

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13-2005-130

В. Ю. Батусов, Ю. А. Будагов, Ю. А. Кульчицкий¹,
М. В. Ляблин, М. Несси², Н. А. Русакович,
А. Н. Сисакян, Н. Д. Топилин, Д. И. Хубуа³

АДРОННЫЙ ТАЙЛ-КАЛОРИМЕТР УСТАНОВКИ АТЛАС:
ОПЫТ СОЗДАНИЯ ПРОТОТИПОВ
И МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА МОДУЛЕЙ

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ИФ НАБ, Минск

²ЦЕРН, Женева

³ИФВЭ, ТГУ, Тбилиси

2005

ВВЕДЕНИЕ

Сотрудничество АТЛАС подготавливает многоцелевой эксперимент по изучению протон-протонного взаимодействия при 14 ТэВ на Большом адронном коллайдере (ЛHC) в ЦЕРН (Женева).

Параметры детекторов установки АТЛАС позволяют проводить исследования широкого круга ожидаемых физических процессов, а также работать в области новых, неожиданных физических явлений [1].

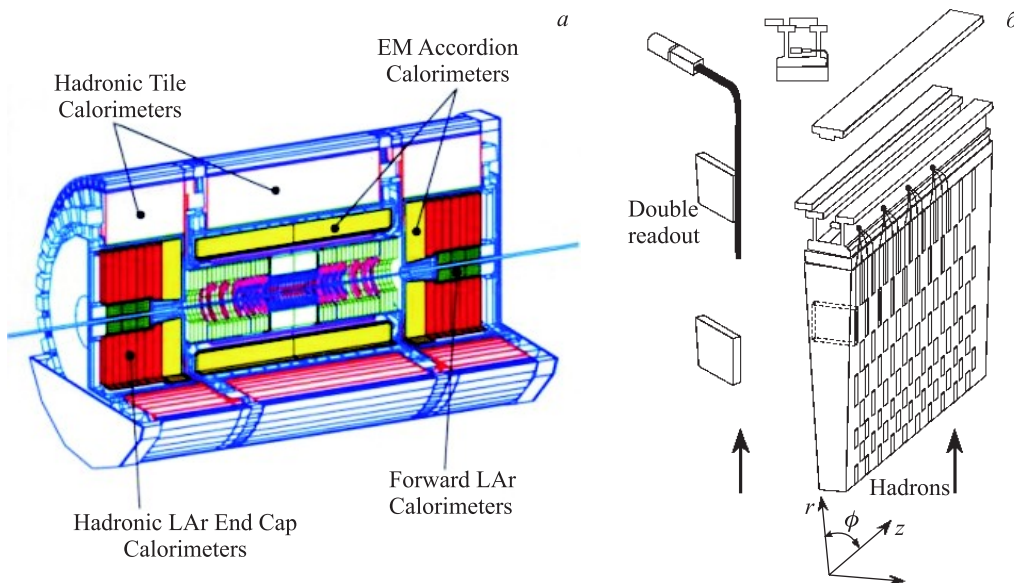


Рис. 1. Схема расположения калориметрической системы АТЛАС (а) и модуля баррельной части адронного калориметра относительно пучка (б)

Одной из важнейших частей установки АТЛАС является адронный калориметр, имеющий т. н. сотовую структуру: сцинтиллирующие пластины (тайлы) вставлены в стальной поглотитель и считываются спектросмещающими оптическими волокнами. Тайлы расположены в плоскости, перпендикулярной направлению сталкивающихся пучков (рис. 1). Калориметр состоит из трех секций: центральной (barrel) и двух дополнительных (extended barrels); каждая из этих секций собрана из 64 модулей клиновидной формы; длина и вес модуля в основной (баррельной) части калориметра равны соответственно 5,6 м и 20 т, а в дополнительных частях — 2,8 м и 10 т. Модуль строится из

субмодулей, установленных с требуемой относительной линейной и угловой точностью на общем основании — прямой мощной балке (girder).

Проектные требования к калориметру [1]:

- энергетическое разрешение струи $\sigma/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$;
- энергетическая линейность $\pm 2\%$.

Необходимо также выполнение ряда жестких проектных требований по точностям к механической сборке модулей. Основное из них — допустимая неплоскостность боковой поверхности модуля ($1,9 \times 5,6$ м): она не может превосходить 600 микрон. Эта точность высока и ее обеспечение представляет собой сложную инженерно-техническую задачу, если учесть вес и габариты модуля и специфику его структуры: модуль, по сути дела, набран из стальных пластин (ядерных поглотителей, рис. 2), а общее количество абсорберов в калориметре — несколько сотен тысяч с производственным допуском по контуру ± 100 мкм и по толщине ± 30 мкм. Вес абсорбера в калориметре достигает нескольких тысяч тонн. Для достижения наиболее приемлемого сочетания требований физики, технологии и точности производства в конструкции модулей калориметра установки АТЛАС применены комбинации соединений: клеевых, болтовых и сварных.

Принципиальная конструктивная схема калориметра, определяемая физическими требованиями, должна быть обеспечена адекватными технологиями производства компонентов, имеющего промышленный масштаб, равно как и технологией сборки субмодулей, модулей и полномасштабного калориметра. Понятно, что на всех названных стадиях потребовалась разработка и применение соответствующих методов прецизионного метрологического контроля, включая методику лазерного контроля, впервые внедренных в современную практику сборки особо крупных детекторов. Очевидно поэтому, что в задаче выступают три ключевых проблемных этапа:

- 1) высокоточное промышленное производство $\approx 300\,000$ компонентов субмодулей: мастерных и спейсерных пластин;
- 2) высокоточная сборка субмодулей и их высокоточное позиционирование на общей балке в модуле;
- 3) Создание и применение прецизионной метрологии для контроля точности сборки калориметра.

Субмодули при сборке модулей должны быть установлены на общую балку так, чтобы положение их оси симметрии было вертикально с точностью 0,15 мм /1,6 м, что соответствует восьмой степени точности при машинной обработке деталей. Достижение подобной точности (при том, что один модуль содержит 19 субмодулей каждый весом около 1 т) стало возможным благодаря разработке и внедрению в ОИЯИ уникального метода *лазерного контроля*.

Разворачиванию в ОИЯИ полномасштабного производства субмодулей и модулей предшествовали принципиально важные этапы научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок. Успешное завершение этих этапов продемонстрировало сотрудничеству АТЛАС, что в ОИЯИ имеются необходимые специалисты и техническая база для создания главной, т. н. баррельной, части адронного тайл-калориметра. Этими этапами были:

- создание в кратчайшие сроки (в течение двух-трех месяцев в 1994 г.) метрового прототипа субмодуля калориметра с качеством исполнения,

уверенно поставившим ОИЯИ в число полноправных участников международной коллаборации;

- создание в ОИЯИ в 1996 г. полномасштабного прототипа модуля, т. н. «модуля 0», высокое качество сборки которого и продемонстрированная методика прецизионного контроля решили вопрос о сборке именно в Дубне всех 65-ти шестиметровых модулей.

Разработка и применение созданной в ОИЯИ методики лазерного контроля точности сборки (≈ 50 мкм) шестиметровых 20-тонных модулей, ставшей новым словом в метрологии, кроме достижения нужных точностей позволили наладить высокий темп производства — два модуля за месяц. Поддержание данного темпа гарантировало выполнение международного обязательства ОИЯИ в срок: 3 июля 2002 г. последний, 65-й модуль адронного тайл-калориметра был доставлен в ЦЕРН.

Допуски, требуемые и достигнутые при сборке модулей с помощью прецизионных инструментов и лазерной методики, являются экстраординарными, т. к. модули изготовлены не на точных станках, а по сути дела собраны «вручную», между тем как обеспеченная при этом неплоскостность боковых поверхностей модулей 0,2–0,4 мм на площади $\approx 2 \times 6$ м является исключительной, сопоставимой с точностью обработки, достижимой на крупных современных многометровых фрезерных станках.

Созданная в ОИЯИ культура прецизионной сборки может быть востребована не только в сооружении *калориметра*, но также и всего АТЛАСа и собственно ускорителя ЛНС.

Решив сложную научно-техническую проблему прецизионной сборки *модулей* баррельной части калориметра [2], сотрудничество в последующем экспериментально продемонстрировало соответствие параметров калориметра (разрешение и линейность) проектным физическим величинам. При исследовании в тестовых сеансах фрагментов калориметра было установлено: калориметр АТЛАС соответствует требованиям эксперимента по энергетическому разрешению $50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$ и линейности $\pm 2\%$ [3], что ставит его в число наиболее точных устройств подобного типа.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Начало работ в ОИЯИ по адронному калориметру АТЛАС отсчитывается с 23.02.94, когда была достигнута договоренность об изготовлении в ОИЯИ 120 мастерных и более 500 спейсерных высокоточных стальных пластин ядерных абсорберов для прототипа — т. н. «метрового» субмодуля. Прототип субмодуля представляет собой слоистую систему из 55 периодов: период содержит две большие мастерные плиты толщиной 5 мм с двумя слоями меньшего размера пластин — спейсеров толщиной 4 мм, расположенных на мастерной пластине с интервалом 100 мм и смещенных относительно предыдущих на 100 мм; толщина периода 18 мм (рис. 2). Допуск по толщине составляет $\pm 0,05$ мм для мастерных и $\pm 0,1$ мм для спейсерных пластин. Эти требования по точности являются исключительными, т. к. существенно превосходят величины, регламентируемые ГОСТ для этих толщин ($+0,3 \div -0,4$ мм). Точность изготовления всех пластин по контуру составляет $\pm 0,1$ мм при максимальном

линейном размере 1821 мм для мастерных и 200–370 мм для спейсерных пластин.

Мастерные плиты толщиной 5 мм представляют собой в плане равнобедренную трапецию с высотой 1821 мм и основаниями 375 и 196 мм [4]. По предварительному проекту каждая мастерная плита имеет 41 высокоточное отверстие диаметром 8Н7 мм; 36 из них расположены по оси симметрии плиты с позиционным допуском ± 50 мкм, 5 отверстий — на расстоянии 20 мм от большего основания (рис. 2).

Спейсерные пластины 18 типоразмеров толщиной 4 мм представляют собой в плане также равнобедренную трапецию высотой 99 мм и с различной шириной оснований, зависящей от положения спейсерных пластин на мастерной плите при их сборке в submodule. Каждая спейсерная пластина имеет два высокоточных отверстия диаметром 8Н7 мм, расположенных по оси симметрии пластины на расстоянии 70 мм друг от друга с позиционным допуском ± 50 мкм.

