

# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

## Свойства и применение DLC-покрытий

Боровиков Сергей Максимович, кандидат технических наук, доцент;  
 Пигаль Роман Владимирович, студент магистратуры  
 Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)

Терещук Олег Игоревич, аспирант  
 Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

В статье авторы приводят краткий обзор свойств и применений алмазоподобного покрытия.

**Ключевые слова:** DLC, углерод, алмазоподобное покрытие, материаловедение, технология тонких плёнок.

DLC — это аббревиатура Diamond-Like Carbon. Русскоязычный аналог данного термина «алмазоподобное покрытие». Данное покрытие обладает некоторыми ценными свойствами алмаза, в том числе: высокой твердостью, низким трением, износостойкостью, химической инертностью, биологической совместимостью, электрической изоляцией, оптической прозрачностью и гладкостью.

DLC покрытия используются для придания нужных характеристик другим материалам. С точки зрения технологии большим плюсом является то, что во многих случаях он может быть нанесен при низкой (<200С) температуре подложки.

DLC покрытие имеет множество коммерческих применений, включая станки, аэрокосмические детали, детали двигателей и медицинские имплантаты. В зависимости от области применения используются различные составы DLC-покрытий. [1]

### Виды и формы DLC

Основными составляющими DLC являются атомы углерода в двух видах гибридизации ( $sp^2$  и  $sp^3$ ), а также атомы водорода. В зависимости от процентного соотношения этих составляющих существует несколько различных форм. Наиболее явно их отличие можно видеть на тернарной диаграмме (рисунок 1).

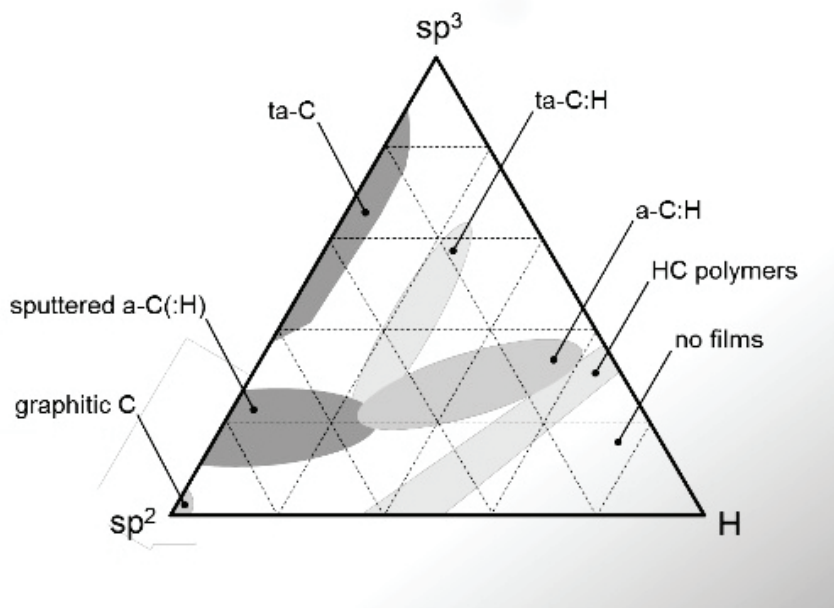


Рис. 1. Типы DLC-покрытия [2]

«Тетраэдрический аморфный углерод (ta-C)» считается «чистой» формой, поскольку он состоит преимущественно из  $sp^3$ -гибридизированных атомов углерода. Однако из-за патентных ограничений и дорогостоящих лицензионных сборов чистый ta-C обычно используется для компонентов с высокой стоимостью. Другие формы DLC более экономичны и просты в производстве, поэтому более широко применяются.

### Технология

Различные технологические параметры контролируют характеристики DLC-покрытий. К ним относятся не только такие факторы как отношение углерода  $sp^2$  к углероду  $sp^3$ , но и метод осаждения, напряжение смещения подложки, время процесса, энергия и плотность ионов и температура подложки. Таким образом, многие характеристики, такие как толщина покрытия,

твёрдость, удельное сопротивление, содержание водорода и другие, могут контролироваться по мере необходимости для различных применений.

DLC на раннем этапе развития этой технологии имел проблемы с адгезией. Это связано с тем, что алмазоподобное покрытие, как правило, имеет высокие напряжения в плёнке, которые в сочетании с несоответствиями решетки между DLC и многими подложками приводят к плохой адгезии. Однако эта проблема была решена применением многослойных покрытий, включающих в себя адгезионный слой. Эти слои уменьшают концентрацию напряжений вблизи границы раздела «покрытие-подложка» за счет создания плавной границы раздела, которая создаёт более высокий модуль упругости. Это гарантирует отсутствие резкого перехода между составами и постепенное введение напряжения в покрытие, что приводит к отличной адгезии DLC.

