

Уникальные климатические условия Чили стали причиной того, что на этой длинной узкой полоске земли между Тихим океаном и Андами сосредоточено самое большое количество обсерваторий в мире. Здесь действуют крупнейшие телескопы, принадлежащие США и ЕС, и постоянно строятся новые. Одним из них станет трехзеркальный телескоп-анастигмат в обсерватории имени Веры Рубин на горе Серо-Пачон, предназначенный для постоянного обзора неба с целью исследования темной материи и темной энергии, наблюдения за 20 миллиардами далеких галактик, картографирования Млечного Пути и пр. Планируется, что полноценная эксплуатация начнется в конце 2022 года.

Диаметр этого телескопа, прежде известного как LSST, составляет всего 8.4 метра, что далеко от рекордных показателей, однако прибор будет оснащен 3.2-гигапиксельной цифровой камерой – самой большой из существующих. Матрица камеры, размером 64 см в поперечнике, состоит из 189 светочувствительных ПЗС-матриц, работающих в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазоне; во время работы их охлаждают до -100°C для снижения уровня шума. Камера регулярно будет делать снимки с 15-секундной экспозицией, что сгенерирует огромные массивы данных. Первоначальные требования к ЦОД оцениваются в 100 Tflops производительности и 15 петабайт дисковой емкости для хранения данных – с увеличением по мере поступления новой информации.

Создание камеры началось в 2015 году, а 8 сентября 2020 года было объявлено об успешном испытании матрицы, в ходе которого инженеры спроецировали на нее пять изображений (включая фотографию Веры Рубин за работой и капусту Романеско) через отверстие размером 150 микрон. В итоге было получено 5 снимков высокого разрешения, которые подтвердили работоспособность матрицы.

О том, с какими трудностями столкнулись специалисты компании Keller Technology при изготовлении двух крупногабаритных металлических частей цифровой камеры, рассказывается в предлагаемом переводе статьи из сетевого журнала по металлообработке *“Modern Machine Shop”*.

Программирование в *Mastercam* обработки деталей для самой большой в мире цифровой камеры

Stephanie Hendrixson, пишущий редактор *“Modern Machine Shop”* ©2021 Gardner Business Media



Лаборатория SLAC National Accelerator Laboratory создает самую большую в мире цифровую камеру, которая будет установлена внутри Большого синоптического обзорного телескопа в Чили.

Но чтобы воплотить задуманное в жизнь, требуется опыт механической обработки таких компаний, как Keller Technology.

Национальная ускорительная лаборатория SLAC в Калифорнии, до 2008 года носившая название Центр Стэнфордского линейного ускорителя (Stanford Linear Accelerator Center), является одной из 17 национальных лабораторий Министерства энергетики США и ведет исследования по программе Агентства по науке этого министерства. Оператором лаборатории выступает Стэнфордский университет.

“Большую часть энергии во Вселенной нельзя объяснить только тем, что мы видим в обычный телескоп. Возникла научная потребность в таком приборе, который действительно позволит лучше понять природу темной энергии и темной материи”, – говорит Martin Nordby, главный специалист SLAC National Accelerator Laboratory по разработке цифровой камеры для LSST.



Компьютерная визуализация обсерватории имени Веры Рубин с телескопом LSST (Large Synoptic Survey Telescope – Большой синоптический обзорный телескоп).

Новый телескоп диаметром 8.4 метра позволит обозревать весь купол неба в южном полушарии, а также фиксировать то, что видит, с помощью самой большой в мире цифровой камеры.

(Иллюстрация от LSST Project / NSF / AURA)

Инструмент, который он описывает и который расширит взгляд ученых на Вселенную, – это Большой синоптический обзорный телескоп (*Large Synoptic Survey Telescope, LSST*), который однажды будет установлен на вершине горы в Чили. По его словам, с помощью *LSST* можно будет исследовать южное небо “почти от горизонта до горизонта”. Но *LSST* предназначен не только для наблюдения – он также будет фиксировать наблюдаемое. Оснащенный массивной цифровой камерой телескоп позволит ученым каждую вторую ночь фотографировать южное небо и затем собирать изображения в единую картину, чтобы изучить, как темная энергия и темная материя взаимодействуют с видимыми объектами, такими как звезды. (С учетом погодных условий, предполагается получать порядка 200 000 фотографий в год. – *Прим. ред.*)

Лаборатории *SLAC* в Калифорнии, финансируемая из федерального бюджета, является одним из участников проекта и отвечает за разработку и изготовление цифровой камеры для *LSST*, которая считается самой большой из когда-либо созданных. В отличие от других камер для телескопов, обычно представляющих собой устройства типа *plug-and-play*, которые можно заменять другими инструментами, камера *LSST* будет всегда оставаться на месте.

