



УДК 669.295:539.5

**СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ  
ОРТОРОМБИЧЕСКОГО МАРТЕНСИТА  
В  $(\alpha+\beta)$ -ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ VT16  
ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ И ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

С.С. Манохин, М.Б. Иванов, Ю.Р. Колобов

Научно-образовательный и инновационный центр  
«Наноструктурные материалы и нанотехнологии»,  
Белгородский государственный университет,  
ул. Победы, 85, Белгород, 308015, Россия, e-mail: [manohin@bsu.edu.ru](mailto:manohin@bsu.edu.ru)

**Аннотация.** Современными методами аналитической просвечивающей электронной микроскопии (в том числе высокоразрешающей) и рентгеноструктурного анализа (РСА) исследованы структурно-фазовые превращения в титановом сплаве VT16 с исходной структурой орторомбического мартенсита с дополнительной холодной прокаткой на различную степень деформации и последующим отжигом.

**Ключевые слова:** титановый сплав VT16, распад метастабильных фаз, просвечивающая электронная микроскопия.

**1. Введение.** Известно, что титановые сплавы обладают рядом преимуществ перед другими металлами и сплавами. Например, в сравнении со сталью, они характеризуются значительно более высокой коррозионной стойкостью и биосовместимостью в средах живых организмов. Они немагнитны и имеют существенно меньший удельный вес. Указанные свойства позволяют титановым сплавам находить широкое применение в медицине при изготовлении имплантатов, а также микрохирургического инструмента [1,2]. Среди титановых сплавов, наиболее предпочтителен для практического использования в медицинском инструментарии  $(\alpha+\beta)$ -титановый сплав мартенситного класса VT16, поскольку он обладает достаточно хорошей пластичностью и способен сильно упрочняться при термообработке [3]. Дополнительное ионное азотирование сплава VT16 с нанофазным упрочнением перспективно для изготовления медицинского инструмента [4]. Природа упрочнения этого сплава связана с фазовыми превращениями в интервале температур 573-873 К.

Цель работы – исследование фазовых и структурных превращений в указанном сплаве после холодной деформации и последующих отжигов.

**2. Материалы и методика проведения эксперимента.** Исследуемый в данной работе титановый сплав, относится к  $(\alpha+\beta)$ -классу системы Ti-Al-Mo-V. Сплав VT16 имеет следующий химический состав (мас. %): Al-3.2, Mo-5.4, V-4.4, Fe-0.6, Zr-0.3, O-0.2, Si-0.1, N-0.05, H-0.0015, остальное Ti.

Термическую обработку образцов, размерами 1×2×4 см проводили в электропечах сопротивления типа ИТМ 33.1100. Термическую обработку осуществляли в  $\alpha+\beta$ -области. Материал закачивали в воду от температуры 1073-1123 К. Листовую холодную прокатку проводили в плоских вальцах при комнатной температуре на степень

20 и 50%. Микроструктуру образцов исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе Теснаи G2 F20 S-TWIN при ускоряющем напряжении 200 кВ в режиме просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (СПЭМ). Распределение химических элементов в сплаве после различных обработок определяли методом энергодисперсионного рентгеноспектрального (ЭДРС) анализа в режиме СПЭМ с использованием приставки фирмы EDAX и программного обеспечения TIA и Genesis Microanalysis. Фазовый состав определяли методом РСА на дифрактометре ARL X'TRA. Съёмка проводилась в монохроматизированном медном излучении  $\text{CuK}_\alpha$ . Качественный фазовый анализ проводили с помощью программы полнопрофильного анализа PowderCell v2.4.

**3. Результаты исследования.** Методом пробных закалок установлено, что температура полиморфного превращения ( $T_{п.п.}$ ) в исследуемом сплаве составляет  $1138 \pm 5$  К. После закалки из  $\alpha + \beta$ -области ( $T_{п.п.} - 20 - 40$  К) в воду по данным РСА в сплаве присутствуют преимущественно орторомбический мартенсит  $\alpha''$ , первичная  $\alpha$ -фаза и небольшое количество метастабильной  $\beta$ -фазы. По данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) микроструктура представлена первичными глобулярными частицами  $\alpha$ -фазы и орторомбическим  $\alpha''$ -мартенситом с пластинчатой морфологией и средней толщиной мартенситных пластин порядка 0,5 мкм (рис. 1 а).

