

**Н. И. Левицкий, Т. В. Лапшук, Е. А. Матвиец,  
Н. И. Кузьменко\*, А. Д. Кулак\***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Ti-Al-Si**

*Изучены возможности электронно-лучевой литейной технологии как первого этапа получения материалов системы Ti-Al-Si для использования их после различной обработки. Исследованы структура и механические свойства в литом состоянии и полученном методом порошковой металлургии после различных способов компактирования и термической обработки материалов эвтектоидного и эвтектического типов.*

**Ключевые слова:** электронно-лучевая литейная технология, порошковая металлургия, материалы эвтектоидного и эвтектического типов.

*Вивчено можливості електронно-променевої ливарної технології як першого етапу одержання матеріалів системи Ti-Al-Si для використання їх в різних станах. Досліджено структуру та механічні властивості в литому і порошковому стані після різних способів компактування і термічної обробки матеріалів евтектоїдного і евтектичного типів.*

**Ключові слова:** електронно-променева ливарна технологія, порошкова металургія, матеріали евтектоїдного і евтектичного типів.

*Possibilities of electron-beam casting technology are studied as the first stage of production of Ti-Al-Si alloys for the use in different states. A structure and mechanical properties in the casting and powder-like state after different ways of compacting and heat treatment of materials of eutectoid and eutectic type are explored.*

**Keywords:** electron-beam casting technology, powder metallurgy, materials of eutectoid and eutectic type.

**В** последние годы материалы системы Ti-Al-Si рассматриваются как перспективные композиции для создания жаропрочных и жаростойких титановых сплавов [1-3]. Учитывая специфику получения этих материалов, определяющими факторами их производства являются коэффициент использования первичного сырья, затраты при получении готовых изделий и их качество.

В настоящей работе рассмотрены возможности применения этих материалов в литом состоянии и полученных методами порошковой металлургии с целью изготовления изделий различного назначения, причем ни первый, ни второй из этих методов не может считаться универсальным. Так, являясь наиболее экономичным при производстве изделий сложной конфигурации, метод фасонного литья практически непригоден для производства, скажем, листов, прутков или проволоки, где нельзя обойтись без деформационной и термической обработок. Кроме того, ограничительными моментами для получения фасонных отливок являются низкие литейные свойства некоторых перспективных материалов, что приводит к различного рода дефектам. Альтернативой в этом случае может служить метод порошковой металлургии, несмотря на его многооперационность, а, следовательно, и более высокую трудоемкость.

Для проведения исследований методом электронно-лучевой гарнисажной плавки с электромагнитным перемешиванием (ЭМП) расплава и литьем в графитовую форму были получены слитки  $\varnothing 55$  и длиной до 700 мм. Предварительные исследования [4] показали, что такая технология представляется наиболее приемлемой в случае подобной номенклатуры изделий.

Слитки после обточки поверхности использовали в качестве электродов в установке для распыления расплава ВТУ-2М [5], схема которой представлена на рис. 1.

Компактирование полученного порошка осуществляли горячим прессованием (ГП), экструзией (Э) и вакуумной штамповкой (ВШ).

В качестве материалов для исследований были выбраны эвтектоидный сплав Ti-6 Al-2 Si и эвтектический сплав Ti-5,0 Al-6,2 Si. Структуру и фазовый состав сплавов изучали методами оптической (Neophot-2) и электронной микроскопии (EM-1000X) и рентгеноструктурного анализа (ДРОН-3). Прочностные свойства определяли испытаниями на изгиб в интервале температур 20-1000 °С, характеристики трещиностойкости  $K_{Ic}$  – согласно ГОСТу 25.506-85 при статических испытаниях на изгиб (образец 2,5×5×35 мм). В качестве исходной трещины были микротрещины, возникающие при изготовлении электроискровым способом надреза с радиусом закругления 0,08 мм и длиной  $\approx 2,25$  мм.

