

М. БЭКСТРЕМ, Л.-Э. РЕННАР, А.В. КОПТЮГ



ЗАПЧАСТИ ДЛЯ СКЕЛЕТА

Что общего может быть у фигурного печенья, лезвия ледоруба и костного имплантата? Все они могут быть произведены по одной технологии, точнее, с помощью одного из вариантов семейства технологий настолько современных, что они пока не имеют даже устоявшегося названия. В англоязычной литературе для их обозначения обычно используют словосочетание «additive manufacturing», к которому в русском языке наиболее близко подходит знаменитое лемовское «свободное ваяние». Однако в русскоязычной литературе чаще встречается другой термин – «трехмерная печать». Эти технологии, применимые к самым разнообразным материалам – от пищевого сырья до полимеров и твердых сплавов – сегодня начинают использовать в медицине для изготовления «запасных частей» для человеческого тела по «индивидуальному заказу»

Наше тело не перестает нас удивлять: несмотря на его видимую хрупкость по сравнению с неживой материей, оно состоит из достаточно прочных «частей» и весьма успешно противостоит внешним воздействиям. И все же эта прочность не безгранична, поэтому в древних и современных сказках мы встречаемся с такими суперсуществами, как Голем или Терминатор, чья «слабая плоть» заменена камнем, металлом или пластмассой.

Начиная с конца прошлого века, извечная мечта о возможности замены неисправных, травмированных или просто устаревших частей телесной оболочки человека начала постепенно претворяться в жизнь благодаря новейшим научно-техническим разработкам в самых разных областях знаний, от биологии и психологии до технического дизайна.

ЦЕНА ПРОТОТИПА

Изделия из пластмасс обычно производят методом экструзии, т. е. выдавливая горячую массу в разборную форму – «трехмерный негатив» детали. И хотя конечная стоимость таких изделий невелика, изготовление форм для отливки стоит очень дорого.

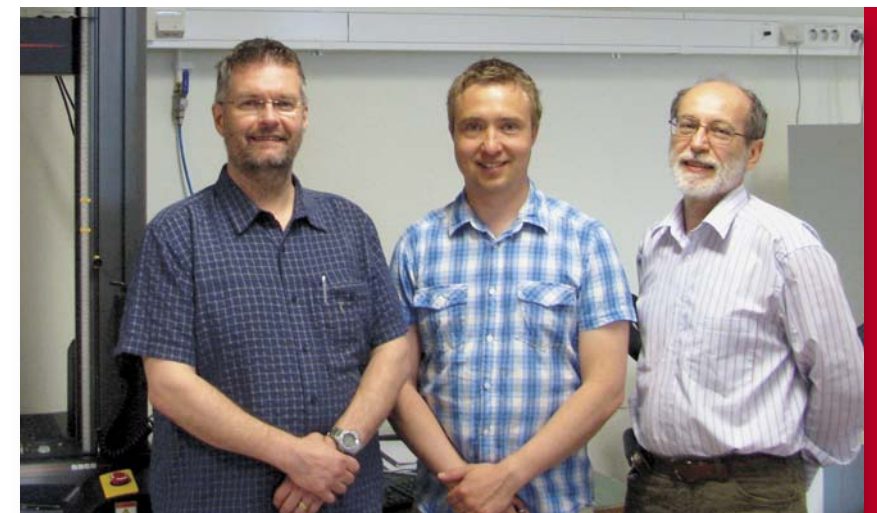
В современном производстве избегать дорогих конструкторских ошибок позволяет использование компьютерных программ для моделирования свойств реальных узлов и элементов конструкций на начальной стадии работы, а также создание предварительных прототипов.

Прототипы больших предметов обычно изготавливают вручную из дерева, гипса, пенопласта или глины. Быстрой и дешевой альтернативой, особенно для прототипирования изделий небольшого размера и сложной геометрической формы, являются технологии «трехмерной печати» пластиком

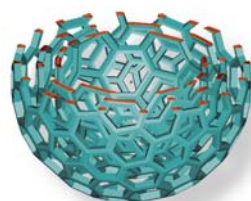
БЭКСТРЕМ Микаэль – доцент Института технологий и устойчивого развития Университета Центральной Швеции (Остерзунд). Автор и соавтор более 35 научных работ

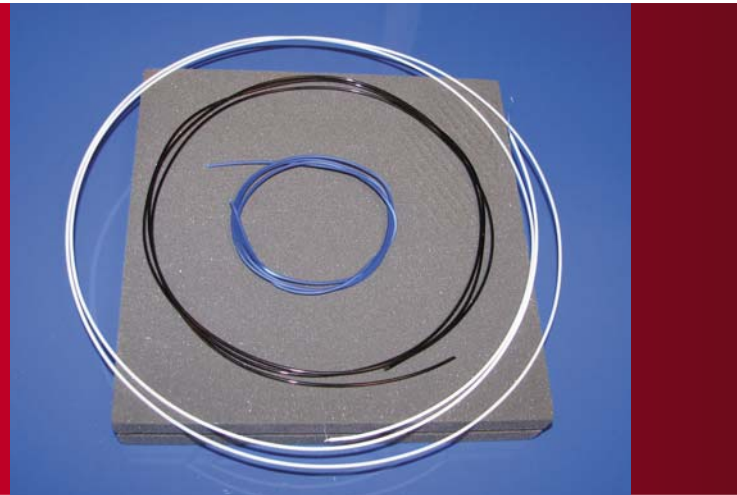
РЕННАР Ларс-Эрик – доцент Института технологий и устойчивого развития Университета Центральной Швеции (Остерзунд). Автор и соавтор более 35 научных работ

КОПТЮГ Андрей Валентинович – кандидат физико-математических наук, доцент Института технологий и устойчивого развития Университета Центральной Швеции (Остерзунд). Автор и соавтор более 50 научных работ и 4 патентов



Ключевые слова: персонализация биомедицинских имплантатов, аддитивные технологии, плавка электронным пучком, металлические стекла.
Key words: individually fit biomedical implants, additive manufacturing, electron beam melting, amorphous metal





