

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 620.3:621.791

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).100-107

Поступила в редакцию / Received 28.01.2025

ГРНТИ 81.09.03+81.35.27

Специальность ВАК 1.3.8.

Принята к публикации / Accepted 20.03.2025

Научная статья

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОПОРОШКА ВОЛЬФРАМА

Зернин Е. А., Петрова Е. Д., Сапожков С. Б.

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
(Санкт-Петербург, Россия)*

Аннотация. Рассмотрены основные направления и области применения нанопорошков металлов в технологиях соединения. Показано, что при наплавке слоев в присутствии нанопорошка вольфрама происходит изменение морфологии наплавленного металла. В присутствии наночастиц вольфрама происходит гетерогенная кристаллизация. Заданная концентрация нанопорошка вольфрама в составе шихты наплавочной проволоки позволяет прогнозировать размер зерна и твердость наплавки.

Ключевые слова: *нанопорошок, наплавка, микроструктура, микротвердость.*

Для цитирования: Зернин Е. А., Петрова Е. Д., Сапожков С. Б. Анализ микроструктуры и микротвердости неразъемных соединений, полученных с применением нанопорошка вольфрама // Вестник НовГУ. 2025. 1 (139). 100–107. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).100-107

Research Article

ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS OF INTEGRAL JOINTS OBTAINED USING TUNGSTEN NANOPOWDER

Zernin E. A., Petrova E. D., Sapozhkov S. B.

Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Abstract. The main directions and areas of application of metal nanopowders in bonding technologies are considered. It is shown that when layers are deposited in the presence of tungsten nanopowder, the morphology of the deposited metal changes. Heterogeneous crystallization occurs in the presence of tungsten nanoparticles. The set concentration of tungsten nanopowder in the charge of the surfacing wire makes it possible to predict the grain size and hardness of the surfacing.

Keywords: *nanopowder, surfacing, microstructure, microhardness.*

For citation: Zernin E. A., Petrova E. D., Sapozhkov S. B. Analysis of the microstructure and microhardness of integral joints obtained using tungsten nanopowder // Vestnik NovSU. 2025. 1 (139). 100–107. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).100-107

Введение

В XXI веке наука о материаловедении в значительной степени ориентирована на создание наноматериалов и нанопорошков. Одним из основных преимуществ таких материалов является то, что их структура позволяет улучшить эксплуатационные показатели изделий из сталей и цветных металлов.

Для повышения долговечности и надежности металлоконструкций, а также для разработки новых металлов необходимо провести обширные научные исследования и активно внедрить современные технологии в промышленное производство. Одним из приоритетных направлений является применение нанопорошков различных металлов и их соединений. Такие материалы способствуют существенному повышению эффективности производства [1–3].

В последние годы значительное внимание уделяется применению нанопорошков тугоплавких металлов при сварке, наплавке и напылении. Одна из основных задач, решаемых при использовании нанопорошков – модифицирование наплавляемого металла. Это позволяет управлять структурой и свойствами наплавляемого слоя. Что, в свою очередь, позволяет получить поверхность изделия с заданными эксплуатационными показателями.

Анализ проведенных работ [4–6] показывает, что существенное внимание уделяется влиянию нано- и ультрадисперсных материалов на структуру, распределение включений и свойства неразъемных соединений. В исследованиях [7–10] приводятся результаты влияния нанопорошков на процесс модифицирования наплавленного металла.

В целом [11] при дуговых способах сварки или наплавки плавлением введение нанопорошков в расплав сварочной ванны реализуется посредством:

- специализированных паст, которые наносятся на кромки свариваемых изделий;
- защитного (транспортирующего) газа;
- порошковой проволокой, содержащей такие материалы.

Материалы и методы

В данной работе рассмотрены метод наплавки порошковой проволокой, содержащей нанопорошок вольфрама, с целью выявления закономерностей формирования структуры и свойств наплавленного металла. Для экспериментальных исследований был использован нанопорошок вольфрама (технология получения методом электрического взрыва проводника приведена в работе [12]).

При наплавке использовался как основная проволока («горячая» присадка), так и дополнительная порошковая проволока («холодная» присадка). В состав порошковой

проволоки («холодной» присадки) входит мелкодисперсный вольфрам. Для того, чтобы снизить воздействие электрической дуги на нанопорошок вольфрама, «холодная» проволока подавалась в часть сварочной ванны, которая имела более низкую температур («холодная» хвостовая часть).

Прототипом для «холодной» послужила порошковая проволока ПП-АН170М.