Сплав Ti-5 Al-2 Si (Т1) по данным рентгеноструктурного анализа состоит из ( $\alpha+\beta$ )-твердого раствора и эвтектоида, представляющего собой 8 %об. очень дисперсной силицидной ( $Ti_5Si_3$ ) фазы (рис. 2, а). В результате экструзии матричное зерно

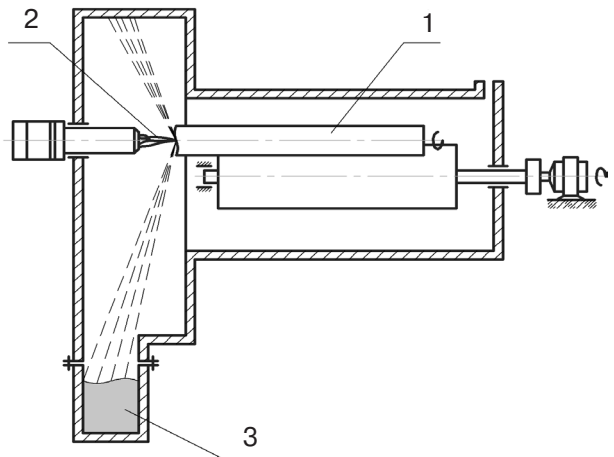


Рис. 1. Схема установки ВТУ-2М: 1 – расходуемый электрод-заготовка; 2 – плазматрон; 3 – продукт распыления

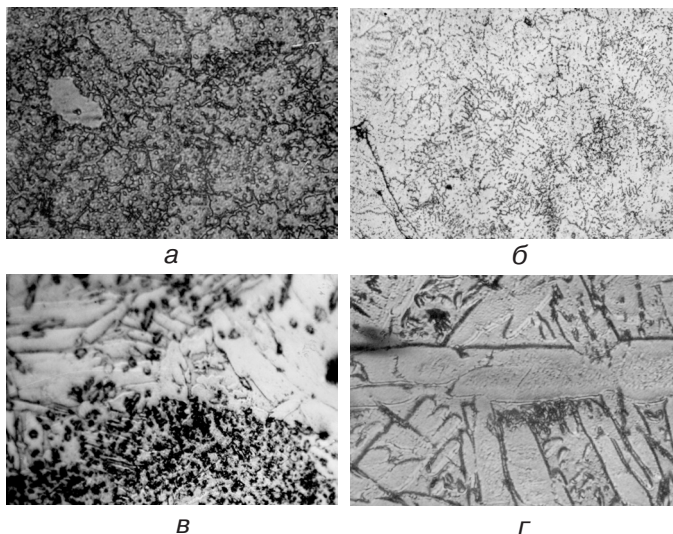


Рис. 2. Микроструктура материала Ti-5 Al-2 Si (Т1): а – после ГП,  $\times 200$ ; б – после экструзии,  $\times 300$ ; в – отжиг 800 °С, 15 ч,  $\times 200$ ; г – закалка 900 °С, 1 ч, вода, отпуск 800 °С, 20 ч,  $\times 600$

## Новые литые материалы

сильно измельчается, а дисперсность силицидной фазы практически не изменяется (рис. 2, б), длительный отжиг при температуре 800 °С приводит к коагуляции силицидной фазы (рис. 2, в), а закалка с 900 °С – к ее полному растворению (рис. 2, г).

На рис. 3 представлены механические свойства литого, горячепрессованного (ГП) и экструдированного материалов. Видно, что механические свойства ГП и литого материала практически одинаковые. Это, вероятно, связано с тем, что при ГП не происходит заметных изменений параметров структуры данного материала – размера матричного зерна, морфологии силицидной фазы и т. п. Такие изменения (и весьма значительные) происходят в результате экструзии материала. Степень деформации ( $\epsilon$ ) при этом достигает 88 %, а величина матричного зерна уменьшается с 160-200 (размер исходных гранул) до 4-5 мкм, то есть в 40 раз. Резкое измельчение зеренной структуры материала приводит к благоприятным изменениям всего комплекса его механических характеристик: увеличилась прочность, повысилась пластичность и, что может быть самое важное, значительно выросла вязкость разрушения, что привело к повышению трещиностойчивости. Однако рабочие температуры таких низкокремнистых материалов ( $\leq 2\% \text{ Si}$ ) из-за растворения силицидов при высоких температурах должны быть ограничены 600 °С.

