

УДК 539.1.07

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

*В. Ю. Батусов¹, Ю. А. Будагов¹, Ю. А. Кульчицкий²,
М. В. Ляблин¹, М. Несси³, Н. А. Русакович¹,
А. Н. Сисакян¹, Н. Д. Топилин¹, Д. И. Хубуа⁴*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Институт физики Национальной академии наук Белоруссии, Минск

³ЦЕРН, Женева

⁴Институт физики высоких энергий и информатики Тбилисского
государственного университета, Тбилиси

| | |
|--|------|
| ВВЕДЕНИЕ | 1484 |
| ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ | 1487 |
| ПРОИЗВОДСТВО МАСТЕРНЫХ И СПЕЙСЕРНЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ МЕТРОВОГО ПРОТОТИПА СУБМОДУЛЯ | 1489 |
| РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СУБМОДУЛЕЙ И МОДУЛЕЙ | 1490 |
| ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОРАБОТКА СОЗДАВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ | 1494 |
| РАЗРАБОТКА ПРИСПОСОБЛЕНИЯ (СТАПЕЛЯ) ДЛЯ СБОРКИ МОДУЛЯ-0 | 1495 |
| ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СКЛЕЙКИ ПЛАСТИН | 1495 |
| ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО КРОЯ ПЛАСТИН | 1498 |
| РАЗРАБОТКА ПОДЪЕМНО-ТАКЕЛАЖНОГО ОБОРУДОВА- НИЯ ДЛЯ СУБМОДУЛЕЙ И МОДУЛЯ-0 | 1498 |
| СБОРКА И ТРАНСПОРТИРОВКА МОДУЛЯ-0 | 1499 |
| СОЗДАНИЕ ПРОГРАММ КАЧЕСТВА ДЛЯ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА МАСТЕРНЫХ И СПЕЙСЕРНЫХ ПЛАСТИН | 1502 |

| | |
|--|------|
| ПРОИЗВОДСТВО МАСТЕРНЫХ И СПЕЙСЕРНЫХ ПЛАСТИН | 1503 |
| ПРОИЗВОДСТВО СУБМОДУЛЕЙ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА | 1510 |
| ПРОИЗВОДСТВО БАЛОК, КОНЦЕВЫХ И ПЕРЕДНИХ ПЛИТ | 1513 |
| СБОРКА МОДУЛЕЙ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА, ТРАНСПОРТИРОВКА | 1513 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 1520 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 1521 |

УДК 539.1.07

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

*В. Ю. Батусов¹, Ю. А. Будагов¹, Ю. А. Кульчицкий²,
М. В. Ляблин¹, М. Несси³, Н. А. Русакович¹,
А. Н. Сисакян¹, Н. Д. Топилин¹, Д. И. Хубуа⁴*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Институт физики Национальной академии наук Белоруссии, Минск

³ЦЕРН, Женева

⁴Институт физики высоких энергий и информатики Тбилисского
государственного университета, Тбилиси

В обзоре рассматривается опыт организации и участия ОИЯИ (1994–2002 гг.) в составе крупномасштабной международной кооперации научных центров и промышленных предприятий России, Европы и США для создания адронного баррель-калориметра установки ATLAS. 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.

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.

Памяти

Юрия Филипповича Ломакина

ВВЕДЕНИЕ

Сотрудничество ATLAS подготавливает многоцелевой эксперимент по изучению протон-протонного взаимодействия при 14 ТэВ на большом адронном коллайдере (LHC) в ЦЕРН (Женева).

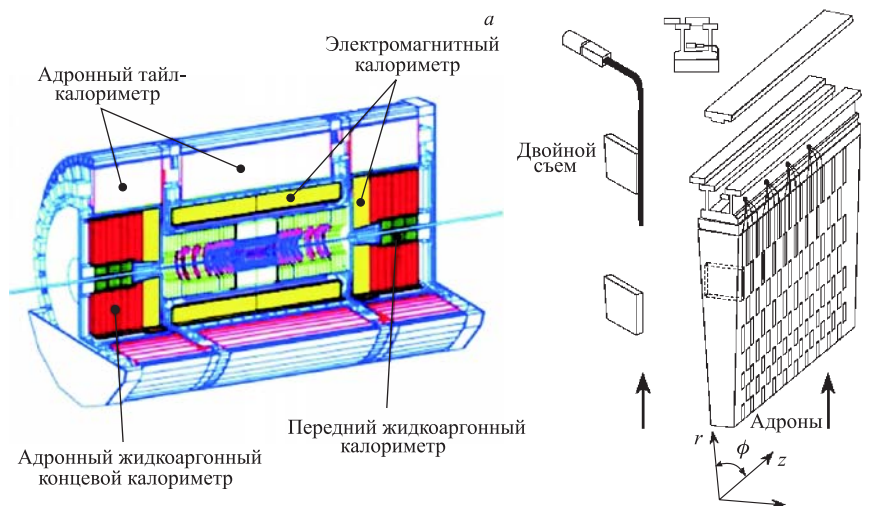


Рис. 1. Схема расположения калориметрической системы ATLAS (а) и модуля баррельной части адронного калориметра относительно пучка (б)

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

Одной из важнейших частей установки ATLAS является адронный калориметр, имеющий так называемую сотовую структуру: сцинтилирующие пластины (тайлы) вставлены в стальной поглотитель, и сигналы с них считываются с помощью спектросмещающих оптических волокон. Тайлы расположены в плоскости, перпендикулярной направлению сталкивающихся пучков (рис. 1). Калориметр состоит из трех секций: центральной (баррель) и двух дополнительных; каждая из этих секций собрана из 64 модулей клиновидной формы; длина и масса 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.

