

Лузан С.А.

Харьковский национальный  
технический университет  
сельского хозяйства  
имени П.Василенка,  
г. Харьков, Украина  
E-mail: khadi.luzan@gmail.com

АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ  
НАПЛАВКИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ,  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

УДК 631.3.004.8:339.13

*Рассмотрены теоретические основы механизма упрочнения наплавленных покрытий. Предложен алгоритм разработки технологии наплавки защитных покрытий, модифицированных износостойкими композиционными материалами, полученными с применением СВС-процесса.*

**Ключевые слова:** композиционный материал, механоактивация, карбид, оксид.

**Введение.** В результате эксплуатации рабочие органы сельскохозяйственных машин, работающие в контакте с абразивной средой, подвергаются значительному износу. Это прежде всего лемеха плугов, диски тяжелых борон, стрелчатые лапы культиваторов.

В процессе абразивного изнашивания поверхностные слои испытывают сложно-напряженное состояние. При этом воздействие абразивов, вдавливаемых в рабочую поверхность и затем перемещающихся относительно её, характеризуется неравномерностью распределения по поверхности. В этих условиях механические и физические свойства структурных составляющих приобретают большее значение, чем общие свойства сплава, определяемые стандартными методами.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для противодействия воздействию внешней среды металл должен иметь твердую составляющую, сопротивляющуюся воздействию абразива. Такой составляющей в металле чаще всего являются карбиды [1]. Эти карбиды должны быть связаны матрицей, свойства которой имеют двойное значение; она скрепляет карбидные частицы, и сама непосредственно противодействует изнашиванию. Так, твердая матрица (мартенсит) сама по себе способна противостоять абразивному износу. Вязкая матрица из нестабильного аустенита также может обеспечить высокую износостойкость, поскольку, с одной стороны, она обеспечивает хорошее закрепление карбидов и сопротивление металла ударным нагрузкам, а с другой – под влиянием воздействия абразива, в определенных условиях, она может претерпевать мартенситное превращение в поверхностном слое с повышением за счет этого сопротивления воздействию абразива. В работе [1] сделан вывод, что износостойкость с твердостью можно отождествлять только для того же материала после различной термообработки. Для разных по структурной природе материалов износостойкость с твердостью отождествлять нельзя.

Все износостойкие сплавы обладают высоким содержанием карбидов, боридов и карбоборидов, что обеспечивает высокую твердость и жаропрочность защитных покрытий [1-3].

Защитные покрытия, работающие при ударно-абразивном изнашивании, также включают две составные части – основу и упрочняющую фазу [4, 5]. Основа является вязкой матрицей, удерживающей в себе тугоплавкие соединения, являющиеся упрочняющей фазой. Основа защитных покрытий может быть ферритной, феррито-перлитной, аустенитной, мартенситной и аустенитной (с метастабильным аустенитом, превращающимся при механическом воздействии на него в мартенсит). Одной из самых благоприятных основ является метастабильный аустенит, а также аустенит [1], поскольку в такой основе карбиды прочно удерживаются в силу высокой пластичности матрицы. При воздействии абразива аустенит пластично деформируется, поэтому частицы карбидов не

выкрашиваются. Отрицательным качеством аустенитной основы является высокая скорость износа, поэтому для уменьшения износа добавляются дополнительные элементы, повышающие ее твердость. Чистая никелевая основа не может применяться, так как скорость ее износа существенно превышает износ карбидов, и они просто выкрашиваются при оголении [1]. Метастабильный аустенит при механических воздействиях переходит в мартенсит, образуя защиту аустенита твердой оболочкой, при этом остальной аустенит прочно удерживает карбиды. Упрочняющая фаза состоит, как правило, из карбидов, боридов, карбоборидов, алюминидов [1, 3]. Известно, что порошок марки ПС-12НВК-01 ТУ 48-19-383-91, представляющий собой механическую смесь порошка ПГ-10Н-01 (65%) и карбида вольфрама WC (35%), эффективно используется в качестве износостойкого и коррозионностойкого покрытия [2, 7].

В ряде работ [5, 12] указано, что для защитных покрытий, работающих в условиях ударного или ударно-абразивного износа, существует максимально допустимый объем упрочняющей фазы в покрытии, который находится в пределах от 20 до 35%. При повышении в составе защитного покрытия упрочняющей фазы более 35% происходит увеличение внутренних напряжений, снижение количества более пластичной фазы (основы), что, в конечном счете, приводит к снижению ударной вязкости.

