



*The morphology of the system Ti-Al-Ni covering, received by means of self-distributing high-temperature synthesis, initiated by electron-beam heating, on the basis of steel St3 is investigated.*

И. В. МУРАШОВА, И. Л. ПОБОЛЬ, ФТИ НАН БЕЛАРУСИ, Ю. В. СОКОЛОВ, БНТУ

УДК 621.9

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Ti-Al-Ni, НАНЕСЕННОГО НА СТАЛЬНУЮ ОСНОВУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

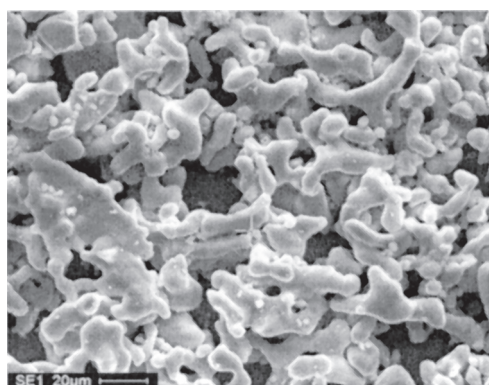
### Введение

Повышение эксплуатационной стойкости инструмента или деталей машин является важнейшей инженерной задачей, которую можно решить, применяя новые конструкционные материалы, либо путем нанесения на поверхность инструмента защитного износостойкого покрытия.

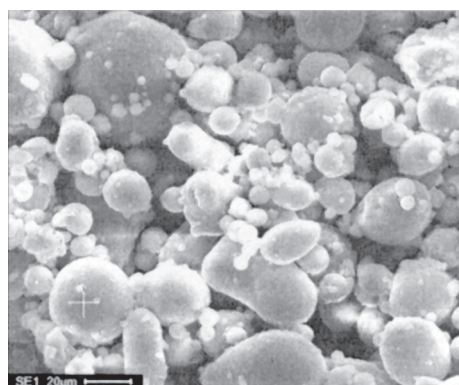
Известно более 200 методов инженерии поверхности, которые можно условно разделить на технологии, не связанные с изменением химического состава материала приповерхностного слоя, и на методы, при реализации которых про-

водится целенаправленное изменение состава материала.

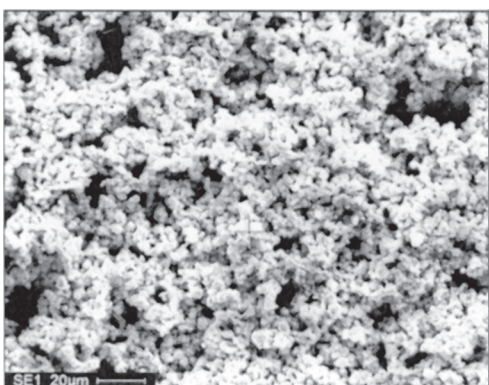
Особое значение среди методов нанесения защитных покрытий на металлическую основу имеют способы с применением источников высококонцентрированной энергии [1]. Применение электронно-лучевого (ЭЛ) нагрева позволяет получать бездефектные слои с более высокими пластическими характеристиками, чем при обычных методах наплавки на воздухе. Это обусловлено рафинирующим действием высокого вакуума и процессами вытеснения примесей при зонной пере-



а



б



в

Рис. 1. Микроструктуры исходных компонентов покрытия Ti-Al-Ni; порошок титана (а), алюминия (б), никеля (в)

кристаллизации [2]. В литературе отсутствуют данные о получении покрытий и синтезе сплавов методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с использованием электронного луча в качестве источника инициализации экзотермической реакции. Ранее нами исследован синтез покрытий методом ЭЛ-СВС системы Ni-Ti с различным содержанием элементов и введением карбида титана и инертных наполнителей [3–5].

Цель работы – исследование структуры и свойств переходной зоны «покрытие–основа» покрытия системы Ti-Al-Ni, полученного методом ЭЛ-СВС.

### Методики исследований

В качестве исходных материалов использовали порошки титана, алюминия и никеля (рис. 1). Порошки предварительно сушили в вакуумном термостатированном шкафу при температуре 100 °С не менее 10 ч. Смешивание компонентов проводили в керамической ступке с последующим перемешиванием в смесителе «Turbula» в течение 4 ч. С помощью ручного пресса прессовали пластины толщиной 3–5 мм, диаметром 10 мм.

