

1–40 мкс; диаметр пучка 6–10 см; неоднородность распределения плотности энергии в импульсе по сечению пучка – не выше 5 % (для лопаток из стали ЭП866Ш требуется $w = 20 \div 22$ Дж/см²).

остаточных растягивающих напряжений; 025 – нанесение нового покрытия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 11-08-00672-а).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что сильнооточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для ремонта лопаток турбины из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойкими покрытиями. Применение СИЭП позволяет удалять за один импульс поврежденные при эксплуатации поверхностные слои лопаток из стали ЭП866Ш толщиной от 5 до 10 мкм при плотности энергии 50–55 Дж/см².

Экспериментально доказано, что после электронно-лучевого удаления с поверхности лопаток 1-й ступени ТВД РД-33 поврежденного во время эксплуатации покрытия СДП-2 основные свойства лопаток ухудшаются – возрастает шероховатость поверхности, снижается предел выносливости, формируются остаточные растягивающие напряжения. Для достижения уровня эксплуатационных свойств исходных лопаток необходимо осуществлять технологический процесс ремонта лопаток в несколько операций:

005 – удаление покрытия; 010 – выглаживание микрорельефа; 015 – контроль состояния поверхности; 020 – финишная термообработка для снятия

ЛИТЕРАТУРА

1. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение. 1988.
2. Пайкин А. Г., Львов А. Ф., Шулов В. А. и др. // Пробл. машиностроения и автоматизации. 2003. № 3. С. 41.
3. Белов А. Б., Крайников А. В., Львов А. Ф. и др. // Двигатель. 2006. № 1. С. 6.
4. Белов А. Б., Крайников А. В., Львов А. Ф. и др. // Там же. № 2. С. 8.
5. Новиков А. С., Шулов В. А., Энгелько В. И. Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения. М.: Изд-во «ДИПАК», 2012.
6. Окс Е. М. Источники электронов с плазменным катодом (Физика. Техника. Применения). Томск: Изд-во НТЛ, 2005.
7. Ягодкин Ю. Д. Разработка технологических основ процессов обработки деталей ГТД с применением ионных и электронных пучков: Дис. ... докт. техн. наук. М.: МАИ, 1995.
8. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (Сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС, 2001.
9. Мубояджан С. А., Будиновский С. А., Помелов Я. А. // Матер. 6-й Междунар. конф. по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками (Томск, 23–28 сент. 2002 г.). Томск, ТПУ, 2002. С. 561.
10. Смыслов А. М., Лизунов В. П., Гребенюк Г. П. // Авиац. пром-сть. 1992. № 12. С. 50.
11. Пат. 586735139 (РФ). Способ восстановления эксплуатационных свойств деталей машин / В. А. Шулов, Н. А. Ночовная, Г. Е. Ремнев и др. 1997.

УДК 621.9.048.7

ПРОЦЕСС СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ПОКРЫТИЯХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

© 2014 г. **А. В. Долговечный, Л. А. Демидова, А. М. Ханов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Статья поступила в редакцию 22.10.2012 г., доработана 30.04.2013 г., подписана в печать 07.05.2013 г.

А. В. Долговечный – ассистент кафедры конструирования машин и технологии обработки материалов ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 6). E-mail: eternal85@bk.ru.

Л. А. Демидова – канд. техн. наук, вед. технолог той же кафедры. E-mail: lab@pstu.ru.

А. М. Ханов – докт. техн. наук, проф., декан механико-технологического факультета ПНИПУ. E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru.

Изучены процессы структурообразования в поверхностном слое стали 20 в результате лазерной наплавки стали марки Н13 (аналог 4Х5МФ1С), которую осуществляли на установке LENS 850-R с лазером мощностью 1 кВт по нескольким типичным схемам. Исследовано влияние технологии наплавки на формирование неоднородной структуры и твердости по слоям наплавки. Проведены металлографический, спектральный и рентгеноструктурный анализы. Показано значительное изменение химического состава слоев по сравнению с химическим составом

исходной стали Н13. Нагрев наплавки при температурах 650 и 750 °С приводит к выравниванию структуры и снижению твердости. Выявлены факторы, влияющие на сложный характер формирования структуры и, соответственно, на изменения твердости для всех видов наплавки.

