

ЛИТЕРАТУРА

1. **Присевко, А. Ф.** Биохимический путь выделения водорода при получении продуктов микробиологического производства / А. Ф. Присевко, В. В. Кураш, Н. В. Спиридонов // Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1990. – Вып. 4. – С. 269–274.

2. **Присевко, А. Ф.** Исследование механизма водородного изнашивания деталей узлов трения технологического оборудования производства микробиологического синтеза / А. Ф. Присевко, В. В. Кураш, П. В. Спиридонов // Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1990. – Вып. 5. – С. 216–224.

3. **Присевко, А. Ф.** Технология формирования газотермических водородостойких покрытий / А. Ф. Присевко. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ БГПА, 2003. – 214 с.

4. **Шаповалов, В. И.** Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сталей и сплавов / В. И. Шаповалов. – М.: Metallurgia, 1988. – 230 с.

5. **Mechanism of Metal and Alloy Wearing in Hydrogen-Containing Media** / A. F. Prisevok [et al.] // Int. J. Hydrogen Energy. Printed in Great Britain, 1996. – Vol. 21, № 11/12. – P. 1005–1008.

6. **Водород** в металлах: прикладные аспекты: в 2 т. / под ред. Г. Алефельда, И. Фелькля; пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – Т. 2. – 430 с.

Поступила 02.02.2007

УДК 621.793.7

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ НАПЫЛЕННЫХ Ni–Cr–B–Si-ПОКРЫТИЙ

Докт. техн. наук, проф. СПИРИДОНОВ Н. В., асп. СОКОРОВ И. О., инж. КУДИНА А. В.

Белорусский национальный технический университет

Влияние процесса лазерной обработки на микроструктуру и распределение элементов между различными структурными составляющими, а также на формирование переходной зоны на границе контакта напыленного Ni–Cr–B–Si покрытия из порошковых материалов и основы исследовали методом микрорентгеноспектрального анализа. Для исследования были выбраны образцы из сплавов ПГ-СР4, ПГ-СР3 и ПГ-СР2. Объектом качественного анализа с фоторегистацией распределения элементов в характеристических лучах для каждого образца стали три характерных участка: приповерхностный слой, средняя зона и переходная зона «покрытие – основа».

Фоторегистрация распределения тока поглощенных электронов при сканировании электронным зондом по исследуемым участкам позволяет получить качественную картину распределения основных компонентов покрытия. Фазы с небольшой средней атомной массой

имеют светлую окраску, а фазы, обогащенные тяжелыми элементами, – более темную (рис. 1). На сканограммах хорошо различаются два основных компонента покрытий – светлые включения упрочняющих фаз по темному полю матрицы сплава – γ -твердого раствора на основе никеля.

На сканограммах в характеристическом рентгеновском K_{α} излучении Ni, Cr, Fe, Si, B, C светлые участки соответствуют повышенной концентрации исследуемого элемента. Распределение максимальной интенсивности хрома и бора по форме и расположению совпадает с изображением упрочняющих фаз, состав которых, таким образом, соответствует боридам хрома [1].

Для всех исследуемых покрытий характерно низкое содержание хрома и бора в твердом растворе и максимальное – в отдельных дисперсных выделениях упрочняющих фаз. Морфологические особенности боридов хрома по глу-

бине оплавленной зоны определяются температурно-концентрационными условиями их формирования. При скорости обработки 1 мм/с и плотности мощности измерения $q = 10\text{--}30 \text{ кВт/см}^2$ в поверхностных слоях, имеющих при оплавлении более высокую температуру нагрева и сравнительно низкую скорость охлаждения, рост кристаллов упрочняющих фаз начинается с появления отростков на вершинах зародышевой призмы. Некоторые ответвления, срастаясь между собой, замыкают в центре участки твердого раствора.

