

УДК 66.017

Микроустройства из металла, керамики и полимеров

Юр. Дж. Бранднер

ЮРГЕН ДЖ. БРАНДНЕР (J. J. BRANDNER) — глава группы исследований тепловых микротехнологий, Технологический институт Карлсруэ, Институт микротехнологических процессов, Кампус Норт, Герман-фон-Гельмгольц-Плац 1. Область научных интересов: микротехнологические процессы, теплообмен, фазовый переход в микромасштабе, микрофлюидика, разработка и изготовление микроструктурированных устройств, био- и нанотехнологии, методы разделения.

D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Германия, E-mail juergen.brandner @ kit.edu

Выбор материалов и технологии для производства микроструктурированных устройств

Выбор материала для изготовления микроструктурированных устройств (микроустройств) зависит от области и условий их применения. Рабочие температура и давление при функционировании устройств, коррозионная активность среды, использование катализатора или предкатализатора, теплопроводность, удельная теплоемкость, электрические и некоторые другие свойства — все это определяют выбор конструкционного материала. Для выбора технологии производства микроустройства имеет значение его конструкция. Некоторые технологии применимы только для создания одного или небольшого числа микроустройств, другие могут использоваться в массовом производстве.

Технологии производства микроустройств при использовании любых конструкционных материалов можно разделить на два основных класса: абразивные и генерационные. Такие технологии, как селективное лазерное плавление, тиснение или литье, принадлежат к генерационным методам, а прецизионная обработка и обработка электрическим разрядом — к абразивным методам. В любом случае принимается во внимание качество поверхности, создаваемой в производственном процессе. Относительная шероховатость (около 10 мкм) несущественна при стандартной геометрии устройства с гидравлическим диаметром ~10 мм, в то же время шероховатости внутренней поверхности реакционного микроканала с гидравлическим диаметром ~300 мкм весьма существенны [1].

Металлические микроустройства

Металлы и сплавы широко используются для изготовления устройств, применяемых для проведения микротехнологических процессов. Ассортимент металлических материалов включает в себя благородные металлы (золото, серебро, платину, родий и палладий), нержавеющую сталь, медь, алюминий и Fe-Al-сплавы или сплавы на основе никеля [1—4].

Технологии производства металлических микроустройств

Начало развитию технологий производства металлических микроструктур дали производство кремниевых полупроводников и классическая прецизионная обработка. Используемые в этих технологиях процессы были адаптированы и усовершенствованы для достижения желаемого качества поверхности микроструктурированных устройств. В большинстве случаев для обеспечения необходимого качества микроструктурированных устройств, пригодных для проведения химических процессов, потребовалось вносить более или менее существенные изменения в конструкции устройств, методологию и в сам процесс производства. Процесс изготовления макромасштабных конструкций редко может быть непосредственно перенесен на микроустройства.

Почти все методы, используемые для производства микроструктур из металла, относятся к абразивным. Такие методы, как штамповка не считаются абразивными и генерационными, они служат только для формования материала.

Т р а в л е н и е. Травильные технологии хорошо известны и применяются в производстве полупроводников. Это — дешевая и хорошо зарекомендовавшая себя технология получения структур из многих металлов различной формы с размерами в субмиллиметровом диапазоне [1—3, 5—8].

На металлическую поверхность предварительно наносится светочувствительный полимерный материал — маска. Маска подвергается воздействию видимого либо ультрафиолетового света через первичный рисунок. Затем осуществляется проявление участков, подлежащих травлению, удаляется полимер и металлическая поверхность подвергается травлению. При травлении должны быть учтены два основных момента. Во-первых, должно быть соблюдено определенное соотношение ширины и глубины структуры и маски при мокром химическом травлении: минимальная ширина структуры должна быть по крайней мере вдвое больше

суммарного размера глубины и ширины отверстия маски, ввиду изотропии травления металла. Это не относится к технологиям сухого травления, таким как RIE или RIBE (реактивное ионное травление или травление реактивным ионным лучем), где допускается соотношение выше 0,5. Но эти методы используются редко при обработке металлических микроструктур, поскольку они довольно дороги и требуют много времени. Во-вторых, мокрое химическое травление всегда приводит к полуэллиптическим или полукруглым структурам с относительно высокой шероховатостью поверхности (порядка нескольких микрометров) также в связи с изотропностью травления.

Другой способ технологии травления — так называемый процесс ламинирования [9—11]. Тонкие металлические пластины подвергаются химическому травлению для придания нужной формы. Получаемые тонкие полоски укладываются определенным образом для создания требуемой микроструктуры и скрепляются. Эта технология хорошо подходит для серийного производства и она весьма рентабельна. Такая листовая технология микронизделий стала популярной благодаря легкости ее реализации и множеству возможностей для создания более или менее произвольной конструкции.

Помимо химического травления были попытки применения методов искровой эрозии (см. ниже) и даже штамповки для производства листов в процессе ламинирования [12, 13].

