

## МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ АТОМОВ МЕТАЛЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ОСНОВЫ-ИЗДЕЛИЯ

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

До настоящего времени представления о кинетике фазовых переходов первого рода, впрочем, как и иные, касающиеся физических свойств вещества, не опираются на представления об образовании и соединении молекул за счет взаимодействия валентных электронов атомов. То, что модель молекулы оказывается не востребованной при создании кинетического представления, свидетельствует либо о несовместимости используемых представлений, либо об их несоответствии моделируемым процессам, в которых участвует вещество.

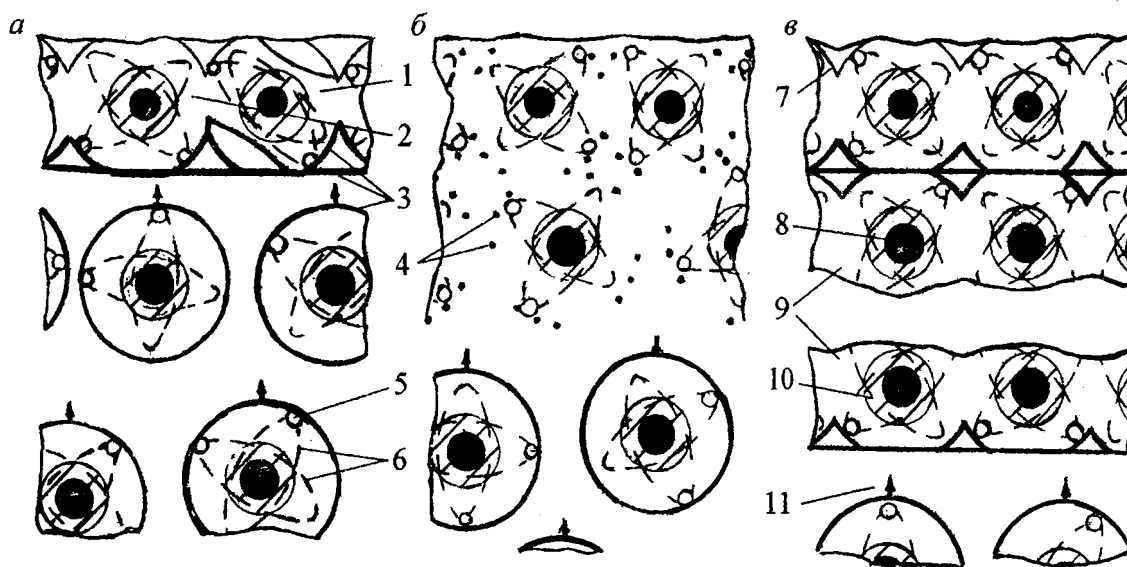


Рис. 1. Фрагменты этапов формирования структуры покрытия:

- 1, 2 – атом основы соответственно с особенностью и без нее в расположении внешних электронов;
- 3 – внешняя граница зерна и граница невозбужденного атома;
- 4 – условная граница атома при нарушении нейтральности зерна и в процессе формирования последнего;
- 5 – электрон; 6 – вероятные траектории движения внешних электронов;
- 7 – внутренняя граница зерна; 8 – ядро; 9 – зерно покрытия, граничащее с зерном основы;
- 10 – область, в которой располагаются внутренние электроны атома;
- 11 – стрелка, указывает направление движения атома

Эти обстоятельства привели к разработке иных представлений о молекуле [1], на основе которых дается кинетика конденсации. Новая кинетика исключает применение противоречивых представлений, например, такого как зародыш, имеющий критический размер, а, следовательно, и образованный ограниченным числом атомов, является макроскопическим телом [2] и такого как макроскопическое тело, т.е. тело, состоящее из колоссального количества отдельных частиц – атомов и молекул [3]. Кроме того, она устраняет необходимость использования дополнительных положений, в частности, таких как фонон – квант поля колебаний кристаллической решетки, метастабильное состояние и др., вводимых в статистической физике для созда-

ния расчетных методов вычисления термодинамических величин, характеризующих макроскопические тела.

