

Наноструктурированные упрочняющие покрытия с неожиданными эффектами

Ю.В. Панфилов
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5
e-mail: panfilov@bmstu.ru

Проанализированы публикации по наноструктурированным упрочняющим покрытиям и описаны необычные эффекты, связанные с режимами формирования тонких пленок в вакууме и методами их нанесения.

Nanostructured strengthening coatings with unusual effects. Y.V. Panfilov. A lot of articles on strengthening thin film coatings have been analyzed and unusual effects associated with process formation of nanostructured coatings by different thin film deposition methods are shown.

Анализ публикаций по упрочняющим покрытиям в различных журналах, включая журнал «Упрочняющие технологии и покрытия», показал, что наноструктурированные упрочняющие покрытия занимают достаточно большое место среди средств повышения долговечности деталей машин, стойкости инструмента, антифрикционных и вакуумных характеристик пар трения. В зависимости от метода и режимов нанесения тонкопленочного покрытия меняются упрочняющие эффекты, а, следовательно, и функциональные характеристики покрытия.

Так, магнетронное распыление многокомпонентных мишеней типа TiBSiN, TiBCrN, TiAlCN и др., изготовленных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1], дает возможность получать наноструктурированные упрочняющие покрытия с размером зерен 1 – 4 нм. Эти в основном объясняется то, что такие покрытия обладают уникальными характеристиками: микротвердостью HV>50 ГПа, коррозионной стойкостью <10 мкм/год в H₂SO₄, довольно низким коэффициентом трения и т.п.

Нанесение таких покрытий на режущий инструмент дает возможность не только увеличить стойкость резцов, фрез, сверл, метчиков и другого инструмента, но и повысить режимы обработки, например, увеличить величину подачи инструмента и, тем самым, уменьшить время обработки и сократить сроки окупаемости дорогостоящего оборудования (немаловажный фактор при закупке импортных металлорежущих станков).

На рис.1 представлены результаты исследования СВС покрытий, нанесенных на сверла из инструментальной стали Р18 диаметром 4,2 мм, обрабатываемый материала – плита из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т толщиной 15 мм [2].

Из графиков на рис. 1 следует, что сверла с покрытиями имеют и более высокую износостойкость (количество просверленных отверстий), и меньшее время сверления плиты толщиной 15 мм из трудно обрабатываемой стали 12Х18Н10Т по сравнению со сверлами без покрытия, а наилучшими характеристиками обладают сверла с покрытиями из TiBSiN. Кроме того, был обнаружен неожиданный эффект, проявившийся в различном виде стружки (рис. 2), причем при сверлении инструментом с покрытием TiBCrN, обладающим наименьшим коэффициентом трения и обеспечивающим наименьшее время сверления (см. рис. 1), стружка имеет наименьшее количество витков – сверло входит в сталь «как в масло».

Еще один неожиданный упрочняющий эффект был обнаружен после осаждения алмазоподобных наноструктурированных тонкопленочных покрытий из сепарированной плазмы дугового разряда с графитовой мишенью [3]. При исследовании фрикционных характеристик покрытий на специальном стенде не удалось довести покрытия до полного износа, т.к. они оказались более твердыми и износостойкими, чем индентор (закаленный шарик). На нижних фотографиях рис.3 видно, что после удаления продуктов износа (фото справа) дорожки трения (фото слева) не осталось, т.к. продукты износа принадлежали индентору.



Рис. 1 Экспериментальная зависимость времени сверления от количества просверленных отверстий и материала покрытия при одинаковой нагрузке на сверло.

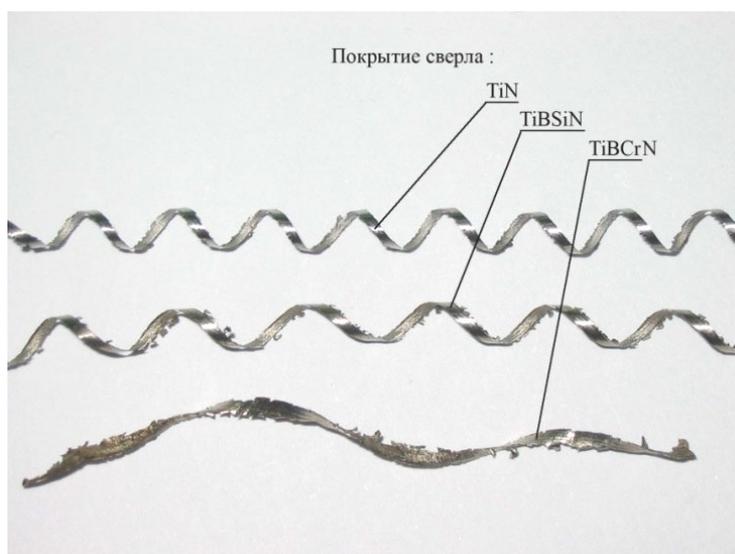


Рис. 2 Вид стружки после сверления инструментом с различными покрытиями.