Ключевые слова: лазерная наплавка покрытий, структурные превращения, схемы наплавки, лазерное воздействие, микротвердость.

Structure formation has been investigated in the surface layer of steel 20 after overlaying laser welding of H13 grade steel (analog of 4X5MФ1C) in LENS 850-R plant with 1kW laser according to several typical schematics. The effect of overlaying process on the formation of heterogeneous structure and hardness across the layers of laser welding has been investigated. Metallographic, spectral and X-ray crystallography were applied. X-ray diffraction analysis showed considerable changes of the chemical composition of the layers is shown in comparison with the chemical composition of initial H13 steel. Heat treatment of the overlaying metal at 650 °C and 750 °C leads to structure leveling and reduction of hardness. The factors affecting the formation of complex structures and changes in hardness for all types of overlaying metal are found.

Key words: laser welding of coatings, structural transformation, surfacing diagrams, laser treatment, microhardness.

Использование процесса лазерной наплавки (ЛН) для создания износостойких поверхностей на деталях, работающих в условиях абразивного износа, имеет ряд преимуществ перед альтернативными технологическими процессами, такими как химико-термические методы и лазерное легирование. Одним из них является то, что возможно существенное сокращение расхода дорогостоящих и дефицитных материалов при улучшении эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей.

Применение ЛН позволяет получать плотные беспористые покрытия за счет частичного растворения легирующих элементов стали Н13 в основном металле (сталь 20). Воздействие лазерного излучения на поверхность стали приводит к значительным структурно-фазовым превращениям – измельчению зерна, появлению пересыщенных твердых растворов, неравномерному распределению карбидов. Эти изменения происходят при жестких условиях – скорости нагрева и охлаждения при лазерной обработке могут достигать 10^6 – 10^7 °С/с [1]. Однако несмотря на малую длительность существования жидкого состояния, в структуре наплавки успевают сформироваться фазы, характерные для традиционных сплавов, но с отличающимися свойствами [1, 2]. При этом образуются пересыщенные легирующими элементами твердые растворы и карбиды, что обуславливает увеличение прочности металла.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований структуро-

образования и твердости образцов после лазерной наплавки, производимой с целью восстановления рабочих поверхностей изношенных деталей. Основное внимание уделено изучению влияния технологии получения наплавки на формирование макро- и микроструктуры.

Исходными материалами служили порошок стали Н13 (обладает высокой износостойкостью) как материал наплавки и сталь 20 в качестве основы. Их химический состав представлен в табл. 1.

Было изучено послойное формирование структуры и твердости, обеспечивающих комплекс эксплуатационных свойств поверхности детали (износостойкость, прочность, твердость).

Лазерную наплавку проводили на установке LENS 850-R с лазером мощностью 1 кВт при следующих режимах: плотность мощности лазера – $1,11 \cdot 10^6$ Вт/см², скорость перемещения лазерной головки – 635 мм/мин, скорость подачи порошка, из которого формируется наплавленный слой, – 3,1 г/мин; данные условия являются оптимальными и выявлены экспериментальным путем [3] (рис. 1).

