УДК 621.791.92

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Ставертий Антон Яковлевич

Студент 5 курса (1), кафедра «Лазерные технологии в машиностроении", Московский государственный технический университет.

Научный руководитель: Р.С.Третьяков, ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении».

В современном машиностроении становится все более острой проблема повышения срока службы быстроизнашивающихся деталей машин. В процессе эксплуатации наиболее часто износу подвергаются лишь локальные участки рабочих поверхностей. Поэтому не менее остро стоит проблема восстановления изношенных поверхностей при сохранении всех остальных параметров и характеристик детали неизменными. Таким образом, изыскание и разработка высокопроизводительных методов и технологических процессов упрочнения и восстановления изношенных деталей, исследование их эксплуатационных характеристик является актуальной задачей.

время существует большое настоящее количество методов упрочнения и восстановления рабочих поверхностей деталей машин: термообработка токами высокой частоты [1]различные методы диффузионного насыщения [2], дуговая и плазменная наплавка [3], пайка [4] различные способы напыления: плазменное, газоплазменное, детонационное [5], способы вакуумно-плазменного напыления [6], диффузионная сварка, электроискровое легирование и др.

Одна из заметных тенденций в развитии технологий упрочнения и восстановления поверхностей — уменьшение тепловложения при формировании поверхностного слоя. Это направление выразилось, в частности, в создании технологий напыления. Универсальность технологий напыления, однако, ограничена невозможностью удовлетворить таким эксплуатационным критериям, как адгезионная прочность, когезионная прочность, отсутствие пористости.

Традиционные способы наплавки со значительным перегревом металла и образованием металлургической связи с подложкой (при совместном плавлении и перемешивании) лишены недостатков процессов напыления, однако имеют ряд собственных недостатков, связанных с большим проплавлением основы и разбавлением наплавляемого металла основным. Для сохранения упрочняющей фазы при наплавке необходимо, чтобы температура плавления или разложения упрочняющей фазы превосходила

температуру расплавленного валика. Наплавка без трещин часто возможна только в случае, если глубина проплавления основы будет минимальной.

К числу упрочняющих фаз, мало склонных к разложению при лазерной наплавке, относятся, прежде всего, карбид титана, затем - карбид вольфрама и некоторые другие. Как показывает практика, разложение упрочняющих фаз существенно уменьшается, если процесс вести по схеме газопорошковой лазерной наплавки, когда в зону наплавки совместно с упрочняющими частицами подается пластичный материал. В настоящее время остается неясным, как нужно вести процесс, чтобы уменьшить разложение упрочняющих фаз. Среди карбидов высокой жаростойкостью обладает карбид хрома $\mathrm{Cr_3C_2}$ ($\mathrm{T_{nn}} = 2168~\mathrm{K}$), однако он весьма склонен к разложению, и получить композит с высоким его содержанием довольно трудно. Карбид вольфрама обладает еще большей температурой плавления: $\mathrm{T_{nn}} = 3143~\mathrm{K}$ и используется в качестве упрочняющей фазы при ударно-абразивной нагрузке.

Известны работы, большей частью зарубежные, в которых технологию лазерного сплавления и впрыск (инжекцию) в оплавленную зону карбидных или других упрочняющих частиц без их расплавления использовали для повышения эксплуатационных свойств. Первая работа по лазерной инжекции была опубликована в 1980 году [7]. Особенно перспективным считается использование технологии инжекции для упрочнения алюминиевых сплавов. В этом случае в пластичную алюминиевую матрицу вводят твердые упрочняющие фазы, например, карбид титана. Такая структура, как показано в работах [8,9,10], обладает повышенной износостойкостью. Сообщается, что коэффициент трения для такой структуры уменьшается в 2 - 2,5 раза.