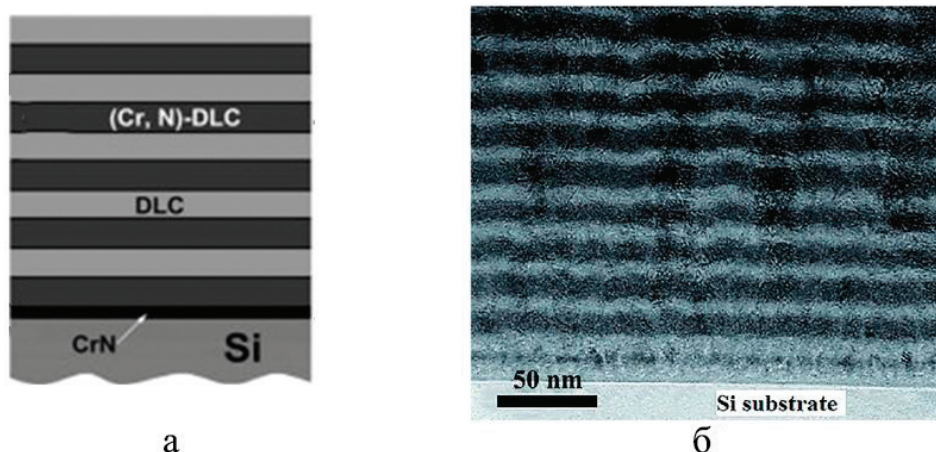


Рис. 2. Схема многослойного покрытия [4] [5]

Многослойные структуры в разы уменьшают напряжения пленки. Это позволяет получать более толстые покрытия, что создает отличные свойства, такие как: чрезвычайно высокая микротвёрдость, низкие коэффициенты трения, более медленные скорости износа и т.д. Обычно используется стек: Титан, нитрид титана, карбонитрид титана, карбид титана и, наконец, DLC.

### Свойства и применение DLC

DLC-покрытия не имеют кристаллической геометрии, которая встречается в природе, а вместо этого являются аморфными. DLC-покрытия изготавливаются из случайных чередований кубических и гексагональных решеток, что не создает дальнего порядка и, следовательно, не создает плоскостей разрушения, вдоль которых можно разорваться. В результате получается исключительно твердый материал.

DLC-покрытия значительно повышают производительность и срок службы инструментов, компонентов и станков. В ta-C форме, как правило, значение твёрдости между 5000–9000HV. Другие формы варьируются от 1000 до 4000HV.

Высокая твёрдость DLC-покрытий снижает вероятность проникновения твердых частиц в инструменты или детали. Было показано, что оптимизированные DLC-покрытия увеличивают срок службы инструментов в 10 раз. Например, DLC-покрытия создали серьезные улучшения в суровых условиях обработки нержавеющей стали. Благодаря своей долговечности DLC используется в качестве трибологического покрытия для станков, таких как сверла, пилы и штампы.

Твёрдость DLC также делает его прочным. DLC-покрытие защищает движущиеся детали от истирания, сохраняя плавное движение гораздо дольше, чем непокрытые детали. Двигатели с деталями, покрытыми DLC, имеют более длительный срок службы из-за механических деталей, которые вращаются, скользят и сталкиваются с другими типами износа. Например, DLC теперь является стандартной практикой на распределительных валах.

DLC-покрытия создают более низкие коэффициенты трения. Таким образом, DLC покрытие нашло применение в двигателях, инструментах, обработке литого и ковального алюминия, пластиковых литевых формах, насосах, деталях машин, подшипниках, кулачках и даже бритвенных лезвиях. Снижение

трения также снижает потребность в смазке, что зачастую повышает эффективность в цепочке.

Высокий коэффициент скольжения у DLC приобретает за счёт того, что он не имеет острых углов и шероховатостей.