При рассмотрении процессов конденсации остановимся на процессах конденсации для паров атомов металла на основе, которая в некоторых случаях должна подогреться [4]. Также обоснуем необходимость использования основы и ее подогрева и обсудим вопросы, связанные с получением максимальной адгезии между материалами покрытия и основы. Выбор конденсируемых материалов не обусловлен какой-либо их исключительностью, и полученные ниже результаты могут быть использованы для объяснения такого процесса для иных материалов.

Модель образования молекулярной структуры в процессе конденсации можно представить в виде нескольких этапов. В начальный момент конденсации (рис. 1, а), так же как и в последующие моменты времени осуществления процесса, часть испаренных атомов металла движется направленно к поверхности основы. Их кинетическая энергия  $E_{kin}$  определяется из равенства

$$E_{kin} = E_{evap} - E_{pot} - \delta E_1, \quad (1)$$

где  $E_{evap}$  – энергия атомов при испарении;  $E_{pot}$  – изменение потенциальной энергии атомов, связанное с изменением высоты основы относительно месторасположения поверхности металла, с которой испаряются атомы;  $\delta E_1$  – энергия, отдаваемая атомами при взаимодействиях с молекулами окружающей среды [5]. При столкновениях с атомами основы испаренные атомы часть своей кинетической энергии будут затрачивать на деформацию взаимодействующих атомов [6], обуславливающую формоизменение и локальное нарушение нейтральности зерен основы, расположенных на границе (рис. 1, б). Другая часть энергии  $E_{kin}$  будет расходоваться на деформацию падающего атома, а также противодействие деформированию со стороны соседних атомов покрытия, расположенных в плоскости, параллельной плоскости основы для локальной области взаимодействия рассматриваемого атома с атомом основы, и их деформирование или, что можно определить короче, на сдвиговые совместные деформации с окружающими атомами. Отметим, что такие представления отличаются от представлений о взаимодействии атомов, не учитывающих заряды взаимодействующих частиц [7]. При этом составляющие внутреннюю энергию испаренных атомов изменятся от значений, определяемых равенством

$$W_a = W_{ekin} + |W_{pot}|, \quad (2)$$

до значений, определяемых равенством

$$W_a = W_{ekin} + W_{nkin} + |W_{pot}|, \quad (3)$$

где  $W_{ekin}$  – суммарная кинетическая энергия электронов;  $W_{nkin}$  – кинетическая энергия ядра для возмущенных состояний атома;  $W_{pot}$  – суммарная потенциальная энергия взаимодействия между всеми частицами, входящими в атом, друг с другом [6].

Следующие испаренные атомы, например, могут взаимодействовать с уже осажденными атомами, препятствуя их стремлению вернуться к исходному недеформированному состоянию. При этом в случае нанесения покрытия из материала основы вполне вероятна ситуация, когда составляющие энергии атомов покрытия будут почти совпадать с составляющими энергии атомов материала основы. В том случае, если такое взаимодействие между осаждаемыми и осажденными атомами будет продолжаться, то наступит момент создания условия нейтральности на поверхности ограниченного объема из осажденных атомов, а соответственно восстано-

вится граница между основой и покрытием и образуется новая граница зерна из атомов, заключенных в этом объеме (рис. 1, в).

Таким образом, в молекулярной структуре под зерном следует понимать совокупность атомов в возбужденном состоянии, образующих систему различно заряженных периодически взаимодействующих частиц атомов, на границе и вне которой суммарная напряженность электрического поля этих частиц равна нулю только для определенного числа атомов в пределах некоторого интервала изменения частот, составляющих их внутренние энергии. Такое определение зерна в полной мере соответствует понятию о молекуле как нейтральной системе, состоящей из положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов – частиц атомов, связанных центральными и нецентральными силами электромагнитного взаимодействия [1].

