

Известно, что работоспособность поверхностного слоя в значительной степени определяется последовательностью технологических операций. В этом случае наблюдается технологическое наследование свойств, позволяющее обеспечить наилучшие выходные показатели поверхности. Анализировали три способа обработки покрытия: чистовое шлифование, полирование и магнитно-абразивную обработку. Анализ результатов исследований показывает, что износостойкость по сравнению с полированием и шлифованием увеличивается соответственно на 5...15 %; момент и коэффициент трения практически не меняются. Очевидно, что повышение износостойкости после магнитно-абразивной обработки связано с более благоприятным микрорельефом обработанной поверхности, имеющим стохастический характер, в отличие от полированной и шлифованной, у которых отдельные риски расположены в направлении скорости резания, а также с формированием в ходе магнитно-абразивной обработки более благоприятного напряженного состояния в поверхностных слоях образцов для испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И., Забавский М.Т., Кожуро Л.М. и др. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле. – Мн. : Наука и техника, 1988. 2. Сагарда Л.А., Чеповецкий И.Х., Мишнаевский П.П. Алмазно-абразивная обработка деталей машин. – Киев: Техника, 1974. – 176 с.

УДК 621.793.001.57:621.777.42

Мрочек Ж.А., Харченко В.В.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРЕССОВАНИЕМ

*Белорусский Национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Для обеспечения получения качественной адгезии между материалами покрытия и основы и возможности изменения толщины наносимого покрытия разработана технология прессования [1]. Ее отличительная особенность от известных способов – это использование дополнительной радиальной подачи материала покрытия на поверхность основы вместо совместного с основным материалом ее соосного прессования.

Задача создания технологии получения покрытий прессованием, как и любой иной технологии, является задачей многопараметрической. С одной стороны ее решение включает рассмотрение технологических особенностей, связанных с конструкционными параметрами реализации процесса. Решение этой части задачи позволило установить, что наряду с качественной адгезией между материалами покрытия и основы и возможности изменения толщины наносимого покрытия в материале покрытия создаются деформации простого сдвига [1]. С другой стороны такое решение включает рассмотрение технологических особенностей, связанных с тепловым состоянием прессуемых материалов покрытия и основы. Эту задачу можно решать для каждой выбранной пары материалов покрытия и основы экспериментально [2], но можно, на основе имеющихся представлений и экспериментальных данных, разработать механизм, объясняющий принципы соединения материалов, и получить общие рекомендации, которые в значительной мере упрощают создание аналогичных технологий.

Известно, что для образования соединения кристаллических тел недостаточно их сближение на расстояние порядка параметра кристаллической решетки, а необходимо превышение определенного для каждого сочетания материалов энергетического порога [3]. Достижение такого порога может осуществляться за счет повышения температуры, пластического деформирования, приложения объемного дополнительного сжатия, предварительного наклепа и ионизирующего облучения.

Можно утверждать, учитывая необходимость достижения указанного порога при соединении материалов и возможность его достижения различными способами, что энергия соединяемых тел определяется такими ее составляющими, которые присущи макроскопическим (температура) и микроскопическим (энергия электрона) телам. Такие представления об энергии должны распро-

страняться и на молекулу, в качестве которой следует полагать и, например, наименьшие зерна металла, разрушение и образование которых происходит дискретно [4]. Однако эти представления не согласуются с представлениями о модели молекулы как конструкции из материи, состоящей из атомных ядер и электронной оболочки, созданной внешними валентными электронами атомов.

Использование модели молекулы (рис. 1), предполагающей взаимодействие всех электронов и ядер, соединяемых в молекулу атомов, как на стадии образования, так и дальнейшего ее существования [5], позволяет обосновать необходимость достижения указанного энергетического порога. Для рассматриваемого прессования создание такого порога осуществляется за счет использования энергии пластического деформирования, включающего два типа механического воздействия материалов покрытия и основы друг на друга, и нагрева соединяемых материалов до определенных температур.