После холодной деформации микроструктура сплава утрачивает типичную для мартенситного состояния пластинчатую морфологию (рис. 1 б).

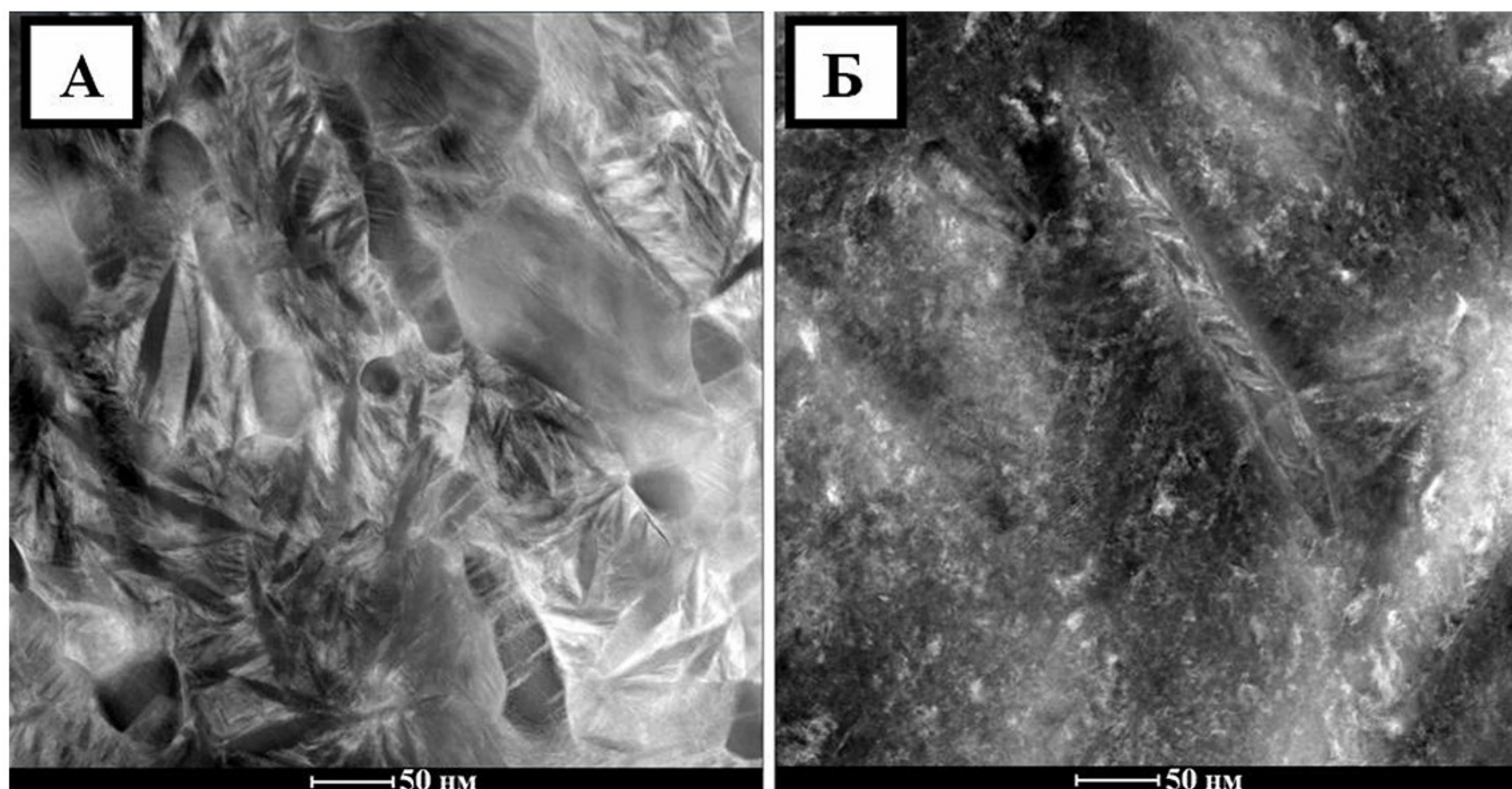


Рис. 1. Структура сплава BT16 в состояниях:

а) после закалки от 1093 К в воду, б) после холодной деформацией прокаткой на 50%.

