

пользование П. т. приводит к формированию принципиально новых композиц. материалов, свойства к-рых не определяются простым суммированием характеристик основы и покрытия, а являются качественно новыми.

При формировании покрытий широко используется перевод исходных продуктов в плазменное состояние с помощью вакуумной дуги. Катодные микропятна *дугового разряда* являются источниками высокоскоростных потоков плазмы, содержащей продукты эрозии катода. Степень ионизации образующегося плазменного потока достаточно велика (от 20 до 90% в зависимости от материала катода); наиб. долю в нём составляют двухзарядные ионы. Ионные токи дугового разряда аномально высокие — до 10 ампер и более (ок. 10% тока разряда).

Управление потоками плазмы вакуумной дуги (транспортировка, фокусировка, сепарация от нейтральных частиц и макрочастиц катодного материала) осуществляется путём использования дополнит. устройств, действующих на принципах плазмооптики (см. *Плазмооптические системы*).

При конденсации потоков плазмы тяжёлых металлов (титан, молибден, цирконий и т. п.) в присутствии реактивного газа (азота) синтезируются нитриды этих металлов, к-рые обладают высокими показателями по твёрдости, износостойкости и адгезии к металлич. основе. Осн. параметрами, определяющими свойства образующегося конденсата, являются хим. состав исходного материала (катода), парциальное давление реактивного газа, темп-ра подложки при конденсации, энергия ионов, плотность плазменного потока. При повышении давления азота до оптим. значений увеличивается микротвёрдость формируемых покрытий, что обусловлено образованием твёрдых растворов азота и нитридов с достаточно широкой областью гомогенности. Зависимость свойств образующихся конденсатов от давления реактивного газа позволяет формировать покрытия с заданным градиентом свойств по толщине, а также создавать многослойные покрытия чередованием высокотвёрдых и «мягких» (исходный материал) слоёв. Возбуждённое состояние компонентов плазмы обеспечивает протекание плазмохим. реакций образования нитридов тугоплавких металлов (карбидов при использовании углеродсодержащих газов) при сравнительно низких темп-рах подложки, что позволяет наносить эти покрытия на материалы с низкой темп-рой отпуска; традиц. методы получения нитридов и карбидов требуют длит. времени и высоких темп-р (см. также *Плазмохимия*).

При конденсации потоков углеродной плазмы в вакууме на поверхности охлаждаемых металлич. подложек получены алмазоподобные покрытия. Ионно-плазменный метод синтеза позволяет получать такие покрытия толщиной до неск. десятков микрон. Физ. свойства алмазоподобных углеродных покрытий близки по свойствам к алмазу. Микротвёрдость плёнок по Виккерсу достигает $(15 \div 18) \cdot 10^8$ кгс/мм², плотность — $2,9 \div 3,2$ г/см³, электросопротивление — 10^8 Ом·см. Плёнки химически инертны к сильным окислителям, как и алмаз. Синтез в предельно неравновесных условиях композиц. высокодефектного углеродного материала, состоящего из смеси высокодисперсных алмазных кристаллитов, упрочнённых второй фазой выделений высокодисперсного графита, позволяет надеяться на получение новых конструкц. материалов с ещё лучшими свойствами, чем свойства известных форм алмазов.

Синтезированные методами П. т. высокотвёрдые, прочные, стабильные покрытия успешно используются в качестве упрочняющих покрытий для режущих инструментов (быстрорежущие стали и твёрдые сплавы) и деталей машин. Это позволяет существенно (в 2—8 раз) повысить эксплуатац. ресурс упрочняемых изделий.

Лит.: Падалка В. Г., Толок В. Т., Методы плазменной технологии высоких энергий, «Атомная энергия», 1978, т. 44, с. 476; Доронинов А. М., Технологические плазменные ускорители, «ЖТФ», 1978, т. 48, в. 9, с. 1858; Аксёнов И. И. и др., Высокоэффективный источник чистой углеродной плазмы, «ЖТФ», 1980, т. 50, в. 9, с. 2000; Плазменная металлизация в вакууме, Минск, 1983. В. Г. Падалка.