Синтез покрытий проводили в ЭЛ установке, созданной на базе энергоблока ЭЛА-15 («Сэлми»,

Сумы, ускоряющее напряжение 60 кВ, мощность луча до 15 кВт, остаточное давление  $10^{-2}$  Па).

В качестве основы использовали сталь марки Ст.3. Таблетки с прессованным шихтовым материалом размещали на стали. Инициацию СВС проводили непрерывно-последовательным нагревом поверхности смеси электронным лучом. Максимальная температура синтеза 1400 °С. При такой температуре образцы сохраняют свою форму в процессе спекания, устойчиво воспламеняются и горят, характер горения автоколебательный.

Для выявления структуры использовали растворы активных кислот (уксусной, серной, азотной и соляной), их смеси, смеси кислот с глицерином, травитель Кеплера (25%  $\text{HNO}_3$ , 25%  $\text{HF}$ , разбавленный водой). Процесс травления осуществляли как при комнатной температуре, так и с подогревом до 70–80 °С и выше.

Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) и энергодисперсионный анализ выполняли на рентгеновском микроанализаторе Genesis 2000 с энергодисперсионным литий-кремниевым детектором FEI515. Исследование микроструктуры проводили на металлографическом оптическом микроскопе МГК-1 при увеличении от 100 до 500 и на растровом электронном микроскопе SEM515 при увеличении 500–10 000.

