

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТАБИЛИЗАЦИЮ РАЗМЕРОВ  
ТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПРЕЦИЗИОННОГО СПЛАВА 29НК-ВИ  
THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE SIZE STABILIZATION OF  
PRECISION PARTS MADE OF 29NK-VI PRECISION ALLOY**

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

JSC "Pluton", 105120, Russia, Moscow, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya str., 11.

П.А. Головкин, к.т.н.; [p.golovkin@pluton.msk.ru](mailto:p.golovkin@pluton.msk.ru); тел.: (495) 730-36-19

P. A. Golovkin, Ph. D.; [p.golovkin@pluton.msk.ru](mailto:p.golovkin@pluton.msk.ru); tel.: (495) 730-36-19

**Аннотация**

Анализируются особенности структуры горячекатаных прутков и влияние термической обработки на стабилизацию размеров точных деталей из прецизионного сплава 29НК-ВИ. Показано, что действующие нормативные документы в полной мере учитывают особенности требований, предъявляемых к материалам из сплава 29НК-ВИ, используемых для изготовления деталей электровакуумных приборов.

**Annotation**

The features of the structure of hot-rolled bars and the effect of heat treatment on the stabilization of the dimensions of precision parts made of precision alloy 29NK-VI are analyzed. It is shown that the current regulatory documents fully take into account the specific requirements for materials from the 29NK-VI alloy used for the manufacture of parts for electrovacuum devices.

*Ключевые слова: прецизионный сплав, горячекатаный пруток, разрыв скоростей деформации, стабильность структуры, опережение при прокатке, дефекты структуры, точность размеров, формоизменение, сохранение геометрии деталей.*

*Keywords: precision alloy, hot-rolled rod, deformation rate gap, structure stability, rolling advance, structure defects, dimensional accuracy, shape change, preservation of the geometry of parts.*

**Общие положения**

Детали типа «Вывод энергии» являются типовыми в конструкции широкой гаммы электровакуумных приборов СВЧ-диапазона [1], производимых АО «Плутон» [2]. Общим требованием к деталям таких изделий является их минимальное формоизменение в результате теплосмен при сборке-пайке, наладке и эксплуатации готовых изделий [1].



Рис. 1. Изменение контролируемого размера  $\varnothing 20^{-0,05}_{-0,07}$  после вырезки паза.

Нерасчётное изменение заданных значений точных размеров деталей может стать причиной ухода рабочих характеристик высокотехнологичного изделия. Внешний вид одной из таких деталей до и после выреза в ней фигурного паза методом электроэрозионной обработки и скоба для контроля одного из размеров по схеме «проход / не проход» представлены на рисунке 1.

### **Состояние поставки прутков и формоизменение получаемых деталей**

В области изготовления электровакуумных СВЧ- устройств широко распространён обладающий ценным комплексом специальных свойств, прецизионный сплав вакуумной плавки 29НК-ВИ [3]. Действующие нормативные документы предусматривают изготовление горячекатаных прутков из этого сплава без последующего отжига [4]. В состоянии поставки макроструктура прутков не должна иметь усадочной раковины, рыхлости, расслоений, инородных включений и трещин [4], методика проверки должна соответствовать ГОСТ 10243 [5].

Помимо этого, методом Ш1 или Ш4 ГОСТ 1778, контролируют загрязненность металла неметаллическими включениями и соответствие требованиям ГОСТ 5949 [6] в части отсутствия волосовин. Казалось бы, столь широкий перечень контролируемых значений должен заведомо обеспечить соответствие поступающего материала требованиям производства электровакуумных СВЧ- приборов. Однако при этом не контролируется размер зерна и уровень внутренних напряжений в материале прутка, как это предусмотрено, например, для прутков бронзы [7].

