

становительных технологий для восстановления дефектных зон и геометрических размеров деталей. При разработке ресурсосберегающей технологии для рабочих лопаток высокотемпературных газовых турбин необходимо учитывать особенности кристаллического строения монокристаллических сплавов и анизотропию механических свойств.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021—2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berdnik O. B., Tsareva I. N., Krivina L. A., Tarasenko Y. P.* A pulse mikronaplavka for repair technologies of turbine shovels from high-temperature nickel monocrystal alloys // *Welding fabrication, MATEC Web of Conferences 224 (01023 ICMTMTE 2018)*. Vol. 2. P. 23—30.
2. *Логунов А. В.* Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин / Рыбинск: Изд. дом "Газотурбинные технологии". 2017. 855 с.
3. *Тарасенко Ю. П., Кривина Л. А., Царева И. Н., Бердник О. Б.* Импульсная микронаплавка для ремонтных технологий турбинных лопаток из жаропрочных никелевых монокристаллических сплавов // *Сварочное производство*. 2018. № 2. С. 24—28.

УДК 621.791.927.053.96.699.058  
DOI: 10.34641/SP.2021.1041.8.034

**С. Ф. ГНЮСОВ**, д-р техн. наук  
ФГБОУ ВПОНИ ТПУ "Томский политехнический университет"  
**М. Г. ГОЛКОВСКИЙ**, канд. физ.-мат. наук  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
E-mail: gsf@tpu.ru

## Особенности формирования структуры ЗТВ в условиях многопроходной вневакуумной электронно-лучевой наплавки

В работе раскрыта особенность формирования структуры ЗТВ (в стали 20) при многопроходной вневакуумной электронно-лучевой наплавке композиционной смесью на основе стали 10P6M5. Установлено, что в зависимости от числа проходов электронного пучка при наплавке стали 10P6M5 структура ЗТВ изменяется по следующей схеме: мартенситно-бейнитно-ферритная смесь (1 проход) → феррито-перлитная смесь с выделением двух форм перлита: крупных по границам зерен и дисперсных по телу зерна феррита (2 проход) → феррито-перлитная структура близкая к структуре основного металла (3 проход). Дополнительное введение карбида вольфрама в наплавочную смесь приводит к уменьшению теплового воздействия на ЗТВ в ходе второго и третьего прохода. Поэтому дисперсная феррито-перлитная структура с выделением двух форм перлита формируется только после третьего прохода электронного пучка.

The microstructures of HAZ formed in multipass non-vacuum electron beam deposition from a 10P6M5 steel powder mixture. It has been established that microstructural evolution of HAZ as depended on the number of electron beam passes can be described as follows: martensite/beinlite/ferrite structures, ferrite/pearlite mixed structures with coarse grain boundary and fine intra-grain pearlite grains, and ferrite/pearlite structures similar to those of the base metal formed after, 1, 2, and 3 passes, respectively. Extra alloying the powder mixture with tungsten carbide resulted in reduced heating in HAZ during both second and third deposition passes so that the above-described refined ferrite/pearlite structures with two pearlite types has been formed only after the third pass.



**Ключевые слова:** вневакуумная электронно-лучевая наплавка, сталь 10P6M5, сталь 20, зона термического влияния, микроструктура, микротвердость

**Key word:** non-vacuum electron beam deposition, 10P6M5 steel, 20 steel, heat-affected zone, microstructure, microhardness

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Долговечность деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного внешнего воздействия (абразивные частицы, пары трения), зависит от триботехнических свойств материалов, улучшение которых может быть достигнуто при использовании различных методов упрочнения.

Поскольку изнашиванию подвергаются лишь поверхностные слои, наиболее рациональным решением проблемы является использование поверхностного упрочнения. Применение такого подхода не только решает задачу экономии дорогостоящих легирующих элементов, но также позволяет использовать в качестве основного металла (подложки) не дорогие малоуглеродистые стали (например, сталь 20). Это позволяет обеспечить пластичность основному объему материала и сохранить высокие показатели трещиностойкости детали в целом.

