…0,02 % от массы расплава, которые целесообразно вводить в расплав несколько позже мишметалла. Так, даже в количестве 0,01 $\%_{масс.}$ добавка церия эффективно связывает легкоплавкие примеси висмута, свинца, сурьмы, и другие, в виде тугоплавких соединений CePb, Ce_2Pb, $BiCe_3$, BiCe и других [24], имеющих температуру плавления, с запасом превышающую рабочие температуры деталей из сплава монель электровакуумных приборов [10].

При этом для сокращения испарения легирующих компонентов [23] и ограничения формирования нежелательных примесных фаз [22], перегрев расплава должен быть минимальным [9]. В противном случае развитая газовая пористость не сможет быть залечена при последующем переделе материала слитка. Последовательное введение раскислителя, а затем и модификаторов сначала первого, а затем второго рода качественно очищают границы зёрен от хрупких и легкоплавких примесей, улучшая пластичность и вакуумную плотность материала будущей ленты.

Для дополнительного вытеснения из расплава свободно растворённых и связанных раскислителями и модификаторами в виде шлака газов и других примесей, после раскисления и перед разливкой, следует производить его подстуживание, визуально контролируемое через смотровое окно печи, и считающееся достаточным, когда от трети до половины диаметра тигля покроется застывшей корочкой [9].

В качестве простого и эффективного технологического решения, уменьшающего ликвационную и структурную неоднородность материала слитка, следует указать на обеспечение широкого фронта кристаллизации расплава, чего можно добиться путём использования плоских изложниц прямоугольного профиля [5]. И конечно, необходимо обращать внимание на своевременную чистку и смену тиглей, а так же их промежуточную «промывку» нейтральным расплавом для недопущения перехода через материал тигля нежелательных примесей.

Также важно отметить такой результат воздействия модификаторов на материал слитка и будущей готовой ленты, как измельчение зерна металлического материала путём создания множества новых центров кристаллизации и рекристаллизации. Известно, что если средние значения самодиффузии в зёрнах металлов по принципу замещения составляют $1 \cdot 10^{-17}$ м^2/с при температуре на 200…500 ^{0}С ниже точки плавления, то для атомов внедрения эти показатели выше в $10^3 \ldots 10^4$ раз [9], а диффузионное перемещение атомов по границам зёрен происходит в 100…1000 раз активнее [14]. Это значит, что измельчение зёрен способствует замедлению диффузионных процессов и связанному с ними остаточному газовыделению [4, 10] и сублимации нежелательных примесей [11].

Рекомендуемые технологические решения обработки слитка перед горячей прокаткой заготовки для холодной прокатки в ленту.

Для обеспечения необходимого качества слитка, безусловно, должны быть проведены такие стандартные операции, как удаление прибыльной и донной части настолько, насколько это необходимо для исключения проникновения в будущую ленту следов усадочной пористости и неметаллических включений. Слиток должен быть очищен от поверхностных дефектов и твёрдой поверхностной корочки. Глубокие дефекты должны быть удалены фрезеровкой или пологой зачисткой с соотношением ширины зачистки к её глубине не менее 6/1, при этом минимальный радиус скругления возникающего при зачистке в теле заготовки паза не должен быть меньше 12 мм.

Далее для уменьшения ликвационной химической неоднородности и снижения до безопасного уровня внутренних напряжений, слиток следует гомогенизировать при температуре 870 ^{0}С в течение 12 часов [3]. Отожжённые цилиндрические слитки должны быть разрезаны на пригодные для дальнейшей проковки заготовки с соотношением диаметра к их высоте не более 2. Плоские слитки с отношением ширины и высоты к толщине более чем 2/1 должны быть разрезаны на 4 пригодные для дальнейшей проковки прямоугольные заготовки. Для исключения образования дефектов типа заковов [8], торцы и грани заготовок должны быть обработаны путём придания им скруглений не менее R10, либо снятия фасок не менее, либо 10×45^0.

Всесторонняя ковка позволяет в нужной мере уравновесить химический состав и получить равномерную мелкозернистую структуру заготовок, которые следует ковать по схеме, известной ка схема № 2 ВИАМ [26]. Ковку заготовок следует начинать относительно слабыми ударами бойка, постепенно усиливая их.

Нагрев заготовок следует осуществлять в электрической печи температуры до не более 930 ^{0}С [5, 6]. Время нагрева заготовок под ковку назначается исходя из её диаметра или наименьшей толщины, но не менее 1 минуты на 1 мм сечения. Продолжительность нахождения заготовок в нагревательной печи в процессе подогрева не должно превышать расчётное время более, чем на 20…30 минут, сообразно размеру заготовок. Длительное нахождение заготовок при высокой температуре может привести к охрупчиванию их материала ввиду выделения нежелательных фаз. Поэтому в случае невозможности соблюдения этого условия заготовки должны быть выгружены из печи и уложены отдельно друг от друга на шамотный пол.

