

УДК 669.714; 621.771; 539.219

**О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЧИНАХ ПОЯВЛЕНИЯ БУГОРКОВ НА
МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ШЛИФАХ ПРУТКОВ ИЗ СПЛАВА МН45-ВП**

П.А. Головкин, к.т.н.

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

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

**ON THE TECHNOLOGICAL CAUSES OF RIDGE APPEARANCE ON
METALLOGRAPHIC SURFACES OF Cu-45%Ni VACUUM MELTING ALLOY BARS**

P.A. Golovkin, Ph. D.

Pluton JSC, 11 Nizhnyaya Syromyatnicheskaya St., Moscow, 105120, Russia.

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

Аннотация

На основании особенностей медноникелевого сплава вакуумной плавки МН45-ВП типа константан, выявляются причины появления на металлографических шлифах его прутков характерных бугорков, как разновидности поверхностного эффекта типа «ус». Показано, что образование бугорков является проявлением диффузионных процессов, вызванных повышенной неравномерности химического состава материала прутков, в свою очередь ставшей следствием не выполнения некоторых обязательных для получения качественного материала операций.

Annotation

Based on the peculiarities of the copper-nickel alloy of vacuum melting Cu-45%Ni such as "constantan" (Russian abbreviation "МН45-ВП"), the reasons for the appearance of characteristic "steps" on the metallographic cuts of its rods as a type of surface effect of the "mustache" type are revealed. It has been shown that the formation of "steps" is a manifestation of diffusion processes caused by increased unevenness of the chemical composition of the rod material, which, in turn, resulted from the failure to perform some operations required for obtaining high-quality material.

Ключевые слова: сплав, индукционная плавка, подстуживание расплава, магнитная восприимчивость, гомогенизация, ковка, прутки, диффузия, пороки поверхности типа «ус».

Keywords: alloy, induction melting, melt quenching, magnetic susceptibility, homogenization, forging, bars, diffusion, surface defects of "mustache" type.

Общие положения

Немагнитный медноникелевый сплав вакуумной плавки типа константан МН45-ВП, требования к пруткам из которого определены ТУ Яе0.021.153 [1], используется, в частности, для изготовления деталей электровакуумных приборов, где востребованы такие его свойства, как вакуумная плотность и неизменность размеров точных деталей. Химический состав сплава приведён в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав сплава МН45-ВП, %_{масс.}

Медь	Никель	Марганец	Углерод	Кремний	Магний	Цинк	Свинец	Марганец
Основа	44...46	≤0,05	≤0,05	≤0,06	≤0,06	≤0,002	–	≤0,05
Висмут	Фосфор	Мышьяк	Кислород	Водород	Азот	Сера	Кадмий	Σ примесей
≤0,002	≤0,01	≤0,002	≤0,005	≤0,002	≤0,002	≤0,005	≤0,002	≤0,13

Сплав не входит в перечень ГОСТ 492 [2] на химический состав никелевых и медноникелевых сплавов, а ТУ [1] не предъявляют требований к структуре и свойствам материала прутков, и к допустимости в нём дефектов, в том числе тех, которые могут представлять опасность для деталей рабочей зоны электровакуумных приборов [3].

Причины появления бугорков на металлографических шлифах прутков

По сумме свойств, основным способом получения исходных слитков сплава МН45-ВП, является индукционная вакуумная плавка. Основанная на нагреве шихты мощными электромагнитными полями, индукционная плавка имеет такую особенность, как неравномерное распределение в расплаве его составляющих [4] с различной электромагнитной восприимчивостью [5]. Поскольку магнитная восприимчивость ферромагнитного никеля при плавлении изменяется слабо, и описывающий это изменение сдвиг Найта незначителен [6], то она и жидкого никеля выше, чем у парамагнитной меди, и никель будет в большей степени перемещён в центр расплавленного сгустка, чем медь. Это означает, что, если индукционная печь не имеет специальных магнитных пещек для перемешивания расплава, то его химический состав будет сильно отличаться от центра образованного сгустка к его краям, и содержание никеля будет выше к середине этого сгустка. Как показывает производственная практика, эта неравномерность может проявить себя при дальнейшей обработке материала слитка, и даже отразиться на материале готовых деталей в составе электровакуумных приборов.

