

УДК 621.793:621.891

## Структурно-фазовое состояние и трибологические свойства покрытий на основе самофлюсующегося никелевого сплава ПГ-12Н-01 после лазерной наплавки

О. Г. ДЕВОЙНО<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Е. Э. ФЕЛЬДШТЕЙН<sup>2</sup>, д-р техн. наук, М. А. КАРДАПОЛОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Н. И. ЛУЦКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь (scvmed@bntu.by)

<sup>2</sup> Зеленогурский университет, г. Зелена Гура, Польша (E.Feldshtein@ibem.uz.zgora.pl)

*Рассмотрены некоторые параметры лазерной наплавки самофлюсующегося никелевого сплава ПГ-12Н-01. В зависимости от скорости наплавки возможно формирование различных структур, содержащих относительно легкоплавкую эвтектику  $\gamma$ -Ni – Ni<sub>3</sub>B и эвтектику  $\gamma$ -Ni – Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, которая кристаллизуется при более высоких температурах и составляет прочностной корсет покрытия. Установлено влияние скорости наплавки на износостойкость покрытия и значения коэффициентов сухого трения.*

**Ключевые слова:** лазерная наплавка; никелевый сплав; структура и фазовый состав; коэффициент трения; интенсивность изнашивания.

## ВВЕДЕНИЕ

Износостойкие покрытия играют важную роль в обеспечении повышенной надежности деталей и машины в целом. Известно много методов их нанесения — гальванические, плакирование, электроискровое упрочнение, наплавление в электрической дуге, в струе плазмы, с помощью электронных или ионных пучков, с помощью лазерного излучения и т.п.

Лазерные технологии имеют широкое применение, поскольку отличаются универсальностью оборудования и широким спектром технологических возможностей [1–3]. Известны исследования, посвященные оптимизации технологических параметров лазерной наплавки [4, 5], формированию покрытий с различными структурами [4, 6–8], изучению механических, физических и эксплуатационных свойств покрытий [9–11].

Наиболее широко для упрочнения рабочих поверхностей используются три группы материалов, а именно, самофлюсующиеся твердые сплавы на железной, никелевой и кобальтовой основе [12–14]. Сплавы на никелевой и кобальтовой основе характеризуются хорошей смачиваемостью, раскисляющей и флюсообразующей способностью [12], высокими физическими и механическими характеристиками [13, 14], высоким сопротивлением изнашиванию, окислению и высокотемпературной коррозии [15, 16].

Цель настоящей работы — анализ влияния условий лазерной наплавки на формирование геометрии и структурно-фазового состояния покрытия на основе самофлюсующегося никелевого сплава ПГ-12Н-01.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Используемый в качестве материала покрытия самофлюсующийся никелевый сплав ПГ-12Н-01 имеет следующий химический состав (% масс.): основа — Ni; 0,3–0,6 С; 1,7–2,2 В; 1,2–3,2 Si; 8–14 Cr; 1,2–1,3 Fe.

Покрытие наносили на подложку из стали 45 методом лазерной наплавки. Исходный порошок просеивали до грануляции 20–80 мкм при помощи набора сит, а затем просушивали в электропечи при 200 °С в течение 2 ч. Для наплавки применяли технологический газовый (CO<sub>2</sub>) лазер непрерывного действия "Комета 2" мощностью 1 кВт. Подачу порошка в рабочую зону осуществляли с расходом 8–20 г/мин коаксиально лазерному лучу через специально разработанное сопло. Принципиальная схема наплавки представлена на рис. 1, а.

Наплавку осуществляли в диапазоне скоростей 40–120 мм/мин при дистанциях наплавки 10, 12 и 14 мм; шаг наплавки 1,2 мм. Диаметр луча принимали равным 1 мм, соответственно плотность мощно-

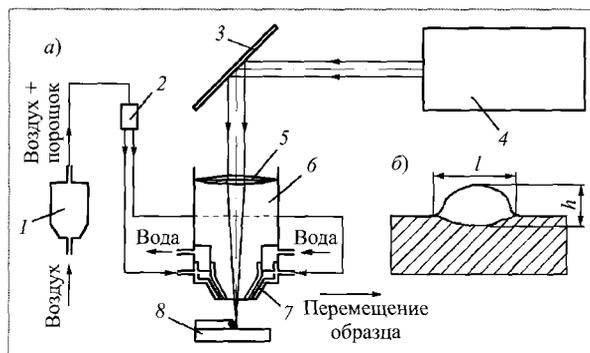


Рис. 1. Схема лазерной наплавки (а) и размеры наплавленного валика (б):