Прецизионная обработка. Не все материалы могут быть обработаны травлением. Например, большинство благородных металлов устойчиво к этому методу коррозионного структурирования. Для создания микроструктур из благородных металлов, а также из стандартных металлических сплавов, таких как нержавеющая сталь, никелевые сплавы и другие металлические материалы, применяют прецизионную обработку. Она проводится методами искровой эрозии (искровая электродная обработка, искровая обработка отверстий под потай), лазерной обработки и прецизионной механической обработки. Выбор технологии определяется

типом материала, расходами на обработку и требуемым качеством поверхности. Прецизионная механическая обработка средствами фрезерования, сверления, долбления и строгания аналогична методам, распространенным в обычной технологии обработки.

Искровая эрозия и лазерная обработка подходят для любого металла или изоляционного материала. Выбор инструментов, используемых для прецизионной механической обработки, зависит от стабильности силава. Микроинструменты из природных алмазов пригодны для обработки латуни и меди, а для обработки нержавеющей стали и сплавов на основе никеля необходимы инструменты из твердых сплавов. Качество поверхности, достигаемое обработкой этими методами, весьма различно и зависит от типа материала и параметров процесса обработки. Методами искровой эрозии получается в целом сравнительно грубая поверхность. Качество поверхности, достигаемое при лазерной абляции, сильно зависит от материала, который требуется обрабатывать, и от параметров процесса обработки.

Медь или латунь в качестве основного материала позволяют получать лучшее качество поверхности при точной механической обработке. Для обеспечения очень хороших свойств поверхности необходима последующая операция электрополировки, тогда может быть достигнута шероховатость поверхности 30 нм и ниже. На рис. 1 показаны микроканалы, полученные микрообработкой и химическим травлением. Каналы, полученные прецизионной обработкой, имеют прямоугольное сечение, а сформированные травлением — полуэллиптические. Подробное описание всех этих методов можно найти в [1, 2, 14—20].

Селективная лазерная плавка. Селективная лазерная плавка (SLM) предназначена для быстрого создания образцов и представляет собой один из редких генерационных методов [21—23]. Эта техника принципиально отличается от абразивных методов.

На базовой платформе, изготовленной из требуемого металлического материала (во многих случаях из нержавеющей стали), распределяется металлический по-

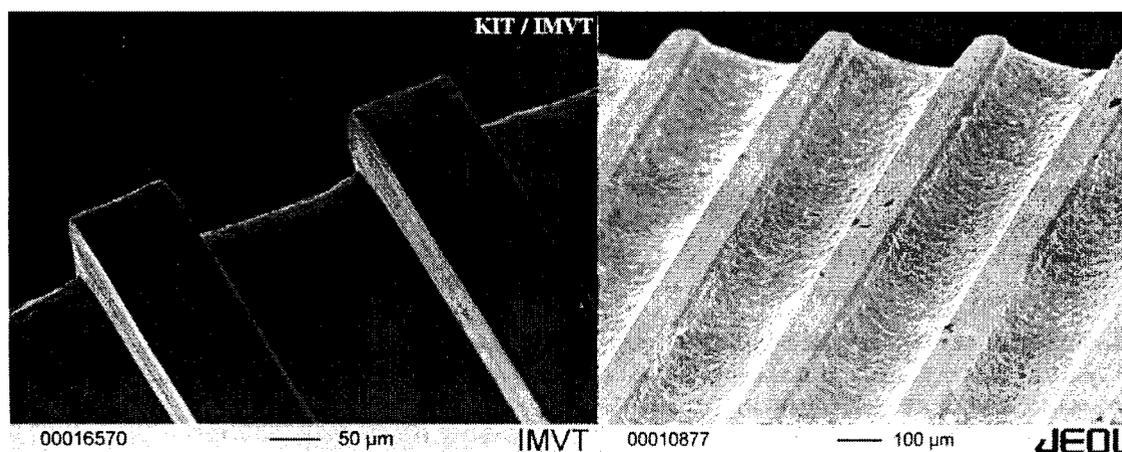


Рис. 1. Сечения микроканалов, полученных механической микрообработкой (слева) и мокрым химическим травлением (справа)

рошок, например путем распыления. Сфокусированный лазерный луч, управляемый компьютером, движется вдоль линий структуры, задаваемой компьютерной 3D моделью (3D CAD). Под воздействием лазерного луча металлический порошок плавится, формируя сварочный валик. После создания первого слоя по желаемой схеме, платформу опускают на определенную величину (около половины толщины одного слоя), на нее наносится новая порция порошка и процесс повторяется. Таким образом, микроструктура формируется слой за слоем.

В принципе любой металлический порошок может быть использован в селективной лазерной плавке, если сфокусированный лазерный луч обеспечивает требуемую температуру плавления.

