

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович**  
**лаборатория механических свойств**

**Научный руководитель** – чл.-корр. РАН, д.т.н. Макаров Алексей Викторович

**Специальность** 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**Тема работы** – Разработка износостойких многокомпонентных покрытий для высокотемпературных применений

**Задача текущего года** – Изучить влияние добавок карбида и борида вольфрама, карбида хрома на структуру, фазовый состав и микротвердость в CrFeNi покрытиях, сформированных импульсной лазерной наплавкой.

**Результаты, полученные в текущем году:**

1. Легирование эквивалентного сплава CrFeNi карбидами вольфрама и хрома приводит к росту микротвердости до 2 раз (в случае с покрытием Cr-Fe-Ni + 4,2% WC + 4,2% CrC + 1,6% Ni).
2. Результаты ПЭМ лазерного покрытия Cr-Fe-Ni + 4,2% WC + 4,2% CrC + 1,6% Ni указывают на формирование  $\gamma$ -твердого раствора с выделением по границам зерен цементита.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович  
лаборатория механических свойств**

**Апробация работы (1 год)**

**Статьи в журналах**

1. Makarov A.V., Korobov Yu.S., Soboleva N.N., Khudorozhkova Yu.V., Vopneruk A.A., Balu P., Barbosa M.M., Malygina I.Yu., Burov S.V., Stepchenkov A.K. Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications // Letters on Materials. – 2019. – Vol. 9. – No 4(36). – P. 470-474.
2. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Степченков А.К., Малыгина И.Ю., Коробов Ю.С. Влияние термического воздействия на микромеханические свойства хромоникелевого покрытия, полученного газопорошковой лазерной наплавкой // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22. – № 2. – С. 104-117.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович**  
**лаборатория механических свойств**

**Апробация работы (1 год)**

**Тезисы докладов на международных конференциях**

1. Соболева Н.Н., Степченков А.К., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Микроструктура, микромеханические свойства и абразивная износостойкость кобальтового покрытия ПГ-10К-01, сформированного газопорошковой лазерной наплавкой // Сборник тезисов докладов VIII Международной конференции «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии», г. Ижевск, 11-12 апреля, 2019. – Ижевск: Изд-во УдмФИЦ УрО РАН, 2019. – С. 180-182.
2. Соболева Н.Н., Степченков А.К., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Микромеханические свойства покрытия ПГ-10Н-01, сформированного комбинированной лазерно-термической обработкой // Сборник трудов XXXI Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС -2019), г. Москва, 4-6 декабря, 2019 г. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2020. – С. 51-54.
3. Степченков А.К., Макаров А.В., Соболева Н.Н., Вопнерук А.А., Котельников А.Б. Влияние термической обработки на структуру и твердость NiBSi покрытия // Сборник материалов XX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых, г. Екатеринбург, 3-7 февраля 2020 г. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. – С. 174-177.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович  
лаборатория механических свойств**

**Апробация работы (1 год)**

**Тезисы докладов на международных конференциях**

4. Степченков А.К., Макаров А.В., Соболева Н.Н., Вопнерук А.А., Котельников А.Б. Влияние термической обработки на структуру и микротвердость покрытий на основе никеля // Сборник материалов XIV Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, 09-13 ноября 2020 г. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2020. – С. 123.
5. Соболева Н.Н., Степченков А.К., Макаров А.В. Влияние высокотемпературного отжига NiCrBSi покрытия на характеристики, полученные при микроиндентировании с различной выдержкой // Тезисы VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии», ЛАПЛАЗ-2021, г. Москва, 23-26 марта 2021 года. – М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 311-312.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович**  
**лаборатория механических свойств**

**Апробация работы (2 год)**

**Тезисы докладов на международных конференциях**

6. Соболева Н.Н., Старикова У.С., Степченков А.К., Макаров А.В. Обзор способов повышения содержания боридов в структуре хромоникелевых покрытий // Сборник материалов X Международной школы «Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности», г. Тольятти, 13-17 сентября 2021 г. – Тольятти: Изд-во Тольяттинского государственного университета, 2021. – С. 157.
7. Okulov A.V., Gokhfeld N.V., Korobov Yu.S., Makarov A.V., Kharanzhevskiy E.V., Stepchenkov A.K., Okulov I.V. An impact of B<sub>4</sub>C in-situ alloying on the structure and mechanical properties of laser deposited medium-entropy CrFeNi coatings // Тезисы III Международной школы-конференции молодых ученых «Получение, структура и свойства высокоэнтропийных материалов», г. Екатеринбург, 11-15 октября 2021 г. – Белгород: ООО «Эпицентр», 2021. – С. 67.
8. Makarov A.V., Korobov Yu.S., Stepchenkov A.K. Prospects for the application of laser surface for the formation of heat-resistant coatings from high-entropy alloys // Тезисы III Международной школы-конференции молодых ученых «Получение, структура и свойства высокоэнтропийных материалов», г. Екатеринбург, 11-15 октября 2021 г. – Белгород: ООО «Эпицентр», 2021. – С. 24.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович**  
**лаборатория механических свойств**

**Апробация работы (2 год)**

**Тезисы докладов на международных конференциях**

9. Макаров А.В., Харанжевский Е.В., Кузнецов В.П., Степченков А.К., Коробов Ю.С., Лежнин Н.В., Сирош В.А., Скорынина П.А., Соболева Н.Н., Владимиров А.Б. Лазерные технологии наплавки и аддитивного производства с использованием высокоэнтропийных, керамических и многослойных материалов // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов = Actual Problems of the Physical Metallurgy of Steels and Alloys: сборник тезисов докладов XXVI Уральской школы металловедов-термистов, г. Екатеринбург, 7-11 февраля 2022 г. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2022. – С. 205-211.
10. Макаров А.В., Степченков А.К., Соболева Н.Н., Вопнерук А.А., Котельников А.Б., Коробов Ю.С. Влияние отжига на структуру и микромеханические характеристики NiBSi/WC и NiBSi/Cr покрытий, сформированных высокоскоростным газопламенным напылением // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии», г. Ижевск, 6-9 апреля, 2022. – Ижевск: Изд-во УдмФИЦ УрО РАН, 2022. – С. 229-231.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович  
лаборатория механических свойств**

**Апробация работы (2 год)**

**Тезисы докладов на международных конференциях**

11. Окулов А.В., Гохфельд Н.В., Коробов Ю.С., Макаров А.В., Харанжевский Е.В., Степченков А.К., Окулов И.В. In-situ легирование карбидом бора  $B_4C$  как перспективный метод упрочнения наплавленных лазером CrFeNi покрытий // Сборник тезисов докладов XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов - молодых ученых, г. Екатеринбург, 07–11 февраля, 2022. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. – С. 426-428.
12. Степченков А.К., Макаров А.В., Харанжевский Е.В., Коробов Ю.С., Окулов А.В., Завалишин В.А., Гохфельд Н.В. Микромеханические свойства наплавленных импульсным лазером CrFeNi покрытий, легированных карбидом бора  $B_4C$  // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии», г. Ижевск, 6-9 апреля, 2022. – Ижевск: Изд-во УдмФИЦ УрО РАН, 2022. – С. 238-240.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович**  
**лаборатория механических свойств**

**Апробация работы (3 год)**

**Тезисы докладов на международных конференциях**

13. Окулов А.В., Коробов Ю.С., Гохфельд Н.В., Степченков А.К., Макаров А.В., Волкова Е.Г., Завалишин В.А., Эстемирова С.Х., Харанжевский Е.В. Формирование прочных износостойких покрытий методом импульсной лазерной наплавки // Сборник статей VIII Международной конференции «Проблемы механики современных машин», г. Улан-Удэ, оз. Байкал, 4–9 июля, 2022. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2022. – С. 45-47.
  
14. Степченков А.К., Макаров А.В., Волкова Е.Г., Харанжевский Е.В. Влияние добавок карбида и бориды вольфрама, карбида хрома на структуру и микротвердость покрытий на основе эквиатомного сплава CrFeNi, сформированных короткоимпульсной лазерной наплавкой // Международная научная конференция «Современные материалы, передовые производственные технологии и оборудование для них», г. Санкт-Петербург, 30 июня — 2 июля 2023 г.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович  
лаборатория механических свойств**

**Апробация работы (1 год)**

**Тезисы докладов на российских конференциях**

1. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю., Степченков А.К. Влияние температуры отжига на структуру и микромеханические свойства NiCrBSi-покрытия, сформированного лазерной наплавкой // Сборник тезисов докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», 28 февраля – 6 марта 2020 г., Новосибирск-Шерегеш. – Новосибирск: Параллель, 2020. – С. 179.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович**  
**лаборатория механических свойств**

**Экзамены/зачеты**

1. Экзамен по английскому языку (26.05.2021)

Оценка «Отлично»

2. Экзамен по философии (06.06.2022)

Оценка «Хорошо»

3. Зачет по курсу «Методология преподавания в высшей школе» (24.04.2023)

**Участие в грантах**

1. Проект РФФ 19-79-00031 «Разработка научных и технологических основ формирования NiCrBSi покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками комбинированными лазерно-термическими обработками». **Степень участия** – исполнитель.