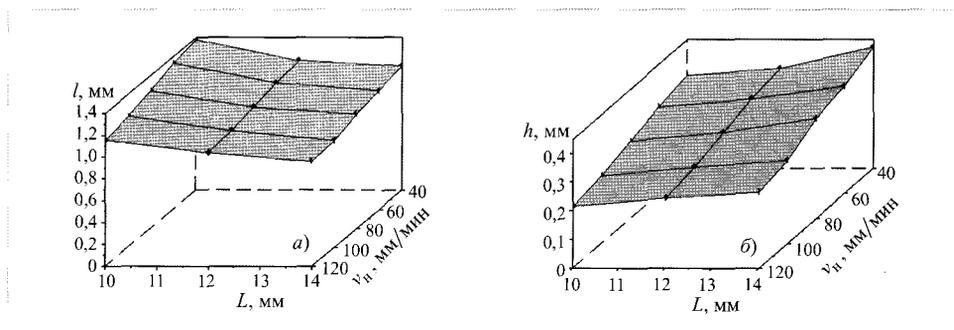
1 — порошковый питатель; 2 — распределитель газопорошковой смеси; 3 — система поворотных зеркал; 4 — лазерная установка; 5 — фокусирующая линза; 6 — наплавочная головка-объектив; 7 — наплавочное коаксиальное сопло; 8 — наплавляемый образец

сти лазерного излучения составляла  $1,27 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Коэффициент перекрытия одиночных дорожек после наплавки принимали равным 0,25.

После наплавки образцы разрезали в направлении, перпендикулярном валикам, изготавливали поперечные шлифы зон наплавки, а затем определяли ширину  $l$  и высоту  $h$  валика (рис. 1, б). Определение размеров одиночных валиков проводили при помощи металлографического микроскопа "Микро Р200".

Микроструктуру наплавленных валиков и переходной зоны исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа "Mira".

Трибологические испытания проводили в условиях сухого трения на установке МИПТ (модуль по исследованию процессов трения), являющейся частью автоматизированного комплекса АКПП для исследования процессов трения [17]. Испытания основаны на возвратно-поступательном движении контртела относительно образца по схеме "алмазный наконечник — плоскость" для испытаний на изнашивание и по схеме "шарик — плоскость" для определения коэффициента трения скольжения как отношения силы трения к силе нормального давления. Сила нормального давления, действующая перпендикулярно контактирующим поверхностям, обеспечивалась набором гирь из равновеса. Величину силы трения регистрировали с помощью тензометрических датчиков, коэффициент трения автоматически рассчитывался и регистрировался в координатах "коэффициент трения — путь трения". Контртело для испытаний на изнашивание представляло собой цангу с закрепленным в ней алмазным наконечником прибора Роквелла. Нормальная нагрузка составляла 2 Н. скорость движения каретки 5 мм/с, длина единичного прохода 15 мм, путь трения ~ 10 м. За величину износа принимали объем изношенного материала. Для его определения при помощи профилографа-



**Рис. 2.** Зависимость ширины валика  $l$  (а) и высоты валика  $h$  (б) от скорости наплавки  $v_n$  и дистанции наплавки  $L$

профилометра “Профи-130” измеряли глубину и ширину дорожки износа. Объем изношенного материала рассчитывали по формуле:  $V = 0,5bhl$ , где  $b$  — ширина дорожки износа;  $h$  — глубина дорожки износа;  $l$  — длина единичного прохода. Интенсивность изнашивания, отнесенную к 1 км пути трения, определяли по формуле:  $I_v = 100V$ .

Контртело для определения коэффициента трения представляло собой шарик диаметром 3 мм из закаленной стали ШХ15. Условия трения: скорость движения каретки 5 мм/с, длина единичного прохода 15 мм, путь трения 10 м, нормальная нагрузка на индентор 0,2 Н. В качестве коэффициента трения принимали среднее из набора рассчитанных мгновенных значений, соответствующих горизонтальному участку кривой на заключительном этапе испытаний.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что ширина валиков увеличивается при уменьшении дистанции наплавки (рис. 2, а). В этом случае происходит некоторая расфокусировка луча лазера, увеличивается пятно нагрева и, как следствие, увеличивается ширина валика. Скорость наплавки также оказывает влияние на ширину валика, хотя в меньшей степени.

