

## ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ТВЕРДОГО СПЛАВА Т15К6 ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ

Е.А. Крутилина<sup>1)</sup>, В.И. Шиманский<sup>1)</sup>, Д.А. Осипенков<sup>1)</sup>, А.А. Подобед<sup>1)</sup>,  
В.М. Асташинский<sup>2)</sup>, А.М. Кузьмицкий<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, soldatenko@tut.by

<sup>2)</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
ул. П. Бровки 15, Минск 220072, Беларусь

Исследована внутренняя структура твердого сплава Т15К6 после высокотемпературного изотермического ( $700^{\circ}\text{C}$ ) отжига в воздушной атмосфере в течение 30-180 минут. Установлено формирование двух зон, имеющих четкую границу. Внутренняя зона характеризуется структурой, соответствующей исходному состоянию. Во внешней зоне наблюдаются продолговатые зерна карбидных фаз WC и (Ti,W)C, увеличенные (в 5-6 раз) по направлению движения теплового фронта при нагреве образцов, что связывается с диффузионным проникновением кислорода вглубь материала и его взаимодействием с углеродом в составе фаз WC и (Ti,W)C. Воздействие компрессионных плазменных потоков снижает толщину внешней зоны после 180 минут отжига приблизительно в 1.4 раза.

**Ключевые слова:** твердый сплав; компрессионные плазменные потоки; внутренняя структура, отжиг в воздушной атмосфере.

## INTERNAL STRUCTURE OF T15K6HARD ALLOY AFTER HIGH-TEMPERATURE HEATING IN AIR

Evgeniya Krutsilina<sup>1)</sup>, Vitali Shymanski<sup>1)</sup>, Danila Osipenkov<sup>1)</sup>, Anna Podobed<sup>1)</sup>,  
Valyantsin Astashynski<sup>2)</sup>, Anton Kuzmitski<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University,

4 Nezavisimosty Ave., 220030 Minsk, Belarus, soldatenko@tut.by

<sup>2)</sup>Institute of Heat and Mass Transfer. A.V. Lykov National Academy of Sciences of Belarus,  
15 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus

The internal structure of the T15K6 hard alloy after high-temperature isothermal ( $700^{\circ}\text{C}$ ) heating in air for 30-180 minutes was investigated. It was established that two zones with a clear boundary form. The internal zone is characterized by a structure of the initial state. In the external zone, WC and (Ti,W)C carbide phases elongated grains are observed. The grains size increases approx. in 5-6 times in the direction of the thermal front movement during the samples heating. The formed internal structure is associated with the diffusion penetration of oxygen deep into the material and local stoichiometric composition disorder. The effect of compressive plasma flows reduces the thickness of the external zone approx. by 1.4 times. In the layer, formed by the compressive plasma flows action, no grains coarsening is observed.

**Keywords:** hard alloy; compressive plasma flows; alloying; internal structure, heating in air.

### Введение

Твердый сплав – композиционный многофазный материал, сочетающий высокую твердость, износостойкость, прочность и теплостойкость ( $600\text{-}800^{\circ}\text{C}$ ), что обусловило как его широкое практическое приме-

нение, так и существующий научный интерес к данному материалу. Важным является изучение структурных особенностей твердых сплавов при высокотемпературных отжигах на воздухе, что имитирует условия эксплуатации твердосплавных из-

делий. Установление подобных закономерностей позволит управлять свойствами материала и повысить надежность изделий.

### Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлся твердый сплав Т15К6 (WC-15TiC-6Co, вес.%). Одна группа образцов обрабатывалась 5 импульсами компрессионных плазменных потоков (КПП) с использованием квазистационарного плазменного компрессора типа МПК компактной геометрии. Другая группа находилась в исходном состоянии. Напряжение на системе конденсаторов составляло 4 кВ. Расстояние между поверхностью обрабатываемого образца и срезом электрода разрядного устройства составляло 8 см. Длительность импульса плазменного воздействия - 100 мкс. МПК работал в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откаченная вакуумная камера заполнялась азотом до давления в 400 Па. Высокотемпературный отжиг проводился на воздухе и в вакууме в муфельной печи при температуре 700°C в течение 30-180 минут. Определение элементного состава исследуемых образцов твердого сплава методом рентгеноспектрального микроанализа осуществлялось с помощью микроанализатора Röntec, работающего совместно с растровым электронным микроскопом (РЭМ) LEO-1455 VP.