2. Грант УМНОЦ «Передовые промышленные технологии и материалы» по теме «Научное обоснование технологии восстановительного ремонта медных плит кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок методом сварки трением с перемешиванием» (2021 г.). **Степень участия** – исполнитель.

3. Грант УМНОЦ «Передовые промышленные технологии и материалы» по теме «Научное обоснование технологии лазерной наплавки износостойких покрытий на медные плиты кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок» (2022 г.). **Степень участия** – исполнитель.

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович**  
**лаборатория механических свойств**

**Участие в грантах**

4. Молодежный проект ИФМ УрО РАН «Влияние добавок карбидов бора, вольфрама и хрома на структуру, микромеханические и трибологические свойства покрытий на основе среднеэнтропийного эквиатомного сплава CrFeNi, сформированных короткоимпульсной лазерной наплавкой». **Степень участия** – руководитель.

**Выступления на конференциях**

Сделано докладов:  
устных – 3+1  
стендовых – 2

**Аспирант 3 года обучения Степченков Александр Константинович**  
**лаборатория механических свойств**

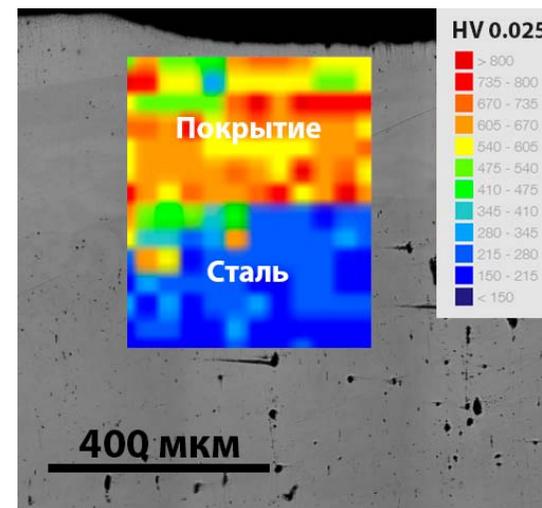
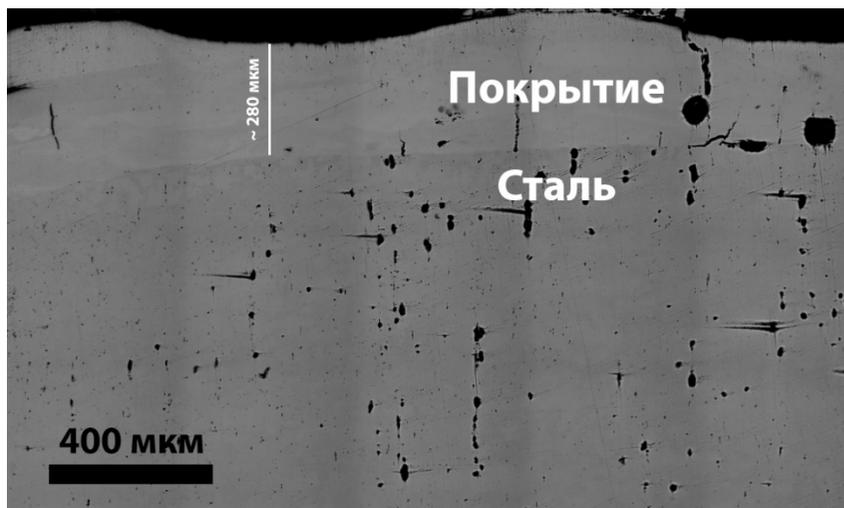
Показатель	Баллы	Кол-во	Сумма
публикации в изданиях ВАК (вышедшие из печати)	20	2	40
публикации в изданиях ВАК (принятые в печать)	5	0	0
свидетельство о программах для ЭВМ, зарегистрированных в установленном порядке	20	0	0
патент	20	0	0
соавторство в монографии	5	0	0
оформленное ноу-хау	5	0	0
публикации в других изданиях (не тезисы)	2	0	0
тезисы доклада на международной конференции	5	14	70
тезисы доклада на российской конференции	3	1	3
участие в конференции с устным докладом	2	4	8
участие в конференции со стендовым докладом	1	2	2
сданный на «отлично» кандидатский экзамен	20	1	20
сданный на «хорошо» кандидатский экзамен	15	1	15
сданный на «удовлетворительно» кандидатский экзамен	10	0	0
участие в грантах в качестве: исполнителя	5	3	15
участие в грантах в качестве: руководителя	10	1	10
Общая сумма			183

## Актуальность темы исследования

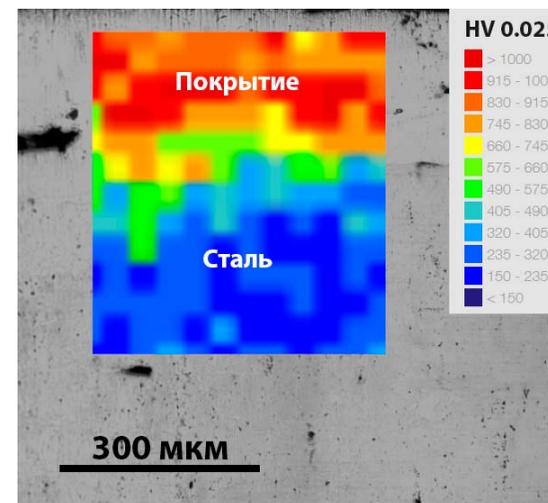
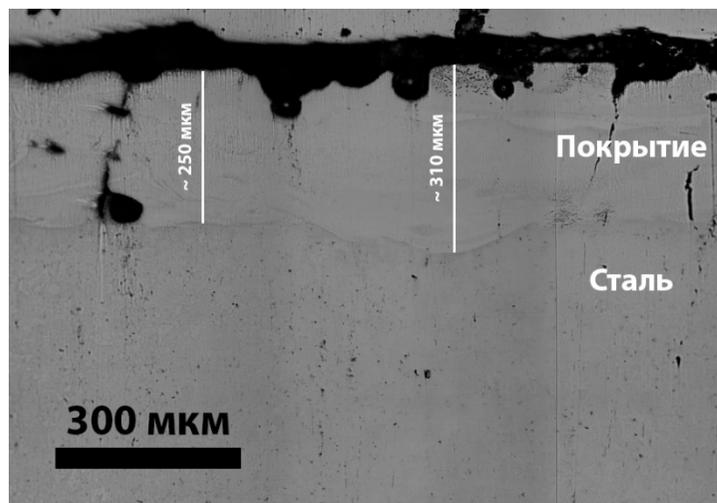
- В промышленных отраслях значительная группа оборудования подвержена агрессивным внешним воздействиям, высоким тепловым и механическим нагрузкам. Для обеспечения долговременной работоспособности и стабильности функциональной поверхности оборудования требуется **поверхностное покрытие**, поскольку именно в поверхностных слоях развиваются процессы износа, коррозии и зарождения усталостных трещин, которые являются главными причинами выхода из строя подавляющего числа деталей и механизмов.
- Перспективным направлением считается применение покрытий на **основе средне- и высокоэнтропийных сплавов**, отличающихся уникальными прочностными, трибологическими и коррозионными свойствами в широком интервале температур.
- Применение **короткоимпульсного лазерного излучения** для формирования покрытий также способствует получению уникальных свойств материала за счёт скоростного нагрева и последующего интенсивного охлаждения, что приводит к высокоскоростному затвердеванию с образованием сильно неравновесных состояний, аморфизации.
- Как правило, **однофазные ВЭС и СЭС с ГЦК структурой** обладают **хорошей пластичностью, но низкой прочностью**. Поэтому актуальным направлением для дальнейших исследований является разработка способов улучшения механических свойств данных сплавов. Прочность многокомпонентных сплавов можно увеличить за счет твердорастворного упрочнения путем добавления элементов с большим атомным радиусом. **Выделение второй фазы** в ГЦК матрице также **может улучшить механические свойства сплава**.

СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННЫХ  
ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРОМ CrFeNi  
ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ  
КАРБИДОМ БОРА B<sub>4</sub>C

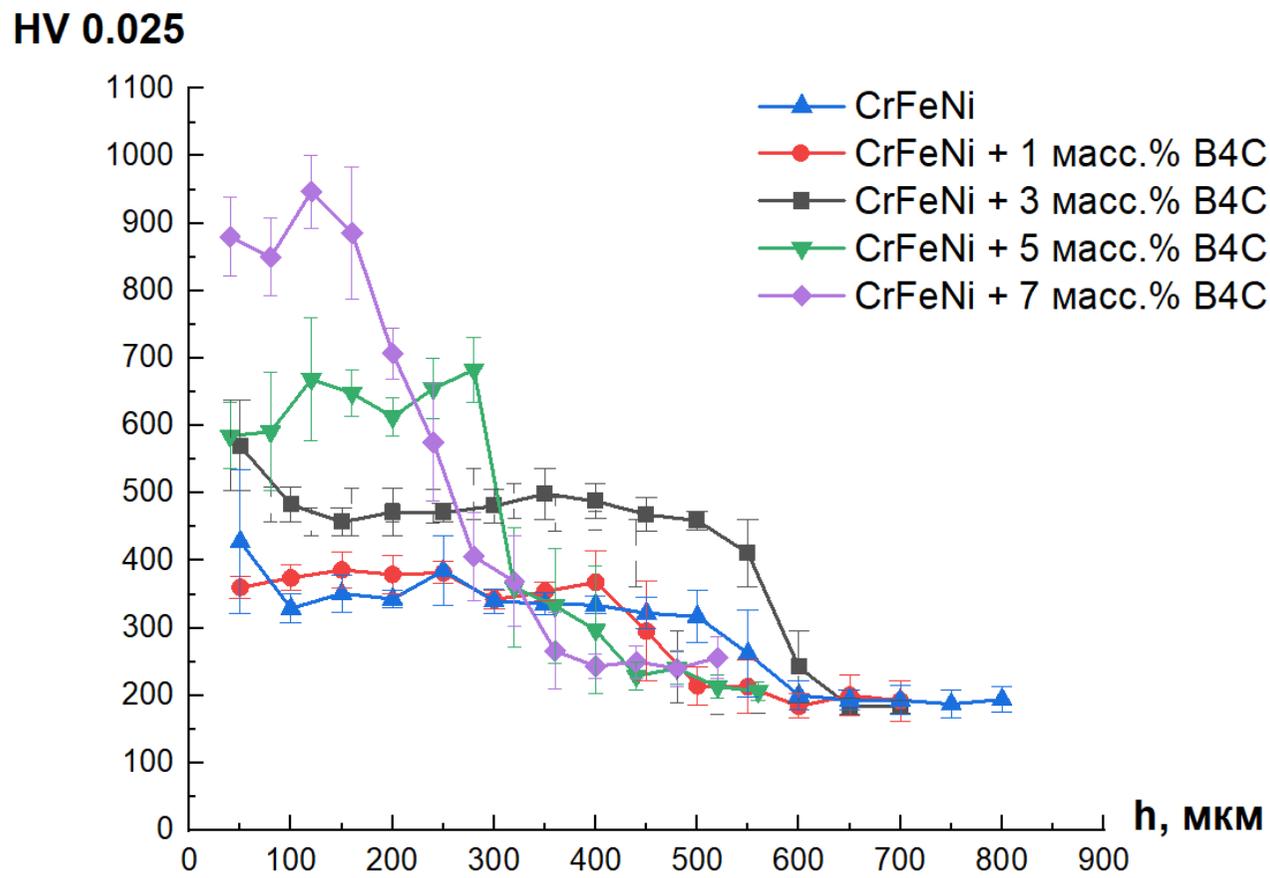
## Покрытие CrFeNi + 5 масс.% B<sub>4</sub>C



## Покрытие CrFeNi + 7 масс.% B<sub>4</sub>C



## Общий график для покрытий CrFeNi, легированных карбидом бора B<sub>4</sub>C

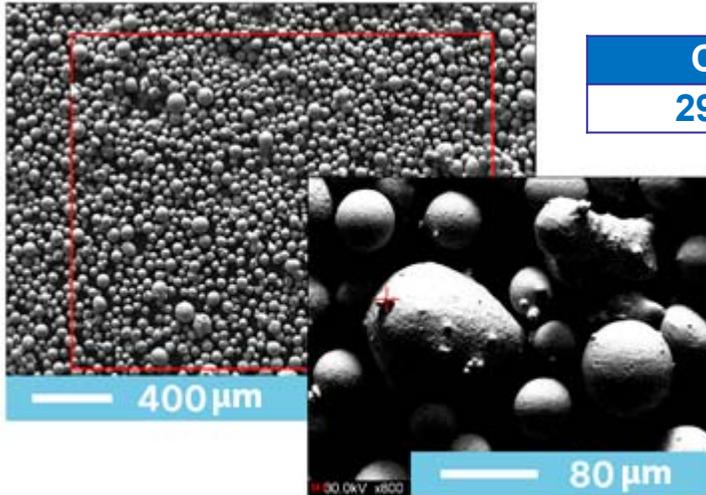


СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННЫХ  
ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРОМ CrFeNi  
ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ WC,  
WB и CrC

# Материалы

Химический состав эквипотенциального порошка Cr-Fe-Ni, масс.%

Cr	Fe	Ni	C	Si
29,8	32,6	35,6	0,37	1,63



Сферический порошок  
сплав Cr-Fe-Ni (СЭМ)

Материал покрытия: среднеэнтропийный эквипотенциальный сплав Cr-Fe-Ni  
фракция порошка: 50-150 мкм

Легирующие добавки:

- GP10BN (60WC-30WB-10Co) – фракция порошка: 10-30 мкм
- Amperit 543.059 (42WC-42CrC-16Ni) – фракция порошка: 5-30 мкм

Материал подложки: сталь 35

Наплавленные лазером покрытия (масс.%):

- Cr-Fe-Ni
- Cr-Fe-Ni + 3% GP10BN: Cr-Fe-Ni + 1,8% WC + 0,9% WB + 0,3% Co
- Cr-Fe-Ni + 10% GP10BN: Cr-Fe-Ni + 6% WC + 3% WB + 1% Co
- Cr-Fe-Ni + 3% Amperit 543.059: Cr-Fe-Ni + 1,26% WC + 1,26% CrC + 0,48% Ni
- Cr-Fe-Ni + 10% Amperit 543.059: Cr-Fe-Ni + 4,2% WC + 4,2% CrC + 1,6% Ni

# Способ формирования покрытий. Параметры.

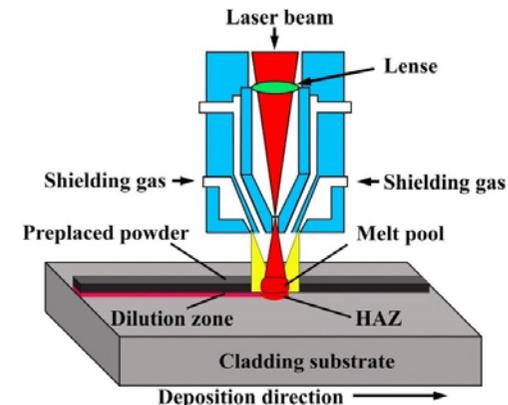


## Параметры лазерной наплавки:

- Энергия импульса – 8,3 Дж;
- Длительность импульса – 3,5 мс;
- Частота импульсов – 20 Гц;
- Расстояние между осями наплавленных дорожек – 0,8 мм;
- Количество слоёв – 4;
- Инертная среда – Ar.