Если уравнивание химического состава не будет произведено в процессе приготовления расплава, в частности, в процессе его подстуживания при минимальной мощности работы нагревателей, то оно неизбежно перейдет в материал получаемого слитка. Далее, если, стремясь сократить загрузку печного оборудования и расход электроэнергии, производитель откажется и от проведения гомогенизационного отжига, эта неравномерность не сможет быть в нужной степени преодолена при кузнечном переделе слитка и при прокатке или ковке прутков.

Данные о диффузионных постоянных двойных систем [7] показывают, что при температуре 1000 °С в паре Ni-Cu, проникновение меди в никель происходит, по разным данным, от трёх [7] до восьми раз [8] быстрее, чем наоборот, и содержание меди на поверхности раздела веществ достигает 84 % и более, при этом энергия активации самодиффузии меди примерно на 20 % меньше, чем у никеля [5, 9]. Очень важно, что при температуре 1000 °С диффузионные процессы не только между чистым никелем и медью, но и между веществом, содержащим различное их количество, очень активны. Так, известный источник [7] сообщает, что при соприкосновении пластин из материалов с химическим составом, описываемым как (Ni + 40 % Cu) / (Ni + 60 % Cu), проникновение меди в никель происходит в 3,2 раза быстрее, чем наоборот, а равновесный состав границы раздела содержит 54 % меди, что точно соответствует паспортному её содержанию в сплаве МН45-ВП согласно ТУ Яе0.021.153 [1].

Это значит, что паспортный химический состав сплава разработан исходя из стремления обеспечить максимально равновесное состояние его материала, на что указывает и само его название – «константан». Однако недобросовестное отношение некоторых изготовителей этого сплава делает изначально разработанный для получения постоянных свойств материал нестабильным.

Стремясь к достижению равновесного состояния, материал сплава претерпевает внутри себя значительные диффузионные изменения в течение технологических переделов, теплосмен, межоперационного пролёживания, и так далее, одним из следствий чего и является появление на поверхности металлографических шлифов бугорков, обычный вид которых показан на рисунке 1.

Одним из проявлений процесса массопереноса в металлическом материале, является образование на его поверхности «усов» или бугорков в той составляющей диффузионной пары, в которую направлен преимущественный поток атомов, и в котором, поэтому, образуются сжимающие напряжения.