“Наша система действительно является целостной”, – говорит г-н *Nordby*.

По его словам, преимущество встроенной камеры заключается в том, что в результате у *LSST* должно быть меньше систематических ошибок по сравнению с другими телескопами. Однако её сложнее спроектировать, построить и интегрировать. Камера будет закреплена в середине телескопа, что ограничивает доступ к ней, а ремонт камеры может привести к долговременному простоем обсерватории. Таким образом, как подчеркивает г-н *Nordby*, требуется обеспечить высокую надежность компонентов, что напрямую ставит вызовы перед производителями.

Общие сведения о проекте

Проект создания телескопа, управляет которым консорциум *LSST Corporation*, стартовал в 2007 году: всё началось с первоначальных предложений и научно-исследовательских работ. Сейчас проект близится к завершению. Лаборатория *SLAC* – один из многих государственных и частных партнеров, в число которых входят Ассоциация университетов для исследований в области астрономии (*Association of Universities for Research in Astronomy, AURA*) и различные лаборатории по всему миру. Национальный научный фонд (*National Science Foundation, NSF*) финансирует

создание телескопа и системы управления данными, а Агентство науки Министерства энергетики США – непосредственно создание камеры.

Исследователи из лаборатории *SLAC* посвятили 10 лет проектированию и инженерным расчетам

Технология Динамической обработки была рождена в тесном взаимодействии разработчиков *Mastercam* с производителями режущего инструмента и станков с ЧПУ, устремленных в будущее.

сложной цифровой камеры с разрешением 3.2 гигапикселя, способной запечатлеть то, что видит телескоп *LSST*. Камера построена по модульному принципу. В

число подсистем входят затвор, фокальная *Charge-Coupled Device* – прибор с зарядовой связью), криостат (термостат для охлаждения матрицы), механизм смены светофильтров и пр. Модули тестируются в лаборатории по мере их завершения и проверяются на протяжении всего процесса интеграции.

Приборы с зарядовой связью

Прибор с зарядовой связью (ПЗС) – общее обозначение класса полупроводниковых приборов, в которых применяется технология управляемого переноса заряда в объеме полупроводника. Ярким представителем этого класса является ПЗС-матрица.

Матрица ПЗС – интегральная схема, представляющая собой совокупность МДП-структур, сформированных на общей полупроводниковой подложке так, что полосы электродов образуют линейную или матричную регулярную структуру. Расстояния между соседними электродами столь малы, что существенным становится их взаимовлияние вследствие перекрытия областей пространственного заряда вблизи краёв соседних электродов.



Цифровая камера *LSST* состоит из ряда подсистем. Компания *Keller Technology* изготовила для этого проекта две детали: корпус камеры (показан внизу) и задний фланец. (Иллюстрация *SLAC National Accelerator Laboratory*)

Вокруг всех этих подсистем будет возведена еще бóльшая алюминиевая конструкция, обрабатывающая камеру весом 2800 кг. Крупногабаритные части этой внешней конструкции – корпус камеры и задний фланец – были изготовлены компанией *Keller Technology* из Буффало (шт. Нью-Йорк). Хотя диаметр обеих деталей составляет 1.65 метра, тем не менее, при производстве требовалось уложиться в жесткие допуски (вплоть до 50 микрон в критических областях), чтобы обеспечить высокую точность работы камеры.

***Keller Technology* есть чем гордиться**

Не так давно отметившая 100-летний юбилей компания *Keller Technology* – это семейное предприятие, основанное в 1918 году, которым сейчас управляет уже пятое поколение семьи. Компания располагается в двух местах: одно в Буффало, где изготавливались детали камеры, – там работают 135 сотрудников, второе – в городе Шарлотт (шт. Северная Каролина), где работают еще 65 человек.