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 мкм. Эта точность высока, и ее обеспечение представляет собой сложную инженерно-техническую задачу, если учесть массу 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. Масса абсорбера в калориметре достигает нескольких тысяч тонн. Для достижения наиболее приемлемого сочетания требований физики, технологии и точности производства в конструкции модулей калориметра установки ATLAS 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 их ось симметрии была вертикальной 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 массой ~ 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 ATLAS, что в ОИЯИ имеются необходимые специалисты и техническая база для создания главной, так называемой 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, так называемого «модуля 0», высокое качество сборки которого и продемонстрированная методика прецизионного контроля решили вопрос о сборке именно в Дубне всех 65 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, так как модули изготовлены не на точных станках, а, по сути, 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 всей установки ATLAS и собственно ускорителя LHC.

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 ATLAS 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

Работы в ОИЯИ по адронному калориметру ATLAS начались с 23 февраля 1994 г., когда была достигнута договоренность об изготовлении в ОИЯИ 120 мастерных и более 500 спейсерных высокоточных стальных пластин ядерных абсорберов для прототипа — так называемого «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, так как 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.

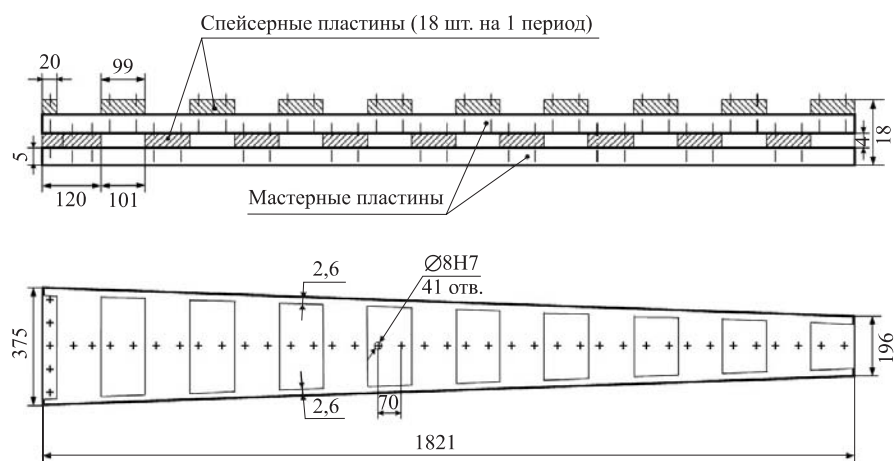


Рис. 2. Схематическое изображение одного из 55 периодов метрового прототипа submodule

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 8H7 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 8H7 мм, расположенных по оси симметрии пластины на расстоянии 70 мм друг от друга с позиционным допуском ± 50 мкм.

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 (они установлены во все отверстия и закреплены 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 горячекатаной 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 $+0,1 \div +0,14$ мм для 5-мм листов и $+0,01 \div +0,10$ 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.) было решено произвести их с помощью механической обработки. С учетом крайне жестких сроков изготовления 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 поддочке.

Требуемые высокие точности при изготовлении мастерных пластин достигнуты по схеме: сначала сверлили высокоточные отверстия, а затем, используя три из них как базы, 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 окалина 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 коллаборацией TILe Cal 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 ЦЕРН 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, естественно, недопустимо при массовом производстве. Наконец, собранная

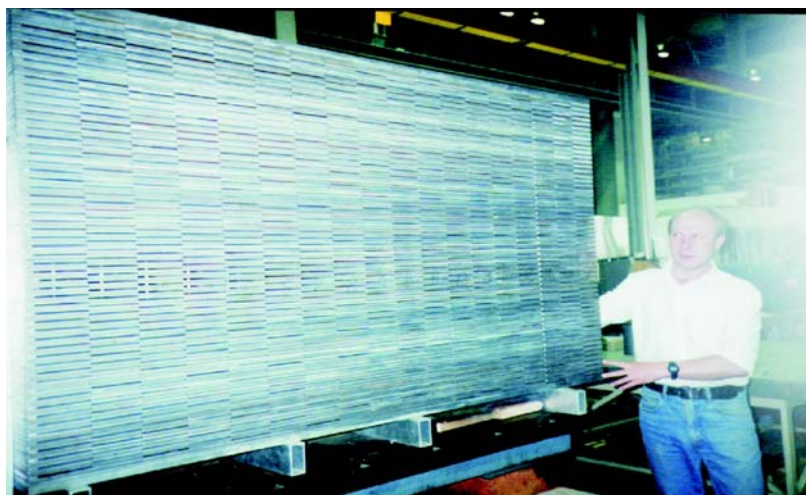


Рис. 3. Дубненский прототип однометрового субмодуля в сборе. Июнь 1994 г. ЦЕРН

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) два шпоночных паза на основаниях трапеции по осевой линии и пластины (стрипы) по четырем углам трапеции.