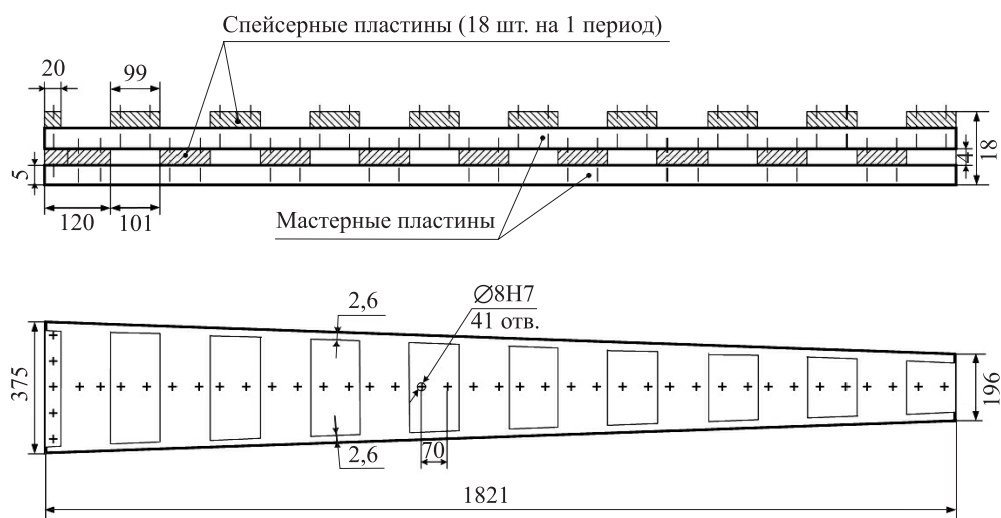


Рис. 2. Схематичное изображение одного из 55 периодов метрового прототипа submodule

В собранном виде мастерные пластины отделены друг от друга спейсерными пластинами, уложенными с равными промежутками в плане и в шахматном порядке по высоте (рис. 2). Все мастерные пластины соединены между собой 41 стержнем (установленными во все отверстия) и закрепленными гайками. Дополнительно каждый спейсер зафиксирован на мастерной плите двумя эластичными втулками, что весьма точно задает относительное расположение «мастер/спейсер».

2. ПРОИЗВОДСТВО МАСТЕРНЫХ И СПЕЙСЕРНЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ МЕТРОВОГО ПРОТОТИПА СУБМОДУЛЯ

Для производства мастерных и спейсерных пластин на Новолипецком металлургическом комбинате (НЛМК) была заказана специальная партия горячекатанной стали марки «сталь 10» толщиной 5 мм для мастерных плит и толщиной 4 мм для спейсерных пластин. Для этих толщин при стандартной ширине листа 1,5 м ГОСТ 19903-74 определяет допуск на толщину $+0,3 \div -0,4$ мм. Между тем по проекту субмодуля допуск на толщину листа должен был быть на порядок (!) жестче и составлять $\pm 0,05$ мм для мастерных плит и $\pm 0,1$ мм для спейсерных пластин. В итоге изготовление 5 т листовой стали нужной толщины приобрело характер технико-экономической проблемы: неоправданно большие цены и непредсказуемые трудозатраты.

Однако проведенное специалистами ОИЯИ на заводе НЛМК детальное техническое исследование процесса проката и анализ заводских методов и средств контроля толщины листа убедили руководство НЛМК в принципиальной технической возможности прокатного комплекса изготовить листы с минимальными только положительными отклонениями от номинала.

В итоге ОИЯИ получил листы только с положительными допусками $+0,1 - +0,14$ мм для 5-мм листов и $+0,01 - +0,10$ мм для 4-мм листов. Эти допуски были близки к требуемым и при этом были почти на порядок точнее, чем определяет ГОСТ.

Ввиду малости партии мастерных плит (120 шт.) и спейсерных пластин (500 шт.) их производство было решено осуществлять механической обработкой. Учитывая крайне жесткие сроки, изготовление спейсерных пластин поручили отделу опытного экспериментального производства ЛЯП, а изготовление мастерных пластин — Опытному производству ОИЯИ. Заготовки для пластин были нарублены на гильотине с припуском $+3$ мм для спейсерных пластин и $+6$ мм для мастерных пластин. Для достижения проектной толщины изготавливаемого прототипа субмодуля предложено нестандартное решение: толщины заготовок для спейсерных пластин были уменьшены методом химического травления на Савеловском механическом заводе.

При изготовлении спейсерных пластин требуемых точностей удалось достичь по следующей схеме: сначала сверлили высокоточные отверстия, а затем, используя их как базы, пластины обрабатывали по контуру строганием оснований пакета пластин и фрезерованием боковых сторон пластин поодиночке.

Требуемые высокие точности при изготовлении мастерных пластин достигнуты по схеме: сначала также сверлили высокоточные отверстия, а затем, используя три из них как базы, пластины обрабатывали по контуру фрезерованием по четыре пластины в пакете.

Разработанная технология производства оказалась адекватной жестким требованиям по точности: каждая из мастерных и спейсерных пластин прошла метрологический контроль на соответствие требуемым допускам.

В мае 1994 г. пластины были отправлены в ЦЕРН для сборки дубненского прототипа метрового субмодуля. Перед отправкой все пластины прошли антикоррозионную обработку.

Детальное изучение процесса производства горячекатаной стали и возникающих в дальнейшем проблем при обработке этих листов (наличие окалины на поверхностях листов, неравномерности в толщине по полю листа, обусловленные чечевицеобразной формой поперечного сечения листа, и пр.) привело к заключению: для массового производства мастерных и спейсерных пластин TILE Cal коллаборацией необходимо использовать полосы шириной 420 мм и длиной 1620 мм из холоднокатаной стали чешского производства марки CSN 11347 (аналог российской стали Ст.3). Полосы из этой стали имели требуемый допуск на толщину листа $\pm 0,03$ мм.

3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СУБМОДУЛЕЙ И МОДУЛЕЙ

В июне 1994 г. в ЦЕРНе при участии специалистов ОИЯИ был собран прототип метрового субмодуля из дубненских пластин (рис. 3). Указанные дубненской группой существенные конструкторско-технологические недостатки первоначального проекта субмодуля были выявлены в процессе его сборки. Эти недостатки крайне затрудняли массовое производство субмодулей. При сборке подобного типа изделий достаточно иметь две базы, между тем как мастерные пластины собираемого субмодуля имели 41 высокоточное отверстие, которые играли роль установочных баз. При сборке субмодуля наличие явно избыточного числа однотипных баз приводило к трудности установки каждой последующей мастерной пластины. Более того: из-за малой жесткости соединительных стержней и отсутствия других установочных баз вся конструкция «закручивалась» по высоте по мере установки мастерных пластин.

Вследствие разнотолщинности пластин толщина метрового субмодуля в разных его точках по периметру отличалась на 1–2 мм. Для устранения этого недостатка необходимо было селективно подбирать пластины, что,

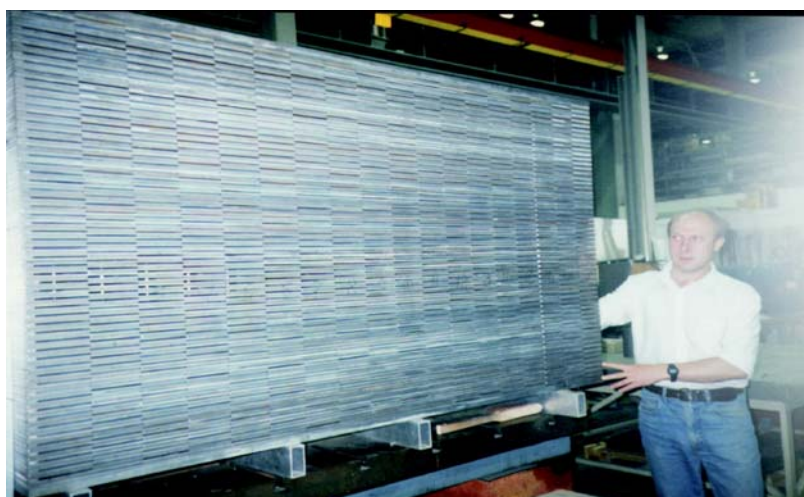


Рис. 3. Июнь 1994 г. ЦЕРН. Дубненский прототип однометрового субмодуля в сборе

естественно, недопустимо при массовом производстве. Наконец, собранная конструкция не имела достаточной жесткости, и для фиксации мастерных пластин друг относительно друга необходимо было вводить дополнительные жесткие соединительные элементы.

Эти недостатки неприемлемы в полномасштабной конструкции модуля и тайл-калориметра в целом; поэтому был разработан целый ряд принципиальных конструкторско-технологических решений [5], которые впоследствии были воплощены в конструкции субмодулей, модулей и в технологии их сборки.

В конструкцию субмодулей ввели (рис. 4.):

- а) два шпоночных паза на основаниях трапеции по осевой линии;
- б) пластины (стрипы) по четырем углам трапеции.

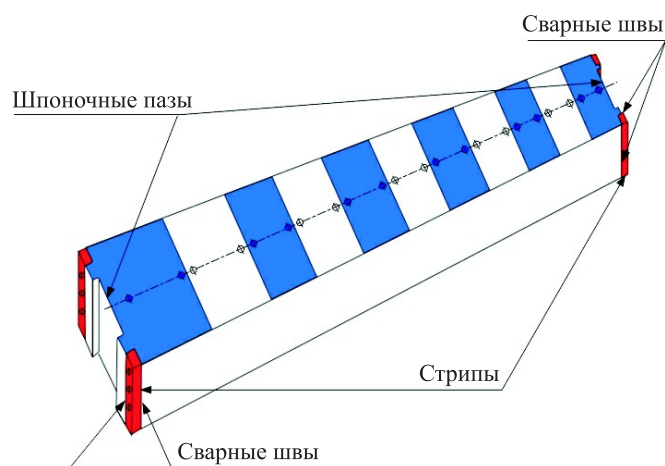


Рис. 4. Схематический вид субмодуля: введены установочные шпоночные пазы и четыре угловых стрипа

Для достижения требуемой высоты субмодуля, не зависящей от разброса пластин по толщине, коллаборацией было решено мастерные и спейсерные пластины соединять между собой эпоксидным клеем; клей, как предполагалось, компенсирует разнотолщинность пластин; механическая прочность клея при этом была не столь важна, т. к. мастерные и спейсерные пластины соединялись между собой дополнительно стальными пружинными втулками, предотвращающими относительные смещения пластин.

В соответствии с этим дизайном группой ОИЯИ была предложена конструкция приспособления для сборки субмодулей, детальные чертежи которого по поручению коллаборации были выполнены коллегами в Аргоннской национальной лаборатории (США).

Введение шпоночных пазов в мастерных плитах при производстве субмодулей (рис. 4) коренным образом изменило принцип сборки модулей.

По осевой линии приспособления для сборки субмодулей (рис. 5) установлены два ограничительных кронштейна, которые играют роль жестких баз для правильной относительной укладки мастерных пластин.