Наплавка осуществлялась в автоматическом режиме в среде защитных газов на подложку из низкоуглеродистой стали (основу). Толщина подложки – 20 мм. Режимы наплавки: ток сварки 320–340 А; напряжение дуги 32–34 В. Образцы перед наплавкой подвергались предварительному подогреву и последующей термообработке. Температура предварительного подогрева составляла 300–320°C. После наплавки образцы помещались в муфельную печь с температурой 320°C с последующем остыванием вместе с печью.

Фазовый состав и микроструктура определялись при помощи оптической металлографии. Для регистрации изображения использовалась оптическая цифровая фотокамера. Образы подвергались избирательному травлению, которое проводилось в два этапа. На первом этапе шлиф протравливался спиртовым раствором азотной кислоты для выявления и регистрации структуры основного металла. На втором этапе осуществлялось дополнительное травление смесью азотной и соляной кислот. В соответствии с ГОСТ 5639 «Стали и сплавы. Методы определения размера зерна» определялся размер зерна.

Оценка механических свойств наплавки и металла подложки проводилась за счет измерения микротвердости. При этом использовался микротвердомер ПМТ-3М (метод Виккерса). Твердость и микроструктура определялись от поверхности наплавки в направлении подложки с шагом 0,5 мм.

Исследования наплавленных слоев проводились согласно схеме, представленной на рисунке 1.

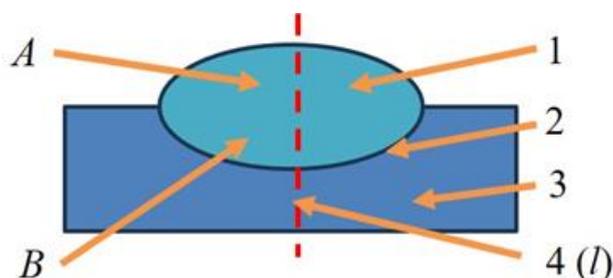


Рисунок 1. Поперечный срез наплавленного металла на подложке для оценки структуры и свойств наплавки: 1 – слой, полученный при наплавке; А – область дендритов, имеющих форму «зерна»; В – область дендритов, имеющих разную ориентацию; 2 – линия условного перехода от наплавленного металла к металлу подложки; 3 – металл подложки; 4(л) – линия определения значений механических характеристик основного и наплавленного металла

Результаты

Анализ экспериментальных исследований структуры слоёв, наплавленных порошковой проволокой с мелкодисперсным вольфрамом, показал, что независимо от концентрации модификатора, наплавленный металл имеет схожее строение. В нем присутствуют характерные: области дендритов, имеющих форму «зерна» и области дендритов, имеющих разную ориентацию (рисунок 2).

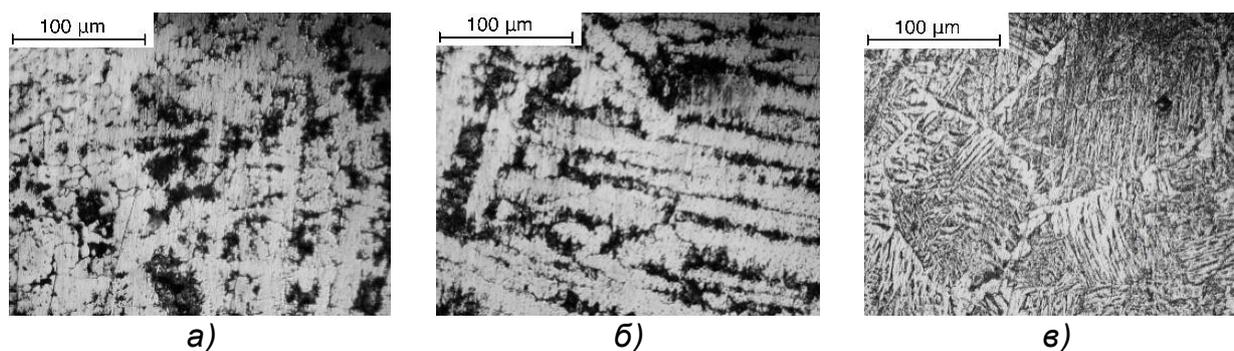


Рисунок 2. Микроструктура металла наплавки и основного металла: а) область дендритов, имеющих форму «зерна»; б) область дендритов, имеющих разную ориентацию; в) металл подложки (основной металл из низкоуглеродистой стали)

Тем не менее, увеличение концентрации мелкодисперсного вольфрама в составе порошковой «холодной» проволоке, размер зерен имеет тенденцию к уменьшению. График экспериментальных данных влияния мелкодисперсного порошка вольфрама на геометрические параметры зерна в наплавленном металле представлены на рисунке 3.