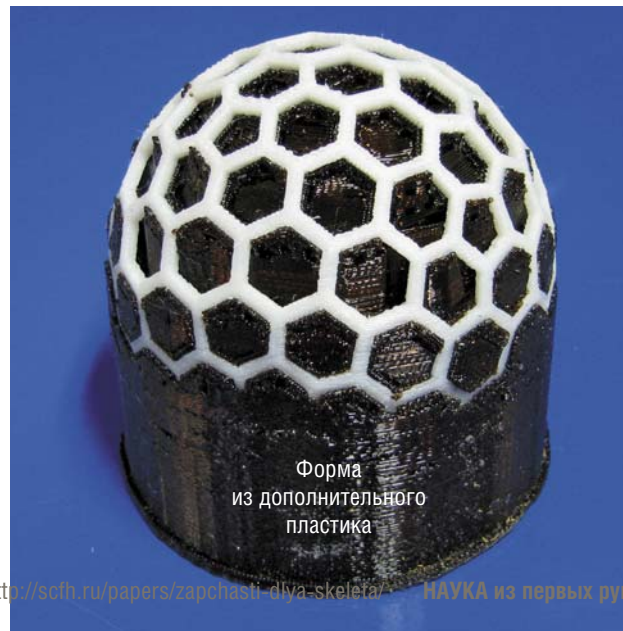
Рабочая (голубая и белая) и поддерживающая (коричневая) пластмасса на стартовой платформе

Принтер *PRODIGY Plus* производства компании *Stratasys* проводит послойную экструзию термопластичного полимера из тонкого подвижного сопла. В камере, где поддерживается высокая температура, находится «стартовая платформа» из вспененного полимера на трех винтовых опорах, на которую укладываются слои полимера. Когда один слой закончен, винтовые опоры сдвигают стартовую платформу и процесс повторяется. Чтобы слои держались в нужном месте и не сползали, их необходимо поддерживать. В *PRODIGY Plus* рабочая головка использует сразу две разных пластмассы: из одной формируется само изделие, из другой – «строительные леса». Рабочий пластик в остывшем состоянии жесткий, а дополнительный способен растворяться в горячей воде, поэтому от него легко избавиться, прогрев изделие в специальной «ванне»

«Свободная форма»

Появившиеся недавно благодаря достижениям в материаловедении и информатике производственные технологии «additive manufacturing», т.е. «изготовление наложением», являются своего рода антитезой классической технологии резки, при которой с заготовки удаляется лишнее. Они особенно эффективны для изготовления изделий сложной формы – именно это свойство акцентирует их шведское название, в переводе звучащее как «технологии свободной формы».

Создание изделия по «аддитивной технологии» начинается с разработки чертежа с помощью современной программы конструкторского дизайна. Следует обратить особое внимание на тот факт, что эти технологии основаны на послойном нанесении рабочего материала, поэтому соответствующая трехмерная компьютерная модель должна быть виртуально «нарезана» на необходимое количество «слоев». Каждый из таких слоев содержит информацию о том, в каком месте нужно расположить рабочий и поддерживающий материалы. Готовый файл-«чертеж» с подробным послойным «меню» посылается на исполнение специальному устройству – назовем его условно *трехмерный принтер*.



