

**ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАЗМЕРНУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ СПЛАВА МНК**

**THE INFLUENCE OF PROCESS OF MANUFACTURING AND HEAT
TREATMENT ON PERFORMANCE AND DIMENSIONAL STABILITY OF THE
Cu-Ni-Si ALLOY**

Головкин П.А., к.т.н., Милутинович М.М., инженер

P.A. Golovkin, Ph.D. in Engineering Science, M.M. Milutinovich, Engineer

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

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

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

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

Аннотация

Анализируются возможности улучшения свойств и повышения размерной стабильности материала специального сплава МНК для деталей электровакуумных СВЧ-приборов методами деформации и термической обработки.

Annotation

The possibilities of improving the properties and increasing the dimensional stability of material of the special Cu-Ni-Si alloy for the parts of electric vacuum microwave devices by the deformation and heat-treatment methods are analyzed.

Ключевые слова: электронные приборы, механизм перестройки, стабильность характеристик, деформация, термическая обработка, свойства материала, поперечновинтовая прокатка, сложная ковка, размерная стабильность деталей, автодеформирование.

Key words: electronic devices, transformation mechanism, performance stability, deformation, heat treatment, material properties, cross rolling, complex forging, dimensional stability of parts, self-deforming.

Общие положения

АО «Плутон», являющееся одним из лидеров в области разработки и выпуска специальных СВЧ-устройств [1], использует в своей работе ряд материалов, имеющих ограниченное применение в других отраслях промышленности.

Рабочие параметры электровакуумных приборов СВЧ-диапазона, помимо заданной вакуумной плотности, обеспечиваются размерной стабильностью деталей, включая механизм перестройки их рабочей частоты. С учётом того, что температура рабочей зоны приборов в аппаратуре накального типа может достигать 400 °С, а в процессе настройки и испытаний и более [2], обеспечение размерной стабильности деталей становится непростой задачей. Между тем, она напрямую предопределяет стабильность рабочих показателей СВЧ-приборов [2].

Одним из материалов, предназначенных для изготовления деталей электровакуумных СВЧ-приборов, является медноникелевый сплав с добавкой кремния марки МНК, сочетающий заданный уровень жаропрочности и механических свойств [3, 4]. Важно, что автодеформирование и как следствие изменение размеров деталей и узлов в процессе отладки, испытаний и эксплуатации приборов может сделать параметры их работы неприемлемыми [2]. С этой точки зрения следует обратить особое внимание на размерную стабильность деталей приборов.

В данном случае изменение размеров деталей целесообразно рассматривать воедино с природой деградации и разрушения металлического материала, напрямую связанных с выделением на границах зёрен нежелательных примесей и уровнем поверхностной энергии на этих границах [5]. Комплексный анализ происходящих в металлическом материале процессов позволит выстроить технологический процесс изготовления исходного пруткового полуфабриката необходимым образом. Пример зернограничного выкрашивания в тонкостенной детали механизма перестройки рабочей частоты СВЧ-устройства из сплава МНК и расслоений в материале исходного прутка приведён на рисунке 1.