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, так как 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, деталильные чертежи которого по поручению коллаборации были выполнены коллегами в Аргоннской национальной лаборатории (США).

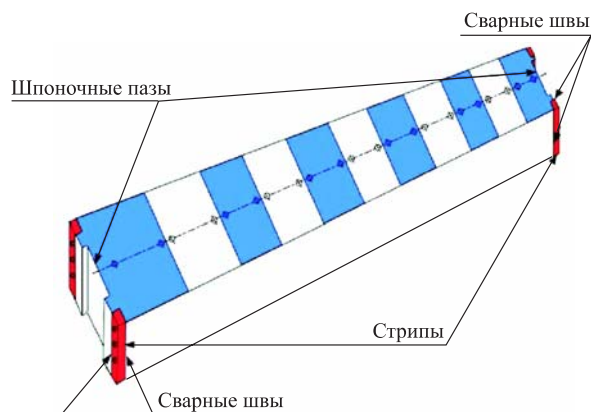


Рис. 4. Схематический вид субмодуля

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) установили два ограничительных кронштейна, которые играли роль жестких баз для правильной относительной укладки мастерных пластин.



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

Шпоночные пазы в мастерных плитах дали возможность легко располагать плиты между кронштейнами одна на другую в пределах допустимого относительного сдвига, а также 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

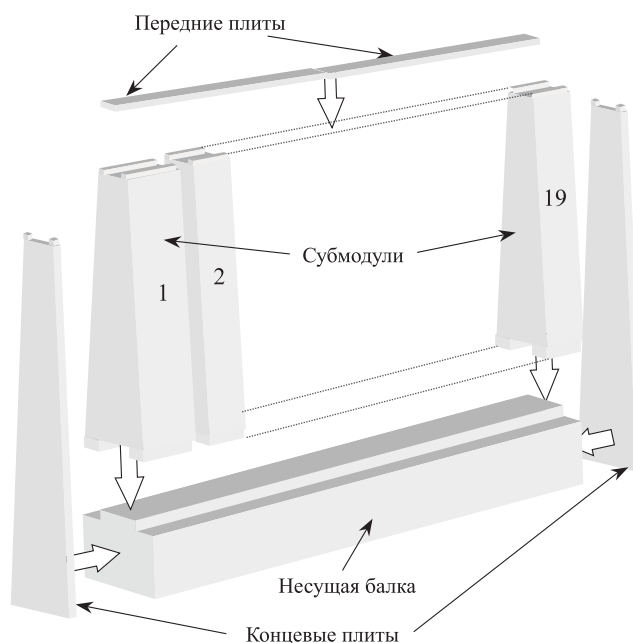


Рис. 6. Схема сборки модуля

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 свариваются две длинные продольные передние плиты, 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 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 в ОИЯИ приступили 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 установить 19 субмодулей на балке в модуле вместо шести. Длина отдельного субмодуля уменьшилась с $\cong 1$ м до $\cong 300$ мм, и соответственно масса субмодуля уменьшилась 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 отверстий, 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) ДЛЯ 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 конструкторском отделе 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, поэтому его высота зависит от разброса толщин 64 пластин; следовательно, можно было ожидать, что отклонения по высоте субмодулей составят ± 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 ЦЕРН с участием ОИЯИ были склеены три субмодуля. Для обезжиривания склеиваемых поверхностей применялась пескоструйная обработка пластин. К недостаткам этого «наивного» метода можно отнести его дороговизну, вредность, низкую скорость обработки (10–15 мин на 1 м^2 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 последнего метода, его высокую производительность (1–1,5 ч на все пластины для одного субмодуля), а также достаточную прочность 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 $\sim 24 \text{ м}^2$) 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



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

алюминиевые рамки с поперечными пластинами. В пластинах просверлены сквозные отверстия необходимого диаметра и высоты. Рамки поочередно накладываются на мастерную пластину или на соответствующий полупериод 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 эффективно использовано при массовом производстве всех 308 субмодулей в ОИЯИ (рис. 7, 8).



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

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, ЦЕРН.

Производство около 4500 спейсеров 12 типоразмеров для всех 22 субмодулей было поручено ОИЯИ. Точность изготовления спейсерных пластин должна быть $\pm 0,1$ мм. Наиболее подходящей технологией для изготовления такого количества спейсеров (как по срокам, так и по затратам) является лазерный крой.

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 TRUMF 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, в который входят:

- специальные пластины для их подъема в горизонтальном положении и для укладки в транспортировочный контейнер;
- траверса для подъема субмодуля в горизонтальном положении, позволяющая 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 комплект ПТКО, 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 (два других 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 и изготовлено в ЛЯП. Для сборки модулей в ЛЯП была сформирована группа специалистов. Перед началом сборки все компоненты модуля, полученные от наших коллег, прошли в ОИЯИ входной контроль на соответствие проектной документации.

В процессе сборки модуля-0 были 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 $1,9 \times 5,6$ 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).



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

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.