В этом направлении широко себя зарекомендовали вакуумная и вневакуумная электронно-лучевая наплавка [1, 2]. Достаточно хорошо изучены структуры различных наплавочных материалов, подобраны наиболее оптимальные из них [3—9]. Все эти структуры могут успешно работать при формировании равновесной структуры на границе раздела наплавка — основной металл. Высокие скорости нагрева и охлаждения в условиях, например, электронного луча, могут формировать в зоне термического влияния (ЗТВ) основного металла неравновесные структуры: мартенсит, бейнит, видманшеттов феррит, которые существенно снижают его прочностные характеристики. Однако должного внимания анализу этих структур и способов их устранения не отводилось.

Целью данной работы является изучение особенностей формирования структуры ЗТВ при многопроходной вневакуумной электронно-лучевой наплавке композиционных покры-

тий на основе стали 10P6M5 на основной металл сталь 20.

## 2. Материалы, оборудование и методы исследования

*Основной металл и материал покрытия.* В качестве материала покрытия использовали порошок стали 10P6M5 (вес %: С — 1, Cr — 4, W — 6,5, Mo — 5, V — 2, Si — <0,5, Mn — 0,55, Ni — 0,4, S — 0,03, O — 0,03, основа Fe) и композиционную смесь порошков стали 10P6M5 + 30 % WC дисперсностью  $\leq 100$  мкм. Наплавку проводили на образцы основного металла, изготовленные из отожженной стали 20 ( $HV = 1300$  МПа) размером  $50 \times 100$  мм<sup>2</sup> и толщиной 10 мм. Для оценки формирующейся структуры и микротвердости в зоне термического влияния образцы стали 20 дополнительно подвергали нормализации ( $HV = 1420$  МПа) и закалке ( $HV = 1650$  МПа). Перед наплавкой образцы подвергали шлифовке и обезжириванию 70 % раствором этилового спирта. Для защиты от влияния окружающей среды в наплавочный порошок вводили флюс —  $MgF_2$ . Обычно отношение количества флюса к основной порошковой смеси выбирается равным 1 : 1 (ат.%). Это позволяет обеспечить заполнение флюсом пустот между частицами порошка.

*Оборудование и технология нанесения покрытий.* Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковой стали 10P6M5 и 10P6M5 + 30 % WC, осуществлялась на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск). Энергия пучка при обработке составляла 1,4 МэВ и токе пучка 22...24 мА. Заготовки находились на расстоянии 90 мм от выпускного отверстия. При этом гаусовский диаметр пучка электронов на поверхности заготовки составлял 12 мм. Для увеличения обрабатываемой площади осуществлялась электромагнитная развертка пучка электронов. Частота сканирования составляла 50 Гц, ширина сканирования — 50 мм. Заго-



Таблица 1

№ образца	Основной металл	Металл покрытия	Кол-во проходов
№ 2	Сталь 20	10P6M5	1
№ 4	Сталь 20	10P6M5	2
№ 5	Сталь 20	10P6M5	3
№ 3	Сталь 20	10P6M5 + 30%WC	1
№ 7	Сталь 20	10P6M5 + 30%WC	2
№ 9	Сталь 20	10P6M5 + 30%WC	3

товки перемещались в продольном направлении относительно выпускного отверстия со скоростью 25 мм/с при плотности порошковой насыпки  $0,45 \text{ г/см}^2$ . Исследуемые образцы после вневакуумной ЭЛН представлены в табл. 1.

Технология получения покрытий состоит из следующих этапов. Порошковая смесь равномерно перемешивается и наносится на предварительно очищенную поверхность стальной заготовки. После нанесения порошок подпрессовывается при давлении 20...50 кПа. Образцы устанавливаются на стол ускорителя электронов, который перемещается относительно пучка электронов.