Рис. 5. Декабрь 1998 г. ОП ОИЯИ. Полимеризация субмодуля в специальном приспособлении (стапеле) под нагрузкой

Шпоночные пазы в мастерных плитах сделали возможным:

а) легко располагать плиты между кронштейнами одна на другую в пределах допустимого относительного сдвига;

б) собирать субмодуль вертикально и симметрично в плане.

По окончании укладки требуемого количества мастерных и спейсерных пластин на склеиваемый субмодуль укладывается толстая стальная плита и притягивается 14 шпильками к нижней плите через проставки калиброванной высоты. В таком состоянии клей полимеризуется. Четыре пластины по углам субмодуля вваривают (после полной полимеризации клея) до извлечения субмодуля из приспособления, что придает субмодулю необходимую жесткость и сохранность формы при любых манипуляциях с ним. Пластины имеют резьбовые отверстия для подсоединения подъемно-такелажного оборудования, а также для крепления субмодуля на балке при сборке модуля.

При сборке модулей (рис. 6) шпоночные пазы в широком основании субмодулей позволили с требуемой точностью центрировать положение субмодулей при установке их на общей балке, а наличие угловых пластин (стрипов) — крепить субмодули болтами к балке и регулировать положение субмодулей относительно вертикальной оси для получения высокой степени плоскостности (до 0,2 мм на площади $1,9 \times 5,6$ м) боковых поверхностей модуля. В шпоночные пазы при узком основании субмодулей ввариваются две длинные продольные передние плиты (front plates), соединяющие субмодули по верху модуля и фиксирующие их требуемое относительное расположение. Были предложены технологически оправданные, выбранные с учетом критериев цена-качество допуски на изготовление деталей и узлов как субмодулей и модулей, так и технологического оборудования по их сборке. Исходя из принятых допусков было рассчитано предельное значение неплоскостности боковых поверхностей

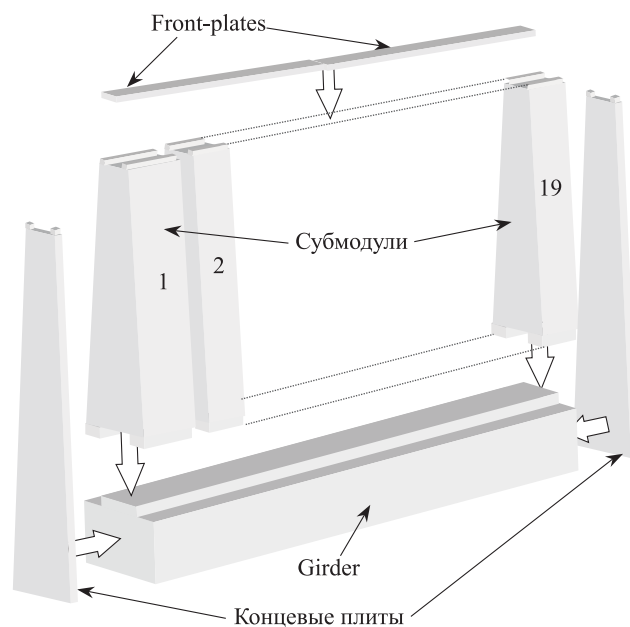


Рис. 6. Схема сборки модуля

модуля (0,6 мм на площади $1,9 \times 5,6$ м) и заданы номинальные расстояния между модулями в калориметре (1,5 мм) [6]. Эти два ключевых параметра были предметом особого метрологического контроля при сборке модулей и решающим образом определили успех как предсборки барреля на поверхности земли [7], так и финальной сборки согласно проектным допускам в подземном павильоне (декабрь 2004 г.).

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОРАБОТКА СОЗДАВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

После утверждения окончательной схемы конструкции тайл-калориметра и уточнения геометрических параметров субмодулей и модулей коллективу ОИЯИ было поручено приступить к детальной проработке необходимой технической документации.

Изготовление субмодулей планировалось в нескольких институтах, часть из которых не располагала необходимыми производственными мощностями. Поэтому особо значительным нововведением стало предложение иметь 19 субмодулей на балке в модуле вместо шести. Длина отдельного субмодуля уменьшилась с $\cong 1$ м до $\cong 300$ мм и, соответственно, вес субмодуля уменьшился с 3 т до 800–900 кг [6]. Впоследствии это изменение кардинально упростило сборку модулей и, что особенно существенно, открыло возможность прецизионного метрологического контроля сборки.

Таким образом, конструкция модулей стала детальной: оптимизировались размеры мастерных и спейсерных пластин, угловых пластин, резьбовых от-

верстий, сварных швов и др. К началу 1995 г. основные решения по сборке субмодулей и модулей были найдены [8] и получили официальный статус. ОИЯИ представил также предложения по подъемно-такелажному оборудованию для субмодулей и модулей, варианты конструкции стапеля сборки модулей и принципиальную схему приспособления для транспортировки модуля в ЦЕРН.

5. РАЗРАБОТКА ПРИСПОСОБЛЕНИЯ (СТАПЕЛЯ) ДЛ Я СБОРКИ МОДУЛЯ-0

В ноябре 1994 г. на совещании в Барселоне на ОИЯИ была возложена сборка модуля-0, а также всех последующих баррель-модулей и их компонентов с проектированием и изготовлением всего необходимого технологического и подъемно-такелажного оборудования.

К середине 1995 г. конструкция модуля-0, как полномасштабного прототипа модулей тайл-калориметра, была утверждена и в КО ЛЯП ОИЯИ началось проектирование стапеля для сборки модуля-0 [9].

После одобрения коллаборацией конструкции стапеля и предложенной технологии сборки модулей проект стапеля был в ОИЯИ завершен [10] и в конце 1995 г. ОИЯИ заключил контракт с компанией «Nuclear & Vacuum» (Бухарест, Румыния) на его изготовление. В марте 1996 г. стапель для сборки модулей был доставлен в Дубну.

6. ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СКЛЕЙКИ ПЛАСТИН

Накопленный коллаборацией опыт изготовления метровых прототипов субмодулей и анализ возможностей европейских металлургических комбинатов при горячей и холодной прокатке листовой стали показали: сборка субмодулей с малым принятым допуском по высоте даже при очень малых допусках на толщину листа невозможна.

Минимальные допуски на толщину листа холоднокатаной стали чешского производства составляют $\pm 0,03$ мм. Стандартный субмодуль имеет 16 периодов, отчего его высота зависит от разброса толщин 64 пластин; следовательно, можно было ожидать субмодули с отклонениями по высоте ± 2 мм; модули же, собранные из таких субмодулей, могут иметь различия по длине в пределах ± 38 мм, что недопустимо.

В середине 1995 г. коллаборация приняла решение:

- 1) установить высоту субмодуля на $\cong 3$ мм больше, чем можно получить при сборке субмодулей из пластин с максимальным положительным допуском;
- 2) равномерное распределение пластин по высоте субмодуля обеспечить за счет компенсирующих слоев эпоксидного клея между пластинами.

Летом 1995 г. в ЦЕРНе с участием ОИЯИ были склеены три субмодуля. Для обезжиривания склеиваемых поверхностей применена пескоструйная обработка пластин. К недостаткам этого «наивного» метода можно отнести его дороговизну, вредность, низкую скорость обработки (10–15 мин на 1 м² поверхности), а также уменьшение толщины пластин на 0,02 мм.

Для удешевления процесса обезжиривания пластин в ОИЯИ были проведены испытания клеевых соединений пластин при различных технологиях обезжиривания поверхностей [11]: пескоструйная обработка, обработка стальными щетками, обработка абразивной бумагой, очистка пластин в горячей воде с добавлением химического обезжиривателя.

Самое прочное клеевое соединение было при пескоструйной обработке поверхностей пластин (23 Н/мм^2 на срез и $\approx 7,5 \text{ Н/мм}^2$ на отрыв). Самая низкая, но совершенно достаточная, прочность была после обезжиривания поверхностей пластин в горячей воде с добавлением химического обезжиривателя (20 Н/мм^2 на срез и $\approx 4 \text{ Н/мм}^2$ на отрыв).

Учитывая исключительную дешевизну этого последнего метода, его высокую производительность (1–1,5 ч на все пластины для одного субмодуля), а также достаточность прочности получаемого при этом клеевого соединения, решили использовать данный метод в дальнейшем при склейке субмодулей.

Второй проблемой, возникшей при склейке субмодулей, была необходимость дозированного нанесения клея на поверхность. При склейке первых субмодулей для смешивания компонентов клея и нанесения его на поверхность использовались стандартные технологические пистолеты. Из-за большого расхода клея (общая поверхность склейки на одном субмодуле составляет около 24 м^2) этот метод неприемлем для массового производства субмодулей.

В ОИЯИ было использовано простое и удобное приспособление для дозированного нанесения клея на поверхность при склейке субмодулей: две алюминиевые рамки с поперечными пластинами. В пластинах просверлены сквозные отверстия необходимого диаметра и высоты. Рамки поочередно накладываются на мастерную пластину или на соответствующий полупериод



Рис. 7. Март 1996 г. Нанесение дозированного клеевого слоя в ЦОЭП ЛЯП

спейсерных пластин, и отверстия заполняются заранее подготовленным клеем с помощью шпателя.

Это приспособление было апробировано в ОИЯИ при склейке четырех субмодулей для модуля-0 и в дальнейшем было эффективно использовано при массовом производстве всех 308 субмодулей в ОИЯИ (рис. 7, 8).

Остальные коллаборанты приобрели в промышленности специально спроектированные дорогостоящие станки-автоматы для нанесения клея; практика показала, что с использованием таких машин субмодули клеились за 3–3,5 ч, тогда как в ОИЯИ этот процесс занимал менее часа.

7. ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО КРОЯ ПЛАСТИН

Модуль-0 содержит 19 субмодулей. Для его изготовления коллаборацией было решено склеить 22 субмодуля, в том числе четыре в ОИЯИ; 18 других собирали в Протвино, Пизе, Праге, Барселоне, Аргонне, ЦЕРНе.

Производство около 4500 спейсеров 12 типоразмеров для всех 22 субмодулей было поручено ОИЯИ. Спейсеры должны были изготавливаться с



Рис. 8. Март 1996 г. ООЭП ЛЯП. Склейка одного из четырех субмодулей ОИЯИ для модуля-0

точностью $\pm 0,1$ мм. Как представлялось, наиболее подходящей технологией для изготовления такого количества спейсеров (как по срокам, так и по затратам) являлся лазерный край.

ОИЯИ провел исследовательский опрос 18 предприятий России и СНГ [12]. Были испытаны различные типы лазерных установок кроя листового материала. Наиболее подходящим для данной задачи оказался завод «Универсалмаш» (Санкт-Петербург) с лазерной установкой TRIUMF мощностью 1 кВт, с размером стола $1,8 \times 2$ м и паспортной точностью резки 0,03 мм. ОИЯИ заключил контракт с этим предприятием и к началу производства субмодулей получил необходимое количество спейсеров.

