

ЛИТЕРАТУРА

1. Таратута Л.И., Сверчков Л.А., Прогрессивные методы ремонта машин. Минск. «Ураджай». 1975, 344с.
2. Бабук В.В., Бернштейн М.Л., Яковлев Г.М. Влияние термомеханической обработки стали на сопротивление изнашиванию - «Вестник машиностроения», 1966, №7, с.67-69.
3. Лойко Ю.М., Таратута А.И. и др. Предварительная термомеханическая обработка наплавленного металла. В сб.: Улучшение эксплуатационных качеств тракторов и сельхозмашино – Горки, 1976, вып. 21, с. 68-73.
4. Шаврин О.И. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. – М.: Машиностроение. 1983.-76с.
5. Беляев Г.Я., Сакович Н.А. Триботехнические свойства металлопокрытий, упрочненных поверхностной термомеханической обработкой // Машиностроение. – Мн., 2000. – Вып.16 – с.149-153.

УДК 621.373.826

Спирidonов Н.В., Соколов И.О., Пилецкая Л.И.

ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД УПРОЧНЕНИЯ НАПЫЛЕННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ NI-CR-B-SI ПОКРЫТИЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Большие возможности для повышения эксплуатационных свойств напыленных покрытий открывает последующая обработка высококонцентрированными потоками энергии, в частности лазерная обработка. Рассмотрены различные периоды взаимодействия элементов покрытий и основы. Исследовались самофлюсующиеся сплавы марок ПР-Н73Х16СЗРЗ, ПР-Н70Х17С4Р4, ПР-Н67Х18С5Р5. Для получения упрочняющих слоев высокого качества, обладающих прочной связью с основой, процесс лазерной обработки напыленных никельхромборкремниевых покрытий необходимо вести на режимах, обеспечивающих время контактирования расплава с основой 0,6-0,8 с.

Последующая термообработка (оплавление) напыленных покрытий из композиционных материалов на основе Ni-Cr-B-Si позволяет значительно снизить пористость покрытий и повысить прочность их сцепления с основным металлом. Большие возможности для повышения эксплуатационных свойств открывает последующая обработка покрытий высококонцентрированными потоками энергии, в частности, лазерная обработка.

Повышение физико-механических свойств покрытия после оплавления связано с особенностями процесса оплавления, а именно, наличием жидкой самофлюсующейся фазы. Жидкая фаза создает условия для протекания процессов поверхностной и объемной диффузии, рекристаллизации, десорбции газов, т.е. процессов, обуславливающих стремление порошковой системы к более термодинамическому устойчивому состоянию. В результате во время оплавления происходит усадка покрытия за счет резкого сокращения количества и размера пор и образование прочной металлической связи покрытия с основным металлом.

Для получения качественных напыленных покрытий с высокой адгезией к основному металлу, минимальным содержанием элементов базового материала, мелкодисперсных, с высокими наследственными свойствами исходного материала, необходимо обеспечить минимальную длительность контактирования твердой (основного металла) и жидкой (покрытия) фаз, создавая условия для протекания процесса формирования покрытия с максимально возможными скоростями нагрева и охлаждения. При этом уровень остаточных напряжений в покрытии повышается, что увеличивает возможность трещинообразования и отслаивания покрытия.

С целью получения более качественных покрытий исследован метод обработки потоками энергии высокой концентрации – лазерный.

Локальный нагрев покрытий приводит к изменениям физико-химических процессов в системе «покрытие-основа» в отличие от объемного и поверхностного способов нагрева покрытий. Поглощенная и преобразованная в тепловую, энергия распространяется в глубь покрытия за счет теплопроводности. Воздействие ВКПЭ на пористые покрытия существенно отличается от его воздействия на сплошные материалы. Это связано с тем, что пористость изменяет теплофизические,

оптические и некоторые физико-механические свойства материалов. В отличие от монолитного, пористый материал является термодинамически неравновесной системой с более высоким уровнем свободной поверхностной энергии и энергии искажений кристаллической решетки, что оказывает значительное влияние на геометрию зон воздействия ВКПЭ, развитие объемного порообразования и др.