Это связано с фактором, при котором абразив может не только скользить по поверхности, но и проникать между пластичной основой и карбидом, что приведет, в конечном итоге, к выпадению частицы карбида. При этом необходимо отметить, что присутствие в сплаве боридов приводит к существенному повышению износостойкости, но стойкость к ударному износу снижается в разы ввиду более высоких значений твердости [1, 8]. Т. е. для повышения стойкости против износа покрытия с аустенитной основой и упрочняющей фазой в количестве до 35% должны содержать карбиды WC, TiC, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, W<sub>2</sub>C. К тому же они имеют большую технологичность по сравнению с покрытиями на феррито-перлитной основе с упрочняющей фазой в количестве 85% (НВ 1750 кгс/мм<sup>2</sup>) в виде одноатомарного карбида вольфрама (WC).

**Постановка проблемы.** Предложить алгоритм разработки технологии наплавки защитных покрытий, модифицированных износостойкими композиционными материалами, синтезированными с применением СВС-процесса.

**Основная часть.** Большое количество выпускаемых промышленностью порошковых материалов имеет аустенитную структуру. Это позволяет применять их при защите от ударно-абразивного воздействия. Наплавочные материалы типа электродов, проволок сплошного сечения или порошковых проволок имеют следующие недостатки: 1) высокое перемешивание наплавленного с основным материалом; 2) неравномерность химического состава защитного покрытия; 3) высокая стоимость наплавочных материалов, содержащих тугоплавкие материалы. Следовательно, при наплавке защитных покрытий с целью повышения абразивной износостойкости целесообразно применять порошковые материалы на никелевой основе, упрочненные дополнительно композиционными материалами, содержащими карбиды, бориды и другие упрочняющие фазы.

Износостойкие покрытия системы Ni-Cr-B-Si-Fe наносят плазменным и газоплазменным напылением и наплавкой, а также электродуговыми способами наплавки. Наплавленный износостойкий слой характеризуется высоким сопротивлением против изнашивания, ударных нагрузок, коррозии и окисления при нормальных и повышенных температурах до 650°C. Применяется для упрочнения и восстановления деталей машин, оборудования и технологической оснастки.

Самофлюсующиеся твердые сплавы на основе никеля являются многофазной системой, состав которой изменяется вследствие перемешивания компонентов и взаимных диффузионных процессов, протекающих между материалом основы и наплавленным

слоем, а также в результате удаления части флюсующих компонентов, таких как кремний и бор, с легкоплавкими шлаками [9].

Наплавленные такими сплавами покрытия обладают высокими технологическими свойствами благодаря наличию в их структуре тугоплавких соединений - карбидов, боридов и др. Количество и строение карбидной фазы, зависящий от химического состава наплавляемого сплава, в значительной степени определяет его свойства: износостойкость, твердость, ударостойкость.

Так, износостойкость зависит от типа образующихся карбидов и их количества. Например, покрытия с кубическим карбидом хрома ( $Cr_3C_2$ ) обладают более высоким сопротивлением абразивному изнашиванию, чем покрытия с тригональным карбидом хрома ( $Cr_7C_3$ ). Образование в структуре твердых и хрупких боридов и легирование бором карбидов повышает износостойкость и твердость наплавленного металла при повышенной температуре, одновременно снижая ударную вязкость [10].

В работах [11, 12] показано, что износостойкость повышается, если структура имеет более высокий балл зерна, и в ней более равномерно распределены тугоплавкие соединения в виде карбидных и карбоборидных фаз [13]. Большое количество границ раздела в структуре препятствует активному движению дислокаций, их смыканию и возникновению «полостей», а впоследствии – образованию трещин и внедрению частиц абразива. Это способствует локализации усталостного разрушения в меньших объемах и снижению интенсивности изнашивания при трении. Частицы боридов, более твердых, чем цементит, служат препятствиями для перемещения дислокаций, и не позволяют им скапливаться в объемные дефекты типа трещин. При этом чем более мягкой и пластичной является эвтектика, тем большую долю энергии трения она воспринимает, и тем большую имеет способность релаксировать напряжения.