Количество наплавов по высоте и с перекрытием определялось необходимостью получения нужного по высоте слоя наплавленного на поверхности детали материала (высота наплавки составляла ~ 4 мм: 2 мм – рабочая поверхность и 2 мм – под механическую обработку). Процесс наплавки нескольких слоев можно представить двухступенчатым: переплав основы металла с наплавляемой легированной сталью, охлаждение и вторичный

Таблица 1. Химический состав используемых сталей

Материал	Химический состав, %								Размер частиц, мкм
	C	Cr	V	Si	Mn	Mo	S	P	
Порошок стали Н13	0,4–0,5	5,5	1,59	0,85	0,32	1,32	–	–	40–160
Сталь 20	0,17–0,24	0,25	–	0,17	0,35	–	> 0,04	> 0,035	–

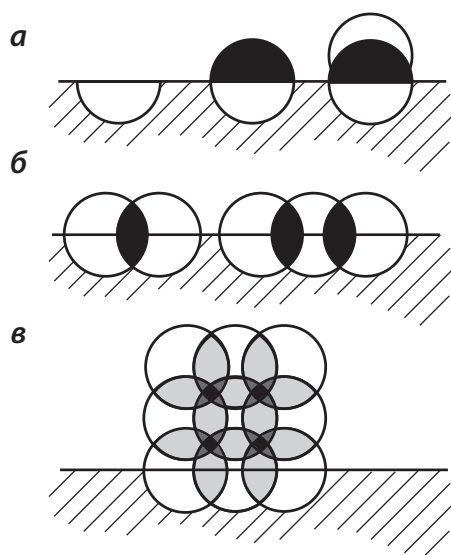


Рис. 1. Схемы наплавки

- а** – наплавка в несколько слоев по высоте
б – в один слой с перекрытием
в – многослойная

переплав полученного слоя с новой сформированной структурой с очередной порцией легированного порошка с последующим охлаждением. Вторичные процессы расплавления и охлаждения наплавки оказывают существенное влияние на формирование структуры предыдущих наплавки. Для изучения структуры наплавки в работе использовали металлографический, спектральный, рентгеноструктурный, химический анализы и метод химического травления.

Металлографический анализ проводили на микроскопе OLYMPUS при различных увеличениях. Спектральный анализ наплавки по слоям осуществляли на установке «Квантометр АКМ 34-60». Рентгеноструктурный анализ на определение фаз выполняли с помощью дифрактометра ДРОН-3.

Исследование структуры наплавки показало, что в результате многоразовой лазерной наплавки на основу образуются послойные структуры, состоящие из ряда зон.

При однократном воздействии лазерного излучения возникает область первичной наплавки, включающая две зоны – зону проплава и зону термического влияния (ЗТВ) (рис. 2).

В зоне проплавления основная масса стали распространяется отдельными потоками под действием механических сил, а также за счет диффузии легирующих элементов по всему объему зоны наплавки. В зоне термического влияния под воздействием лазерного излучения процессы, связанные с нагревом и охлаждением, протекают в твердой фазе, вследствие чего структура ЗТВ отличается от структуры зоны проплава. На ее формирование существенное влияние оказывает быстрый отвод тепла от ванны расплава в основу, поэтому размеры ЗТВ незначительны – порядка 0,1–0,15 мм.

В области многократного лазерного воздействия при получении любого покрытия возникает ряд новых зон со специфическими структурой и свойствами.

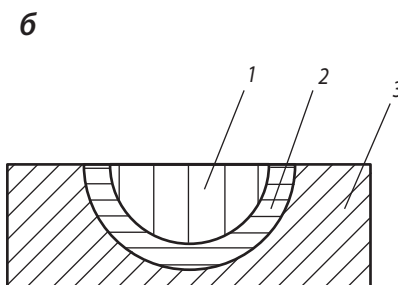
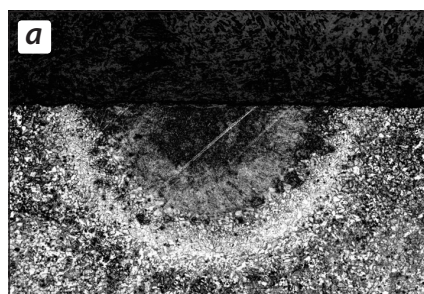


Рис. 2. Макроструктура (×100) одной дорожки при однократном лазерном излучении (**а**) и схема наплавки (**б**)
1 – зона проплавления
2 – зона термического влияния
3 – основа (сталь 20)

