

6. Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х. Оптимизация перехода на производство новой продукции машиностроения. // Вестник машиностроения. – 2011, №12. – С. 80 – 83.
7. Saprykina N A, Saprykin A A, Borovikov I F, Sharkeev Y P, Influence of layer-by-layer laser sintering conditions on the quality of sintered surface layer of products, //IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.- 2015.- Vol.91. Article number 012031.- pp.1-6.
8. Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х. Оптимизация этапа эксплуатации изделий машиностроения // Вестник машиностроения. – 2010, №7. – С. 68 – 72.
9. Petrushin S.I., Gubaidulina R.H. New principles of mechanical engineering organization//The 7th international Forum on Strategic Technology IFOST 2012 September 17 – 21, 2012. Tomsk polytechnic University. VOLUME II pp.129 – 133. [Электронный ресурс].– режим доступа:<http://www.tpu.ru>
10. Губайдулина Р.Х., Петрушин С.И. Экономически обоснованная эксплуатация изделий машиностроения. Организатор производства, М.: «Экономика и финансы». Теоретический и научно-практический журнал – 2010. №3.– С.75–78.

МИКРОТВЕРДОСТЬ ВАЛИКОВ ИЗ СПЛАВА ПГ-10Н-01, НАНЕСЕННЫХ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

*О.Г. Девойно, д.т.н., проф., Н.И. Луцко, науч. сотр., А.С. Лапковский, мл. науч. сотр.,
Белорусский национальный технический университет
220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65, тел. (375 17)331-00-45
E-mail: scvmed@bntu.by*

Технология лазерной наплавки имеет целый ряд преимуществ перед другими технологиями нанесения покрытий. Прежде всего, это связано с небольшими размерами наплавляемых валиков, сравнимыми с диаметром лазерного пятна на поверхности наплавки и локальностью нагрева. Благодаря своим особенностям метод лазерной наплавки позволяет проектировать и создавать мультимодальные покрытия, состоящие из полосчатых слоев, полученных чередованием материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами, когда один материал играет роль связующего, а второй – арматуры. Уникальность метода лазерной наплавки при создании мультимодальных покрытий состоит в том, что покрытия с полосчатой архитектурой могут создаваться из металлических материалов, что практически трудно осуществить другими способами. Реализация технологии нанесения мультимодальных покрытий методом лазерной наплавки неразрывно связана с использованием системы ЧПУ для осуществления процесса наплавки, что позволяет с высокой точностью создавать архитектуру мультимодальных полосчатых слоев. Технология создания мультимодальных покрытий может быть использована как для упрочнения поверхностей новых деталей, так и для восстановления их изношенных поверхностей с хорошими прочностными свойствами [1,2].

Прежде чем приступить к созданию мультимодальных покрытий из разнородных металлических материалов должна быть отработана технология лазерной наплавки валиков из предполагаемых составляющих мультимодального покрытия и исследованы физико-механические свойства материалов валиков. В данной работе нами предпринята попытка исследовать распределение микротвердости в единичных валиках из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-10Н-01 и выявить влияние режимов лазерной наплавки на величину микротвердости.

Для выполнения исследований применялся лазерный технологический комплекс, включавший газовый СО₂ лазер непрерывного действия типа «Комета 2» с мощностью излучения 1000 Вт и координатную систему с ЧПУ, обеспечивавшую необходимое перемещение наплавочной головки относительно наплавлявшихся образцов. Применявшаяся схема наплавки показана на рисунке 1.