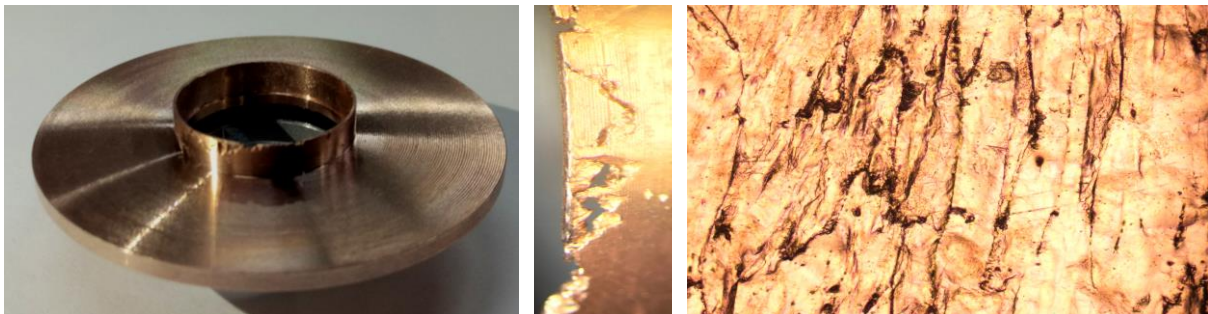


Рис. 1. Выкрашивания в тонкостенной детали из сплава МНК (слева, в центре) и расслоения в материале исходного прутка (справа, 100[×]).

Fig. 1. Chipping in a thin-walled part made of Cu-Ni-Si alloy (left, center) and delamination in the material of the original bar (right, 100[×]).

Механизмы изменения размеров деталей и сопутствующих процессов

Деформация всегда увеличивает структурную неоднородность металла, чем естественно активизирует протекание диффузионных и фазовых превращений при нагреве [6]. При этом диффузионная пластичность является частью механизма изменения размеров в процессе отдыха металла и его высокотемпературной ползучести, складываясь из суммы растворно-осадительно механизма, межзёрненной диффузии и самодиффузии [7]. При увеличении температуры, начиная от комнатной, на каждые 10...15 °С, коэффициент диффузии возрастает примерно вдвое [8].

Если при температуре на 200...500 °С ниже точки плавления средние значения самодиффузии в зёрнах металлов составляют $1 \cdot 10^{-17}$ м²/с [8], то перемещение атомов по границам зёрен происходит в 100...1000 раз активнее [5]. Поэтому измельчение зёрен путём термической и деформационной обработки способствует замедлению диффузионных процессов. Также, термическая стабилизация уменьшает уровень напряжений и разность потенциалов на межфазных поверхностях [5].

Границы и плоскости скольжения представляют собой области с сильно искажённой структурой и повышенной свободной энергией, достаточной для расплавления отдельных микрообъёмов металлического материала и образования нежелательных фаз [8]. Поэтому энергетически наиболее выгодное зарождение трещин происходит у тройных стыков зёрен со смоченными расплавом легкоплавких фаз стенками [9], как это видно на рисунке 1.

На границах зёрен происходит наибольшая генерация вакансий и накопление примесей [9]. В таком состоянии даже при отсутствии магистральных трещин, превращения в металлическом материале образуют у поперечных границ микропустоты, а это значит, что применение ковочных операций при изготовлении прутка в данном случае предпочтительнее его прокатки [12].

Представляет опасность повышенное содержание в сплаве МНК, как и в других медных сплавах, таких элементов, как образующие легкоплавкие эвтектики Bi, Se и Te. Так, концентрация висмута на границах зёрен может достигать 20 % при среднем содержании менее 3×10^{-4} % [10]. Легкоплавкие эвтектики BiPb и CuBi с температурами плавления 124 °С и 271,44 °С [10] находятся в рамках рабочих температур электровакуумных приборов [2]. То же касается селенида меди CuSe и теллурида меди CuTe с температурами конгруэнтного плавления 367 °С и 453 °С соответственно [11]. Всё это может привести к разрушению деталей по границам зёрен при механической обработке и тепловой нагрузке, что отражено на рисунке 1.

Условия и результаты эксперимента

Для численного измерения влияния процесса рекристаллизации при нагреве деталей из сплава МНК в конструкции электровакуумных приборов были изготовлены образцы из исходного пруткового материала Ø 45 мм. Эксперимент включал изготовление исходного образца размерами 40×24×7 мм на шадящих режимах, обеспечивающих по возможности наименьший уровень нагартовки.

Контрольные размеры были выполнены с допуском в пределах ±2 мкм. Исходя из проведённых наработок и литературных данных, было измерено изменение размеров после проведения следующих технологических воздействий. Первое состояло в моделирующем пайку двухступенчатом отжиге, включающем нагрев со скоростью 30 °С в минуту, выдержку при 750 °С в течение 20 минут, дальнейший нагрев до 870 °С с выдержкой 1,5 минуты, и охлаждение со скоростью около 60 °С в час.