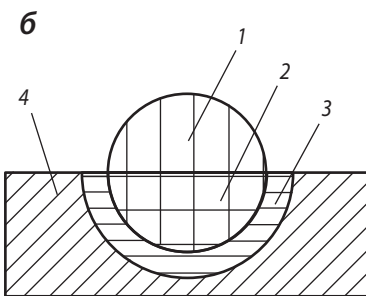
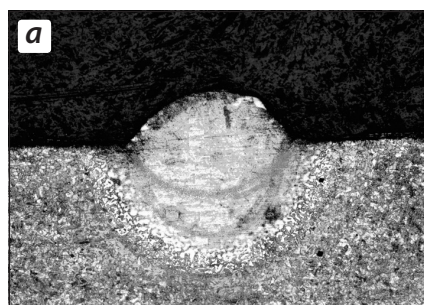


Рис. 3. Макроструктура (×100) двух дорожек (**а**) и схема их наплавки (**б**)
1 – зона наплавки
2 – зона двойного проплавления
3 – зона термического влияния
4 – основа (сталь 20)

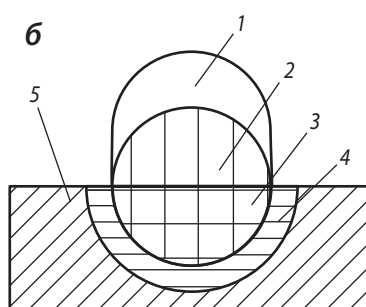
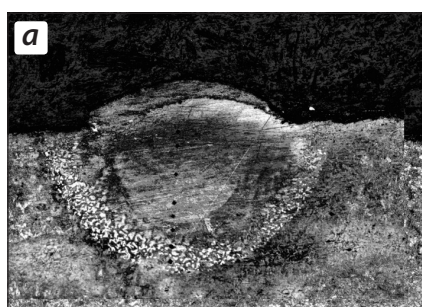


Рис. 4. Макроструктура ($\times 100$) трех дорожек (а) и схема их наплавки (б)

1 – зона однократного воздействия лазера
2 – зона переплава вторичной наплавки
3 – зона двойного переплава проплава
4 – зона термического влияния
5 – основа (сталь 20)

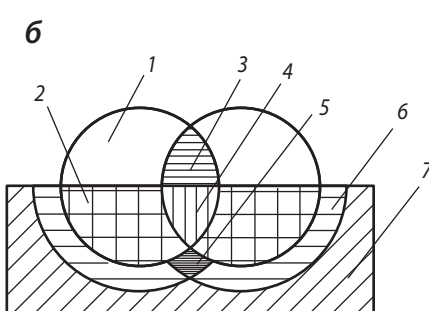
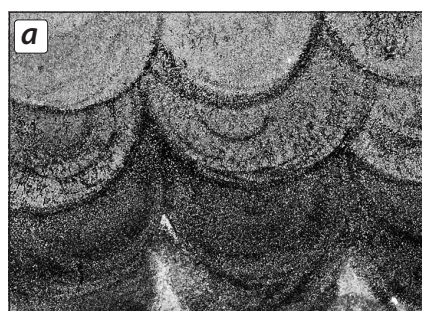


Рис. 5. Макроструктура ($\times 100$) наплавки с перекрытием (а) и соответствующая схема (б)

1 – зона вторичной наплавки
2 – первичного переплава
3 – двойного переплава перекрытия
4 – двойного переплава первичной наплавки
5 – ЗТВ после первичной наплавки
6 – ЗТВ после вторичной наплавки
7 – основа

При наплавке двух дорожек по высоте в области лазерного воздействия появляются три зоны (рис. 3): зона наплавки при вторичном воздействии лазера; зона двойного переплава, образующаяся в результате повторного нагрева и охлаждения области первичной наплавки; и ЗТВ.

При наплавке третьей дорожки области двойного переплава зоны оплавления возникают в результате повторного нагрева наплавки до температур плавления и последующего быстрого охлаждения (рис. 4).