Для увеличения концентрации легирующих компонентов в покрытии могут быть наплавлены второй и последующие слои. Для этого на поверхность стальной заготовки с наплавленным слоем вновь наносят порошковую смесь, и технологический процесс повторяется в той же последовательности. Реализация этих режимов обеспечивает наплавку упрочненных слоев толщиной до 2 мм с производительностью не менее  $4,5 \text{ м}^2/\text{ч}$  и слоев толщиной 2...3 мм с производительностью не менее  $1,8 \text{ м}^2/\text{ч}$ . Увеличение объемной доли упрочняющей фазы в поверхностно легированном слое возможно при использовании двухслойной и трехслойной наплавки.

Оценка качества наплавленных слоев производится на каждом этапе технологического процесса. В процессе обработки осуществляется визуальный контроль (на экране монитора оператора ускорителя), позволяющий оценить степень разлета компонентов порошковой насыпки. После обработки качество наплавленного слоя оценивается путем внешнего осмотра. Критериями оценки являются рав-

номерность полученного покрытия, легкость удаления шлаковой корки, отсутствие нерасплавившихся частиц порошка и пор. Кроме того, при реализации технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки осуществляется весовой контроль потерь порошковой смеси и флюса.

*Методы исследования.* Для изучения структуры упрочненного слоя и зоны термического влияния из наплавленных образцов вырезались пластины перпендикулярно наплавленной поверхности по всей ширине (50 мм) образца с помощью универсального отрезного станка. В процессе нарезания пластин-образцов использовалась СОЖ, что позволяло исключить нагрев заготовок.

Далее осуществлялась подготовка шлифов, которая включала в себя шлифование и полирование на абразивных шкурках и алмазных пастах различной дисперсности. Окончательная доводка шлифов производилась на фетровом диске с использованием водного раствора окиси хрома.

Для анализа изменения микротвердости по толщине наплавки, ЗТВ и основного металла использовали прибор ПМТ-3М. Микротвердость наплавки измеряли при нагрузке 100 г, а основного металла (включая ЗТВ) при нагрузке 50 г, шагом по глубине 100 мкм в виде двух дорожек в шахматном порядке. Это позволило построить график изменения микротвердости по толщине наплавки и основного металла с шагом 50 мкм.

Микроструктуру наплавленного металла и ЗТВ изучали с помощью оптического микроскопа Olympus GX 51 с комплектом прикладных программ SIAMS 700. В качестве травителя использовали 3 % раствор  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте.

### 3. Результаты и обсуждение

В исходном состоянии после отжига микроструктура стали 20 представляет собой ферритные зерна близко к равноосной форме со средним размером 10 мкм, по границам которых в виде отдельных колоний присутствует пластинчатый перлит. Исходная микротвердость стали  $HV \sim 1300 \text{ МПа}$ .