Износостойкость наплавленных слоев определяется не только наличием в сплаве карбидов и других тугоплавких соединений, но и строением матрицы [14], которая в основном для износостойких материалов является аустенитной. Однако и в аустенитной матрице количество карбидов должно быть в определенных пределах. При их содержании более 35% может произойти уменьшение износостойкости сплава, т.к. карбиды начинают выкрашиваться, а не изнашиваться. При формировании упрочненного слоя имеет место текстурирование никелевых зерен в направлении отвода тепла. Структура такого типа обладает пониженной схватываемостью при трении [11].

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что твердость и износостойкость покрытий в значительной степени зависят от структуры сплава, размера и количества включений карбидных, боридных, карбоборидных и других тугоплавких соединений. Поэтому разработку технологии и материала наплавки следует осуществлять с полнотой возможности управлять свойствами наплавляемого покрытия.

Структуру и свойства наплавленного металла можно изменить, с помощью металлургических и технологических приемов: воздействием на сварочную ванну дополнительными компонентами (модификаторами); введением элементов, образующих избыточные фазы. На наш взгляд перспективным является разработка композиционных материалов на основе карбидных, боридных, карбоборидных и других тугоплавких соединений, получаемых с применением СВС-процесса и введение их в основной (матричный) материал, применяемый для наплавки.

При наплавке износостойкого материала, содержащего композиционный материал, полученный с применением СВС-процесса, изменяются условия кристаллизации, в том числе распределение температур, а следовательно, и скорость охлаждения, и проплавление основного металла, химический состав металла сварочной ванны. Действие тугоплавких частиц композиционного материала объясняется появлением в расплавлен-

ном металле дополнительных центров кристаллизации, что приводит к увеличению скорости образования центров кристаллизации.

Одновременное уменьшение размеров зерна и дендритной ячейки возможно, если одновременно с увеличением скорости зарождения центров кристаллов уменьшается скорость объемного роста за счет повышения температуры расплава и приближения зоны роста к фронту кристаллизации. Эффективность использования композиционного материала заключается в увеличении скорости кристаллизации, так как именно при больших скоростях процесса, когда поверхность раздела фаз увеличивается, концентрация примеси в пограничном диффузионном слое и возможность механического захвата примеси растущими кристаллами значительно возрастает.

Таким образом, такие основные параметры кристаллизации, как количество центров кристаллизации и время первичной кристаллизации, можно изменять в процессе электродуговой наплавки, формируя различные типы структуры. Температурный градиент в сварочной ванне может быть повышен увеличением тепловой мощности электрической дуги или понижен при предварительном подогреве.

Скорость кристаллизации возможно регулировать путем изменением скорости наплавки и эффективной тепловой мощностью процесса. Электродуговая наплавка материала, состоящего из основного (матричного) материала системы Ni-Cr-B-Si и композиционного, полученного с применением СВС-процесса, позволяет управлять параметрами кристаллизации, структуры и в итоге свойствами упрочняющего или восстановительного покрытия.

За последние годы было опубликовано большое количество статей [15-18] посвященных модифицированию металла шва и наплавленного металла наноразмерными тугоплавкими частицами при реализации сварочных процессов.

Всеми авторами отмечается положительное воздействие модификатора на эксплуатационные свойства и размер зерна наплавленного металла. Так были опробованы различные способы сварки и наплавки с введением наноразмерных модификаторов при реализации таких процессов как: ручная дуговая сварка и наплавка плавящимися покрытыми электродами, механизированная сварка под слоем флюса, лазерная сварка, плазменно-порошковая наплавка и др.

В работах отмечается измельчение зерна металла швов и наплавленных покрытий в результате модифицирования наноразмерным карбидом вольфрама. Иногда микротвердость металла шва и наплавленных покрытий, выполненных при введении наноразмерных тугоплавких частиц, меньше по сравнению со швом и наплавками, выполненными без модификатора. Показано, что увеличивается доля равноосных зерен на поверхности шва, оси дендритов изогнуты вблизи центра шва. Результаты исследований химической неоднородности показывают, что модифицирование снижает неравномерность распределения легирующих элементов по сечению шва.