Степень перекрытия слоев при исследованном режиме лазерного воздействия составляет $\sim 25\div 35\%$ (рис. 5).

Многokrатная лазерная обработка дает сложное строение наплавленных легированных слоев при всех представленных схемах наплавки за счет дополнительной диффузии легирующих элементов в образующихся зонах и перемешивания жидкого металла под действием конвективного движения (табл. 2).

При анализе распределения легирующих элементов в покрытии, полученном при трехкратной лазерной обработке, установлено, что его слои химически неоднородны, и это существенно влияет на фазовый и структурный составы наплавки. В ее слоях характер изменения концентраций вышеуказанных химических элементов одинаков (рис. 6). Их снижение происходило при каждом повторном лазерном воздействии. Поверхностные слои практически близки по составу к наплавляемой стали, а наименьшее количество легирующих элементов имеет слой, наплавленный на основу при первичной обработке. Такое снижение объясняется тем, что при повторных лазерных воздействиях часть легирующих элементов, за счет сравнительно невысоких температур их кипения (см. табл. 2) по сравнению с температурой в области лазерного воздействия, переходит из жидкой фазы в газообразную форму.

Результаты рентгеноструктурного и спектрального анализов показали, что при ЛН формируется микроструктура с различными структурным и фа-

Таблица 2. Химический состав (%) наплавки (трехкратная по оптимальному режиму)

Расстояние от поверхности наплавки, мм	C	Si	Cr	Mo	V
Исходная сталь Н13	0,4–0,5	0,85	5,5	1,32	1,59
0	0,44	0,97	5,66	1,28	1,51
0,10	0,41	0,85	5,65	1,21	1,46
0,26	0,40	0,84	5,29	1,11	1,33
0,38	0,40	0,81	5,05	1,07	1,20
0,50	0,34	0,51	2,92	0,54	0,65
0,63	0,34	0,24	0,97	0,02	0,01
Температура кипения, К					
	5100	2623	2945	4885	3650

