

# Наномеханообработка. Возможности и перспективы

В.В. Попов<sup>1</sup>, А.М. Салецкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИИЯФ МГУ, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

**Т**ехнология механической обработки материалов, по-видимому, является первой технологией, разработанной *Homo sapiens*. Пройдя долгий многовековой путь и усовершенствовав многократно свои орудия, она оставила неизменным свой главным принцип: инструмент, с твердостью и прочностью выше, чем у обрабатываемого материала, за счет механического движения инструмента относительно объекта обработки удаляет разрушенный материал, формируя тем самым нужную конфигурацию детали.

Прогресс механообработки шел по трем главным направлениям. Во-первых, усовершенствование инструмента: улучшение его твердости, прочности, остроты, точности формы. Во-вторых, улучшение точности перемещения инструмента относительно объекта обработки. И, в-третьих, точного дозирования усилия воздействия на материал.

По всем этим направлениям современное станкостроение добилося огромных успехов, подогдя в некоторых случаях, видимо, к теоретическому пределу возможного. Так, например, уже не являются экзотикой резцы из алмаза или алмазоподобных материалов, превосходящих алмаз по твердости, а точность подачи инструмента с использованием пьезоактюаторов может достигать нескольких нм.

Но такие точности достигаются при обработке деталей макроскопических размеров, и, как правило, по одной координате. То есть, можно обработать лазерное зеркало на станке алмазного точения с шероховатостью в единицы нанометров, но изготовить на его поверхности двумерный рисунок размеров в несколько мкм на том же станке нельзя.

Вообще, прогресс, связанный с формированием микро рельефа предельно малого размера на поверхности материалов методами механообработки, не слишком впечатляет. Так, еще в 1882 г. американский изобретатель и ученый Роуланд создал делительную машину для нарезания алмазным резцом штрихов профилированной дифракционной решетки. Ему удалось сделать 1700 штрихов на 1 мм, т.е. штрих размером 600 нм. Он первым показал, что принцип обработки металлов резанием применим при субмикронных размерах. Может быть, с этого момента и берет начало история наномеханообработки. Современные делительные машины наносят не более 3600 штрихов на 1 мм, т.е. за сто с лишним лет точность повысилась всего лишь в 2 раза.

Зато появились другие приборы, способные позиционировать инструмент с точностью лучше нанометра — сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ). Ими

незамедлительно воспользовались исследователи из лаборатории IBM, сумевшие сложить название своей фирмы из атомов.

Современные СЗМ имеют поле сканирования до 100 мкм и больше, и поэтому могут быть использованы не только для перемещения зонда, сканирующего поверхность, но и для позиционирования инструмента, модифицирующего ее.

Величина усилия, которую развивает пьезосканер, более чем достаточна, чтобы создать необходимое для разрушения материала давление на площади в несколько мкм<sup>2</sup>.

Таким образом, СЗМ — это готовая платформа для механической нанообработки материалов. Поэтому, чтобы превзойти успехи Роуланда (хотя бы на размере 100x100 мкм, тогда как решетки Роуланда были размером >50 мм), достаточно иметь СЗМ, уметь управлять сканером по двум координатам, XY, одновременно управляя подачей инструмента по Z, и иметь инструмент (резец) необходимой формы, размеров и прочности.