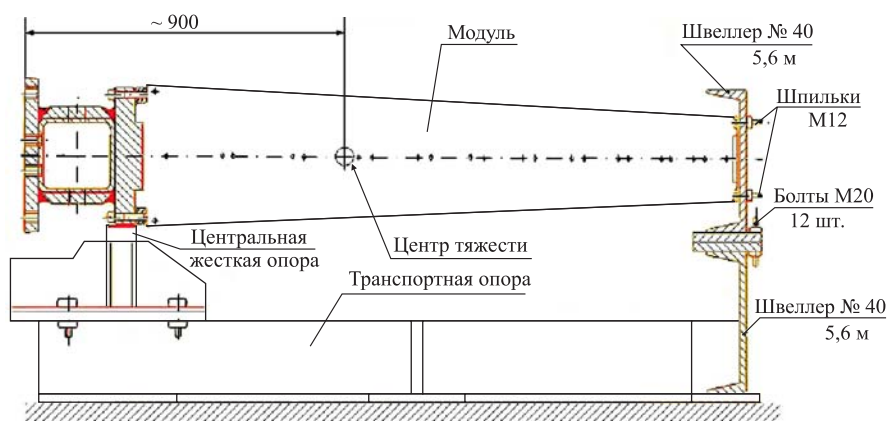


Рис. 10. Транспортная опора для перевозки модуля-0 в горизонтальном положении

В конструкторском отделе ЛЯП 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 прива-



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

рена для усиления мощная балка (швеллер №40). С другой стороны в центре транспортной опоры была установлена дополнительная жесткая опора. На модуль в узкой его части крепился 114 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 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 submodule: 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 практике ОИЯИ и его успех принципиально зависел 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, ставшая 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. шт.) 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 $\cong 300\,000$ 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 ANL (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 мастерных пластин, так как 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 оказалась более чем в пять раз ниже цены, названной



Рис. 12. Завод «Татра» (г. Копрживнице, Чехия). Штампование первых мастерных пластин. Март 1997 г.

на АЗЛК (Москва) при проведении тендера. Кроме того, 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) шесть пробных 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 субмодулей 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. Завод «Татра». Массовое производство мастерных пластин. Март 1997 г.

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 $\sigma_{x,y,z} \cong 20\text{--}50$ мкм. Такой строгий геометрический контроль позволил вовремя заметить необходимость перезаточки режущих кромок штампа, что и было выполнено своевременно. К маю 1998 г. все мастерные пластины были изготовлены и отправлены в Пизу, Прагу, Протвино, Дубну.

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;

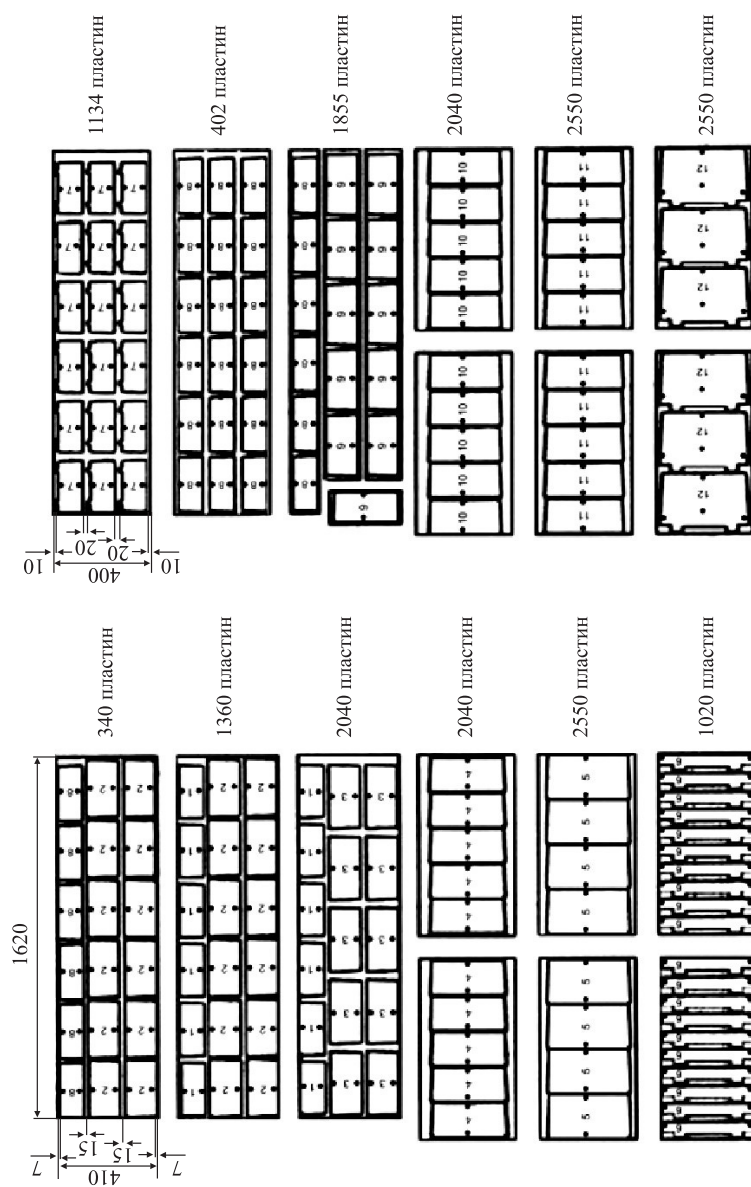


Рис. 14. Схема раскроя 20221 стальной пластины для производства 244800 шт. спейсеров (штамповка на МТЗ, Минск)

2) на МТЗ не было трехкоординатного измерительного центра, поэтому возникала проблема контроля точности готовых спейсерных пластин.