Исходя из литературных данных, наиболее простой способ получения композиционной структуры - использование мощных лазерных установок (≈5 кВт) и большого диаметра пятна. При малой плотности мощности существенно тепловложение возрастает общее теряются И преимущества лазерного луча, кроме того, при больших диаметрах пятна плотность мощности излучения от центра луча к периферии изменяется значительно, что должно влиять на количество нерастворенных карбидов в наплавленном металле. Детально разобраться с тем, как нужно наплавлять карбид, и выяснить общие закономерности формирования композиционной структуры при лазерной порошковой наплавке (для любых фаз) можно только путем глубокого изучения теплофизики процесса плавления кристаллизации металла И исследования полученных структур наплавленном металле.

Целью данной работы было получение наплавленного износостойкого композиционного покрытия с помощью излучения волоконного лазера. При подготовке эксперимента было необходимо провести анализ данных по выбору наплавочного материала и исследование распределения мощности лазерного излучения по сечению луча, получаемого на установке. Идея композиционного материала заключается в том, что в

наплавленном слое формируется структура, состоящая из фаз, существенно отличающихся по своим свойствам от материала подложки.

Из литературных источников известно, что одним из лучших показателей износостойкости в высокотемпературной области обладает карбид вольфрама. Это свойство обусловлено плотной и прочной окисной пленкой, появляющейся на его поверхности при высоких температурах. Однако этот карбид склонен к разложению и растворению в жидком металле при лазерной наплавке. Данное обстоятельство осложняет выбор параметров режима и требует поддержания их на заданном уровне.

Так как помимо повышения трибологических свойств требуется также матрицы сохранить жаропрочность детали, TO В качестве необходимо брать композиционного покрытия было материал, обеспечивающий жаропрочность и схожий с восстанавливаемой деталью по теплофизическим характеристикам, в особенности, по температурному коэффициенту линейного расширения. С учетом вышеуказанных требований, в качестве наплавочного порошка был принят состав, состоящий из Ni (40%), Cr (10%), WC (50%).

Описание эксперимента

Технологический комплекс для коаксиальной лазерной наплавки состоял из иттербиевого волоконного лазера ЛС-3.5, системы охлаждения Riedel PC-160, 2-х координатного стола на шаговых двигателях, системы перемещения технологической головки для наплавки (координата Z) и системы подачи наплавляемого порошка (рис.2.1). Также для защиты персонала от отраженного излучения и случайного вмешательства в работу лазерного комплекса предусмотрен защитный кожух.

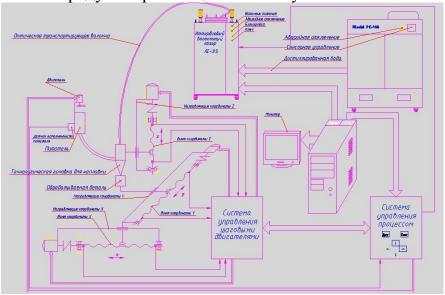


Рис. 1.1 Кинематическая схема комплекса с управлением

Непосредственно функция подачи порошка для коаксиальной наплавки реализуется за счёт питателя. Разработанный питатель реализует схему

порошкового материала 30HY обработки под действием подачи В гравитационных сил, что позволяет прежде всего обеспечить наибольшую стабильность подачи, особенно при малых расходах наплавочной смеси.

В качестве защитного газа в установке используется аргон, который так улучшению сыпучести способствует порошка. Аргон поступал же непосредственно в бункер с порошком, из которого порошок выходил с

аргоновой смесью, навстречу этой смеси так же идет поток аргона под тем же давлением, что и в бункере, стабилизируя истечение порошка. Так же

аргон поступает непосредственно в сопло, где он выступает в качестве защитного газа, ограничивая ванну от воздействия кислорода.

Технологическая головка для наплавки, разработанная для проведения эксперимента по нанесению композиционного покрытия представляет из себя набор тубусов и имеет крепление для коллимирующей системы фирмы OptoScand и для сопла.

Фокус лазерного излучения располагался выше теоретического фокуса просыпаемого порошка таким образом, чтобы на поверхность падал расфокусированный лазерный луч.

Исследование распределения плотности мощности

В настоящее время, в связи с недостаточной изученностью оптических свойств световодов, при использовании в технологических волоконных лазерах возникает необходимость измерять распределение энергии в выходном пучке лазерного излучения. По тем или иным причинам распределение энергии ПО сечению пучка оказаться неудовлетворительным для проводимого технологического процесса.