Формовка. Почти все описанные выше технологии пригодны для создания прототипов (образцов) или малых производственных серий. Таким путем можно изготовить одно устройство или несколько устройств. Методы лазерной абляции, проволочной эрозии, порошковой металлургии и селективной лазерной плавки требуют слишком много времени для приготовления большого количества микроструктур. Исключение составляет травление: этим методом можно генерировать большое число микроструктур, что делает его пригодным для массового производства устройств.

Другую возможность получения большого количества микроструктур дает метод рельефного тиснения. Как было показано в работе [24], создание микроструктур размером в несколько десятков микрометров может быть легко достигнуто при использовании технологии тиснения. При этом следует иметь в виду, что материал выпрессовывается из генерированных микроструктур и необходимо провести прессование внутри уже готовой конструкции.

Для создания не только микроканалов, но и отверстий и сплошных проходов для микроструктур подходит техника штамповки. Ключевой момент этой технологии — создание точного негатива модели, изготов-

ляемого, например, методом прецизионной обработки или искровой эрозии. В такой негатив можно включить структуры различной высоты и таким образом обеспечить эффективное массовое производство микроструктурированных листов металла с отверстиями и щелями, сочетающимися с более традиционными структурами, такими как каналы и пустоты, за один рабочий шаг.

Методы штамповки и тиснения представляют несомненный интерес для производства дешевых и легкодоступных частей сложных устройств. Эти методы могут легко быть объединены, что обеспечивает еще больше возможностей для получения микроструктурированной фольги и устройств, изготовляемых из нее.

Сборка и крепление металлических микроструктур

Монтаж большого числа элементов устройства не составляет проблему в макромасштабном производстве, в случае же микротехнологии этот шаг вызывает некоторые затруднения. Кроме проблем, связанных с изоляцией, фиксацией и креплением, главное — обеспечить точность соединения и совмещения отдельных частей устройства. Ошибки совмещения в зависимости от качества поверхностей и применяемой технологии крепления могут быть сопоставимы с недостатками самих микроструктур. На рис. 2 приведен пример микроструктурированной фольги с микроканалами, полученными методом химического травления. При совмещении листов фольги должны получаться каналы эллиптического сечения, тогда искажения при скреплении листов будут незначительными. Плохое совмещение приводит к нарушению формы каналов, что может быть несовместимо с техникой скрепления листов фольги. Согласование совмещения и скрепления (выравнивание) может быть обеспечено простым механическим способом (например, использованием выравнивающих штифтов), применением краевых захватов в специально спроектированных монтажных устройствах, или оптическими ме-

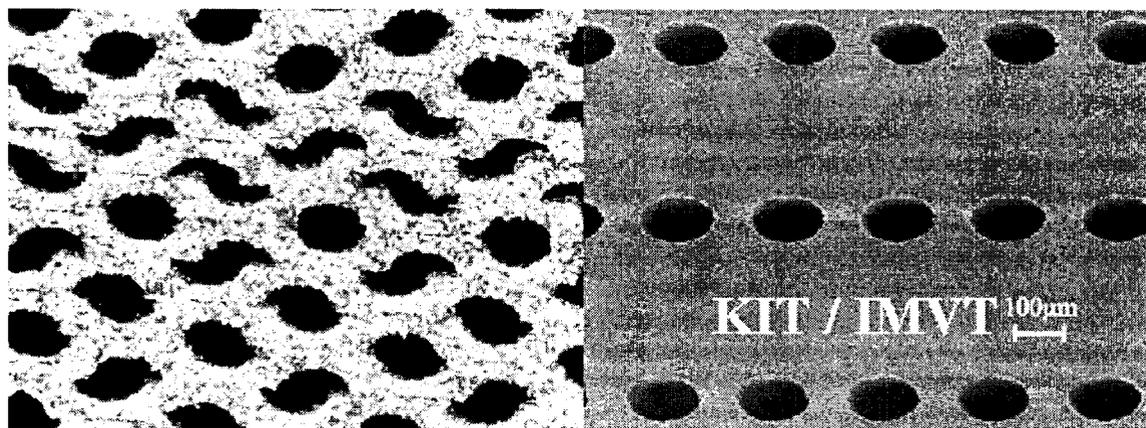


Рис. 2. Каналы из нержавеющей стали, сформированные методом мокрого химического травления:

слева — неэллиптические микроканалы, полученные при неправильном совмещении микроструктурированных листов после диффузионного скрепления; справа — эллиптические микроканалы, полученные при правильном совмещении скрепляемых листов

тодами, такими как полностью автоматизированное выравнивание с помощью светодиодов или лазеров. Большинство из этих методов пришло из технологии обработки кремния, где необходимо точное выравнивание нескольких слоев маски для обеспечения функционирования производимых устройств [2, 6].

В микротехнологии образование заусенцев при механической микрообработке или лазерной обработке может повлечь за собой значительные затруднения при сборке элементов устройства, а также при скреплении. Заусенцы по краям приведут к некоторой деформации или неравномерному контакту отдельных слоев. Поэтому удалению заусенцев в микроструктурах должно быть уделено особое внимание либо вообще следует исключить их образование.

