

**Morphology features of the structure
of the primary phase during solidification of aluminum alloys**

Summary

It was determined the areas of dendritic, dendritic-rosette-like, rosette-like-dendritic, rosette-like and globular morphologies of the primary phase for aluminum alloys of AK7 type. It was determined potential and peculiarities of the transition of the dendritic morphological structure of α -phase into the non-dendritic one and separately to the rosette-like. It was found the heat conditions of the pouring of which structure of the primary phase closed to the globular one.

УДК: 669.295'71'292:621.9.048

*Структура та властивості литих сплавів
системи Ti – Al – V електронно-променевої
виплавки*

М. М. Ворон, М. І. Левицький, Т. В. Лапшук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Досліджено вплив технологічних параметрів виплавки $\alpha + \beta$ -сплавів системи Ti – Al – V, отриманих за технологією електронно-променевої гарнісажної плавки (ЕПП) з електромагнітним перемішуванням розплаву, на формування їх структури та властивостей. На основі експериментальних даних побудовано математичні моделі залежності структурних параметрів сплавів та їх твердості від режимів виплавки. Показано, що за допомогою даної технології можна отримувати литі готові вироби та напівфабрикати, які за комплексом механічних властивостей не поступаються деформованим.

Титанові сплави відносяться до перспективних матеріалів сучасності завдяки поєднанню високої міцності, пластичності, корозійної стійкості та можливості варіювання цих характеристик в широких межах як шляхом легування, так і відповідної обробки [1, 2]. Загалом титанові сплави поділяють на 5 груп – три основні (за фазовим складом) та дві умовні. До основних відносять α -, $\alpha + \beta$ - та β -титанові сплави, а до умовних – евтектичні сплави та сплави на основі інтерметалідів [2].

Найпоширенішими титановими сплавами є $\alpha + \beta$ -сплави, основним представником яких можна вважати найбільш розповсюджений титановий сплав ВТ6 (у західній літературі його ідентифікують як Ti-6-4 або Grade 5). Ці сплави відрізняються високими показниками міцності, відносно

високими робочими температурами, проявляють суперпластичність при гарячій деформації та придатні до термічної обробки [1, 2]. Однак, серійне виробництво готової продукції з таких сплавів, яке базується на вакуумно-дуговій плавці, залишається дуже витратним внаслідок його багатостадійності.

Останнім часом активно розвиваються альтернативні технології одержання якісних напівфабрикатів та готових виробів з титанових сплавів [3, 4]. Вони поділяються на деформаційні та ливарні методи, які передбачають одержання литих малогабаритних злитків для подальшої обробки тиском або виливків. Механічні властивості як готових литих виробів, так і напівфабрикатів залежать від особливостей їх структурної та фазової будови, які в принципі можна регулювати, змінюючи технологічні умови їх одержання.

Найбільш перспективним напрямком в цьому плані видається розробка принципів одержання якісних литих виробів та напівфабрикатів з регламентованою структурою [5]. У разі формування бажаної структури литого напівфабрикату, подальша обробка тиском у поєднанні з нагрівом (нижче температури рекристалізації), швидкісним нагрівом, термоцикуванням, тощо, буде більш ефективною як технологічно, так і економічно [2, 3].

Відома вітчизняна технологія електронно-променевої гарнісажної плавки (ЕПП) з електромагнітним перемішуванням (ЕМ) розплаву (ЕПП+ЕМ) відноситься до ливарних методів одержання відносно невеликих за масою (до 60 кг по титану) зливків та виливків з тугоплавких та високореакційних металів [6]. Для одержання титанових сплавів із заданими механічними властивостями застосування такої технології видається перспективним, проте досі механізми впливу технологічних факторів методу ЕПП+ЕМ на формування структури та властивостей титанових сплавів досліджені обмежено.