Для обработки экспериментально-полученных значений необходимо радиально-симметричный пучок лазерного что описывается местоположением перетяжки пучка Z_0 , диаметром пучка в перетяжке $V\sigma_{\scriptscriptstyle 0}$, углом расходимости пучка « $V\sigma$ » в дальней зоне. Перетяжкой пучка измеряется его сечение с минимальными полезными размерами. Качество пучка в процессе его распространения будем характеризовать показателем (коэффициентом) «K» распространения пучка или обратной ему величиной $\underline{\underline{M}^2}$. Величины $K(M^2)$, $d\sigma_0$ и V_σ связывает выражение: $K = \frac{1}{M^2} = \frac{4\lambda_0}{\pi} \cdot \frac{1}{n \cdot d\sigma_0 \cdot V_\sigma} = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{d\sigma_0 \cdot V_\sigma},$

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{4\lambda_0}{\pi} \cdot \frac{1}{n \cdot d\sigma_0 \cdot V_\sigma} = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{d\sigma_0 \cdot V_\sigma},$$

где: λ_0 - длина волны в вакууме; λ - длина волны в среде с «n».

$$nd\sigma_0 V_{\sigma} = \frac{4\lambda_0}{K\pi} = \frac{M^2 \cdot 4\lambda_0}{\pi}$$

является инвариантом распространения пучка лазерного излучения в безаберрационной среде в отсутствии ограничивающих его диафрагм.

Для определения диаметра пучка $d\sigma(Z)$ было измерено распределение плотности мощности энергии в сечении пучка х'и у' с координатой Z и при

этом учтен азимутальный угол φ между осью «х» пучка и осью «х'» лабораторной системы координат. Измерению подлежал диаметр $d\sigma_{f}$ пучка в точке оси, расположенной на расстоянии f от задней главной плоскости фокусирующего элемента. Угол расходимости лазерного пучка формуле $V_{\sigma} = \frac{d\sigma_{\scriptscriptstyle F}}{f}$. Для определения К или ${
m M}^2$ рассчитывается по необходимо найти диаметр перетяжки $d\sigma_0$ и углы расходимости V_σ . Для определения координаты «Z» расположения перетяжки пучка учитывались параметры распространения излучения И использовались аппроксимирующие формулы.

Лазерный источник состоит и девяти объединенных модулей. Мощность одного модуля 400 Вт. В ходе эксперимента по измерению распределения плотности мощности использовались модули №1 и №9 на разных мощностях накачки. Изучение распределения энергии излучения по сечению пучка проводилось при помощи метода движущейся щели (Рис. 2.1). Распределение плотности мощности пересчитывалось через долю излучения, проходящего сквозь щель.

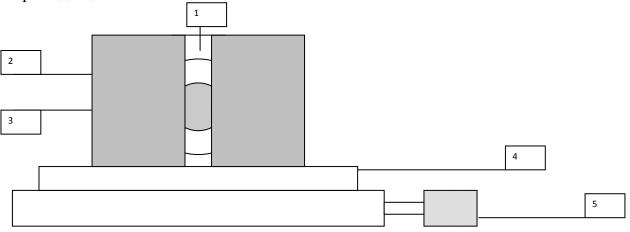


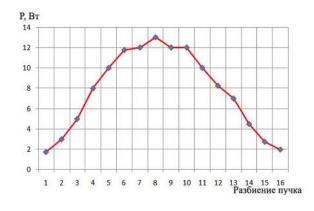
Рис. 2.1. Схема эксперимента. 1 - Движущаяся щель, 2 - Приемная площадка измерителя, 3 - Поперечное сечение пучка, 4 - Предметный столик, 5 — Микрометр.

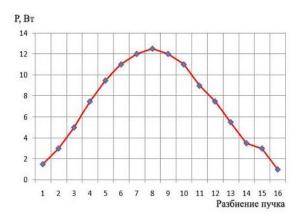
В качестве измерителя мощности излучения использовался измеритель на базе термоголовки Ophir 5000 W.