С целью достижения высокого качества производства спейсеров на МТЗ в конструкторском отделе 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: штангенциркуля, рейсмуса, призмы, штифтов (рис. 15).

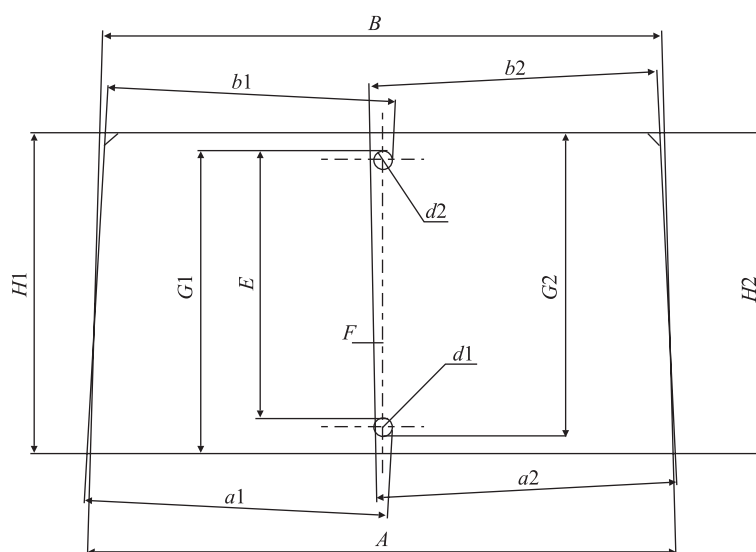


Рис. 15. Схема контрольных измерений для типового спейсера: габаритные размеры спейсера A и B вычисляются по измеренным величинам a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , d_1 , d_2

Разработанные нами карты раскроя листов доказали возможность изготовления не только 244800 спейсерных пластин 12 различных типоразмеров и конфигураций из 20400 листов (420×1620 мм), что было неочевидно первоначально, но и 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 с июля по декабрь 1998 г. Материальные затраты Института на проведение метрологи-

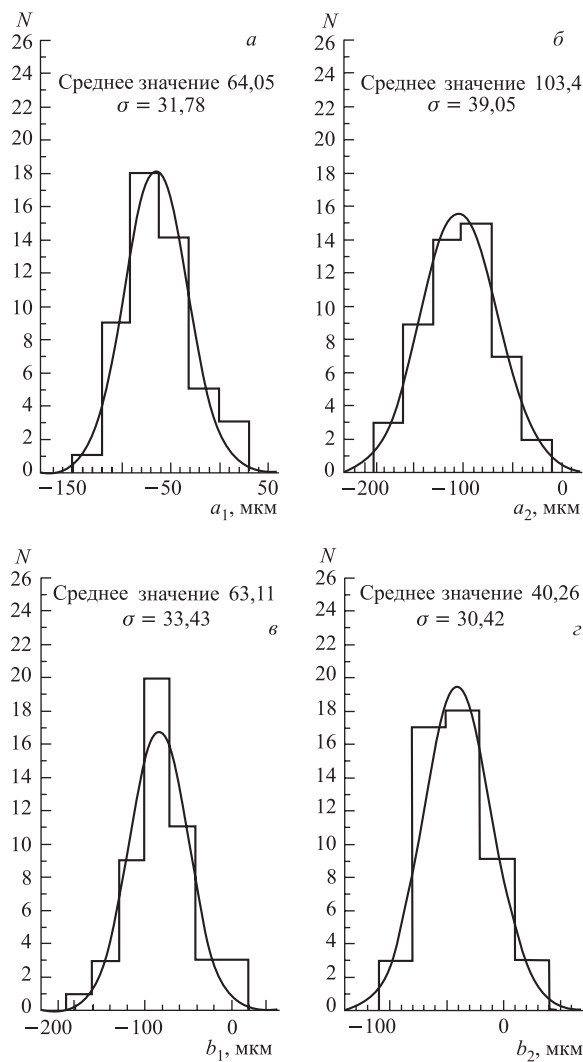


Рис. 16. Распределение отклонений от номинальных размеров величин a_1 (а), a_2 (б), b_1 (в), b_2 (г) для спейсеров типоразмера 1

ческого контроля на предприятиях-изготовителях мастерных и спейсерных пластин оказались не напрасными: все мастерные и спейсерные пластины соответствовали чертежу и поэтому не возникло дополнительных проблем при сборке submodule 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.

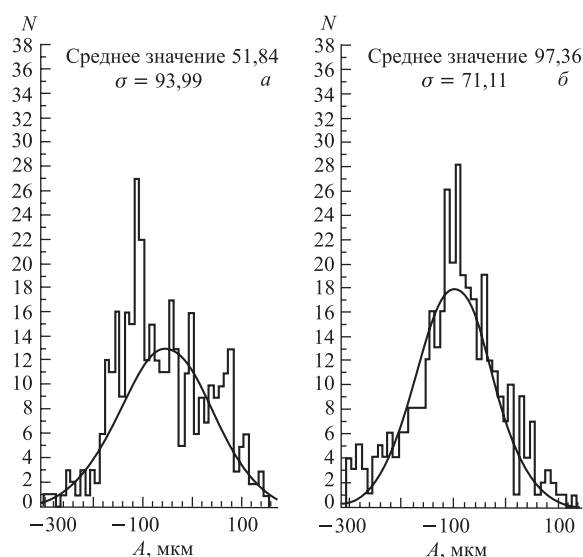


Рис. 17. Распределение отклонений от номинального значения габаритных размеров A (a) и B (b) для всех спейсеров 12 типоразмеров

Приведенные распределения свидетельствуют о том, 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 ($+0,1 \div -0,2$ мм).