### Результаты и их обсуждение

На РЭМ-изображении (рис. 1) поперечного сечения твердого сплава в исходном состоянии хорошо выявляются частицы карбидных фаз (области белого и серого цветов соответственно карбиды WC и (Ti,W)C). Внутреннее строение твердого сплава характеризуется большим разбросом значений размеров частиц (средний размер 1–2 мкм), ярко выраженным их границами и присутствием пор между частицами.

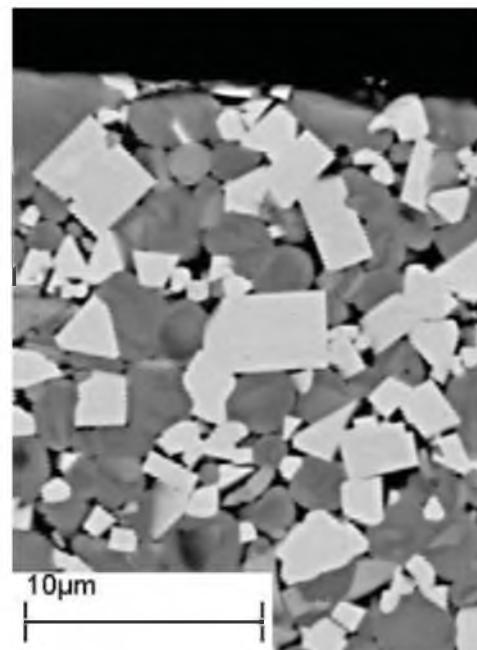


Рис. 1. РЭМ-изображение поперечного сечения твердого сплава Т15К6 в исходном состоянии

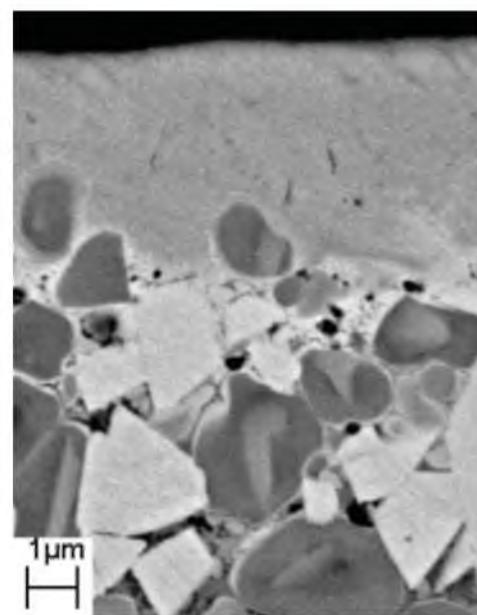


Рис. 2. РЭМ-изображение поперечного сечения твердого сплава Т15К6, модифицированного компрессионными плазменными потоками

Вследствие плавления фазовых составляющих, формирования больших температурных градиентов ( $\sim 10^7$  К/м), вызывающих охлаждение расплавленного слоя с высокими скоростями ( $\sim 10^6$ – $10^7$  К/с), внутренняя структура образцов твердого сплава после воздействия КПП становится многозонной (рис. 2).

Внешний слой характеризуется однородным элементным составом и дисперсной структурой и образован за счет перемешивания компонентов сплава в жидкокомпозитном состоянии. Его глубина при данном режиме плазменного воздействия составляет около 5 мкм. Стоит отметить отсутствие пор в модифицированном слое.

При исследовании внутренней структуры отожженных образцов твердого сплава методом РЭМ было обнаружено, что внешний слой образцов, находящихся на открытой атмосфере, изменяет свою микроструктуру. Именно этот приповерхностный слой находится при максимальной температуре 700°C, которая уменьшается с глубиной. Во внутренней структуре твердого сплава после изотермического отжига можно выделить два слоя, имеющих четкую границу: внутренний слой, в котором размер и форма зерен соответствуют исходному состоянию, и внешний слой с увеличенными в направлении температурного градиента зернами (рис. 3). Увеличение продольного размера карбидных зерен достигает 5–6 раз.