Практически все изготовленные спейсеры удовлетворяли жестким чертежным допускам. Исключение составляли около 10% спейсеров, у которых отдельные размеры лишь незначительно отличались от требуемых, что не повлияло на качество изготовленных субмодулей.

8. РАЗРАБОТКА ПОДЪЕМНО-ТАКЕЛАЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СУБМОДУЛЕЙ И МОДУЛЯ-0

Параллельно с организацией промышленного производства спейсеров велось проектирование и изготовление подъемно-такелажного оборудования (ПТКО) для субмодулей и модуля-0 [13].

Для субмодулей был спроектирован и изготовлен комплект ПТКО, включивший:

- специальные пластины для их подъема в горизонтальном положении и для укладки в транспортировочный контейнер;
- траверсу для подъема субмодуля в горизонтальном положении, позволяющую поворачивать субмодуль вокруг его продольной оси (для покраски субмодулей методом окунания в ванну);
- кантовочное приспособление для перевода субмодуля из горизонтального положения в вертикальное;
- специальные кронштейны для подъема субмодуля в вертикальном положении и установки его на балку при сборке модуля.

Для модуля-0 был спроектирован и изготовлен ПТКО-комплект, содержащий специальную траверсу, позволяющую поднимать модуль в вертикальном положении после его сборки и переводить с помощью дополнительного кантовочного приспособления в горизонтальное положение для транспортировки. Специальное кантовочное приспособление после существенной модернизации было использовано в последующем для транспортировки модуля-0 в ЦЕРН на автомашине в горизонтальном положении.

9. СБОРКА И ТРАНСПОРТИРОВКА МОДУЛЯ-0

16–19 апреля 1996 г. в ОИЯИ в соответствии с планами коллаборации была успешно проведена сборка шестиметрового баррель-модуля-0 [14]. Поскольку это был первый (из трех) «нулевых» модулей (другие два вдвое меньшего размера должны были собираться позднее в Испании и США),

то, учитывая уникальность и поучительность процесса сборки модуля, для участия в нем прибыли коллеги из других институтов.

Сборка модуля-0 велась на стапеле, изготовленном в Румынии компанией «Nuclear & Vacuum». В качестве прецизионного «сборочного стола» нами было предложено использовать шестиметровую планшайбу карусельного станка ЛЯП ОИЯИ. Это было исключительно удачное решение: использование планшайбы сняло вопрос о создании специальной монтажной зоны и дало огромную экономию времени.

Технология сборки модуля и все необходимое технологическое и подъемно-такелажное оборудование было разработано в конструкторском отделе ЛЯП ОИЯИ. Изготовление указанного оборудования осуществлено в ЛЯП. Группа специалистов для сборки модулей была сформирована из сотрудников ЛЯП. Перед началом сборки все компоненты модуля, полученные от наших коллег, прошли в ОИЯИ входной контроль на соответствие проектной документации.

В процессе сборки модуля-0 созданы технологии контролируемой точной установки несущей балки модуля в горизонтальное положение, установки субмодулей в вертикальное положение, замены установленных субмодулей в случае необходимости, приварки передней плиты к субмодулям и др. (рис. 6). Перед приваркой передней плиты были проверены соосности «9 мм»-отверстий всех 19 субмодулей, стоящих в один ряд на модуле (при этом глубина каждого из 22 отверстий составляет 5640 мм!) на всех уровнях поочередной установкой в них стержня диаметром 8 мм и длиной 6 м. Эта методика контроля обеспечила соосность субмодулей в пределах 1,5 мрад.

Выполнение самого главного требования к точности изготовления модуля — неплоскостности в пределах 0,6 мм на поверхности 1,9 × 5,6 м — контролировалось нами с помощью специального промышленного калибра — метровой поверочной линейкой достаточной жесткости. Неплоскостность боковых поверхностей модуля контролировалась дважды: до приварки передней плиты и после ее приварки. Измерения показали: технология сварки была выбрана правильно, модуль практически не получил поводок от сварки и имел в итоге максимальную неплоскостность 0,45 мм/м при допуске 0,6 мм/м. Длина модуля составила 5641 мм при номинальном значении 5640 мм, что соответствует требуемому допуску.

30 апреля 1996 г. модуль-0 был отправлен в ЦЕРН (рис. 9).

Изначально планировалось перевозить модуль в Женеву в вертикальном положении. Однако при этом варианте транспортировки центр тяжести модуля располагался высоко, создавая риск опрокидывания груза при движении. Транспортировка модуля в горизонтальном положении проблематична из-за низкой жесткости модуля в узкой его части, что могло привести к пластической деформации передней плиты и в итоге к — увеличению неплоскостности боковой поверхности модуля сверх 0,6 мм.

В КО ЛЯП ОИЯИ было найдено конструкторское решение безопасной транспортировки модуля-0 на автомашине в горизонтальном положении. Специальное кантовочное приспособление было модернизировано в транспортную опору (рис. 10). По его длине с одной стороны была приварена для усиления мощная балка (швеллер № 40). С другой стороны в центре транспортной опо-

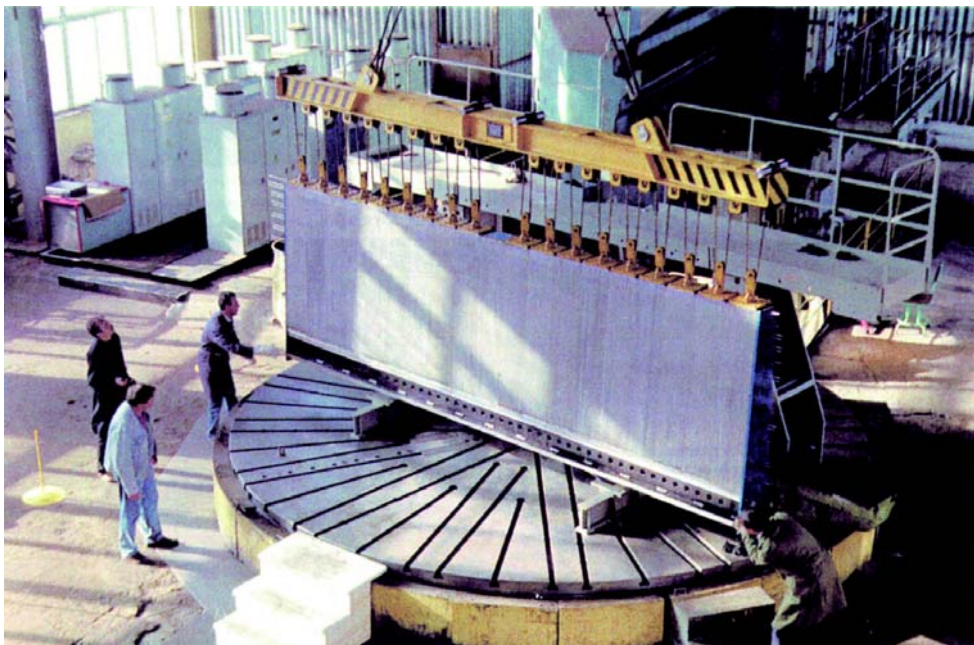


Рис. 9. Апрель 1996 г. Модуль-0 на шестиметровой планшайбе карусельного станка Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ

ры была установлена дополнительная жесткая опора. На модуль в узкой его части крепился 114-ю шпильками М12 другой швеллер № 40 [15]. Модуль с балкой укладывали на транспортную опору; эта дополнительная технологическая балка по всей длине опиралась на балку транспортной опоры, а широкая часть модуля своей несущей жесткой балкой опиралась на центральную опору транспортного приспособления. Таким образом, модуль во время транспортировки опирался на «линию» в узкой его части и «точку» в широкой его части. Дополнительная балка модуля и балка транспортного приспособления соединялись друг с другом 12-ю болтами М20, а несущая балка модуля свободно опиралась на опору. В процессе транспортировки деформации кузова автомашины, вызванные неровностью дороги, практически не передавались на модуль. Для гашения колебаний свободно висящих краев модуля в широкой его части были установлены демпфирующие элементы. Низкое положение центра тяжести модуля обеспечивало его безопасную транспортировку. В начале мая 1996 г. модуль-0 был благополучно доставлен в ЦЕРН (рис. 11).

10. СОЗДАНИЕ ПРОГРАММ КАЧЕСТВА ДЛЯ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА МАСТЕРНЫХ И СПЕЙСЕРНЫХ ПЛАСТИН

Как было сказано выше, ОИЯИ был ответствен за сборку 65 баррель-модулей и за изготовление основных деталей, составляющих субмодули:

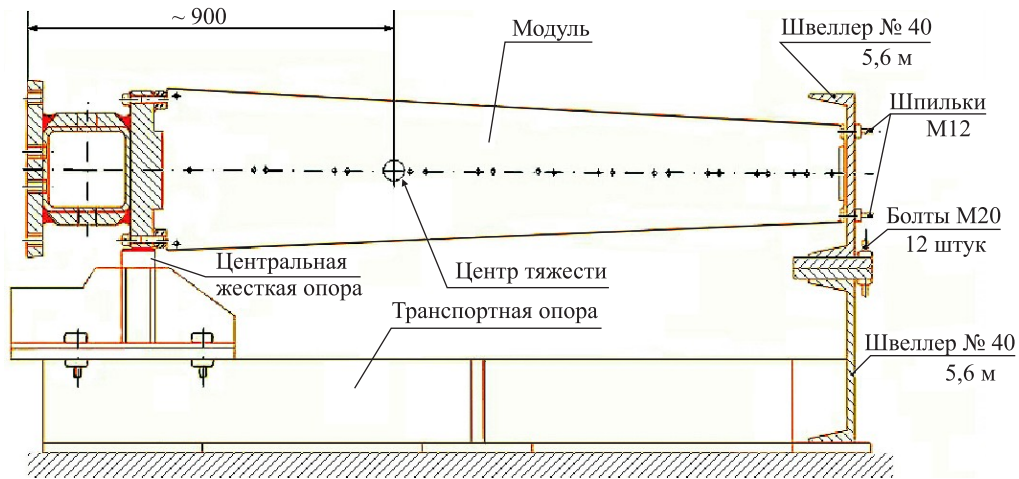


Рис. 10. Транспортная опора для перевозки модуля-0 в горизонтальном положении



Рис. 11. Май 1996 г. ЦЕРН. Модуль-0 прибыл в экспериментальную зону для установки на тестовый пучок

мастерных и спейсерных пластин. Для производства названного количества модулей необходимо было склеить 1170 стандартных и 65 специальных submodule, а для всех 1235 submodule изготовить 40800 мастерных и 20400 наборов (по 12 типоразмеров пластин в одном наборе) спейсерных пластин. Подобный масштаб производства (≈ 300000 единиц) весьма необычен в прак-

тике ОИЯИ и его успех принципиально зависит от умения организовать и реализовать контроль качества.