Нанесение такой пленки на мелкогазмерный инструмент, также, дало неожиданный упрочняющий эффект: сплошная алмазоподобная углеродная пленка повышает не только стойкость инструмента, но и увеличивает изгибную жесткость сверл диаметром 50 – 300 мкм, предназначенных для сверления отверстий в печатных платах (ПП) [3].

Увеличение изгибной жесткости сверл дало возможность повысить точность сверления отверстий в ПП. Причиной изгиба сверла в процессе микрообработки является радиальная сила, обусловленная существенной в масштабах сверла неоднородностью обрабатываемого материала диэлектрического слоя ПП, содержащего армирующие нити из стекловолокна и эпоксидное связующее.

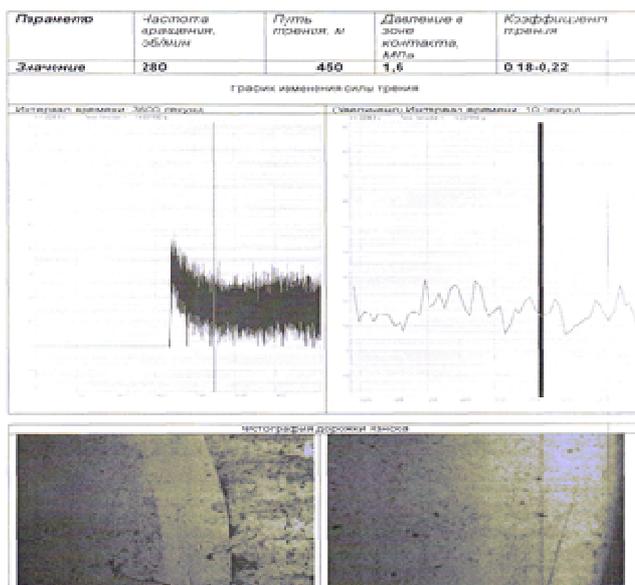


Рис. 3 Результаты исследования фрикционных характеристик углеродного алмазоподобного покрытия.

Полученные результаты продемонстрировали, что изгибная жесткость сверла диаметра 0,105 мм с алмазоподобными покрытиями на 21,6% превысила жесткость сверла без покрытия. За счет крайне малой жесткости микроразмерных сверл наименьших диаметров относительный вклад упрочняющего покрытия может быть весьма значительным (рис. 4).

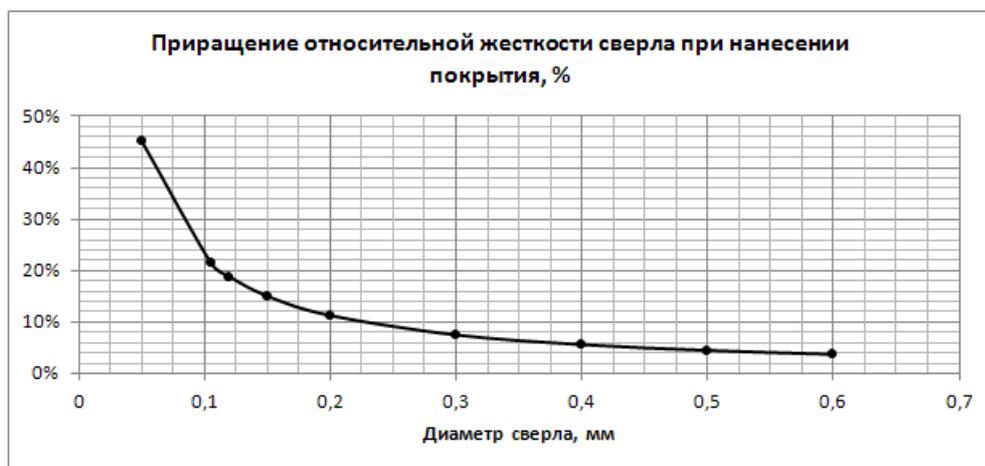


Рис. 4 Относительное приращение изгибной жесткости сверл различного диаметра с упрочняющим покрытием.

Исходя из полученных результатов можно предположить, что при сверлении микроразмерных отверстий в ПП сверлами с упрочняющим покрытием случайная погрешность, обусловленная уводом оси сверла, снизится пропорционально величине относительного приращения изгибной жесткости сверла. В частности, для сверл диаметра, 0,30 мм уменьшение среднеквадратического отклонения величины смещения координаты центра отверстия при сверлении сверлами с покрытием на 28,9% или 6,5 мкм, чем при сверлении обычными сверлами (рис. 5).