В начальный период воздействия ВКПЭ из-за большого градиента температур, а следовательно, нестабильного термодинамического состояния системы в зонах действия потока энергии и сопряженных с ними зонах, резко повышается скорость протекания топохимических реакций и одновременно происходит увеличение числа дефектов кристаллической решетки.

Межмолекулярное или химическое взаимодействие элементов покрытия и основы происходит на участках с высокой активностью, т.е. в активных центрах, которые возникают в местах дефектов кристаллической решетки – вакансий, дислокаций, примесных атомов и т.п. В поверхностных слоях скорость перемещения и плотность дислокаций в условиях нестационарных тепловых полей резко повышаются, проявляется аномальная плотность атомов на высокоактивных участках. Это облегчает диффузионные процессы в приповерхностных слоях и способствует установлению химических связей покрытия с основой.

В начальной стадии нагрева происходит смыкание пор, раковин по мере увеличения плотности материала покрытия, т.е. он уплотняется и становится монолитным.

С распространением фронта плавления в глубь покрытия свободная поверхность пор уменьшается, высвобождение поверхностной энергии вызывает повышение температуры объема расплава.

На второй стадии при температуре, близкой к температуре плавления материала покрытия, из-за большого градиента температур в зонах нагрева и прилегающих зонах происходит аномальный массоперенос, обусловленный объемной диффузией и термоконвективным перемешиванием ванны расплава (с появлением жидкой фазы).

Для исследований были выбраны самофлюсующиеся хромборникелькремниевые сплавы ПР-Н73Х16СЗРЗ и ПР-Н70Х17С4Р4, ПР-Н67Х18С5Р4.

Прочность таких материалов в большей мере зависит от дисперсности, морфологии и распределения в никелевой матрице частиц упрочняющих фаз. Чем меньше их размер и выше объемная доля, тем больше прочность сплава. Кроме того, мелкодисперсные частицы упрочняющих фаз влияют на дислокационный механизм образования дефектов тонкой структуры, понижая степень активирования трущихся поверхностей и повышая стойкость против схватывания.

С другой стороны, на прочность таких материалов влияет состояние их металлической матрицы – твердого раствора на основе никеля, степень пересыщения и тип которого определяют уровень физико-механических свойств. При образовании твердых растворов внедрения происходит обогащение структурных неоднородностей в объеме сплава атомами растворенного компонента, ведущее к снижению избыточной энергии дефектов, то есть сегрегации без выделения. Атомы внедрения прочно связываются с дислокациями, образуя атмосферы Коттрелла [1]. Даже небольшое количество второго компонента значительно затрудняет движение дислокации. Поэтому повышение степени пересыщения твердого раствора может многократно увеличить прочность сплава.

Оплавление напыленных покрытий в условиях умеренных скоростей нагрева и охлаждения, а также невысоких температур нагрева в интервале температур "солидус-ликвидус" приводит к формированию многофазной структуры. При этом температурно-временные параметры процесса существенно влияют на характер структуры. Оплавление может идти на "мягких" режимах при расплавлении только самых легкоплавких составляющих. В результате уменьшаются пересыщенность твердого раствора и искаженность его кристаллического строения, в то же время морфология и дисперсность частиц упрочняющих фаз практически не изменяются. Такие условия могут быть созданы при газопламенном оплавлении, однако отсутствие средств контроля и автоматизации процесса не позволяет строго выдерживать требуемый режим. Процессы припекания, осуществляемые при минимальном содержании жидкой фазы, проводят в интервале температур 1023...1123 К. Недостатком такой обработки является сохранение структурной неоднородности покрытий, характерной для насыщенных слоев. Оптимальным температурным режимом при объемном нагреве, обеспечивающим получение однородной мелкодисперсной структуры, но снижающим пересыщенность никелевой матрицы, является нагрев до 1293...1333 К. При более высоких температурах (перегреве) происходят интенсивный рост фазовых составляющих и огрубление структуры. По глубине слоя наблюдаются различные структурные зоны, снижается микротвердость. При оплавлении ТВЧ размер выделений упрочняющих фаз, в частности карбидов,

