

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ ИЗ НИОБИЯ МЕТОДОМ ГИДРОУДАРНОЙ ШТАМПОВКИ

*Н. С. Азарян<sup>а, 1</sup>, Г. Д. Ширков<sup>а</sup>, А. Ю. Журавский<sup>б</sup>, В. С. Петраковский<sup>б</sup>,  
М. А. Батурицкий<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Физико-технический институт НАНБ, Минск

<sup>1</sup> Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ, Минск

Выполнен полный производственный цикл изготовления всех деталей одноячеечного сверхпроводящего резонатора, состоящего из двух полуячеек, двух трубок дрейфа и двух фланцев. Полуячейки резонатора изготовлены методом гидроударной штамповки, который обладает рядом преимуществ по сравнению с инструментальными штампами. Экспериментальным путем впервые получена диаграмма штампуемости высокочистого ниобия для технологии гидроударной штамповки и определены ключевые параметры процесса, обеспечивающие полную вытяжку заготовки: значение предельной степени вытяжки сверхчистого ниобия составляет 1,92 при величине удельной энергии удара 0,42 МДж/м<sup>2</sup>. При этом отклонение размеров полуячеек от номинальных значений не превышает 0,1 мм. Создана технологическая оснастка для всех этапов изготовления деталей резонатора. Опытным путем определены параметры механической обработки деталей ниобиевых резонаторов перед сваркой.

Complete manufacturing cycle on the production of parts for superconducting single-cell cavity (half-cells, drift tubes and flanges) has been executed. Half-cells of the cavities were made by the method of hydropercussion punching which has a number of advantages in comparison with instrumental stamping technique. Experimentally for the first time the diagram of hydropercussion stamping of ultrapure niobium has been obtained and the key parameters of the process which provide the complete deep-drawing of workpiece have been defined: ultimate degree of extraction is 1.92 at the specific impact energy 0.42 MJ/m<sup>2</sup>. The deviations of half-cells dimensions do not exceed 0.1 mm from the nominals. All the necessary fixtures for all manufacturing steps have been produced. The parameters of machining of the parts of niobium cavities before the welding have been determined experimentally.

PACS: 29.20.Ej; 41.75.Ht; 84.40.-x; 85.25.Am; 81.05.-t

### ВВЕДЕНИЕ

К сверхпроводящим ниобиевым резонаторам для ускорителей заряженных частиц предъявляются очень высокие требования к геометрии весьма сложной формы и очень жесткие допуски на размеры. Кроме того, при изготовлении изделия не допускается даже

---

<sup>1</sup>E-mail: azaryan@jinr.ru

ничтожное загрязнение сверхчистого ниобия материалом штамповой оснастки. Качество поверхности полуячеек должно быть высочайшим, без царапин, вмятин, следов инструмента. Невыполнение хотя бы одного из этих условий не позволит достичь требуемого качества резонатора.

В настоящее время для изготовления резонаторов используют обычную инструментальную штамповку [1]. Инструментальные штампы имеют высокую производительность, что крайне важно при массовом производстве, но при этом имеют высокую стоимость, а с учетом сверхвысоких требований к геометрической точности сложнопрофильных резонаторов стоимость таких штампов дополнительно многократно возрастает. Кроме того, инструментальная штамповка не гарантирует защиты сверхчистого ниобия от загрязнения материалом оснастки, так как штамповка осуществляется за счет жесткого контакта между пуансоном и матрицей. Помимо этого имеются сложности, связанные с обеспечением точной геометрии, с неравномерным утонением, царапинами и задирами на изделиях.

Помимо инструментальных штампов существует относительно новая технология гидроформовки [2], которая отличается низкой стоимостью формообразующего инструмента и малыми сроками подготовки производства, но требует дорогостоящего гидравлического оборудования, сложных уплотняющих устройств на штампе, которые иногда дороже самого штампа. Процесс в силу этого обладает низкой производительностью, а так как толщина материала значительная (2,8–3,0 мм), требуются высокие давления, чтобы обеспечить точное копирование матрицы, что весьма проблематично.