Имеются сведения по применению оксидов в качестве модификаторов. Оксиды – самые дешевые тугоплавкие материалы, а наноразмерный  $Al_2O_3$  - один из самых распространенных наноразмерных материалов [19].

Для выполнения работ по наплавке износостойкого в абразивной среде покрытия предлагается следующий алгоритм разработки технологии наплавки защитных покрытий, модифицированных износостойкими композиционными материалами, полученными с применением СВС-процесса (рис. 1).

Механоактивация порошковых материалов является важной технологической операцией, от которой зависят свойства получаемого композиционного материала. Сила воздействия в шаровых мельницах зависит от размеров применяемых шаров, оборотов барабана вокруг собственной оси и оборотов барабана вокруг центральной оси. Максимальное гравитационное ускорение при использовании шаровых мельниц 30G, а при

планетарних шарових мельницях досягає 60G, що дозволяє за кілька секунд отримати суттєві зміни розмірів частинок в оброблюваних матеріалах.



Рис. 1 – Алгоритм разработки технологии наплавки защитных покрытий, модифицированных износостойкими композиционными материалами, полученными с применением CVC-процесса

Отрицательным фактором механоактивационной обработки является возможность протекания химических реакций, а также невозможность измельчение отдельных материалов, входящих в смесь либо существенное снижение размеров и масс частиц, что приводит к снижению КПД процесса наплавки в результате разбрызгивания.

Отметим, что наплавляемый материал состоит из порошкового сплава на основе никеля системы Ni-Cr-B-Si и композиционного материала, состоящего из тугоплавких твердых частиц, обладающих различными физическими свойствами. Поэтому процесс механоактивации необходимо выполнять при технологических режимах, обеспечивающих сохранение размеров частиц порошка на основе никеля.

На рис. 2 представлены композиционные материалы после механоактивационной обработки без добавления матричного материала при получении заготовки для CVC-процесса (рис. 2, а) и с добавлением 20% матричного материала ПГ-10Н-01 и 10% ПТ-НА-01 (рис. 2, б):



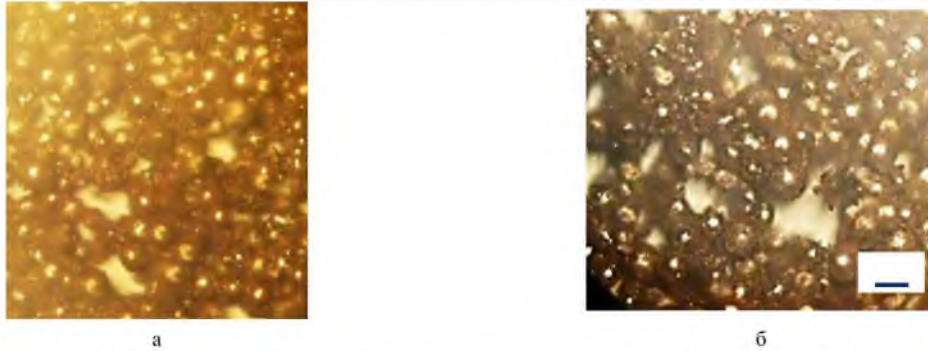


Рис. 2 – Композиционный материал после механоактивационной обработки (180 с):  
а – 10% (Ti+B+C+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al) + 90% ПГ-10Н-01, (×35);  
б – 10% (70% (Ti+C+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al) + 20% ПГ-10Н-01 + 10% ПТ-НА-01) + 90% ПГ-10Н-01

Как следует из рис. 2, морфология приведенных механоактивированных композиционных материалов аналогична.

**Выводы.** На основе проведенных исследований определен механизм упрочнения наплавленных покрытий, модифицированных композиционными материалами, содержащими тугоплавкие соединения.

Предложен алгоритм разработки технологии наплавки защитных покрытий, модифицированных износостойкими композиционными материалами, синтезированными с применением СВС-процесса.