может достичь нескольких сотен микрон. Оплавление дугowym источником повышает температуру расплава до 2073...2273 К. В результате имеет место частичное растворение, измельчение карбидной фазы по сравнению с обработкой ТВЧ и укрупнение фазовых составляющих относительно напыленных материалов. Как недогрев, так и перегрев отрицательно сказываются на эксплуатационных свойствах покрытий. В частности, в первом случае износостойкость понижается вследствие неполного спекания частиц порошка друг с другом и с основой, во втором – вследствие укрупнения карбоборидной фазы за счет вторичной рекристаллизации.

В реальных условиях превращения в сплавах протекают в интервале температур, который расширяется при повышении скорости нагрева и охлаждения. По данным [2], повышение скорости нагрева хромоникелевых сплавов до 20 град/с смещает верхнюю границу формирования высококачественной мелкодисперсной структуры до 1373... 1413 К. При высоких скоростях нагрева и охлаждения изменяется не только температура превращений, но и условия их протекания, так как не успевают произойти диффузионные процессы по типу равновесных, повышается перегрев или переохлаждение системы. Известно, что склонность систем к переохлаждению больше, чем к перегреву, и поэтому увеличение скорости охлаждения оказывает значительное влияние на структуру и фазовый состав сплавов. При сверхбыстрых скоростях охлаждения фиксируется пересыщенное состояние твердого раствора, присущее расплаву, тормозятся диффузионные процессы, увеличивается число центров кристаллизации, подавляется рост крупных кристаллов упрочняющих фаз, то есть структурное состояние оплавленного слоя приближается к ультрадисперсному, сопоставимому с микроструктурой порошков в состоянии поставки. Сплавы с такой структурой имеют повышенные физико-механические свойства.

Лазерная обработка, обеспечивающая высокие скорости нагрева и охлаждения поверхности металлов (до $10^5 \dots 10^6$ град/с), расширяет температурную область формирования мелкодисперсной структуры, способствует получению более высоких эксплуатационных свойств упрочненных слоев, чем при использовании традиционной технологии. Таким образом, с точки зрения структурообразования лазерное оплавление положительно влияет на эксплуатационные свойства покрытий при достаточно широком диапазоне режимов обработки. Однако уровень эксплуатационных свойств покрытий также определяется прочностью сцепления с основой, которая зависит от типа связей, образующихся в переходной зоне.

На формирование переходной зоны влияют процессы взаимодействия соединяемых слоев, которые могут протекать в жидком состоянии, то есть когда покрытие и основа полностью или частично расплавляются, либо в твердо-жидком состоянии, когда один из металлов находится в твердом состоянии, а другой – в расплавленном. Неуправляемое развитие процессов в контактной зоне, подплавление основного металла, его растворение в жидком металле сварочной ванны, которое наблюдается, например, при некоторых видах наплавки, приводит к насыщению покрытия материалом основы. Наличие значительного количества материала детали в покрытии может существенно ухудшить его свойства. Для получения прочного соединения покрытия с основой при минимальном содержании элементов основного металла в покрытии процесс оплавления необходимо осуществлять так, чтобы основной металл оставался в твердом состоянии, а прочная металлическая связь обеспечивалась без образования общей сварочной ванны. Для возникновения прочных связей между атомами соединяемых материалов должны произойти следующие процессы: образование физического контакта, активация контактных поверхностей и объемное взаимодействие. Образование физического контакта – сближение соединяемых веществ на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия – происходит с высокой интенсивностью при расплавлении одного из материалов. Активация взаимодействующих поверхностей выражается в образовании на них атомов с насыщенными связями и способствует релаксации пика межфазной энергии на границе раздела фаз.

При разработке технологии оплавления покрытий необходимо оценить условия протекания и длительность процессов при контактировании фаз с целью выбора температурно-временных режимов обработки, обеспечивающих образование качественного соединения материалов.