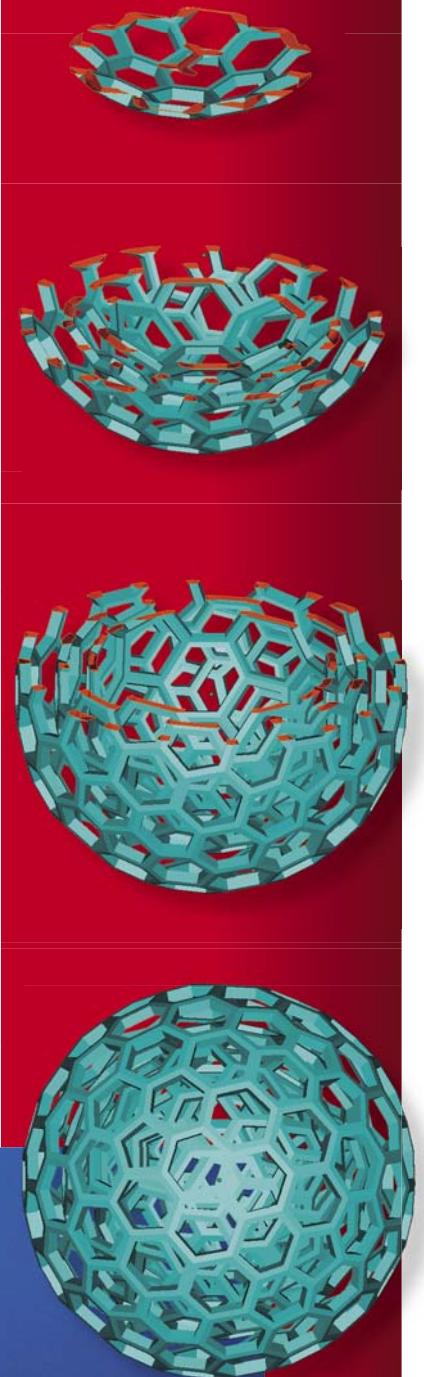
Форма из дополнительного пластика

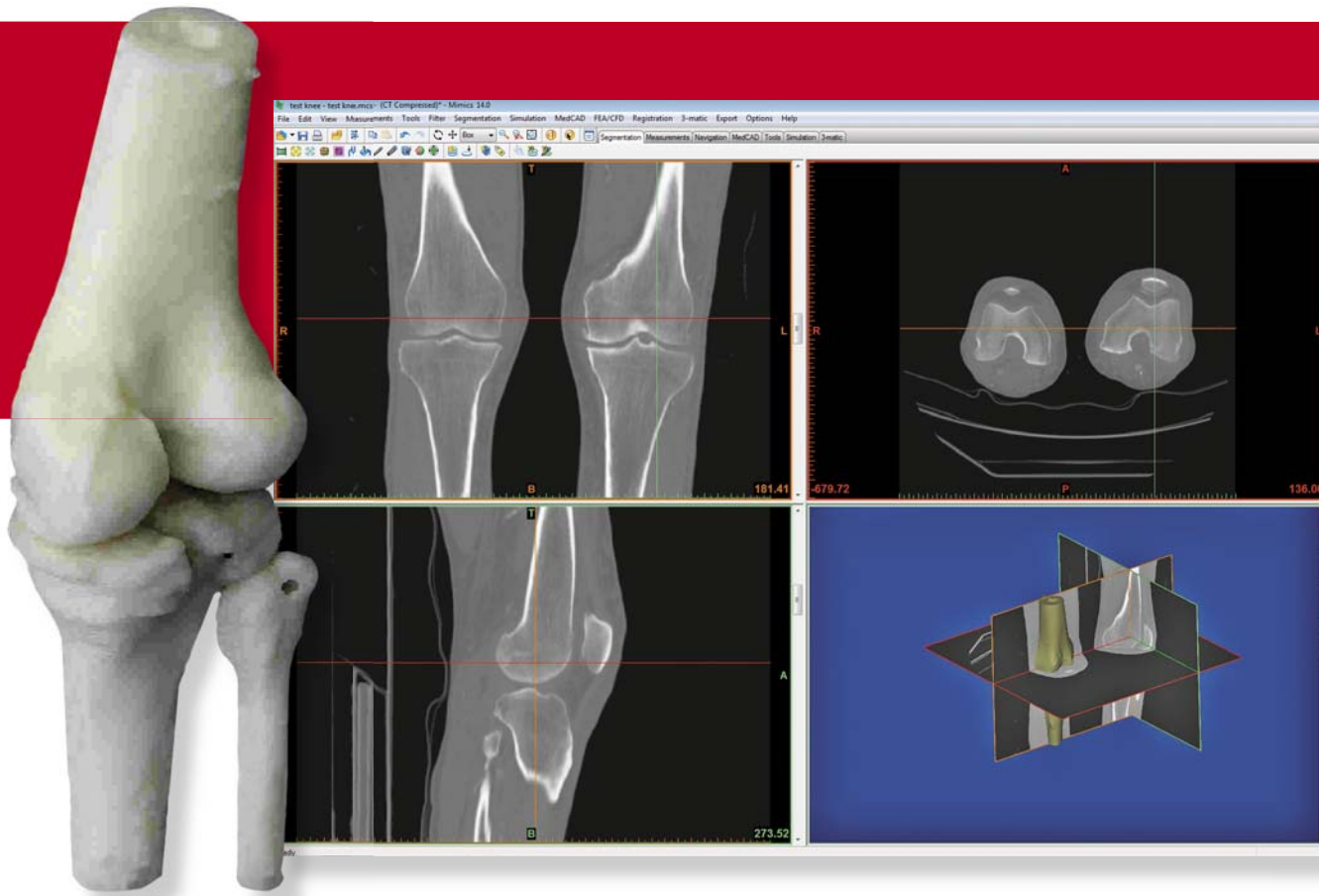
ВСЕ В ОДНОМ

Представьте себе, что вам нужно сделать игрушку наподобие китайских шаров – ажурных сфер, вложенных одна в другую. Китайские мастера издавна вручную вырезали такие изделия из дерева, кости и даже камня. Эта сложная и длительная работа требует высокого мастерства и концентрации внимания резчика: ошибка, особенно на заключительных стадиях процесса, может привести к необратимой порче всего изделия. Изготовление подобных неразборных игрушек обычными современными промышленными методами, по меньшей мере, проблематично. Зато с этой задачей прекрасно справляются аддитивные технологии: трехмерный принтер одновременно наносит концентрические элементы всех шаров на основу из поддерживающего пластика. После завершения процесса все поддерживающие слои удаляются

Форма и структура будущего изделия задаются компьютерным файлом, который аддитивный принтер использует в качестве чертежей. Для подготовки рабочего файла исходная трехмерная модель последовательно «нарезается» на слои подобно апельсину. Слева внизу – одна из стадий изготовления вложенных друг в друга ажурных пластмассовых шаров на принтере *PRODIGY Plus*

Технологии трехмерной печати позволяют создавать изделия не только практически любой формы, но и со свободно движущимися частями. Пример – пластмассовая модель функционирующего 10-сантиметрового разводного ключа, выполненная на трехмерном принтере *OBJET*. Этот принтер печатает не чернилами, а тонкими слоями различных полимеризующихся пластмасс: жесткими и мягкими, прозрачными и разноцветными. Пространственное разрешение *OBJET* составляет 600×600×1600 dpi (42×42×16 мкм). Минимальная толщина наносимого слоя – в несколько раз тоньше человеческого волоса – позволяет изготавливать детали с очень мелкими элементами





Подготовка рабочего файла для аддитивного принтера на основе трехмерных томограмм занимает не больше суток. Еще сутки требуется на то, чтобы изготовить точную предоперационную модель из полимерного материала (слева). Изображения обработаны компьютерной программой «Mimics» компании «Materialise»

Устройства, предназначенные для производства пластмассовых изделий, работают по-разному. В одних исходный гранулированный материал спекается лазерным лучом, в других используется практически настоящая послойная печать, как в обычных струйных принтерах, либо послойная экструзия, т.е. выдавливание горячей массы. Но все такие трехмерные принтеры работают по единому принципу: создавая деталь, они последовательно наносят тонкие слои материала, «печатая» сразу в трех измерениях.

Так, рабочая головка принтера *PRODIGY Plus* – отдаленного родственника хорошо известного «клеявого пистолета», под контролем компьютера перемещается в горизонтальной плоскости и постепенно выдавливает

на стартовую платформу тонкую «змейку» расплавленной пластмассы. Когда слой закончен, винтовые опоры сдвигают стартовую платформу на один шаг вниз, и машина наносит новый слой. Внутри рабочей камеры поддерживается высокая температура, благодаря чему последовательные слои хорошо «сцепляются» друг с другом. Таким образом, слой за слоем, создается изделие заданной формы.

Аддитивные технологии можно использовать при работе не только с пластмассами, но и с металлами и их сплавами.

За 48 часов

Когда инженеры начинают рассуждать о «конструктивной ограниченности» человеческого тела, это, в первую очередь, относится к его «несущим конструкциям» – скелету. Наши кости созданы таким образом, чтобы противостоять значительным статическим и динамическим нагрузкам, одновременно обеспечивая телу необходимую подвижность. Но если нагрузка превысит прочностные возможности кости, она сломается.



На сегодня уже восемь шведских пациентов были прооперированы с использованием костных имплантатов и крепежных пластин, изготовленных группой аддитивных технологий Института развития Университета Центральной Швеции.

Эти иллюстрации демонстрируют сложный случай восстановления нижней челюсти реального пациента, при котором отсутствующие части были собраны из секций, вырезанных из малой берцовой кости.