Этот факт и то, что физические и специальные свойства сплава гарантируются после проведения регламентируемой ГОСТ 14080 термической обработки [8], вызывают противоречие с состоянием поставки металлического материала. В отличие, например, от пресованных медных прутков, где вызванные процессом отставания наружных слоёв выдавливаемой через матрицу заготовки, и зоны разрыва скоростей деформации [9] проявляют себя в виде характерных кольцевых и полукольцевых оттенков [10], для прутков сплава 29НК-ВИ, зоны разрыва скоростей деформации в процессе их прокатки при визуальной проверке макроструктуры не обнаруживается.

Описанное явление становится одной из причин высокого уровня напряжений и появления микродефектов в материале прутков, тем больше, чем больше их диаметр, что важно для разработки технологии изготовления детали «Вывод энергии», поскольку именно стабильность свойств и малое значение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), и обусловило применение сплава в конструкциях СВЧ-приборов.

Рассматриваемая деталь «Вывод энергии» изготавливается из горячекатаного прутка Ø 30 мм. Контроль размеров механически обработанных заготовок показал, что их изменение в процессе вырезки фигурного паза на контролируемом диаметре  $20^{-0,05} -_{0,07}$  составил в среднем 0,015 мм, или 0,075 %. Для сравнения, принятые значения пределов упругости и текучести металлов и сплавов приняты равными 0,05 % и 0,2 % соответственно [11]. Физически такое формоизменение равно ТКЛР сплава при нагреве от 20 до 200 °С [8], то есть сравнимо с расчётным изменением размера детали в её рабочем диапазоне температур. Это значит, что изменение ответственного размера детали может существенно превысить расчётные показатели. Измерение твёрдости материала исходного прутка на поперечных и продольных образцах показала стабильные значения HV 221...225 (HB 209...214).

Исключением стала зона разрыва скоростей деформации [9], по аналогии медными сплавами, расположенная приблизительно на расстоянии половины диаметра от оси симметрии прутка. Здесь величина твёрдости снизилась приблизительно на 11...12 %, составив около HV 199. Исходя из известной корреляции между значениями твёрдости и прочности термически не упрочнённых металлических материалов [12], можно предположить, что даже без учёта имеющих место в этой зоне дефектов материала прутка, его прочностные показатели также заметно понизятся.

А именно: воспользовавшись зависимостью между твёрдостью и прочностью для термически не упрочнённых углеродистых сталей [12], определяем, что сопротивление текучести металлического материала снизилось с гарантируемых [8] 540 до 400 МПа.

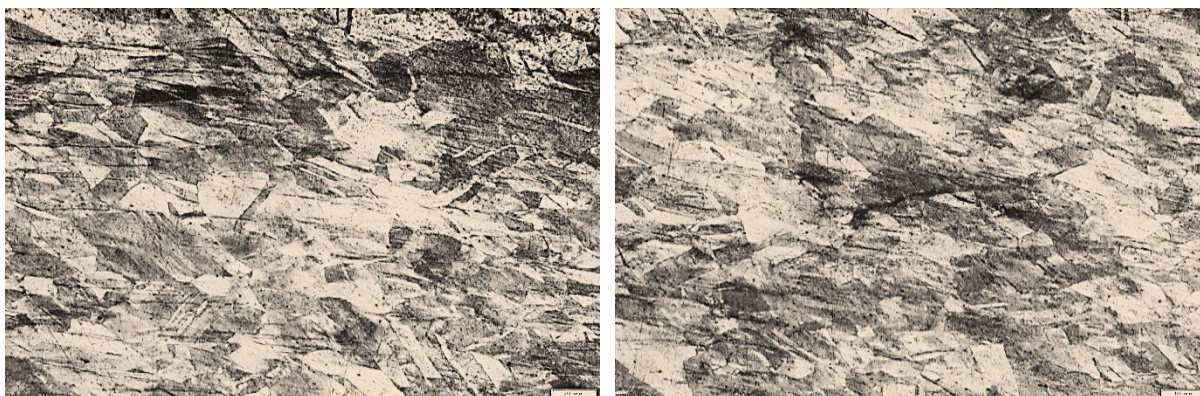


Рис. 2. Структура и дефекты материала прутка в зоне разрыва скоростей деформации в продольном (слева) и поперечном (справа) сечении прутка Ø 30 мм, 100<sup>×</sup>