В даній роботі для визначення впливу основних технологічних факторів вказаного методу (часу та потужностей плавки, маси злитого металу, вакууму та ін.) при обробці результатів експериментальних плавок було використано кореляційний та регресійний аналізи. Для всіх плавок був обраний однаковий склад факторів, що оцінювалися. Обрані для аналізу технологічні фактори було підбрано таким чином, щоб достатньо повно відобразити протікання процесу плавки та його вплив на розплав. Кількість факторів було попередньо скорочено до мінімально необхідної шляхом визначення взаємних коефіцієнтів кореляції.

Проведено 6 експериментальних плавок $\alpha + \beta$ -сплавів системи Ti – Al – V з вмістом ванадію від 3,25 до 4,85 % (по масі) та алюмінію від 4,8 до 9,0 % (по масі), хімічний склад яких наведено в табл. 1.

Широкий діапазон зміни кількості алюмінію пов'язаний із загальною зміною ступеня легування, який, згідно [7], суттєво впливає на структуроутворення титанових сплавів. В даному випадку, при обраному вмісті ванадію, сплави, незважаючи на широкий діапазон коливання концентрації алюмінію, залишалися двофазними. З наведених в табл. 1 даних видно, що в ході експериментів було одержано 2 зливка сплаву ВТ6 (досліди № 3 і № 4).

Таблиця 1

Хімічний склад дослідних $\alpha + \beta$ -сплавів

Номер досліджу	Вміст елементів, % (по масі)					
	Al	V	Si	Fe	Mo	Інші
1	5,00	3,55	0,08	0,14	0,10	0,67
2	4,80	3,27	0,23	0,40	0,24	0,25
3	5,32	4,60	0,05	0,20	0,27	0,20
4	7,14	4,85	0,35	0,26	0,18	0,12
5	9,00	4,00	0,36	0,13	0,20	0,15
6	8,45	3,68	0,27	0,50	0,15	0,52

Примітка: титан – основа

Вміст окремих легуючих елементів в якості факторів не враховували. Брали до уваги лише ступінь легування сплавів обраної системи. Таке рішення пояснюється існуванням великої кількості титанових $\alpha + \beta$ -сплавів, що можуть містити більше п'яти легуючих елементів, які за сумарним вмістом досягають до 25 % (по масі). При цьому роль кількості легуючих елементів в усіх випадках буде зводитися до співвідношення кількості α - і β -фази та дисперсності структури литого металу. В межах будь-якої системи легування за умов збереження двофазності сплаву буде існувати прямопропорційна залежність між ступенем легування сплаву та дисперсністю його структурних складових [1, 2, 7], тому вміст окремих елементів не є суттєвим фактором.

Технологічні параметри виплавки сплавів у вигляді відповідних факторів, їх твердість та структурні характеристики представлено в табл. 2.

Структури сплавів у зливках, наведені на рисунку, показують вплив технологічних параметрів виплавки та лиття на розміри, морфологію та взаємну орієнтацію структурних складових досліджуваних сплавів.

Одержані дані засвідчують можливість отримання $\alpha + \beta$ -сплавів схожого хімічного складу з різними структурними параметрами та механічними властивостями за рахунок зміни технологічних умов їх виплавки. Важливим в цьому випадку є можливість управління мікроструктурними параметрами (розміри пластин α -фази) незалежно від розмірів макрозерна (первинної β -фази) і, як наслідок, здійснення впливу на комплекс механічних властивостей сплавів. Структурні параметри експериментальних зразків можна вважати досить якісними як для литого стану, а деякі з них (дослід № 2) навіть відповідають вимогам сукупності структурних параметрів готових виробів після деформації та відпалу [2].