Высота получаемых валиков также зависит от режимов лазерной наплавки. С увеличением дистанции наплавки уменьшается энергия, переходящая в ванну расплава, зато высота наплавки возрастает. Влияние скорости наплавки на высоту валиков более существенно (рис. 2, б).

Структура покрытия зависит как от параметров лазерной наплавки, так и от положения единичного валика на поверхности подложки (рис. 3, см. обл.). При низких скоростях перемещения луча лазера структура наплавленного слоя имеет дендритный характер с ориентированием осей дендритов в направлении теплоотовода (рис. 3, а, б), при этом отдельные частицы твердого раствора на основе никеля принимают глобулярную форму (рис. 3, в). При увеличении скорости перемещения луча лазера в 2 раза

наблюдается измельчение структурных составляющих (рис. 3, з, д). Рентгеноструктурные исследования позволили установить [18], что в междендритном пространстве формируется легкоплавкая  $\gamma$ -Ni – Ni<sub>3</sub>B и карбидная  $\gamma$ -Ni – Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> эвтектика (рис. 3, е). Наличие указанных эвтектик подтверждается также микрорентгеноспектральным анализом в характеристическом излучении (рис. 4, см. обл.).

Различия в структурах обусловлены условиями теплообмена между слоем расплавленного покрытия и подложкой. При наложении валиков для прохождения реакции восстановления оксидных пленок необходимо дополнительное время. Оно включает время восстановления оксидных пленок между подложкой и наплавленным слоем, между частицами порошка и время восстановления оксидов между слоями. Участки, примыкающие к соседнему слою, испытывают двукратное температурное воздействие, вследствие чего размер дендритов твердого раствора, прилегающих к краю валика, несколько увеличивается. Переходная зона, составляющая 40 – 100 мкм в зависимости от режимов наплавки, свидетельствует о наличии химической связи между наплавленным слоем и подложкой.

С увеличением скорости и расстояния наплавки структурные составляющие измельчаются, переходя в квазиэвтектические структуры. Так как дендриты кристаллизуются под углом 45° к поверхности, наиболее плотноупакованная плоскость кристаллической решетки [111] расположена на поверхности.

Как отмечалось выше, структура сплава состоит из двух видов эвтектик:  $\gamma$ -Ni – Ni<sub>3</sub>B, температура плавления которой составляет 1000 °С, и  $\gamma$ -Ni – Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, которая кристаллизуется при более высоких температурах и составляет прочностной корсет покрытия. Вторичные бориды кристаллизуются в виде небольших зародышей и не успевают вырасти, т.е. прочностной скелет покрытия способствует высокой коррозионной стойкости в щелочах и кислотах, а легкоплавкая эвтектика залечивает поры, трещины и другие единичные дефекты [18].

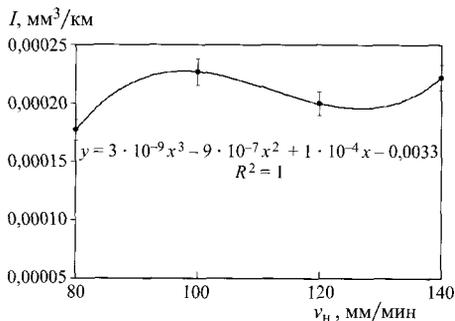


Рис. 5. Влияние скорости наплавки ( $v_n$ ) на интенсивность изнашивания ( $I$ ) покрытия

Структурно-фазовое состояние слоя покрытия оказывает непосредственное влияние на его трибологические характеристики. По мере увеличения скорости наплавки износостойкость покрытия изменяется (рис. 5). При малых скоростях наплавки и большой тепловой мощности, переходящей в покрытие, образуется крупнозернистая структура с равномерным распределением упрочняющих фаз, благоприятно влияющая на износостойкость. При увеличении скорости наплавки и уменьшении тепловой мощности размеры зерен уменьшаются и объемный износ снижается. При дальнейшем увеличении скорости все большую роль начинает играть неполное сплавление материала валиков по границам зерен, приводящее к росту объемного износа, несмотря на уменьшение размеров зерен. Следует отметить, что наилучшими для исследуемого покрытия являются скорости наплавки  $\sim 80$  мм/мин и  $\sim 120$  мм/мин.

