

Список использованных источников

1. Шеин, А. А. Технологическое обеспечение качества деталей в процессах раздельной штамповки путем нанесения на инструмент вакуумно-плазменных покрытий: дис. к. т. н.: 05.02.08: защищена 21.12.2005 / Шеин Александр Анатольевич. – М., 2005. – 135 с.

2. Карпенко В. М., Гринь Л. Г. Гринько И. Н. Повышение стойкости вырубных штампов. // Кузнечно-штамповочное производство, 1987, № 6. с. 33–34.

УДК 621.793.1:546.26:533.92

Влияние термообработки на фазовый состав и механические свойства кремний-углеродных покрытий

**Руденков А. С., канд. техн. наук, доцент,
Середа А. А., старший преподаватель**

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины
Гомель, Республика Беларусь*

Аннотация:

Рассматриваются перспективы легирования кремнием углеродных покрытий с точки зрения улучшения их термостойкости. Определено влияние термообработки на химический и фазовый состав, микротвердость и триботехнические свойства кремний-углеродных покрытий, сформированных путем ионно-лучевого испарения мишени на основе карбида кремния.

Благодаря уникальным механическим свойствам (высокая микротвердость, низкий коэффициент трения), химической инертности, хорошей тепло- и электропроводности, прозрачности в инфракрасном диапазоне углеродные покрытия нашли широкое применение в различных отраслях промышленности [1]. Однако, их существенным недостатком является низкая термостойкость: при температуре около 350 °С вследствие интенсивной графитизации их механические свойства существенно ухудшаются [2]. Перспективным технологическим приемом повышения термостойкости (до 600–800 °С)

углеродных покрытий, вследствие образования карбидов, является легирование тугоплавкими металлами и кремнием [2]. Необходимо отметить, что свойства углеродных покрытий, главным образом, определяются соотношением sp^3 - и sp^2 -гибридизированных атомов углерода, которое, в свою очередь обусловлено выбором метода формирования, режимов и условий осаждения [1]. Целью данной работы является установление влияния термообработки на фазовый состав и механические свойства кремний-углеродных покрытий.

Кремний-углеродные покрытия были сформированы на кремниевых подложках путем ионно-лучевого распыления карбида кремния. Параметры ионно-лучевого распыления: рабочий газ – аргон, давление – 5×10^{-2} Па, ускоряющее напряжение – 4,5 кВ, ток разряда – 164 мА, ток мишени – 148 мА. Толщина покрытия – около 300 нм. Термообработка покрытий проводилась на воздухе при температурах 600 °С, 700 °С в течение 30 минут.

Анализ химического и фазового состава покрытий осуществлялся средствами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), прибор РНІ Quantera (возбуждение вещества $K\alpha$ -излучением алюминия с энергией кванта 1486,6 эВ, суммарная мощность – 250 Вт). Анализ фазового состава также осуществлялся средствами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР-спектроскопия). Измерения микротвердости выполнялись при помощи микротвердомера ДМ-8 с индентором Кнупа. Нагрузка на индентор – 0,98 Н. Триботехнические испытания были выполнены по схеме «сфера-плоскость», контртело – шарик из стали ШХ15 диаметром 5 мм, нагрузка на индентор – 0,98 Н, средняя скорость перемещения – 0,0087 м/с. После проведения триботехнических испытаний рассчитывался коэффициент объемного изнашивания контртела на основе определения диаметра пятна контакта.

Средствами РФЭС установлено, что термообработка приводит к снижению концентрации углерода и увеличению содержания кислорода в покрытии (таблица 1). Уменьшение значения соотношения C_{sp^3}/C_{sp^2} свидетельствует о протекании процессов графитизации покрытия. Уменьшение соотношения Si-C/Si-O вызвано разрушением Si-C и C-Si-O связей и взаимодействием свободных атомов кремния с кислородом с образованием оксидов кремния Si_xO_y , что является причиной увеличения концентрации кислорода в покрытии. Вследствие разрыва Si-C связей атомы углерода взаимодействуют с кислородом и десорбируют с поверхности.

Таблица 1 – Анализ изменений химического и фазового состава кремний-углеродных покрытий после термообработки

Термо-обработка, °С	Концентрация элементов, ат. %			Соотношение связей		КР-спектроскопия	
	С	Si	О	Csp ³ /Csp ²	Si-C/Si-O	Ширина G-пика, см ⁻¹	I _D /I _G
–	40,3	25,7	34,0	1,06	0,15	117,9	1,78
600	22,3		52,0	0,28	0,10	115,6	1,63
700	20,2		54,1	0,18	0,08	110,7	1,55

Результаты РФЭС подтверждаются данными КР-спектроскопии. D-пик КР-спектров углеродных покрытий, расположенный между 1350 см⁻¹ и 1400 см⁻¹, обусловлен включениями из sp³-гибридизированных атомов в матрицу на основе sp²-гибридизированных атомов. G-пик соответствует sp²-гибридизированным атомам углерода и определяется около 1560–1580 см⁻¹. С увеличением температуры наблюдается уменьшение ширины G-пика, что, согласно [3], свидетельствует об увеличении степени упорядоченности sp²-кластеров. Уменьшение соотношения интенсивностей I_D/I_G D- и G-пиков свидетельствует о некотором увеличении размеров sp²-кластеров [3].