Распределение мощности излучения по сечению пучка

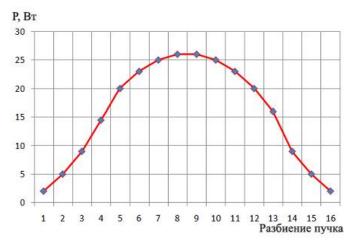
Измерения показали, что различные модули накачки выдают в общем случае различные распределения плотности мощности излучения, выходящего из транспортного волокна. Это распределение обычно близко по форме к гауссовому (одномодовому). Набор одномодовых излучений создает суммированное излучение, также близкое к одномодовому. Благодаря полученным данным, становится понятно, что из-за низкой концентрации энергии по краям лазерного пучка на края наносимого валика действует

источник энерговыделения с меньшей плотностью мощности, чем на центральную часть валика (см. рис. 2.2).



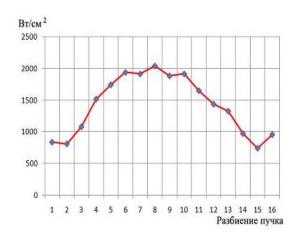


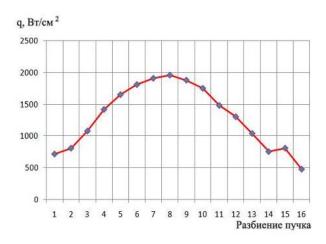
- а). Модуль №1, ток 30%
- б). Модуль №9, ток 30%



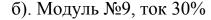
в). Модули №1 и №9, ток 30%

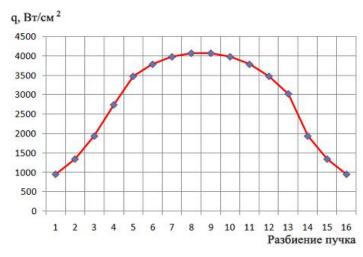
Рис. 2.2. Распределение мощности излучения волоконного лазера





а). Модуль №1, ток 30%





в). Модули №1 и №9, ток 30%

Рис. 2.3. Распределение плотности мощности излучения волоконного лазера.

Составление и проведение многофакторного эксперимента

При проведении эксперимента планировалось изменять диаметр пятна обработки, мощность лазерного излучения и скорость нанесения покрытия.

Для выбора размера лазерного пучка проведен эксперимент по нанесению валика на режиме: $P_{cp} = 3000~BT,~V = 2~m/мин,~ т.е.~ на максимальном тепловложении. Диаметр луча составлял 3, 4, 5, 6, 7 и 8 мм. Было отмечено, что оптимальное сочетание формирования валика и минимальная глубина проплавления были получены при размере пятна обработки около 6 мм. После определения оптимального диаметра пятна была поставлена серия экспериментов с варьированием мощности излучения и скорости нанесения покрытия. Режимы, на которых проводились испытания, приведены в таблице <math>3.1.$

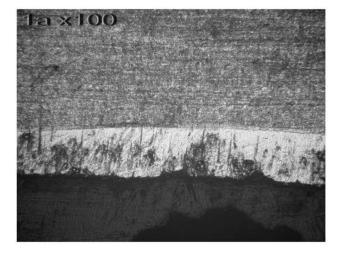
Табл.3.1 Режимы обработки

№ эксперимента	1a	16	1в	2a	26	2в	3a	36	3в	4a	46	4в
Мощность, Вт	1500	1500	1500	2000	2000	2000	2500	2500	2500	3000	3000	3000
Скорость, м/мин	2	3	4	2	4	3	2	3	4	2	3	4

Изучение формы валиков

Режимы первой группы. При сравнительно малой мощности излучения на всех трех скоростях были получены слишком тонкие валики, поэтому, несмотря на явное наличие карбидов, их исследование не проводилось (рис.3.1-3.3).