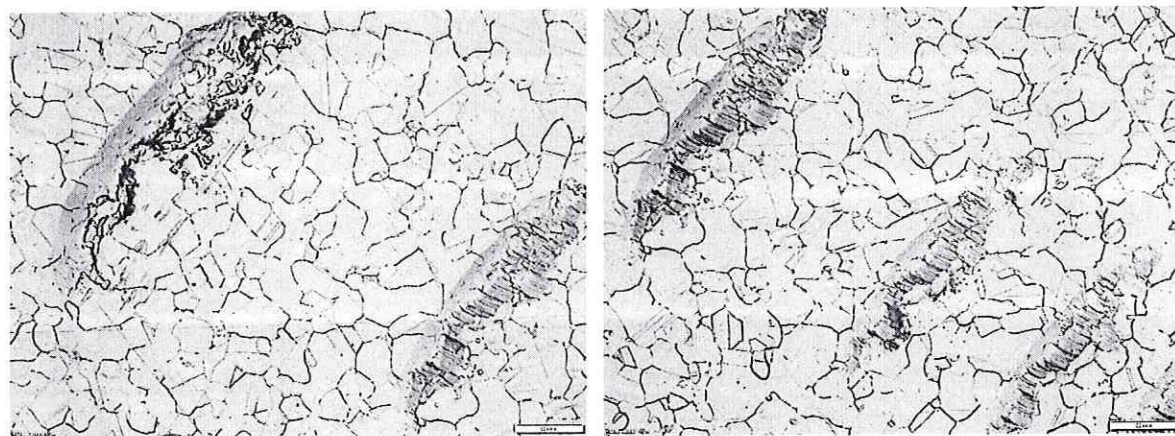


Рис. 1. Бугорки из множества усов, исходные зёрна частично разрушены, 100^x.

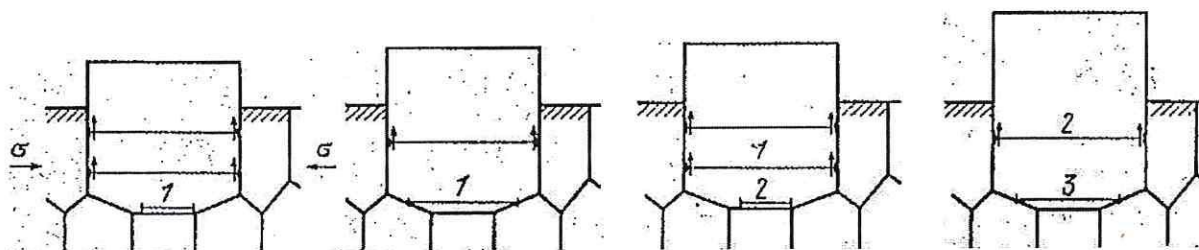


Рис. 2 Схема образования бугорков и усов, взято из [14].

Эти «усы» и бугорки являются местом стоков «избыточных» приходящих атомов [7], и в этом смысле их зарождение является отражением эффекта Френкеля, упрощённо, заключающемся в образовании пор в местах скопления избыточных вакансий [10]. Образование бугорков на поверхности шлифов можно обрисовать следующим образом: направленный поток атомов меди в область с повышенным содержанием никеля формирует на границе зёрен разность напряжений, выдавливающих их вовне материала образца, как это показано на схеме рисунка 2. Химическую неоднородность материала в местах роста бугорков на шлифе можно различить уже по изменению цвета его поверхности, как это видно на рисунке 3. При этом сами бугорки могут расти не только в виде холмообразных выпуклостей, как на рисунке 1, но и в виде грибоподобных образований, одно из которых также приведено на фотографии рисунка 3.

Что касается наблюдаемой рисунке 1 повторяемости бугорков на некотором расстоянии друг от друга, то она, видимо, является следствием дополнительного влияния образующихся при полировке шлифов стоячих волн, способствующих ускоренной диффузии в материале, как это происходит при ультразвуковом воздействии [11].