На заводе «Кралов двор» в Праге ОИЯИ (через ЦЕРН) заказал 1450 т холоднокатаной листовой стали толщиной 4 и 5 мм. Для высокоэффективной переработки этого массива стали в мастерные и спейсерные пластины, а также с целью снижения вероятности возникновения брака на всех технологических этапах производства деталей появилась необходимость в разработке программ качества для массового производства мастерных и спейсерных пластин.

В ноябре 1997 г. сотрудниками ОИЯИ и ЦЕРН была создана такая программа, явившаяся главным технологическим документом для потенциального изготовителя мастерных и спейсерных пластин. В программе были подробно изложены необходимые контрольные операции на всех этапах производства пластин и их транспортировки к потребителю.

Последующая практика использования программ качества для массового производства (≈ 300 тыс. штук) мастерных и спейсерных пластин показала их принципиальную необходимость и эффективность: заложенный изначально минимальный запас (3%) стальных пластин был достаточен для выполнения программы производства пластин и в дальнейшем — субмодулей.

11. ПРОИЗВОДСТВО МАСТЕРНЫХ И СПЕЙСЕРНЫХ ПЛАСТИН

Параллельно с разработкой программ качества для массового производства $\cong 300\,000$ шт. мастерных и спейсерных пластин в 1997 г. в промышленности были начаты поиски предприятий, способных выполнить поставленную задачу. К этому времени стало понятно, что наиболее эффективной технологией изготовления такого количества пластин является штамповка. Основными критериями отбора потенциальных производителей были опыт работы в этой области, стоимость, географическое положение (минимизация транспортных затрат), наличие железнодорожных подъездных путей, а также страна-изготовитель.

Поскольку вся сталь изготавливалась в Праге, а после изготовления мастерных и спейсерных пластин их нужно было отправить равными частями по четырем адресам (Дубна, Прага, Пиза, Протвино), то поиск предприятий велся на территории от Москвы до Праги.

После анализа возможностей всех потенциальных производителей в итоге заказали изготовление пробной партии спейсеров (разных типов) на Заводе тяжелого машиностроения (ЗТС, г. Дубница над Вагом, Словакия) и на Минском тракторном заводе (МТЗ, Минск, Белоруссия).

Для производства мастерных пластин коллеги из АНЛ (г. Аргонн, США) предоставили во временное пользование готовый штамп, который они применяли при производстве мастерных пластин для модуля-0. Оставалось найти такой завод, где имелся бы механический пресс с усилием не менее 550 т.

Необходимый пресс с рабочим усилием 800 т и с необходимым расстоянием между колоннами прессы нашелся на заводе «Татра» (г. Копрживнице, Чехия). Этот завод и был выбран в качестве изготовителя



Рис. 12. Март 1997 г. Завод «Татра», г. Копрживнице, Чехия. Первые мастерные пластины отштампованы

мастерных пластин, т. к. обладал всеми необходимыми качествами и имел ряд преимуществ. Завод имел большой опыт в штамповочных работах, обладал прекрасно оборудованной метрологической лабораторией, находился на территории страны-производителя стали, имел железнодорожные подъездные пути, а также назначил приемлемую цену исполнения заказа. Себестоимость изготовления одной мастерной пластины оказалось более чем в пять раз ниже цены, названной нам на АЗЛК (Москва) при проведении тендера. Кроме этого, завод «Татра» находился в 30 км от завода по переработке металлических отходов (при вырубке мастерной пластины из листа 25 % материала шло в отход), что позволило впоследствии закупить в Чехии необходимые нам материалы и оборудование на вырученные от продажи металлолома деньги.

В итоге в ноябре 1997 г. на заводе «Татра» были отштампованы (рис. 12) пробные шесть мастерных пластин и их геометрические размеры были измерены в нашем присутствии на трехкоординатном измерительном центре. Измерения показали, что на всех шести пластинах 12 геометрических разме-

ров незначительно выходят за чертежные допуски. Анализ этих отклонений показал, что они не повлияют на качество собираемых в будущем submodule и модулей. В чертеж на мастерную пластину были внесены изменения и с заводом «Татра» был заключен контракт на изготовление 40800 мастерных пластин (рис. 13).



Рис. 13. Март 1997 г. Завод «Татра», г. Копрживнице, Чехия. Массовое производство мастерных пластин

В процессе производства мастерных пластин каждая 30-я отштампованная пластина устанавливалась на калибр, а каждая 600-я проверялась на трехкоординатном измерительном центре с характерной точностью $\sigma_{X,Y,Z} \cong 20-50$ мкм. Такой строгий геометрический контроль позволил вовремя заметить необходимость перезаточки режущих кромок штампа, что и выполнялось своевременно. К маю 1998 г. все мастерные пластины были изготовлены и отправлены в Пизу, Прагу, Протвино, Дубну.

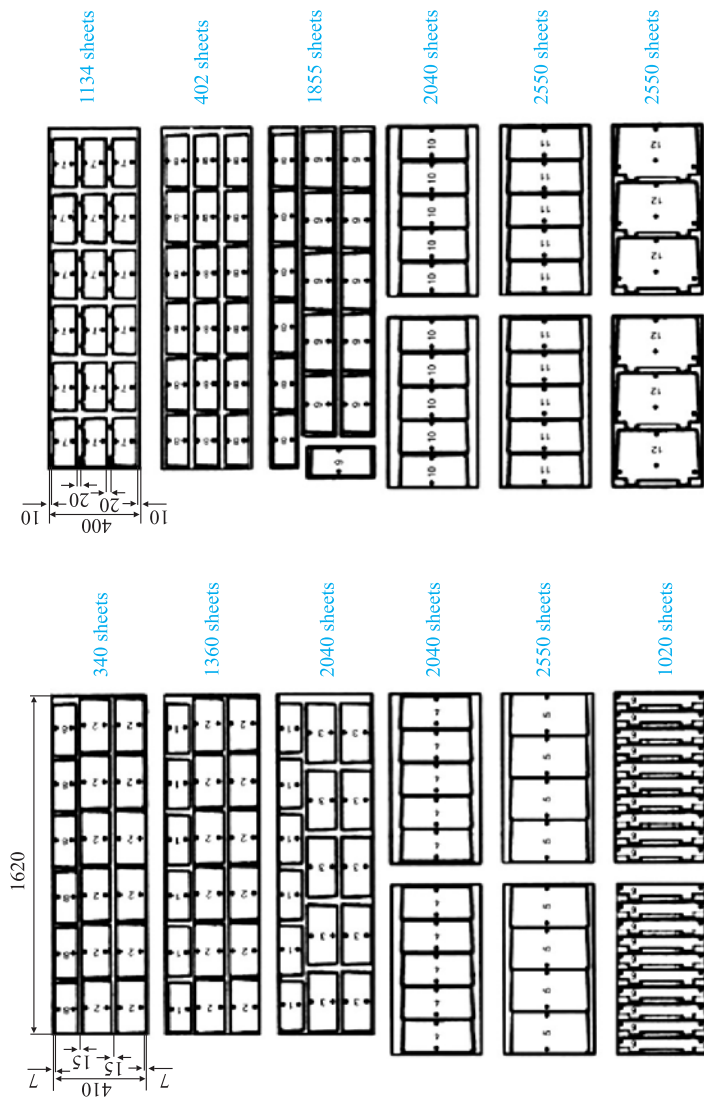


Рис. 14. Схема раскроя 20221 стальных пластин для производства 244x800 шт. стейсеров (штамповка на МТЗ, Минск)

Предприятия ЗТС и МТЗ показали высокое качество изготовленных образцов спейсерных пластин. Исходя из экономических соображений, было решено изготавливать спейсеры на МТЗ [16].

Условия производства спейсеров на МТЗ отличались от условий производства мастерных пластин на «Татре» двумя существенными моментами:

1) все мастерные пластины были одного размера и из одного листа получалась одна мастерная плита; а из одного листа для спейсерных пластин можно получить от 6 до 20 спейсеров, что зависит от его типоразмера и варианта раскроя исходного листа;

2) на МТЗ не было трехкоординатного измерительного центра, что выдвигало проблему контроля точности готовых спейсерных пластин.

С целью достижения высокого качества производства спейсеров на МТЗ в КО ЛЯП были разработаны карты раскроя листов с эффективным использованием материала (рис. 14), а также разработаны схемы метрологического контроля геометрических размеров спейсеров с использованием стандартных измерительных инструментов: штангенциркуль, рейсмус, призмы, штифты (рис. 15).

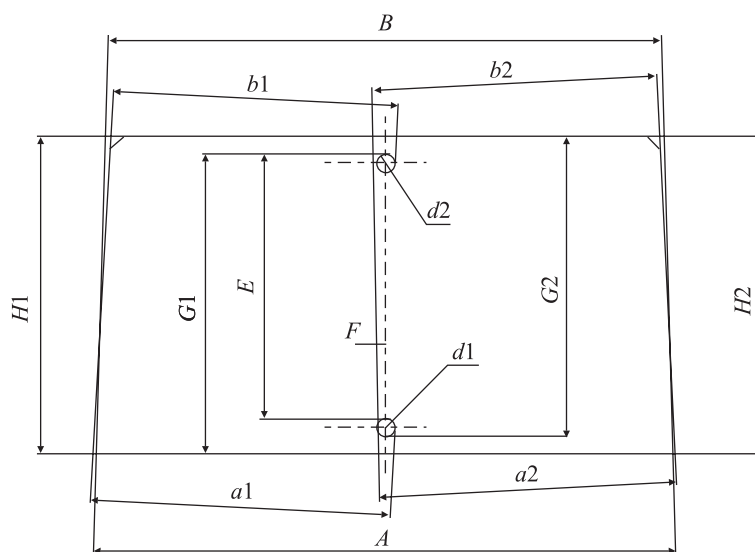


Рис. 15. Схема контрольных измерений для типового спейсера: габаритные размеры спейсера A и B вычисляются по измеренным величинам $a1, a2, b1, b2, d1, d2$

Разработанные нами карты раскроя листов доказали не только возможность изготовления 244800 спейсерных пластин 12 различных типоразмеров и конфигураций из 20400 листов (420×1620 мм), что было неочевидно первоначально, но и возможность изготовления всех спейсерных пластин из меньшего количества листов (20221 шт.) [17].

Как и при производстве мастерных пластин, при изготовлении спейсерных пластин каждая 30-я отштампованная пластина устанавливалась на свой калибр, а каждая 600-я подвергалась 100%-му геометрическому контролю (с

характерной точностью $\cong 50$ мкм) по разработанным нами схемам измерений. Этот же полный контроль применялся и при аттестации изготовленных на заводе штампов, а также после проведения коррекции или доработки штампа, или после их перезаточки.

В процессе производства спейсерных пластин каждый штамп в случае необходимости направлялся на перезаточку.