Как доказательство необходимости превышения определенного энергетического порога для материалов кристаллических тел при образовании их соединения, так и решение поставленной задачи начнем с рассмотрения представлений об энергетических характеристиках атома и молекулы, поскольку эти представления должны согласовываться с представлениями о наличии некоторого энергетического порога, при котором возможно соединение и адгезия материалов.

Внутренняя энергия атома W_a характеризуется постоянной величиной W_{ion} , которая определяется как работа, затрачиваемая на его ионизацию, или как работа образования атома из положительного иона и электрона. Так как при достижении энергии атома W_{ion} он разрушается, т.е. атом теряет электрон и становится другой частицей (ионом), поэтому фактически внутренняя энергия атома определяется как

$$W_a = W_{ion} - \delta W, \quad (1)$$

где δW – бесконечно малая величина.

Удалить электрон из атома возможно как за счет изменения кинетической энергии движения электрона, так и за счет изменения потенциальных энергий взаимодействия электронов друг с другом и электронов и ядра. Таким образом, атом может рассматриваться как система частиц, доведение внутренней энергии которой при внешнем воздействии, предположим за счет столкновения с другим атомом, до энергии $W_a + \delta W$ приводит к ее разрушению.

Отметим также и еще одну из особенностей, возникающую при столкновении, например,

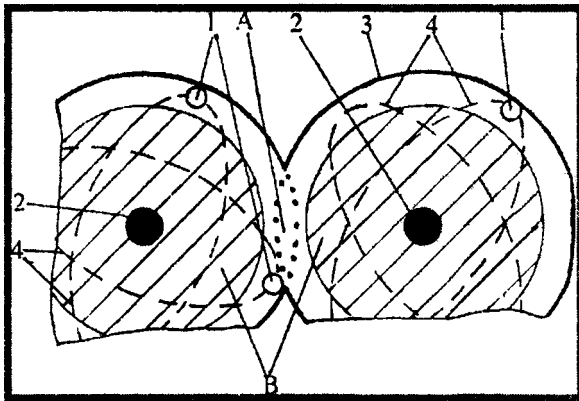


Рисунок 1 - Схема фрагмента молекулы вещества, образованной из одинаковых атомов с двумя внешними электронами: 1 – электрон; 2 – ядро; 3 – контур границы молекулы; 4 – вероятные траектории движения внешних электронов; А – зона, запрещенная для попадания электронов; В – область, в которой располагаются внутренние электроны атомов молекулы

атома с электроном. При таком взаимодействии общепринято полагать, что, так как масса электрона мала по сравнению с массой ядра, то движением последнего в процессе столкновения можно пренебречь [6]. Однако пренебрегать энергией, характеризующей такое даже весьма незначительное движение, нет оснований. Такое упрощение было бы пригодно только в том случае если бы заряд сталкивающегося с атомом электрона, был бы пренебрежимо мал по сравнению с отрицательным зарядом или зарядами внешней оболочки ядра. Поскольку это не так, то при приближении электрона к внешней оболочке атома на расстоянии, в частности, равные удаленности внешней электронной оболочки от ядра, возникают кулоновские силы, соразмерные с силой взаимодействия электронов этой оболочки с ядром и отталкивающие ее в направлении движения электрона. При этом предполагается, что движение атома и электрона происходят по прямой, соединяющей их центры масс, а влиянием внутренних

оболочек можно пренебречь. Тогда как кулоновское взаимодействие этого электрона с ядром атома будет вызывать его притяжение к электрону и движение, направленное в противоположную сторону движению внешней оболочки атома. Очевидно, что при таком взаимодействии энергия атома должна содержать составляющую энергии, характеризующую движение ядра и сопоставимую с иными слагаемыми энергии атома. При разрыве потенциальной связи внешнего электрона с

ядром кинетическая энергия ядра в указанных столкновениях будет максимальной. Аналогичные рассуждения можно провести и для сталкивающихся атомов.