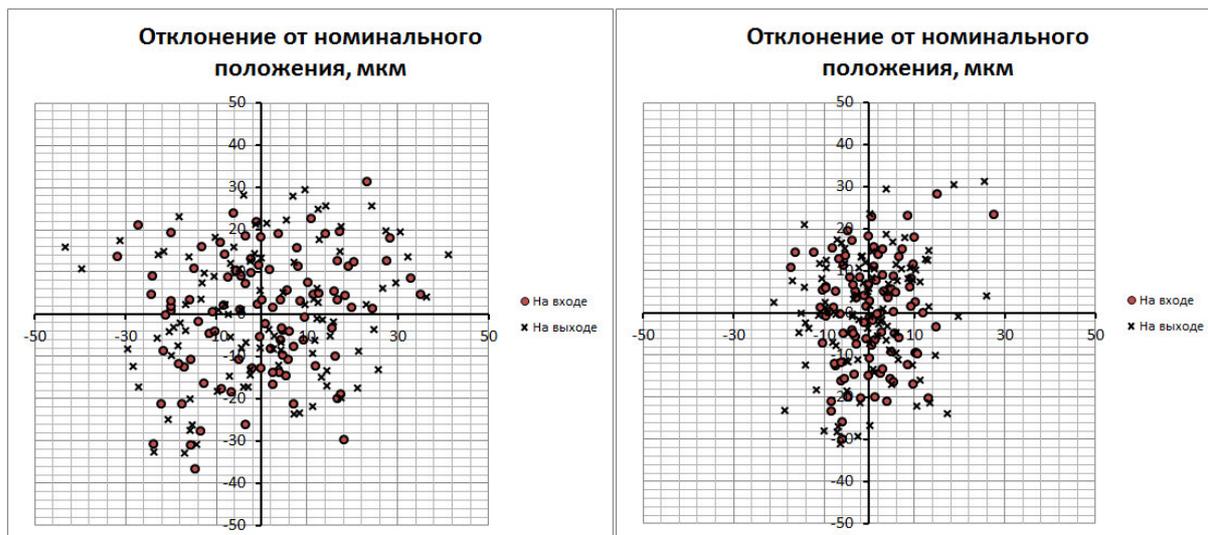


Рис. 5 Величина отклонения координаты центра отверстия от номинального положения диаметр сверла – 0,30 мм: а) сверло без покрытия, б) сверло с покрытием.

Эффект сверхнизкого трения был получен на антифрикционном тонкопленочном покрытии состава MoS_2D_x (где D – легирующий элемент) при нормальных условиях на воздухе путем магнетронного распыления двух мишеней из MoS_2 и Ga [4]. По сравнению с коэффициентами сухого трения скольжения ($f = 0,7 - 0,9$) двух металлических поверхностей и трения скольжения твердых антифрикционных материалов ($f = 0,1 - 0,2$) коэффициент трения скольжения покрытия MoS_2D_x составляет очень маленькую величину $f = 0,001 - 0,0001$.

Разработана модель, объясняющая механизм антифрикционного действия покрытий состава MoS_2D_x , имеющих сверхнизкие коэффициенты трения при триботехнических испытаниях в нормальных условиях на воздухе – легирующий элемент уменьшает трение скольжения между слоями слоистой структуры дисульфида молибдена. На рис.6 приведена зависимость коэффициента трения скольжения от длительности испытаний покрытий MoS_2 (1) и MoS_2D_x (2), нанесенных высокочастотным катодным распылением. Испытания по схеме диск-сфера проводились на воздухе при нормальных условиях.

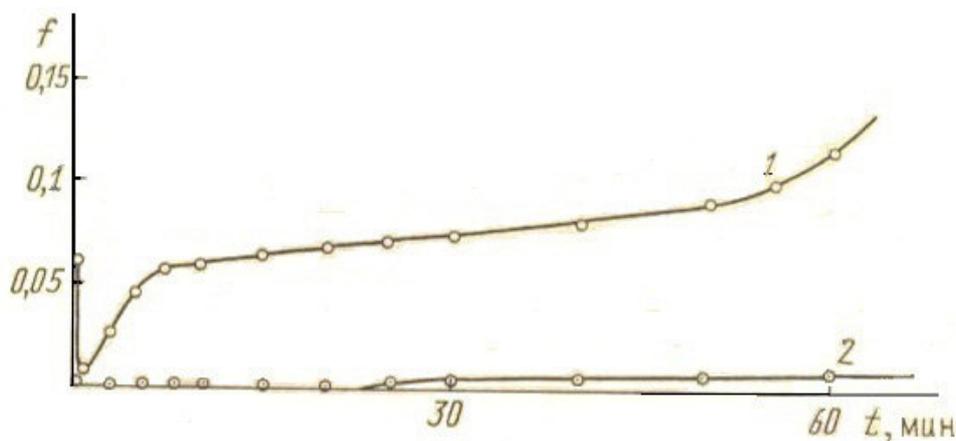


Рис. 6 Зависимость коэффициента трения скольжения от длительности испытаний двух типов покрытий: 1 – MoS_2 , 2 – MoS_2D_x .