Для детальшого вивчення впливів технологічних факторів на обрані відгуки було застосовано кореляційний аналіз (табл. 3). Ці дані показують ступінь та напрямок впливу окремих технологічних факторів плавки на обрані досліджувані параметри. Враховуючи результати кореляційного аналізу було побудовано математичні моделі регресійного типу, які відображають залежності формування твердості та структурних параметрів сплавів від технологічних факторів. Регресійний аналіз проводили з

Плавлення і кристалізація

Таблиця 2

Технологічні параметри плавок для регресійного аналізу

Технологічні фактори		Номер досліджу					
		1	2	3	4*	5*	6*
X1	Вміст легуючих елементів, % по масі	9,4	9,25	10,4	12,7	14,1	13,65
X2	Час дії ЕМП, хв	21,5	21	17,5	17	18	22,5
X3	Тривалість режиму 1, хв	10	3	8,5	6	4	1
X4	Потужність режиму 1, кВт	60	75	60	75	60	45
X5	Тривалість режиму 2, хв	5	8	5,5	5	5	6
X6	Потужність режиму 2, кВт	45	60	45	60	75	60
X7	Перепад температур охолоджуючої води, °С	14,5	16,5	15,5	15,5	14	14
X8	Маса злитого металу, кг	6,84	5,47	4,74	6,77	7,42	5,4
X9	Матеріал форми / діаметр, мм	сталь 3/75	графіт/65	сталь 3/55	графіт/65	графіт/65	графіт/65
X10	Час заливки металу, с	7	7	7	15	9	7
X11	Вакуум в момент заливки, Па	1,33	2	2	1,86	0,67	1,35
Y1	Твердість зразків, НВ	318	331	321	316	388	352
Y2	Розміри макрозерен**, мм	0,8-4/1,8	2-4,5/2,5	0,5-2/1,55	0,5-1,5/1	0,7-2,2/1,3	0,8-2/0,9
Y3	Розміри мікрозерен**, мкм	6-12/8	2-7/3,5	1-3/1,75	2-6/4,2	5-20/6,1	2-12/7
Y4	Розміри колоній**, мкм	40-120/82	30-90/58	30-70/43	45-100/76	50-140/90	30-50/48

Примітка: * другий переплав, ** через / вказані середні розміри

Таблиця 3

Матриця парних коефіцієнтів кореляції технологічних факторів з відгуками для дослідних сплавів