Слева – упрощенная модель, на которой поверхность кости представлена в виде набора покрывающих ее многоугольников (полигональная аппроксимация контуров).

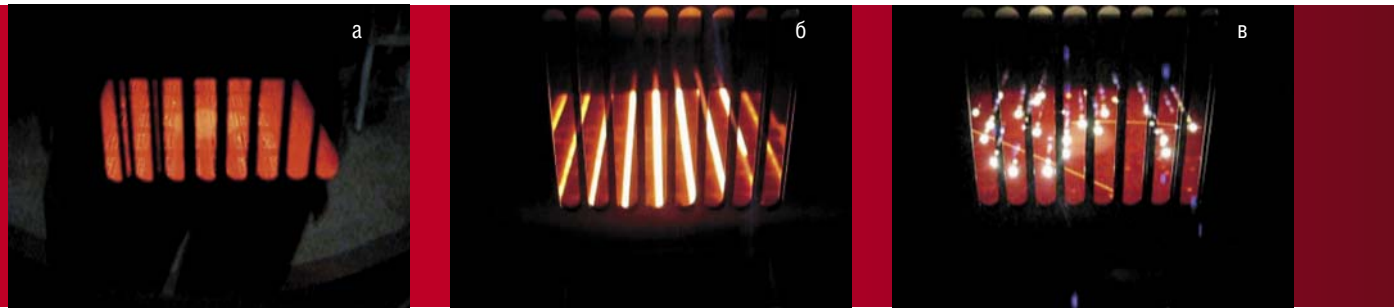
Справа – пластиковая модель костей и крепежные пластины из медицинского титан-алюминий-ванадиевого сплава, выполненные по аддитивным технологиям

Для «ремонта» перелома часто достаточно соединить края костей, обездвижив конечность гипсовой повязкой, однако нередко приходится прибегать и к хирургическому вмешательству. В самых же сложных случаях элементы нашей «несущей конструкции» бывают повреждены настолько сильно, что требуют частичной или полной замены.

Одна из самых серьезных проблем при производстве костных протезов и других искусственных имплантатов заключается в огромном разнообразии их возможных размеров и форм – от простых металлических пластин для фиксации фрагментов поломанных костей до сложных конструкций, заменяющих отсутствующие или сильно поврежденные фрагменты и даже целые суставы. При этом геометрические размеры скелета очень индивидуальны, поэтому даже в не очень сложных случаях хирургу часто приходится подгонять стандартный элемент из доступного «ортопедического конструктора» непосредственно во время операции. Фактически в этом случае операционный зал совмещается с механической мастерской, и ортопед отрезает куски металла и подгоняет протез по форме, пока больной находится под наркозом.

Если же говорить о целых «сменных узлах», то здесь ситуация еще более непростая. В промышленности путь к удешевлению продукции и переводу ее в категорию «доступное» идет через массовое производство, когда соответствующая деталь изготавливается в огромных количествах без изменений в конструкции. Но «универсального» имплантата не существует, а производство «индивидуализированных» изделий малыми сериями приводит к значительному удорожанию продукции.

Производители имплантатов нашли компромиссный выход: они поддерживают баланс цен путем снижения разнообразия размеров изделий. Так, в Европейском союзе по традиционным технологиям производится не более дюжины однотипных протезов различного размера. Но этого явно недостаточно, и у пациентов часто приходится подтачивать кости и применять особый «клей» для заполнения пустот между костью и имплантатом.

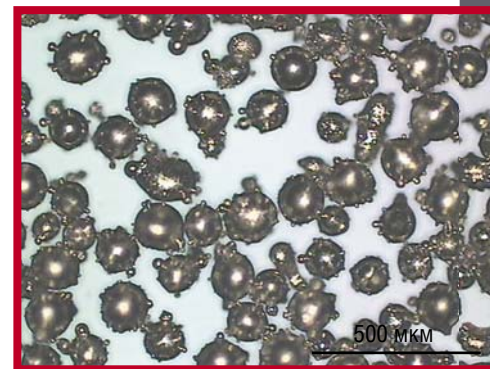


Есть и еще один нюанс. Говорят, что хороший хирург «думает руками». Действительно, многие хирурги заранее продумывают ход операции, пользуясь при этом предоперационными моделями костей, гипсовыми или пластмассовыми, которые традиционно выполняет скульптор по рентгеновским снимкам или трехмерным томографическим изображениям. Однако такой метод изготовления моделей требует много времени, а откладывать операцию зачастую нельзя по медицинским показаниям.