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

12. ПРОИЗВОДСТВО СУБМОДУЛЕЙ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

В конце декабря 1998 г. в Опытном производстве (ОП) ОИЯИ по техническому заданию 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 конструкторском отделе ЛЯП. В ОП 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. Начало производства серии из 308 субмодулей в ОП ОИЯИ. Декабрь 1998 г.

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, так как 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 с заводов «Татра» 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 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 осуществлялись с помощью специально приобретенного цифрового рейсмуса. 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. 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, а.

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

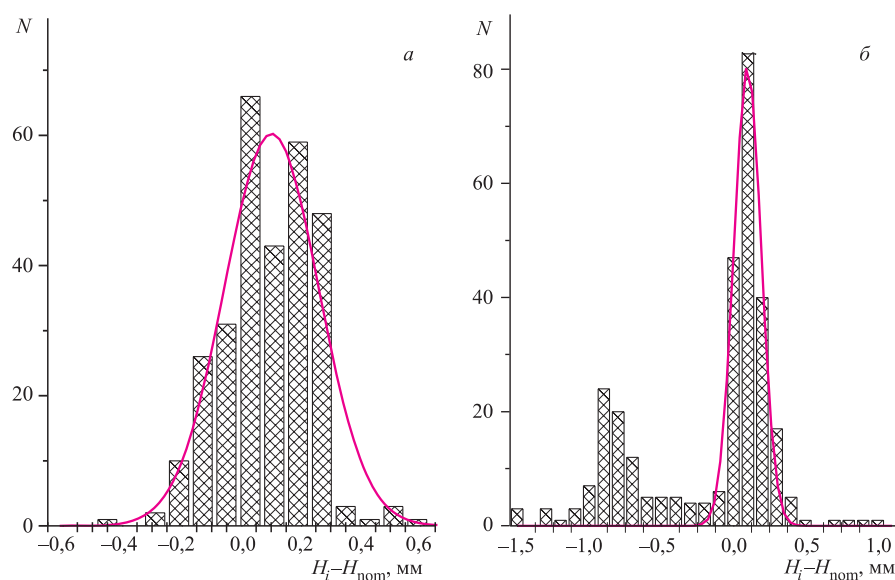


Рис. 19. Распределение максимальных величин $H_i - H_{\text{ном}}$ для 308 submodule, собранных в ОИЯИ (а), и 272 submodule, собранных в Барселоне (б)

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

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

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

В ОП были изготовлены 243 стандартных (291,7 мм высотой) и 65 специальных (341,2 мм высотой) submodule в период с декабря 1998 г. по май 2001 г. Как правило, все submodule, изготовленные в ОИЯИ, соответствовали допускам. Даже первые семь стандартных submodule, 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, концевые плиты и переднюю (верхнюю) плиту (рис. 6).

За производство балок отвечал ЦЕРН. Заказ на их изготовление был размещен на заводе в г. Клуж-Напока в Румынии. После изготовления каждого 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 ATLAS. В отличие от модуля-0 сборка первого и последующих модулей велась на специально подготовленном и оборудованном технологическом участке в корпусе № 5 ЛЯП* бригадой из ОП под инженерно-технологическим руководством сотрудников ЛЯП (рис. 20).

ОИЯИ первым начал собирать модули и первым встретил необычную технологическую проблему при приварке передней плиты с использованием утвержденной коллаборацией ручной аргонодуговой сварки. В сварных швах появлялись трещины из-за попадания в расплавленный металл краски ДИС-КОР 2076, применяемой для антикоррозионного покрытия субмодулей и присутствующей в небольшом количестве в зазорах между пластинами. При переходе на ручную электродугую 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 аргонодуговой сваркой. Таким образом, замена технологии сварки была правомочна.

*Этот корпус много лет назад был сооружен по инициативе директора ЛЯП В. П. Желепова, в нем размещался шестиметровый чехословацкий карусельный станок. Корпус использовался для модернизации синхротрона и выполнения многих ответственных задач различных лабораторий ОИЯИ.



Рис. 20. Сборка модуля № 1 в ЛЯП ОИЯИ. Июль 1999 г.

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 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 субмодулей 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 субмодулей и улучшать неплоскостность боковых поверхностей модулей. При допуске на неплоскостность боковых поверхностей модулей 0,6 мм баррель-модули имели, как правило, допуск 0,2–0,3 мм и в редких случаях до 0,6 мм.

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

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

- непрямолинейность несущей балки (0,2 мм);
- точность ее установки в горизонтальное положение (0,1 мм);
- неплоскостность боковой поверхности субмодуля (0,1 мм) и перпендикулярность его установки на несущую балку (максимум 0,2 мм; см. рис. 21).