Следовательно, можно утверждать, что экстремальные кинетические энергии электронов и ядра и потенциальные энергии их взаимодействия, которые не приводят к разрушению атома при его столкновениях, например, с электроном или другими атомами, определяются и равенством

$$W_a = W_{e\text{ kin}} + W_{n\text{ kin}} + |W_{\text{pot}}|, \quad (2)$$

где $W_{e\text{ kin}}$ – суммарная кинетическая энергия электронов; $W_{n\text{ kin}}$ – кинетическая энергия ядра, которая не равна нулю для возмущенных состояний атома; W_{pot} – суммарная потенциальная энергия взаимодействия между всеми частицами, входящими в атом, друг с другом [5]. Очевидно, что при указанных столкновениях нейтральность атома нарушается.

Молекула как нейтральная единая система электронов и ядер может создаваться из нейтральных атомов и разделяется на них. Так, например, при разрушении металла испарением от него отделяются в основном нейтральные атомы (пары большинства металлов частично состоят из ионов, количество которых может составить до 0,1% нейтральных испаренных атомов [7]). Тогда как дальнейшая конденсация паров этих атомов может вызывать образование кристалла (зерна), капли жидкости (при остывании превращающейся в кристалл) и одновременное образование зерен в жидком и твердом агрегатном состоянии, имеющих металлическую структуру. В силу этого нельзя полагать возможность разрушения атомов при их соединении. Принимая во внимание обоснованность (2), можем на основании закона сохранения энергии утверждать, что составляющие энергию атома претерпевают лишь изменения при образовании молекулы (для упрощения приводимых представлений не рассматривается часть энергии, определяющая кинетическую энергию движения атомов и молекулы соответственно до и после объединения атомов). Из этого следует, что ее внутренняя энергия W_m равняется сумме внутренних энергий N атомов, входящих в нее, т.е.

$$W_m = \sum_{i=1}^N W_a^i, \quad (3)$$

где W_a^i – энергия образования i -го атома молекулы, определяемая равенством (1) или (2).

Изменение составляющих энергию атомов при их соединении в молекулу и дальнейшее их нахождение в таком возмущенном состоянии должно обуславливать наличие ограниченного числа атомов в наименьшей молекуле, поскольку она должна быть нейтральной. При этом количество атомов N , входящих в такую молекулу, должно определяться из условия ее нейтральности, т.е. условия равенства нулю суммарной напряженности электрического поля, создаваемого всеми заряженными частицами образованной системы, на ее границе. При меньшем или большем числе атомов, чем N равенство нулю суммарной напряженности электрического поля на границе системы частиц должно не выполняться.

Для молекулы, например, образованной из одинаковых атомов, такие условия можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N [(\vec{E}_e)_i + (\vec{E}_n)_i] &= 0; \\ \sum_{i=1}^{N-1} [(\vec{E}_e)_i + (\vec{E}_n)_i] &\neq 0; \\ \sum_{i=1}^{N+1} [(\vec{E}_e)_i + (\vec{E}_n)_i] &\neq 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $(\vec{E}_e)_i$ и $(\vec{E}_n)_i$ – напряженности электрического поля, создаваемые соответственно электронами и ядром i -го атома, в рассматриваемой точке границы молекулы в выбранный произвольно момент времени. Причем аналогичные соотношения должны быть справедливы и для всех иных точек границы в этот момент времени.

В случае образования молекулы из атомов m различных химических элементов вхождение в нее того или иного их количества $N_1, N_2, N_3, \dots, N_m$ каждого из элементов определяется из

$$\sum_{i=1}^{N_1} [(\bar{E}_e)_i + (\bar{E}_n)_i] + \sum_{j=1}^{N_2} [(\bar{E}_e)_j + (\bar{E}_n)_j] + \sum_{k=1}^{N_3} [(\bar{E}_e)_k + (\bar{E}_n)_k] + \dots + \sum_{f=1}^{N_m} [(\bar{E}_e)_f + (\bar{E}_n)_f] = 0 \quad (5)$$