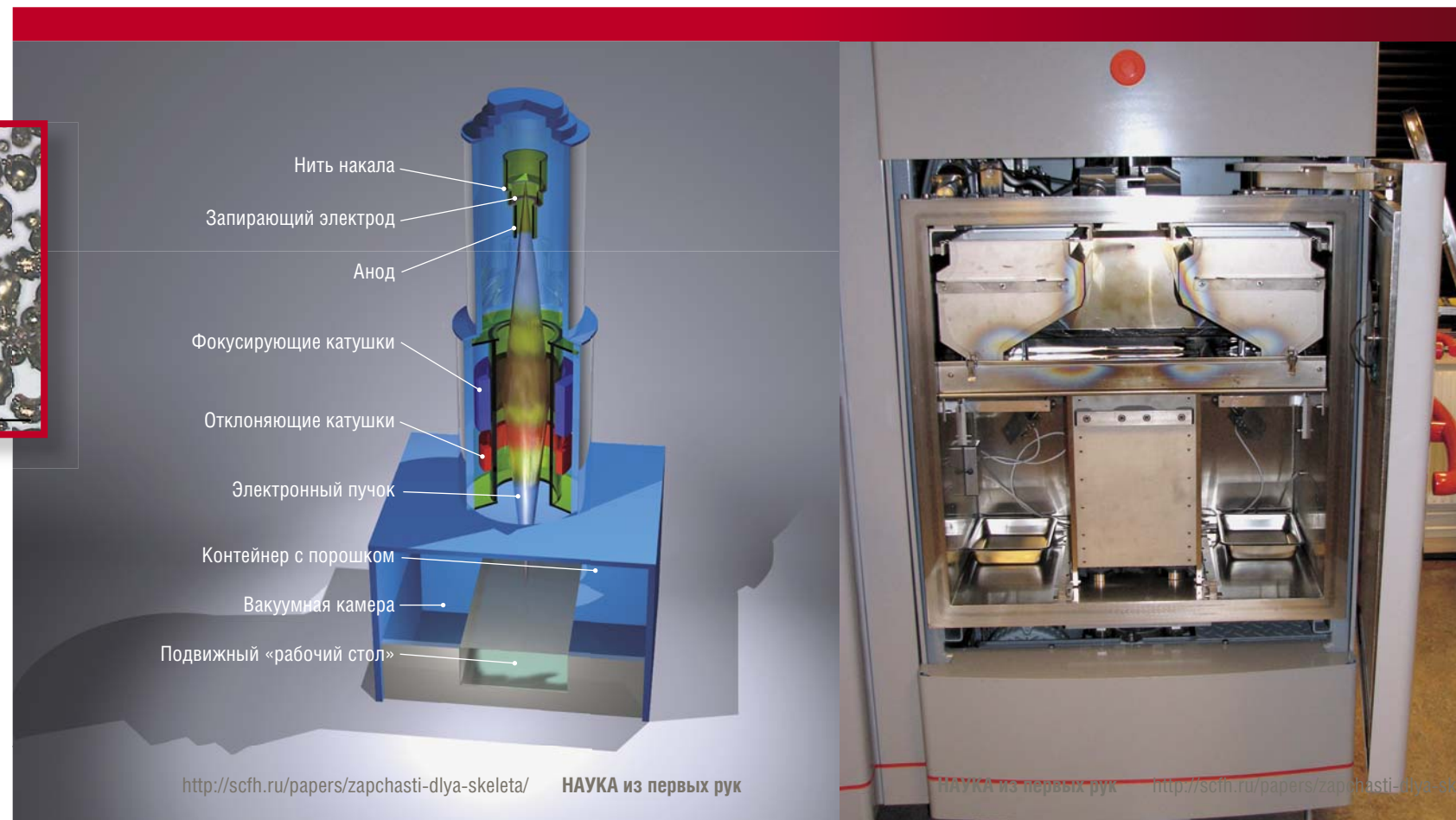
И здесь на помощь приходят аддитивные технологии, с помощью которых можно быстро изготовить не только точные пластиковые

В Институте технологий и устойчивого развития Университета Центральной Швеции установлена аддитивная установка для работы с металлами и сплавами, разработанная и серийно выпускаемая шведской компанией *ARCAM AB*. *ARCAM* управляется компьютером через сенсорный экран. Оператор может контролировать процесс непосредственно или с любого удаленного компьютера, а также получать «текущий отчет» по электронной почте или на мобильный телефон

Исходное сырье для изделия забирается и разравнивается «щеткой»,двигающейся в горизонтальной плоскости (а). После этого вся рабочая зона подогревается расфокусированным сканирующим электронным пучком до температуры 700—800 °С (б). На этой стадии порошок частично спекается. После этого сфокусированный пучок начинает плавить порошок в строго заданных областях наплавленного слоя (в)



Металлический рабочий порошок для аддитивного принтера должен быть достаточно мелкодисперсным, с округлым зерном, размером не больше толщины рабочего слоя (около 100 мкм). Такие порошки обычно изготавливают методом газовой атомизации с последующей разбраковкой по фракциям на ситах с разным размером ячеек



модели и металлические имплантаты, идеально подходящие по размерам и приемлемые по стоимости, но даже специальные операционные инструменты, такие как высокоточные приспособления для сверления или резки костей.

Процесс начинается с компьютерной обработки исходной информации – данных медицинской (обычно рентгеновской) томографии. В результате получают точное трехмерное изображение (цифровую модель) тела, включая кости, хрящи и мягкие ткани. Далее исходная цифровая модель «очищается» (фильтруется) с использованием специальных программ, чтобы получить четкие трехмерные изображения костей.

К сожалению, полученная таким образом геометрическая модель очень сложна и требует неоправданно больших компьютерных ресурсов для дальнейшей работы в инженерных приложениях. Поэтому на следующем этапе ее упрощают, представляя поверхность кости в виде набора покрывающих ее многоугольников (такое представление является стандартным для многих инженерно-конструкторских программ). И вот теперь, используя обычный компьютерно-модельный инструментарий, можно рассчитать прочность костей и быстро изготовить детальную пластиковую модель, используя трехмерный принтер.

Время, требуемое для подготовки файла, зависит от величины и сложности конкретного изделия и обычно не превышает суток. Примерно столько же потребует изготовление и самой пластиковой модели. Таким образом, уже через двое суток после обследования пациента врач может получить выполненную из полимерного материала точную предоперационную модель кости.

Металлы и сплавы, которые можно использовать для медицинских имплантатов, плавятся при высоких температурах (например, титан-алюминий-ванадиевый сплав – при 1650° С) и их очень сложно выдавливать через форсунку. Поэтому в аддитивных технологиях используют прецизионное плавление последовательно наносимых тонких слоев мелкодисперсного металлического порошка с помощью лазерного или электронного пучка.

Сплавы, разрешенные для производства имплантатов, – особые. Они должны не корродировать, быть прочными и, конечно, биосовместимыми, т. е. не вызывать нежелательной реакции организма. При аддитивной плавке электронным пучком рутинно используют такие сплавы, как титан-алюминий-ванадий и кобальт-хром, разрешенные для медицинского применения в Европейском союзе и США.

От получения результатов компьютерной томографии до получения готового, индивидуально подогнанного металлического имплантата проходит несколько суток – примерно такое время и требуется для подготовки серьезной хирургической операции. К тому же имплантаты, изготовленные аддитивной плавкой электронным пучком, прекрасно стерилизуются во время самого процесса, который проходит при очень высоких температурах в глубоком вакууме.

Внутри рабочей вакуумной камеры установки *ARCAM* пучок электронов, создаваемый электронной пушкой, направляется на слой рабочего металлического порошка. Благодаря значительному ускоряющему напряжению мощность пучка достигает нескольких киловатт, а поскольку он сфокусирован в небольшой области (несколько десятых долей мм), температура там значительно превышает 1000 °С. Этого вполне достаточно для быстрой плавки даже очень стойких сплавов.