В этих условиях гидроударная штамповка, обладающая такими достоинствами, как низкая стоимость оснастки, отсутствие уплотнений, высокое и равномерное деформирующее усилие жидкости, которое гарантирует точное копирование матрицы, выглядит предпочтительней перед описанными методами штамповки. Кроме того, при гидроударной штамповке практически весь объем металла находится в пластическом состоянии, что приводит к отсутствию пружинения, а значит, к повышению точности изделий. Сверхчистый ниобий — высокопластичный металл, поэтому обладает высокой схватываемостью с деформирующим инструментом, что приводит к снижению качества поверхности изделий, а гидроударная штамповка, благодаря минимальному контакту инструмента с заготовкой, устраняет этот недостаток [3]. Таким образом, гидроударная штамповка полупаузер резонаторов представляется весьма перспективным направлением при изготовлении как опытных партий резонаторов, так и при массовом производстве сверхпроводящих ниобиевых резонаторов. Выпускаемое серийно в Белоруссии гидроударное оборудование обладает следующими достоинствами:

- простота и низкая стоимость оснастки, так как роль пуансона выполняет жидкость;
- отсутствие уплотняющих устройств;
- высокое и равномерное деформирующее усилие;
- отсутствие пружинения;
- короткие сроки подготовки производства;
- высокое качество поверхности отштампованных изделий;
- отсутствие средств повышенной опасности, так как роль энергоносителя выполняет сжатый воздух цеховой пневмосети с давлением до 0,63 МПа.

### ГИДРОУДАРНАЯ ШТАМПОВКА ПОЛУЯЧЕЕК РЕЗОНАТОРА

Внешний вид гидроударного пресса приведен на рис. 1. Гидроударный пресс выполняет практически все операции листовой штамповки — вытяжку, пробивку, вырубку, формовку, раздачу труб, отбортовку и т. п. Основной операцией при штамповке полуячеек резонатора является операция вытяжки, представляющая собой процесс превращения плоской заготовки в полое изделие. Основным критерием, определяющим возможность осуществления вытяжки, является предельная степень вытяжки

$$K^{\text{lim}} = D/d,$$

где  $D$  — диаметр заготовки;  $d$  — диаметр вытягиваемого изделия. Величина предельной степени вытяжки, помимо деформационных свойств материала, зависит от конструктивных характеристик гидроударного оборудования и технологической оснастки.

В связи с этим для определения истинной предельной степени вытяжки  $K_{\text{act}}^{\text{lim}}$  важно знать величину и характер влияния этих характеристик на предельную степень вытяжки. К таким характеристикам относятся:

- относительная масса бойка  $\alpha$  (отношение массы жидкости в рабочей камере к массе бойка);
- величина радиуса закругления матрицы  $R_M$ ;
- относительная толщина заготовки  $S/D$ ;
- наличие смазки и ее качество;
- схема процесса гидроударной вытяжки.

Существует еще ряд конструктивных характеристик гидроударных прессов, оказывающих некоторое влияние на предельную степень вытяжки, однако оно исключается путем однотипного проектирования (например, соотношение объемов ресивера и ствола) или не превосходит нескольких процентов и им можно пренебречь (например, влияние рода жидкости в рабочей камере).

Экспериментами установлено, что перечисленные выше параметры однотипно влияют на весь диапазон применяемых в листовой штамповке материалов. Таким образом, имея значения предельных степеней вытяжки различных конструкционных листовых материалов, полученных при определенных условиях,  $K_0^{\text{lim}}$  и зная величину и характер влияния основных технологических параметров на предельную степень вытяжки, можно найти истинную предельную степень вытяжки  $K_{\text{act}}^{\text{lim}}$  любого материала в любых условиях процесса гидроударной вытяжки. Параметрическое уравнение для определения истинной предельной степени вытяжки имеет вид

$$K_{\text{act}}^{\text{lim}} = K_0^{\text{lim}} K_1 K_2 K_3 K_4,$$



Рис. 1. Гидроударный пресс СФТ-510

где  $K_0^{lim}$  — предельная степень вытяжки, полученная экспериментально путем построения кривых штампуемости для ряда конструкционных материалов при постоянных условиях процесса вытяжки;  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  — коэффициенты, учитывающие влияние относительной массы бойка  $\alpha$ , величины радиуса закругления матрицы  $R_M$ , относительной толщины заготовки, а также наличие смазки на поверхности заготовки и матрицы и ее качество.



