

Зародышеобразование новой фазы (энергию Гиббса  $\Delta G^\circ$ ) рассматривается как разница уменьшения энергии образования единичного объема новой фазы и увеличения энергии за счет образования новых граничных поверхностей (поверхностная энергия). Значения энергии Гиббса для образования возможных соединений при нагреве частиц с покрытием приведены в таблице 2

Таблица 2 – Изменение энергии Гиббса с ростом температуры

Химическая реакция	Энергия Гиббса, кДж/моль		
	800°C	900°C	1000°C
$Si + C = SiC$	-66,33	-58,04	-58,15
$Si + O_2 = SiO_2$	-923,15	-944,62	-949,255
$C + O_2 = 2CO$	-260,3	-267,39	-275,7
$4Al+3C=Al_4C_3$	-176,24	-171,5	-167,33

$K$  – константа равновесия, показывающая полноту протекания реакции.

Согласно дилатограмме при 650 °С, когда энергия Гиббса отрицательная (реакция экзотемическая) имеет наибольшее значение, образование SiC идет активно с образованием пленки SiC в зоне контакта Si – C. Реакционная диффузия (спекание) с образованием  $\alpha$  - SiC протекает при температуре 800 – 850°C. Покрытие Al ( $Al_2O_3$ ) или силумином АК9 на частицах со сло-

стым покрытием (Si+C) и аморфный SiC служило для защиты кремния от оксидирования при транспортировке и хранении, одновременно Al является активирующей спекание добавкой.

Развитие вакуумной нанотехнологии позволило магнетронным распылением комбинированного катода Si – C в условиях раздельного синтеза получить слоистый конденсат аморфно – кристаллического строения из смеси Si + C с тонким слоем аморфного SiC. Реакционное спекание в конденсате с образованием покрытия  $\alpha$ -SiC протекает при низких температурах (650 – 850°C).

1. Гнесин, Г.Г. Исследования и разработка неоксидных керамических материалов в Украине / Г.Г. Гнесин – Новые материалы и технологии – Киев:Наук. Думка, 1998.–с.519-528.
2. Ковалевский, В.Н. Нанесение слоистых нанопокровтий на порошки алмаза и получение материалов на основе этих порошков Порошковая металлургия / В.Н. Ковалевский, С.К. Гордеев, С.Б. Корчагина, И.В. Фомихина, С.В.Григорьев, А.Е. Жук – Минск -2006.С.86 – 93
3. Ковалевский, В.Н. Механизмы образования слоистых многофункциональных покровтий на основе карбида кремния/ В.Н. Ковалевский, А.Е. Жук // Вестник БНТУ, 2010.№6. С.42 – 47.

УДК 681.7.023.72

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА СФЕРИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Козерук А.С., Кузнецик В.О., Шамкалович В.И., Филонова М.И., Сафонов В.В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В классической технологии оптического приборостроения обработку оптических деталей производят по методу свободного притирания, при котором происходит изменение величины площади зоны контакта детали и инструмента, вызывающее непостоянство эпюры давления в этой зоне. Такая обработка сопровождается неодинаковым съемом припуска в центральной и краевой зонах детали, что служит одним из приемов управления процессом формообразования высокоточных поверхностей деталей [1].

С целью получения закона изменения обсуждаемой площади соприкосновения звеньев, обратимся к рис. 1, а, где показано положение верхнего звена 1 относительно нижнего 2 в произвольный момент времени, когда угол

между их осями вращения равен  $\Delta$ . Из анализа этого рисунка видно, что если  $\Delta \leq \Delta_H - \Delta_B$ , где

$$\Delta_H = \arcsin \frac{D_H}{2R} \quad \text{и} \quad \Delta_B = \arcsin \frac{D_B}{2R} - \text{углы}$$

раствора соответственно нижнего и верхнего звеньев диаметрами  $D_H$  и  $D_B$ ,  $R$  – радиус кривизны обрабатываемой детали, то верхнее звено не выходит за край нижнего, и площадь их контакта постоянна и равна

$$S_1(\Delta) = 2\pi R(R - OB)$$

$$\text{где } OB = \sqrt{R^2 - (D_B/2)^2}.$$

В случае, когда  $\Delta > \Delta_H - \Delta_B$ , но  $\Delta < \Delta_H$ , т.е. когда верхнее звено выходит за край