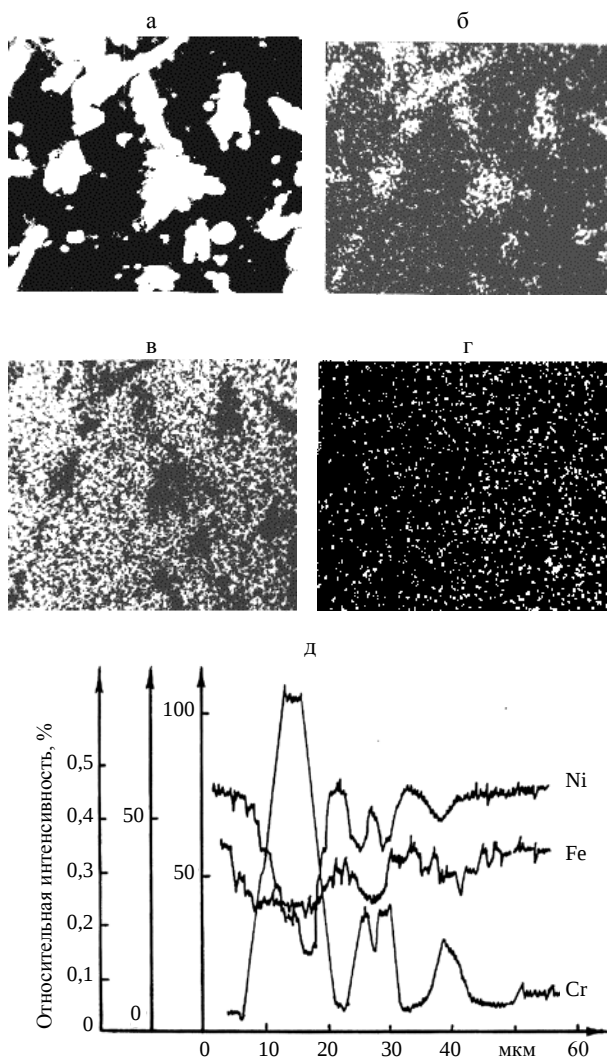


Рис. 1. а – сканограмма приповерхностного участка покрытия после лазерного оплавления в поглощенных электронах; б – то же в характеристических лучах Cr; в – то же Ni; г – то же Fe ($\times 1400$); д – концентрационные кривые распределения элементов на том же участке

В реальных условиях не всегда происходит полное воспроизведение формы зародышевой

призмы. Отдельные кристаллы имеют шаровидную или вытянутую ланцетовидную форму. В нижних слоях покрытий, где время существования жидкой фазы чрезвычайно мало, наблюдается тенденция к подавлению роста крупных кристаллов. Выделения упрочняющих фаз фиксируются в виде субмелкодисперсных зародышевых образований, равномерно распределенных в никелевой матрице сплава.

Оплавление покрытий на расчетных режимах позволяет добиться получения субмелкодисперсной структуры по всему объему покрытия.

Анализ сканограммы и кривых распределения относительной интенсивности характеристического излучения элементов показал, что после лазерного оплавления в покрытиях отсутствуют частицы карбидной фазы, углерод концентрируется в никелевой матрице. Характер перераспределения элементов определяется в основном высокой температурой нагрева, вызывающей развитие интенсивных конвективных потоков и повышение диффузионной подвижности элементов, а также особенностями их физико-химического взаимодействия. В результате частичного или полного растворения кристаллов упрочняющих фаз происходят гомогенизация расплава, уменьшение размеров микрогруппировок элементов – потенциальных центров кристаллизации. Высокое сродство никеля к углероду способствует повышенной растворимости последнего в сплаве. Быстрое охлаждение такого расплава сопровождается преимущественным выделением высокодисперсных, равномерно распределенных частиц боридов хрома и одновременным подавлением карбидной фазы. При лазерном оплавлении легирующие элементы пересыщают никелевую матрицу сплава и способствуют ее упрочнению.

Особое внимание было уделено исследованию диффузионного соединения в зоне контакта покрытия с основой. Как уже отмечалось, основными факторами, определяющими степень развития процессов массопереноса из покрытия в основу, являются температура и длительность контакта жидкой и твердой фаз.