Производственные возможности *Keller Technology* охватывают ручную и роботизированную сварку, механическую обработку и сборку систем для полупроводниковой промышленности, а также для национальных лабораторий, отрасли медицинского оборудования и др. Одной из сфер специализации компании является производство вакуумных камер (как правило, из алюминия), в ходе которого используется сварка, механическая обработка и полировка, а также привлекается собственное оборудование для вакуумных испытаний.

Компания гордится своим умением справляться со сложными, проблемными деталями.

“Мне нравится говорить новичкам, что всё [оборудование], что здесь есть, находится здесь для того, чтобы сделать работу, с которой не сладят другие компании”, – говорит *Scott Steggs*, инженер-технолог CAD/CAM.

Компания *Keller* стала экспертом в единичных работах и небольших проектах, но последние 15 лет она двигалась в сторону сложных мелкосерийных заказов по механической обработке.

“Долгосрочные проекты дают нам возможность улучшить наш производственный процесс, а также лучше прогнозировать и планировать будущие проекты”, – говорит *Shane Slack*, директор по производству.

Полученные знания затем могут быть применены в будущей работе. Один из путей воплощения их в жизнь выражается в новом акценте на ведение обработки деталей, даже уникальных, без присмотра оператора.

“Мы любим бросать себе вызов – выключать свет в цехе всегда, когда это возможно”, – говорит г-н *Slack*.

Например, новейший обрабатывающий центр с ЧПУ, используемый в компании *Keller Technology*, – пятиосевой DMC 160 от DMG MORI – обычно успешно работает более 60 часов подряд без присутствия оператора в выходные дни. Сделать

всё правильно с первого – и, возможно, единственного раза – имеет решающее значение.

Планирование и опыт, необходимые для осуществления этого, а также для корректировки, когда что-то идет не так, стали особенно важными, когда компания получила заказ на производство двух крупногабаритных деталей для цифровой камеры телескопа.

... и есть, куда стремиться

При изготовлении деталей камеры *LSST* специалистам *Keller Technology* пришлось применить все свои знания в области сварки и снятия остаточных механических напряжений, а также опыт обработки на станках ЧПУ. Когда я приехала сюда в начале апреля, компания уже отправила задний фланец заказчику и вовсю занималась производством корпуса камеры.

Задний фланец представляет собой плоскую цилиндрическую деталь, которая обеспечивает

Технология Динамических траекторий Mastercam реализует захватывающий новый подход к созданию траекторий совсем другого уровня эффективности.



Задний фланец диаметром 1.65 метра будет соединять камеру с остальной частью телескопа. Использование термодатчиков для посадки инструмента с обжимом, в сочетании с очень маленькой глубиной резания, позволили снизить вибрацию и повысить точность обработки. (Фотография предоставлена компанией Keller Technology)



Портальная конструкция и большая рабочая зона обрабатывающего центра Parpas XS 63 в сочетании с гибкими возможностями 5-осевой высокоскоростной фрезерной головки позволили обработать фланец всего за два установка.

С помощью комбинации прецизионных блоков деталь была поднята над столом, что обеспечило максимальный доступ. Фиксировали фланец стандартные зажимы. (Фотография предоставлена компанией Keller Technology)

жесткость остальной части камеры и её соединение с телескопом. Перед механической обработкой заготовку, изготовленную из алюминиевого сплава 6061 методом горячей объемной штамповки, подвергали операции вибрационного снятия напряжений для стабилизации атомов в металле. Затем с помощью портального 5-осевого обрабатывающего центра **Parpas XS 63** в ней были вырезаны различные отверстия и карманы.

Этот обрабатывающий центр имеет большую рабочую зону размером 600 × 300 × 150 см по осям X, Y и Z – достаточно места для размещения фланца диаметром 1.65 метра и корпуса высотой примерно 77 см. Однако реальным преимуществом является наличие сменных головок. В компании *Keller Technology* используют три варианта:

- фрезерная головка для прямой черновой обработки;
- универсальная индексная угловая головка;

- универсальная 5-осевая головка для высокоскоростного фрезерования.