Соединение и скрепление металлических элементов могут быть осуществлены разными методами. Общими для микроструктур являются низкотемпературная или высокотемпературная пайка, сварка (лазерная, электронно-лучевая, WYG), диффузионная сварка. Как вариант возможно применение склеивания и прижима с использованием различных методов герметизации, если температура и давление при работе устройства это допускают. Подробную информацию об этих процессах можно найти в [1—3, 5, 25—31]. Очевидно, что выбор техники скрепления должен обеспечивать технологические параметры работы устройства в дальнейшем. Например, не допускается использовать устройство, скрепленное методом низкотемпературной пайки, при температуре в несколько сотен градусов Цельсия, а клееное устройство не выдержит абсолютное давление в несколько сотен МПа. Для устройств, работающих при высоких температуре и давлении, в основном используются сварные, паяные или диффузионные методы скрепления. Диффузионная сварка предпочтительна, поскольку при правильном применении делает устройство монолитным. Устройства, полученные этим методом, могут выдерживать очень высокие давления — до нескольких сотен МПа [1, 3, 9, 10].

Керамические микроструктуры

Микроструктурированные устройства, изготовленные из керамики, а также из стекла, могут работать в технологических условиях, в которых недопустимо использование металлических и полимерных устройств. Применимость керамики при высоких температурах (1000 °C и выше), отсутствие собственной каталитической активности и легкость интеграции каталитически активных материалов в случае пористой керамики — все эти качества обуславливают технологическую ценность данного материала. Стекло позволяет осуществлять более тщательный контроль внутренних гидродинамических и технологических параметров микроструктур в режиме реального времени с использованием оптических волокон или высокоскоростной визуализации, μ PIV (Micro Particle Image Velocimetry — измерение скорости микрочастиц) или фотометрии флуоресценции. Однако изготовление микродеталей из стекла и

керамики ограничено лишь некоторыми известными технологиями и в большинстве случаев не очень выгодно по цене.

Традиционный способ получения керамических микроструктур включает подготовку исходной суспензии, жидкостное или пластическое литье, литье под давлением или кастинг (ленточное литье), освобождение от формы, декарбонизацию и спекание. Большинство керамических материалов при спекании уменьшается в объеме, что должно быть предусмотрено при изготовлении из них изделий. Технологии свободного формования в твердом виде типа печатания, нанесения в расплавленном виде и микростереолитографии с использованием керамических суспензий [4, 32—44] также применимы, но они, как правило, позволяют получить единственное изделие — прототип. Некоторые керамические материалы могут подвергаться механической обработке.

Предпринята успешная попытка применить для изготовления из керамики микроструктур селективную лазерную плавку (SLM, selective laser moulding). Принцип этого метода аналогичен стереолитографии. Первые эксперименты дали многообещающие результаты [23].

При использовании любой технологии размер зерен керамического порошка для приготовления суспензии должен быть достаточно мал, чтобы можно было воспроизвести точно все детали желаемой микроструктуры. Даже после спекания, которое обычно сопровождается укрупнением зерна, их размер должен быть по крайней мере на порядок меньше, чем наименьший размер устройства. Это означает, что при минимальном размере изделия около 50 мкм размер зерна должен быть не более 5 мкм. Добавки также играют важную роль в производстве микроструктур. В случае их удаления неподходящим способом возможны искажения и трещины или даже расслоение микроскопической части желаемой микроструктуры устройства. То же относится и к скорости удаления добавок: при слишком быстром удалении трещин и разрывов в структуре не избежать. Уплотнение материала достигается путем спекания, например, для глинозема требуется температура ~1600 °C, а для оксида циркония достаточно 1500 °C. Температура существенно зависит от размера зерна и может быть снижена в случае применения наночастиц.

Но самая критическая точка — это конструирование микроструктуры. В силу специфических свойств керамики простой перенос дизайна металлических или полимерных устройств на керамические изделия невозможен. Керамика предъявляет особые требования к уплотнению, монтажу и соединениям, в том числе к соединению с металлом. Особые трудности связаны с включением ее в металлическое устройство, так как керамика — хрупкий материал с коэффициентом теплового расширения в большинстве случаев отличным от коэффициента теплового расширения металлов. Рекомендации по микроструктурному конструированию с применением керамики отсутствуют, а опыт изготовления макроскопических устройств нельзя переносить непосредственно на микроразмерные устройства [6].

Другое применение керамических материалов — создание покрытий и пены, например внутри металлических микроструктурированных устройств. Для этого используются такие технологии, как химическое осаждение в парах (CVD, chemical vapor deposition), распыление, осаждение электрофорезом, золь-гель методы, создание открытой пены в сочетании с нанесением покрытия под действием центробежной силы, покрытие окунами или намывом [32—45]. Если базовый материал устройства — алюминиевый сплав, то можно использовать метод анодного окисления для создания как плотных защитных керамических покрытий, так и пористых слоев, которые могут служить в качестве носителя для катализатора. Пена даже может работать как нагреватель, если изменить ее электрическое сопротивление, например, посредством металлических добавок. Возможно применение керамики на основе SiC в качестве базового материала микроустройства.

