

Ситников Н.Н.^{1,2}, Сивцова Г.В.¹, Хабибуллина И.А.¹, Шеляков А.В.², Ашмарин А.А.¹

¹ ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва, Российская Федерация; ² НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

Получение образцов

Ленты из сплава состава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ (в. ат. %), полученные методом сверхбыстрой закалки из расплава.

Методы исследований: оптическая, сканирующая и электронная электронная микроскопия; энергодисперсионный рентгеновский микроанализ; рентгеноструктурный фазовый анализ; дифференциальная сканирующая калориметрия; исследование зависимостей формоизменения при реализации ЭОПФ.

В зависимости от скорости охлаждения расплава, определяемой технологическими параметрами процесса спиннингования расплава, в лентах формируется аморфное, кристаллическое или аморфно-кристаллическое состояние. При скоростях охлаждения расплава около 10^6 К/с весь объем ленты находится в аморфном состоянии (рис. 1, а). При более низких скоростях охлаждения расплава ($10^5 \div 10^6$ К/с) на неконтактной поверхности ленты образуется поверхностный кристаллический слой (рис. 1, б), т.е. такая лента представляет собой слоистый композит.

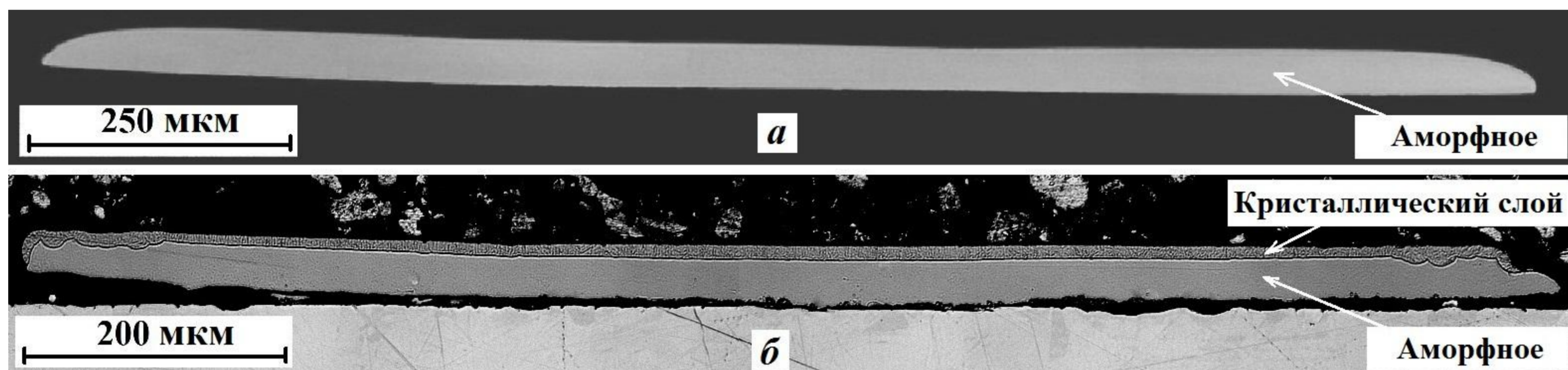


Рис. 1 – Типичные поперечные сечения аморфной (а) и аморфно-кристаллической (б) ленты