Степень деформации заготовки за ковочный переход должна составлять 60±5 % от её первоначальной высоты. Большая или меньшая деформация может привести соответственно к внешнему, либо внутреннему разрушению заготовки. По мере проковки температуру нагрева (подогрева) заготовок целесообразно понижать на 30…40 ^{0}С за переход, ограничив температуру конца ковки 820…830 ^{0}С, что будет способствовать исключению перегрева материала [5, 6].

Ковка производится с двумя подогревами, время которых рассчитывается исходя из диаметра или наименьшей толщины заготовок, но не менее 0,5 минуты на 1 мм сечения. Если профессиональный уровень кузнеца и его подручного не позволяют произвести ковку заготовок с двумя подогревами, число подогревов может быть увеличено, при этом для необходимой проработки материала заготовки, её относительная деформация на окончательном переход должна быть не менее 50 %.

Максимальная продолжительность непосредственно ковки во время одного технологического перехода следует контролировать исходя из цвета наиболее быстро остывающих углов или торцев заготовки. По мере охлаждения заготовки её материал сильно охрупчивается, поэтому заготовку следует дополнительно подогревать, как это описано выше. Охлаждать поковки следует отдельно друг от друга на шамотном полу. С охлаждённых заготовок должны быть удалены поверхностные дефекты аналогично тому, как это предусмотрено для исходного слитка.

Подготовленные таким образом заготовки могут быть прокатаны после нагрева в электрической печи до температуры не более 930 ^{0}С с необходимым количеством технологических проходов и вспомогательных операций. Предварительный отжиг заготовок перед прокаткой в данном случае не требуется, поскольку гомогенизация слитка уже была проведена. Описание последующих режимов непосредственно холодной прокатки ленты выходят за рамки настоящей статьи.

Рис. 9. Разрушение не отожжённого слитка при попытке его прокатки

Следует обратить внимание на технологическую дисциплину при соблюдении приведённых рекомендаций. Так, отказ от проведения гомогенизации и попытка провести прокатку слитка в сыром состоянии, может привести к его разрушению при первых же проходах прокатки, как это показано на рисунке 9.

Равно, к разрушению слитка может привести попытка его деформации с превышающих рекомендованный интервал температур нагрева и времени выдержки, а так кратно превышающее допустимое, содержание раскислителей и модификаторов, при введении в большом количестве дающих сильный охрупчивающий эффект.

Таким образом, на этапах от приготовления исходного расплава, далее термической обработки и пластической деформации слитка перед прокаткой в ленту, предложены и системно обоснованы технологические решения, обеспечивающие вакуумную плотность и минимальный уровень остаточного газовыделения и сублимации нежелательных примесей с поверхности получаемых из ленты готовых деталей, используемых в рабочей зоне специальных СВЧ- устройств.

Выводы:

1. Особенности конструкции и технологии изготовления электровакуумных СВЧ- приборов предъявляют к ленте из сплава НММц 38-2В комплекс требований, которые не в полной мере отражены в Яе0.021.070 ТУ, единственном действующем документе, определяющем уровень свойств и порядок их проверки для этого материала.

Это обстоятельство, а также общее свойство необратимости сборочных операций в производстве электровакуумных СВЧ- приборов накладывает особый уровень ответственности на разработку и соблюдение технологического процесса изготовления холоднокатаной ленты из сплава НММц 38-2В, начиная с приготовления расплава исходного слитка.

2. Анализ типичных дефектов в материале лент показывает опасность возникновения в их материале пористости и расслоений, причины которых могут быть заложены как на этапе исходного слитка, так и в процессе деформации его материала при горячей прокатки заготовки.

3. Для пресечения образования пористости и расслоений на этапе приготовления слитка следует последовательно производить раскисление расплава углеродом и двойное модифицирование расплава редкоземельными присадками мишметалла на основе лантана и цезия, и далее циркония и церия в пределах 0,01…0,02 % от общей массы расплава. Добавка редкоземельных элементов эффективно связывает находящиеся в расплаве легкоплавкие малорастворимые примеси висмута, свинца, селена и теллура, а так же их соединений.

В процессе приготовления расплава его перегрев должен быть по возможности минимальным. В промежутке между вводом модификаторов и перед разливкой в изложницу должно быть проведено подстуживание расплава для снижения растворимости и вытеснения из него связанных и свободных нежелательных примесей.

4. Для получения более равномерного химического состава, разливку исходного расплава следует производить в плоские прямоугольные изложницы, обеспечивающие наибольший фронт кристаллизации, и тем ограничивающие зонную ликвацию в материале слитка. Ранее введённые в расплав модификаторы при этом выступят в роли дополнительных центров кристаллизации, и тем будут препятствовать развитию микрохимической неоднородности металлического материала.

5. Для дополнительного снижения ликвационной и микрохимической неоднородности материала слитка его необходимо подвергнуть гомогенизации температуре 870 ^{0}С в течение 12 часов. Такая термическая обработка позволит избежать разрушения слитка при его первичной деформации.

6. Дальнейшее повышение однородности материала заготовки под первичную горячую прокатку будет обеспечено в процессе проведения всесторонней ковки заготовок, на которые должен быть нарезан полученный прямоугольный слиток.