Рис. 3.1



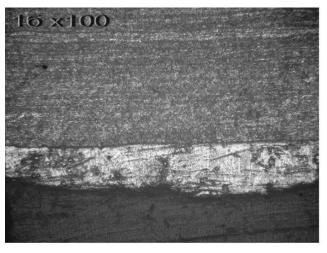
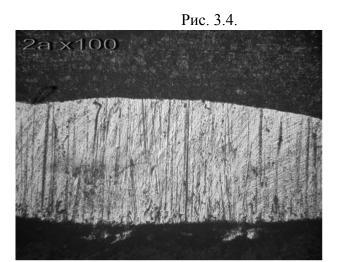


Рис. 3.3 1В ×100

Режимы второй группы. Повышение мощности излучения привело к увеличению высоты валика, особенно при небольших скоростях наплавки

(Рис.3.4-3.6). Так же заметно, что при малом объеме расплава в валике остались скопления нерастворенных карбидов вольфрама.



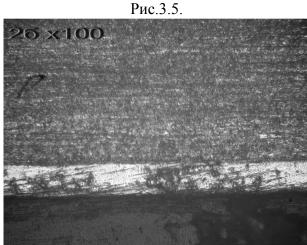
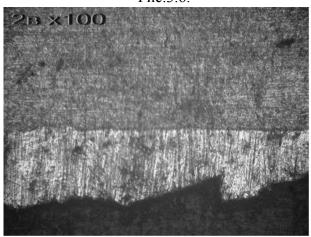
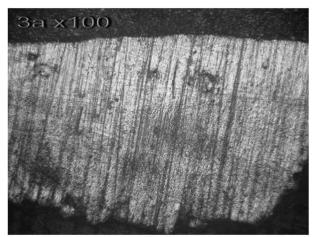


Рис.3.6.



Режимы третьей группы. Аналогично предыдущим группам заметно снижение высоты валика в зависимости от скорости наплавки, в общем случае высота валика определяется погонной энергией наплавки (рис.3.7-3.9). При визуальном осмотре приемлемым получился валик режима 3в, его будем исследовать ниже.

Рис. 3.7. Рис. 3.8.



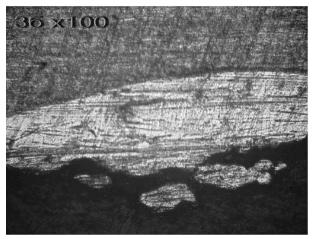
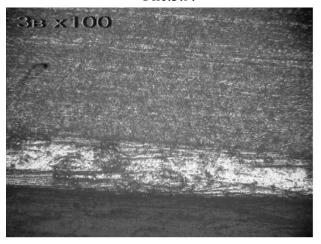


Рис.3.9.



Режимы четвертой группы. При максимальной мощности и минимальной скорости получился самый крупный валик (рис.3.10), его необходимо исследовать на наличие нерастворенных карбидов. Кроме того, при максимальной мощности даже в тонких валиках растворилось большинство карбидов, особенно в центре валика, и в наплавленном композите начали появляться поры (рис.3.11, 3.12).

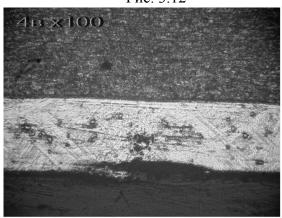
Рис. 3.10



Рис.3.11.



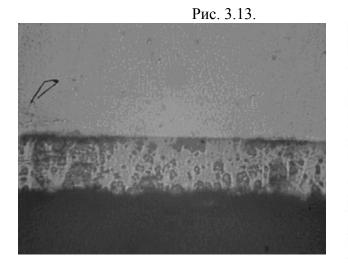
Рис. 3.12

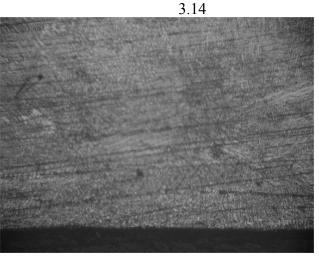


Изучение микроструктуры

Таким образом, из полученных в результате экспериментов шлифов были отобраны валики с наилучшим формообразованием и наименьшим подплавлением основного материала подложки (детали). При более крупном увеличении (х400) на микроскопе были выявлены образцы, где сохранилось наибольшее количество упрочняющей фазы (WC). Лучшим по предъявляемым требованиям оказался валик, полученный при режиме 3в. А самое большое растворение второй фазы и подплавление основного материала оказалось на образце с самым большим тепловложением, на режиме 4а.