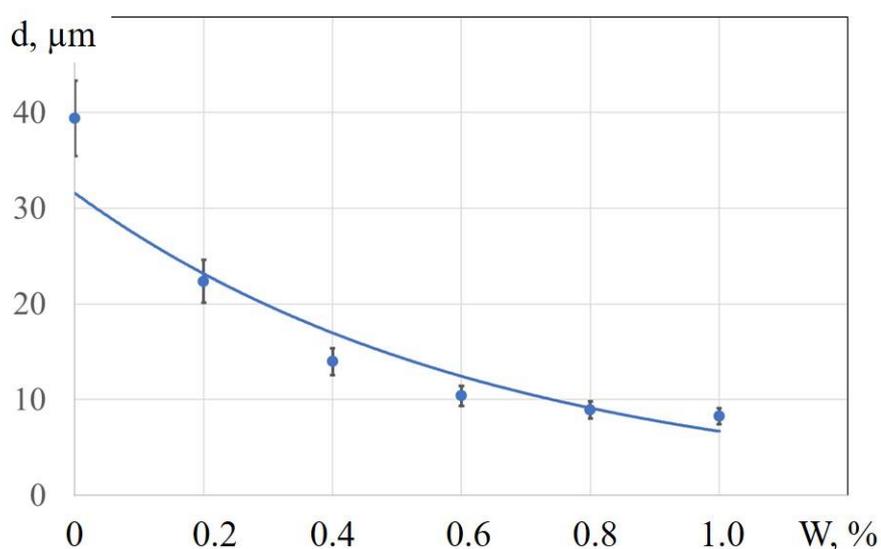


Рисунок 3. Экспериментальные данные влияния мелкодисперсного порошка вольфрама на геометрические параметры зерна в наплавленном металле

По результатам анализа экспериментальных данных можно констатировать, что мелкодисперсные частицы вольфрама способствуют протеканию гетерогенной кристаллизации и обеспечивают модифицирование металла, наплавленного порошковой проволокой. Управление структурой и, следовательно, размером зерна, достигается при количественном и качественном изменении шихты порошковой проволоки.

Количественная оценка изменения показателей прочности наплавленных слоев в присутствии мелкодисперсного вольфрама была проведена посредством измерения микротвердости наплавленного металла вдоль линии 4(1) (рисунок 1). Шаг измерения микротвердости составлял 0,5 мм. Глубина измерения от лицевой части наплавки составила 3 мм. Графики изменения микротвердости по толщине наплавленного металла изображены на рисунке 4.

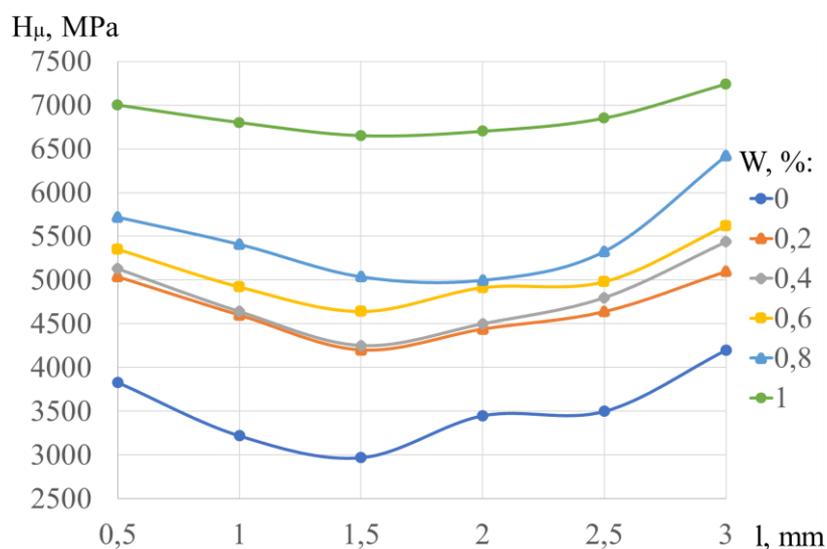


Рисунок 4. Графики изменения микротвердости по толщине наплавленного металла

Анализ экспериментальных данных показал, что микротвердость одинаково распределяется (по характеру) во всех испытуемых образцах. Максимум показателей твердости – у поверхности наплавки и на границе сплавления с основным металлом (подложкой). Значения твердости выше у поверхности наплавки. Это объясняется различным теплоотводом кристаллизующегося металла сварочной ванны в окружающий воздух и в более холодный металл подложки.