Толщина внешнего слоя после отжига в течение 180 минут достигает приблизительно 55 мкм для исходного образца и 40 мкм для модифицированного образца. В слое твердого сплава толщиной до 10 мкм, сформированном воздействием КПП, укрупнения зерен не наблюдается. Причиной стабилизации микроструктурного состояния может служить избыточная поверхностная энергия на границах дисперсных зерен, полученных при скоростной кристаллизации расплава. С целью определения ключевой роли кислорода в формировании указанной внутренней структуры был выполнен отжиг исходного образца твердого сплава в вакууме при температуре 700°C в течение 180 минут.

Согласно данным РЭМ-исследований, внутренняя структура твердого сплава после вакуумного отжига соответствует ис-

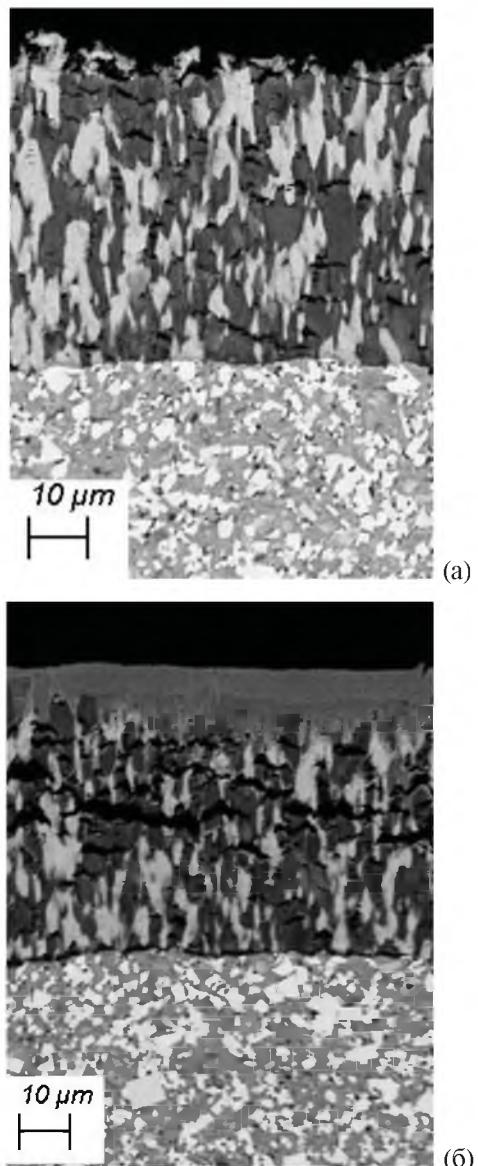


Рис. 3. РЭМ-изображение поперечного сечения твердого сплава Т15К6 после высокотемпературного отжига при 700°C в течение 180 минут: а – исходный образец; б – модифицированный компрессионными плазменными потоками образец

ходной. Кроме того, результаты РСМА показали, что глубина проникновения кислорода соответствует границе между слоем с увеличенными зернами карбидных фаз и слоем с исходной структурой. Таким образом, предполагается, что формирование продолговатых укрупненных зерен может быть связано с диффузией кислорода из воздушной атмосферы вглубь образца преимущественно по границам зерен WC и (Ti,W)C и его взаимодействием с углеро-

дом, входящим в состав карбидов. Как результат, локально нарушается стехиометрический состав указанных фаз, что приводит к их распаду на составляющие атомы, которые затем присоединяются к более крупным частицам.

### **Заключение**

В результате высокотемпературного изотермического отжига ( $700^{\circ}\text{C}$ , 30-180 минут) во внутренней структуре твердого сплава Т15К6 формируется внешний

слой с зернами WC и (Ti,W)C, характеризующимися увеличением размера в 5-6 раз в направлении распространения температурного фронта. Наблюдаемая структура связана с локальным нарушением стехиометрического состава карбидов в результате проникновения кислорода в твердый сплав при нагреве. Воздействие компрессионных плазменных потоков уменьшает толщину формируемого слоя приблизительно в 1.4 раза.