Путем сканирования электронного пучка по глубине оплавленных слоев установлено, что при обработке на полученных в результате численного эксперимента режимах и более высо-

ком энерговкладе в приграничной зоне формируется область химической неоднородности различной ширины. Ее образование способствует более плавному переходу от покрытия к основе, играет роль промежуточной «сглаживающей» прослойки, снижающей остаточные макро- и микронапряжения и способствующей подавлению трещинообразования.

В этой области концентрация компонентов значительно изменяется, причем содержание железа на границе «сплав – основа» (поверхность диффузионной зоны) – максимальное. По мере удаления от основы количество диффундирующего элемента снижается и образуется твердый раствор железа в никеле переменной концентрации. В то же время концентрация основных компонентов материала покрытия – хрома, никеля и кремния – в этой области постепенно уменьшается по мере приближения к основе электронного зонда. Подобное перераспределение компонентов покрытия и материала основы в зоне их контакта – следствие развивающейся в условиях оплавления встречной диффузии.

Оплавление с энерговкладом ниже расчетного не сопровождается образованием переходной зоны и, следовательно, диффузионной связи с основой. Такие покрытия имеют низкую прочность сцепления порядка 2–3 МПа, равную адгезии напыленных слоев, и склонны к отслоению.

При образовании диффузионного соединения развитие процессов массопереноса из твердой фазы в жидкую можно подразделить на стадии, соответствующие трем основным типам микроstructures оплавленной зоны. Первый структурный тип (рис. 2а) формируется при близких к расчетным режимах оплавления, обеспечивающих заданные температуру и время контакта фаз. На границе фаз наблюдается линия сварки шириной 1–3 мкм, представляющая собой твердый раствор никеля в железе. Образование линии сварки гарантирует прочную диффузионную связь между покрытием и основой. Прилегающая к ней зона химической неоднородности не превышает 10–20 мкм. Содержание элементов в покрытии соответствует исходному составу порошка сплава в состоянии поставки. Испытания по стандартной методике [2] показали, что прочность сцепления таких покрытий соответствует 300–350 МПа и сопоставима с прочностью основного материала.

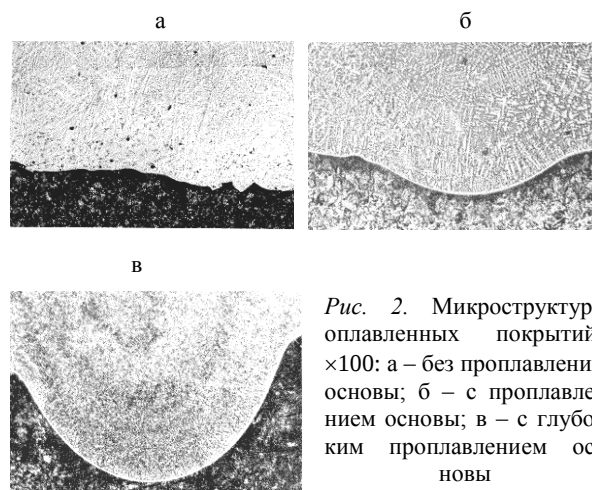


Рис. 2. Микроструктура оплавленных покрытий, $\times 100$: а – без проплавления основы; б – с проплавлением основы; в – с глубоким проплавлением основы

Для второго типа микроstructures оплавленной зоны (рис. 2б), формирующейся при повышенном энерговкладе, характерно наличие растворенного участка основы. В результате наряду с образованием линии сварки компоненты твердой фазы поступают в приграничный слой расплава. При растворении основы на глубину до 50 мкм состав поверхностных слоев покрытий толщиной 0,5–0,7 мм практически не изменяется. Обогащенные железом нижние слои покрытия, имеющие более высокую температуру плавления, начинают кристаллизоваться первыми, образуя дендритную структуру, что способствует удалению пор и шлаков из расплава.