«Пятно» электронного пучка движется по рабочей поверхности со скоростью несколько километров в секунду. Работа над одним слоем может продолжаться в течение нескольких минут, поэтому при изготовлении сложных изделий машина работает в автоматическом режиме достаточно долгое время. Полный цикл работы может занять до нескольких суток, поскольку изделие должно остыть, прежде чем его можно будет достать из рабочей камеры



Металлическое изделие, изготовленное по аддитивной технологии, находится внутри «кирпича» из спекшегося рабочего порошка как окаменелость внутри куска известняка. В герметичном шкафу, похожем на пескоструйное устройство, будущий имплантат очищается струей рабочего порошка.

Вверху слева – компьютерная модель нескольких индивидуально подогнанных протезов шейки бедра, стоящих на стартовой платформе принтера; вверху справа – изготовленные по этой модели имплантаты из титан-алюминий-ванадиевого сплава после очистки от спеченного рабочего порошка. Внизу – протезы шейки бедра из различных комбинаций пористых и сетчатых структур, плавно переходящих в сплошной металл



ПРЯМИКОМ ИЗ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Возможность манипулировать с трехмерными моделями в виртуальном пространстве, соединенная с возможностью их быстрого «овеществления», существенно расширяет потенциал восстановительной хирургии. Например, изображение раскошенной при сложном переломе кости можно «разобрать» на фрагменты, а затем сложить в строгом порядке так, как это должно быть сделано во время операции. Если же какой-либо из костных фрагментов сохранить не удастся, то можно определить форму замещающих элементов, крепежной металлической пластины-имплантата и оптимальное положение крепежных винтов. После этого программа генерирует компьютерный дизайн моделей кости и идеального имплантата, следующего всем изгибам костной поверхности, с учетом расположения отверстий под винты. Эти файлы уже можно использовать для изготовления пластиковых моделей и самого имплантата

Вслед за природой

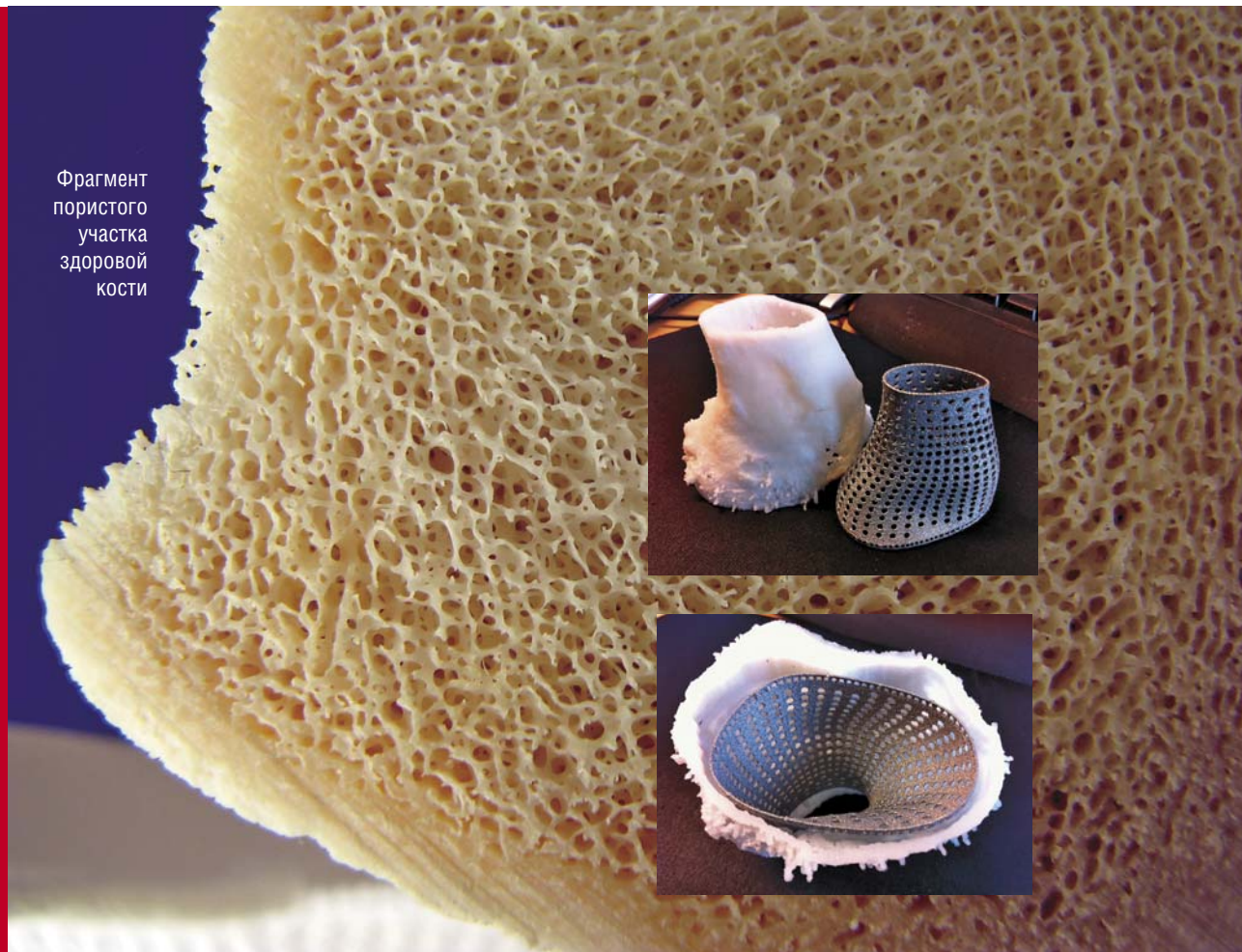
Точная подгонка формы металлических имплантатов, при всех своих плюсах, решает лишь одну из насущных проблем ортопедии. Более серьезной и во многом нерешенной задачей является обеспечение полноценного функционирования замененных «испорченных узлов», их долгосрочной бесперебойной работы внутри организма.

Стоит вспомнить, что все наши кости – даже те, которые называют трубчатыми, – не являются сплошными твердыми структурами, а включают в себя и многочисленные пористые участки. Имплантаты же, выполненные из сплошного металла, препятствуют свободному движению биологических жидкостей, тормозя процесс образования новых тканей.