нижнего, площадь контакта определим с помощью поверхностного интеграла 1-го рода  $S_2(\Delta) = \iint_S dS$  [2], или

$$S_2(\Delta) = \iint_{D_{xy}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy,$$

где  $D_{xy}$  – проекция площади контакта на плоскость  $O_{xy}$  прямоугольной системы координат с началом в центре сферической поверхности нижнего звена (рис. 1, б);

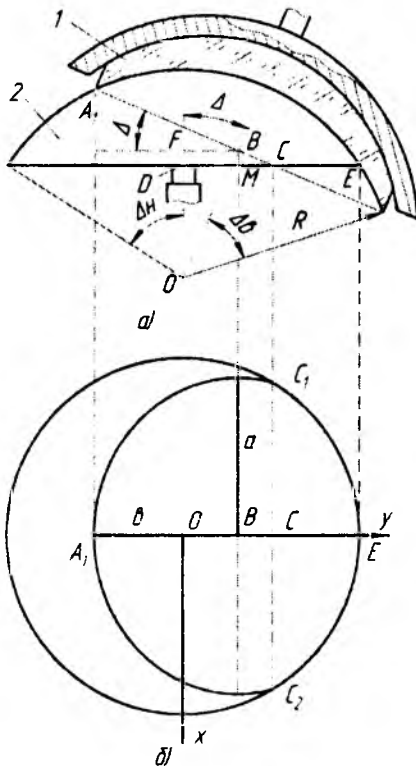


Рисунок 1 – Схема обработки линз по методу свободного притирания: а – взаимное расположение и детали в произвольный момент времени; б – к определению площади контакта притирающихся звеньев

$z = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}$  – уравнение сферической поверхности радиусом кривизны  $R$ .

Так как  $\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{-x}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}}$ ;

$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{-y}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}}$ , то

$$1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 = \frac{R^2}{R^2 - x^2 - y^2}.$$

Ввиду того, что площадь  $D_{xy}$  ограничена дугой  $EC_1A_1C_2$  в виде окружности  $C_1EC_2$  и эллипса  $C_1A_1C_2$  и состоит из двух одинаковых площадей  $A_1EC_1$  и  $A_1EC_2$ , то, принимая во внимание последнее выражение, можно записать:

$$S_2(\Delta) = 2R \int_{x_a}^{x_b} \left( \int_{y_c}^{y_d} \frac{dx}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} \right) dy + 2R \int_{x_c}^{x_d} \left( \int_{y_c}^{y_d} \frac{dx}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} \right) dy,$$

где  $a(\Delta)$  – часть дуги  $EC_1A_1C_2$  в виде эллипса  $C_1A_1C_2$  с большой  $a$  и малой  $b$  полуосями.

Используя изложенное, искомое уравнение эллипса можно получить из решения системы

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = R^2, \\ y \sin \Delta + z \cos \Delta = OB, \end{cases}$$

которое после преобразований с учетом, что  $R^2 - OB^2 = (D_0/2)^2$ , принимает вид

$$S_2(\Delta) = 2R \int_{x_a}^{x_b} \arcsin \frac{\frac{D_0}{2} \sqrt{(y - OB \cdot \sin \Delta)^2 - \left(\frac{D_0}{2} \cos \Delta\right)^2}}{\sqrt{R^2 - y^2}} dy + 2R \int_{x_c}^{x_d} \arcsin \frac{\sqrt{\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 - y^2}}{\sqrt{R^2 - y^2}} dy.$$

Полученная формула позволяет определить закономерность изменения площади контакта притирающихся сферических поверхностей инструмента и детали в случае выхода одного из них за край другого.

Если же пронормировать абсолютное значение площади контакта  $S_2(\Delta)$ , разделив его на максимальную величину  $S_1(\Delta)$ , то получим коэффициент  $K = S_2(\Delta) / S_1(\Delta)$ , используя который можно записать закон изменения рабочего усилия в виде

$$F(\Delta) = KF_0,$$

где  $F_0$  – рабочее усилие на стадии полного контакта верхнего звена с нижним.