Для того, чтобы убедится в полученном выводе, была проведена еще одна серия экспериментов на указанных выше режимах. На рис. 3.13 и 3.14 приведены фотографии шлифов на режимах 3в и 4а соответственно, при 100-кратном увеличении. Таким образом, поставленная задача о сохранении упрочняющей фазы была реализована. Следующим этапом исследования проводилась проверка твердости покрытия. Микротвердость наплавленных валиков была замерена с помощью микротвердомера ПМТ-3.





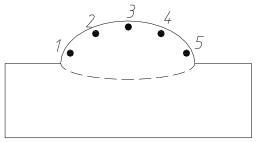


Рис. 3.15 Схема расположения точек измерения микротвердости на нанесенном валике

Измерения микротвердости для двух лучших режимов (приведены в табл.3.1,3.2) свидетельствуют о том, что в зонах с высоким содержанием нерастворенных карбидов микротвердость значительно превышает таковую в основном металле. Неравномерность микротвердости по поверхности валика объясняется тем, что при проведении измерений попадали «пирамидкой» как на сам карбид вольфрама (Рис. 3.17), имеющий микротвердость $HV0,05 \sim 2200$, так и на мягкую матрицу (Рис. 3.18), у которой микротвердость $HV0,05 \sim 200$, и на смежную область между WC и матрицей (Рис. 3.19), что дает плавно изменяющуюся твердость, в зависимости от количества растворенных упрочняющих частиц, от HV0,05 = 380 до 1500 (табл 3.1, 3.2).

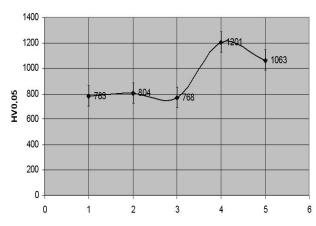


График 3.1 Значения	
микротвердости при режиме Зв	,

№ точки]	HV0,05	Средняя HV0,05	
1	713	840	795	783
2	677	795	940	804
3	752	713	840	768
4	795	2130	532	1201
5	840	1410	940	1063

Табл. 3.1 Значения микротвердости при режиме 3в

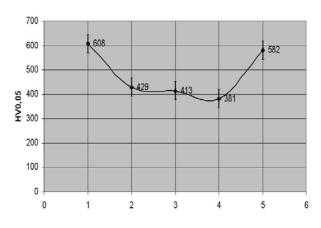


График 3.1 Значения микротвердости при режиме 4a

№ точки	F	IV0,0	Средняя HV0,05	
1	532	613	677	608
2	413	462	412	429
3	392	423	424	413
4	358	406	379	381
5	524	541	681	582

Табл. 3.1 Значения микротвердости при режиме 4a

Во время анализа полученных данных, замечено, что на режиме обработки с наибольшим тепловложением, т.е. 4а, по краям нанесенного валика карбиды не успевали раствориться, а по центру валика они полностью растворены (Рис. 3.16). Это видно и по полученным шлифам, и по графику распределения микротвердости. Проведенное исследование распределения плотности мощности по диаметру пятна излучения позволяет объяснить данный факт с позиций различного введения тепла в центральную зону валика и в крайние зоны того же валика.

Как видно из фотографий шлифов, в крайних зонах наплавленного валика количество нерастворенных карбидов существенно выше, чем в центральной области (рис.3.16 - 3.18). Однако их форма неправильная и укрупненная, что может привести к пониженным пластическим свойствам покрытия в зоне сплавления подложки и валика. Полученный валик

представлял собой неоднородный по всей ширине композитный материал, однако при создании покрытия методом многопроходной наплавки карбиды из крайних зон валика должны переплавиться и количество нерастворенных карбидов в нем снизится.