Для одноразовых и мелкосерийных работ наличие этих опций обеспечивает гибкость при выполнении на станке *Parpas* ряда операций с минимальным числом переустановок.

Как для обработки фланца, так и для обработки корпуса, применялась высокоскоростная фрезерная головка с интерфейсом *HSK 100*, обеспечивающая скорость вращения инструмента до 20 000 об/мин. Небольшой размер головки позволяет ей поместиться внутри крупных деталей при обработке труднодоступных участков, таких как карманы на заднем фланце. Горячая посадка с обжимом дает возможность использовать длинные инструменты, необходимые для доступа к некоторым карманам; фрезерование производилось с очень небольшой глубиной резания, чтобы получить хорошее качество поверхности в этих областях. Кроме того, такая посадка уменьшила вибрацию, что обеспечило более точную и плавную резку.

Конструкция оснастки, которая фиксировала фланец над столом (для удержания и подъема детали использовалась комбинация стандартных зажимов с прецизионными блоками и алюминиевыми обрезками труб после гидроабразивной резки), обеспечила хороший доступ для механической обработки. В сочетании с гибкостью возможностей 5-осевой головки это позволило обработать задний фланец всего за два установка. Аналогичная стратегия подходит и для обработки корпуса камеры, когда шпинделю надо находиться внутри детали.

Программирование обработки

Программирование обработки, которая производилась с помощью обрабатывающего центра *Parpas*, осуществлялось средствами *CAD/CAM*-системы *Mastercam* от *CNC Software, Inc.*

“Обработка этих деталей включает несколько сотен операций”, – говорит г-н *Steggs*, который и программировал обработку обеих деталей камеры *LSST*. – “Требуется время на подготовку,

чтобы убедиться, что у нас всё в порядке, и *Mastercam* действительно является нашей первой линией защиты. И это касается не только ведения обработки в цехе без присутствия человека, но и успеха выполнения уникальных работ или изготовления опытных образцов”.

После создания управляющей программы и первичной проверки траектории путем симуляции, г-н *Steggs* переходил в среду *VERICUT* компании *CGTech* (теперь принадлежит *Sandvik*. – *Прим. ред.*). Эта система служит



Инженер-технолог Scott Steggs за работой. Одним из преимуществ использования CAD/CAM-системы Mastercam является полный контроль процесса и возможность готовить УП в автономном режиме, когда станки в цехе обрабатывают другие детали. (Фотография предоставлена компанией Keller Technology)

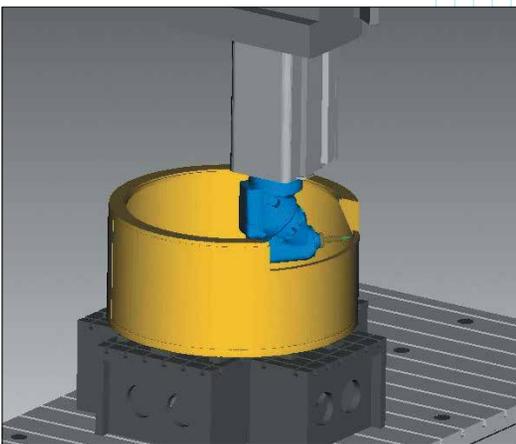
Динамические траектории Mastercam могут уменьшить время обработки на 25÷75%, а в ряде случаев черновой обработки – на 100÷300%.

камеры, которые она производит, требуют полировки вокруг уплотнений. Малейшая шероховатость может создать щель и привести к утечке, поэтому крайне важно выполнить этот этап правильно. Что касается деталей камеры, то полировали двойного действия (DA) и подушечки Scotchbrite обеспечили доводку поверхностей до требуемого уровня чистоты.

Несмотря на большие габариты деталей камеры, размерные допуски были заданы очень жесткие: для некоторых критических размеров – в пределах 50 микрон. Для проверки обеих деталей компания Keller Technology использовала координатно-измерительную машину Global Advantage – систему для крупных деталей (2000 × 4000 × 1500 мм), обеспечивающую измерения с точностью до 0.013 мм. КИМ является программируемой, приводится в действие двигателем и может как сканировать детали, так и производить контактные измерения.