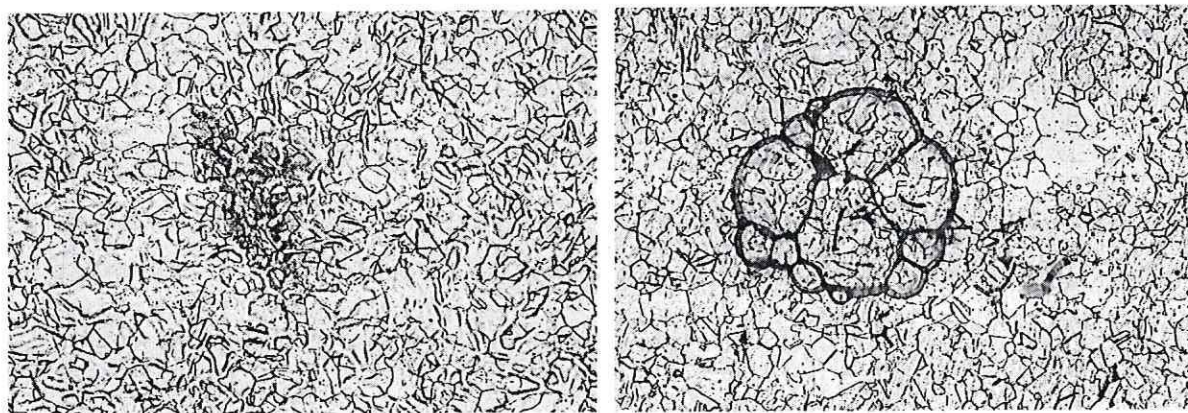


Рис. 3. Место химической неоднородности (слева) и сформировавшийся бугорок из целых неразрушенных зёрен (справа), 50^х.

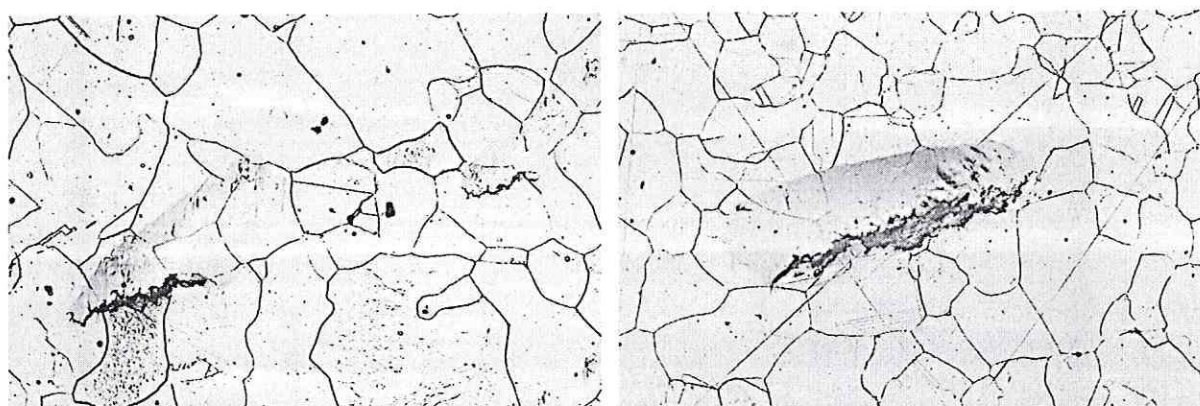


Рис. 4. Трещины в бугорках на торцевом шлифе прутков из сплава НВ45-ВП, 100^х.

На фотографиях рисунка 1 в местах излома поверхности бугорков видно, что они состоят из множества рядом стоящих, подобно сотам, усов-столбиков. Можно предположить, что, если бы растущие бугорки не удалялись бы полировочным абразивом при подготовке шлифа, они могли бы превратиться в бугорки гораздо больших размеров, либо в большие в поперечном сечении и протяжённые «усы», и мы наблюдаем лишь остаточные следы протекающих в металлическом материале явлений, когда воздействие стоячих волн прекращено.

В любом случае движущей силой образования бугорков является стремление металлического материала уменьшить свою химическую неоднородность, а непосредственно её причиной – недостаточное перемешивание разделённого по признаку магнитной восприимчивости материала исходного расплава, и отказ изготовителя от проведения гомогенизирующего отжига готового слитка.

Переходящая в материал деталей микрохимическая неоднородность может привести к их короблению во время технологических и рабочих теплосмен, и как следствие – изменению служебных характеристик готового прибора в случае изменения, например, зазора между его деталями, и т.д. Другой опасностью может стать возможное нарушение вакуумной плотности деталей прибора при появлении, в его тонкостенных деталях, вызванных диффузионными процессами трещин напряжения, пример которых в местах роста бугорков приведён на рисунке 4.