Зерно или молекула может соединиться с другими зернами благодаря взаимодействию атомов, расположенных на их внешних границах, и не терять в определенных пределах своей индивидуальности. При соединении с другими зернами, по всей видимости, только в зоне приграничных атомов происходит нарушение условий нейтральности соединяемых границ зерен, которое ликвидируется после соединения, приводит к искажению в местах соединения ранее существовавших в каждом зерне своих периодически изменяющихся электрических полей, обуславливавших нейтральность их границ, и образованию общей нейтральной границы. При этом, нет оснований полагать, учитывая возможность проникновения, например, масла при сильном его сжатии через стенки стального цилиндра, т.е. через металлическую структуру, что в пространствах между ее внутренними границами, как и границами соединившихся зерен (рис. 1), присутствуют электрические поля, а, следовательно, полагать и непрерывность материи в таком кристаллическом пространстве. Каждое зерно характеризуется своим периодически изменяющимся электрическим полем, существующим благодаря наличию преимущественного большинства симметрично расположенных ядер и их внешних электронов, которые также, в основном, одинаковым образом пространственно ориентированы друг относительно друга. При деформации зерна или молекулы, о которой можно говорить, рассматривая локальную область деформируемого, например, в процессе прессования тела, фактически одинаковым образом изменяются пространственные расположения и ориентация электронов и ядер друг относительно друга в кристаллической структуре зерна, и в соответствии с ними изменяется его электрическое поле. Тогда как из-за наличия границ у зерен при деформации тела в том же процессе такие измененные их электрические поля и внешнее механическое силовое воздействие будут обуславливать возрастание и убывание кулоновских сил между электронами и ядрами взаимодействующих приграничных атомов или размеров их запрещенной зоны. Здесь для упрощения изложения события, связанные с изменением полей, условно разнесены по времени. Такое изменение кулоновских сил будет создавать условия, приводящие к разрушению существовавших связей между зернами вдоль их границ, изменению положений зерен друг относительно друга и возможному образованию новых связей с другими зернами. Это подтверждается фиксируемыми при пластических деформациях разрывами связей, прежде всего, между атомами вдоль границы зерен и наблюдениями такой границы при известной подготовке поверхности кристаллических веществ. При увеличении составляющих энергии, связанных с движением частиц атома, вплоть до разрушения кристаллической структуры и перехода зерна в жидкое агрегатное состояние нейтральность будет нарушаться. Все большее число частиц будет входить в укрупняющиеся зерна с тем, чтобы ликвидировать нарушение нейтральности, пока не наступит момент, когда нейтральной границей не станет граница всего расплава слившихся в одно целое зерен.

Кристаллическая структура, образованная из металлических атомов, не обладает какими-либо особыми характеристиками, которые могли бы выделять ее среди иных кристаллических структур. Однако из этого вовсе не следует, что структуры, образованные из атомов различных химических элементов, будут иметь одинаковые физические свойства, в том числе и касающиеся количественно состава атомов в молекуле (зерне). Такое представление отличается от иного, как уже отмечалось, данного на основе строения структуры из атомов, благодаря взаимодействию их валентных электронов, и предполагающего, в частности, для металлической структуры наличие особых свойств электронов [5].

Отметим, что зерно может иметь особенность или особенности в структуре, которые связаны с расположением орбит внешних электронов, например, друг относительно друга в одном атоме или для соединенных друг с другом нескольких атомов, и приводят к особенностям формирования условной границы существования атома в зерне (рис. 1, а). В рассматриваемом случае отсутствием такой особенности можно полагать симметричное расположение орбит внешних электронов атома 2 в пространстве относительно окружающих атомов (рис. 1, а). Под границей свободного от взаимодействий атома следует понимать замкнутую пространственную оболочку, разделяющую внутреннее и внешнее для атома пространства. Внутреннее пространство атома содержит разноименно заряженные частицы и электрические поля, обуславливающие их взаимодействие и не распространяющиеся во внешнее его пространство. Учитывая то, что в зернах атомы находятся в возбужденном состоянии, не являются электрически нейтральными, а часть пространств, занимаемых атомами, являются общими, можно говорить лишь об их условных границах в зерне.