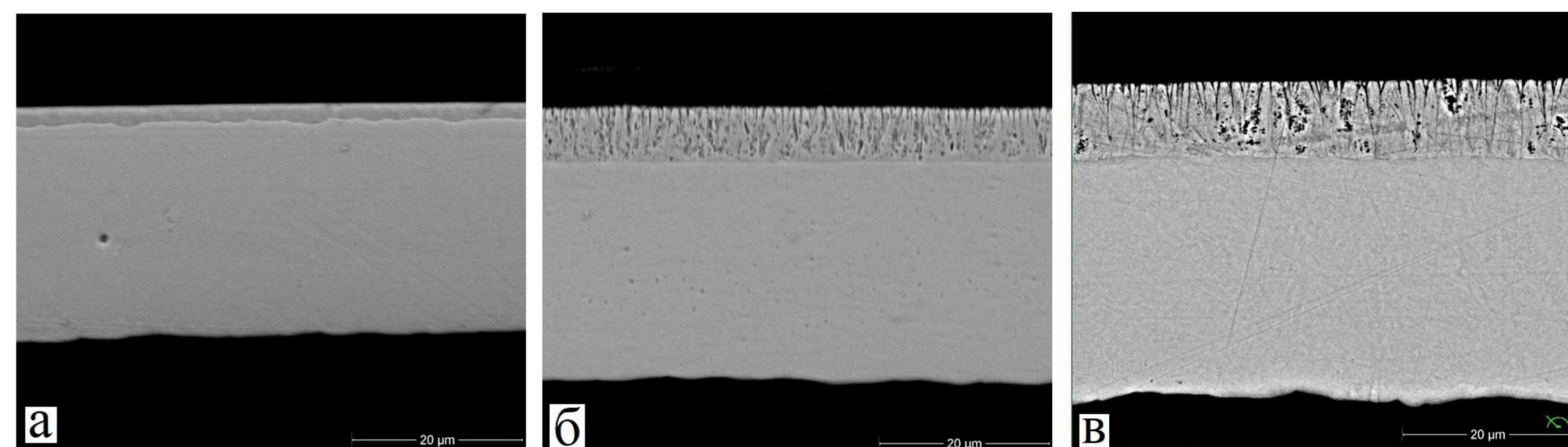


Рис. 2 – Поперечные сечения быстроохлажденных лент, полученных при скоростях охлаждения $8,4 \cdot 10^5$ К/с – образец №4 (а); $6,6 \cdot 10^5$ К/с – образец №2 (б); $4,0 \cdot 10^5$ К/с – образец №3 (в);

Изменение скорости охлаждения расплава существенным образом влияет на соотношение толщин аморфного и кристаллического слоев. В частности, снижение скорости охлаждения от $9 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^5$ К/с приводит к увеличению толщины кристаллического слоя от 2 до 10 мкм при практически неизменной толщине ленты (рис. 2).

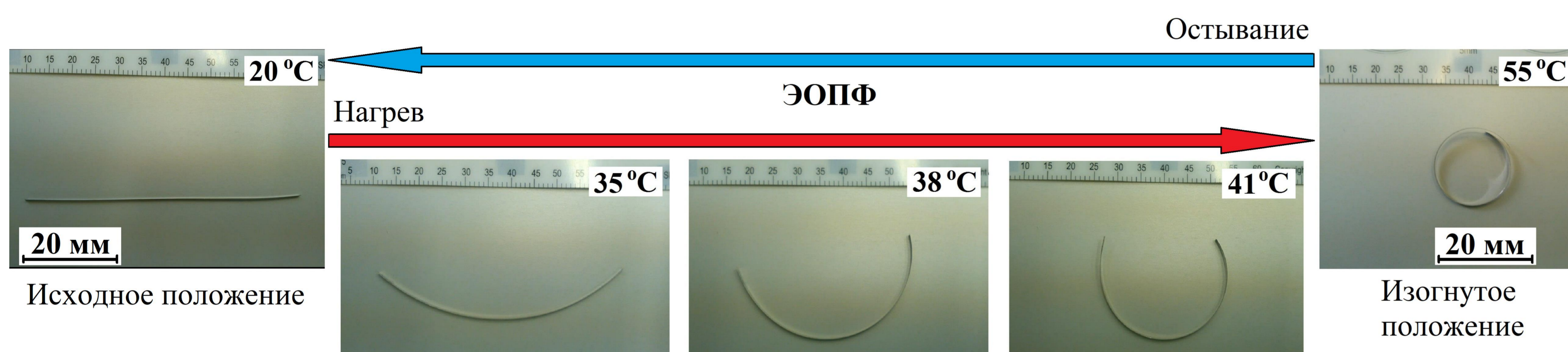


Рис. 5 – Зависимость формоизменения и изгибной деформации быстроохлажденного аморфно-кристаллического композита от температуры

В быстроохлажденных аморфно-кристаллических композитных лентах из сплава $TiNiCu$ реализуется ЭОПФ без каких-либо дополнительных термообработок, заключающийся в том, что из исходной прямолинейной формы при нагреве выше температуры A_n образец начинает изгибаться (рис. 3), принимая форму, близкую к кольцу при температуре выше A_k . Охлаждение образца до комнатной температуры приводит к его возврату в исходное прямолинейное состояние.

Для дальнейших исследований аморфно-кристаллического композита была выбрана лента общей толщиной около 40 мкм и толщиной кристаллического слоя 10 мкм. Микроскопические исследования показали, что кристаллический слой имеет столбчатую структуру с характерным поперечным размером кристаллов 0,5–1 мкм (рис. 3), а также выявили резкую границу между аморфным и кристаллическим слоями.