Для оперативного измерения спейсеров представитель ОИЯИ постоянно находился на МТЗ во время штамповки спейсеров в период июль–декабрь 1998 г. Материальные затраты Института на проведение метрологического контроля на предприятиях-изготовителях мастерных и спейсерных пластин

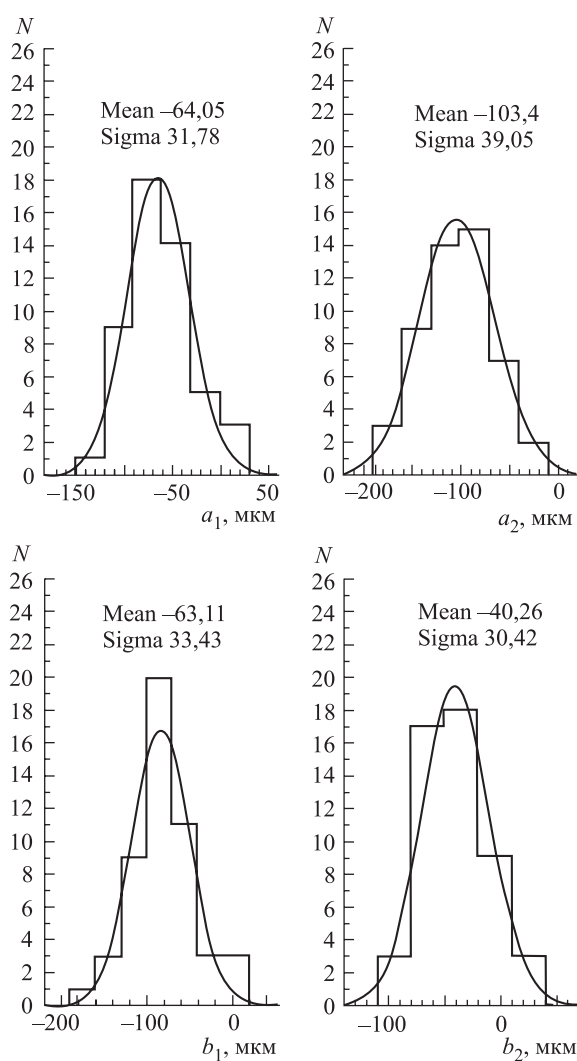


Рис. 16. Распределение отклонений от номинальных размеров величин a_1 , a_2 , b_1 , b_2 для спейсеров типоразмера 1

оказались ненепрными: все мастерные и спейсерные пластины соответствовали чертежу и поэтому не возникло дополнительных проблем при сборке субмодулей и модулей.

На рис. 16 показаны распределения отклонений от номинальных размеров величин a_1 , a_2 , b_1 , b_2 для спейсеров типоразмера 1; эти отклонения являются типичными для всех типоразмеров спейсеров. На рис. 17 показаны распределения отклонений чертежных габаритных размеров A и B для всех спейсеров 12 типоразмеров, изготовленных на МТЗ.

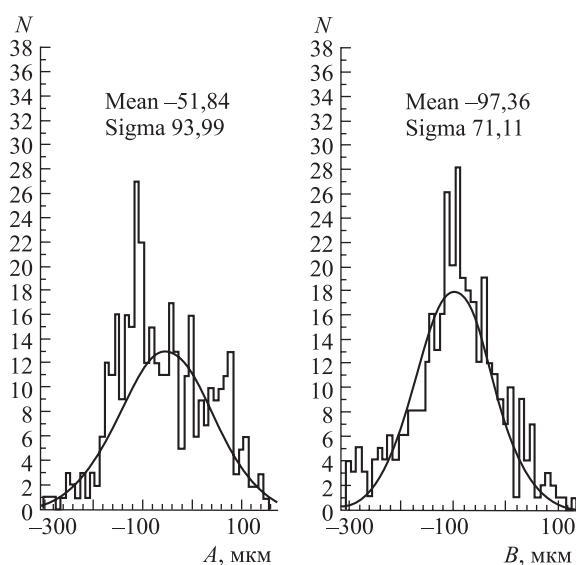


Рис. 17. Распределение отклонений от номинального значения габаритных размеров A и B для всех спейсеров 12 типоразмеров

Приведенные распределения свидетельствуют, что разработанные и примененные методы статистического контроля массового производства по выборке являются достаточно мощными: практически все спейсеры отштампованы в соответствии с требуемыми высокоточными для данных условий допусками (+0,1 ÷ -0,2 мм).

По окончании производства спейсерных пластин таможенная проблема утилизации отходов стали (около 110 т) решена тем, что сталь подарена Белорусии.

12. ПРОИЗВОДСТВО СУБМОДУЛЕЙ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

В конце декабря 1998 г. в ОП ОИЯИ по ТЗ КБ ЛЯП была создана специальная технологическая линия для сборки субмодулей и в ОИЯИ началось их массовое производство. План размещения технологического оборудования и технология сборки субмодулей разработаны в КО ЛЯП. В ОП ОИЯИ в соответствии с технологией производства субмодулей были размещены ванны

для мойки пластин, станок для придания шероховатости поверхностям мастерных и спейсерных пластин и снятия заусенцев, столы для нанесения клея на пластины, приспособление для склейки субмодулей, стол для приварки угловых пластин на субмодуле, вертикальная ванна для покраски субмодулей окунанием, зоны сушки и хранения субмодулей (рис. 18).



Рис. 18. Декабрь 1998 г. Начало производства серии из 308 субмодулей в ОП ОИЯИ

Результаты контроля линейных и угловых размеров готовых субмодулей и существенные сведения по технологии производства занесены в паспорта качества. Толщина H измерялась в 20 точках; она является основной геометрической характеристикой субмодулей, т. к. характеризует равномерность распределения тайлов по длине модуля и влияет на правильность и возможность сборки модуля.

На толщину субмодуля влияют толщины склеиваемых пластин и количество нанесенного клея. Все остальные геометрические характеристики субмодулей задаются размерами мастерных плит и обеспечиваются технологией; например, перпендикулярность боковых поверхностей субмодуля к его основанию достигается за счет базирования шпоночных пазов мастерных плит на кронштейнах приспособления.

Толщина субмодулей также обеспечивается технологией. Однако оказалось, что первые субмодули, склеенные в различных институтах по одной технологии, не достигли номинальной толщины на 1–2 мм при допуске на высоту 0–0,2 мм. Мастерные и спейсерные пластины, поступившие от производителей на «Татре» и МТЗ, оказались настолько плоскими, что их суммарная толщина вместе с клеем была меньше высоты калиброванных колонн приспособления для склейки субмодулей. Исходя из этого факта и

после выборочной проверки толщин и плоскостности остальных пластин было решено уменьшить номинальную толщину субмодулей с 293,2 до 291,7 мм. При этом модуль получил в итоге два дополнительных периода. Одновременно были утверждены новые допуски на толщину субмодуля в пределах $+0,3 \div -1,5$ мм и конструкторский зазор 0,4 мм между субмодулями в модуле.

Субмодуль должен был быть собран так, чтобы удовлетворить допуску $+0,3 \div -1,5$ мм по его толщине H_i , измеренной в 20 точках по периметру и центральной оси симметрии. Измерения толщины субмодулей осуществлялась специально приобретенным заранее цифровым рейсмусом. Точность измерения рейсмусом составляла 20 мкм при точности отсчета 0,01 мм.

Для качественного проведения измерений толщин H_i необходима достаточно плоская поверхность. В качестве таковой была выбрана поверочная плита ОП ОИЯИ. Поверхность плиты была обмерена с помощью имеющегося лазерного измерительного устройства. В системе координат, связанной с поверочной плитой, были измерены координаты (XYZ) достаточного количества точек на поверхности плиты.

Неплоскостность поверочной плиты составила 70 мкм при точности измерений 20 мкм. Таким образом, среди многих поверочных плит была отобрана та, которая обеспечивала нам требуемую точность измерения высоты H_i . Распределение максимальных величин $H_i - H_{\text{ном}}$ для 308 субмодулей, собранных в ОИЯИ, показано на рис. 19.

Таким образом, благодаря корректировке допусков и соблюдению технологии сборки, мотивированному выбору измерительного оборудования и

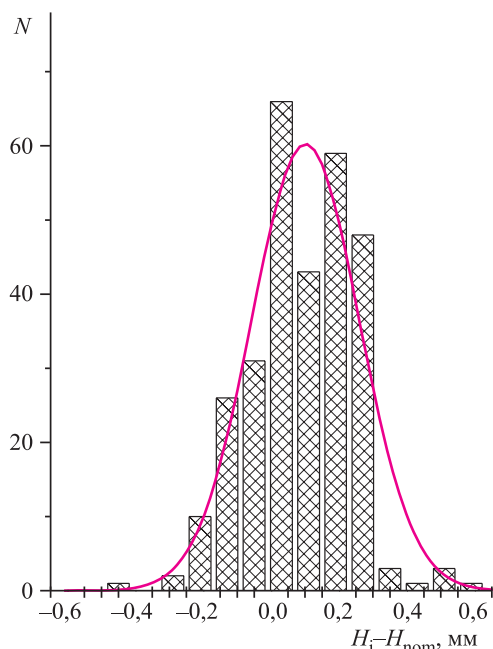


Рис. 19. Распределение максимальных величин $H_i - H_{\text{ном}}$ для 308 субмодулей, собранных в ОИЯИ

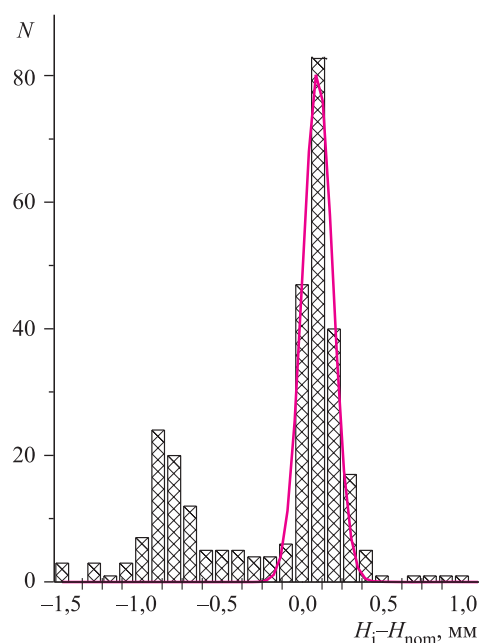


Рис. 20. Распределение максимальных величин $H_i - H_{\text{ном}}$ для 272 субмодулей, собранных в Барселоне

достаточному уровню неплоскостности поверочной плиты было обеспечено весьма высокое стабильное качество сборки субмодулей.

Важность этого достижения заключается в том, что впоследствии, при сборке модулей:

а) оказалось возможным устанавливать субмодули на балку *не селективно*, а произвольно;

б) распределение субмодулей по длине модуля было равномерным; не было случаев с чрезмерно большим зазором между соседними субмодулями;

в) исключена возможность того, что 19 субмодулей не помещаются на балке.