и 2m неравенств, например, таких как

$$\sum_{i=1}^{N_1-1} [(\bar{E}_e)_i + (\bar{E}_n)_i] + \sum_{j=1}^{N_2} [(\bar{E}_e)_j + (\bar{E}_n)_j] + \sum_{k=1}^{N_3} [(\bar{E}_e)_k + (\bar{E}_n)_k] + \dots + \sum_{f=1}^{N_m} [(\bar{E}_e)_f + (\bar{E}_n)_f] \neq 0, \\ \sum_{i=1}^{N_1} [(\bar{E}_e)_i + (\bar{E}_n)_i] + \sum_{j=1}^{N_2} [(\bar{E}_e)_j + (\bar{E}_n)_j] + \sum_{k=1}^{N_3} [(\bar{E}_e)_k + (\bar{E}_n)_k] + \dots + \sum_{f=1}^{N_m+1} [(\bar{E}_e)_f + (\bar{E}_n)_f] \neq 0. \quad (6)$$

В соответствии с предложенной моделью молекулы взаимодействия, возникающие в ней с момента образования между электронами ее любого атома и соседними ядрами атомов, являются периодическими. Электроны и ядра будут совершать колебательные движения. Такие ускоренные движения электронов и ядер молекулы, по всей видимости, приводят к возникновению у вещества электромагнитного излучения также как в вибраторе Герца. Тогда как установление неких средних обменных энергий между атомами молекулы, которые могут изменяться при контакте, например, с другими молекулами, свидетельствует о возможности их характеристики теплотой. В качестве косвенного доказательства последнего утверждения можно рассматривать существование технологий соединения материалов, включающих как тепловое, так и ультразвуковое воздействие. Именно возможность существования средних обменных энергий между атомами молекулы обеспечивает возможность увеличения их кинетической энергии в этих технологиях и достижение определенного энергетического порога, как за счет теплопередачи, так и за счет воздействия внешней силой с ультразвуковой частотой, совпадающей с собственной частотой колебаний атомов в молекуле и приводящей к явлению резонанса.

Используя соотношения (2) и (3), можем записать, что экстремальные значения кинетических энергий частиц молекулы и потенциальных энергий их взаимодействия, которые не приводят к разрушению молекулы при ее взаимодействиях с элементарными частицами, другими атомами или электромагнитным полем, определяются и равенством

$$W_m = (|W_{pot}|)_N + \sum_{i=1}^N [(W'_{e kin})_i + (W_{n kin})_i], \quad (7)$$

где $(W_{n kin})_i$ – кинетическая энергия ядра i-го атома молекулы; $(W'_{e kin})_i$ – суммарная кинетическая энергия электронов i-го атома в молекуле; $(|W_{pot}|)_N$ – суммарная потенциальная энергия взаимодействия между всеми электронами и ядрами, входящими в молекулу для N ее атомов, друг с другом.

Принимая во внимание приведенные доводы и соотношение (7), можем записать условие, определяющее средние экстремальные кинетические и потенциальные энергии атомов, в виде

$$W_m = W_{kin} + |W'_{pot}|, \quad (8)$$

где W'_{pot} и W_{kin} обозначены суммарные соответственно средние потенциальные энергии взаимодействия между всеми парами атомов и средние кинетические энергии атомов для одного и того же состояния молекулы. Такие фактически общепринятые представления в полной мере отвечают новой модели молекулы [5] и позволяют, например, объяснить при соединении различных материалов изменение свойств, касающихся как макроскопических, так и микроскопических явлений, которые происходят в новых материалах, образованных из соединенных материалов.

Составляющие энергии, входящие в (8), определяют свойства молекулы вещества и при их изменении в сторону увеличения или уменьшения позволяют судить об относительном изменении размеров запрещенной зоны между атомами (рис. 1), под которой понимается общее пространство для атомов молекулы, куда невозможно попадание электронов [5]. Знание относительных изменений указанных составляющих энергии или размеров такой зоны позволяет давать качественные объяснения происходящих явлений при деформировании металлов в различных условиях.