## Шликерная лазерная наплавка.

### Схема



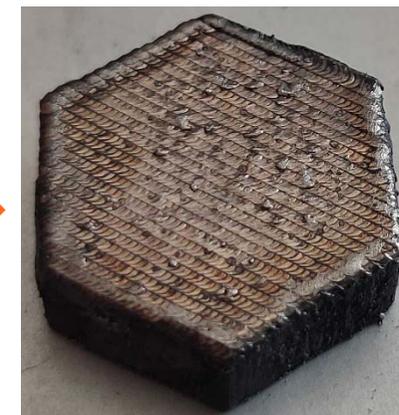
*J. Manuf. Process. 66  
(2021) 341-363*

## Многофункциональная лазерная установка LRS AU

Длительность импульса	0,2 - 20 мс
Частота импульсов	до 200 Гц
Длина волны лазера	1,064 мкм (YAG:Nd <sup>3+</sup> )
Режим работы	импульсно-периодический



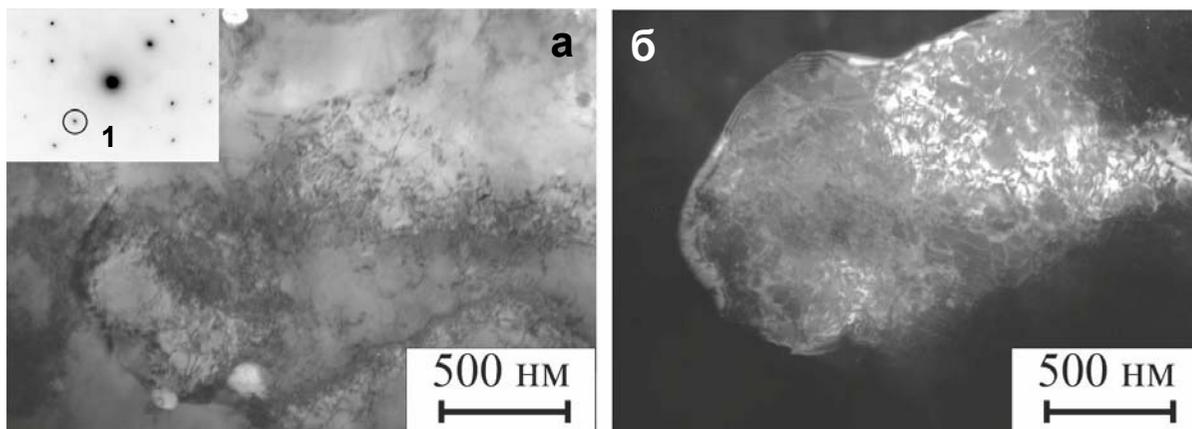
**Подложка с нанесенным слоем порошка**



**Подложка с оплавленным слоем порошка**

# Образец CrFeNi

## Структура образца



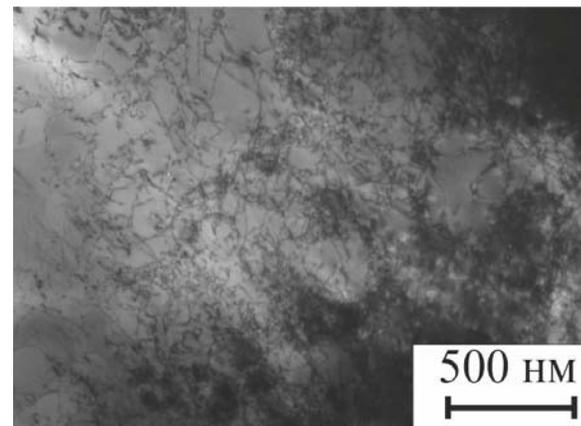
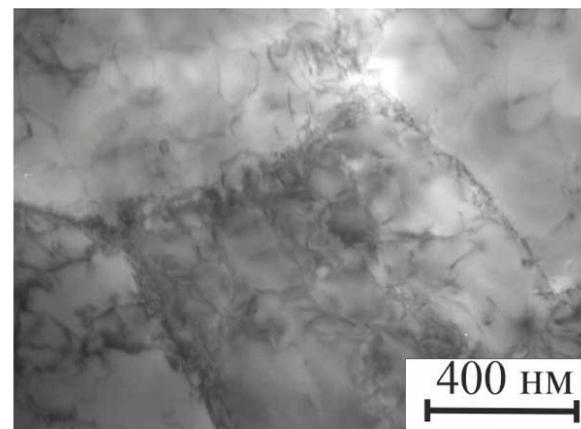
а – светлопольное изображение и картина микродифракции;  
б – темнопольное изображение в рефлексе 1 (ГЦК)

Рефлексы, на снимках микродифракции принадлежат только  $\gamma$ -Fe.

Структура образца CrFeNi характерна для образцов, полученных метом селективного лазерного сплавления и является однофазной.

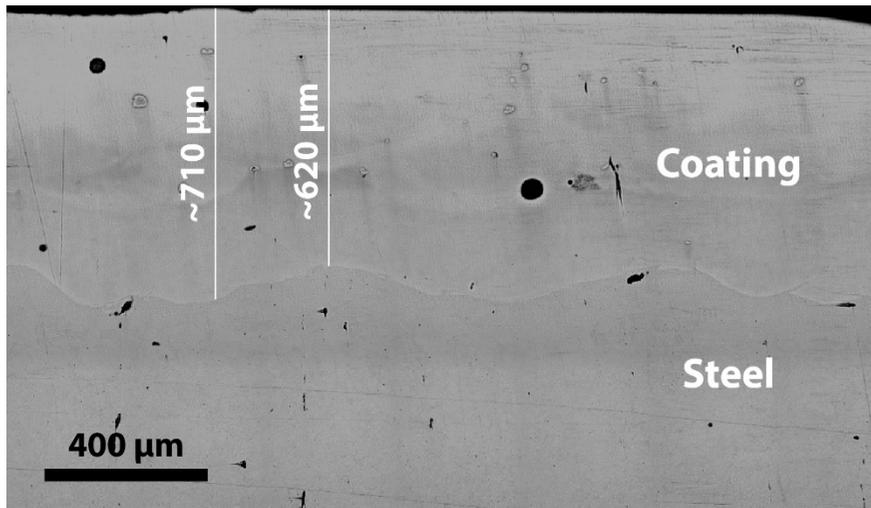
## Общий вид образца

светлопольные изображения

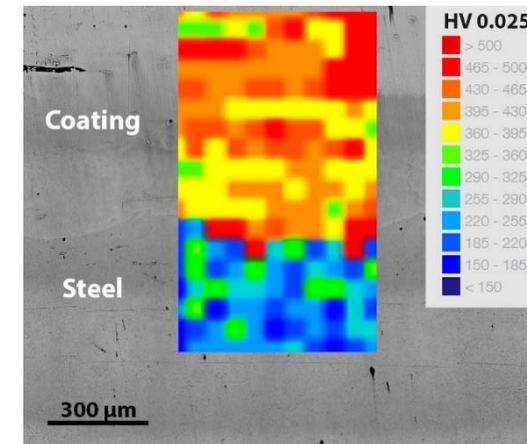


# Образец Cr-Fe-Ni + 6% WC + 3% WB + 1% Co

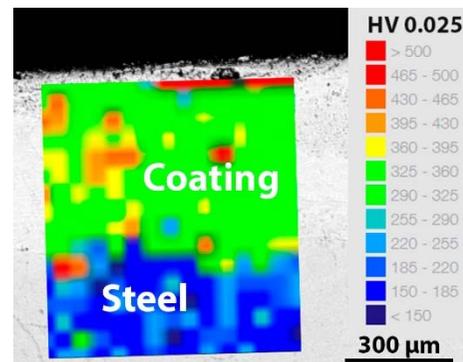
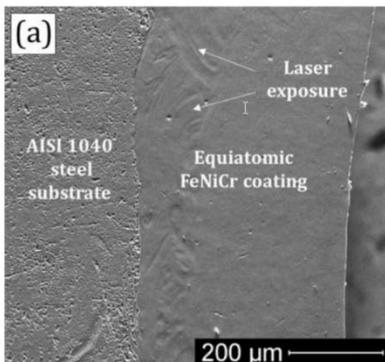
Покрытие