Бесспорные преимущества разработанной в ОИЯИ технологии сборки субмодулей иллюстрирует сравнение распределений максимальных величин $H_i - H_{ном}$ для субмодулей, собранных в ОИЯИ (рис. 19) и Барселоне (рис. 20). Как видно из рис. 20, наблюдаются отклонения в интервале $-1,5 \div +1$ мм. Именно это вынудило испанских коллег выполнять изнурительную процедуру селективной подборки субмодулей при сборке барселонских модулей.

ОП ОИЯИ изготовило 243 стандартных (291,7 мм высотой) и 65 специальных (341,2 мм высотой) субмодулей в период декабрь 1998 – май 2001 г. Как правило, все субмодули, изготовленные в ОИЯИ, соответствовали допускам. Даже первые семь стандартных субмодулей, не соответствующих первоначальному размеру (293,2 мм), также были использованы в производстве модулей.

13. ПРОИЗВОДСТВО БАЛОК, КОНЦЕВЫХ И ПЕРЕДНИХ ПЛИТ

Помимо субмодулей модуль содержит несущую балку (girder), концевые плиты (end-plates) и переднюю (верхнюю) плиту (front plate) (рис. 6).

За производство балок отвечал ЦЕРН. Заказ на их изготовление был размещен на заводе в г. Клуж-Напока в Румынии. По изготовлении каждой восьми балок представитель ЦЕРН–ОИЯИ выезжал на завод для их приемки. Этим была обеспечена обратная связь с заводом, позволившая оперативно устранить технические недоработки со стороны производителя.

За производство концевых и передних плит отвечал ОИЯИ. Заказ на их изготовление был размещен на ЗТС в г. Дубница над Вагом, Словакия. Эти изделия были получены в срок с надлежащим качеством.

14. СБОРКА МОДУЛЕЙ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА, ТРАНСПОРТИРОВКА

8 июля 1999 г. в ОИЯИ началась сборка модуля № 1, первого из 65, для барреля адронного калориметра установки АТЛАС. В отличие от модуля-0 сборка первого и последующих модулей велась на специально подготовленном

и оборудованном технологическом участке в корпусе №5 ЛЯП ОИЯИ *) бригадой ОП ОИЯИ под инженерно-технологическим руководством сотрудников ЛЯП (рис. 21).



Рис. 21. Июль 1999 г. ЛЯП ОИЯИ. Модуль №1 (из 65) собран

ОИЯИ первым начал собирать модули и первым встретил необычную технологическую проблему при приварке передней плиты с использованием утвержденной коллаборацией ручной аргодуговой сварки. В сварных швах появлялись трещины из-за попадания в расплавленный металл краски ДИСКОР 2076, применяемой для антикоррозионного покрытия субмодулей и присутствующей в небольшом количестве в зазорах между пластинами. При переходе на ручную электродуговую сварку этой проблемы не возникало. Для уверенности в возможности изменения технологии сварки 27 июля 1999 г. в ОИЯИ были проведены сравнительные механические испытания прочности образцов сварки, выполненных двумя различными методами. Испытания показали: шов, выполненный ручной электродуговой сваркой, прочнее шва, выполненного ручной аргодуговой сваркой. Таким образом, замена технологии сварки была правомочна.

Эта неожиданная проблема была первой и единственной серьезной трудностью в начале производства модулей и она была благополучно решена. На каждый изготовленный модуль составлялся паспорт качества, куда помимо

*) Этот корпус много лет назад был сооружен по инициативе В. П. Джеллепова, разместившего в нем шестиметровый чехословацкий карусельный станок. Корпус использовался для модернизации синхроциклотрона ОИЯИ и выполнения многих ответственных задач различных лабораторий ОИЯИ.

информации по основным технологическим моментам производства заносились сведения о неплоскостности боковых поверхностей модуля, играющие важную роль в дальнейшем при вычислении толщин межмодульных шимм при сборке барреля.

Требуемая высокая точность юстировки положений submodule в модуле для обеспечения проектной неплоскостности «0,6 мм» боковой поверхности модуля, в отличие от технологии сборки модуля-0, обеспечивалась применением лазерной измерительной системы. С помощью этого инструмента и разработанной методики [15] проводились измерения неплоскостности боковых поверхностей модуля до и после приварки передней плиты. За счет оптимальной последовательности нанесения сварных швов удавалось достаточно успешно исправлять кривизну submodule и улучшать неплоскостность боковых поверхностей модулей. При допуске на неплоскостность боковых поверхностей модулей 0,6 мм баррель-модули имели, как правило, 0,2–0,3 мм и в редких случаях до 0,6 мм.

Рассмотрим более подробно основные технологические обстоятельства сборки submodule при серийном производстве.

Стояла задача создать такую технологию сборки модуля, чтобы максимально снизить величину неплоскостности боковых поверхностей модуля. Основными причинами, влияющими на величину боковой неплоскостности поверхности, являлись:

- прямолинейность несущей балки (0,2 мм);
- точность ее установки в горизонтальное положение (0,1 мм);
- неплоскостность боковой поверхности submodule (0,1 мм) и перпендикулярность его установки на несущую балку (0,2 мм — максимум; см. рис. 22).

Несущие балки поставляли коллеги из Румынии. В процессе их производства был организован входной контроль на заводе-изготовителе. Непрямолинейность балок соответствовала чертежу и не превосходила 0,2 мм. Неплоскостность боковой поверхности submodule была в пределах 0,1 мм, что обеспечивалось технологией его сборки. Симметричность положения боковых поверхностей submodule относительно центральной плоскости симметрии модуля составляла $\pm 0,05$ мм, что также обеспечивалось геометрией мастерных пластин и технологией сборки submodule в приспособлении для их склейки.

Следовательно, в конечном итоге неплоскостность боковой поверхности модуля определялась точностью установки submodule при их монтаже на балке.

Положение нижнего основания submodule, имеющего шпоночные пазы, задает выступ на несущей балке, который фиксирует положение submodule в поперечном направлении и дает возможность юстировки положения submodule по вертикали. Исходя из необходимой точности измерения контролируемых величин было выбрано и заблаговременно приобретено измерительное оборудование. При сборке модуля первоначально несущая балка устанавливалась в горизонтальное положение с помощью мини-нивелира с точностью 0,1 мм на 1 м длины. Точность отсчета составляла 0,01 мм на 1 м длины.

Затем на балку последовательно устанавливались submodule. Перпендикулярность положения submodule в продольном положении определялась и

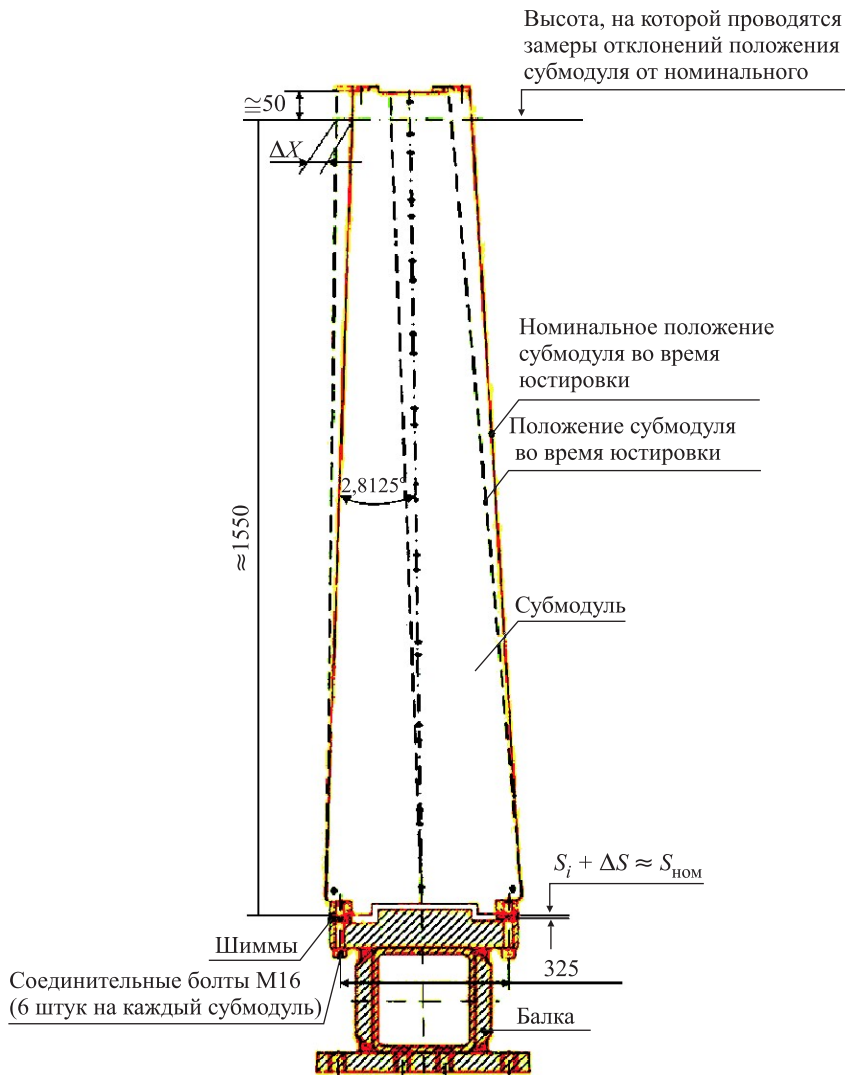


Рис. 22. Схема юстировки положения submodule при сборке модуля; S_i — первоначальная толщина шимм в данном месте; ΔS — толщина дополнительных шимм; $S_{\text{ном}}$ — теоретически необходимая толщина шимм; ΔX — отклонение положения submodule от номинального

контролировалась метрологическим угольником, а в поперечном направлении необходимо было определять угол наклона боковых поверхностей submodule относительно вертикали. Поскольку мини-левел мог контролировать перпендикулярность и горизонтальность очень малых углов ($< 1^\circ$), а боковые поверхности submodule имеют наклон с вертикалью около 3° , то в верхней части submodule на его боковой поверхности, на определенной высоте, устанавливалась клиновидная пластина таким образом, чтобы ее внешняя грань составляла с нижней кромкой балки общую вертикальную поверхность.

Таким образом, контролируя с помощью двухметровой поверочной линейки и мини-левила вертикальность этой поверхности в пределах 0,1–0,4 мм, оказалось возможным достичь требуемой «вертикальности» положения плоскости симметрии субмодуля и допустимого отклонения боковой поверхности субмодуля от «идеальной» боковой поверхности модуля.

Юстировка положения субмодуля достигалась за счет изменения толщин шимм между нижними пластинами (стрипами) субмодуля и верхней поверхностью несущей балки (рис. 22). Вертикальность положения субмодуля проверялась после установки и затяжки динамометрическим ключом всех шести болтов, соединяющих субмодуль и балку, и при необходимости корректировалась повторным проведением операции юстировки.