ПЛАЗМЕННАЯ ЧАСТОТА — частота ленгмюровских колебаний, называемых также плазменными колебаниями и продольными ($k \parallel E$) колебаниями пространственного заряда $\omega_p = \sqrt{4\pi n e^2 / m_e}$, n — плотность, e и m_e — заряд и масса электрона, k — волновой вектор, E — электр. поле, вызываемое разделением зарядов. В холодной плазме ($T_e = T_i$) ленгмюровские колебания не обладают дисперсией, т. е. П. ч. ω_p не зависит от длины волны. Подробнее см. в ст. *Волны в плазме*. **ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА** — раздел физики плазмы, изучающий коллективные взаимодействия плотных потоков (пучков) зарядж. частиц с плазмой и газом, приводящие к возбуждению в системе линейных и нелинейных эл.-магн. волн и колебаний, и использование эффектов такого взаимодействия. Прикладные задачи, к-рые ставит и решает П. э., определяют её осн. разделы: плазменная СВЧ-электроника, изучающая возбуждение в плазме интенсивного когерентного эл.-магн. излучения, начиная от радио- и вплоть до оптич. диапазона длин волн; плазменные ускорители, осн. на явлении коллективного ускорения тяжёлых зарядж. частиц электронными пучками и волнами в плазме; *плазменно-пучковый разряд*, основанный на коллективном механизме взаимодействия плотных пучков зарядж. частиц с газом; турбулентный нагрев плазмы плотными пучками зарядж. частиц и коллективные процессы при транспортировке и фокусировке пучков в проблеме УТС (см. *Ионный термоядерный синтез*); неравновесная *плазмохимия*, изучающая процессы образования возбуждённых молекул, атомов и ионов при коллективном взаимодействии пучков зарядж. частиц с газом и плазмой.

Историческая справка. П. э. возникла после открытия А. И. Ахнезером и Я. Б. Файнбергом (1948), Д. Бомом (D. Bohm) и Э. Гроссом (E. P. Gross, 1949) явления пучковой неустойчивости, представляющего собой вынужденное черенковское излучение плотным моноэнергетич. пучком электронов продольных эл.-магн. волн в плазме. Одним из осн. направлений коллективных методов ускорения, основы к-рых были заложены работами советских учёных В. И. Векслера, Г. И. Будкера и Я. Б. Файнберга, является метод ускорения электронов и ионов волнами плотности заряда в плазме и некомпенсиров. пучках зарядж. частиц, предложенный Я. Б. Файнбергом в 1956. В 1965 Е. К. Завойский и Я. Б. Файнберг предложили использовать электронные пучки и возбуждаемые ими эл.-магн. волны для пучкового и турбулентного *нагрева плазмы*. Идея турбулентного нагрева плазмы позволила Е. К. Завойскому в 1969 сформулировать осн. принципы иверциального электронного УТС. В 70-х гг. Д. Д. Рютовым был предложен нагрев плазмы релятивистскими пучками в *открытых ловушках*.

Параллельно возникли и развивались направления, связанные со слабоионизованной плазмой. Открытие плазменно-пучкового разряда (1961) послужило основой создания новых источников плазмы, использующих энергию плотных электронных пучков для ионизации газа. Создаваемая в таких источниках плазма оказалась сильно неравновесной с большим числом возбуждённых ионов, атомов и молекул в метастабильных состояниях, инициирующих ряд новых типов плазмохим. реакций. Неравновесная плазма пучкового разряда является рабочим веществом в плазмохим. реакторах по разделению изотопов, в квантовых генераторах когерентного излучения — плазменных лазерах и мазерах и др.

Коллективные взаимодействия. Все направления П. э. базируются на коллективных взаимодействиях