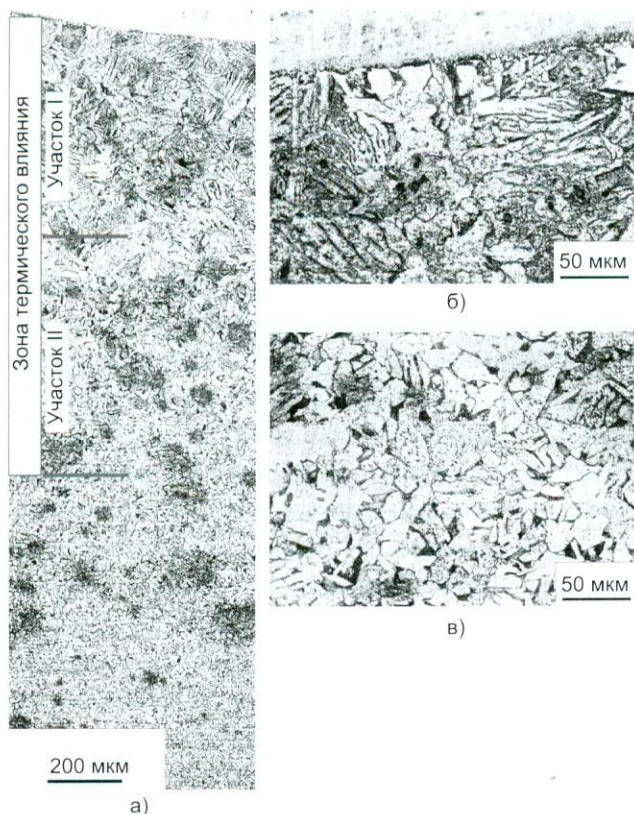


Рис. 1. Структура ЗТВ в стали 20 с наплавленным покрытием (сталь Р6М5) в один проход электронного пучка: а — общий вид, б — микроструктура на участке I, в — микроструктура на участке II

В процессе наплавки порошка стали 10Р6М5 от границы сплавления с покрытием в основном металле формируется зона термического влияния (ЗТВ), протяженность, структура и микротвердость которой изменяется в зависимости от числа проходов электронного пучка, рис. 1—3. На рис. 1, а представлена структура ЗТВ, формирующаяся в объеме основного металла после первого прохода наплавки электронным пучком. В зоне термического влияния, за исключением границы сплавления между наплавленным покрытием и основным металлом выделяются два участка, отличающихся микростроением. Первый участок, непосредственно прилегающий к границе сплавления, имеет грубо игольчатую мартенситно-бейнитную структуру с присутствием достаточно крупных (~50 мкм) зерен феррита, рис. 1, б. Образование такой структуры связано со значительным перегревом исходного аустенитного зерна и последующим быстрым охлаждением. Из анализа твердости Стали 20 в зависимости от режима термической обработки и ее сравнение с твердостью ЗТВ непосредственно под границей сплавления

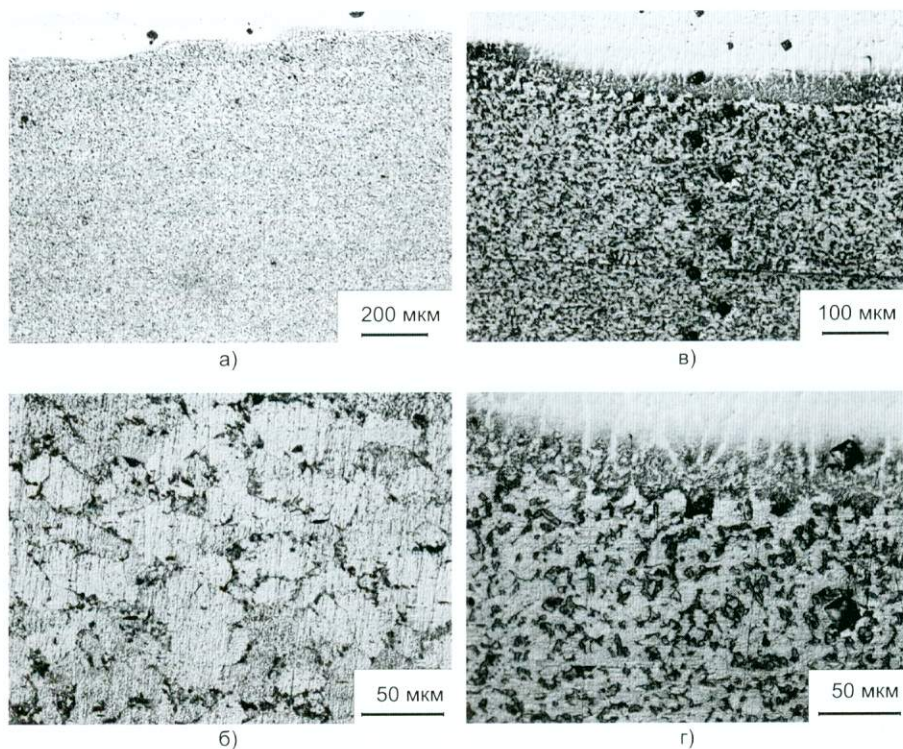


Рис. 2. Микроструктура в зоне термического влияния основного металла Стали 20 после наплавки стали Р6М5 в два (а, б) и три (в, г) прохода электронного пучка



ния (рис. 3, а) можно сделать вывод, что этот объем материала практически соответствует закаленному состоянию. Однако присутствие в структуре наряду с мартенситом и бейнитом крупных зерен феррита обеспечивает значительный разброс значений твердости от 1600...1650 до 1300...1350 МПа. Толщина первого участка не превышает ~0,6 мм.