Третий структурный тип (рис. 2в) оплавленной зоны формируется в режиме «кинжального» проплавления при плотности мощности излучения 90–100 кВт/см² и скорости оплавления 1 мм/с. В результате происходит интенсивное растворение материала основы, а глубина проплавления в основу может превышать толщину покрытия. При этом компоненты основы достигают поверхности расплава. Такое развитие процесса массопереноса железа в покрытие способствует более равномерному распределению остаточных напряжений, поскольку происходит уменьшение градиента свойств в области оплавления основного материала и материала покрытия. Кроме того, повышается пластичность покрытия, способствующая улучшению несущей способности при высоких контактных нагрузках.

ВЫВОД

Одним из важнейших преимуществ лазерного оплавления является возможность управ-

ления процессами, протекающими на границе «покрытие – основа» и, как следствие, уровнем механических свойств покрытий путем изменения режимов обработки, задающих температуру нагрева и время существования ванны расплава.

Результаты исследований позволяют применить лазерное оплавление покрытий, в первую очередь, на тех деталях – крупногабаритных, длинномерных, тонкостенных, где не может быть использовано объемное оплавление по причине возникающих больших остаточных напряжений и недопустимых изменений структуры основы. Разработана технология оплавления таких деталей, как рабочие колеса маги-

стральных нефтяных насосов, штоки плунжерных насосов и др. Данная технология внедрена на ряде предприятий нефтяной и нефтехимической промышленности со значительным экономическим эффектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Теория** и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
2. **Хасуй, А.** Техника напыления: пер. с яп. / А. Хасуй – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.

Поступила 6.06.2006

УДК 539.374

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ДЕФОРМАЦИЯМИ И НАПРЯЖЕНИЯМИ В НАПОЛНИТЕЛЯХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Докт. физ.-мат. наук, проф. ВАСИЛЕВИЧ Ю. В.,
канд. физ.-мат. наук, проф. САХОНЕНКО В. М., САХОНЕНКО С. В.*

Белорусский национальный технический университет

В современном производстве для композиционно-волокнутого материала (КМ) в основном применяют наполнители, получаемые на основе прядей (нитей, изготовленных из волокон), а также тканей. В первом случае КМ создается путем послойной укладки семейств однонаправленных нитей. В результате получается слоистая структура (она может представлять собой взаимно перпендикулярные семейства нитей), у которой отсутствует взаимное переплетение. Во втором случае рассматриваются ортотропные структуры из композиционных материалов, которые представляют собой многослойные среды на основе тканей, имеющих упорядоченное расположение волокон. Все слои КМ сориентированы в одном направлении, которые пропитаны полимерным связующим.

Технологический процесс изготовления изделий из композиционно-волокнутого материала состоит из трех стадий: формирования поверхностей заданной геометрии, т. е. получения полуфабрикатов в виде слоистой структуры семейств волокон (ткани), пропитанных связующим; отверждения связующего; механиче-

ской обработки поверхностей изделия до требуемой точности. Особый интерес представляет стадия получения полуфабриката, когда связующее композита не отверждено (такой материал называют препрегом). На этой стадии материал конструкции позволяет целенаправленно создавать напряженное состояние, дающее при эксплуатации положительный эффект, т. е. дает возможность снять или уменьшить остаточные напряжения, которые имели бы место в материале изделия в случае отсутствия принятых мер по их устранению.

Кроме зависимостей между перемещениями точек каждого семейства нитей препрега и напряжениями, в них существуют зависимости между перемещениями и напряжениями в точках разных семейств нитей. Эти связи существуют благодаря переплетению нитей ткани. Найдем их.

Пусть точка O в координатной системе $O^1X^1Y^1$ имеет координаты (x, y) и представляет собой точку пересечения двух взаимно перпендикулярных нитей из слоя ткани (рис. 1). Предположим, что одна из нитей принадлежит семейству «1», совпадает с осью OX и находится