Шарообразное пространство невозбужденного атома, которое занимают взаимодействующие электроны, ядро и их электрические поля, при образовании молекулярной структуры принимает иную форму (рис. 1, 2). Общее пространство взаимодействующих атомов в такой структуре становится запрещенным для попадания в нее электронов (рис. 2, а). При попадании электронов в такое пространство атом может становиться нейтральным, и связь с иными атомами может разрываться. В молекулярной структуре в силу определенной ограниченности движения электронов в атоме, возникающей из-за наличия запрещенных зон, часть шарообразного пространства свободных атомов также становится ограниченно доступной – это закрытая область для попадания электронов (рис. 2, а). Отметим, что закрытая область, в отличие от запрещенной области, не входит в пространство, занимаемое атомом. За счет присоединения той или иной части этой области атом, находящийся в состоянии взаимодействия с другим атомом или атомами, может увеличивать свой объем. Как запрещенная, так и закрытая области могут изменять свои размеры при изменении составляющих внутреннюю энергию. Таким образом при увеличении температуры или нарушении нейтральности зерна электроны могут попадать в закрытую область, не вызывая разрушения связей с остальными атомами, и приводить к созданию или ликвидации особенностей в структуре зерна.

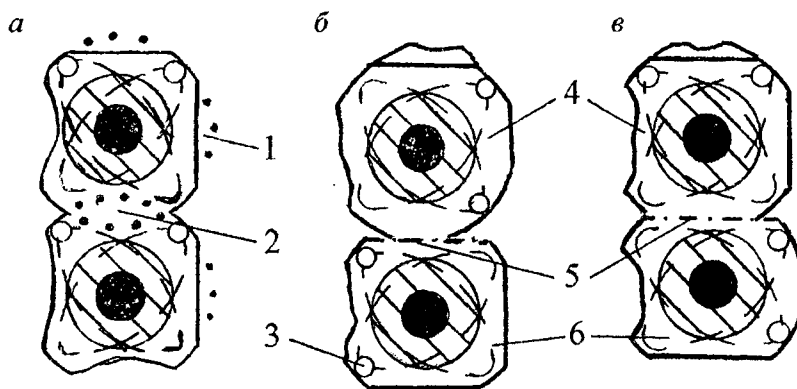


Рис. 2. Фрагменты двух атомов при их различных взаимодействиях:  
 1 и 2 – закрытая и запрещенная область для попадания электронов; 3 – внешний электрон;  
 4 – атом основы; 5 – условная граница между атомами основы и покрытия; 6 – атом покрытия

Составляющие внутренней энергии испаренных атомов при столкновениях с атомами основы всегда будут изменяться от значений, определяемых равенством (2), до значений, определяемых равенством (3). В тоже время атомам основы будут присущи изменения составляющих внутренней энергии только в пределах, определенных равенством (3) (вопросы, связанные с разрушением зерен основы при конденсации, не рассматриваются). Учитывая, что внутренние

энергии взаимодействующих атомов задаются схожими равенствами (3), в которые входят три слагаемых, характеризующих сложное движение всех связанных электрическими полями частиц атома, для удобства проведения анализа таких взаимодействий перейдем к значениям энергий, определяющимся только двумя составляющими. Для этого в качестве одной из таких составляющих  $W_{kin}$  выберем суммарное значение кинетических энергий ядра и электронов, а в качестве другой возьмем значение, характеризующее потенциальную энергию взаимодействия между электронами, электронами и ядром и входящее в равенство (3). Тогда равенство (3) запишется в виде

$$W = W_{kin} + |W_{pot}|. \quad (4)$$

При столкновении испаренных атомов с атомами основы будут наблюдаться две особенности, связанные вероятнее всего с одинаковым изменением составляющих  $W_{kin}$  и  $|W_{pot}|$  атомов основы. Первая из особенностей при таких столкновениях обусловлена убыванием закрытой области, возрастанием запрещенной области для попадания электронов между атомами основы и созданием недостаточной для обеспечения связи между атомами покрытия и основы запрещенной зоны (рис. 2, б). Возрастание запрещенной области будет обуславливать возрастание абсолютных значений потенциальных энергий взаимодействия между атомами основы и, согласно равенству (4), приводить к уменьшению кинетической энергии частиц атома. Это, в свою очередь, будет фактически исключать возможность соединения атома основы с осаждаемым атомом покрытия. Именно существование такой особенности взаимодействия атомов покрытия и основы вызывает необходимость подогревать основу. Подогревание основы в соответствии с (4) позволяет уменьшать абсолютные значения потенциальной энергии взаимодействия атомов основы друг с другом. Это обеспечивает возможность при столкновении атомов покрытия и основы увеличивать абсолютные значения потенциальной энергии взаимодействия последних и тем самым создавать условия для соединения атомов основы и покрытия. Вторая особенность, благоприятная для соединения атомов основы и покрытия, обусловлена возрастанием закрытой области и запрещенной области, возникающей при столкновении атома покрытия с атомом основы (рис. 2, в).