Соединения для керамических устройств готовят из материала со свойствами, аналогичными свойствам базовой керамики. Для соединения керамических материалов друг с другом или более того для соединения керамики с металлами особенно важное значение имеют коэффициенты теплового расширения этих материалов.

Идеальные соединения для керамических деталей формируются при изготовлении в сыром состоянии до обжига. В процессе обжига керамические детали связываются друг с другом, образуя единое плотное керамическое тело. Чтобы обеспечить соединение без трещин, детали изготавливаются из того же или аналогичного керамического состава.

Другой возможностью является пайка с применением стеклокерамических или стеклометаллических герметиков. Тогда рабочая температура устройства будет ограничена температурой плавления герметика. Пригодны также реверсивная сборка, допускающая неоднократную сборку-разборку, и герметизация с применением зажимных технологий или склеивание. Можно применять и обычные уплотнения, такие как полимерные или металлические кольца и прокладки — те же, что и для металлических устройств. В работающем микроустройстве соединение керамических деталей с узлами металлического технологического оборудования должно находиться как можно дальше от зоны высоких температур. Проблемы, скорее всего, могут возникнуть именно в связи с большими различиями в коэффициентах теплового расширения этих двух видов используемых материалов. Если соединение будет находиться близко к зонам тепловых градиентов, то следует применять уплотнения, минимизирующие растягивающие напряжения, как это делается в технологии топливных элементов. Более подробную информацию можно найти в [2, 4, 32—45].

Стекланные микроустройства

Стекло представляет особый интерес в качестве материала для микроструктурированных устройств благодаря таким его свойствам, как высокое удельное

сопротивление, химическая стойкость, устойчивость при повышенных температурах и оптическая прозрачность. Методов, пригодных для создания микроструктурированных устройств из стекла, не так много [4, 48]. Наиболее распространенными являются мокрое химическое (изотропное) травление с использованием плавиковой кислоты и обработка песком или абразивным порошком. Лазерная микрообработка также применима. В этом случае необходимо, чтобы лазерное излучение поглощалось стеклом, а не проходило через него.

В качестве базового материала микроустройств может служить фоточувствительное стекло, которое структурируется либо под воздействием УФ излучения с последующим травлением, либо непосредственно под воздействием лазерного луча. В обоих случаях происходят фотохимические реакции, приводящие к изменению структуры открытых участков стекла, которые становятся растворимыми при обработке плавиковой кислотой. Экспонированные участки подвергаются травлению быстрее, чем те, которые не облучались. Лазерное структурирование может быть достигнуто методом импульсного лазерного УФ облучения без маски, контролируемым компьютерной моделью (CAD), подобно описанной выше стеролитографии [46—48]. В случае применения фоточувствительного стекла, например марки FOTURAN[®], необходимо использовать маску с последующим травлением.

Склеивание стеклянных устройств осуществляется немного легче, чем керамики. Соединение между стеклянными частями одного устройства может быть выполнено путем диффузионной сварки, анодного скрепления, пайки или склеивания. Пайка в данном случае означает, что припой также выполнен из стекла. Соединение с нестеклянными материалами, такими как керамика, кремний или металлы, осуществляется методом анодного скрепления, склеивания, напыления или электроосаждения. Наиболее критические моменты — это хрупкость стекла и его коэффициент теплового расширения, различающийся для стекла и материалов, применяемых для склеивания. Таким образом, те же замечания, что упоминалось ранее для керамики, справедливы и для стекла [46, 47].

Полимерные микроустройства

Как известно, полимеры широко используются как конструкционные материалы. Это дает основание рассматривать полимеры также как материал для изготовления микроструктурированных устройств. Очевидно, что возможность использования устройств из полимерных материалов в гораздо большей степени зависит от параметров процесса, в котором они должны применяться, чем в случае устройств из любого другого материала. Высокая температура обычно исключает возможность использования полимеров. Есть несколько высокотехнологичных полимерных материалов, выдерживающих температуру до 400 °С и выше, но они дорогостоящие и труднее поддаются обработке или формовке.