Структура, сформированная в объеме металла второго участка ЗТВ, соответствует феррито-перлитной смеси фаз, рис. 1, в. При этом размер зерен феррита увеличен (до ~15 мкм) по сравнению с исходной структурой Стали 20 (10 мкм). Толщина этого участка ~1 мм. Далее структура Стали 20 не отличается от исходной. Общая протяженность всей ЗТВ ~1,6 мм.

При втором проходе электронного пучка, в ранее сформированной ЗТВ, за счет повторного термического воздействия происходят следующие изменения. В объеме первого и второго участка происходит рекристаллизация, что приводит к резкому измельчению ферритного зерна и выделению двух форм перлита: крупных по границам зерен феррита и дисперсных по телу зерна феррита, рис. 2, а, б. Причем степень этого измельчения уменьшается при движении от границы сплавления к основному металлу. Следовательно, ЗТВ после двух проходов электронного пучка состоит только из участка II толщиной 1,2 мм. Микротвердость в ЗТВ при движении от границы сплавления к основному металлу уменьшается от ~1500 МПа до исходного значения 1300 МПа, рис. 3, б.

После третьего прохода феррито-перлитная структура ЗТВ имеет более крупный размер кристаллитов (рис. 2, в, г) по сравнению со структурой, сформированной после второго прохода, рис. 2, а, б. По границам зерен феррита в виде отдельных колоний присутствует перлит. Дисперсных выделений перлита внутри зерен феррита не наблюдается. Это обусловлено последующим температурно-временным воздействием электронного пучка на ранее сформированную структуру после первого и второго прохода. Протяженность ЗТВ уменьшается до 0,35...0,4 мм, а ее микротвердость практически сравнима с основным металлом, рис. 3, в. Твердость наплавленного слоя прак-

тически не меняется по толщине наплавки и равна ~7,8 ГПа.

Введение карбида вольфрама в наплавочную смесь (сталь 10P6M5 + 30 % WC) приводит к формированию мартенситно-бейнитно-ферритной структуры на участке I ЗТВ, рис. 4, а, б.