При деформации зерна или молекулы, о которой можно говорить, рассматривая локальную область деформируемого макроскопического тела, растяжением или за счет повышения кинетической энергии, размеры запрещенной зоны будут уменьшаться. Такие воздействия фактически

стремятся удлинить форму пространства, занимаемого атомами молекулы, и, следовательно, могут нарушать нейтральность самой молекулы, обуславливая возникновение электрического поля, создаваемого внешними электронами атомов. Кроме того, они уменьшают абсолютные значения W_{pot}^* и приводят к возрастанию вероятности как роста размеров молекулы за счет увеличения числа ее атомов для восстановления утерянной нейтральности, так и разрушения молекулы на отдельные атомы. При всестороннем сжатии молекулы значения W_{kin}^* будут уменьшаться, указанная зона будет увеличиваться. Это также может приводить к нарушению условия нейтральности молекулы, возникновению на ее границах электрического поля, создаваемого положительно заряженными ядрами атомов, и вероятному делению молекулы на более мелкие части или если это невозможно отделению атомов.

Таким образом, различные воздействия на молекулу будут вызывать различные ответные реакции, приводящие к изменению размеров запрещенной зоны и сил, обеспечивающих свойство ее нейтральности. Из этого вытекает необходимость создания условий, позволяющих достигать превышения определенного энергетического порога для материалов кристаллических тел при образовании их соединения с тем, чтобы сначала нарушить нейтральность приграничных молекул, а затем ее ликвидировать за счет соединения. А кроме того вытекает и то, что изменение энергии молекулы может обуславливать изменение условий нейтральности, заданных формулами (4)–(6), и вызывать изменение ее количественного состава атомов и последующие наблюдаемые, например, сублимацию твердых тел, на которые после завершения изготовления и изменения их энергетического состояния как, казалось бы, ни что не оказывает воздействия, или дробление зерна на более мелкие фракции у заготовки, подвергаемой холодному деформированию. Однако указанные локальные изменения условий нейтральности молекул никак не отражаются на изменении общего электрически нейтрального состояния макроскопического тела, например, подвергаемого холодной обработке давлением. Это можно объяснить возникновением сил, стремящихся ликвидировать возникшее электрическое поле не только за счет изменения количественного состава молекул, но и за счет возникновения деформаций, противоположных создаваемым деформациям, в частности, деформации сжатия всегда сопровождаются деформациями растяжения, которые могут сохраняться и после окончания деформирования, обуславливая наличие остаточных напряжений в поковке.

В рассматриваемом процессе прессования имеют место два типа механических воздействий одного материала на другой материал, приводящих к изменению энергетических состояний их молекул и сил, обеспечивающих свойство их нейтральности. Такими механическими воздействиями соединяемых материалов друг на друга являются деформации их сжатия и сдвига. Сжатие материалов приводит к одноименным деформациям его молекул. Тогда как сдвиговые деформации материалов вызывают растяжение молекул.

Одновременное действие на соединяемые молекулы усилий сжатия и растяжения обеспечивает условия, которые были бы характерны для соединенных, но не нагруженных внешним воздействием металлов при температурах рекристаллизации. Это следует из того, что при таких температурах в металлах нарушаются условия нейтральности зерен и происходит изменение их границ, т.е. изменение состояния взаимодействия между зернами и, конечно, между атомами этих зерен или молекул. Эти взаимодействия также как и в процессе прессования приводят к изменению энергетических состояний молекул и сил, обеспечивающих свойство их нейтральности. Учитывая это, можем утверждать, что создание тождественных тепловых условий при указанном одновременном воздействии внешних нагрузок на материалы в процессе прессования приведет к соединению молекул (подтверждающие это результаты приведены в [2]).

Следовательно, соединение материалов в рассматриваемом процессе прессования можно объяснить тем, что механическое воздействие приводит молекулы различных материалов в контакт, при котором колебания граничных атомов молекул вызывают непосредственные действия их друг на друга. При таких действиях атомов с уменьшенными значениями потенциальных энергий, которые получены за счет предварительного нагрева взаимодействующих материалов до температур рекристаллизации, обеспечивается возможность увеличения их потенциальных энергий за счет соединения и создания на бывшей границе схожих энергетических условий с условиями для части молекулы, присоединенной ко всему веществу. Действительно, учитывая изложенные представления о деформировании молекулы, можем утверждать, что ядра и электроны в пространствах, занимаемых приграничными атомами, контактирующими друг с другом под действием усилий деформирования, будут приходить во взаимодействие с тем, чтобы ликвидировать нарушения нейтральности, возникающие в них. Эти изменения условий нейтральности рассматриваемых контактирующих молекул и их энергетических состояний приводят к из-