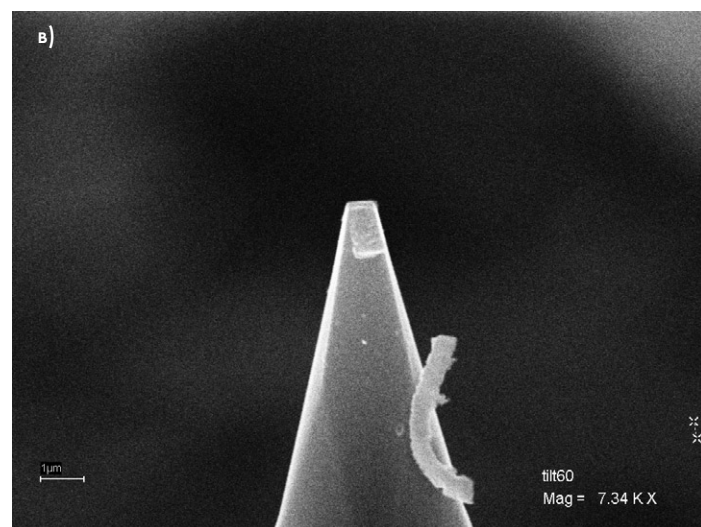
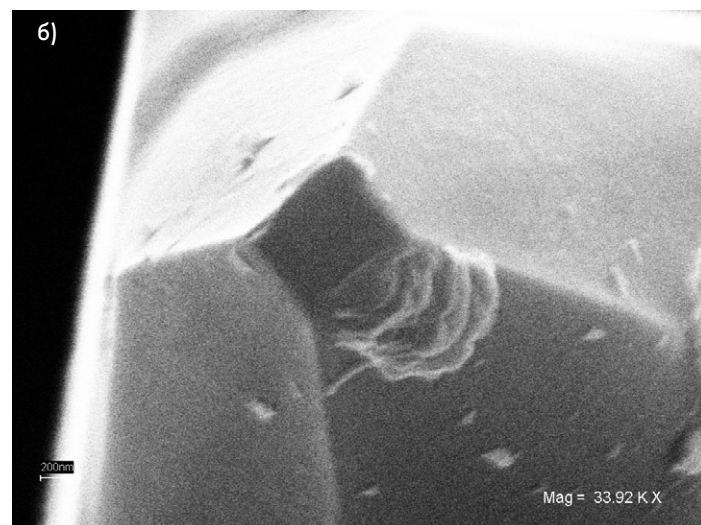
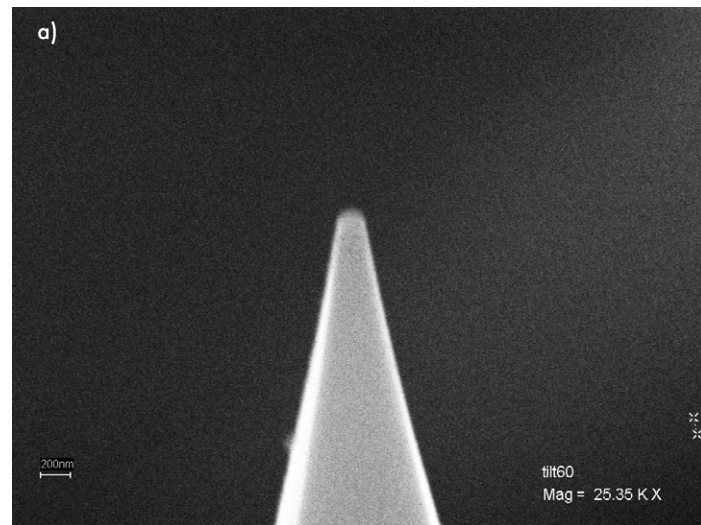
В настоящее время СЗМ, выпускаемые рядом фирм, среди допустимых опций имеют возможность проведения операций литографии, т.е. кантилевер может сканировать некоторую область поверхности по определенной кривой с приложением соответствующей силы или напряжения, как в случае токовой литографии.

Рассмотрим возможности силовой литографии на примере СЗМ «Смена», выпускаемого фирмой «Нанотехнология МДТ». Различные сканирующие головки позволяют перемещать зонд в пределах до 100x100 мкм по XY и до 5 мкм по Z. Предположим, что мы хотим использовать в качестве инструмента для обработки материала стандартный кантилевер, изготовленный из кремния. Максимальное усилие, с которым зонд может давить на поверхность материала, определяется жесткостью балки кантилевера. Максимальной жесткостью (~ 50 Н/м) обладают кантилеверы с треугольной балкой, поэтому при ходе в 1 мкм можно добиться передаваемого на материал усилия до  $5 \cdot 10^{-5}$  Н. Учитывая то, что радиус кривизны кончика зонда составляет 50-70 нм, максимальное давление на поверхность может достигать более 2500 мПа.

Это значение существенно превышает предел текучести металлов, который, например, у меди составляет 170 мПа, а у стали до 1000 мПа.