Сканирующая просвечивающая электронная микроскопия.

Методами РСА установлено, что под воздействием холодной пластической деформации в закаленном материале происходит фазовое превращение  $\alpha'' \rightarrow \alpha'$  (рис. 2).

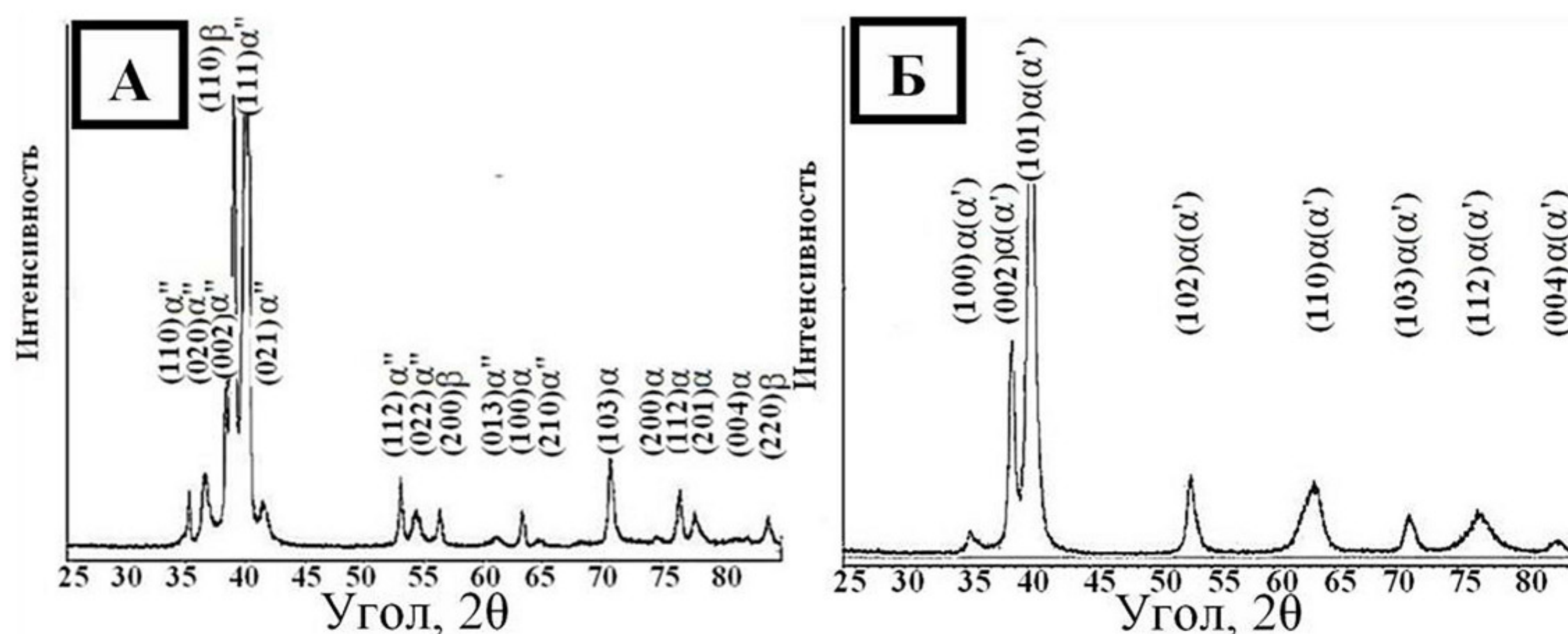


Рис. 2. Рентгенограммы сплава VT16 в состояниях:

а) закалка с 1093 К в воду, б) после закалки с последующей холодной прокаткой на 50%.