Юстировка положения субмодуля прекращалась по достижении отклонения от вертикали $\Delta X = 0,2$ мм и менее, т. к., во-первых, этого достаточно по проектному требованию, а во-вторых, при установке дополнительной шиммы $\Delta S = 0,02$ мм снизу субмодуля отклонение его верха ΔX составляло около 0,1 мм (рис. 22).

Применение разработанной нами лазерной метрологии обеспечило достижение требуемых точностей юстировки субмодулей и радикально упростило процесс сборки *модуля*: ввиду трудоемкости юстировки каждого субмодуля с применением мини-левила и дополнительных средств при серийном производстве было решено юстировать по этой технологии только первый и 19-й субмодули, а положение боковых поверхностей промежуточных субмодулей *контролировать с помощью лазерного луча; точность измерения величины ΔX при этом составляет 0,05 мм.*

Значимость достигнутого нами высокого уровня точностей при сборке модулей поучительно сопоставить с точностью обработки в промышленности стальных слябов $250 \times 1500 \times 6000$ мм. При изготовлении плит для 20000-тонного магнитного баррель-тороида установки SDC (SSCLab, Даллас, Техас) на Атоммаше (г. Волгодонск, Россия) на современных итальянских фрезерных станках обрабатывались по плоскости стальные слябы производства НЛМК (г. Липецк) толщиной 250 мм. Обработка слябов велась поочередно с двух сторон: толщина стальной плиты доводилась до $(220 \pm 0,5)$ мм. Фрезерный станок имел рабочий стол длиной 25 м. Через каждый метр устанавливались опоры и они фрезеровались для получения общей горизонтальной плоскости по всем опорам. Затем укладывался сляб толщиной 250 мм и его верхняя плоскость фрезеровалась \cong на 15 мм для получения горизонтальной поверхности. Затем сляб переворачивался и фрезерованием второй его поверхности толщина стальной плиты доводилась до 220 мм. Измерение неплоскостности полученной плиты проверялось с помощью оптического нивелира: плиты имели неплоскостность до 0,4 мм при точности измерения 0,1 мм.

Таким образом, собранные нами, по сути дела, «вручную» модули по точности сборки превосходили сопоставимые по размерам промышленные изделия, обрабатываемые механическим путем на высокопрецизионном станке. Достигнутый результат проиллюстрирован на рис. 23, где показаны отклонения всех субмодулей от номинального положения в собранных модулях. Зачернены максимальные отклонения субмодулей для каждого из 65 модулей.

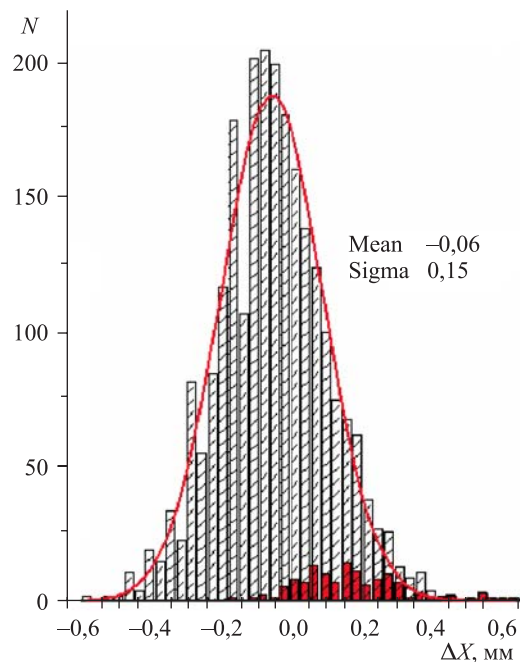


Рис. 23. Распределение максимальных отклонений submoduleй $H_i - H_{ном}$ в собранных в ОИЯИ модулях

Видно, что достигнутая нами величина неплоскостности модулей лежит в интервале $0-0,4$ мм и в целом существенно превосходит требования к проектной величине неплоскостности ($0,6$ мм).

Модуль (ввиду наличия мощной жесткой балки в его широком основании) имеет достаточную жесткость и прочность в вертикальном положении; в горизонтальном положении он имеет низкую прочность и жесткость в узкой части. Поэтому для безопасной транспортировки модулей автотранспортом в ЦЕРН КО ЛЯП были спроектированы шесть специальных транспортных опор, изготовленных в ООЭП ЛЯП (рис. 24).

При проектировании был учтен опыт перевозки модуля-0. Так, в конструкцию транспортных опор были добавлены два гидравлических амортизатора для гашения колебаний свободно висящих краев модуля и ряд других полезных усовершенствований. С каждым шестым рейсом (один модуль — один рейс) опоры возвращались в Дубну для дальнейшего использования. Все 65 модулей были доставлены в ЦЕРН без повреждений, что было подтверждено сравнением протоколов измерений боковых поверхностей модулей до и после их транспортировки.

3 июля 2002 г. последний 65-й модуль прибыл в ЦЕРН. Поставленная перед ОИЯИ восемь лет назад задача была успешно выполнена (см. фото).



Рис. 24. Август 1999 г. ЛЯП ОИЯИ. Модуль №1 укладывается на транспортную опору для отправки в ЦЕРН



3 июля 2002 г. Последний 65-й модуль доставлен в ЦЕРН



Дубненская команда, принимавшая самое активное участие в создании тайл-калориметра установки АТЛАС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор кратко суммирует некоторые существенные итоги восьмилетия 1994–2002 гг., следуя, в основном, хронологии завершенных работ:

- Эскизное проектирование главных структурных элементов калориметра; сопутствующие НИОКР; изготовление прототипов.
- Массовое производство в промышленности $\cong 300\,000$ единиц стальных ядерных абсорберов несущих балок.
- Создание субмодулей и модулей; разработка и применение методик прецизионной технологии, включая лазерную.

Авторы считают своим долгом еще раз подчеркнуть исключительную эффективность совместной деятельности большого коллектива рабочих, техников, инженеров и физиков из многих научных центров и промышленных предприятий, выразившуюся в успешном выполнении уникальной инженерно-технической проблемы сооружения модулей и их доставки в ЦЕРН.

Послесловие

Декабрь 2004 г. отмечен знаменательным достижением в подготовке к экспериментам на LHC: в подземном зале был собран первый крупный узел установки АТЛАС — баррель адронного тайл-калориметра. Баррель —

центральная и самая большая часть всего калориметрического комплекса, которая вдвое превосходит по размерам примыкающие к ней т.н. Extended Barrels.

Этот успех завершил почти десятилетний период напряженной деятельности большого международного сотрудничества — Tile Cal Collaboration. ОИЯИ — активный участник этого сотрудничества, и в ряде ключевых этапов создания Калориметра внес решающий вклад принципиального значения в достижение «в подземелье» названного успеха.

Список литературы

1. *Armstrong W. W. et al.* Atlas. Technical Proposal. CERN/LHC/94-43, 1994.
2. *Batusov V. et al.* Development of laser measurements at the ATLAS Tile Calorimeter module production. JINR Preprint E-13-2001-257. Dubna, 2001.
3. *Berger E. et al.* Construction and performance of an iron-scintillator hadron calorimeter with longitudinal tile configuration. ATLAS Int. Note TILECAL-N-055, August 1995.
4. *Budagov J. et al.* Report on fabricating of ATLAS hadron calorimeter prototype #5 in Dubna. ATLAS Int. Note TILECAL-N-014, June 1994.
5. *Budagov J. et al.* Tile calorimeter module assembly. ATLAS Int. Note TILECAL-N-021, July 1994.
6. *Budagov J. et al.* ATLAS Tile hadron calorimeter module assembly design. ATLAS Int. Note TILECAL-N-036, December 1994.
7. *Batusov V. et al.* Development and application of high-precision metrology for the ATLAS Tile-Calorimeter construction. JINR Preprint E-13-2004-177. Dubna, 2004.
8. *Budagov J. et al.* ATLAS barrel hadron calorimeter module design. JINR Commun. E13-95-20. Dubna, 1995.
9. *Budagov J. et al.* ATLAS barrel hadron calorimeter module assembly and tooling design description. JINR Commun. E13-95-254. Dubna, 1995.
10. *Budagov J. et al.* ATLAS barrel hadron calorimeter module: tooling description for module assembly. JINR Commun. E13-95-467. Dubna, 1995.
11. *Budagov J. et al.* ATLAS barrel hadron calorimeter module: JINR — Group Activity (July–September 1995). JINR Commun. E13-95-500. Dubna, 1995.
12. *Alikov B. et al.* Recent advances in precision laser cutting for the ATLAS hadron calorimeter absorbers production. JINR Preprint E13-95-515. Dubna, 1995.
13. *Budagov J. et al.* ATLAS barrel hadron calorimeter: tooling design description for module assembly. JINR Preprint E13-96-78. Dubna, 1996.
14. *Budagov J. et al.* ATLAS barrel hadron calorimeter 0-module assembly technology. JINR Commun. E13-97-23. Dubna, 1997. ATLAS Internal Note TILECAL-NO-94.
15. *Budagov J. et al.* Some auxiliary technology equipment for ATLAS hadron calorimeter module and submodule manipulations and the quality control of the assembled module. JINR Commun. E13-97-22. Dubna, 1997. ATLAS Internal Note TILECAL-NO-90.
16. *Alikov B. et al.* ATLAS barrel hadron calorimeter: general manufacturing concepts for 300000 absorber plates mass production. JINR Commun. E13-98-135. Dubna, 1998.
17. *Artikov A. et al.* ATLAS barrel hadron calorimeter: spaces plates mass production. JINR Commun. E13-99-79. Dubna, 1999.

Получено 1 сентября 2005 г.

Батусов В. Ю. и др.

P13-2005-130

Адронный тайл-калориметр установки АТЛАС:
Опыт создания прототипов и массового производства модулей

Работа отражает опыт ОИЯИ 1994–2002 гг. организации и участия в крупномасштабной международной кооперации научных центров и промышленных предприятий России, Европы и США в создании адронного баррель-калориметра установки АТЛАС.

Существенное внимание уделено опытно-конструкторским разработкам и методикам контроля качества; особо выделена роль созданной в ОИЯИ лазерной метрологии в достижении высокой точности монтажных операций при создании основных структурных элементов калориметра: его субмодулей и модулей.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

Batusov V. Yu. et al.

P13-2005-130

Hadron Tile-Calorimeter of ATLAS:
The Experience of Prototypes Construction
and Modules Mass Production

The work presents the JINR 1994–2002 experience in organization and participation of a large-scale international cooperation of scientific centers and industrial enterprises of Russia, Europe and the USA in creation of ATLAS hadron barrel calorimeter.

Significant attention was paid to the R&D-works and quality control methods; special role was indicated of JINR created laser metrology in achievement of the high precision when assembling the main structural calorimeter units: submodules and modules.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 22.11.2005.

Формат 70 × 100/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,12. Уч.-изд. л. 2,81. Тираж 400 экз. Заказ № 55113.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/