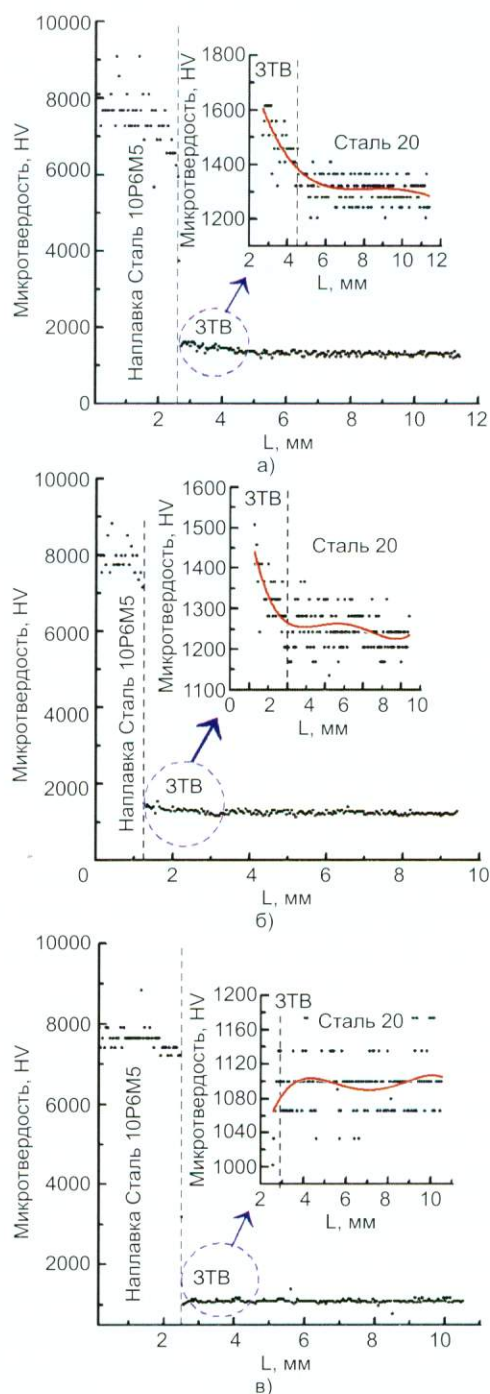
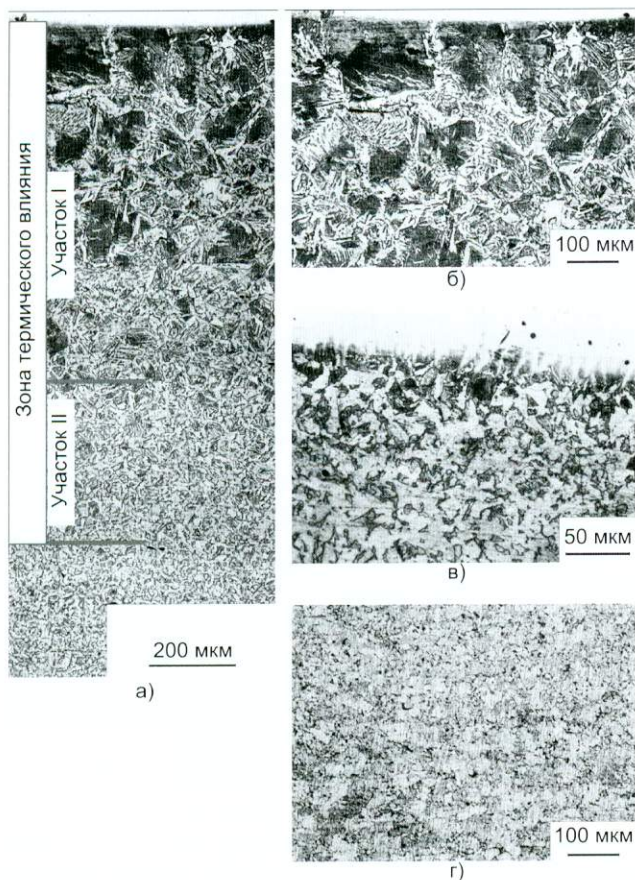


Рис. 3. Изменение микротвердости по толщине покрытия на основе стали P6M5 и основного металла стали 20 после одного (а), двух (б) и трех (в) проходов электронного пучка