Таким образом, нет проблемы обеспечить давление, необходимое для разрушения материала. Проблема состоит в том, что предел прочности кремния составляет всего лишь 100 мПа. Поэтому кремниевые кантилеверы пригодны лишь для модификации мягких материалов: полимеров, тонких пленок. По-видимому, этим объясняется отсутствие работ по силовой литографии на металлах, а типичное значение глубины воздействия на полимерах составляет не более 25-30 нм.

Интерес авторов к более глубокой модификации поверхности обусловлен тематикой работ по дифракционной компьютерной оптике, проводимых на кафедре общей физики Физического факультета и в отделе физических проблем квантовой электроники НИИ ядерной физики МГУ. Используемая в настоящее время технология электроннолучевой литографии дает возможность создавать сложные дифракционные



**РИСУНОК 1** | Микрофотографии зонда на сканирующем электронном микроскопе:  
а) Острие зонда до манипуляций. б) Сломанное острие зонда после обработки никеля. На правой грани – наплывы металла, предшествующие образованию стружки.  
в) То же, с прилипшей к зонду стружкой

элементы, к которым, в частности, относится размещенная на обложке синтезированная голограмма. Внедренные в нее светящиеся микротексты с телефонами редакции журнала «Российские нанотехнологии» и лаборатории с высотой букв 100 мкм, состоящих из дифракционных решеток с размером штриха 500 нм, на 2-3 порядка превосходят разрешение полиграфических технологий. Но и этого уже не хватает для создания оптических элементов, основанных на субволновых эффектах (т.е. при размерах элементарной структурной ячейки меньше длины волны), для генера-

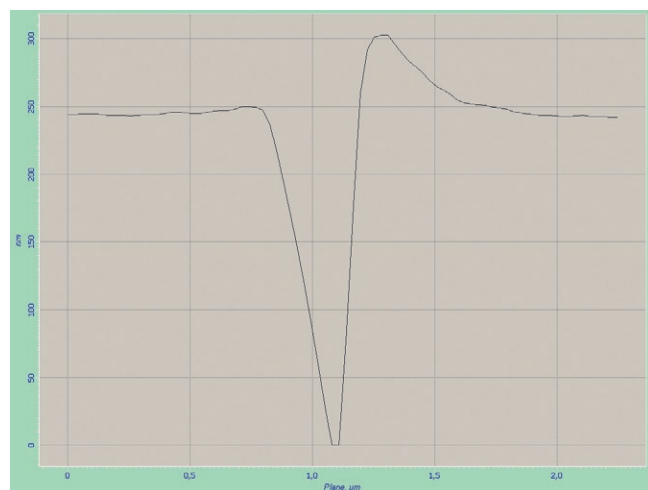
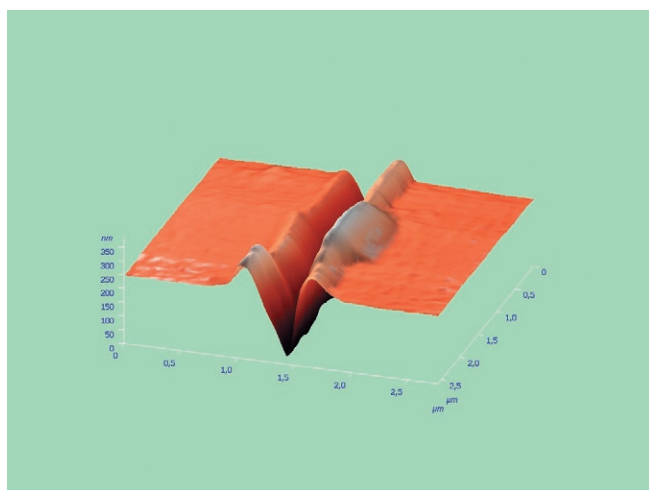
ции специальных идентификационных элементов в защитных голографических наклейках и т.п. Поэтому технология глубокой модификации поверхности интересна не только с точки зрения возможностей процесса, но и имеет актуальный практический выход.