К тому же цельнометаллические имплантаты гораздо прочнее окружающих их костей: например, сплошной титановый стержень чуть толще обычного карандаша выдерживает такие изгибающие усилия, как если бы по нему проехал автомобиль. Конечно, никакая кость подобных нагрузок не выдержит, и этот факт часто провоцирует вторичные переломы в непосредственной

Каждую минуту в России из-за остеопороза происходит семь переломов позвонков, а каждые пять минут – перелом шейки бедра. Эта болезнь – одна из основных причин инвалидности и смертности среди пожилых людей. Протезирование шейки бедра сегодня является распространенной операцией, а часто – и единственной возможностью сохранить пациенту подвижность. Протезы с индивидуально подобранной геометрией благодаря точной подгонке размеров служат гораздо дольше, чем обычные, обеспечивая пациенту полное восстановление подвижности





Фрагмент пористого участка здоровой кости

близости от имплантата – в месте, где кость не защищена металлом.

Все это означает, что в идеале не только форма, но и структура металлического имплантата должна быть приближена к натуральным костям, т. е. включать сетчатые и пористые участки. Но комбинацию пористых и сетчатых металлических структур, плавно переходящих в сплошной металл, чрезвычайно трудно получить с помощью традиционных технологий. А вот аддитивные с этим легко справляются.

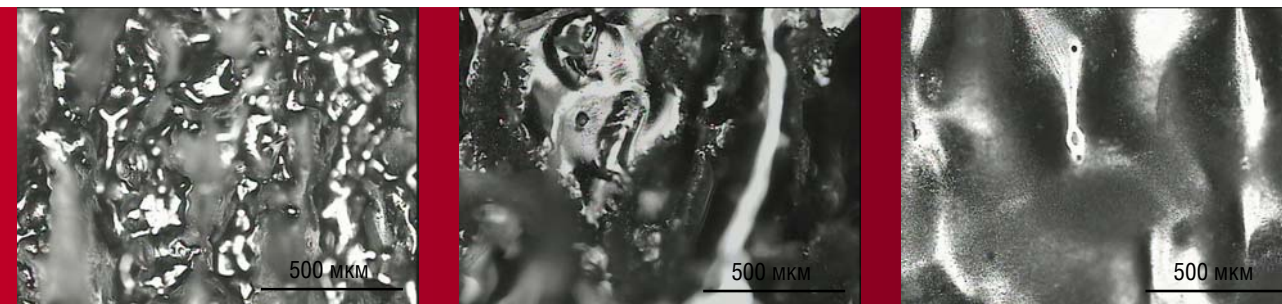
Рыхлая металлическая сетка, плавно переходящая в цельнометаллический стержень имплантата, служит для растущей кости своего рода арматурой и постепенно обрастает костной тканью. Такое соединение имплантата с исходной костью получается во много раз прочнее, чем при обычных технологиях.

Как уже упоминалось, избыточная прочность металлических структур, замещающих кости, в некоторых случаях становится недостатком. Однако подбирая толщину цельнометаллического стержня, окруженного трехмерной сеткой переменной плотности, можно

Такая защитная титановая сетка, изготовленная по аддитивной технологии, была вставлена внутрь большой бедренной кости реального пациента. В этом случае пораженные остеопорозом кости были настолько непрочными, что без поддержки не смогли бы удержать цельнометаллический протез шейки бедра

регулировать жесткость структуры. При этом внешняя часть (сетка) будет по-прежнему точно следовать поверхности кости, а внутренний стержень – обеспечивать необходимую жесткость.

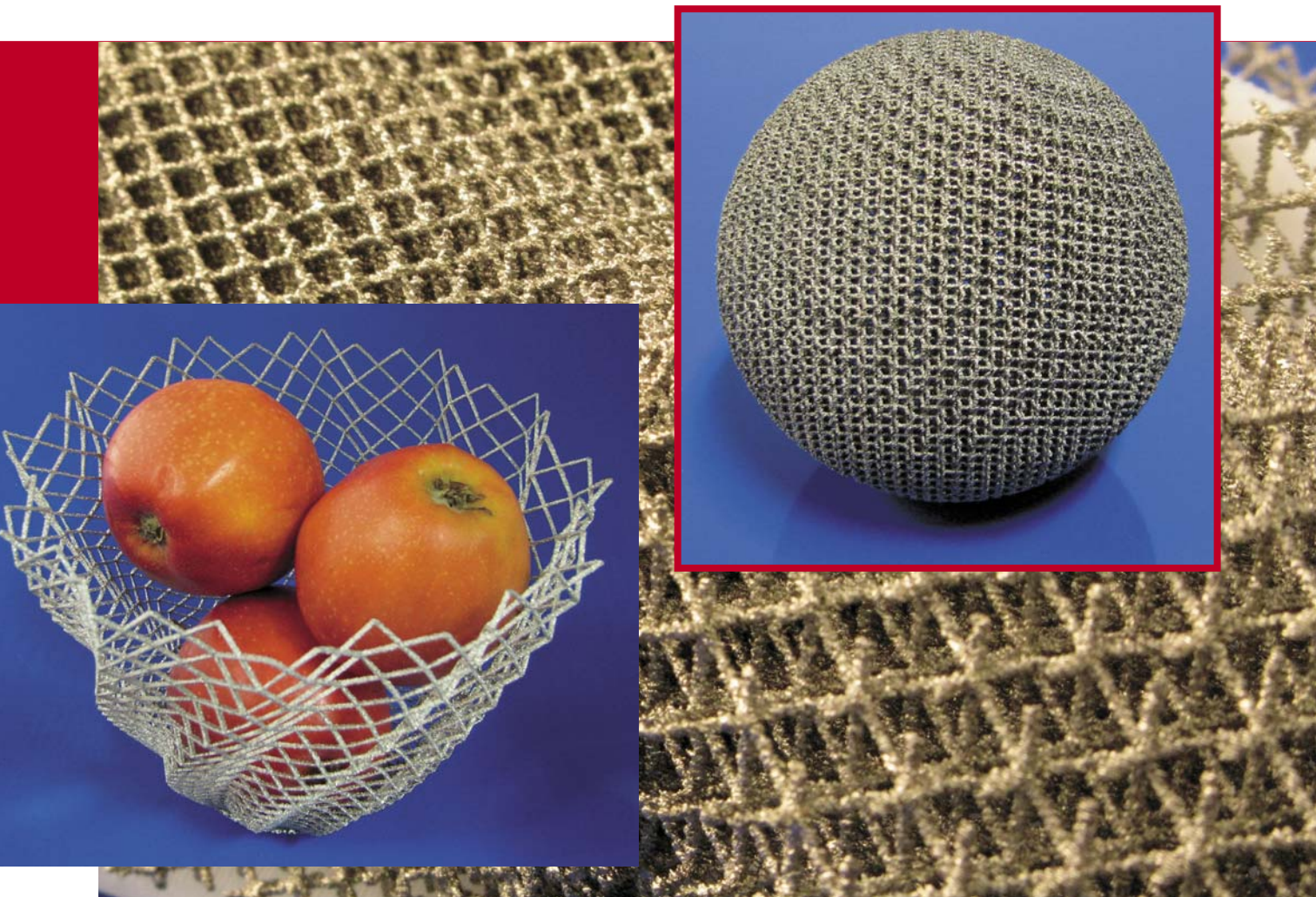
К тому же нельзя забывать, что вновь нарастающая костная ткань плохо держится, если поверхность имплантата будет слишком гладкой. Поэтому после изготовления имплантатов традиционными методами их поверхность, которой предстоит соприкоснуться с костью, специально делают более шероховатой. А в аддитивных технологиях шероховатая, пористая или сетчатая поверхность получается непосредственно в процессе изготовления тела имплантата.