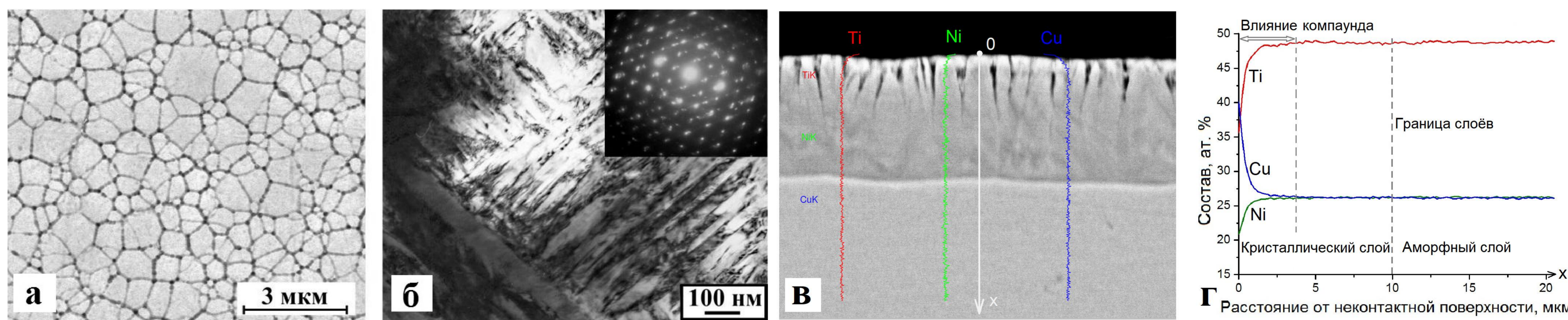


Рис. 4 – Неконтактная поверхность (СЭМ - а и ПЭМ - б) и поперечное сечение (в) ленты аморфно-кристаллического композита после травления; элементный состав вдоль линии 0-X от неконтактной поверхности по данным EDAX (г)

Рентгеноструктурный фазовый анализ показал, что при комнатной температуре наблюдаемые дифракционные пики на свободной поверхности ленты относятся к структурам типа B19 (ромбическая решетка мартенсита), (рис. 5). При нагреве выше температуры A_k наблюдаемые дифракционные пики от кристаллического слоя переходят структуре с решеткой типа B2 (решетка типа CsCl аустенита), а при дальнейшем охлаждении к комнатной температуре возвращаются в исходное состояние. На контактной стороне ленты пики отсутствуют, что свидетельствует об аморфном состоянии этого слоя. Таким образом, полученная при скорости охлаждения $5 \cdot 10^5$ К/с быстроохлажденная лента представляет собой слоистый аморфно-кристаллический композит. Очевидно, такая структура ленты обусловлена тем, что скорость охлаждения расплава на контактной стороне ленты выше, чем на свободной (неконтактной) стороне.

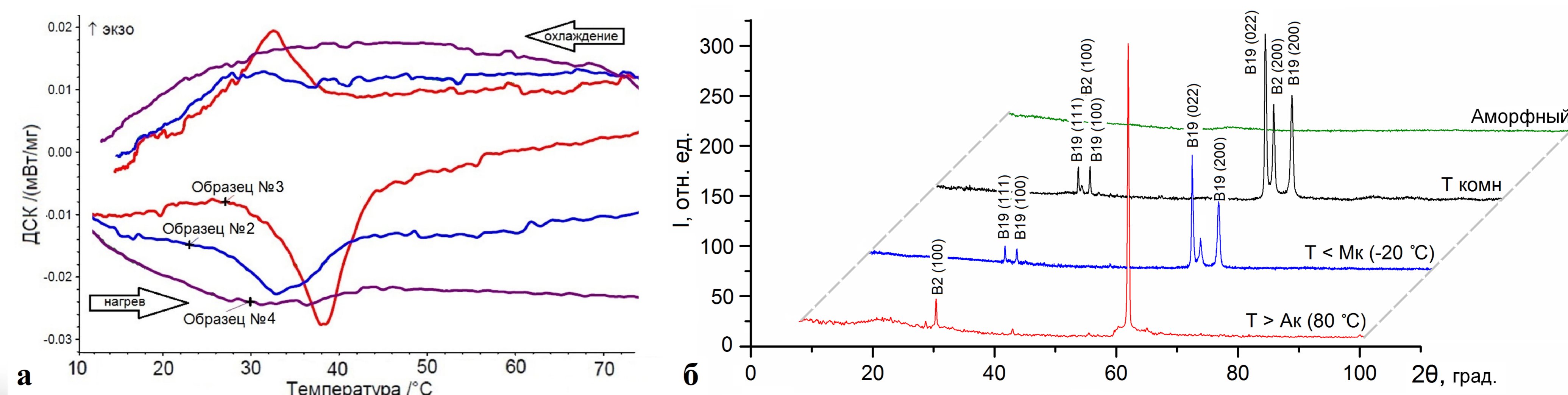


Рис. 5 – Рентгенограммы (а) и кривые ДСК (б) аморфно-кристаллического композита