Рис. 2. Экспериментальные образцы из ниобия

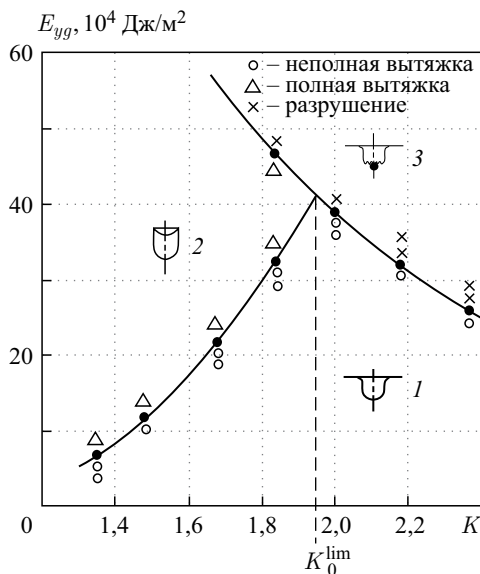


Рис. 3. График штампуемости сверхчистого ниобия

В настоящее время полностью отсутствуют исследования штампуемости не только сверхчистого ниобия, но и ниобия любой чистоты при гидроударном нагружении. Поэтому оценка штампуемости сверхчистого ниобия при гидроударном нагружении путем определения  $K_0^{lim}$  является актуальной задачей. Методика оценки деформационных свойств различных металлов при гидроударном нагружении предложена в работе [4]. Здесь в качестве критерия штампуемости используется значение предельной степени вытяжки [4]. Фото экспериментальных образцов и полученный график штампуемости сверхчистого ниобия приведены на рис. 2 и 3.

Из представленного графика штампуемости видно, что кривые графика (кривые штампуемости) являются границами трех характерных областей. Область 1 определяет такие соотношения удельной энергии бойка  $E_s$  и начальных степеней вытяжки  $K$ , при которых можно получить только неполную вытяжку, т. е. деталь всегда будет с фланцем. Область 2 определяет соотношение параметров, при которых происходит полная вытяжка заготовки (всегда без фланца), а область 3 характеризуется тем, что здесь при любых соотношениях энергии бойка и начальной степени вытяжки заготовка разрушается. Общая для всех трех областей точка на кривых штампуемости соответствует предельной степени вытяжки  $K_0^{lim}$ . Значению предельной степени вытяжки соответствует только одна опре-

деленная величина удельной энергии удара, обеспечивающая полную вытяжку заготовки, в то время как любой другой степени вытяжки (меньше предельной) соответствует определенный диапазон энергии бойка, в котором обеспечивается полная вытяжка заготовки. Этот диапазон уменьшается по мере увеличения степени вытяжки и приближения ее к предельной, следовательно, чувствительность ниобия к избыточной энергии возрастает с увеличением степени вытяжки.

В результате построения кривых штампуемости установлено значение предельной степени вытяжки сверхчистого ниобия, величина которой  $K_0^{\text{lim}} = 1,92$ . Сравнив полученное значение предельной степени вытяжки сверхчистого ниобия  $K_0^{\text{lim}} = 1,92$  с предельными степенями вытяжки других материалов при гидроударном нагружении в таких же условиях, приведенных в работе [5] (например, для меди (М1М), алюминиевого сплава (АМцМ) эти показатели соответственно равны 1,91, 1,94), можно сделать вывод о хорошей штампуемости сверхчистого ниобия при гидроударном нагружении.

Полученные результаты позволили установить энергетические показатели процесса гидроударной вытяжки полуячеек резонатора из сверхчистого ниобия и разработать технологический процесс изготовления. По результатам проектирования была изготовлена оснастка и заготовки, которые штамповались в матрицу, показанную на рис. 4.

Отработка технологии гидроударной вытяжки, впрочем, как и любой другой, требует больших затрат времени и материалов, а с учетом высокой стоимости заготовок из ниобия было принято решение обрабатывать технологию штамповки на материале АМцМ. Это позволило минимизировать количество экспериментов на меди (М1М) и сверхчистом ниобии, а значит, заметно уменьшить стоимость работ. Полученные результаты отработки технологии использовали для определения всех технологических по-



Рис. 4. Оснастка для гидроударной штамповки полуячеек резонатора



Рис. 5. Полуячейки из меди и алюминия (слева) и из ниобия (справа), изготовленные методом гидроударной штамповки на прессе СФТ-510

казателей для других материалов в соответствии с их прочностными и пластическими свойствами, выявленными при испытаниях как на растяжение, так и на штампуемость. Таким образом, удалось получить готовые детали с первой заготовки как для меди, так и для сверхчистого ниобия. Отштампованные полуячейки из меди и алюминия, а также сверхчистого ниобия приведены на рис. 5.

### ТОЧНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

Для определения точности изготовления полуячеек резонатора выбраны два размера: внутренний диаметр в области экватора резонатора  $D_{eq}^{in}$  и внутренний диаметр в области ириса (место стыковки резонатора с трубкой дрейфа)  $d_{iris}^{in}$ . Это главные размеры полуячеек, по которым они электронным лучом свариваются друг с другом и с трубками дрейфа. К этим размерам предъявляются самые высокие требования, так как разнотолщинность стенок даже в 0,1 мм уже вызывает проблемы при сварке и считается недопустимой. После штамповки эти размеры подвергаются механической обработке резанием, а с учетом того, что сверхчистый ниобий очень плохо обрабатывается, допуски на механическую обработку должны быть минимальными как по линейным размерам, так и по эллипсности. В отштампованных полуячейках (по две каждого из материалов) измерялись диаметры  $D_{eq}^{in}$  и  $d_{iris}^{in}$  с точностью до 0,05 мм в двух взаимно-перпендикулярных направлениях — вдоль и поперек прокатки. Результаты измерений приведены в таблице. Кроме диаметров  $D_{eq}^{in}$  и  $d_{iris}^{in}$  здесь приведены их отклонения от номинального значения  $\Delta D_{eq}^{in}$  и  $\Delta d_{iris}^{in}$  соответственно, а также толщина исходного листа  $S_0$ .

Как видно из таблицы, точность гидроударной штамповки очень высокая, так как отклонение измеряемых диаметров не превышает 0,1 мм, что является недостижимым результатом для инструментальной штамповки. Фактически такие отклонения характерны для процессов обработки металлов резанием. Для деталей таких размеров в справочниках по холодной штамповке [6, 7] приводятся допускаемые отклонения по диаметру на порядок больше ( $\pm 0,4-0,9$  мм) полученных отклонений (0,05–0,1 мм) при гидроударной штамповке.

Размеры изготовленных полуячеек

№ образца	Материал	$S_0$ , мм	$D_{eq}^{in}$ , мм	$d_{iris}^{in}$ , мм	$\Delta D_{eq}^{in}$ , мм	$\Delta d_{iris}^{in}$ , мм
1	Алюминий	2,84	206,5	78,0	-0,10	-0,10
			206,6	78,1	0	0
2	Алюминий	2,84	206,5	78,1	-0,10	0
			206,5	78,1	-0,10	0
1	Медь	2,9	206,6	78,1	0	0
			206,7	78,0	+0,10	-0,10
2	Медь	2,9	206,6	78,0	0	-0,10
			206,5	78,0	-0,10	-0,10
1	Ниобий	2,87	206,5	78,05	-0,10	-0,05
			206,6	78,0	0	-0,10
2	Ниобий	2,87	206,5	78,05	-0,10	-0,05
			206,6	78,0	0	-0,10

Что касается качества поверхности отштампованных гидроударным методом изделий, то оно определяется только качеством поверхности исходного материала. Шероховатость исходного листового сверхчистого ниобия (Китай) измеряли цифровым профилометром (модель 296, Московский инструментальный завод «Калибр» ТУ2-034-4-83). Средняя шероховатость листов  $R_a$  колебалась от 0,6 до 0,958 мкм, и эта шероховатость практически не изменилась на отштампованных изделиях. Визуальное исследование других материалов подтверждает вывод, что качество поверхности отштампованных гидроударным методом изделий определяется только состоянием исходной заготовки.

Проведенные исследования показали, что гидроударный метод штамповки полностью удовлетворяет требованиям по точности, качеству и экономичности, предъявляемым к методу изготовления сверхпроводящих ниобиевых резонаторов.

### МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ РЕЗОНАТОРА

В процессе изготовления резонаторов необходимо обрабатывать резанием заготовки, отштампованные полуячейки, трубки дрейфа и фланцы. Заготовка для штамповки полуячеек изготавливалась из квадрата  $290 \times 290$  мм: методом водоструйной резки вырезается круг  $\varnothing 285$  мм. Процесс проходит в воде при комнатной температуре и не вызывает технических сложностей.

После штамповки полукамер необходима токарная обработка области экватора и ириса. Сверхчистый ниобий относится к высокопластичным металлам, но труднообрабатываемым резанием, подобно алюминию, меди, нержавеющей стали, платине, золоту, никелю и др. Однако обработка резанием сверхчистого ниобия по сравнению с обработкой перечисленных металлов значительно сложнее. При резании всегда присутствует тенденция к привариванию, налипанию ниобия к режущей пластине, происходит интенсивный износ режущей кромки, образуются задиры на обрабатываемой детали, возрастает микротвердость в несколько раз на поверхности среза.

Особое внимание должно быть уделено геометрии резца и качеству заточки его граней — грани должны быть очень острые. Даже покрытия режущих пластинок увеличивают радиус режущей кромки, что ухудшает процесс резания ниобия. Передний угол резания выбирают большим, вплоть до  $55^\circ$ , задний угол — около  $10^\circ$ . Эти рекомендации легко выполнить, используя режущие пластины из быстрорежущей стали. Однако оказалось, что при обработке ниобия быстрорежущая сталь очень быстро истирается и за один проход мы не можем отрезать фланец. Необходимо останавливать процесс и затачивать резец, а это крайне нежелательно, так как страдает точность выполняемой операции.