Показано, что термообработка кремний-углеродных покрытий приводит к снижению микротвердости на 1,3–1,7 ГПа в зависимости от температурного режима (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние параметров термообработки на микротвердость кремний-углеродных покрытий и коэффициент объемного изнашивания контртела при взаимодействии с такими покрытиями

Термообработка, °С	Микротвердость H _к , ГПа	Коэффициент объемного изнашивания контртела j, ×10 ⁻¹⁷ м ³ /(Н·м)
–	13,34±0,25	332±17,3
600	12,05±0,27	185±16,9
700	11,59±0,22	167±14,3

Уменьшение микротвердости может быть обусловлено несколькими причинами: главным образом, разрушением твердых фаз

внедрения на основе карбида кремния и фазовой трансформацией $sp^3 \rightarrow sp^2$. Кроме того, в соответствии с законом Холла-Петча [4], гласящем о том, что уменьшение среднего размера зерна приводит к росту предела текучести, а значит и микротвердости материала, снижение микротвердости кремний-углеродных покрытий может быть вызвано увеличением размеров sp^2 -кластеров (подтверждается приведенными выше результатами КР- спектроскопии). Показано, что коэффициент объемного изнашивания (таблица 2) после термообработки в зависимости от температурного режима уменьшается в 1,8–2 раза. В свою очередь, коэффициент трения кремний-углеродных покрытий, сформированных путем ионно-лучевого распыления карбида кремния, после термообработки уменьшается почти в 2 раза (рисунок 1).

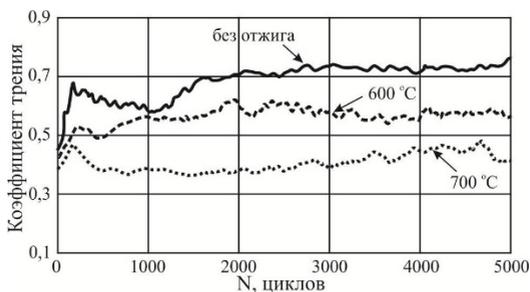


Рис. 1 – Влияние параметров термообработки на кинетические зависимости коэффициента трения кремний-углеродных покрытий

Согласно данным РФЭС, термообработка кремний-углеродных покрытий приводит к увеличению содержания графита, который играет роль твердой смазки и способствует снижению коэффициента трения. Более высокий коэффициент трения до термообработки обусловлен наличием твердых фаз внедрения на основе карбида кремния и неравномерным изнашиванием поверхности в процессе трения. Абразивным действием карбида кремния объясняется и более высокий коэффициент объемного изнашивания контртела при взаимодействии с поверхностью кремний-углеродных покрытий, не подвергнутых термообработке.

Таким образом, термообработка кремний-углеродных покрытий вызывает графитизацию покрытия, разрушение Si-C связей, сниже-

ние содержания карбида кремния, окисление свободных атомов кремния, что приводит к уменьшению микротвердости на 1,3–1,7 ГПа, снижению коэффициента трения в 1,8–2 раза и коэффициента объемного изнашивания контртела при взаимодействии с такими покрытиями в 2 раза. Необходимо отметить, что однокомпонентные углеродные покрытия при выбранных в настоящей работе режимах термообработки разрушаются полностью. Кремний-углеродные покрытия могут найти применение при упрочнении поверхности специализированного инструмента, работающего при высоких температурах (до 700 °С).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР «Разработка реакционных ионно-плазменных методов формирования и параметризация покрытий на основе силицированного углерода и карбидообразующих металлов с высокими механическими свойствами и повышенной термостойкостью» (№ гос/р 20211993), ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

Список использованных источников

1. Рогачев А. В. Механические, свойства и структура композиционных углеродных покрытий / А. В. Рогачев, А. Н. Попов, В. П. Казаченко, С. С. Сидорский // *Материалы, технологии, инструмент.* – 2001. – Т. 5, № 2. – С. 77–80.
2. Thermal stability of nanostructured superhard coatings: A review / A. Raveh [et al.] // *Surface & Coatings Technology.* – 2007. – Vol. 201. – P. 6136–6142.
3. Bonding in hydrogenated diamond-like carbon by Raman spectroscopy / C. Casiraghi [et al.] // *Diamond and Related Materials.* – 2005. – Vol. 14. – P. 1098–1102.
4. Зайченко, С. Г. Дислокационный механизм пластической деформации нанокристаллических материалов / С. Г. Зайченко, А. М. Глезер // *Физика твердого тела.* – 1997. – № 11. – С. 2023–2028.