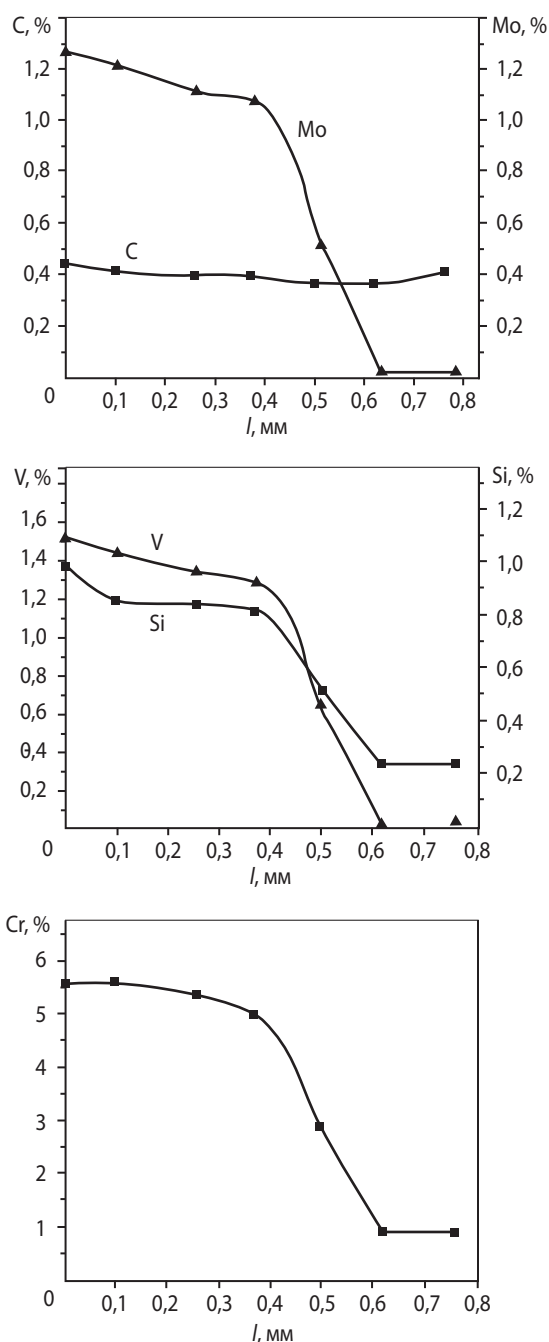


Рис. 6. Изменение содержания легирующих элементов в наплавке по слоям

l – расстояние от поверхности наплавки

Таблица 3. Характеристики кристаллической решетки

Материал	Параметр решетки a , Å	Размер блока D , мкм	Напряжение σ , МПа
Чистое α -железо	2,8664		
Наплавка стали Н13:			
без отпуска	4,9924	0,58	257
650 °С	2,8741	0,131	127
750 °С	2,8721	0,131	127

зовым составами. Ее отличает значительная неоднородность образующихся фаз, обусловленная химической неоднородностью слоев наплавки. Однако несмотря на малую длительность существования жидкого состояния, в структуре наплавки успевают сформироваться фазы, традиционные для обычных сплавов (мартенсит, пересыщенные твердые растворы, карбиды), но с отличающимися свойствами.

Рентгеноструктурный анализ позволил обнаружить в структуре наплавки пересыщенные твердые растворы на базе α -железа (табл. 3), а также неравномерно распределенные упрочняющие фазы типа Cr_{23}C_6 и Cr_7C_3 .

По результатам замера твердости построены зависимости ее распределения по глубине всей наплавки при различных количествах ЛН.

На рис. 7 представлено изменение микротвердости при наплавке одной дорожки. Поверхность зоны проплавления имеет сравнительно небольшой разброс в твердости – от 3700 до 3900 МПа.

Зона термического влияния может быть представлена двумя подзонами (рис. 8): прилегающей к зоне проплавления ($H_{50} = 2000 \div 3000$ МПа) и находящейся у основы ($H_{50} = 1700$ МПа).

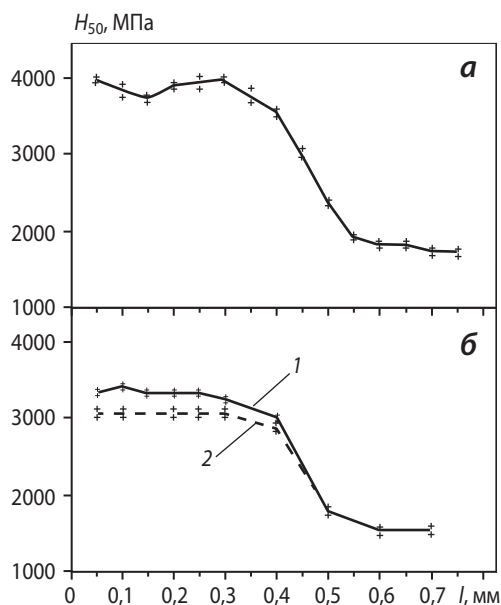


Рис. 7. Распределение микротвердости по глубине одной дорожки

а – без последующего нагрева; **б** – после нагрева
1 – 650 °С, 2 ч; **2** – 750 °С, 2 ч

l – расстояние от поверхности наплавки

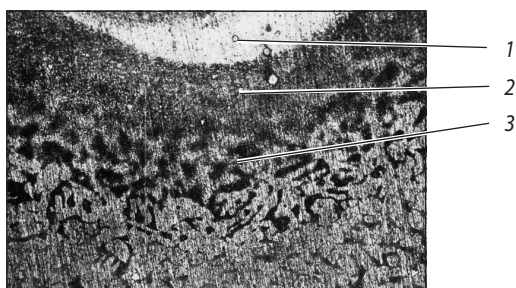


Рис. 8. Микроструктура зоны термического влияния
1 – зона проплава; 2 – подзона, прилегающая к зоне проплава;
3 – подзона, находящаяся у основы

При проплавке двух дорожек (рис. 9) наблюдается изменение твердости, характерное для многослойной наплавки. При наплавке второй дорожки в поверхностном слое имеет место незначительный разброс твердости от 4200 до 4300 МПа, затем происходит ее падение до 3500–3600 МПа. С переходом на первую нанесенную дорожку твердость снова растет до 4000–4100 МПа. Дальнейшее ее понижение наблюдается в ЗТВ.