Такое воздействие вызвало уменьшение размеров образца в направлении, перпендикулярном направлению проката около от 0,02 до 0,1 %. Казалось бы, ввиду снятия напряжений при отжиге, поперечный размер образца должен был увеличиться, однако противоречия здесь нет. Дело в том, что состоянию катаного прутка отвечают высокие растягивающие напряжения ближе к центру его сечения, вызванные явлением более быстрого перемещения внешних слоёв материала относительно внутренних слоёв при его прокатке [13]. Это и обусловило уменьшение линейного размера в поперечном направлении, дополнительно указывая на высокий уровень напряжений в материале полученного поперечновинтовой прокаткой (ПВП) прутка [13].

При этом место имеет повышенные напряжения растяжения как в продольном, так и поперечном направлении. Соответственно, «усадка» материала растёт по мере приближения к центру сечения прутка. Если вблизи диаметра заготовки изменение размеров практически отсутствует, то ближе к центру сечения прутка она достигает 0,1 % от линейного размера образца. Для таких точных устройств, как электровакуумные СВЧ-приборы, даже такое изменение линейных размеров деталей должно быть учтено, поскольку может неприемлемо изменить их рабочие характеристики.

В процессе отжига после закалки аналогичные показатели изменения размеров опытных образцов составили около 0,05 %, с минимальным разбросом по их сечению, что свидетельствует об исходном более стабильном состоянии металлического материала. Также это значит, что проведение закалки существенно снижает уровень напряжений и микрохимической неоднородности материала прутка, хотя и не может нивелировать нежелательное воздействие опережения при прокатке полностью.

Рекомендуемые режимы изготовления прутков из сплава МНК

В ходе исследований установлено, что характерные для поперечновинтовой прокатки напряжения в материале прутка формируют структуру материала, с низкой твёрдостью, составляющей НВ 50...55, и как следствие плохой обрабатываемостью резанием и технологичностью при сборке. В то же время, сложная ковка и протяжка заготовок на прутковый сортамент даёт проработку и уплотнение металлического материала по всему сечению прутка, обеспечивая показатель твёрдости НВ 110...120.

Хорошие характеристики пруткового материала обеспечиваются следующими шагами. Очищенный от окисленной корочки слиток следует гомогенизировать при температуре 830 °С в течение 15 часов, и далее ковать после с нагрева 930 °С по сложным схемам с подогревами, завершая протяжкой по схеме квадрат → квадрат → круг. По мере проковки температуру нагрева заготовок целесообразно понижать на 30...50 °С, ограничивая температуру конца ковки интервалом 820...830 °С.

Типичная микроструктура кованных прутков с размером зерна 70...100 мкм показана на рисунке 2. Далее, для уменьшения химической неоднородности и снятия напряжений, с ковочного нагрева заготовки целесообразно подвергать закалке в воде, и после пролёживания в течение 12 часов – упрочняющему старению при температуре 500 °С в течение 3 часов с охлаждением с печью. Важно отметить, что превышение температуры конца ковки и, соответственно, закалки в воде приведёт к существенному росту зерна и огрублению структуры. Для исключения такой опасности закалку следует производить в виде отдельной операции, понизив температуру нагрева до 800 °С.

Необходимо обратить внимание на то, как проводилось раскисление и модифицирование исходного расплава. Важно, был ли расплав раскислен и модифицирован только лишь мишметаллом на основе лантана и цезия, либо был ещё добавлен цирконий. Так, при отсутствии циркония после закалки материал прутка показывает твёрдость в пределах НВ 65...70, при его наличии - НВ 80...85, хотя оба значения твёрдости не достаточны для изготовления точных деталей.