Образец 8 устанавливался на поверхность стола координатной системы, указанная система обеспечивала перемещение наплавочной головки-объектива 3 с коаксиальным наплавочным соплом 4, фокусирующей линзой 5 и системой поворотных зеркал 6 относительно образца с заданной скоростью наплавки V. Наплавляемый материал в питателе 1 смешивался с воздухом и в виде газопорошковой смеси поступал в распределитель 2, из которого он по четырем трубкам подавался в коаксиальное сопло 4. Луч лазера 7 через систему поворотных зеркал 6 и линзу 5 фокусировался на поверхности образца в той же точке, куда подавался порошок по наклонным каналам коаксиального сопла 4. Для предотвращения перегрева фокусирующей линзы 5 и сопла 4 в процессе наплавки, в корпусе

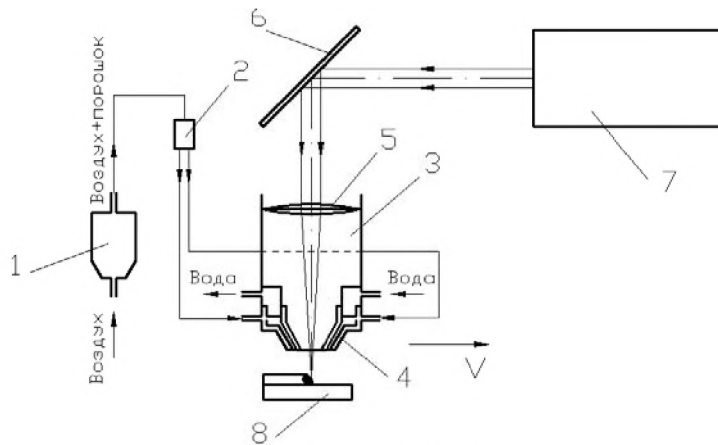


Рис. 1. Схема лазерной наплавки

головки объектива 3 были предусмотрены специальные каналы, через которые протекала проточная вода. Лазерная наплавка производилась при мощности излучения лазера 1000 Вт, дистанциях наплавки 10, 12 и 14 мм, скоростях наплавки 60, 80, 100 и 120 мм/мин, величине подачи порошка 12 г/мин. Наплавка выполнялась на образцы изготовленные из стали 45, имевшие размеры 20x30x8 мм. В качестве наплавочного материала использовался порошок самофлюсующегося

сплава на основе никеля – ПГ-10Н-01, имевший грануляцию 20-80 мкм.

После наплавки образцы разрезались в направлении перпендикулярном валикам наплавки, шлифовались и заливались в специальные оправки. Затем изготавливались поперечные шлифы валиков наплавки и производился замер микротвердости по глубине валиков наплавки. Измерения микротвердости производились при помощи микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г по линии симметрии валиков от поверхности в основу с шагом 0,05 мм. Результаты приведены на рисунках 2-4.

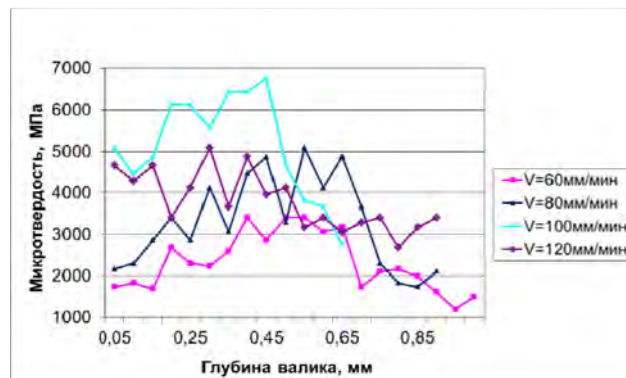


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине валика для сплава ПГ-10Н-01 при дистанции наплавки L=10 мм

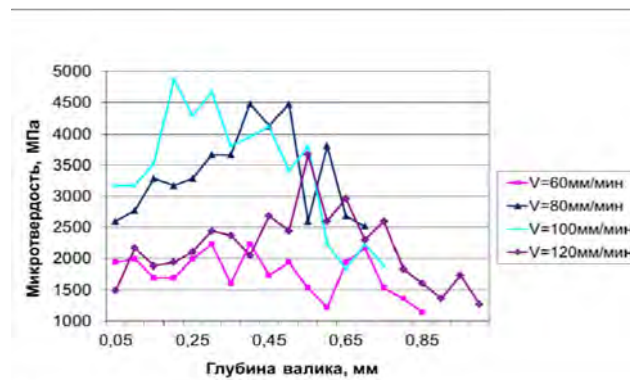


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине валика для сплава ПГ-10Н-01 при дистанции наплавки L=12 мм