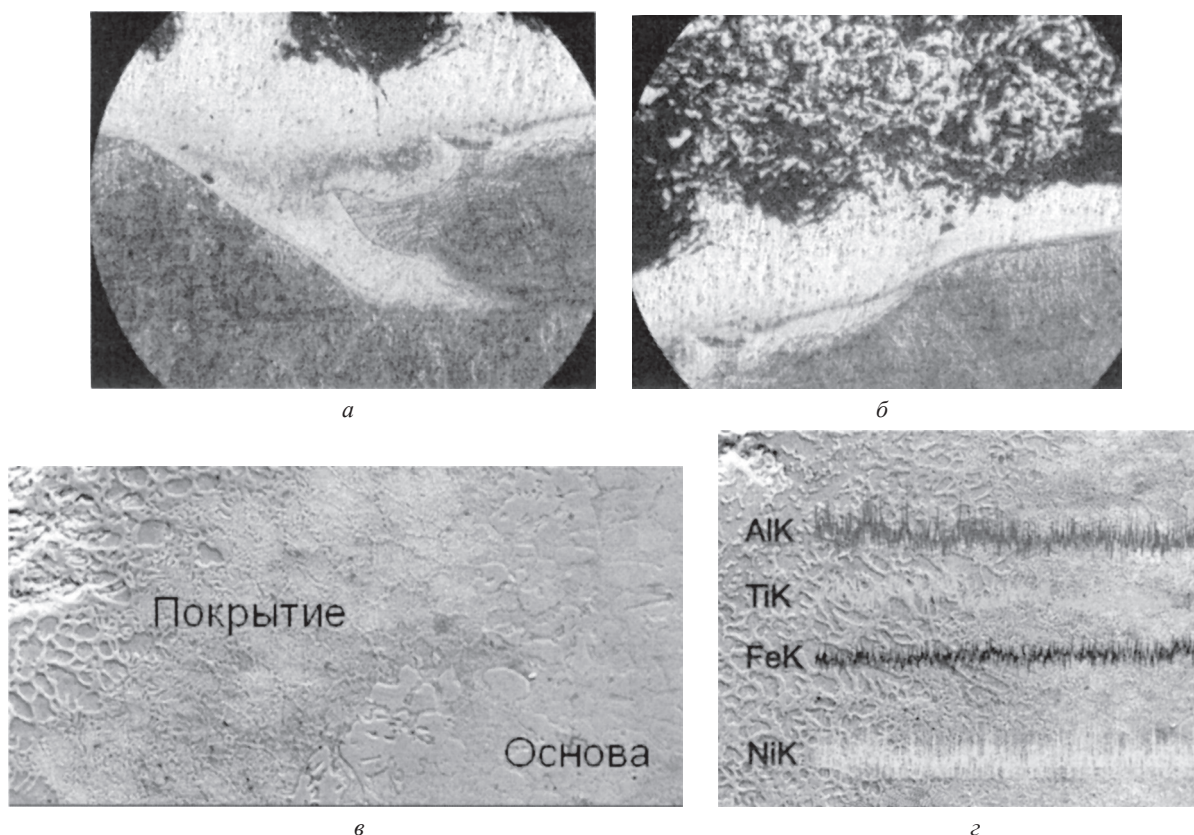


Рис. 2. Структура покрытия системы 70Ti–20Al–10Ni, микроструктура границы «покрытие–основа».  $\times 100$ ; травитель Кеплера (а); пористая структура покрытия на поверхности образца.  $\times 100$ , травитель Кеплера (б); структура покрытия в зоне контакта покрытия с основой (в).  $\times 300$ ; распределение элементов по сечению покрытия (г).  $\times 250$

Микротвердость измеряли на микротвердомерах ПМТ-3 и Struers Duramin с использованием нагрузок 1,962 Н (200 г) и 0,981 Н (100 г) с погрешностью  $\pm 200$  МПа. Исследования проводили на полированных шлифах, приготовленных методом мокрого шлифования.

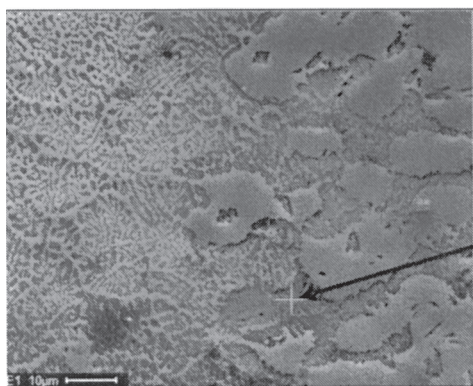
**Результаты исследований**

Эксперименты с нанесением покрытия системы 70Ti–20Al–10Ni на основу из стали Ст.3 методом ЭЛ-СВС показали следующую картину формирования структуры.

На начальном этапе горения в зонах контакта шихтового материала системы 60Ti–30Al–10Ni об-

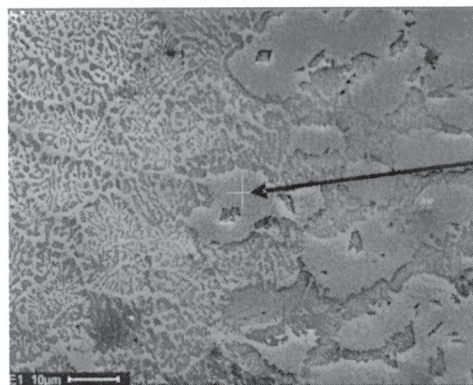
разуется жидкая фаза (эвтектика). После насыщения эвтектики растворенными в ней титаном, алюминием и никелем в расплаве начинают кристаллизоваться интерметаллиды, которые, увеличиваясь в объеме, выдавливаются в близлежащие поры, равномерно заполняя пространство пористого каркаса. Контактные участки порошковой смеси спекаются за счет нагрева до воспламенения и экзотермического тепла.

Анализ микроструктуры полученного покрытия показал, что в результате синтеза формируется неравномерный по сечению образца слой (рис. 2, а). Покрытие имеет неровную границу раздела с основой. Само покрытие состоит из нескольких зон: на



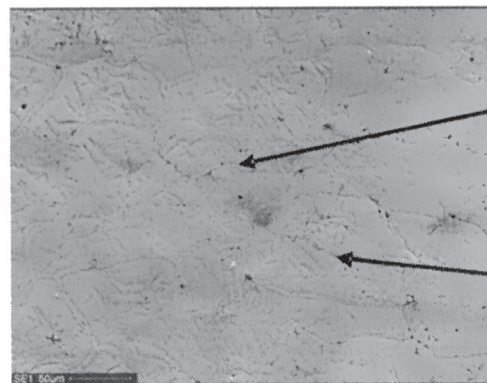
а

Элемент	Мас. %	Ат. %
AlK	06.57	12.14
TiK	21.15	22.35
FeK	72.31	65.51



б

Элемент	Мас. %	Ат. %
AlK	10.11	18.65
TiK	09.09	09.45
FeK	77.92	69.46
NiK	02.89	02.45