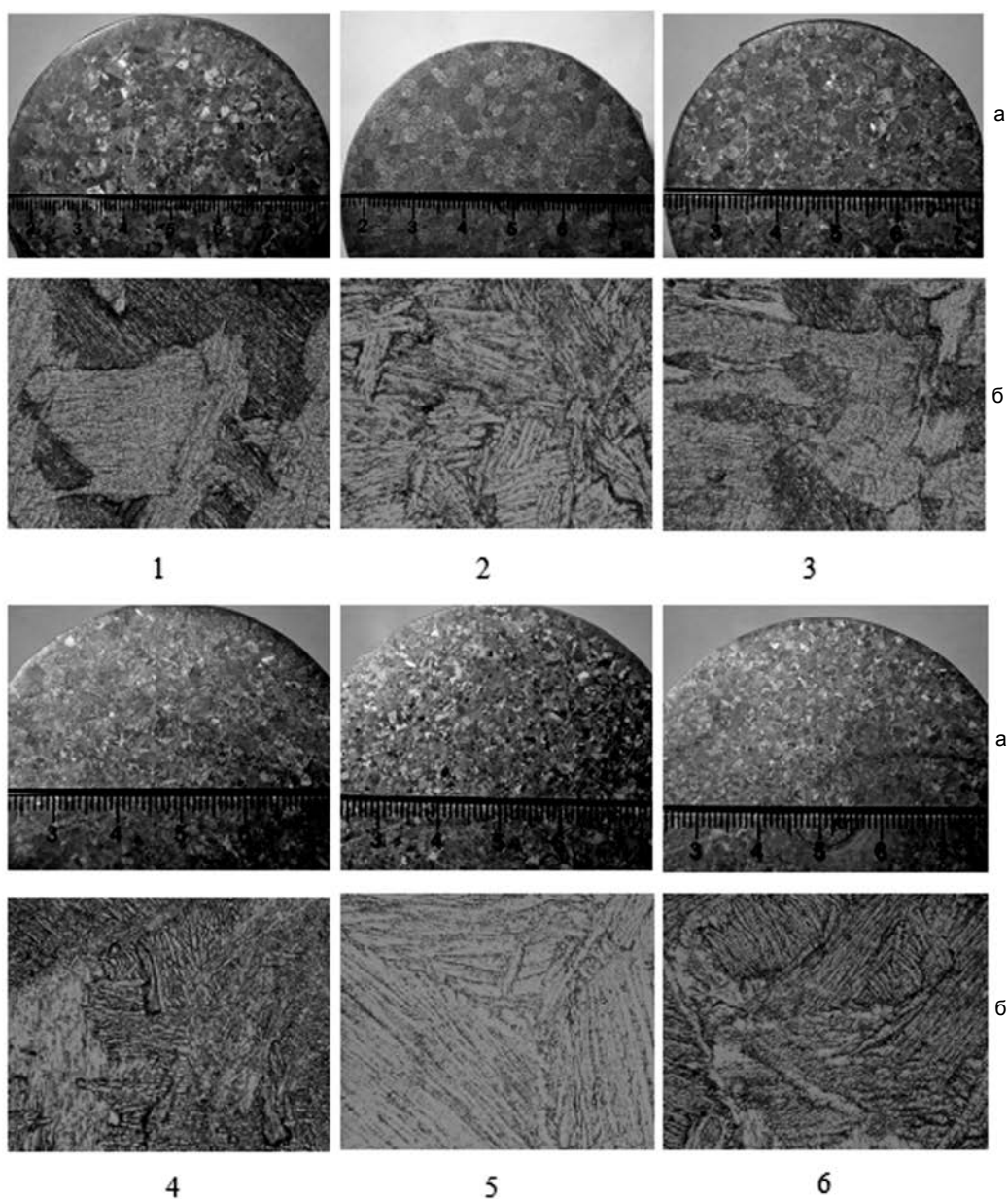
X/Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
Y1	0,69	0,01	-0,58	-0,41	-0,09	0,82	-0,61	0,37	-0,04	-0,17	0,84
Y2	-0,84	0,25	0,17	0,49	0,68	-0,25	0,65	-0,22	0,13	-0,48	-0,42
Y3	0,26	0,59	-0,09	-0,5	-0,33	0,16	-0,76	0,57	0,84	-0,23	0,71
Y4	0,21	-0,22	0,22	0,27	-0,49	0,43	-0,34	0,98	0,64	0,41	0,61

використанням багатовимірного методу найменших квадратів [8], в результаті чого було отримано рівняння регресії:

$$\begin{aligned}
 HB &= 497,564 - 4,4 \cdot X1 + 2,26 \cdot X6 - 16,06 \cdot X7 + 0,03 \cdot X11, & \delta &= 4,7 \%, \\
 D &= 0,725 - 0,18176 \cdot X1 + 0,2866 \cdot X5 + 0,2488 \cdot X8 - 3,2836 \cdot X10 \cdot 10^{-2}, & \delta &= 10,0 \%, \\
 l &= -0,86 + 0,6834 \cdot X2 - 0,9827 \cdot X7 + 1,068 \cdot X8 + 9,0888 \cdot X10 \cdot 10^{-2}, & \delta &= 8,5 \%, \\
 L &= -38,72 + 0,905 \cdot X5 + 19,735 \cdot X8 + 1,612 \cdot X9 \cdot 10^{-4} - 0,3326 \cdot X11, & \delta &= 6,25 \%,
 \end{aligned}$$

де НВ – твердість за Брінелем, D – розмір макрозерен, мм, l – ширина пластин α -фази, мкм, L – ширина колоній пластин α -фази, мкм.

На основі рівнянь регресії для сплавів системи Ti – Al – V було проведено багатокритеріальну оптимізацію за методом випадкового пошуку



Макро- (а) та мікроструктури (б) зразків дослідних сплавів № 1 – 6. Збільшення (б): 1, 3 – х 100, 2, 4, 6 – х 200, 5 – х 400.