Можно однозначно утверждать, что основа в процессах конденсации паров атомов металла служит не только базой для образования новой структуры из конденсируемых атомов. Прежде всего, она необходима для управления взаимодействием конденсируемых атомов между собой, а в случае создания адгезии между атомами основы и покрытия – и для управления взаимодействием атомов покрытия и основы.

При столкновениях атомов покрытия, величина кинетической энергии которых в соответствии с равенством (1) не превышает  $E_{kin}$ , с атомами основы, в зависимости от величины составляющих их энергии, будет происходить то или иное их деформирование, обуславливающее возникновение условной границы между взаимодействующими атомами (рис. 2, б и в). Эта граница при соединении атома покрытия с атомом подложки может трансформироваться в запрещенную область. Такие модельные представления о процессе соединения атомов логичны за исключением представлений, касающихся введенных для наглядности условных границ атомов (рис. 2, б и в), поскольку в реальности электроны взаимодействующих атомов не могут попадать в пространства друг друга, а могут только иметь общие границы. Это обстоятельство, как и изложенные иные, позволяет говорить лишь об установлении при различных энергетических взаимодействиях атомов соответствующих различных размеров общих границ, которые и определяют адгезионные свойства покрытия.

Таким образом, внешние энергетические условия сказываются на количественном содержании атомов в зерне, поскольку энергия испаряющихся атомов фактически остается постоянной, а строительство зерна завершается при достижении состояния нейтральности. Тогда как при создании связи между зернами эти энергетические условия изменяют энергию зерен и,

следовательно, влияют на величину сил взаимодействия между атомами, расположенными у границ зерен.

Размеры запрещенной области в веществе задаются силами взаимодействия электрических полей движущихся по орбитам электронов одного контактирующего атома с ядром другого атома. При этом ускоренные движения электронов и ядер таких атомов осуществляются как с изменением направления движения, так и модуля скорости. Периодическое взаимодействие положительно и отрицательно заряженных частиц контактирующих атомов вызывает у них колебательные движения, частотой которых можно характеризовать размеры запрещенной для попадания электронов области. Такие ускоренные движения электронов и ядер, взаимодействующих атомов, обуславливают возникновение электромагнитного излучения, которое может быть измерено.

Поскольку в молекуле все атомы являются нейтральной единой системой, то их совместное существование возможно только при равенстве частот их колебаний, вызванных взаимодействием электронов одних контактирующих атомов с ядрами других атомов. Такие частоты колебаний могут поддерживаться и в случае асимметричного перераспределения некоторой части ее атомов и их частиц друг относительно друга и относительно другой части атомов, обуславливая тем самым создание напряженного состояния в молекуле. В противном случае должно происходить затухание колебаний, уменьшение запрещенной области и разрушение молекулы. Частоты таких колебаний назовем частотами взаимодействующих атомов или просто частотами атомов.

При конденсации, практически происходящей при энергиях атомов покрытия, приведших к разрушению молекул, в которых они до этого существовали, отличия в частотах колебаний взаимодействующих атомов для всего их конгломерата вплоть до образования зерна являются максимальными. И в случае, если эти отличия в частотах под внешним воздействием со стороны основы или благодаря иному воздействию не будут уменьшены до значений, обуславливающих автоматическое затухание колебаний до определенных значений частоты, которая характерна для атомов молекулы или зерна при максимальных кинетических энергиях в соответствии с равенством (4), конденсация не произойдет. Под автоматическим затуханием колебаний понимается такое воздействие колебательных движений ядра атома на электроны внешних орбит соседних атомов или наоборот, которые не приведут к попаданию электронов в запрещенные области, возникшие между атомами, а будут способствовать установлению одинаковых энергетических состояний для взаимодействующих атомов.