Это значит, что определяемое по разнице твёрдости [12] значение внутренних напряжений, вызванных явлением опережения при прокатке прутков, составляют не менее 140 МПа, или  $\approx 35\%$  предела текучести материала прутка. Важно, что такие расчётные показатели не противоречат гарантируемым значениям отожжённого материала по ГОСТ 14080 [8], а значит, являются корректными.

Такое падение прочности не может не отразиться на поведении металлического материала при его обработке, стабильности получаемых размеров детали и её вакуумной плотности, которая должна обеспечиваться в готовом СВЧ- устройстве на протяжении не менее 15 лет [1]. Типичные дефекты структуры материала заготовок деталей типа «Вывод энергии» представлены на рисунке 2.

Так, в структуре зоны разрыва скоростей деформации [9] исходного прутка имеют место микроскопические расслоения и микронесплошности металлического материала у тройных стыков зёрен. Приведённые обстоятельства и цифры являются основанием для осуществления дополнительной термической обработки заготовок деталей.

Важно уточнить, что предписанные [8] режимы термической обработки деталей в вакуумных печах перед вырезом фигурного паза неизбежно изменяют все выполненные и проверенные до этого размеры, которые на рисунке 1 не показаны. Напротив, отжиг прутка в атмосферной электрической печи существенно удешевит технологический процесс. На основании требований ГОСТ, справочных данных [13] и результатов опытных работ, может быть предложен следующий режим стабилизирующего отжига прутковых заготовок из сплава НК29-ВИ: нагрев заготовок с печью до 900 °С, выдержка 1 час, охлаждение с печью до температуры не более 60 °С, далее на воздухе.

Структуры материала прутка в долевом направлении до и после проведения отжига по предлагаемому режиму, представлены на рисунке 3.

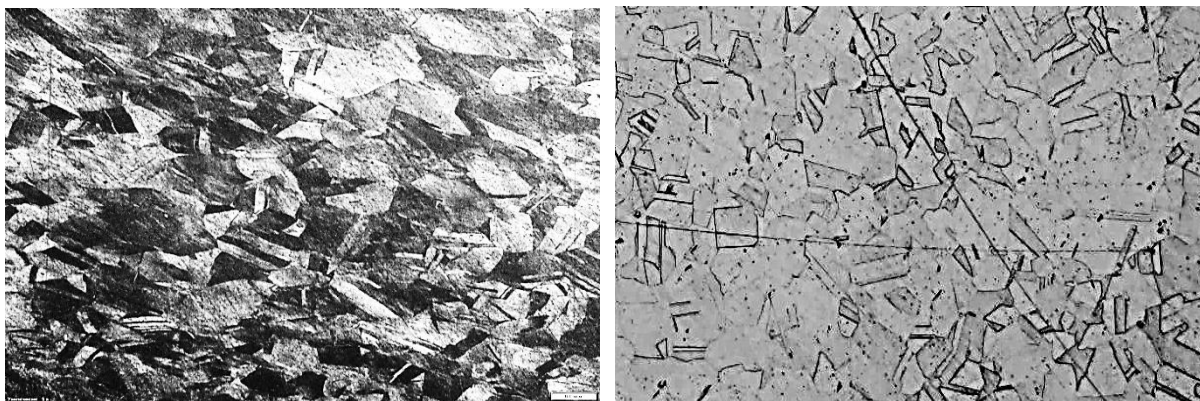


Рис. 3. Структура материала прутка до (слева) и после (справа) отжига, 100<sup>×</sup>

Из фотографий видно, что такая обработка способствует гармонизации и получению ненаправленной структуры полуфабриката. Без учёта зоны разрыва деформаций, после отжига материал прутка показывает твёрдость НВ 148...152 (HV 148...150). Конечно, такое понижение твёрдости ухудшает технологичность материала при обработке резанием, однако обеспечивает повышение геометрической точности деталей и стабильность рабочих характеристик готовых приборов. Что же касается падения прочности материала, оно неизбежно происходит при сборке-пайке детали, и именно такие её значения являются расчётными при проектировании изделия.