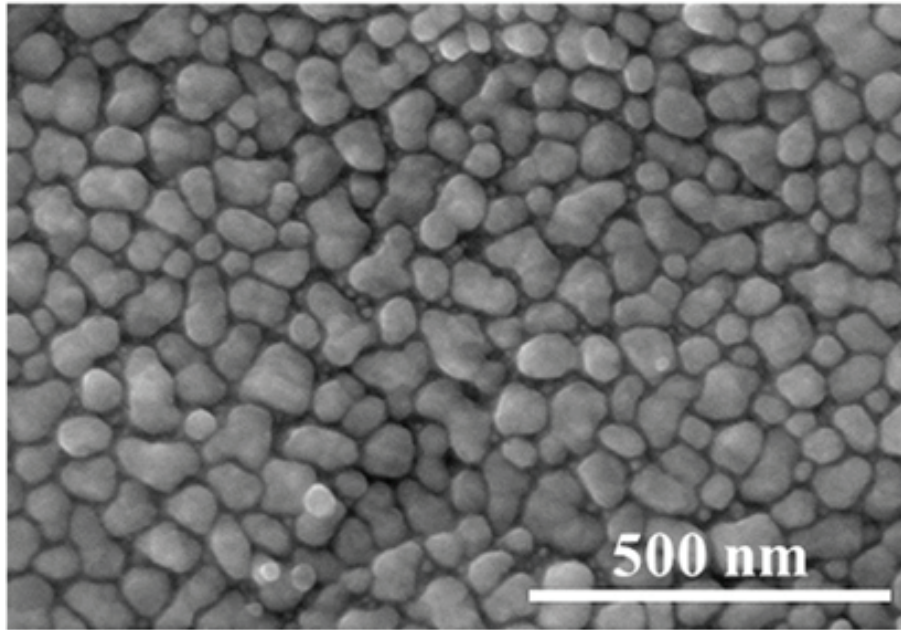


Рис. 3. Фото поверхности DLC легированного титаном [6]

DLC-покрытие не реагирует ни на кислоты, ни на щелочи. Оно обладает высокой устойчивостью к окислению и коррозии. Высокая плотность и аморфная структура DLC препятствуют проникновению агрессивных побочных продуктов в инструменты. Химически инертные характеристики алмазоподобных покрытий резко снижают возможность холодной сварки и захвата материала на поверхности инструмента.

DLC был тщательно протестирован на биосовместимость. Исследования (как *in vitro*, так и *in vivo*) были сосредоточены на взаимодействии DLC с макрофагальными клетками (крупными лейкоцитами, поглощающими инородные тела), фибробла-

стами (клетками, образующими соединительную ткань) и остеобластами (клетками, образующими кость).

DLC, нанесенный на сплав Ti, обладает низким уровнем цитотоксичности и действует как диффузионный барьер между титановым сплавом (который в противном случае вызывал гибель многих клеток) и клетками фибробластов.

Так же DLC доказал свою безопасность и эффективность для имплантированных медицинских устройств, таких как стенты, тазобедренные и коленные суставы. DLC-покрытия позволяют имплантатам сохранять целостность, избегать образования мусора, предотвращать неконтролируемый рост клеток и не вызывать инфекций.

#### Литература:

1. Diamond-Like Carbon Coatings.— Текст: электронный // [www.acreotech.com/](http://www.acreotech.com/): [сайт].— URL: <http://www.acreotech.com/index.php/products/diamond-like-carbon-coating> (дата обращения: 25.01.2021).
2. Tomasz, Liskiewicz DLC coatings in oil and gas production / Liskiewicz Tomasz.— Текст: электронный // [www.slideshare.net](http://www.slideshare.net/): [сайт].— URL: <https://www.slideshare.net/TomaszLiskiewicz/dlc-coatings-in-oil-and-gas-production> (дата обращения: 25.01.2021).
3. Complete Guide To DLC Coating.— Текст: электронный // [www.dekmake.com](http://www.dekmake.com/): [сайт].— URL: <https://www.dekmake.com/guide-to-dlc-coating/> (дата обращения: 25.01.2021).
4. Microstructure and tribomechanical properties of (Cr, N)-DLC/DLC multilayer films deposited / C. Q. Guo [и др.].— Текст: непосредственный // *Diamond and Related Materials*.— 2015.— № 60.— С. 66–74.
5. Pogrebnjak, A. Nanocomposite Multilayer Binary Nitride Coatings Based on Transition and Refractory Metals: Structure and Properties / A. Pogrebnjak, K. Smyrnova, A. Bondar.— Текст: непосредственный // *Coatings*.— 2019.— № 9.— С. 155.
6. Mazare, A. Silver doped diamond-like carbon antibacterial and corrosion resistance coatings on titanium / A. Mazare, A. Anghel, C. Surdu-Bob.— Текст: непосредственный // *Thin Solid Films*.— 2018.— № 657.— С. 16–23.
7. Diamond-like carbon coating under oleic acid lubrication: Evidence for graphene oxide formation in superlow friction.— Текст: электронный // [www.nature.com](http://www.nature.com/): [сайт].— URL: <https://www.nature.com/articles/srep46394> (дата обращения: 25.01.2021).