С помощью электрохимического травления можно значительно изменить геометрию поверхностей имплантатов. Процесс сглаживания поверхности титан-алюминий-ванадиевого имплантата с увеличением времени электрохимического травления. Оптическая микроскопия



В этом сложном клиническом случае недостающие части челюсти пациента были замещены металлическими имплантатами с «гнездами» для будущих зубных протезов. При этом использовался как цельнометаллический протез (нижняя модель) так и протез из трехмерной металлической «сетки» (верхняя модель). Крепёжные пластины и замещающие имплантаты, созданные по аддитивной технологии из медицинского титан-алюминий-ванадиевого сплава, представляют собой единое целое



тонкий (на уровне микро- и нанометровых элементов) контроль за поверхностью изделия.

К тому же необработанная поверхность деталей, выполненных аддитивной плавкой электронным пучком, содержит большое количество частично приплавленных зерен рабочего порошка. И всегда присутствует риск, что эти зерна могут оторваться от протеза в то время, когда он находится в человеческом организме.

Сегодня наиболее перспективными методами обработки поверхностей имплантатов, изготовленных по аддитивным технологиям, считаются плазменные (в вакууме или разреженной газовой среде), химические и электрохимические (в растворе). Так, электрохимическим травлением можно убрать с поверхности лишние зерна рабочего порошка, а в некоторых случаях и сгладить мелкие и средние элементы микрорельефа.

Прикрепление тканей к поверхности имплантатов подразумевает, в том числе, и образование химических связей с материалом имплантата. Регулируя химический состав поверхности, можно увеличить прочность

Аддитивная плавка электронным пучком позволяет в рамках одного производственного процесса легко комбинировать цельнометаллические, сетчатые и пористые структуры в едином изделии. Наглядным примером таких изделий может служить ваза из титан-алюминий-ванадиевого сплава и титановый шар, представляющий собой двухмиллиметровой толщины сетчатую «скорлупу»

этих связей и, в результате, облегчить процесс прикрепления клеток.

Для такой химической модификации поверхности имплантата можно с успехом использовать те же самые химические или электрохимические методы. Например, с их помощью можно окислировать поверхность либо осадить на нее такие биологически совместимые вещества, как гидроксиапатит – одну из форм фосфата кальция, входящую в состав природного костного материала.

ИМПЛАНТАТЫ ИЗ «СТЕКЛА»

Благодаря развитию материаловедения появилась возможность использовать в аддитивных технологиях новые классы материалов. Одни из наиболее интересных – так называемые аморфные сплавы или «металлические стекла». Открытые еще в начале 1960-х гг., металлические стекла сегодня превратились из экзотического предмета научного исследования в перспективные технологические материалы. Исключительная твердость и высокая прочность наряду с очень высокой устойчивостью к коррозии делают их чрезвычайно заманчивыми кандидатами для производства медицинских имплантатов. К тому же в последние годы были открыты аморфные сплавы на основе железа, которые значительно дешевле по сравнению с давно известными металлическими стеклами на основе редкоземельных элементов

Появление компьютерных технологий дизайна явилось в свое время огромным рывком вперед по сравнению с традиционными методами «карандаша и бумаги», позволив координировать работу дизайнеров и инженеров из любых уголков мира и, главное, моделировать свойства реальных узлов и элементов конструкций еще на стадии конструкторской разработки. В сочетании с технологиями трехмерной печати они создали беспрецедентную возможность для точного и быстрого материального воплощения конструкторской идеи.

Используя этот подход в медицине, сегодня можно не только детально «отрепетировать» на экране компьютера ход хирургической операции, но и сделать предоперационные модели сломанных костей, подобрать и изготовить сами имплантаты и даже операционный инструмент.

Конечно, эти технологии пока еще не вошли в широкую медицинскую практику, хотя собственно технологические аспекты изготовления «запасных частей» для скелета во многом успешно решены. Но хочется думать, что уже не в столь отдаленном будущем аддитивные технологии смогут обеспечить всех нуждающихся имплантатами костей, индивидуально подобранными как по форме, так и по механическим и функциональным свойствам. И это будет еще один крупный вклад новейших технологий в так необходимую и так долго ожидаемую нами «персонализацию» медицины.

Так выглядит под разным увеличением поверхность металлического стекла – аморфного сплава на основе железа – после плавки электронным пучком. Оптическая поляризационная микроскопия

Литература
Cronskär M., Rännar L.-E., Bäckström M. Implementation of Digital Design and Solid Free-Form Fabrication for Customization of Implants in Trauma Orthopaedics // Journal of Medical and Biological Engineering. 2012. Vol. 32. № 2. P. 91–96.

Koptyug A. et al. Electron Beam Melting: Moving from Macro- to Micro- and Nanoscale // Proceedings of the Intl. Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, THERMEC-2011. Quebec, Canada, August 1–5, 2011.

Cronskär M. et al. Application of electron beam melting to titanium hip stem implants // Proceedings of Intl. Conference on Additive Technologies, September 17–18. Ptuj, Slovenia, 2008.

В публикации использованы фотографии из архива группы аддитивных технологий Института технологий и устойчивого развития Университета Центральной Швеции (Остерзунд) а также П. Дерана (Лундский Университет) и Я. Хирша (Университет Уппсалы)