Карта распределения микротвердости

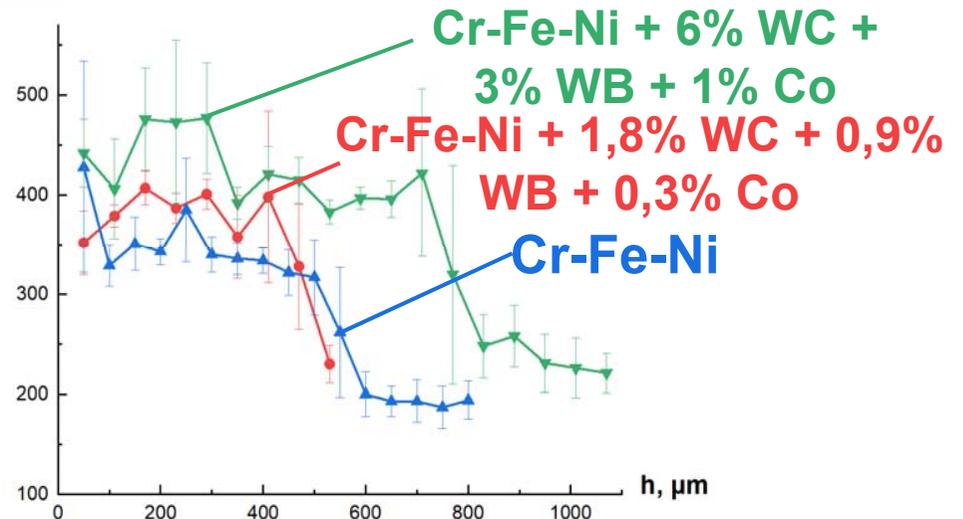


## Образец Cr-Fe-Ni



## Cr-Fe-Ni + 3% / 10% GP10BN

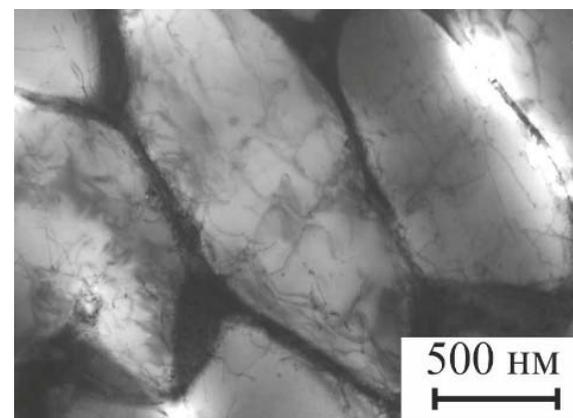
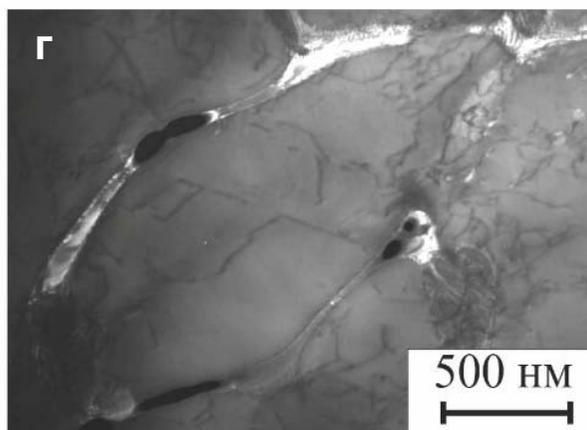
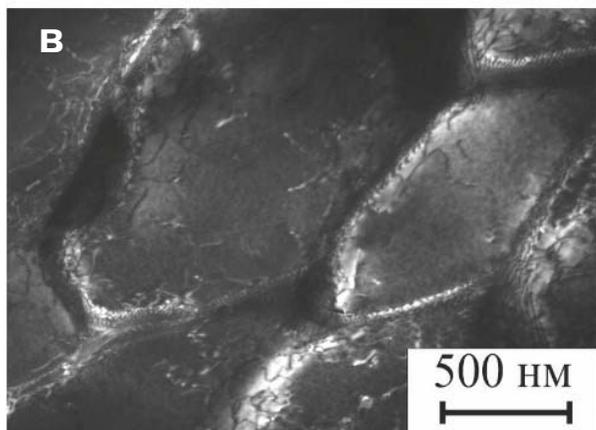
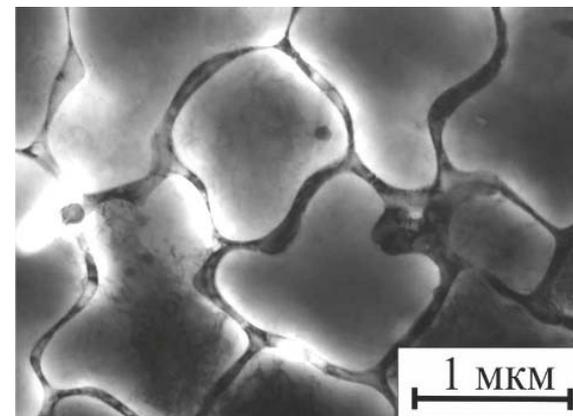
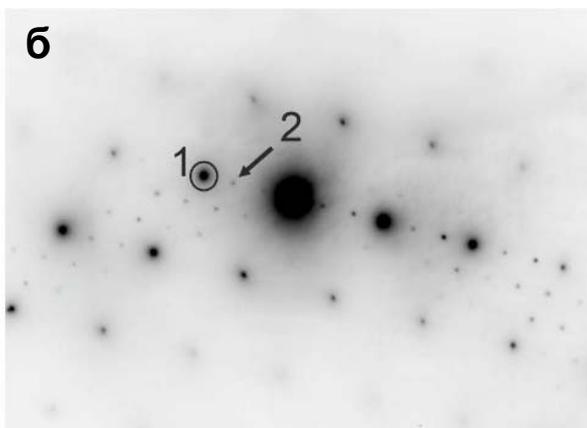
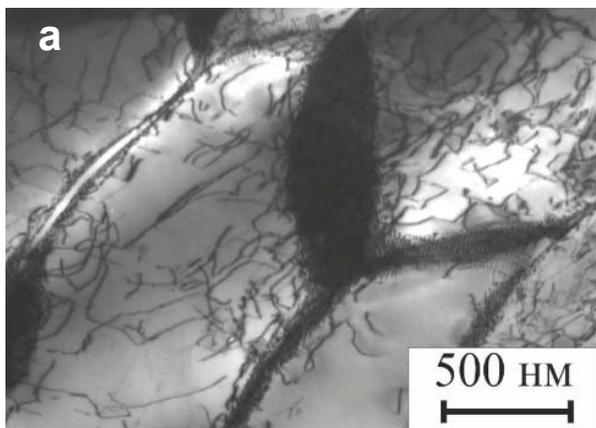
HV 0.025



# Образец Cr-Fe-Ni + 6% WC + 3% WB + 1% Co

## Структура образца

## Общий вид образца светлопольные изображения

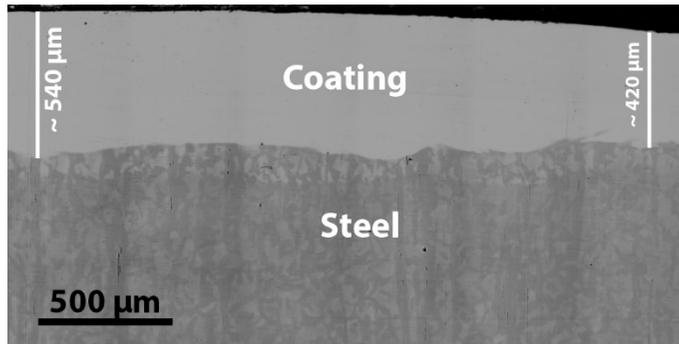


а – светлопольное изображение; б – картина микродифракции;  
в, г – темнопольное изображение в рефлексе 1 (ГЦК) и 2  
( $Me_{23}C_6$ ), соответственно.