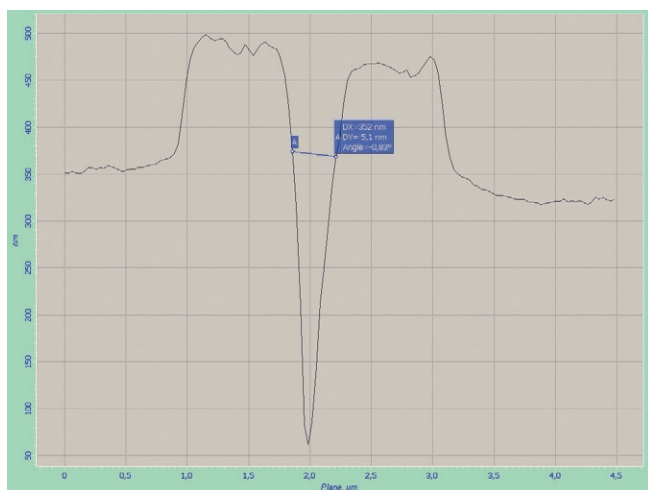
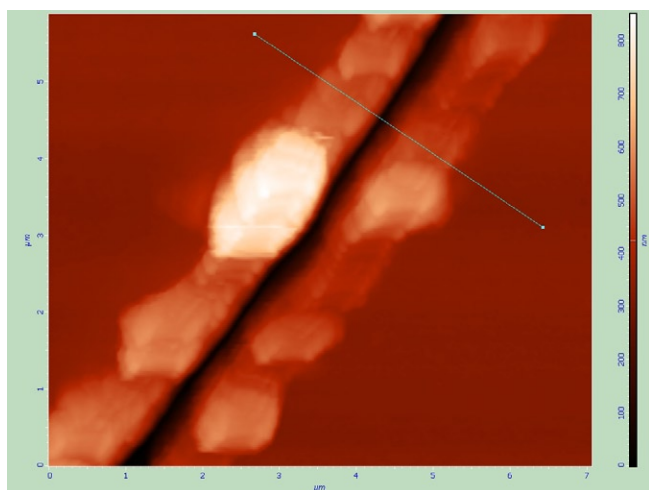
Для глубокой модификации металлов можно использовать кантилеверы с алмазным покрытием толщиной до 70 нм. Именно такие кантилеверы были использованы авторами для экспериментов по скрайбированию поверхности металлов: Ni, Cu, Ag.

Полученные предварительные результаты показывают, что, используя стандартный СЗМ и серийно выпускаемые зонды, можно получить рельеф глубиной в  $200 \div 300$  нм.

При этом характер взаимодействия инструмента с материалом принципиально такой



**РИСУНОК 2** | 3D-изображение царапины в пленке меди и профиль ее сечения



**РИСУНОК 3** | 2D-изображение царапины в пленке серебра и профиль ее сечения. Ширина царапины примерно равна ее высоте

же, как и при макроскопической обработке: сначала зонд углубляется в поверхность металла, затем при движении деформирует и удаляет материал, образуя при этом стружку. Твердости алмазного покрытия при этом достаточно, чтобы обработать такой материал, как никель, однако из-за больших латеральных нагрузок рабочий конец зонда, изготовленного из кремния, часто ломается.

При принципиальной ясности возможности наномеханообработки металлов с помощью СЗМ, для использования полученных результатов в каких-либо практических целях необходимо, пре-

жде всего, решить проблему изготовления инструмента с высокими характеристиками по прочности. Кроме того, как и в обычной механообработке, надо научиться изготавливать инструмент (резец) нужной формы и размера. В этом плане может помочь технология травления материалов фокусированным ионным пучком (ФИП). Так, например, обработка алмаза с помощью ФИП может помочь создать идеальный инструмент для наномеханообработки.

И еще одна деталь. При больших усилиях пьезоподвижки уже не могут обеспечить точного линейного позиционирования, поэтому

необходимо использовать сканеры с обратной связью по положению зонда.

А когда эти проблемы будут решены, то останется только снабдить СЗМ прецизионным двухкоординатным столом для перемещения образца, и можно будет создавать поверхностные рельефные структуры на больших площадях.

Так что наномеханообработка как технология находится практически в начале своего пути, но нет сомнения, что она будет востребована по мере совершенствования оборудования силовой нанолитографии и по мере понимания того, какие задачи она может решить. ■