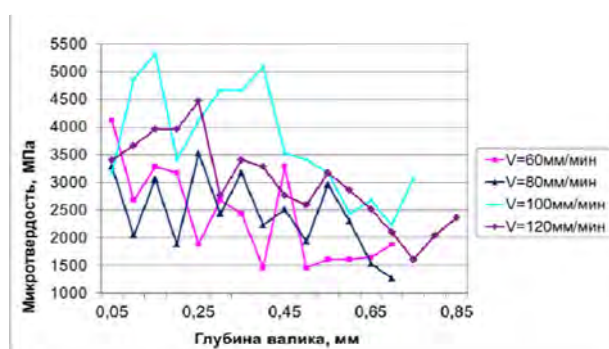


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине валика для сплава ПГ-10Н-01 при дистанции наплавки $L=14$ мм

Анализируя полученные результаты можно отметить следующее:

- По глубине наплавленных валиков из сплава ПГ-10Н-01 микротвердость распределена достаточно равномерно при всех дистанциях наплавки. Наблюдается некоторое снижение микротвердости покрытия вблизи поверхности валиков на 300 – 1500 МПа, которое скорее всего связано с дефектами возникающими при полировке покрытия на стыке покрытие-заливка. При приближении к основе микротвердость также уменьшается до микротвердости основы;
- Наблюдается некоторый рост микротвердости в валиках наплавки при уменьшении дистанции наплавки, что связано с изменением положения фокуса лазерного излучения относительно поверхности наплавки;
- Наивысшая микротвердость (7000 МПа) отмечается при скорости наплавки 100 мм/мин и дистанции наплавки 10 мм;
- Общий уровень микротвердости в валиках наплавки при скорости наплавки 60 мм/мин достаточно низок и составляет 2100 – 3000 МПа.
- Максимальная величина средней микротвердости в валиках сплава ПГ-10Н-01 для всех режимов составляет 4067 МПа, а минимальная величина – 2500 МПа.

Небольшие колебания микротвердости в валиках сплава ПГ-10Н-01 свидетельствуют о достаточно равномерном распределении фаз в покрытии. Другими словами, из-за высокой скорости охлаждения (10^3 - 10^5 К/с), большинство упрочняющих элементов остаются в твердом растворе γ -Ni матрицы.

Графики распределения микротвердости по глубине валиков также показывают, что хотя валики, полученные методом лазерной наплавки, имеют металлическую связь с основой, переходная зона между покрытием и основой практически отсутствует или совсем невелика.

На рисунке 5 приведена зависимость средней микротвердости покрытия от скорости наплавки. Из рисунка 5 видно, что при увеличении скорости наплавки от 60 мм/мин до 100 мм/мин наблюдается рост средней микротвердости примерно на 1500 МПа. При дальнейшем увеличении скорости наплавки до 120 мм/мин, величина средней микротвердости уменьшается на 400 МПа.

Такую зависимость средней микротвердости от скорости наплавки можно объяснить тем, что с изменением скорости наплавки меняется величина удельной энергии E , вводимой в покрытие.

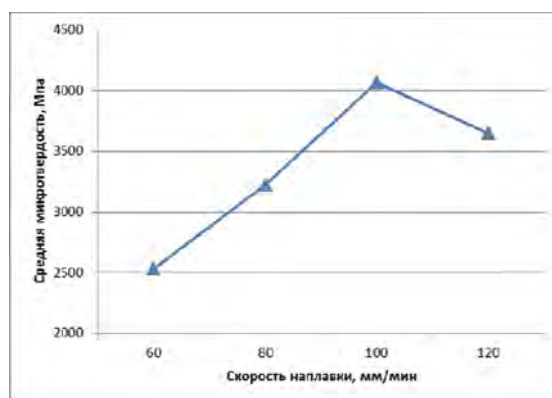


Рис. 5. Зависимость средней микротвердости от скорости наплавки

Удельная энергия E ($\text{Вт}\cdot\text{с}/\text{мм}^2$ или $\text{Дж}/\text{мм}^2$) представляется выражением:

$$E = \frac{P}{D \cdot S}, \quad (1)$$

где P - мощность лазерного излучения, Вт; D - диаметр лазерного пятна, мм; S - скорость наплавки, мм/с.