Характер изменения твердости после нагрева для числа дорожек $n > 1$ такой же, как после нагрева для одной дорожки (см. рис. 7, б)

В зоне перекрытия наплавки твердость не меняется по сравнению с основной зоной.

Такой сложный характер поведения твердости для всех видов наплавки можно объяснить тем, что на формирование структуры и, соответственно, твердости оказывает влияние ряд факторов:

- 1) жидкая ванна расплава имеет сложный неоднородный химический состав;
- 2) при больших скоростях плавления и охлаждения не происходит равномерного перемешивания состава жидкой ванны;

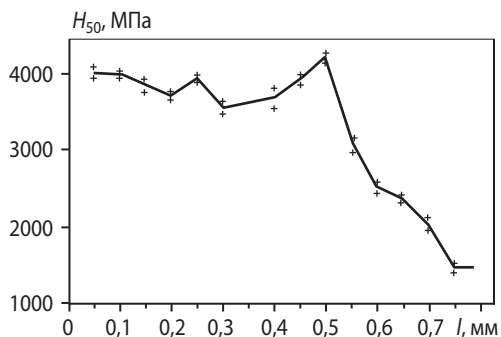


Рис. 9. Распределение микротвердости по глубине двух дорожек

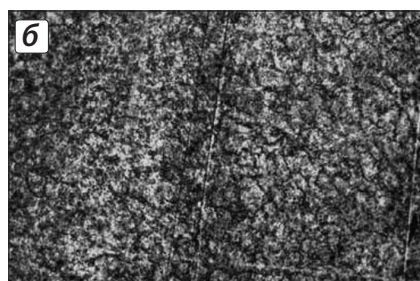
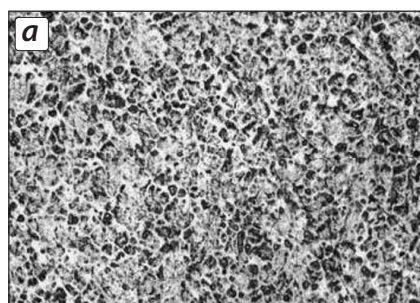


Рис. 10. Микроструктура наплавки (×500)
а – исходное состояние
б – после нагрева при температуре 750 °С, 2 ч

3) кристаллизация жидкой ванны осуществляется неравномерно по всему объему расплавленного металла;

4) при лазерном воздействии часть легирующих элементов переходит из жидкой фазы в газообразную за счет испарения;

5) при многократной ЛН происходит повторный нагрев, а охлаждение предыдущих слоев приводит к повторной закалке и последующему многократному отпуску.

Таким образом, структура лазерных слоев на различной глубине разная. В поверхностном слое формируется структура пересыщенных твердых растворов, а в нижних слоях присутствуют ферритно-цементитные фазы и неравномерно распределенные карбидные включения.

Жесткие температурные условия нагрева и охлаждения при ЛН приводят к возникновению сложного уровня внутренних напряжений, образованию гетерогенной и дисперсной структуры и значительному колебанию микротвердости (в отдельных участках – от 7900 до 4000 МПа) по всей глубине наплавки, включая ЗТВ. Для снижения напряжений, получения более устойчивого структурного состояния проводили нагрев наплавленного металла при температурах 650 и 750 °С в течение 2 ч в специальной засыпке. Для всех типов наплавки это вызвало снижение твердости во всех ее слоях: в зоне наплавки – от 7900 до ~ 3000 МПа,

в ЗТВ – до ~ 2200 МПа. В ЗТВ твердость выше, чем у основы, и она является как бы переходной от зоны проплава к матрице. Эта зона оказывает благоприятное влияние на свойства наплавки.