в

Элемент	Мас. %	Ат. %
AlK	04.33	08.47
TiK	07.14	07.88
FeK	85.51	80.92
NiK	03.02	02.72

Элемент	Мас. %	Ат. %
AlK	03.56	06.99
TiK	11.10	12.26
FeK	82.52	78.21
NiK	02.82	02.54

Рис. 3. Результаты энергодисперсионного анализа переходной зоны «покрытие – основа»; химический состав зерен основы (а) и твердого раствора на основе железа, расположенного по границам зерен (б); химический состав стальной основы на расстоянии 400 мкм от переходной зоны «покрытие – основа» (в)

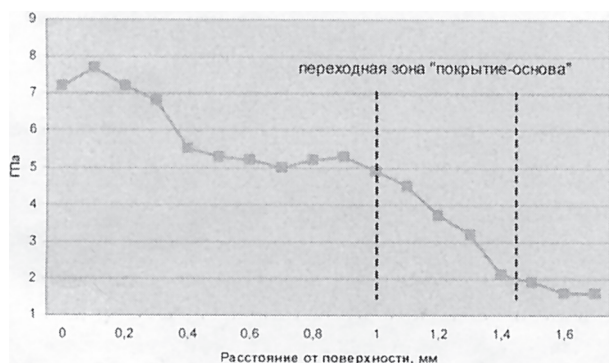


Рис. 4. Микротвердость покрытия системы 70Ti-20Al-10Ni на основе из стали Ст.3

поверхности оно пористое (рис. 2, б), а вблизи основы микроструктура имеет дендритный характер (рис. 2, в), что связано с разницей скорости охлаждения вблизи основы и у поверхности образца. Структура стали Ст.3 около покрытия представляет собой мартенситно-трооститную смесь, причем на границе раздела наблюдается перемешивание основы с покрытием. МРСА показал равномерное распределение элементов, входящих в состав покрытия, по толщине слоя (рис. 2, з).

Исследования микроструктуры покрытия при больших увеличениях выявили сложнотемпературный характер переходного слоя «покрытие-основа». На этом участке происходит легирование основы элементами покрытия на глубину около 400 мкм. Для зоны перемешивания покрытия с ма-

териалом основы структура представлена зернами округлой формы и твердым раствором на основе железа, с растворенными в нем титаном, алюминием и никелем, располагающимися по границам зерен. Результаты энергодисперсионного анализа структуры приведены на рис. 3.

Микротвердость покрытия плавно снижается от поверхности (7,2–7,6 ГПа) к основе (1,9–1,3 ГПа) (рис. 4).

### Выводы

1. Изучено структурообразование покрытия системы 70Ti-20Al-10Ni. Граница раздела «покрытие-основа» неровная. Характер структуры покрытия – эвтектический. На поверхности сохраняется пористость.

2. Определено, что в зоне контакта «покрытие-основа» происходит перемешивание материалов. Глубина легирования основы титаном, алюминием и никелем составляет около 400 мкм. Структура представлена мартенситно-трооститной смесью.

3. Измерения микротвердости по сечению покрытия показывают ее плавное снижение в зоне контакта «покрытие-основа». Результаты исследований свидетельствуют о возможности использования изделий с покрытием системы 70Ti-20Al-10Ni при изготовлении деталей, эксплуатирующихся при интенсивном износе.

### Литература

1. Шипко А. А., Поболь И. Л., Урбан И. Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
2. Алехнович В. Н., Алифанов А. В., Гордиенко А. И., Поболь И. Л. Электронно-лучевая обработка материалов. Мн.: Белорусская наука, 2006.
3. Поболь И. Л., Кулак М. М., Гринкин А. В., Мурашова И. В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез материалов при электронно-лучевом нагреве // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии. Ч. 2. Гродно, 2006. С. 102–109.
4. Гринкин А. В., Мурашова И. В. Исследование структуры и свойств покрытий систем (Ni-Ti)-C и (44Ni-56Ti)+TiO<sub>2</sub> // Междунар. науч. техн. конф. «Современные технологии создания и обработки материалов». Мн., 2008. С. 306–311.
5. Мурашова И. В., Гринкин А. В., Поболь И. Л. Морфология и структурные особенности материала и покрытий системы (44Ni-56Ti)+TiO<sub>2</sub>, полученных методом СВС // Сварка и родственные технологии. Мн., 2008. С. 48–52.