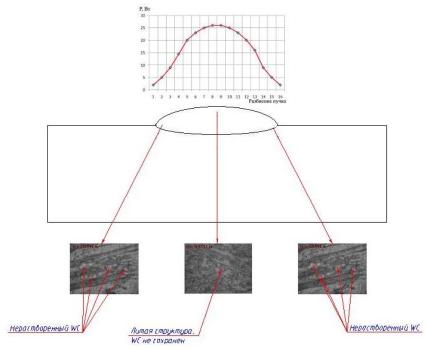


Рис. 3.16 Влияние распределения мощности лазерного пучка на технологический процесс



Рис. 3.17. Измерения микротвердости карбидов

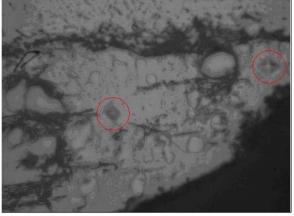


Рис. 3.17. Измерения микротвердости наплавленной матрицы

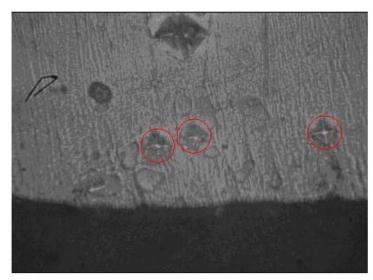


Рис. 3.18. Измерения микротвердости раствореных карбидов

Выводы

В результате экспериментов получено и исследовано композиционное покрытие на основе карбида вольфрама, проявляющее высокие прочностные свойства. Установлено, что:

- 1. Наплавка мощными непрерывными волоконными лазерами позволяет получать широкие валики без видимых дефектов. При правильном подборе режима наплавки возможно сохранение упрочняющей фазы не только в основании валика, но и по всей ширине наплавленного металла.
- 2. Распределение мощности излучения не зависит от количества модулей, задействованных для генерации.
- 3. Распределение плотности мощности излучения по диаметру пятна значительно влияет на структуру и свойства наплавленных валиков.
- 4. Микротвердость наплавленных валиков изменяется по ширине и существенно зависит от плотности мощности лазерного излучения, воздействовавшей на данный участок валика.

Литература

- 1. Новое в термической обработке / Л.А.Петрова, В.А.Прусакова // Новые материалы и технологии термической обработки металлов: Докл. Всесоюзн. конф. Киев, 1985. С. 1-5.
- 2. Коломытцев П.Т. Жаростойкие диффузионные покрытия М.: Металлургия, 1979. 271 с.
- 3. Плазменная наплавка металлов / А.Е.Вайнерман, М.Х.Шоршоров, В.Д.Веселков, В.С.Новосадов М.: Машиностроение, 1969. 192 с.
- 4. Николаев Г.А., Ольшанский Н.А. Специальные методы сварки М.: Машиностроение, 1975. 231 с.
- 5. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В.Н,Анциферов, Г.В.Бобров, Л.К.Дружинин и др. М.: Металлургия, 1967. 792 с.
- 6. Майсел Л., Гленг Р. Технология тонких пленок. М.: Сов. радио, 1977. 664 с.
- 7. Tucker T.R., Ayers J.D. Metallic coatings modification by scanned electron beam and laser sources// Thin Solid films. -1980. v.73. P. 199-200.
- 8. Повышение теплостойкости быстрорежущих сталей лазерным легированием / В.А.Бураков, Г.И.Бровер, Н.М.Буракова // Металло ведение и термическая обработка металлов. 1965. .№11. С. 2-6.
- 9. Лазерная обработка спеченных сплавов TiC-сталь / В.К. Нарва, Н.С.Лошкарева, М.Н.Крянина, Е.П.Шуренков // Металловеде ние и термическая обработка металлов. 1987. №10. С. 57-59.
- 10. Электрошлаковая наплавка малого конуса доменной печи композиционным сплавом / С.Я.Шехтер, А.М.Резницкий, Ю.Н.Лазаренко, В.В.Разинский // Автоматическая сварка. 1978. №8. С. 43-47.