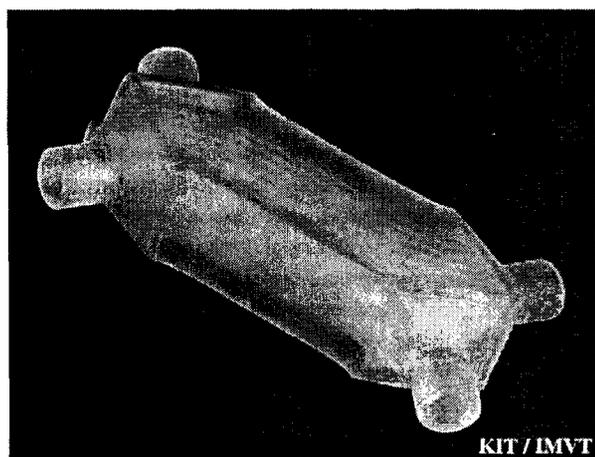


Рис. 3. Противоточный микроструктурированный теплообменник, изготовленный методом микростереолитографии

Исключают применение полимеров высокое давление, а также использование в технологических процессах растворителей. Таким образом, применимость полимерных материалов ограничивается условиями технологических процессов.

Полимерные микроустройства включают в изделия на основе чипов, применяют в биотехнологии, в медицинских исследованиях, в технических разработках, где низкая термостойкость и неустойчивость к давлению не существенны, в то время как дешевизна и возможность массового изготовления являются преимуществом, позволяющим производить устройства одноразового действия. Другим важным преимуществом некоторых полимерных материалов является оптическая прозрачность, что позволяет использовать их в аналитических методах [49—53].

Существует много методов обработки полимеров при создании обычного макромасштабного оборудования. Это технологии, основанные на удалении материала (механическая обработка, лазерная абляция) и технологии, основанные на образовании материала (тиснение, литье под давлением, микростереолитография). Широко используются литьевое формование и горячее прессование. Обе эти технологии применимы и для массового и серийного производства макромасштабных устройств [2, 4, 49—53].

Помимо указанных методов есть некоторые другие, не так часто применяемые, особенно для массового производства. Среди них лазерная обработка, проводимая с использованием эксимерных или УФ-Nd:YAG лазеров с импульсами на высоких частотах [54—56].

Другая интересная технология для генерации небольшого числа образцов — это микростереолитография [57—60]. Она считается одной из технологий для быстрого изготовления прототипов. Эта технология основана на послойной генерации при воздействии на жидкий фоточувствительный мономер маломощным сфокусированным лазерным лучом. Действие луча приводит к полимеризации и, следовательно, к образованию полимерной микроструктурированной пленки.

После генерации одного слоя базисная платформа, используемая для создания устройства, смещается на определенный шаг и снова заливается жидким мономером, затем формируют следующий слой. Фокусировка лазерного излучения контролируется компьютером, отслеживающим линии 3D модели CAD. На рис. 3 показано микроструктурированное устройство, изготовленное методом микростереолитографии. Используемый полимер стабилен до температуры около 100 °C и более и менее оптически прозрачен.

Для скрепления полимерных материалов применяют разнообразные варианты склеивания и сварки. Возможности метода склеивания сильно зависят от типа используемого полимера. Сварка — ультразвуковая, лазерная или с применением раствора — в принципе применима ко всем полимерным материалам. Подробную информацию о процессах соединения полимерных микродеталей и уплотнения можно найти в [4, 61—69].

ЛИТЕРАТУРА

1. Brandner J.J. e. a. In: Advanced Micro & Nanosystems. V. 5. Micro Process Engineering. Eds. H. Baltes, O. Brand, G.K. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata. Weinheim: Wiley-VCH, 2006, Ch. 10.
2. Madou M. Fundamentals of Microfabrication. London: CRC Press, 1997.
3. Brandner J.J., Bohn L., Schygulla U., Wenka A., Schubert K. Microreactors: Epoch-Making Technology for Synthesis. Ed. J.I. Yoshida. MCPT, 2001, Tokyo, CMC Publ. Co., 2003, p. 75—87, 213—223.
4. Knitter R., Dietrich Th. In: Advanced Micro & Nanosystems. V. 5. Micro Process Engineering. Eds. H. Baltes, O. Brand, G.K. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata. Weinheim: Wiley-VCH, 2006, Ch. 12.
5. Menz W., Mohr J. Mikrosystemtechnik für Ingenieure. Weinheim: VCH, 1997.
6. Eigler H., Beyer W. Moderne Produktionsprozesse der Elektrotechnik, Elektronik und Mikrosystemtechnik. Expert Verlag, Renningen, Germany, 1996.
7. Petzow G. Metallographisches, Keramographisches und Plastographisches Ätzen. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1994.
8. Harris T.W. Chemical Milling. Oxford: Clarendon Press, 1976.
9. Drost M.K., Wegeng R.S., Martin P.M., Brooks K.P., Martin J.L., Call C. Microheater. Proc. 4th Int. Conf. on Micro Reaction Technology, AIChE, March 5-9, 2000, Atlanta, GA, USA, p. 308—313.
10. Matson D.W., Martin P.M., Tonkovich A.Y., Roberts G.L. Proc. SPIE, 1998, v. 3514, p. 286—392.
11. US Patent № 5,611,214, 1997; US Patent № 8,811,062, 1998.
12. <http://www.pnl.gov/microcats/aboutus/publications/microfabrication/DWMFrankfurt.pdf>, accessed on June 30, 2010.
13. <http://www.pnl.gov/microcats/aboutus/publications/microfabrication/MatsonFrankfurtPaper1999.PDF>, accessed on June 30, 2010.
13. Holladay J.D., Brooks K.P., Wegeng R., Hu J., Sanders J., Baird S. Catal. Today, 2007, v. 120, Is. 1, p. 35—44.
14. Slocum A.H. Precision Machine Design: Macromachine Design Philosophy and its Applicability to the Design of Micromachines. Proc. IEEE MEMS 1992, Travemünde, Germany, 1992.
15. Boothroyd G., Knight W.A. Fundamentals of Machining and Machine Tools. New York: Marcel Dekker Inc., 1989.
16. Evans C. Precision Engineering: An evolutionary View. Cranfield Press, Cranfield, Bedford, 1989.