Анализ экспериментальных данных также показал, что чем выше концентрация нанопорошка вольфрама (рисунок 5), тем выше среднее значение микротвердости металла, наплавленного порошковой проволокой.

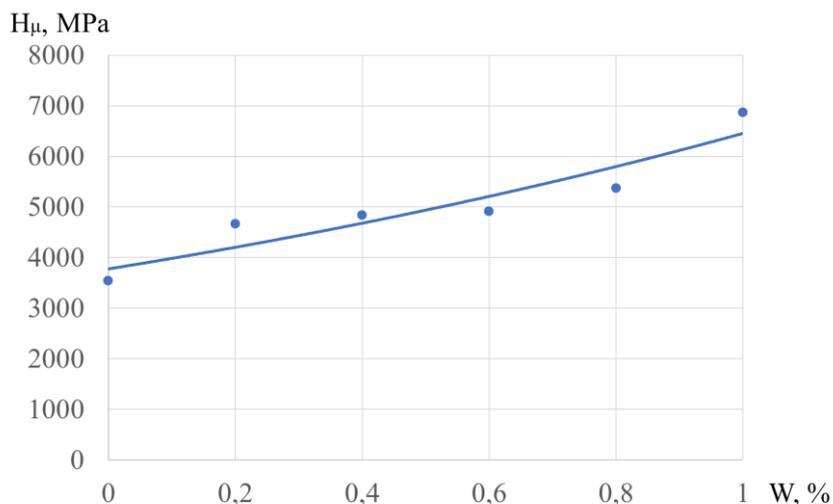


Рисунок 5. Экспериментальные данные зависимости микротвердости наплавки от процентного содержания мелкодисперсного вольфрама в составе шихты порошковой проволоки

Изменение прочностных свойств наплавки (их повышение) подтверждается увеличенными показателями твердости наплавленного металла в присутствии в составе шихты порошковой проволоки мелкодисперсных частиц вольфрама.

Заключение

Анализ проведенных исследований показывает, что при наплавке слоев в присутствии нанопорошка вольфрама происходит изменение морфологии наплавленного металла. Применение нанопорошка вольфрама однозначно приводит к получению более равновесной и мелкодисперсной структуры наплавки при одновременном повышении микротвердости.

Характер распределения микротвердости также имеет схожий характер – наибольшие значения наблюдаются возле зоны сплавления, а наименьшие значения – у свободной поверхности. Абсолютная величина микротвердости, прежде всего, определяется исходным материалом для наплавки.

В присутствии наночастиц вольфрама происходит измельчение структуры наплавленного металла, т. к. происходит гетерогенная кристаллизация. Другими словами – нанопорошок вольфрама служит готовыми центрами кристаллизации при затвердевании жидкого расплава сварочной ванны наплавленного металла. Заданная концентрация нанопорошка вольфрама в составе шихты наплавочной проволоки позволяет прогнозировать размер зерна и твердость наплавки.