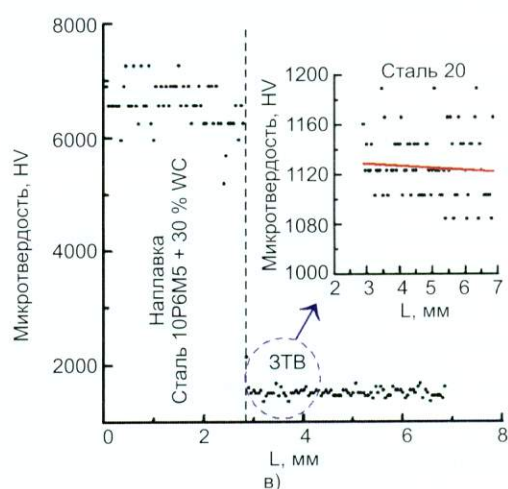
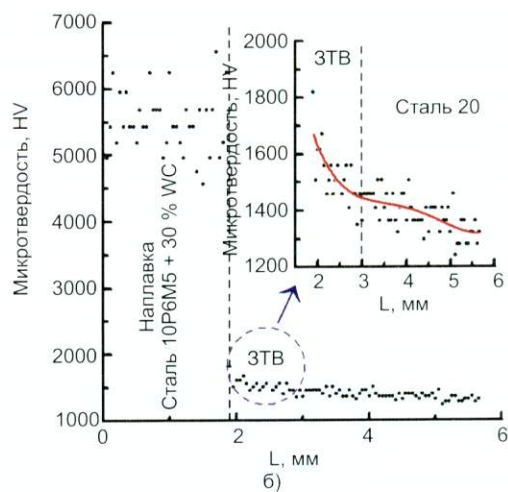
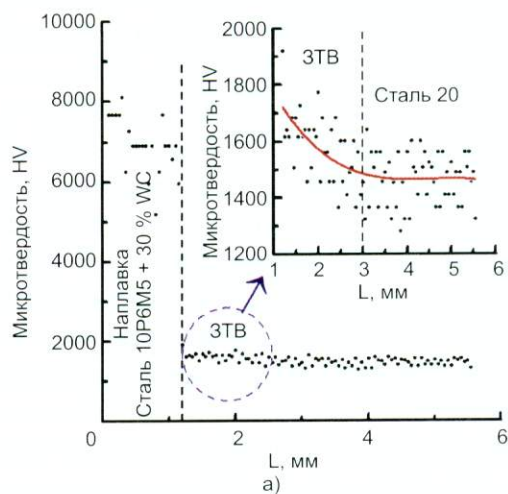


**Рис. 4.** Структура ЗТВ стали 20 после наплавки композиционной смеси сталь 10P6M5 + 30 %WC в один (а, б), два (в) и три (г) прохода электронного пучка: а — общий вид, б — микроструктура на участке I, в — микроструктура на участке I, II, г — микроструктура на участке II

При этом твердость непосредственно у границы сплавления достигает 1700...1750 МПа, рис. 5, а. Протяженность первого участка не превышает 0,8 мм. На участке II перлит присутствует в виде отдельных включений и в виде явно просматривающихся пластинчатых колоний. Протяженность этого участка не превышает 350 мкм и его твердость сравнима с основным металлом.

Дополнительное присутствие карбида вольфрама в наплавочной смеси приводит к уменьшению теплового воздействия на ЗТВ в ходе второго и третьего прохода. Это обусловлено более значительным поглощением тепла в процессе наплавки за счет присутствия тугоплавкого WC. Поэтому после второго прохода электронного пучка в очень тонком приповерхностном слое (~100 мкм) к границе сплав-

ления со стороны стали 20 еще сохраняется мартенситно-бейнитная структура (рис. 4, в), что приводит к сохранению в этом объеме материала микротвердости на уровне 1600 МПа,



**Рис. 5.** Изменение микротвердости по толщине композиционного покрытия (сталь 10P6M5 + 30 %WC) и основного металла (сталь 20) после одного (а), двух (б) и трех (в) проходов электронного пучка



рис. 5, б. Только после третьего прохода электронного пучка формируется дисперсная феррито-перлитная смесь в ЗТВ со средним уровнем микротвердости ~1500 МПа, рис. 5, в. Подобная структура при наплавке сталью Р6М5 формировалась уже после второго прохода электронного пучка, рис. 2, б и рис. 3, б.

## ВЫВОДЫ

1. В стали 20 после наплавки первого прохода порошком стали 10Р6М5 ЗТВ, общей протяженностью ~1,6 мм, состоит из двух участков. Первый участок, непосредственно прилегающий к границе сплавления, имеет грубо игольчатую мартенситно-бейнитную структуру с присутствием крупных зерен феррита (~50 мкм). В объеме металла второго участка ЗТВ формируется феррито-перлитная смесь фаз. Размер зерен феррита увеличен по сравнению с исходной структурой стали 20 на 50 %.