Таким образом, условием существования молекулы при тех или иных энергетических характеристиках ее атомов является не только нейтральность ее границ при определенном количестве конгломерате из них, но и возможность установления равенства между частотами их колебаний, т.е.

$$\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \dots = \nu_N, \quad (5)$$

где  $\nu_i$  – частота колебаний  $i$ -го атома молекулы;  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  $N$  – количество атомов в молекуле.

Ранее было предположено, что в случае реализации ситуации нанесения покрытия из материала основы, когда составляющие энергии атомов покрытия и основы будут почти совпадать, будет образовываться качественное соединение создаваемой и имеющейся структур. Действительно, в этом случае частоты колебаний атомов покрытия и основы будут практически совпадать, что будет приводить к незначительному напряженному состоянию на границе соединения, и такое соединение структур будет характеризоваться максимальной адгезией. Как правило, рассмотренная ситуация является исключительной ситуацией, а те, с которыми приходится сталкиваться, связаны с нанесением материалов, отличающимися качественно от материалов основы.

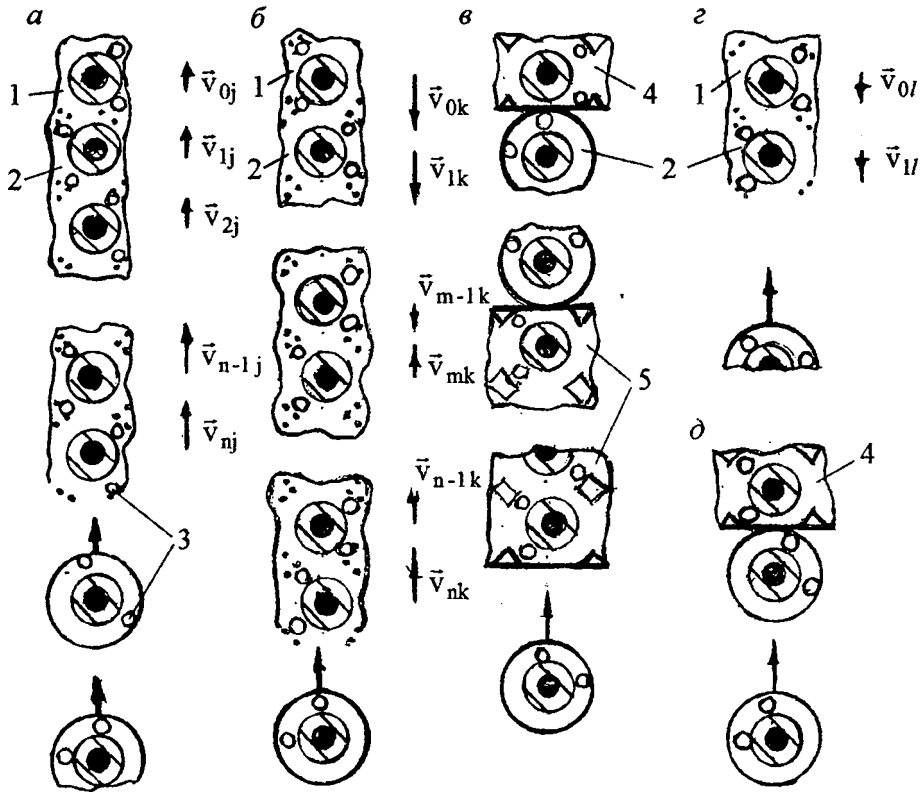


Рис. 3. Фрагменты этапов формирования структуры покрытия при различных частотах  $V^I$  (а, б, в) и  $V^II$  (г, д) осаждения атомов металла ( $V^I > V^II$ ):

1, 2 – соответственно атомы основы и покрытия; 3 – внешний электрон (вероятная траектория движения не показана); 4, 5 – соответственно зерно основы и покрытия;  $\vec{V}$  – скорость ядра атома; индекс 0 указывает на принадлежность ядра атому основы; индексы 1, 2, m-1, m, n-1, n указывают на принадлежность ядра атому покрытия и его порядковый номер; j, k, l – индексы, указывающие различные моменты времени