менению взаимодействия всех образующих молекулы частиц. Последующий после такого объединения молекул обмен энергиями между всеми их атомами после снятия механических нагрузок исключает энергетические особенности на границе соединяемых материалов (о таком обмене энергиями свидетельствует повышение температуры отформованного тела) и не приводит к разрушению установившихся связей. При нагреве соединяемых материалов до температур, меньших температур рекристаллизации, в процессе прессования у приграничных атомов потенциальная энергия взаимодействия уменьшится недостаточно, что исключит возможность их соединения [2].

Таким образом, приведенные представления о механизме соединения материалов позволяют не только с достаточной степенью достоверности объяснять процесс прессования, но и определять с минимальными затратами его наиболее оптимальные температуры прессования, выбираемые из интервалов температур рекристаллизации соединяемых материалов, и схемы формирования материалов покрытия и основы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харченко В.В., Мрочек Ж.А. Получение пленочных покрытий прессованием // *Машиностроение*. – Мн. 2007. – Вып. 22. С. 34–37.
2. Харченко В.В., Тюрин Л.Н., Макушок Е.М. и др. Некоторые закономерности процесса нанесения радиальным обжатием покрытия на прессуемый профиль // *Весті АН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. Навук*. 1994. №2. С. 43–47.
3. Семенов А.П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах. – М.: Наука, 1972. –160 с.
4. Макушок Е.М., Харченко В.В. Некоторые особенности металлической структуры и механизмы ее разрушения и соединения при тепловом и механическом воздействии // *ИФЖ*. 2002. Т.75. №1. С. 148–155.
5. Макушок Е.М., Харченко В.В. О моделях молекулы, их значении в развитии представлений об электропроводности и создании технологий снижения сопротивления материалов // *Теория и практика машиностроения*. 2003. №2. С. 17–20.
6. Мотт Н., Месси Г. Теория атомных столкновений. – М.: Мир, 1969. –756 с.
7. Точицкий Э.И. Кристаллизация и термообработка тонких пленок. – Мн.: Наука и техника, 1976. –314 с.

УДК 621.79

Беляева Г.И., Беляев Г.Я., Крушевский А.Е., Присевков А. Ф.

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ О СВОДООБРАЗОВАНИИ В ПИТАТЕЛЕ ПЛАЗМОТРОНА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

При газопламенном и плазменном напылении порошковых материалов, особенно с малыми значениями удельного веса (порошки на основе пластических материалов и др.), часто наблюдаются случаи прекращения подачи порошка из питателя. Это объясняется тем, что в питателе образуется, несмотря на наличие избыточного давления, купол из порошка, который и держит на себе всю массу порошковой смеси. В связи с этим представляется важным найти математические зависимости, связывающие размерные характеристики формы питателя, физико-механические свойства порошков и параметры процесса напыления.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СВОДООБРАЗОВАНИИ

Поставленная задача может быть решена как плоская, решение которой было нами приведено ранее [1], так и в пространственном отображении как осесимметричная задача.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА

Напишем дифференциальные уравнения равновесия сыпучей среды в сферических координатах:

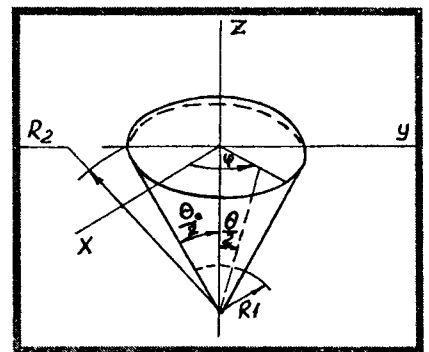


Рисунок 1 -- К решению задачи о сводообразовании