Старение сплава МНК увеличивает твёрдость материала более чем вдвое, до НВ 170...180 и НВ 210...220, при отсутствии и наличии циркония соответственно, обеспечивая хорошую обрабатываемость и стабильность размеров деталей при неизменном размере зерна в пределах 70...100 мкм. Наличие циркония на 15...17 % повышает прочность материала при комнатной температуре и ещё значительно при повышенных, соответствующих режимам работы СВЧ-приборов [13].

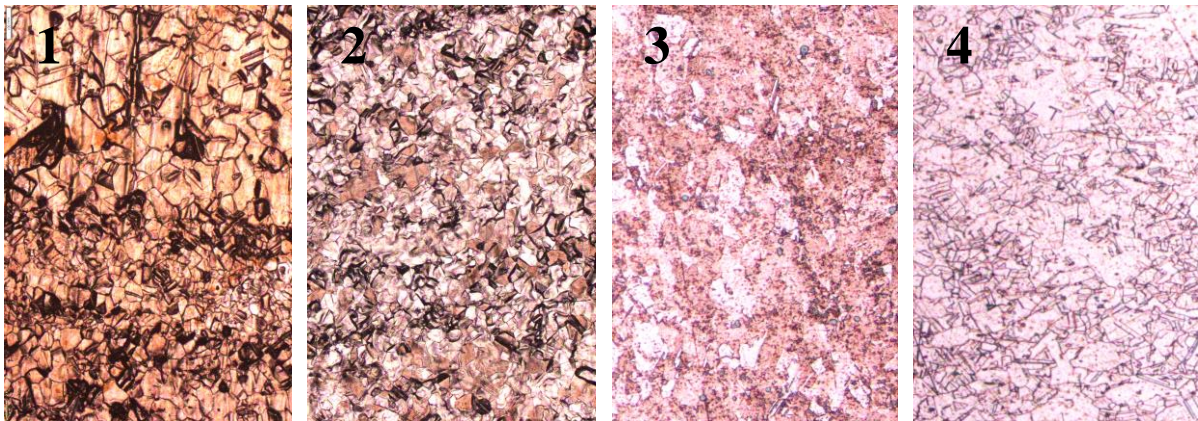


Рис. 2 Долевая структура катаного (1) и кованого прутка (2), она же после закалки в воду (3), и после закалки и искусственного старения при 500 °С (4), 100[×]
Fig. 2 The share structure of rolled (1) and forged bar (2), it is the same after quenching in water (3), and after quenching and artificial aging at 500 0C (4), 100[×]

Представленные на рисунке 2 типы структур материала прутков размещены по степени склонности к автодеформации и прочностной деградации. Наименее желательной является нестабильная структура, представленная на позиции 1 рисунка 2, которая часто имеет место при получении исходных прутков методом ПВП [13]. Её отличает склонность к понижению прочности ввиду скопления легкоплавких примесей на границах и у тройных стыков зёрен. Более предпочтительной является равномерно деформированная структура прутков, полученных с использованиемковки по сложным схемам, представленная как позиция 2 рисунка 2. Она более равномерна, и потому менее склонна к прочностной деградации, и автодеформированию при нагреве.

Меньший уровень внутренних напряжений и микрохимической неоднородности можно обеспечить проведением термической обработки в виде закалки в воду. Получаемая структура отличается пониженным уровнем остаточных напряжений, однако и малой твёрдостью, и как следствие – плохой обрабатываемостью и малой прочностью. Пример такой структуры представлен на позиции 3 рисунка 2.

Однако для использования в качестве материала деталей электровакуумных СВЧ-приборов, наиболее целесообразно применение сплава МНК после закалки и старения. Такое состояние сочетает в себе снятие внутренних напряжений после закалки, и упрочнение при старении, основанное на выделении эвтектоидов мишметалла и циркония по границам зёрен и фаз [7, 8]. Пример структуры с характерными двойниками отжига представлен на позиции 4 рисунка 2.