Кроме сверхнизкого трения тонкопленочные покрытия из MoS_2 , нанесенные ионно-плазменным методом (ИПН), имеют хорошие вакуумные характеристики [5] – спектр

выделения газов из покрытия, вплоть до температуры 773 К не содержит сернистых соединений по сравнению с твердосмазочным покрытием «Димолит-4» (рис. 7).

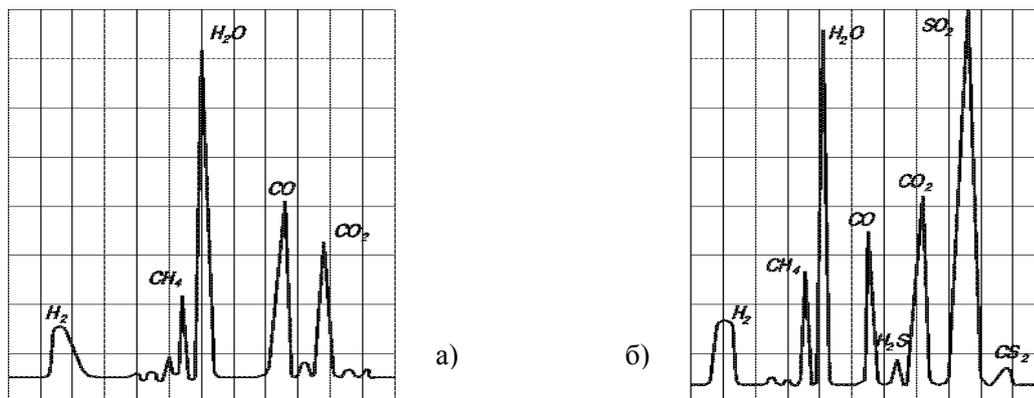


Рис. 7 Спектр газовой выделения покрытий на основе MoS_2 : а) ИПН MoS_2 , $T=773 \text{ K}$, $t=1 \text{ час}$; б) Димолит-4, $T=623 \text{ K}$, $t=1 \text{ час}$.

Заключение

Метод и режимы нанесения тонкопленочного покрытия в вакууме определяют энергомассоперенос материала покрытия, его структурные и функциональные характеристики, а также необычные упрочняющие эффекты, описанные в данной статье. Управляемый энергомассоперенос и наноструктура покрытия обеспечивают одновременно сверхвысокую твердость и пластичность, низкий и сверхнизкий коэффициент трения скольжения, высокую износостойкость и повышенную жесткость малоразмерного инструмента.

Для обработки резанием труднообрабатываемых материалов – специальных сталей и сплавов, титана, керамики, стекла и других материалов – необходимо подбирать или материал упрочняющего покрытия, например, сверхтвердый TiBSiN (HV до 70 ГПа) или твердый и «скользящий» TiBCrN , или структуру покрытия, например, полученный из сепарированной плазмы дугового разряда алмазоподобный углерод.

Для механизмов и устройств сверхточных перемещений рекомендуется использовать покрытия MoS_2D_x с эффектом аномально низкого трения (коэффициент трения скольжения менее 0,001). Причем такие покрытия могут работать как в атмосфере, так и в высоком и сверхвысоком вакууме – при их нагреве до температуры 773 К в спектре газовой выделений отсутствуют сернистые соединения.

Тонкопленочные покрытия, нанесенные на малоразмерные сверла диаметром менее 0,3 мм, увеличивают их изгибную жесткость на 10 – 45 %, что способствует повышению точности обработки печатных плат.

Литература

1. Новые материалы. Колл. авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС. – 2002 – 736 с.
2. Levashov E.A., Shtansky D.V., Panfilov Y.V. Multi-component nanostructure thin film wear-resistant coatings / 7th International Conference on Nanostructured Materials, June 20-24, 2004 Viesbaden/ Germany, P. 35.
3. Литвак Ю.Н., Панфилов Ю.В. Применение упрочняющих покрытий для повышения точности микроразмерного сверления печатных плат / Упрочняющие технологии и покрытия, №1, 2016, С. 3 – 7.
4. Ноженков М.В. О слабых взаимодействиях частиц в твердых телах. Наноинженерия, №3(9), 2012, С.41 – 47.
5. Вакуумная техника: справочник / Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009, 590 с.