“Возможность сканирования особенно полезна для таких сложных деталей, как эти”, – говорит Steve Kregulec, инспектор по контролю качества.

для продвинутой комплексной симуляции движения инструмента и процесса удаления материала. Для сложных деталей, таких как корпус камеры, когда шпиндель должен работать глубоко внутри, особенно важно добиться точной имитации процесса. Кроме того, специалисты Keller Technology обнаружили, что предварительная проверка точности размеров и оптимизация траекторий инструмента позволяет улучшить качество обработки поверхностей и кромок.



Система VERICUT используется для симуляции обработки и оптимизации траекторий инструмента. (Изображение предоставлено компанией Keller Technology)

Финишный этап

После механической обработки обеим деталям требовалась полировка поверхностей до 4-й степени чистоты (так называемой молочной или санитарной). Этот стандарт обычно используется в пищевой промышленности (в том числе для молочного оборудования), так как получаемая гладкая поверхность препятствует скоплению потенциально опасных бактерий.

Полировка – это ключевая компетенция компании Keller Technology, поскольку вакуумные

Сканирование обеспечивает более полное представление о каждой детали и позволяет сопоставлять эти данные с CAD-моделью, чтобы выявить любые области, выходящие за пределы допуска. Кроме того, сканирование осуществляется намного быстрее, чем замер по точкам. Программное обеспечение PC-DMIS фиксирует данные, собранные КИМ Global Advantage.

В отношении фланца компания сразу же получила реакцию заказчика. Представители SLAC присутствовали в Буффало, когда в цехе проверяли обработанную и отполированную деталь. По словам г-на Kregulec, сложность и множество конструктивных элементов делали инспекцию детали утомительным занятием, требовавшим три или четыре дня, но присутствие заказчика позволило значительно сэкономить время.

Инженеры SLAC помогли интерпретировать чертежи, уточняли, какие размеры имеют

критически важное значение, отвечали на вопросы и вместе искали пути к решению в случаях, когда какие-либо размеры выходили за пределы указанного допуска. Всё это ускорило процесс переговоров, который обычно происходит по телефону или с помощью электронной почты. При этом было выявлено, что некоторые из заданных допусков обеспечить слишком сложно, и представители SLAC сразу же снизили требования.

“Для нашей стороны это было хорошо, потому что не надо было ждать ответов”, – говорит г-н *Krengulec*. – “При этом они на своей стороне получили более быструю доставку”.

Затем фланец отправили на операцию покрытия Алодином (патентованная хромато-фосфатная смесь) для создания защитной пленки. После возврата детали в компанию *Keller Technology* осталось только добавить резьбовые вставки. Этот шаг был особенно сложным, поскольку нельзя было допустить повреждения покрытия, так что сотрудники носили перчатки и использовали подкладки, чтобы предотвратить появление царапин на детали. Вставки были установлены, когда деталь находилась на козлах; при этом один сотрудник стоял внутри, а другой

помогал снаружи. После установки каждая резьбовая вставка была проинспектирована.

Готовый фланец был доставлен в SLAC для установки нужных деталей, после чего его отправили партнеру *LSST* во Франции для интеграции с карусельным механизмом, обеспечивающим смену светофильтров.

Перефокусировка

Хотя изготавливаемые детали камеры имели много общего с вакуумными камерами и другими крупными сварными изделиями, которые обычно производит *Keller Technology*, не всё шло гладко. У компании были свои сложности с этими деталями, но она проявила ту же гибкость и стремление к познанию нового, что и при любой другой работе.

На тот момент, когда я посетила *Keller Technology*, задний фланец был уже готов и отправлен, но корпус камеры всё еще находился в стадии изготовления, которое в данном случае оказалось еще более сложной задачей. Корпус представляет собой цилиндрическую деталь из

Динамические траектории Mastercam обеспечивают равномерный съём материала, что уменьшает вибрацию и улучшает отвод тепла от детали и инструмента вместе со стружкой.