При изготовлении линз по классической технологии, когда величина рабочего усилия не изменяется в течение всего цикла обработки, информативным является зависимость коэффициента  $K$  от угла  $\Delta$ . Так, например, из анализа рис. 2, где представлены результаты расчета закономерностей изменения коэффициента  $K$  от  $\Delta$  для разных диаметров верхнего звена при постоянных значениях радиуса кривизны обрабатываемой поверхности и диаметра нижнего звена, видно, что изменение  $D_B$  не вызывает существенных расхождений в характере распределения

коэффициента  $K$ : углы наклона кривых отличаются между собой незначительно и последние сходятся в одну точку.

Следовательно, если при управлении процессом формообразования линзы на стадии ее полирования изменять диаметр инструмента,

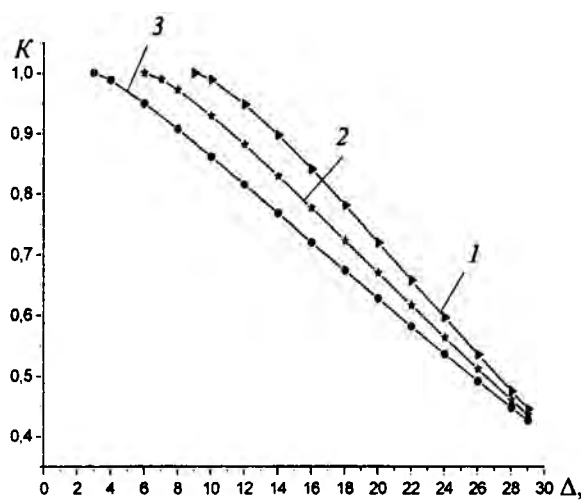


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента  $K$  от угла между осями вращения нижнего и верхнего звеньев при  $R = 100$  мм,  $D_n = 100$  мм,  $D_b = 70$  (1), 80 (2), 90 (3) мм

то это не приведет к резкому изменению характера съема припуска с заготовки и не

произойдет нарушения сферичности обрабатываемой поверхности, которое исправляют в большинстве случаев ее перешлифовкой и повторным полированием.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Полученная формула для расчета величины площади контакта притирающихся звеньев при изготовлении линз высокой точности позволяет определить закон изменения рабочего усилия на стадии финишного полирования оптических элементов и тем самым повысить производительность этой операции.

2. Проведенные численные исследования показывали, что с увеличением радиуса кривизны сферической поверхности линзы диаметр инструмента целесообразно выбирать вблизи нижней границы рекомендуемого диапазона (0,7 – 0,9) от диаметра детали [3].

1. Козерук, А.С. Формообразование прецизионных поверхностей / А.С. Козерук – М., 1997.
2. Математика для инженеров. Т. 2 / Под ред. Н.А. Микулика. Мн., 2006.
3. Технология оптических деталей / Под ред. М.Н. Семибратова. М., 1978.

УДК 621.382:621.373.820

### ФОРМИРОВАНИЕ ДИСИЛИЦИДА ТИТАНА В МОДИФИКАЦИИ С49 НА КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ИОНАМИ МЫШЬЯКА

Колос В.В.<sup>1</sup>, Маркевич М.И.<sup>2</sup>, Чапланов А.М.<sup>3</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-производственное объединение «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup> Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Развитие микроэлектроники требует дальнейших разработок стабильных и высококачественных слоев дисилицида титана и некоторых других силицидов для задач оптоэлектроники [1-4].

Одним из важных направлений физики твердого тела является разработка новых методов синтеза перспективных материалов с заданными структурно-чувствительными свойствами. Перспективным направлением современного материаловедения является быстрая термическая обработка (БТО). Установление свойств материалов, влияния параметров БТО на процесс формирования структуры может упростить технологические процессы и существенно повысить качество синтезированных материалов [3-6].

Особенности быстрой термической обработки изучены для ограниченного числа систем металл-полупроводник. В подавляющем боль-

шинстве научных работ исследовались процессы формирования силицидов титана в бинарных системах титан – кремний [1-3,5,6]. Вместе с тем, в реальных структурах полупроводниковых приборов силициды титана создаются на кремниевых областях с высокими концентрациями различных донорных и акцепторных примесей.

Исследование влияния легирующих примесей на протекание процесса формирования силицидов титана и установление особенностей синтеза дисилицида титана под слоем специально выращенного слоя нитрида титана представляет интерес для опто- и микроэлектроники и является важной и актуальной задачей.

В данной работе исследовался процесс формирования дисилицида титана в модификации С49 в системах TiN/Ti/Si и Ti/Si, где кремний легировался ионами мышьяка различными дозами.