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 субмодуля была в пределах 0,1 мм, что обеспечивалось технологией его сборки. Симметричность положения боковых поверхностей субмодуля относительно центральной плоскости симметрии модуля составляла $\pm 0,05$ мм, что также обеспечивалось геометрией мастерных пластин и технологией сборки субмодулей в приспособлении для их склейки. Следовательно, в конечном итоге неплоскостность боковой поверхности модуля определялась точностью установки субмодулей при их монтаже на балке.

Положение нижнего основания субмодуля, имеющего шпоночные пазы, задает выступ на несущей балке, который фиксирует положение субмодуля в поперечном направлении и дает возможность юстировки положения субмодуля 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-уровня с точностью 0,1 мм на 1 м длины. Точность отсчета составляла 0,01 мм на 1 м длины.

Затем на балку последовательно устанавливались субмодули. Перпендикулярность положения субмодуля в продольном положении определялась и контролировалась метрологическим угольником, а в поперечном направлении необходимо было определять угол наклона боковых поверхностей субмодулей относительно вертикали. Поскольку мини-уровень мог контролировать перпендикулярность и горизонтальность очень малых углов ($< 1^\circ$), а боковые поверхности субмодулей имеют наклон с вертикалью около 3° , то в верхней части субмодуля 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-уровня вертикальность этой поверхности в пределах 0,1–0,4 мм, можно достичь требуемой «вертикальности» положения плоскости симмет-

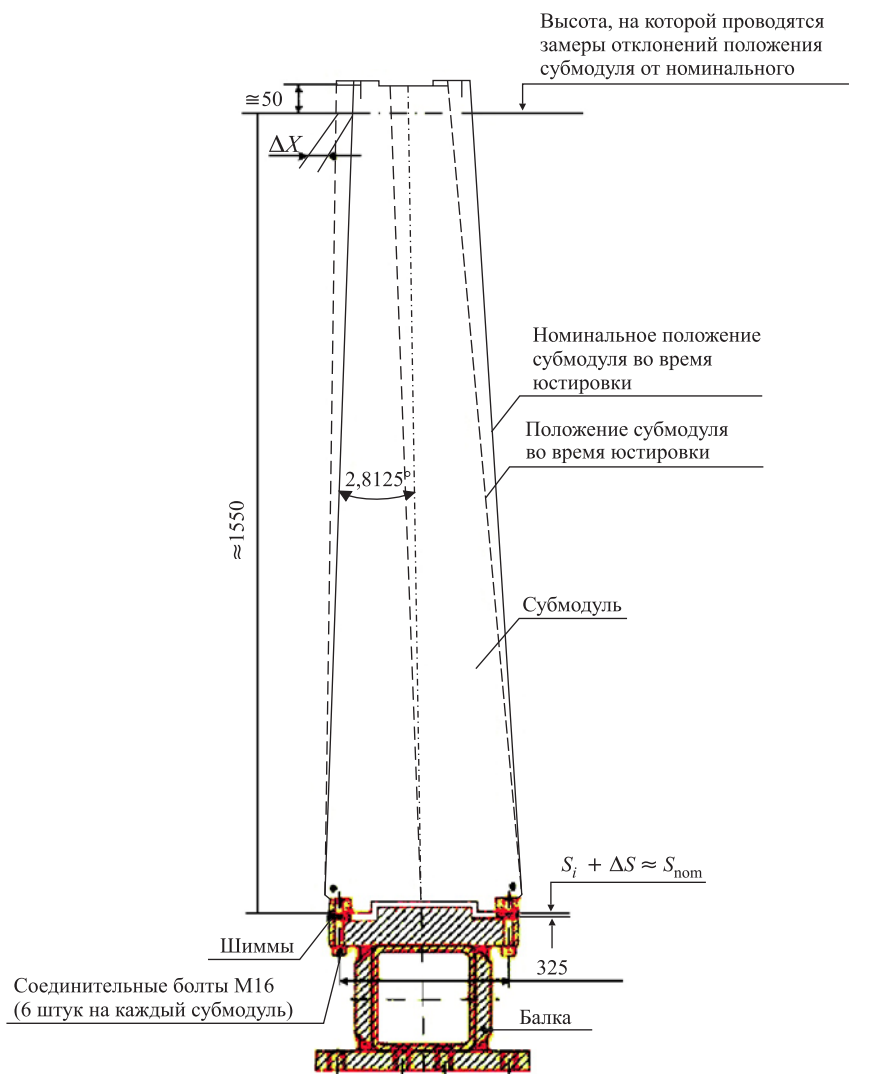


Рис. 21. Схема юстировки положения submodule при сборке модуля: S_i — первоначальная толщина шимм в данном месте; ΔS — толщина дополнительных шимм; S_{nom} — теоретически необходимая толщина шимм; ΔX — отклонение положения submodule от номинального

рии 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. 21). 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, так как, 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. 21).