Самофлюсующиеся сплавы, как уже отмечалось, обладают более низкой температурой плавления чем широко применяемые материалы основы – конструкционные стали. Эта особенность позволяет расплавлять материал покрытия на твердой основе с последующим образованием физического контакта соединяемых материалов. Активация основы при оплавлении самофлюсующихся сплавов происходит за счет химического и термического факторов. Химическое взаимодействие является неотъемлемой частью процесса, определяется химическим составом сплавов и реализуется в процессе раскисления основы флюсующими компонентами. Термический канал

активации реализуется путем подогрева основы. Экспериментально было установлено, что для всех сочетаний веществ и материалов существует температура подогрева основы, обеспечивающая резкое повышение прочности сцепления. Согласно данным работы [3], контактная температура, обеспечивающая надежные континуальные связи самофлюсующихся сплавов со стальной основой, рассчитанная с использованием формул Н.Н. Рыкалина и В.В. Кудинова, составляет 1223 К. Определяющую роль в формировании соединения исследуемых покрытий с основой играют процессы образования твердых растворов и взаимной диффузии никеля и железа. Процессы электронного взаимодействия сводятся к коллективизации (обобщению) валентных электронов положительными ионами, образованию "металлической" связи, особенностью которой является отсутствие предела насыщения. В работе [3] установлено, что металл основы – железо начинает активно растворяться в жидких самофлюсующихся сплавах при температуре выше 1373 К.

В реальных условиях, как показали исследования многих авторов, при взаимодействии твердой и жидкой металлических фаз первые стадии процесса и следующая за ними диффузия протекают, как правило, настолько быстро, что разделить их практически невозможно. Составы фаз, находящихся в контакте, устанавливаются в соответствии с требованиями равенства их химических потенциалов, и даже незначительное время их существования будет способствовать протеканию диффузии в направлении установления фазового равновесия. Процесс оплавления неизбежно будет сопровождаться той или иной степенью развития процессов массопереноса. Интенсивность их протекания определяется температурой, длительностью контактирования, градиентом концентраций и другими факторами.

Исследования процессов оплавления самофлюсующихся сплавов традиционными методами показали, что происходит диффузионное перемещение железа из основного металла в покрытие и углерода из покрытия в основной металл. Ширина диффузионной зоны растет с увеличением времени выдержки при температуре термической обработки по параболическому закону, при этом граница снижения твердости смещается к поверхности покрытия. При перегреве расплава покрытия выше температуры плавления основы растворение стали определяется не атомным механизмом диффузии, а динамикой конвективных потоков жидкости, температурой перегрева и временем контактирования фаз. При оплавлении желательнее не перегревать расплав и сокращать время контактирования твердой и жидкой фаз путем уменьшения температуры нагрева поверхности основного металла и увеличения скорости охлаждения. Для получения соединения самофлюсующихся сплавов с основой, обеспечивающей высокую прочность сцепления и качество покрытий, время контакта фаз на основе теоретических расчетов должно составлять 0,6...0,8 с. Увеличение времени контакта свыше 0,8...1,2 с не приводит к росту прочности сцепления.

Таким образом, для получения упрочняющих слоев высокого качества, обладающих прочной связью с основой, процесс лазерной обработки напыленных никельхромборкремниевых покрытий необходимо вести на режимах, обеспечивающих время контактирования расплава с основой 0,6...0,8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.М.Лахтин, В.П.Леонтьева. *Материаловедение*. М. – Изд-во «Машиностроение», 1990 – С.527.
2. В.А.Витязь и др. *Теория и практика нанесения защитных покрытий*. – Мн., «Беларуская навука», 1998. – С.582.
3. Спиридонов Н.В. *Формирование износостойких поверхностных слоев концентрированными потоками энергии* /Н.В.Спиридонов. – Минск: БНТУ, 2012. – 183 с. – Монография.

УДК 621.914+621.787

Турейко Д.Н., Баршай И.Л.

УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЕМ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В статье изложены результаты изучения влияния иглофрезерования на упрочнение стальных заготовок, в частности, на поверхностное пластическое деформирование. Использование