Подпитываемые диффузионными процессами, даже имея поверхностный характер, такие трещины могут стать концентраторами напряжений во время теплосмен, испытательных и рабочих нагрузок на прибор, и развиваться в критические для его вакуумной плотности дефекты, привести к его выходу из строя. С учётом назначения готовых приборов, это крайне критично. Всё это значит, что исходный расплав должен быть либо перемешан специальными электромагнитными пушками, либо, при их отсутствии в составе печи, – самоуравновешен во время подстуживания при дегазации, а готовый слиток – должен быть обязательно отождён для его гомогенизации.

Выводы

1. Появление на поверхности металлографических шлифов «усов» и бугорков является следствием активно протекающих в металлическом материале диффузионных процессов, вызванных недостаточной равномерностью его химического состава.

2. Повышенная неоднородность материала прутков из прецизионного медноникелевого сплава МН45-ВП типа «константан» может стать причиной отсутствия в составе индукционных плавильных печей электромагнитных пушек для перемешивания, разделённого по показателю электромагнитной восприимчивости его составляющих, исходного расплава.

3. Отказ от проведения операций подстуживания в процессе дегазации расплава не позволяет получить химический состав слитка, однородность химического состава материала которого ограничила бы протекание в нём активных диффузионных явлений. Отказ от проведения гомогенизационного отжига слитка также не способствует получению однородного по химическому составу металлического материала.

4. Недостаточная однородность химического состава, не прошедшего подстуживание расплава и гомогенизационный отжиг слитка материала, не позволяет обеспечить его стабильность, необходимую для изготовления точных деталей электровакуумных приборов.

5. Диффузионные явления, протекающие в неоднородном по химическому составу материале из сплава МН45-ВП, могут вызвать образование в изготовленных из него деталях трещин напряжения, опасных для вакуумной плотности готовых приборов.

6. При отсутствии в составе индукционной печи перемешивающих расплав электромагнитных пушек, проведение его подстуживания перед разливкой в изложницы и гомогенизационный отжиг получаемых слитков, являются необходимым условием получения качественных материалов из сплава МН45-ВП.

Список источников

1. Яе0.021.153 ТУ Прутки из медно-никелевых сплавов вакуумной плавки / взамен ТУ 11-19 с 01.01.1984 / –М: п/я 4315, ОЗТМиТС, 1983. -16 с.; изм.

2. ГОСТ 492-2006 Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки / –М.: Стандартинформ, 2011. -14 с.

3. А.С. Гладков, В.М. Амосов, Ч.В. Копецкий, А.М. Левин / Металлы и сплавы для электровакуумных приборов (серия «Электронное материаловедение») / под общей ред. А.И. Шокина / –М.: Энергия, 1969. -600 с., ил.

4. И.Л. Повх, А.Б. Капуста, Б.В. Чекин / Магнитная гидродинамика в металлургии / –М.: Металлургия, 1974. -240 с., ил.

5. Физические величины. Справочник / Коллектив авторов по ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова / –М.: Энергоатомиздат, 1991, -1231 с.; ил.

6. Д.Р. Вилсон / Структура жидких металлов и сплавов / перевод с англ. / –М.: Металлургия, 1972. -247 с.

7. Я. Е. Гегузин / Диффузионная зона / –М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. -344 с.

8. П. Шьюмон / Диффузия в твёрдых телах / пер. с англ. Б.С. Бокштейна / –М.: Металлургия, 1966. -196 с.

9. В. Зайт / Диффузия в металлах. Процессы обмена мест / пер. со второго переработанного и расширенного немецкого издания Г.С. Куликова и Р.Ш. Малковича под ред. Б.И. Болтакса / –М.: Издательство иностранной литературы, 1958. -382 с.

10. Н.В. Сторожук, А.М. Гусак / Конкуренция эффектов Френкеля и Киркендалла при взаимной диффузии / Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова / –Киев: Металлофизика. Новейшие технологии, 2014, том 36, с. 367...374.

11. А.В. Кулемин / Ультразвук и диффузия в металлах / –М.: Металлургия, 1978. -200 с.