В процессе нагрева в структуре происходят существенные изменения, связанные с распадом пересыщенных твердых растворов и образованием ферритно-цементитных фаз с высокодисперсными структурами типа троостита и сорбита отпуска (рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многослойная структура во всех исследованных схемах наплавки формируется в результате закали и многократного отпуска. В большей степени она зависит от количества легирующих элементов, приходящихся на единицу объема расплавленного металла, а скоростные процессы нагрева и охлаждения обеспечивают образование дисперсной структуры с разнообразным фазовым составом.

Измерения твердости по глубине всей наплавки показали значительный разброс микротвердости в каждой последующей нанесенной дорожке.

Нагрев наплавки всех видов при температурах 650 и 750 °С приводит к снижению твердости и напряжений, уменьшению размера блоков и параметра кристаллической решетки железа (см. табл. 3).

Полученные результаты позволяют упростить подбор режимов для процесса лазерной наплавки исходя из заданных эксплуатационных свойств конкретных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки. М.: Высш. шк., 1987.
2. Tominsky V.S., Postnikov V.S. // Key Eng. Mater. Trans. Tech. Publi. 1990. Vol. 46–47. P. 473.
3. Долговечный А. В., Демидова Л. А., Морозов Е. А. // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1(2). С. 550.

УДК 537.534.9 : 621.785

МИКРОСТРУКТУРА, ТЕПЛОПЕРЕНОС И ПЛАВЛЕНИЕ СЛОЕВ ТВЕРДОГО СПЛАВА, СОДЕРЖАЩЕГО КАРБИДЫ ТИТАНА И ВОЛЬФРАМА, В УСЛОВИЯХ МОЩНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

© 2014 г. **А. К. Кулешов, А. С. Якушевич, В. В. Углов, В. М. Асташинский, Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Крутилина**

Белорусский государственный университет (БГУ), г. Минск, Респ. Беларусь
«Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны», г. Минск, Респ. Беларусь
Институт физики (ИФ) им. Б. И. Степанова НАНБ, г. Минск, Респ. Беларусь
Институт сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, г. Томск

Статья поступила в редакцию 06.02.2013 г., доработана 06.03.2013 г., подписана в печать 11.03.2013 г.

А. К. Кулешов – канд. физ.-мат. наук, зав. НИЛ «Физика ионно-плазменной модификации твердых тел» физического факультета БГУ (220030, Респ. Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 4). Тел.: (+375 17) 226-58-34. Факс: (+375 17) 226-55-52. E-mail: kuleshak@bsu.by.

А. С. Якушевич – магистрант Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны» (220109, Респ. Беларусь, г. Минск, ул. Красина, 99). Тел.: (+375 29) 211-64-99. E-mail: jakuban@yandex.by.

В. В. Углов – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой физики твердого тела БГУ. Тел.: (+375 17) 209-51-34. Факс: (+375 17) 226-54-45. E-mail: uglov@bsu.by.

В. М. Асташинский – докт. физ.-мат. наук, зав. сектором физики плазменных ускорителей ИФ НАНБ (220072, Респ. Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 68). Тел.: (+375 17) 284-10-65. E-mail: ast@imaph.bas-net.by.

Н. Н. Коваль – докт. физ.-мат. наук, проф., зам. директора по научной работе ИСЭ СО РАН (634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3). Тел.: (3822) 49-17-06. E-mail: koval@hcei.isc.ru.

Ю. Ф. Иванов – докт. физ.-мат. наук, проф., ст. науч. сотр. ИСЭ СО РАН. Тел.: (3822) 43-17-13. E-mail: yufi55@mail.ru.

Е. А. Крутилина – аспирант кафедры физики твердого тела физического факультета БГУ. Тел.: (+375 17) 209-55-12. Факс: (+375 17) 226-55-52. E-mail: uglov@bsu.by.