В нашем случае, удельная энергия E составляет 1000, 752, 602 и 500 $\text{Дж}/\text{мм}^2$ для скоростей наплавки 60, 80, 100 и 120 мм/мин, соответственно. При скорости наплавки 60 мм/мин энерговклад в покрытие достаточно большой, что скорее всего приводит к перегреву последнего и образованию довольно крупнозернистой структуры, приводящей к небольшой величине средней микротвердости. При скорости наплавки 120 мм/мин энерговклад в покрытие уменьшается в два раза. Соответственно уменьшается размер ванны расплава и увеличивается скорость отвердевания при одном и том же количестве подаваемого порошкового материала. Результатом является неполное сплавление материала валиков по границам зерен и уменьшение средней микротвердости покрытия. При скорости наплавки 100 мм/мин энерговклад в покрытие все еще достаточный, чтобы обеспечить образование сравнительно большой ванны расплава, не приводя к перегреву покрытия. В то же время, скорость отвердевания довольно велика для образования оптимальной зернистости структуры, которая и обеспечивает высокое значение средней микротвердости.

Сделанные предположения, хорошо согласуются с известной [3] зависимостью размера зерна d_g от скоростей зарождения и роста кристаллов:

$$d_g = 1,1 \cdot \left(\frac{R}{n} \right)^{3/4}, \quad (2)$$

где n - ($\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-3}$)- скорость зарождения кристаллов; R - ($\text{мм}/\text{с}$)- скорость роста кристаллов.

Известно [3], что скорость роста кристаллов всегда меньше скорости зарождения кристаллов и не зависит от скорости охлаждения и, соответственно, от скорости наплавки. В то же время, скорость зарождения кристаллов возрастает с ростом скорости охлаждения и скорости наплавки, соответственно. По этой причине при увеличении скорости наплавки от 60 до 100 мм/мин, согласно уравнению (2) на фоне роста скорости зарождения кристаллов n , при практически неизменной скорости роста кристаллов – R происходит уменьшение размеров зерен и наблюдается рост микротвердости. При дальнейшем увеличении скорости наплавки до 120 мм/мин, несмотря на продолжающееся уменьшение размеров зерен, начинает сказываться недостаток вводимой лазером мощности и уменьшение прочности сплавления материала валиков по границам зерен, что вызывает уменьшение микротвердости.

Таким образом, полученные результаты показывают, что валики, полученные лазерной наплавкой самофлюсующегося сплава на основе Ni – ПГ-10Н-01 отличаются равномерным распределением микротвердости по глубине валика. Максимальная величина средней для всех использовавшихся режимов микротвердости составляет 6800 МПа, а минимальная - 2230 МПа. Графики распределения микротвердости по глубине слоя показывают, что несмотря на металлургическую связь с основой, практически не образуется переходная зона между покрытием и основой. Кроме того, зависимость средней микротвердости покрытия от скорости наплавки показывают, что оптимальной скоростью для лазерной наплавки отдельных валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-10Н-01 является скорость – 100 мм/мин, при которой достигается максимальная микротвердость покрытия 4900-6800 МПа. Полученные результаты хорошо объясняются данными о количестве вводимой удельной энергии и о размерах зерен образующихся при лазерной наплавке.

Литература.

1. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок/ Под ред. В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – С.664.
2. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, - С. 424.
3. L. Thivillon, Ph. Bertrand, B. Laget, I. Smurov, Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coating and parts for reactors components, Journal of Nuclear Materials, 385 (2009) 236-241.