#### Литература:

1. Лившиц Л.С. Металловедение для сварщиков (сварка сталей) / Лившиц Л.С. – М.: Машиностроение, 1979. – 253 с.
2. Сидоров, А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. В. Сидоров. - М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
3. Малаховский В. А. Плазменные процессы в сварочном производстве / Малаховский В. А. - М.: Высшая школа, 1988. - 72 с.
4. Кудинов, В. Д. Наплавка композиционным сплавом деталей металлургического оборудования / В. Д. Кудинов, Б. В. Филимонов, С. А. Шевцов // Автоматическая сварка. – 1985. – № 5. – С. 48-50.
5. Киселев В. С., Радченко М. В. Создание информационно-измерительной системы диагностики сверхзвуковой газопорошковой наплавки покрытий на основе никеля и технических алмазов // Сварка и диагностика. – 2013. – № 5. – С. 50 - 53.
6. Пурехов А.Н. Новые технологии и материалы для восстановления и упрочнения деталей подвижного состава / А.Н. Пурехов, В.Н. Лозинский, С.Г. Суслин // Ползуновский альманах. – 2007. – №1 - 2. – С. 140 - 142.
7. ТУ 48-19-383-91. Порошки для наплавки и напыления. Технические условия. - М.: Торезтвердосплав, 1991.
8. Перемиловский, И. А. Жаропрочные сплавы для наплавки лопаток авиационных турбин и исследование свойств наплавленного металла / И. А. Перемиловский // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл. - К.: Наукова думка, 1977. – С. 131-135.
9. Ощепков Ю. П. Особенности структурообразования сплавов системы Ni-Cr-B-C-Si при индукционной наплавке / Ю. П. Ощепков, Н. В. Ощепкова // Металловедение и термическая обработка. – 1979. – № 10. – С.14-17.
10. Лазерная наплавка цилиндрических деталей порошковыми материалами / О. А. Величко [и др.] // Автоматическая сварка. – 1990. – №1. – С.59-61.

11. Структура и свойства износостойких покрытий полученных способом плазменно-дуговой технологии / Л. С. Лившиц [и др.] // Трение и износ. – 1990. – Т.1. – № 2. – С. 259.
12. Пантелеенко, Ф. И. Влияние структуры защитных покрытий на их износостойкость / Ф. И. Пантелеенко, Л. Г. Ворошин, С. Н. Любецкий // Трение и износ. – 1991. – Т.12. – № 2. – С. 310-314.
13. Сбриджер, А. Г. Структура и свойства покрытий из самофлюсующихся сплавов / А. Г. Сбриджер // МиТОМ. – 1987. – №4. – С.42-44.
14. Лившиц Л. С. Основы легирования наплавленного металла / Л. С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э. Г. Куркумелли – М.: Машиностроение, 1969. – 188 с.
15. Влияние нанодисперсных карбидов WC и никеля на структуру и свойства наплавленного металла / Г.Н. Соколов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2011. – №3. – С. 36–38.
16. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г.Н. Соколов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 6. – С. 41-47.
17. Феноменологическая модель формирования центров кристаллизации в металлическом расплаве при сварке под влиянием ультрадисперсных тугоплавких компонентов / Г.Н. Соколов [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 4(84). – С. 159-168.
18. Структура и свойства низкоуглеродистого металла, наплавленного под керамическим флюсом, содержащим композиционные микрогранулы Ni-нанодисперсный WC / А.С.Трошков [и др.] // Известия ВолгГТУ. – 2012. – №6. – С. 187-190.
19. Влияние нанодисперсных частиц  $Al_2O_3$  на структурно-фазовое состояние покрытий системы Ni-Cr-B-Si-Fe/WC, полученных плазменно-порошковой наплавкой / А.Н. Смирнов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2012. – № 5. – С. 32–37.

### Summary

**Luzan S.** Algorithm of development technology of safety the protective coatings, modified composite materials

*The theoretical foundations of the mechanism of hardening of welded coatings are considered. An algorithm is proposed for the development of technology for surfacing protective coatings modified with wear-resistant composites obtained using the SHS process.*

**Keywords:** composite material, mechanoactivation, carbide, oxide.

### References

1. Livshic L.S. Metallovedenie dlja svarshhikov (svarka stalej) / Livshic L.S. – М.: Mashinostroenie, 1979. – 253 s.
2. Sidorov, A. I. Vosstanovlenie detalej mashin napyleniem i naplavkoj / A. B. Sidorov. - М.: Mashinostroenie, 1987. – 192 s.
3. Malahovskij V. A. Plazmennye processy v svarochnom proizvodstve / Malahovskij B. A. - М.: Vysshaja shkola, 1988. - 72 s.
4. Kudinov, V. D. Naplavka kompozicionnym splavom detalej metallurgicheskogo oborudovaniya / V. D. Kudinov, B. V. Filimonov, C. A. Shevcov // Avtomaticheskaja svarka. – 1985. – № 5. – S. 48-50.
5. Kiselev B. C., Radchenko M. V. Sozdanie informacionno-izmeritel'noj sistemy diagnostiki sverhzvukovoj gazoporoshkovoj naplavki pokrytij na osnove nikelja i tehnicheskikh almazov // Svarka i diagnostika. – 2013. – № 5. – S. 50 - 53.