надто високою твердістю та різними комбінаціями структурних складових. Одержання невисокої твердості переслідувало мету збільшення пластичності, хоча для вибірки даної серії дослідів поняття «невисокої твердості» є відносним. Результати оптимізації технологічних параметрів плавки для одержання сплавів системи $Ti - Al - V$ з $HV = 305 - 335$, $D = 0,5 - 2,5$ мм, $l = 2 - 10$ мкм, $L = 20 - 100$ мкм приведено в табл. 4. Оптимізовані набори факторів відповідають умовам проведення дослідних плавок і не мають логічних розбіжностей з практичними даними.

Плавлення і кристалізація

Таблиця 4

Результати оптимізації технологічних параметрів плавки та властивості сплавів

Технологічні фактори		Номер досліду						
		1	2	3	4	5	6	7
X1	Вміст легуючих елементів, % по масі	11,4	10	10	9,3	13,5	9,5	9,9
X2	Час дії ЕМП, хв	21	19,4	19,5	23,1	21,5	21	21,7
X3	Тривалість режиму 1, хв	5	11	10	4	4	3	5
X4	Потужність режиму 1, кВт	75,9	75,3	61,8	71,3	45,7	65,4	75
X5	Тривалість режиму 2, хв	4	6	5	6	7	7	7
X6	Потужність режиму 2, кВт	52,1	51,2	47,5	44,8	64,5	52	62
X7	Перепад температур охолоджуючої води, °С	16,2	14,8	14,9	15,1	16,4	15,6	16,9
X8	Маса злитого металу, кг	6,6	4	5,2	7,4	5	6,9	6,9
X9	Діаметр форми, мм	61,9	70	61	75,6	65,4	65,3	69,6
X10	Час заливки металу, с	8	7	14	10	14	15	11
X11	Вакуум в момент заливки, Па	0,66	0,8	0,65	1,86	1,35	1,35	0,69
Y1	Твердість зразків, НВ	307	333	324	317	321	325	325
Y2	Розміри макрозерен, мм	1,2	1,45	1,1	2,3	0,9	2,1	2,3
Y3	Розміри мікрозерен, мкм	5	3	5	9	4	7	6
Y4	Розмір колоній, мкм	72	25	45	93	35	82	81

Проведені дослідження засвідчують, що в умовах технології ЕПГП+ЕМП можливо виплавляти готові вироби та напівфабрикати з $\alpha + \beta$ -титанових сплавів системи Ti – Al – V, які мають наперед задані структурні параметри та механічні характеристики.

В роботі також проводили оцінку механічних властивостей серійного сплаву ВТ6, одержаного методом ЕПГП+ЕМП розплаву, в литому стані та після відпалу для зняття напружень. Властивості дослідних зразків порівнювали з властивостями сплаву ВТ6 в литому стані після вакуумно-індукційної плавки, після деформації та відпалу та в стані підвищеної якості [10]. Порівняння механічних властивостей наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Механічні властивості ВТ6 різних технологій одержання

Стан	НВ	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
ЕПГП литий	315 – 325	853 – 952	915 – 1025	2 – 3	7,0 – 9,5
ЕПГП литий + відпал	285 – 305	889 – 942	932 – 1010	4,0 – 6,5	11 – 13
ВП литий	275 – 345	640	790	6 – 9	15
ВП деформація + відпал	255 – 341	720	835 – 885	6 – 8	15 – 20
ВП підвищеної якості	255 – 341	730 – 810	835 – 1050	6 – 10	20 – 30

Рентгенівський фазовий аналіз сплавів показав, що в умовах технології ЕПГП з ЕМП можна отримувати сплав ВТ6, для якого в литому стані характерна кількість β -фази приблизно 14 %. Після відпалу для зняття напружень кількість β -фази зменшується на 1 – 3 %.