2. При втором проходе электронного пучка в объеме первого и второго участка происходит рекристаллизация, что приводит к резкому измельчению ферритного зерна и выделению двух форм перлита: крупных по границам зерен феррита и дисперсных по телу зерна феррита. Степень этого измельчения уменьшается при движении от границы сплавления к основному металлу. ЗТВ после двух проходов электронного пучка состоит только из участка II толщиной 1,2 мм. Микротвердость в ЗТВ при движении от границы сплавления к основному металлу уменьшается от ~1500 МПа до исходного значения. В процессе третьего прохода феррито-перлитная структура ЗТВ отличается только более крупным размером кристаллитов по сравнению с исходной структурой стали 20, а по уровню микротвердость практически сравнима с основным металлом.

3. Дополнительное введение карбида вольфрама в наплавочную смесь (сталь 10Р6М5 + 30 % WC) приводит к уменьшению теплового воздействия на ЗТВ в ходе второго и третьего прохода. Это обусловлено более значительным поглощением тепла в процессе наплавки за счет присутствия тугоплавкого карбида вольфрама. Поэтому дисперсная феррито-перлитная структура с выделением

двух форм перлита: крупных по границам зерен и дисперсных по телу зерна феррита, в ЗТВ формируется только после третьего прохода электронного пучка, что обеспечивает сохранение высокого уровня микротвердости (~1500 МПа) в данном объеме материала.

*Работа выполнена в рамках приоритетного направления развития ТПУ "Нанотехнологии и пучково-плазменные технологии создания материалов с заданными свойствами".*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В. Е., Белюк С. И., Дураков В. Г., Ремпе Н. Г. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование технология, свойства покрытий // Сварочное производство. 2000. № 2. С. 34—38.
2. Fadeev S. N., Golkovski M. G., Korchagin A. I., Kusanov N. K., Lavruhin A. V., Petrov S. E., Salimov R. A., Vaisman A. F. Technological applications of BINP industrial electron accelerators with focused beam extracted into atmosphere // Radiation Physics and Chemistry. 2000. Vol. 57. P. 653—655.
3. Гнусов С. Ф., Дураков В. Г., Гнусов К. С., Игнатов А. А., Толмачев К. А. Электронно-лучевая наплавка карбидосталей. III. Влияние числа проходов на структурно-фазовое состояние композиционных покрытий на основе стали Р6М5 // Сварочное производство. 2009. № 7. С. 18—23.
4. Gnyusov S. F., Ignatov A. A., Durakov V. G., Tarasov S. Yu. The effect of thermal cycling by electron-beam surfacing on structure and wear resistance of deposited M2 steel // Applied Surface Science. 2012. Vol. 263. P. 215—222.
5. Lee K., Son C., Kim J. S., Lee S., Kim K. Y., Kim C. P. Hardness and corrosion resistance of steel-based surface composites fabricated with Fe-based metamorphic powders by high-energy electron beam irradiation // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 201. P. 835—841.
6. Nam D., Lee K., Lee S. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance of carbide-reinforced ferrous surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // Metallurgical and materials transactions A. 2008. Vol. 39A. P. 2626—2634.
7. Полетика И. М., Голковский М. Г., Крылова Т. А., Иванов Ю. Ф., Перовская М. В. Формирование структуры металла электронно-лучевой наплавки карбидом вольфрама // Перспективные материалы. 2009. № 4. С. 65—70.
8. Полетика И. М., Голковский М. Г., Крылова Т. А., Перовская М. В. Структура и свойства хромосодержащих покрытий, полученных методом электронно-лучевой наплавки в атмосфере // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 3. С. 15—22.
9. Полетика И. М., Крылова Т. А., Перовская М. В., Иванов Ю. Ф., Гнусов С. Ф., Голковский М. Г. Структура и механические свойства электронно-лучевой наплавки до и после термической обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 4. С. 44—53.