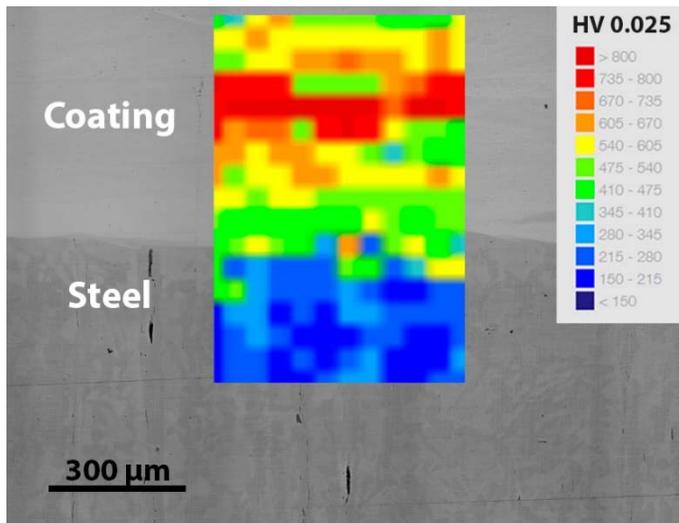
Размер зерен: 1-2 мкм

# Образец CrFeNi + 4,2% WC + 4,2% CrC + 1,6% Ni

## Покрытие

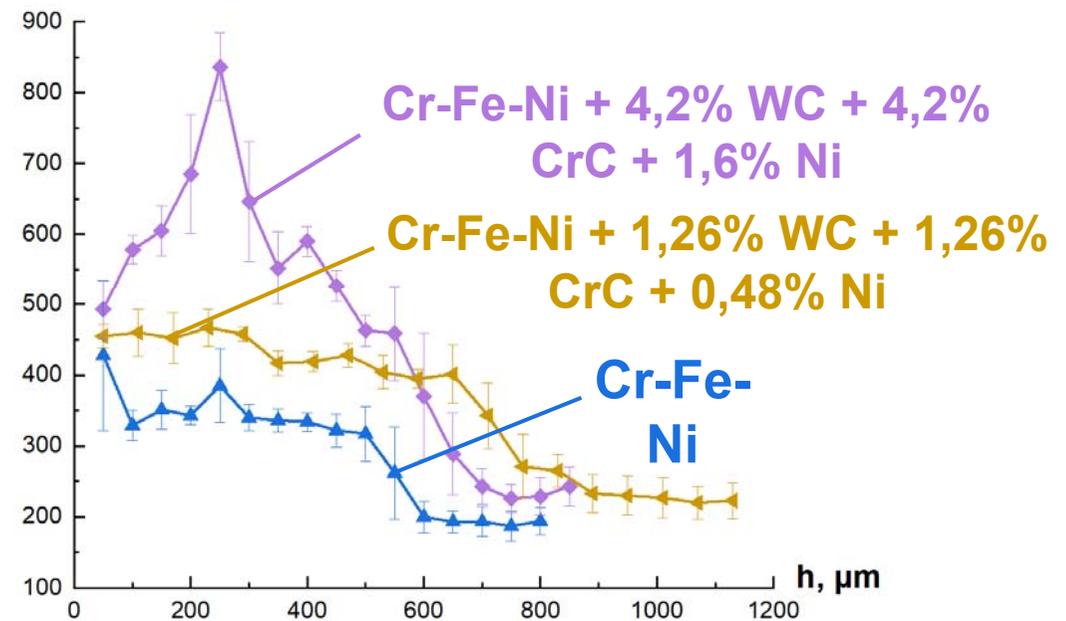


## Карта распределения микротвердости



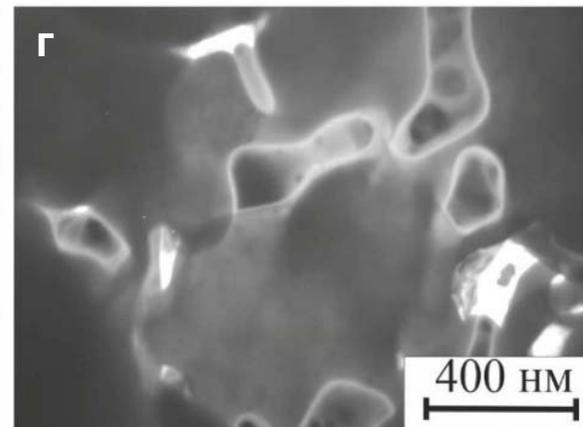
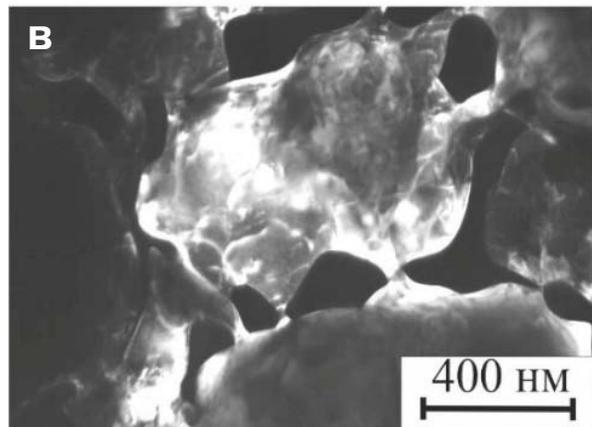
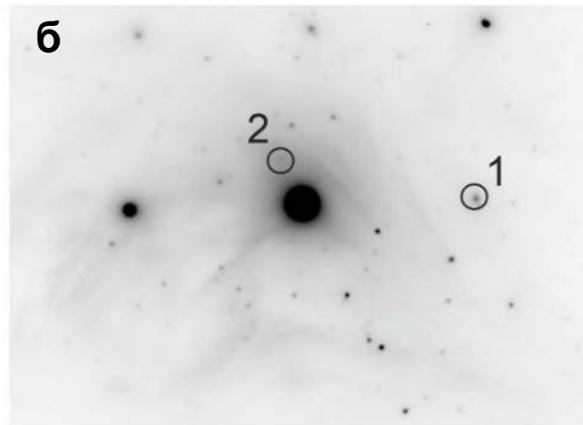
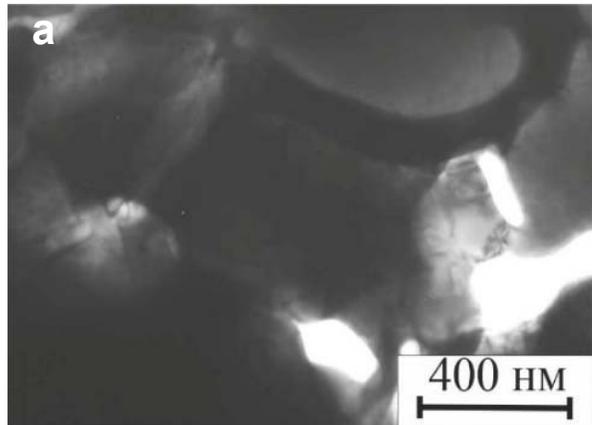
## Cr-Fe-Ni + 3% / 10% Amperit 543.059

HV 0.025



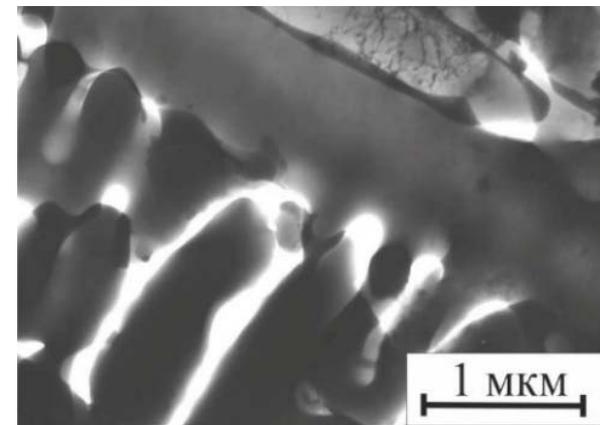
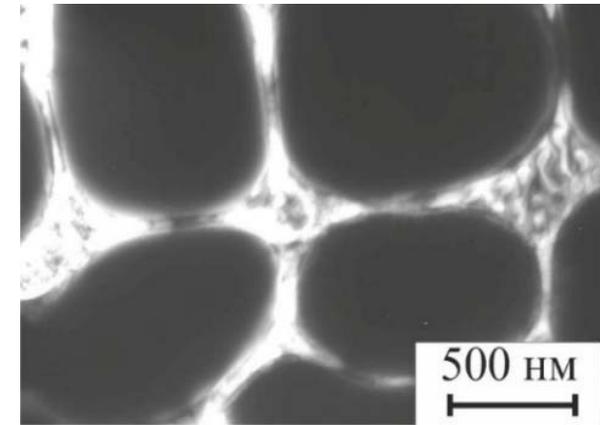
# Образец CrFeNi + 4,2% WC + 4,2% CrC + 1,6% Ni

## Структура образца



## Общий вид образца

светлопольные изображения



а – светлопольное изображение; б – картина микродифракции; в, г – темнопольное изображение в рефлексе 1 (ГЦК) и 2 (Цементит), соответственно.