Сплав Ti-5,0 Al-6,2 Si (T2) в отличие от сплава T1 состоит из  $\alpha$ -твердого раствора

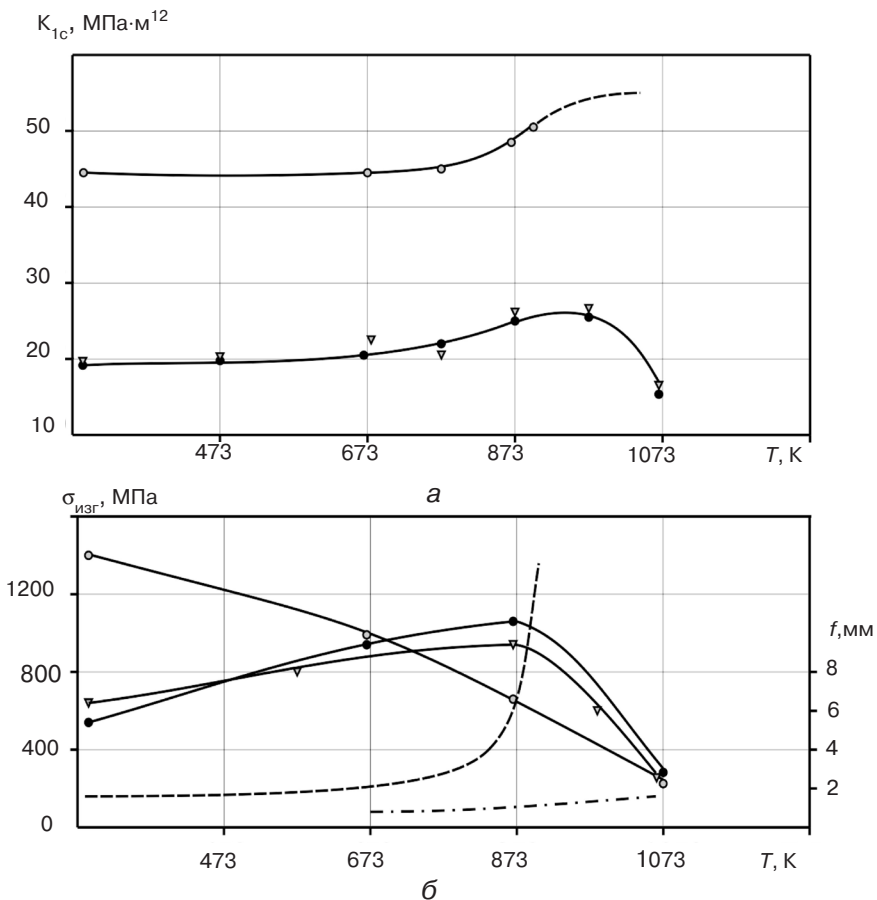


Рис. 3. Механические свойства материала T1, полученного после: ● – ГП; ○ – экструзии; ▽ – литья; - - - - - стрела прогиба после ГП; - - - - - после экструзии

## Новые литые материалы

легирующих элементов в титане и силицидной фазы в форме эвтектических колоний (рис. 4, а) в литом состоянии или отдельных дисперсных выделений размером 2-5 мкм (рис. 4, б, в) – после ГП. Заметное измельчение упрочняющей силицидной фазы в сочетании со значительным увеличением ее объемного содержания приводит к улучшению всего комплекса механических характеристик таких материалов.