Таким чином експериментально доведено, що серійний промисловий сплав ВТ6, виплавлений методом ЕПГП+ЕМП, не поступається в литому стані міцністю та пластичністю аналогічного сплаву в деформованому стані, а його структурні параметри та механічні властивості можна регулювати, змінюючи відповідні технологічні фактори виплавки.

Висновки На основі дослідження впливу технологічних параметрів плавки на структуру та властивості литих $\alpha + \beta$ -титанових сплавів системи $Ti - Al - V$ побудовано відповідні математичні моделі та вирішено задачу багатокритеріальної оптимізації технологічних режимів для отримання заданих структурних параметрів та твердості сплавів.

Обґрунтовано технологічну ефективність та доцільність використання методу ЕПГП+ЕМП для одержання якісних литих напівфабрикатів та готових виробів з титанових $\alpha + \beta$ -сплавів системи $Ti - Al - V$ із досить прийнятними структурними параметрами, фазовим складом та високим рівнем механічних властивостей.

Література

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
2. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы: Состав, структура, свойства. Справ. – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.
3. Волков А. Е. Новые металлургические процессы и оборудование для производства титановых сплавов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 193 с.
4. Хорев А.И. Создание теоретических и практических основ высокой и сверхвысокой конструкционной прочности перспективных титановых сплавов // Ti-2008 в СНГ. Сборник трудов международной конференции. Россия, Санкт-Петербург, 18-21 мая 2008 г. – С. 248 – 261.
5. Польшкин И. С. Перспективные направления науки о титане // Ti-2008 в СНГ. Сборник трудов международной конференции. Россия, Санкт-Петербург, 18-21 мая 2008 г. – С. 33 – 40.
6. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. Ладохина С.В. – Киев: Сталь, 2007. – 626 с.
7. Аношкин Н.Ф., Глазунов С.Г., Морозов Е.И. Плавка и литье титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 385 с.
8. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа. – Киев: Корнийчук, 2011. – 376 с.
9. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 111 с.
10. Тур А.А. Металлургия титана. – Киев: Металагротрейд, 2003. – 199 с.

Одержано 11.02.14

М. М. Ворон, Н. И. Левицкий, Т. В. Лапшук

**Структура и свойства литых титановых сплавов системы
Ti – Al – V электронно-лучевой выплавки**

Резюме

Исследовано влияние технологических параметров выплавки титановых $\alpha + \beta$ -сплавов, полученных по технологии ЭЛГП с ЭМП, на формирование их структуры и свойств. На основе экспериментальных данных построены математические модели зависимости структурных параметров сплавов и их твердости от режимов выплавки. Доказано, что с помощью данной технологии можно получать литые титановые сплавы в виде готовых изделий и полуфабрикатов, которые по комплексу механических свойств не уступают деформированным.

M. M. Voron, M. I. Levitsky, T. V. Lapshuk

**Structure and properties of Ti – Al – V cast titanium alloys
obtained by electron-beam melting**

Summary

The influence of technological parameters of melting of titanium $\alpha + \beta$ alloys obtained under EBSM technology with EMS was considered from the point of their structure and properties formation. Mathematical models of the structural parameters and hardness of the alloys were developed on the basis of the experimental data. It was proved, that this technology is useful for obtaining cast titanium alloys in the form of finished and semifinished products, which can having mechanical properties similar to the wrought alloys.

Шановні колеги!

**Тривас передплата на науково-технічний журнал
«Металознавство та обробка металів» на 2015 р.**
Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати
вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.
Вартість одного номера журналу – 30 грн., передплата на рік – 120 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2014 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,
спонсорів і рекламодавців:**

банк ГУДКСУ в м. Києві, р/р 31257201112215, код банку 820019.

Отримувач – ФТІМС НАН України, ЗКПО 05417153,
з посиланням на журнал "ММ".

Копію документа передплати та відомості про передплатника
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.