17. *Snoeys R.* Non-Conventional Machining Techniques. The State of the Art. Advances in Non-Traditional Machining, Anaheim California, USA, 1986.
18. *Shaw M.C.* Metal Cutting Principles. Oxford: Clarendon Press, 1984.
19. *DeVries W.R.* Analysis of Material Removal Processes. New York: Springer, 1992.
20. *Chryssolouris G.* Laser Machining. New York: Springer, 1991.
21. *Vansteenkiste G., Boudeau N., Leclerc H. e.a.* Proc. LANE-2004, Erlangen, Germany, 2004, p. 425—434.
22. *Fischer P., Blatter A., Romano V., Weber H.P.* Laser Phys. Lett., 2004, p. 1—8.
23. *Brandner J.J., Hansjosten E., Anurjew E., Pflöging W., Schubert K.* Microstructure devices generation by selective laser melting. SPIE Photonics West, San Jose, CA, USA, January 25-27, 2007.
24. *Pfeifer P.* The 7th Biennial China Int. Environmental Protection and Energy Saving and Comprehensive Resource Utilization Exhibition, Beijing, China, September 27-30, 2004; Mikrosystemtechnik im Automobil: Veranstaltungsreihe zur Landesinitiative «Mikrosystemtechnik in Niedersachsen», Wolfsburg, 22 September 2004.
25. *Ehrfeld W., Gärtner C., Golbig K. e.a.* Proc. of the 1st Int. Conf. on Microreaction Technology. Ed. W. Ehrfeld. Berlin: Springer, 1997, p. 72—90.
26. *Kolb G., Cominos V., Drese K. e.a.* Proc. 6th Int. Conf. on Micro Reaction Technology. Eds. P. Baselt, U. Eul, R.S. Wegeng, I. Rinard, B. Hoch. AIChE, March 10-14, 2002, New Orleans, LA, USA, p. 61—69.
27. *Ziogas A., Löwe H., Küpper M., Ehrfeld W.* Proc. of the 3rd Int. Conf. on Micro Reaction Technology. Ed. W. Ehrfeld. Berlin: Springer, 2000, p. 136—150.
28. *Meyer H., Crämer K., Kurtz O. e.a.* Patent Application DE 10251658 A1.
29. *Pfeifer P., Görke O., Schubert K. e.a.* Proc. of the 8th Int. Conf. on Micro Reaction Technology IMRET 8, April 10-14, 2005, Atlanta, GA, USA.
30. *Paul B.K., Hasan H., Dewey T., Alman D., Wilson R.D.* Proc. 6th Int. Conf. on Micro Reaction Technology. Eds. P. Baselt, U. Eul, R.S. Wegeng, I. Rinard, B. Hoch. AIChE, March 10-14, 2002, New Orleans, LA, USA, p. 202—211.
31. *Bier W., Keller W., Linder G., Seidel D., Schubert K.* Symposium Volume, DSC-Vol. 19, ASME, New York, 1990, p. 189.
32. *Heule M., Vuillemin S., Gauckler L.J.* Adv. Eng. Materials, 2003, v. 15, p. 1237—1245.
33. *Yu Z.Y., Rakurjar K.P., Tandon A. J.* Manufact. Sci. Eng., Trans. ASME, 2004, v. 126, p. 727—732.
34. *Knitter R., Günther E., Maciejewski U., Odemer C.* Preparation of ceramic microstructures. cfi/Ber. DKG 1994, v. 71, p. 549—556.
35. *Mutsuddy B.C., Ford R.G.* Ceramic injection molding. London: Chapman & Hall, 1995.
36. *Griffith M.L., Halloran J.W. J.* Am. Ceram. Soc., 1996, p. 2601.
37. *Blazdell P.F., Evans J.R.G., Edirisinghe M.J., Shaw P., Binstead M.J. J.* Mater. Sci. Lett., 1995, v. 14, p. 1562—1565.
38. *Agrarwala M.K., Bandyopadhyay A., van Weeren R. e.a.* Am. Ceram. Soc. Bull., 1996, v. 75, p. 60—65.
39. *Evans J.R.G.* In: Materials Science and Technology. V. 17a. Processing of Ceramics, Pt 1. Ed. R.J. Brook. Weinheim: VCH, 1996, Ch. 8.
40. *Bauer W., Knitter R. J.* Mater. Sci., 2002, v. 37, p. 3127—3140.
41. *Mistler R.E.* The principles of tape casting and tape casting applications. Ceramic Processing. Eds. R.A. Terpstra, P.P.A.C. Pex, A.H. de Vries. London: Chapman & Hall, 1995, Ch. 5.