По данным РСА после 20% деформации отсутствуют характерные рефлексы орторомбической  $\alpha''$ -фазы в малых углах ( $34-36^\circ$ ) типа  $(110)_{\alpha''}$  и  $(020)_{\alpha''}$ , а также присутствует характерный рефлекс для  $\alpha'$ -фазы отражение типа  $(100)_{\alpha'}$ . Не обнаруживаются расщепления на пары типа  $(111+021)_{\alpha''}$ ,  $(112+022)_{\alpha''}$  и  $(200+130)_{\alpha''}$ . Слияние каждой пары дублетных максимумов орторомбической фазы, индуцируется как отражения ГПУ  $\alpha'$ -фазы. После закалки и последующей холодной деформации на 50% в структуре сплава обнаруживается исключительно  $\alpha'$ -фаза (рис. 2).

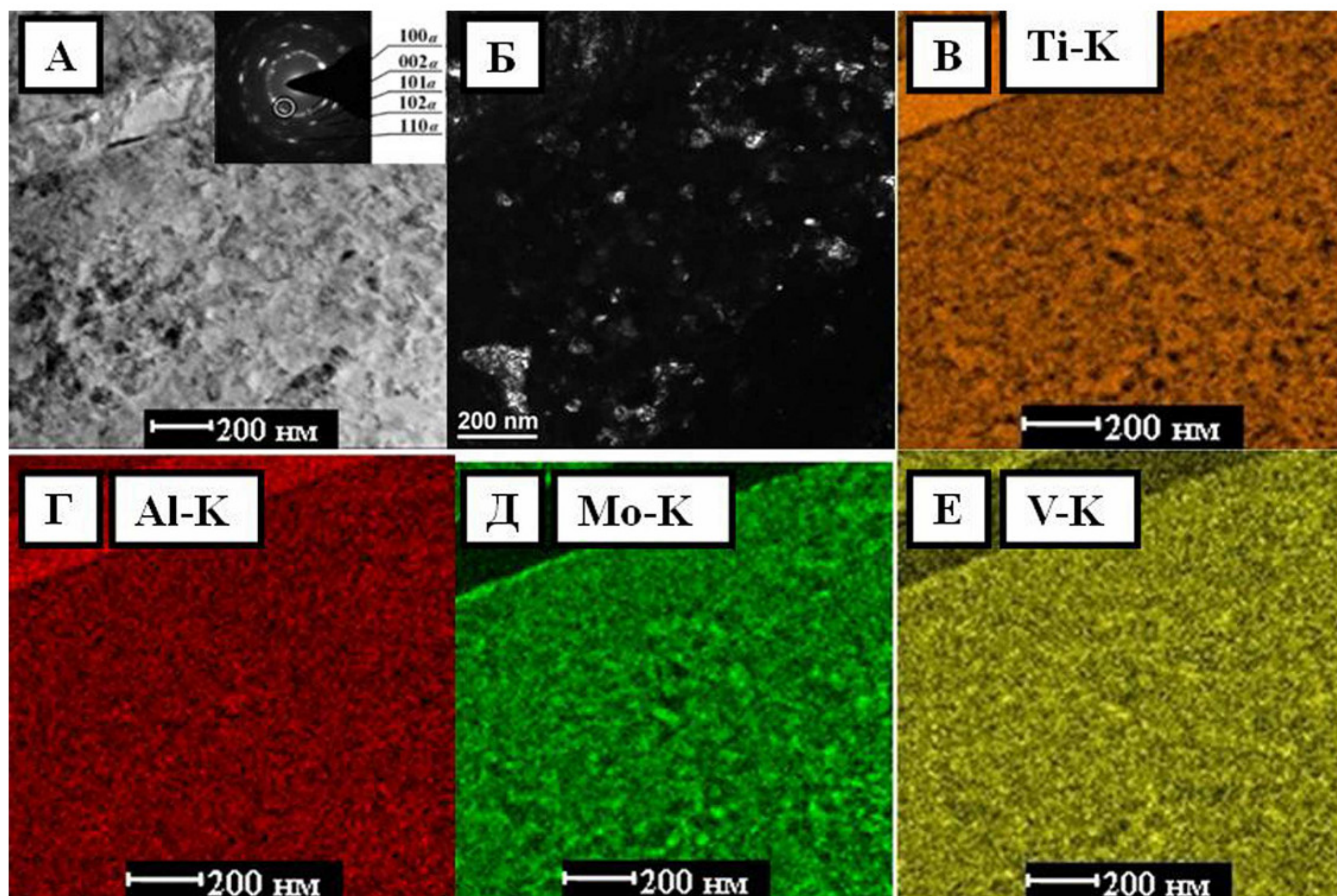


Рис. 3. Микроструктура сплава VT16 после закалки на орторомбический мартенсит, последующей холодной деформации на 50% и отжига при 823 К:

а) СПЭМ и микродифракция с площади  $30 \text{ мкм}^2$ ; б) тёмное поле в рефлексах  $[100]_{\alpha'}$ ; в) - е) распределение элементов по данным ЭДРС анализа.



Отжиг холоднодеформированного мартенсита при температурах 573-773 К приводит к формированию нанофазной структуры. На микродифракционных картинах наблюдается кольцевое распределение рефлексов, сгруппированных в широкие скопления максимумов, свидетельствующих о наличии текстуры (рис. 3 а, 3 б).

Методом ЭДРС анализа установлено, что при отжиге деформированного материала имеет место гомогенный распад метастабильного твёрдого раствора (на основе  $\alpha'$ -фазы). Формирующиеся  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы имеют морфологию близкую к глобулярной (рис. 3 в – 3 е).

**4. Заключение.** В закаленном титановом сплаве ВТ16 при холодной деформации происходит фазовое превращение, в ходе которого орторомбический мартенсит пластинчатой морфологии превращается в бесструктурную ГПУ  $\alpha$ -фазу. Последующий отжиг приводит к формированию обогащённых и обеднённых легирующими элементами наноразмерных областей. Распад  $\alpha'$ -фазы происходит гомогенно, при этом формируются кристаллиты  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз размерами порядка 20 нм с морфологией, близкой к глобулярной.

Работа проводилась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. госконтракт №02.740.11.0137 и П329, а также проекта №2.1.2/9427 аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» с использованием аналитического оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» БелГУ.

### Литература

1. Wong J.Y. Biomaterials / J.Y. Wong, Y. Joyce, J.D. Bronzino, D. Joseph // New York: CRC Press, 2007. – 365 p.
2. Колобов Ю.Р. Технологии формирования структуры и свойств титановых сплавов для медицинских имплантатов с биоактивными покрытиями / Ю.Р. Колобов // Российские нанотехнологии. – 2009. – №11-12. – С.69-81.
3. Moiseyev N. Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications / Moiseyev, N. Valentin // Taylor and Francis, 2006. – 207 p.
4. Вершинин Д.С. Исследование трибологических свойств азотированного титанового сплава ВТ16 / Д.С. Вершинин, М.Ю. Смолякова, С.С. Манохин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – 76;12. – С.45-49.



**STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS OF  
ORTHORHOMBIC MARTENSITE  
IN THE  $(\alpha+\beta)$ -TITANIUM ALLOY VT16  
AT DEFORMATION AND THERMAL INFLUENCE**

**S.S. Manokhin, M.B. Ivanov, Yu.R. Kolobov**

Research, Education and Innovation Centre  
“Nanostructured Materials and Nanotechnologies”,  
Belgorod National Research University,  
Pobedy St., 85, Belgorod, 308015, Russia, e-mail: [manohin@bsu.edu.ru](mailto:manohin@bsu.edu.ru)

**Abstract.** Titanium alloy VT16 after cold rolling at various deformation degree and aging have been studied by means of transmission electronic microscopy and X-ray diffraction. Orthorhombic martensite ( $\alpha''$ -phase) under the influence of cold plastic deformation by rolling undergo phase transformations with hexagonal close packing lattice  $\alpha'$ -phases formation. It has established that there is the crushing of orthorhombic martensite  $\alpha''$  plates with grain-subgrain nanostructure formation with the deformation degree increasing by rolling and they are formed nanostructure with grain sizes about 20 nm after aging.

**Key words:** titanium alloy VT16, decomposition of the metastable phases, high-resolution transmission electron microscopy.