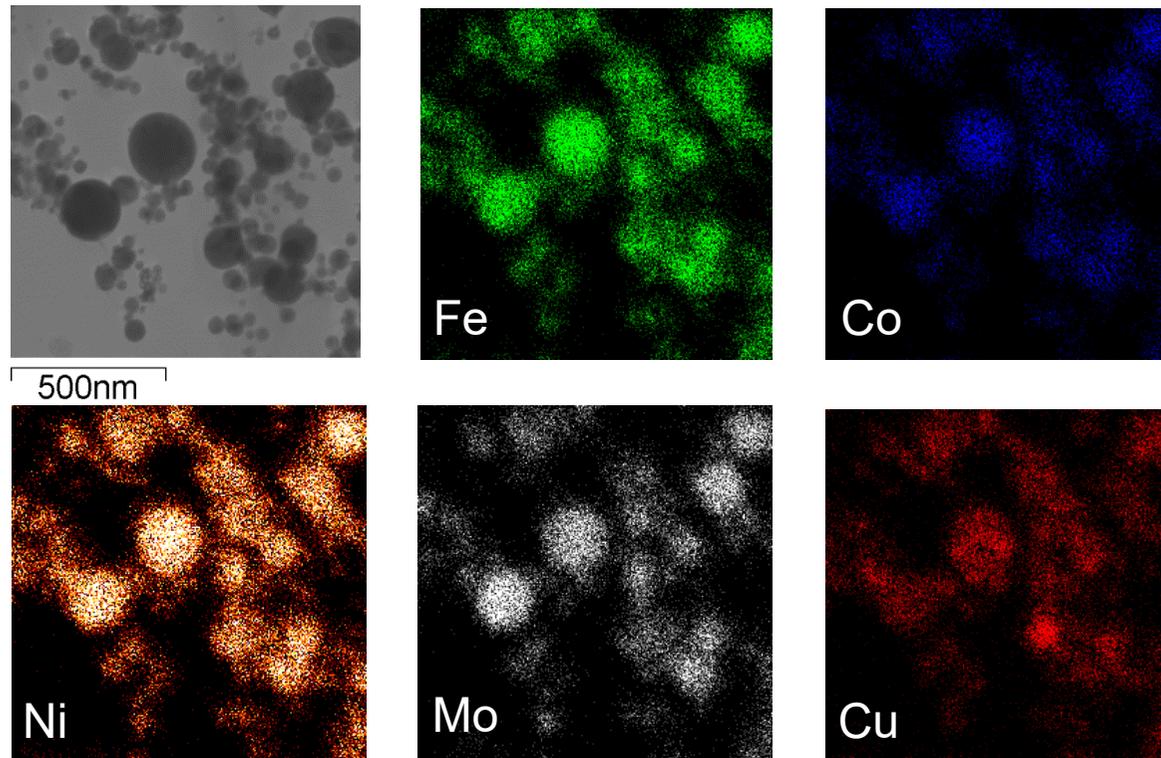
Размер зерен: 1-2 мкм

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ  
НАПЛАВЛЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ  
ЛАЗЕРОМ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ  
Ni29Fe29Mo20Cu13Co9 ПОКРЫТИЙ

## Материалы

Для получения высокоэнтропийного Ni<sub>29</sub>Fe<sub>29</sub>Mo<sub>20</sub>Cu<sub>13</sub>Co<sub>9</sub> нанопорошка использовался метод электрического взрыва проводника (переплетенных между собой проволочек из Cu, Mo, Co и т.д.).

*Результаты исследования лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов ИФПМ СО РАН г. Томск*



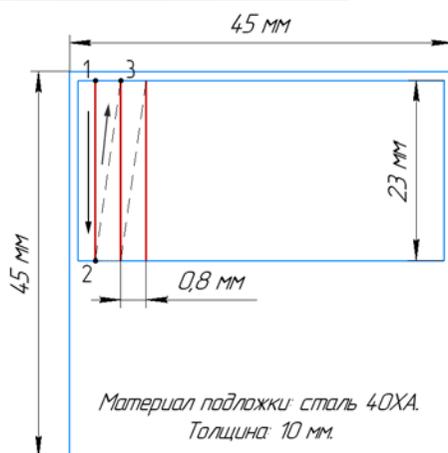
# Способ формирования покрытий – шликерная лазерная наплавка

## Миллисекундный лазер



- Частота импульсов: **20 Гц**;
- Длительность импульса: **3,5 мс**;
- Расстояние между осями наплавленных дорожек – **0,8 мм**.
- Диаметр пятна в плоскости фокусировки — **около 1 мм**.

## Наносекундный лазер



Количество слоёв – 3

Инертная среда – Ar

Схема сканирования образца

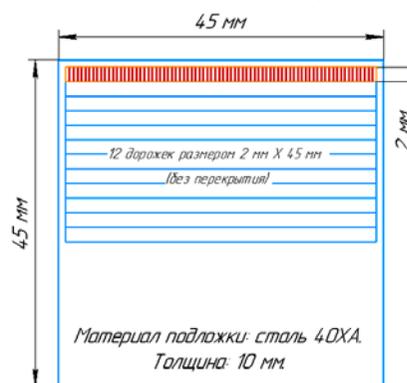
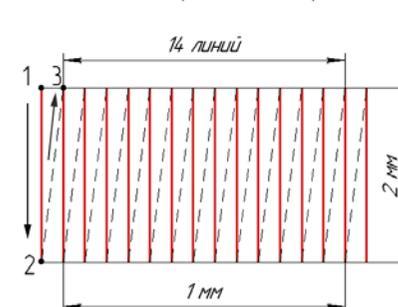