Таким образом, подогревая или охлаждая основу, можем изменять частоту колебаний атомов ее вещества, и если она будет близка к частоте осажденных атомов, то возникнет адгезия. Величина адгезии будет зависеть и от того, насколько отличаются друг от друга частоты характеризующие соединенные материалы, например, при той или иной температуре. Это может приводить к уничтожению адгезии между материалами основы и покрытия, т.е. отслаиванию материала покрытия от основы, после изменения температуры, при которой соединение было образовано. При необходимости получения именно заданной пары материалов в случае невозможности создания адгезии между ними следует на границе их раздела вводить атомы химических элементов, которые при образовании связи характеризовались бы промежуточными значениями частот колебаний атомов между аналогичными частотами для материалов основы и покрытия для всей области применения созданного материала. Следует отметить и то, что контакт разнородных материалов, характеризующихся различной частотой колебаний атомов может приводить и к нарушению условия нейтральности на их границе.

Здесь целесообразно вернуться к объяснению возможности наблюдения границы между зернами, например, в металлической структуре. Поскольку частоты колебаний атомов внутри зерен и на их границах отличаются, поэтому возникают условия, обеспечивающие различные электромагнитные взаимодействия освещающего поверхность металла света и электромагнитных излучений самого металла и определяющие создание видимости границ.

Величина адгезии между материалами покрытия и основы в процессе конденсации паров атомов металла определяется не только качеством взаимодействующих атомов, но и частотой осаждения атомов. Под этой величиной частоты понимается величина, которая является

обратной промежутку времени, протекающему между двумя любыми ближайшими актами осаждения атомов перпендикулярно плоскости основы на круговую площадку, в поперечнике имеющую площадь, большую площади окружности с диаметром, большим радиуса атома, но не превосходящим его диаметра. Интервал частот осаждения атомов можно разделить на три части, характеризующие адгезионные особенности при выбранном режиме конденсации.

Средняя часть такого интервала частот осаждения атомов, приводящая к получению покрытия на основе, рассмотрена. Для нее характерно то, что частота осаждения атомов изменяется в пределах изменения частот атомов основы при температурах, в пределах которых изменяется температура основы при конденсации, и частоты, при которой начинается сублимация атомов покрытия. При такой частоте попадания атомов покрытия на материал основы возникает такое взаимодействие между атомами материала основы и покрытия и между атомами последнего, которое позволяет не только деформировать им друг друга, но и уменьшать скорости направленных движений их ядер. Это в свою очередь будет уменьшать частоты колебаний этих ядер до значений, обуславливающих автоматическое затухание колебаний до определенных значений частоты.

Две другие крайние части интервала частот осаждения атомов не приводят к получению покрытия на основе. Рассмотрим случай, когда частота осаждения атомов покрытия будет больше максимальной частоты из средней части интервала частот. При реализации такой ситуации на определенном временном этапе конденсации направления движения групп атомов, а точнее их ядер, будут совпадать (рис. 3, а). В силу чего возможность их соединения с атомами основы или образования зерна будет исключена. При появлении групп атомов покрытия, имеющих направления движения ядер противоположные движению ядер первичной группы атомов, контактирующей с атомами основы (рис. 3, б), появляется возможность образования зерна из атомов материала покрытия. При этом между образовавшимся зерном и зерном основы адгезия будет отсутствовать, а, кроме того, между зернами возможно образование прослойки из несвязанных между собой атомов материала покрытия (рис. 3, в). Такие же образования будут возникать и при продолжении процесса с той же частотой осаждения атомов.

Теперь рассмотрим случай, когда частота осаждения атомов покрытия будет меньше минимальной частоты из средней части интервала частот осаждения атомов. При такой частоте осаждения атомов взаимодействие между атомами покрытия и основы будет происходить, и прекращаться раньше, чем следующий атом материала покрытия соприкоснется с предыдущим осажденным атомом (рис. 3, г, д). Атом покрытия при соприкосновении с атомом основы вызовет нарушение нейтральности границы зерна основы и атома покрытия. Однако, поскольку при этом составляющая энергии  $W_{kin}$  для атома покрытия в равенстве (4) будет достаточной для того, чтобы вернуть электрон или электроны внешней орбиты в образовавшееся пространство запрещенной области, поэтому нейтральность границ атома и зерна будут восстановлены.