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-уровня 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 точности 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, США) 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 фрезеровались для получения общей горизонтальной плоскости по всем опорам. Затем укладывался сляб толщиной 250 мм и его верхняя плоскость фрезеровалась на $\cong 15$ 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, «вручную» модули по точности сборки превосходили сопоставимые по размерам промышленные изделия, обрабатываемые механическим путем на высокопрецизионном станке. Достигнутый результат показан на рис. 22, где даны отклонения всех субмодулей от номинального положения в собранных модулях. Зачернены максимальные

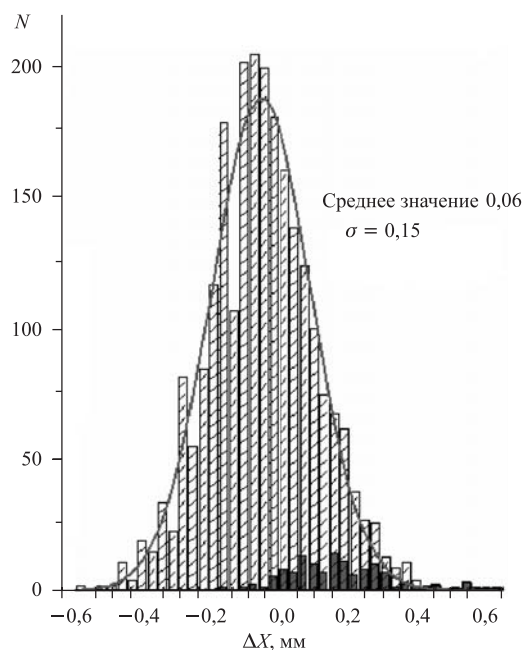


Рис. 22. Распределение максимальных отклонений субмодулей $H_i - H_{\text{ном}}$ в собранных в ОИЯИ модулях

отклонения субмодулей для каждого из 65 модулей. 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 в конструкторском отделе были спроектированы шесть специальных транспортных опор, изготовленных в ЛЯП (рис. 23).

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.

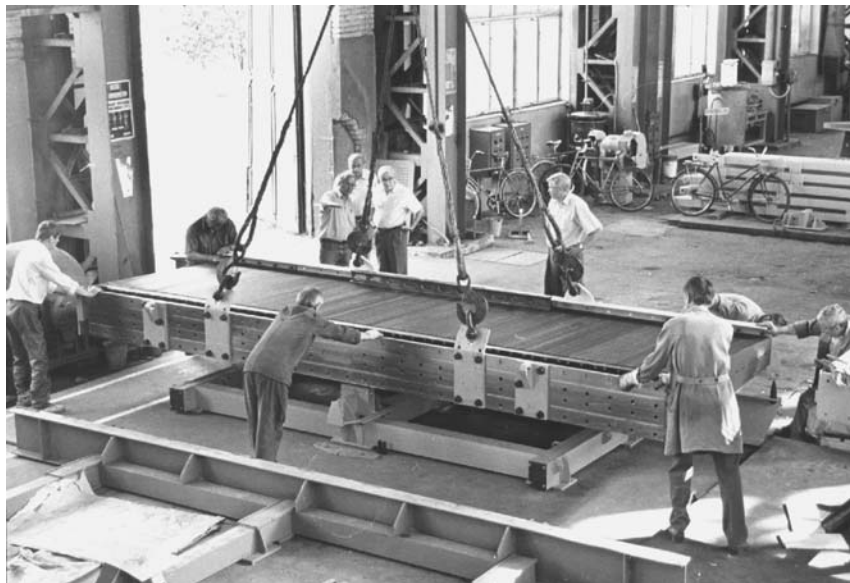


Рис. 23. Укладка модуля № 1 на транспортную опору для отправки в ЦЕРН. Август 1999 г. ЛЯП ОИЯИ



Рис. 24. Последний, 65-й модуль доставлен в ЦЕРН. 3 июля 2002 г.

3 июля 2002 г. последний, 65-й модуль прибыл в ЦЕРН. Поставленная перед ОИЯИ восемь лет назад задача была успешно выполнена (рис. 24).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре кратко рассматриваются некоторые существенные итоги работы в 1994–2002 гг.

- 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.

Декабрь 2004 г. был отмечен знаменательным достижением в подготовке к экспериментам на LHC: в подземном зале был собран первый крупный узел установки ATLAS — баррель адронного тайл-калориметра. Баррель — центральная и самая большая часть всего калориметрического комплекса,



Рис. 25. Дубненская команда, принимавшая самое активное участие в создании тайл-калориметра установки ATLAS

которая вдвое превосходит по размерам примыкающие к ней так называемые дополнительные баррели.

Этот успех завершил почти десятилетний период напряженной деятельности большого интернационального сотрудничества — Tile Cal Collaboration. ОИЯИ был активным участником этого сотрудничества и в ряде ключевых этапов создания калориметра внес решающий вклад принципиального значения в достижение названного успеха.

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.

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 E13-2001-257. 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. 1995.
4. *Budagov J. et al.* Report on Fabricating of ATLAS Hadron Calorimeter Prototype No. 5 in Dubna. ATLAS Int. Note TILECAL-N-014. 1994.
5. *Budagov J. et al.* Tile Calorimeter Module Assembly. ATLAS Int. Note TILECAL-N-021. 1994.
6. *Budagov J. et al.* ATLAS Tile Hadron Calorimeter Module Assembly Design. ATLAS Int. Note TILECAL-N-036. 1994.
7. *Batusov V. et al.* Development and Application of High-Precision Metrology for the ATLAS Tile-Calorimeter Construction. JINR Preprint E13-2004-177. 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.