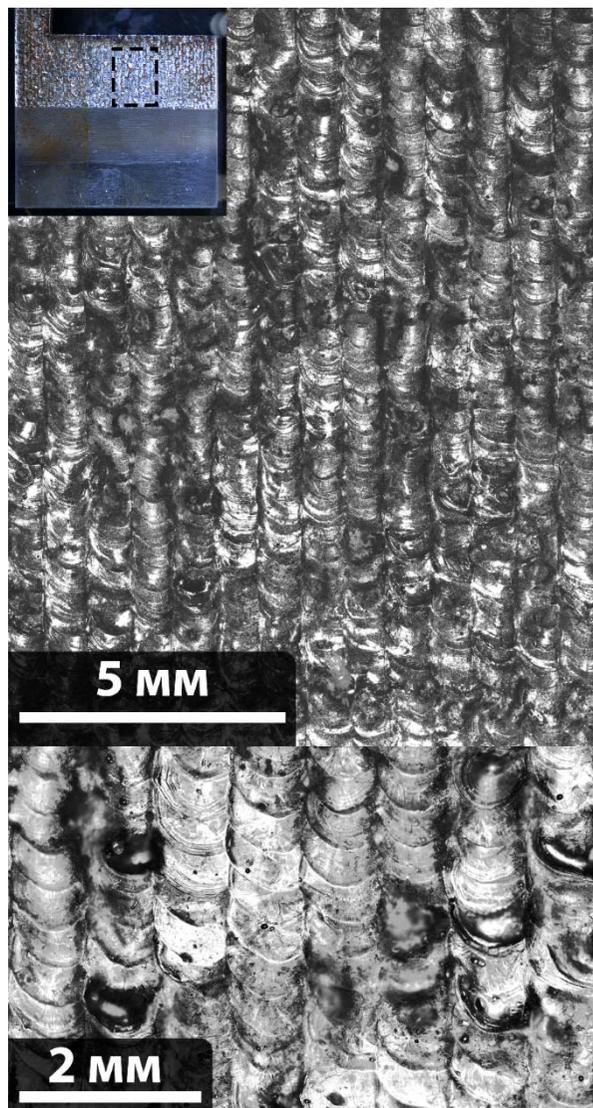
Схема сканирования дорожки



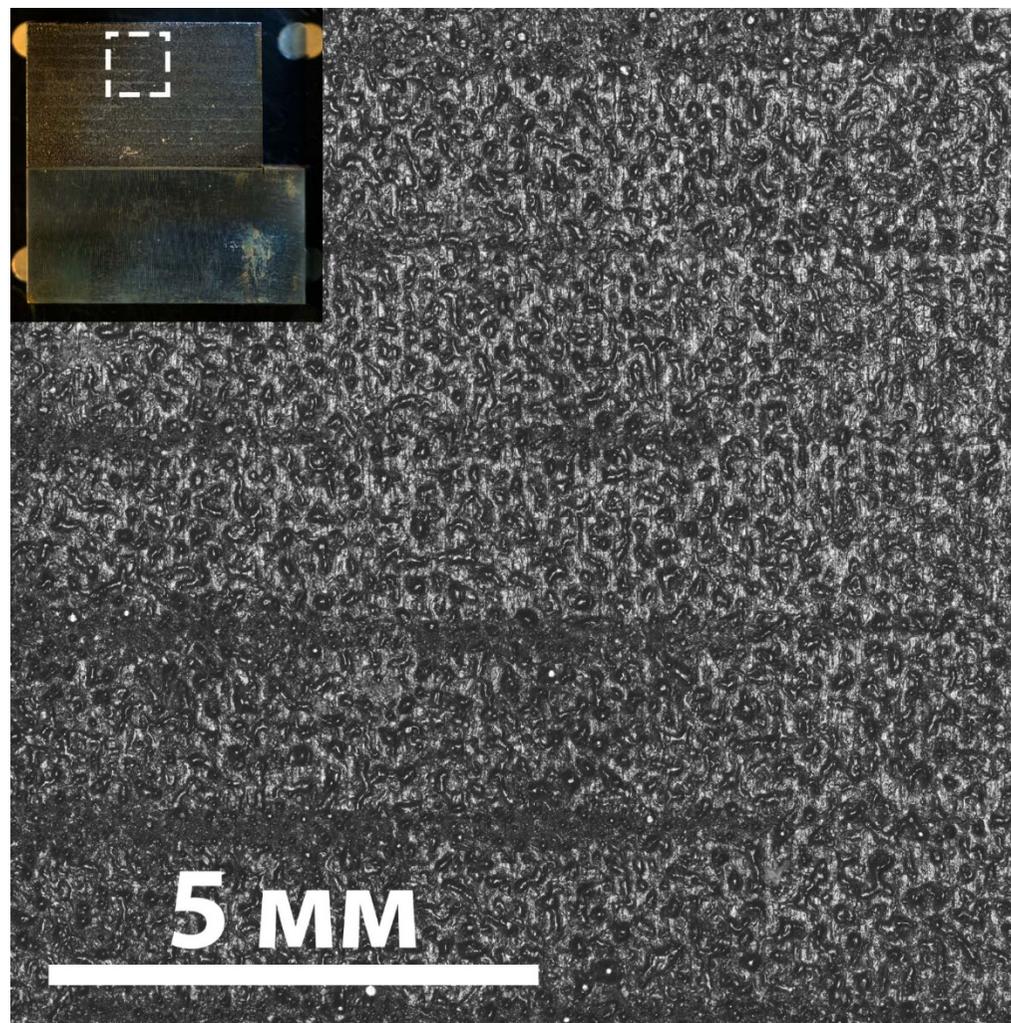
- Частота: **100 кГц**; Длительность импульса: **120 нс**.
- Диаметр пятна в плоскости фокусировки — **около 35 мкм**.

# Поверхность покрытий после лазерной наплавки

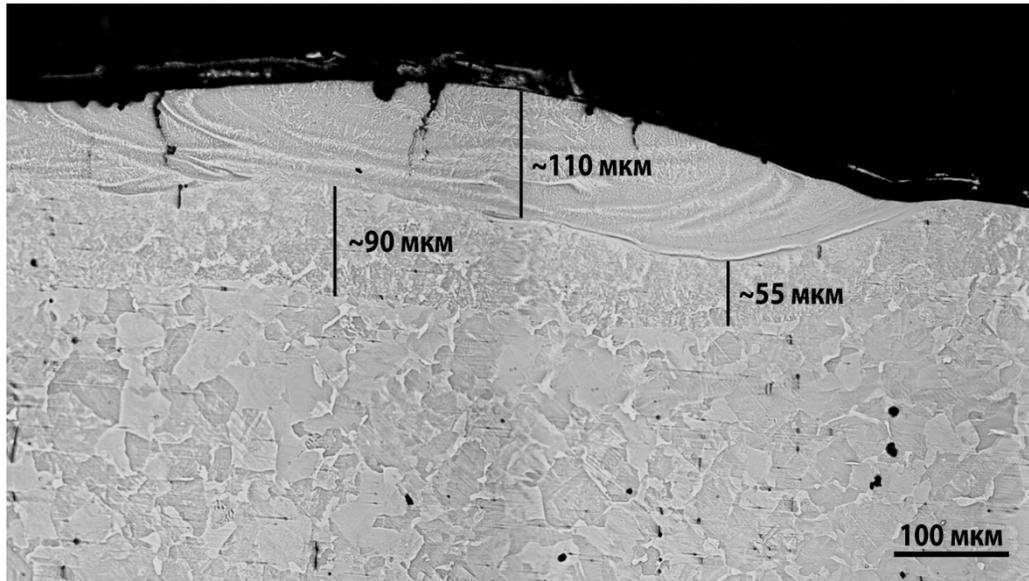
## Миллисекундный лазер



## Наносекундный лазер

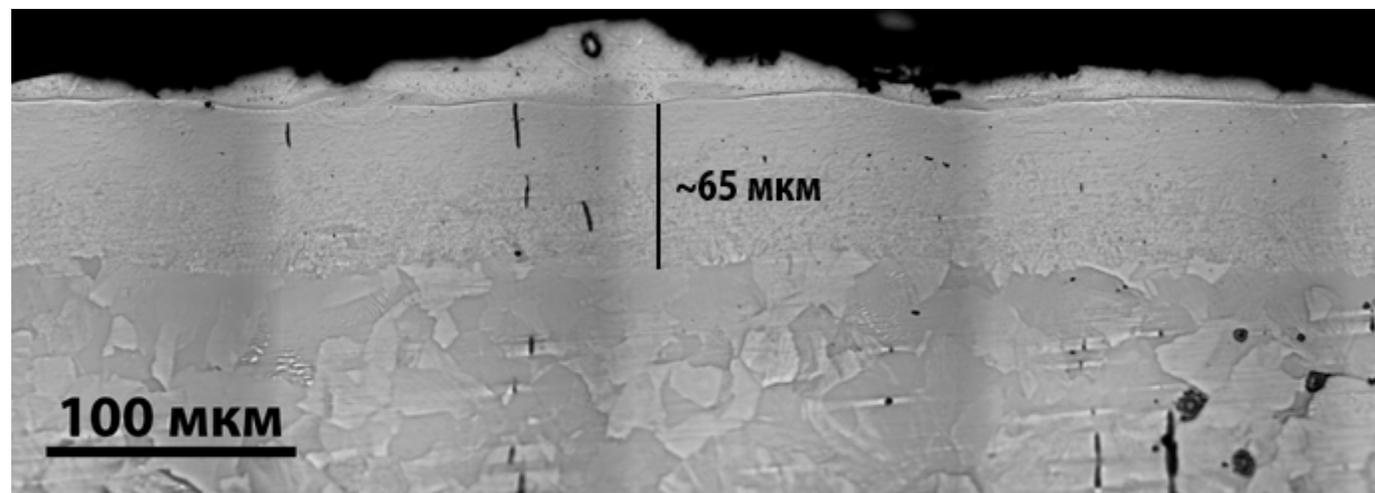


## Общий вид Ni29Fe29Mo20Cu13Co9 покрытий после лазерной наплавки



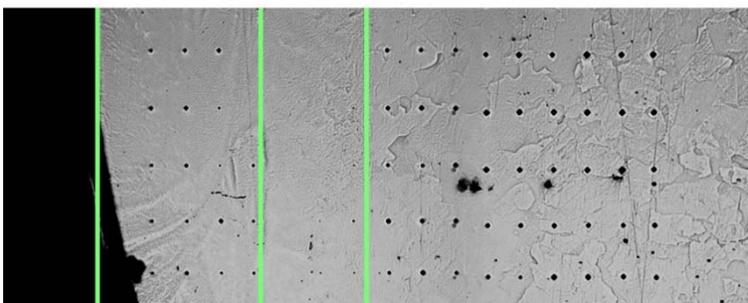
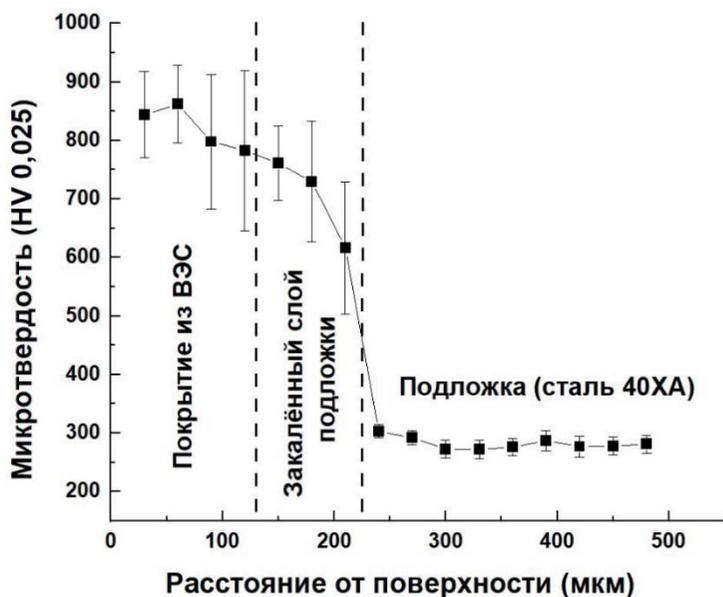
Миллисекундный лазер

Наносекундный  
лазер



# Распределение микротвердости по глубине Ni29Fe29Mo20Cu13Co9 покрытий

## Миллисекундный лазер



## Наносекундный лазер