### **Выводы**

1. Существует противоречие требований к состоянию поставки и гарантируемым свойствам материала прутков из сплава 92НК-ВИ по ГОСТ 14082 и ГОСТ 14080, что важно с точки зрения обеспечения критических для изготовления точных деталей электровакуумных СВЧ-приборов свойств.

2. Изготовлению точных деталей из горячекатаных прутков в состоянии поставки препятствует высокий уровень внутренних напряжений, в частности, в прутке диаметром 30 мм, уровень растягивающих напряжений достигает трети от гарантированного предела текучести сплава в соответствующем состоянии. В результате размеры точных деталей изменяются настолько, что выводят их за пределы соответствующих допусков и изменяют характеристики готовых СВЧ-приборов.

3. Для соответствия материала прутков из сплава 29НК-ВИ заданным свойствам следует применять их отжиг по режиму: нагрев в электрической печи до 900 °С, выдержка 1 час, охлаждение с печью до температуры не более 60 °С, далее на воздухе.

### Список литературы

1. Д.Е. Самсонов / Основы расчёта и конструирования магнетронов / –М.: Советское радио, 1974. -328 с.
2. Плутон. 90 лет. Гордимся прошлым, смотрим в будущее / коллектив авторов / –М.: ООО «Пилотаж», 2019. -232 с.
3. ГОСТ 10994-74 Сплавы прецизионные. Марки / введён впервые с 01.01.1975 / –М.: Издательство стандартов, 1978. -17 с., изм.
4. ГОСТ 14082-78 Прутки и листы из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия / взамен ГОСТ 14082-68 с 01.01.1979 / –М.: Издательство стандартов, 1978. -7 с., изм.
5. ГОСТ 10243-75 Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры / Введён в действие впервые с 19.08.1975 / –М.: Издательство стандартов, 1978. -37 с., изм.
6. ГОСТ 5949-75 Сталь сортовая и калиброванная коррозионностойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия / введён с 01.01.1977 взамен ГОСТ 5949-6171 и ГОСТ 10500, кроме теплоустойчивой стали / –М.: Издательство стандартов, 1978. -23 с., изм.
7. ГОСТ 2060-2006 / Прутки латунные. Технические условия / –М.: Стандартиформ, 2008. -28 с.
8. ГОСТ 14080-78 Лента из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия / введён впервые с 01.01.1979 / –М.: Издательство стандартов, 1978. -17 с., изм.
9. М.Я. Дзугутов / Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением / 2-е изд., перераб. и доп. / –М.: Металлургия, 1974. -280 с.: ил.
10. ГОСТ 10988-75 / Прутки из бескислородной меди для электровакуумной промышленности. Технические условия / –М.: Издательство стандартов, 1986. -14 с.
11. Терминология теории упругости, испытаний и механических свойств материалов и строительной механики / Сборники рекомендуемых терминов / Акад. наук СССР. Ком. техн. терминологии / Под ред. акад. А. М. Терпигорева; Вып. 14 / –М.: Издательство Академии Наук СССР, 1952. -80 с.
12. М.С. Дрозд /Определение механических свойств металла без разрушения / –М.: Металлургия, 1964. -172 с.
13. Материалы в машиностроении. Справочник в пяти томах / Под общей редакцией И.В. Кудрявцева / Том 3. Специальные стали и сплавы. Выбор и применение / под редакцией Ф.Ф. Химушина / –М.: Машиностроение, 1968. -448 с.