Зависимости коэффициента трения от пути трения представлены на рис. 6, а. Для покрытий, нанесенных при низких скоростях наплавки (80 и 100 мм/мин) в начальный период (до 1 м пути трения) происходит достаточно быстрый рост коэффициента трения, связанный с приработкой трущихся поверхностей. Схватывания на этих участках не происходит, так как отсутствуют резкие изменения коэффициента трения. Далее, в диапазоне 4,5 – 7 м пути трения, рост коэффициента трения продолжается, но гораздо медленнее. На последнем участке пути трения процесс трения стабилизируется, и коэффициент трения практически не изменяется.

Для покрытий, полученных при высоких скоростях наплавки (120 и 140 мм/мин), зависимости коэффициента трения от пути трения несколько изменяются. В начале пути трения (до 0,5 м) коэффициент трения растет очень быстро, причем на этих участках наблюдаются скачки коэффициента трения, свидетельствующие о протекании процессов схватывания. В дальнейшем, на пути трения 6 – 7 м, происходит более медленное возрастание коэффициента

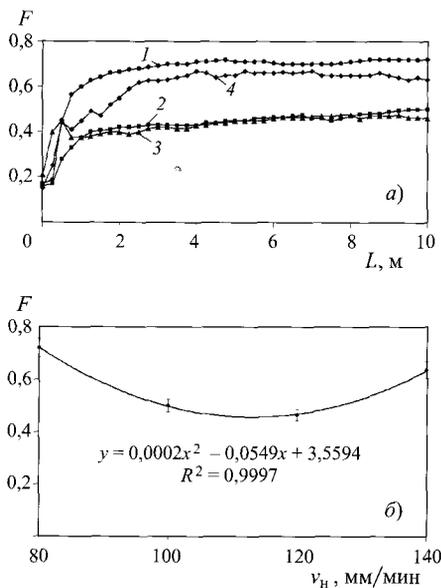


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения ( $F$ ) от пути трения ( $L$ ) (а) и скорости наплавки ( $v_n$ ) (б):

1 —  $v_n = 80$  мм/мин; 2 —  $v_n = 100$  мм/мин; 3 —  $v_n = 120$  мм/мин; 4 —  $v_n = 140$  мм/мин

трения, также сопровождающееся схватыванием контактирующих поверхностей. На последнем участке пути трения, как и при более низких скоростях наплавки, коэффициент трения имеет достаточно стабильное значение. Процессы схватывания в покрытиях, полученных при скоростях наплавки 120 и 140 мм/мин, обусловлены тем, что при таких скоростях наплавки уменьшается мощность теплоты, переходящей в покрытие. Это приводит к неполному сплавлению материала валиков по границам зерен и выкрашиванию частиц материала покрытия, которые становятся зародышами процессов схватывания.

На основании анализа коэффициентов трения в конце пути трения (условия стабилизации) можно рекомендовать скорости наплавки 110 – 120 мм/мин, как обеспечивающие наилучшие условия трения (рис. 6, б). Такая зависимость коэффициента трения от скорости наплавки обусловлена тем, что при  $v_n = 80$  мм/мин за счет большого количества теплоты в покрытии в нем формируется крупнозернистая структура, обладающая, как было установлено ранее [10], невысокой твердостью, вследствие чего коэффициент трения составляет  $\sim 0,7$ . При увеличении скорости наплавки до 100 – 120 мм/мин в покрытии создаются условия для образования оптимальной мелкозернистой структуры с достаточно высокой твердостью, и коэффициент трения уменьшается до 0,45 – 0,5. При дальнейшем увеличении скорости наплавки и количества теплоты в покрытии все большую роль начинает играть неполное сплавление материала валиков по границам зерен. При этом умень-

шается твердость и увеличивается коэффициент трения.

### ВЫВОДЫ

1. В зависимости от скорости лазерной наплавки на основе самофлюсующегося никелевого сплава ПГ-12Н-01 возможно формирование как равномерных структур, так и структур со значительным содержанием дендритов. Структура сплава состоит из двух видов эвтектик:  $\gamma$ -Ni – Ni<sub>3</sub>B, температура плавления которой составляет 1000 °С, и  $\gamma$ -Ni – Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, которая кристаллизуется при более высоких температурах и составляет прочностной корсет покрытия.