Список литературы

1. Галевский Г. В., Руднева В. В., Юркова Е. К. Наноматериалы и нанотехнологии: оценки, тенденции, прогнозы // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2007. 2. 73–76.
2. Pal K., Mohan M. M., Thomas S. Dynamic application of novel electro-optic switchable device modulation by graphene oxide dispersed liquid crystal cell assembling CdS nanowires // Organic Electronics: Physics, Materials, Applications. 2016. 39. 25–37.
3. Reisgen U., Balashov B., Stein L., Geffers C. Nanophase hardfacing new possibilities for functional surfaces // Materials Science Forum. 2010. 638–642. 870–875.
4. Wang Jian-Yih, Chang Tien-Chan, Chang Li-Zen, Lee Shyong. Effect of Al and Mn content on the mechanical properties of various ECAE Processed Mg-Li-Zn Alloys // Materials Transactions. 2006. 47 (4). 971–976.
5. Seo J. S., Kim H. J., Lee Ch. Effect of Ti addition on weld microstructure and inclusion characteristics of bainitic GMA welds // ISIJ International. 2013. 53 (5). 880–886. DOI: 10.2355/isijinternational.53.880
6. Vanovsek W., Bernhard C., Fiedler M., Posch G. Influence of aluminum content on the characterization of microstructure and inclusions in high-strength steel welds // Welding in the World. 2013. 57 (1). 73–83.
7. Wang Jian-Yih, Chang Tien-Chan, Chang Li-Zen, Lee Shyong. Effect of Al and Mn Content on the Mechanical Properties of Various ECAE Processed Mg-Li-Zn Alloys // Materials Transactions. 2006. 47 (4). 971–976.
8. Klimpel A., Kik T. Erosion and abrasion wear resistance of GMA wire surfaced nanostructural deposits // Archives of Materials Science and Engineering. 2008. 30 (2). 121–124.
9. Zhu Y., Yukimura K., Ding C. X., Zhang P. Y. Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying // Thin Solid Films. 2001. 388 (1-2). 277–282.
10. Wu P., Du H. M., Chen X. L., Li Z. Q., Bai H. K., Jiang E. Y. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings // Wear. 2004. 257 (1-2). 142–147.
11. Сапожков С. Б., Зернин Е. А., Петрова Е. Д., Петров Р. В., Захаров М. А. Применение нано- и ультрадисперсных материалов для управления структурой и свойствами металлов в соединительных технологиях: мировая практика (обзор) // Вестник НовГУ. 2023. 5 (134). 833–846. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).833-846
12. Zhuravkov S. P., Pustovalov A. V., Kuznetsov M. A., Rosliy I. S., Zernin E. A. Assignment of appropriate conditions for synthesizing tungsten nanopowder by electric explosion of conductors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. 142. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012020

References

1. Galevskii G. V., Rudneva V. V., Yurkova E. K. Nanomaterials and nanotechnologies: Assessment, tendencies, and forecasts // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2007. 48 (2). 157–160. DOI: 10.3103/S1067821207020162 (In Russian).
2. Pal K., Mohan M. M., Thomas S. Dynamic application of novel electro-optic switchable device modulation by graphene oxide dispersed liquid crystal cell assembling CdS nanowires // Organic Electronics: physics, materials, applications. 2016. 39. 25–37.
3. Reisgen U., Balashov B., Stein L., Geffers C. Nanophase hardfacing new possibilities for functional surfaces // Materials Science Forum. 2010. 638–642. 870–875.

4. Wang Jian-Yih, Chang Tien-Chan, Chang Li-Zen, Lee Shyong. Effect of Al and Mn content on the mechanical properties of various ECAE Processed Mg-Li-Zn Alloys // Materials Transactions. 2006. 47 (4). 971–976.
5. Seo J. S., Kim H. J., Lee Ch. Effect of Ti addition on weld microstructure and inclusion characteristics of bainitic GMA welds // ISIJ International. 2013. 53 (5). 880–886. DOI: 10.2355/isijinternational.53.880
6. Vanovsek W., Bernhard C., Fiedler M., Posch G. Influence of aluminum content on the characterization of microstructure and inclusions in high-strength steel welds // Welding in the World. 2013. 57 (1). 73–83.
7. Wang Jian-Yih, Chang Tien-Chan, Chang Li-Zen, Lee Shyong. Effect of Al and Mn Content on the Mechanical Properties of Various ECAE Processed Mg-Li-Zn Alloys // Materials Transactions. 2006. 47 (4). 971–976.
8. Klimpel A., Kik T. Erosion and abrasion wear resistance of GMA wire surfaced nanostructural deposits // Archives of Materials Science and Engineering. 2008. 30 (2). 121–124.
9. Zhu Y., Yukimura K., Ding C. X., Zhang P. Y. Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying // Thin Solid Films. 2001. 388 (1-2). 277–282.
10. Wu P., Du H. M., Chen X. L., Li Z. Q., Bai H. K., Jiang E. Y. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings // Wear. 2004. 257 (1-2). 142–147.
11. Sapozhkov S. B., Zernin E. A., Petrova E. D., Petrov R. V., Zakharov M. A. The use of nano- and ultrafine materials for controlling the structure and properties of metals in connecting technologies: world practice (review) // Vestnik NovSU. 2023. 5 (134). 833–846. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).833-846 (In Russian).
12. Zhuravkov S. P., Pustovalov A. V., Kuznetsov M. A., Rosliy I. S., Zernin E. A. Assignment of appropriate conditions for synthesizing tungsten nanopowder by electric explosion of conductors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. 142. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012020

Информация об авторах

Зернин Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-9176-0720, yuti_sp@bk.ru

Петрова Екатерина Дмитриевна – ассистент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0009-0002-2302-8359, petrowa.ket@yandex.ru

Сапожков Сергей Борисович – доктор технических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0001-6804-4454, ssb@novsu.ru