6. Purehov A.N. Novye tehnologii i materialy dlja vosstanovlenija i uprochnenija detalej podvizhnogo sostava / A.N. Purehov, V.N. Lozinskij, S.G. Suslin // Polzunovskij al'manah. – 2007. – №1 - 2. – S. 140 - 142.
7. TU 48-19-383-91. Poroshki dlja naplavki i napylenija. Tehnicheskie uslovija. - M.: Toreztverdosplav, 1991.
8. Peremilovskij, I. A. Zharoprochnye splavy dlja naplavki lopatok aviacinnyh tur-bin i issledovanie svojstv naplavlennogo metalla / I. A. Peremilovskij //Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy naplavki. Naplavlennyj metall. - K.: Naukova dumka, 1977. – S. 131-135.
9. Oshhepkov Ju. P. Osobennosti strukturoobrazovanija splavov sistemy Ni-Cr-B-C-Si pri indukcionnoj naplavke / Ju. P. Oshhepkov, N. V. Oshhepkova // Metallovedenie i termicheskaja obrabotka. – 1979. – № 10. – S.14-17.
10. Lazernaja naplavka cilindricheskikh detalej poroshkovymi materialami / O. A. Velichko [i dr.] // Avtomaticheskaja svarka. – 1990. – №1. – S.59-61.
11. Struktura i svojstva iznosostojkih pokrytij poluchennyh sposobom plazmenno-dugovoj tehnologii / L. S. Livshic [i dr.] // Trenie i iznos. – 1990. – T.1. – № 2. – S. 259.
12. Panteleenko, F. I. Vlijanie struktury zashhitnyh pokrytij na ih iznosostojkost' / F. I. Panteleenko, L. G. Voroshin, S. N. Ljubeckij // Trenie i iznos. – 1991. – T.12. – № 2. – S. 310-314.
13. Sbridzher, A. G. Struktura i svojstva pokrytij iz samofljusujushhihsja splavov / A. G. Sbridzher // MiTOM. – 1987. – №4. – S.42-44.
14. Livshic L. S. Osnovy legirovanija naplavlennogo metalla / L. S. Livshic, N. A. Grinberg, Je. G. Kurkumelli – M.: Mashinostroenie, 1969. – 188 s.
15. Vlijanie nanodispersnyh karbidov WC i nikelja na strukturu i svojstva naplavlennogo metalla / G.N. Sokolov [i dr.] // Svarka i diagnostika. – 2011. – №3. – S. 36–38.
16. Modificirovanie struktury naplavlennogo metalla nanodispersnymi karbida-mi vol'frama / G.N. Sokolov [i dr.] // Fizika i himija obrabotki materialov. – 2009. – № 6. – S. 41-47.
17. Fenomenologicheskaja model' formirovanija centrov kristallizacii v metallicheskom rasplave pri svarke pod vlijaniem ul'tradispersnyh tugoplavkih komponen-tov / G.N. Sokolov [i dr.] // Voprosy materialovedenija. – 2015. – № 4(84). – S. 159-168.
18. Struktura i svojstva nizkouglerodistogo metalla, naplavlennogo pod keramicheskim fljusom, sodержashhim kompozicionnye mikrogranuly Ni-nanodispersnyj WC / A.S.Troshkov [i dr.] // Izvestija VolgGTU. – 2012. – №6. – S. 187-190.
19. Vlijanie nanodispersnyh chastic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na strukturno-fazovoe sostojanie pokrytij sistemy Ni-Cr-B-Si-Fe/WC, poluchennyh plazmenno-poroshkovej naplavkoj / A.N. Smirnov [i dr.] // Svarka i diagnostika. – 2012. – № 5. – S. 32–37.