Для проверки заднего фланца компания *Keller* использовала координатно-измерительную машину *Global Advantage*. Кроме того, на этапе инспектирования присутствовали представители SLAC, что позволило уточнить допуски “на лету” в случае необходимости. (Фотография предоставлена компанией *Keller Technology*)



Корпус камеры, после первой попытки снять остаточные механические напряжения, был установлен на столе горизонтального фрезерно-расточного станка *Toshiba Shibaura BF-130B*. Это обеспечило удобство при проведении измерений, необходимых для определения того, какие области детали не соответствуют спецификациям SLAC. (Фотография предоставлена компанией *Keller Technology*)

алюминиевого сплава 6061 (ISO 209: 2007:6061) того же диаметра, что и задний фланец (165 см), но большей высоты (76.2 см) и с более тонкими стенками. На самом деле корпус состоит из нескольких сваренных вместе частей: основная оболочка – металлопрокат, а сверху и снизу – кованные кольца. В нескольких местах приварены дополнительные боковые пластины, как и косынки по периметру с внутренней стороны.

Сварочные работы специалисты *Keller Technology* выполнили на своём предприятии, а затем отправили деталь партнерам для первичной обработки внешнего и внутреннего диаметра на большом вертикальном токарном станке. Вот тут и начались проблемы. Оболочка, которая имела начальную толщину 1.59 см, в некоторых местах нуждалась в доводке до 0.6 см или даже меньше. Сварка вызывает в металле остаточные напряжения, и, по мере того как корпус становился тоньше, эти напряжения стали проявляться.

“Мы думали, что толщина материала достаточна для выполнения обработки. Но стенка стала настолько тонкой, что даже перемещение детали могло нарушить допуски, и субподрядчик остановил работу”, – так описал ситуацию **Jorge Martinez**, менеджер отдела качества.

Тогда компания *Keller Technology* отправила корпус на низкотемпературную термообработку – контролируемый процесс, при

котором металл постепенно нагревается и охлаждается, что позволяет снять напряжения у металлических сплавов на основе алюминия. Предполагалось, что это поможет стабилизировать сваренный материал, но в результате корпус вернулся с цилиндрическими деформациями.

Чтобы решить проблемы с круглостью, корпус камеры установили на горизонтальном фрезерно-расточном станке *Toshiba Shibaura BF-130B*. Идея заключалась не в том, чтобы задействовать его возможности для резки детали, а в том, чтобы использовать большой поворотный стол для проведения измерений и определения тех мест, где деталь имеет неправильную форму. Кроме того, открытая конструкция станка обеспечила доступ при выполнении следующей операции – сварки.

Когда я посетила цех, там как раз производилось механическое выправление формы детали.

“Мы “поднимали” участки стенки (подобно тому, как это делают с помощью автомобильного домкрата), пока диаметр не достигал нужной величины”, – поясняет г-н *Martinez*.

Затем была изготовлена четырехспицевая поддерживающая конструкция из алюминиевых труб. Эту конструкцию, называемую “паук”, приварили внутри корпуса, закрепив его на поворотном столе станка *Toshiba*. С другой стороны корпуса установили вторую такую же крестовину. После этого деталь снова была отправлена для снятия внутренних напряжений уже при более высокой температуре – на этот раз с “пауками”, чтобы сохранить круглую форму.

Приближаясь к общей картине

Когда корпус во второй раз прошел процедуру снятия напряжений, “пауков” удалили и отправили его на токарную обработку субподрядчику.

Следующим шагом стала обработка вырезов и чистовое фрезерование, для чего использовался порталый обрабатывающий центр *Parpas XS 63*. Управляющая программа для этого уже была готова.

Одним из преимуществ *CAD/CAM*-системы *Mastercam* является то, что она позволяет учесть и контролировать практически все нюансы обработки, а также работать автономно, независимо от станка, так что г-н *Steggs* мог разрабатывать УП для корпуса камеры, когда в цехе обрабатывались другие детали. К тому времени, как корпус вернулся после токарной обработки, УП была сформирована, а также верифицирована с помощью программного обеспечения *VERICUT*.

Динамические траектории Mastercam облегчают обработку твердых материалов.