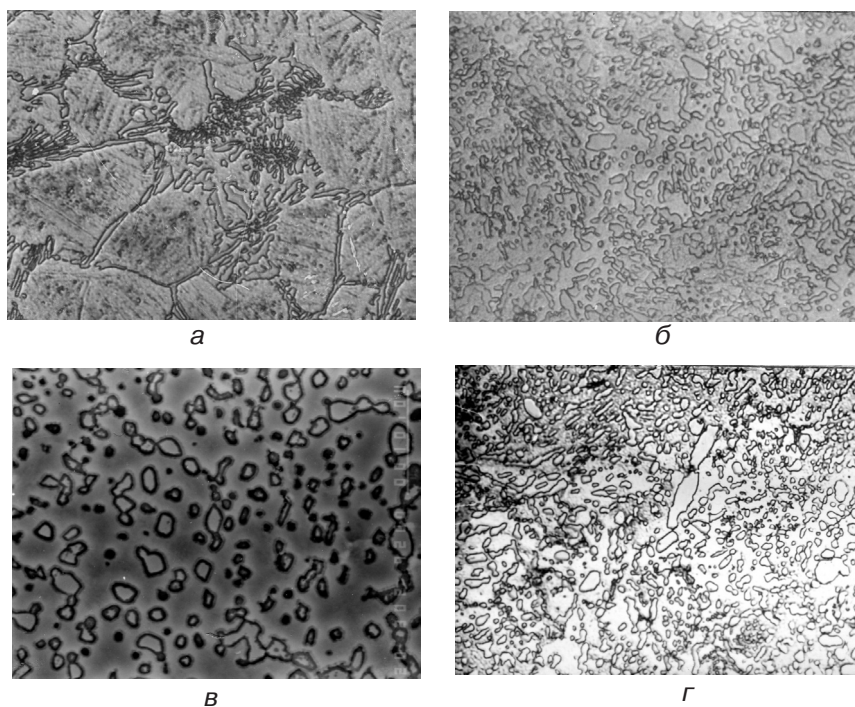


Рис. 4. Микроструктура материала Ti-5 Al-6,2 Si (T2): а – литое состояние,  $\times 500$ ; б, в – порошковый материал,  $\times 500$ ,  $\times 300$ ; г – отжиг 1000 °С, 5 ч; 800 °С, 10 ч,  $\times 600$

Как видно из результатов испытания, уровень механических свойств подобных материалов во многом определяется условиями их компактирования (рис. 5). Улучшение механических свойств материала T2 в результате ВШ связано, в основном, с уменьшением общего содержания кислорода (0,16 %) по сравнению с ГП-состоянием (0,27-0,30 %), и в меньшей мере, с некоторыми его структурными отличиями. Эвтектические материалы проявляют высокую термическую стабильность в условиях длительных нагревов, что связано с особенностями формирования их структуры. Действительно, максимальная растворимость кремния при эвтектической температуре (1330 °С) составляет  $\sim 3\%$  [6], следовательно, избыточное количество кремния в материале T2 равное 3,2 % при кристаллизации расходуется на формирование  $\sim 12\%$ об. нерастворимого в матрице силицида  $Ti_5Si_3$ . Термическая стабильность такой структуры определяется уже не результатом растворно-осадительного механизма, как в эвтектоидном материале T1, а исключительно термодинамическими свойствами самой силицидной фазы. Поэтому коагуляция при длительных нагревах выше 700 °С происходит очень медленно, так как определяется лишь скоростью внутреннего массопереноса (см. рис. 3, г). Сама силицидная фаза не растворяется в матрице вплоть до  $T_{эвт}$ .

Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о перспективности электронно-лучевой литейной технологии как первого этапа производства материалов системы Ti-Al-Si различного назначения.