Ковка с нагрева до температуры не более 930 ^{0}С позволит избежать кипения остаточных легкоплавких примесей на основе соединений упомянутых выше малорастворимых примесей висмута, свинца, селена и теллура. Таким образом, будет сведена к минимуму опасность возникновения в заготовке ленты газовой пористости на этапе горячей деформации материала заготовки ленты.

7. Достигнутая путём двухступенчатого модифицирования и всесторонней ковкой перед прокаткой минимальная микрохимическая неоднородность измельчённых зёрен далее обеспечит наименьшую скорость диффузии остаточных нежелательных газовых и других примесей по границам зерен материала готовых деталей СВЧ-прибора, полученных из холоднокатаной ленты. Так достигнуты необходимый уровень вакуумной плотности и чистоты вакуума рабочей зоны, а значит, работоспособность и стабильность характеристик, СВЧ- прибора ответственного назначения.

Библиографический список

1. Плутон. 90 лет. Гордимся прошлым, смотрим в будущее / коллектив авторов / –М.: ООО «Пилотаж», 2019. -232 с.

2. Яе0.021.070 ТУ Лента из сплава марки НММц 38-2В вакуумной плавки. Технические условия / –М: п/я 4315, ОЗТМиТС, 1986. -10 с.; изм.

3. А.С. Гладков, В.М. Амосов, Ч.В. Копецкий, др. / Металлы и сплавы для электровакуумных приборов / под об. ред. А.И. Шокина / –М: Энергия, 1969. -600 с.

4. Н.В. Черепнин / Вакуумные свойства материалов для электронных приборов / –М.: Советское радио, 1966. -352 с.

5. Головкин П.А. / Повышение качества прутков из немагнитного сплава типа монель вакуумной выплавки НММц 38-2В / –М.: Сборка в машиностроении, приборостроении. № 4, 2021. С. 151...154.

6. Головкин П.А., Рубахин М.Л., Левин Е.А. / Получение прутков из сплава НММц 38-2В методом ротационной ковки / –М.: Сборка в машиностроении, приборостроении. № 5, 2021. С. 221...226.

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

8. ГОСТ 32597-2013 Медь и медные сплавы. Виды дефектов заготовок и полуфабрикатов / –М.: ФГУП Стандартинформ, 2020. -32 с.; изм.;

9. М.В. Пикунов, А.И. Десипри / Металловедение / Учебное пособие для техникумов цветной металлургии / –М.: Металлургия, 1980. -256 с.

10. В.Ф. Коваленко / Теплофизические процессы и электровакуумные приборы / –М.: Советское радио, 1975. -216 с.

11. С.З. Бокштейн, М.Б. Бронфин / Процесс сублимации и влияние вакуума на механические свойства металлов / –М.: Машиностроение, Научно-техническое общество машиностроительной промышленности, 1973. -34 с.

12. ГОСТ 5187-2003 Ленты из мельхиора, нейзильбера и монеля. Технические условия / –М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. -15 с.

13. ГОСТ 21073.0-75 Металлы цветные. Определение величины зерна. Общие требования / –М.: Издательство стандартов, 2002. -8 с.; изм.

14. Б.С. Бокштейн, Ч.В. Капецкий, Л.С. Швиндлерман / Термодинамика и кинетика границ зёрен в металлах / –М.: Металлургия, 1986. -224 с.

15. ГОСТ 10243-75 Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры / –М.: Издательство стандартов, 1975. -28 с.; илл.

16. Головкин П.А. / Повышение качества деталей из бескислородной меди для электровакуумных приборов СВЧ-диапазона / –М.: Технология машиностроения, 2020, № 5, с. 34…41.

17. Л.С. Ватрушкин, В.Г. Осинцев, А.С. Козырев / Бескислородная медь / –М.: Металлургия, 1982. -192 с.

18. Д.И. Сучков / Медь и её сплавы / –М.: Металлургия, 1966. -248 с.

19. Д.М. Чижиков, В.П. Счастливый / Селен и селениды / –М.: Наука, 1964. -320 с.

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

21. Б.В. Линчевский / Вакуумная индукционная плавка / –М.: Металлургия, 1975. -240 с.

22. Д.Ф. Чернега, О.М. Бялик, Д.Ф. Иванчук, др. / Газы в цветных металлах и сплавах / –М.: Металлургия, 1982. -176 с.

23. М.В. Мальцев / Модифицирование структуры металлов и сплавов / -М.: Металлургия, 1964. -214 с. ил.

24. А.М. Михайлов, Б.В. Бауман, Б.Н. Благов, др. / Литейное производство. Учебник для ВУЗов / изд. 2-е, перераб. и доп. / -М.: Машиностроение, 1987. -256 с. ил.

25. М.В. Мальцев / Металлография тугоплавких, редких и радиоактивных металлов и сплавов / –М.: Металлургия, 1971. -488 с.

26. ПИ 1.2.085-78 Ковка и штамповка деформируемых алюминиевых сплавов / –М.: ВИАМ, 1978. -17 с.