*После растягивания корпуса камеры до нужных размеров, в него были сварены две крестовины для фиксации. Вся эта конструкция была повторно отправлена для снятия остаточных внутренних напряжений.
(Фотография предоставлена компанией Keller Technology)*

“Финишная обработка внутренней части этой детали – задача непростая”, – поясняет *Scott Steggs*. Дело в том, что требуется осуществить поверхностную обработку для удаления материала толщиной от 3.1 до 4.8 мм на всём протяжении.

Для этого компании снова пришлось положиться на высокоскоростную обрабатывающую головку – и не только из-за скорости вращения, но и из-за размера. Косынки на внутренней поверхности корпуса позволяли субподрядчику обточить только половину внутренней части, поэтому остальное надо было фрезеровать на станке *Parpas*, а головка при этом должна находиться внутри детали.

Внутренний радиус обрабатывался шаровой фрезой с боковым шагом примерно 0.8 мм. На завершающем этапе требовалось вырезать проёмы и просверлить отверстия, после чего подвергнуть корпус полировке и инспектированию перед отправкой заказчику – лаборатории *SLAC*.

“Хотя процесс изготовления этих деталей был непростым, мне приятно думать, что одна из причин, по которой они [*SLAC*] обратились к нам, заключается в том, что мы в состоянии справиться с самыми сложными, проблемными деталями”, – говорит г-н *Slack*.

Заложенные в *Mastercam* стратегии создания траекторий обеспечивают возможность эффективной обработки большими радиусами режущей зоны инструментов малого диаметра.

Это подразумевает не только чисто техническую способность обрабатывать такие детали, как корпус камеры или задний фланец, и оснащенность *CAD/CAM*-инструментарием *Mastercam*, но также гибкость и творческий подход к решению проблем по мере их возникновения, способность научиться чему-то на каждой новой детали.

“В будущем, столкнувшись с чем-либо, похожим на корпус камеры, мы уже будем иметь представление о том, как поведет себя материал (алюминий). Теперь мы знаем, что для такой сварной конструкции трудно добиться правильной цилиндрической формы”, – говорит г-н *Martinez*.

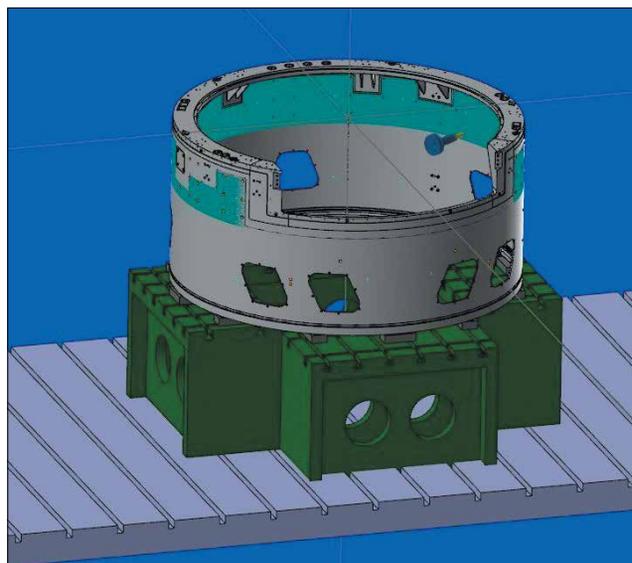
Опираясь на полученные знания, компания будет использовать другой процесс подготовки к сварке и другие условия для снятия внутренних напряжений в любых будущих деталях, напоминающих этот корпус.

Тот труд, который *Keller Technology* и другие подрядчики, участвующие в этом проекте, вложили в изготовление деталей для *LSST*, окупится очень скоро. Когда телескоп начнет действовать, он позволит ученым изучать всё космическое пространство, от околоземных астероидов до самых старых частей Вселенной.

“Мы рассчитываем на великие открытия”, – говорит *Martin Nordby*.



После повторной операции снятия остаточных механических напряжений в корпусе камеры, крестовины были удалены. Дальнейшая обработка корпуса велась на станке *Parpas XS 63*. (Фотография предоставлена компанией *Keller Technology*)



Наличие косынок внутри корпуса камеры не позволяет вести токарную обработку верхней половины детали. Необходима фрезеровка изнутри на станке *Parpas* с использованием высокоскоростной фрезерной головки. (Изображение предоставлено компанией *Keller Technology*)