Отметим, что в случае конденсации паров, состоящих из молекул, последние при контакте должны обеспечивать механические воздействия друг на друга, приводящие к взаимодействию электронов атомов одного вещества с ядрами атомов другого вещества и наоборот и установлению в дальнейшем промежуточных частот колебаний их атомов в соединяемых молекулах. Это может достигаться как за счет теплоотдачи, так и за счет внешнего воздействия.

Предложенная модель механизма конденсации позволяет объяснить не только процесс конденсации, но и иные процессы соединения материалов, а при использовании зависимости частоты излучения вещества от его температуры и управлять технологией получения необходимой адгезии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979. 528 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч. 1. М.: Наука, 1976. 584 с.
4. Точицкий Э.И. Кристаллизация и термообработка тонких пленок. Мн.: Наука и техника, 1976. 314 с.
5. Макушок Е.М., Харченко В.В. Некоторые особен-



ности металлической структуры и механизмы ее разрушения и соединения при тепловом и механическом воздействии // ИФЖ. 2002. Т.75. №1. С. 148–155. 6. Мрочек Ж.А., Харченко В.В. Особенности технологического процесса формообразования покрытий прессованием // Машиностроение. – Мн. 2009. – Вып. 24. С. 23–28. 7. Мотт Н., Месси Г. Теория атомных столкновений. М.: Мир, 1969. 756 с.

УДК 621.9.91 (035)

Присевок А.Ф., Клавсуть П.Н.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУЖКИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

С интенсивным развитием производственных технологий за последние годы, высокоскоростная механическая обработка (ВСО) нашла широкое применение в различных отраслях промышленности. ВСО обеспечивает высокую эффективность и низкую стоимость наряду с повышением качества обработки, позволяет обрабатывать труднообрабатываемые материалы с высокой твердостью (закаленная легированная сталь). Технология ВСО нашла широкое применение в аэрокосмической промышленности, машиностроении и инструментально-штамповом производстве.

Одним из отличий высокоскоростной обработки от обычной механической является образование заостренной “пилообразной” стружки [1], существенно влияющей на такие параметры процесса, как сила резания [2], температура в зоне резания [3], износ режущего инструмента [4] и качество обработанной поверхности [5]. Для возможности оптимизации ВСО необходимо установить закономерности влияния процесса стружкообразования на параметры обработки.

Одним из способов исследования процесса стружкообразования является теоретическое моделирование методом конечных элементов [6, 7]. ВСО относится к нелинейным многокритериальным процессам, существующие математические модели не учитывают в полной мере состояние материала в условиях интенсивного деформирования. Например, результаты конечно-элементного моделирования, выполненного с использованием программного обеспечения Deform-2D, не всегда согласуются с экспериментальными данными из-за невозможности обработки нелинейных задач. В данном исследовании для моделирования процесса стружкообразования при ВСО используется модель материала и критерии разрушения, основанные на уравнении Джонсона-Кука. Математическое моделирование методом конечных элементов осуществлено на базе программного обеспечения ABAQUS, позволяющего обрабатывать нелинейные многокритериальные задачи.

### Моделирование процесса стружкообразования

#### 1. Модель состояния материала

Для моделирования процесса стружкообразования и возникающих сил резания используется математическая модель состояния материала Джонсона-Кука. Эта модель учитывает влияние напряжения, деформации, скорости деформации и температуры [8, 9], что соответствует задачам, в которых скорость деформации изменяется в широком диапазоне (от  $10^2 \text{ с}^{-1}$  до  $10^6 \text{ с}^{-1}$ ), а изменение температуры приводит к изменению условий пластической деформации. Эта модель описывается следующим уравнением кривой течения (уравнение состояния):

$$\bar{\sigma} = \left[ A + B(\bar{\epsilon})^n \right] \cdot \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right], \quad (1)$$