В нашем случае для выполнения операции резания были применены резцы с твердосплавными пластинками Т15К6, ВК8 и быстрорежущие резцы Р6М5. Испытания проведены в широком диапазоне скоростей — от 18 до 210 м/мин. Наилучшие результаты показали резцы с пластинками ВК8. При испытаниях выяснилось, что сверхчистому ниобию свойственно образование очень прочного заусенца, с которым трудно справиться, и нужны индивидуальные приемы по его удалению, чтобы не повредить изготавливаемую деталь.

Для фиксации отштампованных полуячеек в токарном патроне было разработано специальное зажимное устройство (рис. 6), позволяющее обрабатывать экватор и ирис за



Рис. 6. Детали устройства механической обработки полуячеек

были очень щадящими: небольшая глубина резания — не более 0,2 мм; минимальная ручная подача.

одну установку на станке. Вначале это устройство зажимается в токарном патроне и проверяется биение базовых поверхностей. После этого обрабатываемая деталь зажимается прижимным кольцом и проверяется биение детали в местах обработки. При такой схеме обеспечивается параллельность обрабатываемых торцов и их перпендикулярность оси аксиальной симметрии детали.

Обработка резанием проводилась под постоянной струей смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), что предотвращало нагрев в зоне резания более 80 °С. В качестве СОЖ применяли немецкую эмульсию DASCOOL-S44, которую растворяли водой в отношении 1:20. Использовали изолированную подачу СОЖ. Режимы резания



Рис. 7. Изготовленные детали одноячеечного резонатора (слева) и резонатор в сборе (справа)

Предварительно в качестве начальной фазы освоения технологии изготовления высокочастотных сверхпроводящих резонаторов были разработаны и созданы несколько экспериментальных образцов ячеечных резонаторов из модельных материалов (алюминий (АМцМ) и медь (М1М)). Отдельные детали резонатора и резонатор в сборе представлены на рис. 7.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований разработан полный производственный цикл изготовления деталей сверхпроводящих ниобиевых резонаторов и создана вся необходимая технологическая оснастка. Исследовано влияние высокоскоростной деформации на способность высокочистого ниобия к глубокой вытяжке. Экспериментально получена



диаграмма штампуемости ниобия для гидроударной штамповки, и определены предельные степени вытяжки модельных материалов и сверхчистого ниобия: 1,94 для Al (АМцМ), 1,91 для Cu (М1М), 1,92 для Nb. Впервые методом гидроударной штамповки из высокочистого ниобия изготовлены полуячейки сверхпроводящих резонаторов с отклонением размеров от номинала не более 0,1 мм. Определены параметры механической обработки отштампованных деталей ниобиевых резонаторов перед сваркой. Применение метода гидроударной штамповки представляется перспективной технологией для изготовления сверхпроводящих резонаторов из ниобия.

**Благодарности.** Авторы статьи глубоко благодарны коллективу ученых и специалистов исследовательского центра DESY (Гамбург, Германия) за оказанное содействие и постоянный интерес к работе. Особую признательность мы выражаем Вальдемару Сингеру, Ксению Сингер, Алексею Ермакову и Александру Новицкому за ценные консультации и предоставленные научные материалы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Singer W., Iversen J., Schmidt A.* Technical Specifications for the Series Mechanical Fabrication of Superconducting 1.3 GHz Cavities for the European XFEL. DESY. Hamburg, 2009.
2. *Singer W. et al.* Hydroforming of Elliptical Cavities // *Phys. Rev. ST Accel. Beams.* 2015. V. 18. P. 022001.
3. *Петраковский В. С., Журавский А. Ю.* Оценка штампуемости сверхчистого ниобия при гидроударном нагружении // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. материалов 8 МНТК.* Минск, 2013. Кн. 3. С. 147–156.
4. *Петраковский В. С.* Оценка штампуемости листового металла при гидроударной вытяжке // *Импульсные методы обработки материалов: Сб. Минск: Наука и техника, 1979. С. 77–81.*
5. *Петраковский В. С., Здор Г. Н., Журавский А. Ю.* Инженерный метод расчета процесса импульсной вытяжки листовых материалов // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. материалов 6 МНТК.* Минск, 2011. Кн. 3. С. 126–130.
6. *Романовский В. П.* Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
7. *Зубцов М. Е.* Листовая штамповка. М.; Л.: Машгиз, 1958. 459 с.

Получено 3 июля 2015 г.