Конечно, данная статья не претендует на полноту их анализа и уникальность технологических решений. Проведённое исследование опирается на лишь один из множества подходов к решению задач, вынесенных в её название, без привлечения, например, методик исследования высокотемпературной ползучести металлических материалов при циклическом тепловом воздействии.

Выводы

1. Способы получения исходных прутков из сплава МНК напрямую влияют на такие важные их характеристики, как микрохимическая неоднородность, которые в свою очередь определяют возможное адсорбционное понижение прочности при появлении легкоплавких жидких фаз на границах зёрен. Вкупе с межзёрнными напряжениями, такая прочностная деградация помимо снижения прочности может вызвать выкрашивание зёрен по их границам.

2. Материал катаных методом ПВП прутков характеризуется склонностью к повышению размерных показателей в перпендикулярном направлении проката направлении в течение первой теплосмены, моделируемой в виде отжига. В то же время, напряжения растяжения в материале их центральной части настолько значительны, что перекрывают их уширение от эффекта возврата вытянутых деформированных зёрен к их исходному, более равновесному состоянию.

3. Уменьшение линейных размеров образцов материала полученных методом ПВП прутков составляют от 0,02 до 0,1 %, тем больше, чем ближе к центру сечения прутка, и могут быть критическими для работы СВЧ- устройств.

Применение стабилизирующей и упрочняющей обработки в виде закалки и старения снижает изменение размеров контрольных образцов в процессе моделирования пайки по всему их сечению до 0,05 %.

4. Минимальное изменение размеров при прохождении теплосмен может быть обеспечено получением равномерной мелкозернистой структуры с минимальной исходной анизотропией свойств и микрохимической неоднородностью, что достигается применением сложных схемковки при изготовлении исходного прутка и термической стабилизацией в виде закалки и последующего старения.

Получаемая упрочнённая структура обеспечивает высокий уровень прочностных характеристик и хорошую обрабатываемость резанием, а также стабильность размерных характеристик деталей в процессе теплосмен, характерных для изготовления, наладки и работы специальных электроввакуумных СВЧ- устройств.

Библиографический список

1. Плутон. 90 лет. Гордимся прошлым, смотрим в будущее / коллектив авторов / –М.: ООО «Пилотаж», 2019. -232 с.
2. В.Ф. Коваленко / Теплофизические процессы и электровакуумные приборы / –М.: Советское радио, 1975. -216 с.
3. Яе0.021.036 ТУ Прутки из сплава марки МНК вакуумной плавки. Технические условия / –М: п/я 4315, 1981. -9 с.
4. 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.
5. Б.С. Бокштейн, Ч.В. Капецкий, Л.С. Швиндлерман / Термодинамика и кинетика границ зёрен в металлах / –М.: Металлургия, 1986. -224 с.
6. А.А. Бочвар / О разных механизмах пластичности в металлических сплавах / –М.: Известия АН СССР, № 5. 1948.
7. Н.И. Корнеев, И.Г. Скугарев / Пластическая деформация высоколегированных сплавов / –М.: МАП, Оборонгиз, 1955. -204 с.
8. М.В. Пикунов, А.И. Десипри / Металловедение / Учебное пособие для техникумов цветной металлургии / –М.: Металлургия, 1980. -256 с.
9. И.И. Новиков / Горячеломкость цветных металлов и сплавов / –М.: Наука, 1966. -300 с.
10. Л.С. Ватрушкин, В.Г. Осинцев, А.С. Козырев / Бескислородная медь / –М.: Металлургия, 1982. -192 с.
11. А.Б. Лебедь, С.С. Набойченко, В.А. Шунин / Производство селена и теллура на ОАО «Уралэлектромедь» / учеб. пособие под ред. С.С. Набойченко / –Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. -112 с.
12. Головкин П.А. / Механизмы деформации металлов и сплавов, используемых в электровакуумных СВЧ- приборах / –С-Пб.: Политехника, Металлообработка, 2020, № 5...6, с. 27...34.
13. П.К. Тетерин / Теория поперечно-винтовой прокатки / –М.: Металлургия, 1971. -368 с.