42. *Ritzhaupt-Kleissl H.-J., von Both H., Dauscher M., Knitter R.* In: Advanced Micro and Nanosystems. V. 4: Microengineering of Metals and Ceramics. Eds. H. Baltes, O. Brand, G.K. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata. Weinheim: Wiley-VCH, 2005, Ch. 15.
43. *Su B., Button T.W., Schneider A., Singleton L., Prewett P.* Microsyst. Techn., 2002, v. 8, p. 359—362.
44. *Meschke F., Riebler G., Hessel V., Schürer J., Baier T.* Chem. Eng. Technol., 2005, v. 28, p. 465—473.
45. *Haas-Santo K., Görke O., Pfeifer P., Schubert K.* Chimia, 2002, v. 56, p. 605—610.
46. *Dietrich T.R.* In: Handbuch Mikrotechnik. Ed. W. Ehrfeld. Wien: Hanser, 2002, p. 407—429.
47. *Dietrich T.R., Freitag A., Scholz R.* Chem. Eng. Technol., 2005, v. 28, p. 477—483.
48. *Livingston F.E., Hansen W.W., Huang A., Helvajian H.* Proc. SPIE, 2002, v. 4637, p. 404—412.
49. *Giselbrecht S., Gottwald E., Schlingloff G. e.a.* Proc. 9th Int. Conf. on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences μ TAS 2005, October 9-13, 2005, Boston, MA, USA.
50. *Ehrenstein G.W., Erhard G.* Konstruieren mit Polymerwerkstoffen ein Bericht zum Stand der Technik. Hanser-Verlag München, Germany, 1983.
51. *Mohr J.A., Last A., Hollenbach U., Oka T., Wallrabe U. J.* Lightwave Technol., 2003, v. 21, p. 643—647.
52. *Ruprecht R., Benzler T., Holzer P. e.a.* Galvanotechnik, 1999, v. 90, p. 2260—2267.
53. *Hecke M., Schomburg W.K. J.* Mikromech. Mikroeng., 2004, v. 14, p. R1—R14.
54. *Pettit G.H., Sauerbrey R.* Appl. Phys. A, 1993, v. 56, p. 51—63.
55. *Pflöging W., Hanemann Th., Bernauer W., Torge M.* Proc. SPIE, 2001, v. 4274, p. 331—345.
56. *Cheng J.-Y., Wie C.-W., Hsu K.-H., Young T.-H.* Sensors and Actuators B, 2004, v. 99, p. 186—196.
57. *Gebharth A.* Rapid Prototyping. München: Hansa Verlag, 1996.
58. *Ikuta K., Hirowatari K., Ogata T.* Proc. IEEE Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS'94, Osio, Japan, 1994, p. 1—6.
59. *Ikuta K., Hasegawa T., Adachi T., Maruo S.* Proc. IEEE Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS'2000, 2000, 739ff.
60. *Ikuta K.* Proc. 1st Int. Workshop on Micro Chemical Plant Techn., Feb 3-4, 2003, Kyoto, Japan, p. 54—65.
61. *Bacher W., Saile V.* Proc. 2003 JSME-IPP/ASME-ISPS Joint Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, Yokohama, Japan, June 16-18, 2003, p. 133—137.
62. *Truckenmüller R., Ahrens R., Bahrs H., Cheng Y., Fischer G., Lehmann J.* Proc. of DTIP, June 1-3, 2005, Montreux, Switzerland.
63. European Patent № WO 99/25783, 1999.
64. *Bachmann F., Russek U.* Proc. SPIE, 2002, v. 4637, p. 505—518.
65. *Sato K., Kuwosaki Y., Saito T., Satoh I.* Proc. SPIE, 2002, v. 4637, p. 528—536.
66. <http://www.clearweld.com>
67. *Teubner U., Klotzbuecher T.* Proc. of ICALEO 2004, Laser Microfabrication Conf., San Francisco, CA, USA, October 4—7, 2004.
68. *Pflöging W., Baldus O., Bruns M., Baldini A., Bemporad E.* Proc. Int. Conf. «Laser and Applications in Science and Technology (LASE)», Photonic West 2005, San Jose, CA, USA, Jan 22-27, 2005; Proc. SPIE, 2005, v. 5713.
69. *Hessel V., Löwe H.* Chemie Ingenieur Technik, 2002, v. 1-2, p. 17—30; v. 3, p. 185—207; v. 4, p. 381—400.