2. По мере увеличения скорости наплавки износостойкость покрытия изменяется вследствие структурных изменений. Наилучшие результаты достигнуты при малых (~ 80 мм/мин) скоростях наплавки, обеспечивающих более равномерную структуру, и более высоких скоростях (~ 120 мм/мин), при которых наблюдается измельчение зерен. Повышение износостойкости может достигать 30 %.

3. Наименьшие значения коэффициента сухого трения обеспечиваются при скоростях наплавки 110 – 120 мм/мин. В зависимости от скорости наплавки его стабилизация происходит после 0,5 м пути трения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kwok C. T. Laser Surface Modification of Alloys for Erosion and Corrosion Resistance. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2012.
2. Ion J. C. Laser Processing of Engineering Materials. Principles, Procedure and Industrial Application. Cambridge: Elsevier Ltd, 2005.
3. Majumdar J. Dutta, Manna I. Laser material processing // Int. Mater. Rev. 2011. V. 56. P. 341 – 388.
4. Архипов В. Е., Аблаев А. А., Краснов Л. Т. Структура и свойства покрытий, наплавленных излучением CO<sub>2</sub>-лазера // МиТОМ. 1992. № 7. С. 18 – 21.
5. Архипов В. Е., Москвитин Г. В., Поляков А. Н., Широкова Н. В. К вопросу снижения потерь при лазерной наплавке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 8. С. 14 – 19.
6. Тескер Е. И., Гурьев В. А., Тескер С. Е. Микроструктура и свойства наплавленных лазером поверхностных слоев //

- Физика и химия обработки материалов. 2004. № 1. С. 35 – 38.
7. Астапчик С. А., Маклаков А. Г., Горанский Г. Г., Абрамов В. М. Лазерная наплавка аморфизированного порошка на железной основе // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2008. № 2. С. 5 – 9.
8. Корешков Р. Н., Петровский В. Н., Джумаев П. С., Пальский В. И. Технологические особенности формирования структуры лазерных наплавки с использованием излучения мощных волоконных лазеров // МиТОМ. 2014. № 5. С. 30 – 34.
9. Архипов В. Е., Аблаев А. А., Краснов Л. Т. Физико-механические характеристики покрытий, наплавленных лазерным излучением // Сварочное производство. 1992. № 1. С. 18 – 20.
10. Девойно О. Г., Кардаполова М. А., Луцко Н. И., Кабальчук О. Н. Формирование однослойных композиционных полосчатых покрытий из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, получаемых лазерной наплавкой // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. С. 177 – 184.
11. Григорьянц А. Г., Мисюрюк А. И., Шиганов И. Н. и др. Сравнение коррозионной стойкости покрытий из кобальтовых и никелевых сплавов, наплавленных лазерным излучением // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2012. С. 174 – 180.
12. Ju Y., Guo S. Y., Li Z. Q. Status and development of laser surface alloying and laser cladding in China // Mater. Sci. Eng. 2002. V. 20, No. 1 – 2. P. 143 – 145.
13. Hemmati I., Huizenga R. M., Ocelik V., De Hosson J. Th. M. Microstructural design of hardfacing Ni – Cr – B – Si – C alloys // Acta Mater. 2013. V. 61, No. 16. P. 6061 – 6070.
14. Tong Xin, Li Fu-hai, Liu Min et al. Thermal fatigue resistance of non-smooth cast iron treated by laser cladding with different self-fluxing alloys // Optics & Laser Technology. 2010. V. 42, No. 7. P. 1154 – 1161.
15. Fernández E., Cadenas M., González R. et al. Wear behaviour of laser clad NiCrBSi coating // Wear. 2005. V. 259. No. 7 – 12. P. 870 – 875.
16. Chen H., Xu C., Qu J. et al. Sliding wear behaviour of laser clad coatings based upon a nickel-based self-fluxing alloy co-deposited with conventional and nanostructured tungsten carbide – cobalt hard metals // Wear. 2005. V. 259, No. 7 – 12. P. 801 – 806.
17. <http://belisa.org.by/other/catalog17/project885.html?projectSN=20082544-001>.
18. Девойно О. Г., Калининко А. С., Кардаполова М. А. Модифицирование поверхности покрытий с использованием лазерного нагрева. Минск: БНТУ, 2013. 228 с.