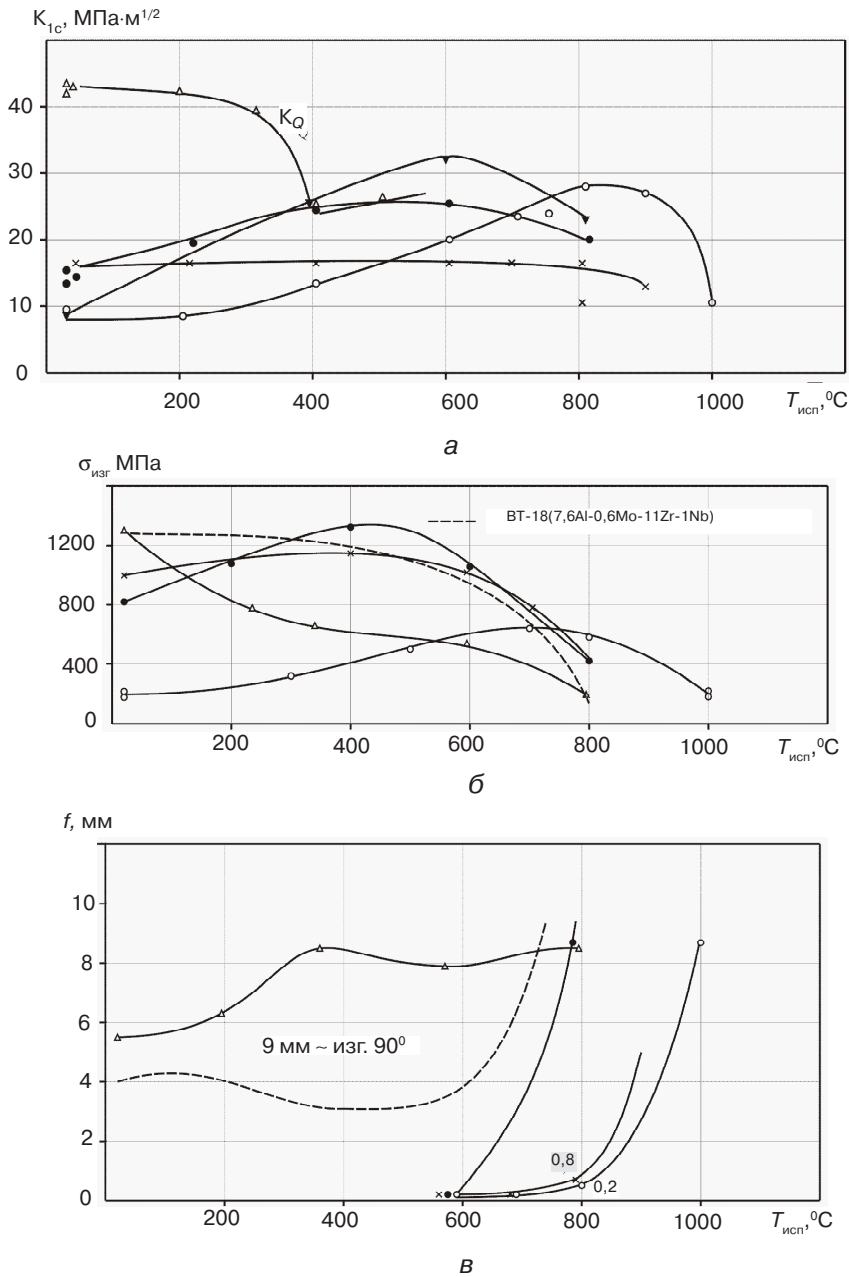


Рис. 5. Механические свойства материала Т2, полученного после:  $\nabla$  – экструзии;  $\circ$  – ГП;  $\bullet$  – ВШ;  $\times$  – литья;  $\Delta$  – сплав ВТ5 литой

Применение технологии получения быстрозакаленных порошков из электродов электронно-лучевой выплавки и их горячего компактирования позволяет получать материалы с мелкокристаллической структурой, обеспечивающей, по сравнению с литым состоянием, улучшение всего комплекса их механических характеристик. В отношении исследованных материалов: материал Т1 лучше применять в порошковом варианте после деформации экструзией, а Т2 – как в литом, так и порошковом вариантах после вакуумного компактирования. Целесообразно продолжать исследования на материалах более сложных систем.



## Список литературы

1. Crossman F. W. , Yue A. S. Unidirectionally Solidified Ti-TiB and Ti-Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> Eutectic Composites // Met. Trans. – 1971. – V. 2, № 6. – P. 1545-1555.
2. Frommeyer G., Rozenkranz R., Ludecke C. Microstructure and Properties of the Refractory Intermetallic Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> Compound and the Unidirectionally Solidified Eutectic Ti-Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> Alloy // Metallkunde. – 1990. – № 81. – P. 307-313.
3. Фірстов С. Нове покоління матеріалів на базі титану // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – С. 609-616.
4. Способы выплавки сплавов систем Ti-Si и Ti-Si-X / Н. Н. Кузьменко, Л. Д. Кулак, Н. И. Левицкий, В. И. Мирошниченко // Металл и литье Украины. – 2011. – № 3. – С. 27-30.
5. Мусиенко В. Т. Некоторые закономерности формирования гранул при центробежном распылении вращающейся заготовки // Порошковая металлургия. – 1979. – № 8. – С. 1-7.
6. Термоциклювання евтектичного сплаву Ti-Si-Al-Zr / В. І. Мазур, С. В. Капустнікова, О. В. Мазур та ін. // Теорія і практика металургії. Спец. випуск. – 2006. – № 4-5 (53-54). – С. 163-167.

Поступила 09.09.2011

### **Вниманию авторов!**

*В соответствии с требованиями ВАКа все статьи, поступающие в редакции научных журналов, должны обязательно проходить рецензирование, иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи — не более 10 стр., рисунков — не более 5.*

*Статьи в редакции поступают как на бумажном, так и электронном носителе. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов — формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.*