

## II ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.74.045:669.24:21.981

Клочихин В. В.<sup>1</sup>, Данилов С. Н.<sup>1</sup>, Лысенко Н. А.<sup>1</sup>, д-р техн. наук Наумик В. В.<sup>2</sup><sup>1</sup> АО «Мотор Сич»,<sup>2</sup> Национальный университет «Запорізька політехніка»; г. Запорожье

### РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖСЗДК-ВИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ПОРОШКАМИ КАРБОНИТРИДА ТИТАНА

**Цель исследования.** Изучить влияние модифицирования присадками ультрадисперсных частиц карбонитрида титана  $Ti(C,N)$  в виде порошка и брикетов на структуру и физико-механические свойства сплава ЖСЗДК-ВИ, применяемого для изготовления литых рабочих лопаток турбин авиационных двигателей.

**Методы исследования.** Предварительную высокотемпературную обработку расплава (ВТОР) проводили на установке ВИП-10.

На установке УППФ-3М с основным тиглем проводили модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ ультрадисперсными частицами карбонитрида титана  $Ti(C,N)$  в количестве 60...80 г в виде брикетов или порошка, завернутого в никелевую фольгу.

Образцы подвергали гомогенизации при температуре 1210 °С с выдержкой 3,5 часа и охлаждением на воздухе.

Определяли химический состав сплава исследуемых вариантов. Макроструктуру изучали на пластинах толщиной ~ 4 мм после химического травления. Микроструктуру оценивали на микрошлифах до и после травления в реактиве Марбле.

Микротвердость, временное сопротивление, относительные удлинение и сужение, ударную вязкость определяли при комнатной температуре. Испытания на длительную прочность проводили при 850°С под нагрузкой 350 МПа. Испытание лопаток на изгиб осуществляли на ручном винтовом прессе в соответствии с ГОСТ 14019-80.

**Полученные результаты.** Изучена микроструктура брикетов  $Ti+TiCN$  методами оптической и электронной микроскопии. Рентгеноспектральным микроанализом (РСМА) изломов образцов подтверждено достаточно равномерное распределение карбонитрида титана в объёме брикетов.

Изучены химический состав, макро- и микроструктура опытного сплава. Проведено фрактографическое исследование строения изломов образцов.

Установлено модифицирующее воздействие ультрадисперсных частиц карбонитрида титана на дендритную структуру, распределение и изменение морфологии первичных карбидов, количество и распределение карбонитридных частиц.

Проведен сравнительный анализ механических и жаропрочных свойств сплава ЖСЗДК-ВИ стандартного состава и модифицированного ультрадисперсными частицами  $Ti(C, N)$ . Проведены испытания рабочих лопаток турбины на изгиб.

**Научная новизна.** Показано, что использование ультрадисперсных порошков карбонитрида титана для объемного модифицирования жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ позволяет повысить механические и жаропрочные свойства материала. Повышение количества модификатора способствует измельчению зерна.

Более стабильные свойства и благоприятную структуру обеспечивает модифицирование расплава ультрадисперсными частицами  $Ti(C,N)$  в виде брикетов. Установлено, что модифицирование порошкообразным  $Ti(C,N)$  приводит к снижению значений ударной вязкости вследствие образования пограничной микропористости.

**Практическая ценность.** Разработана технология модифицирования жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ, применяемого для изготовления литых рабочих лопаток газотурбинных двигателей, присадками ультрадисперсных частиц карбонитрида титана  $Ti(C, N)$ , обеспечивающая повышенный уровень эксплуатационных свойств готовых изделий.

**Ключевые слова:** модифицирование, ультрадисперсные частицы, карбонитрид титана, брикет, макроструктура, микроструктура, физико-механические свойства, жаропрочные свойства.

### Состояние вопроса

Повышение уровня эксплуатационных свойств сплавов за счет дополнительного легирования приводит к существенному повышению его стоимости и усложнению технологического процесса выплавки. Эффективной альтернативой этому является модифицирование расплава для создания в нем тугоплавких примесей.

Технологические параметры процесса модифицирования сплава (температура расплава и время ввода модификатора) определяются его химическим составом [1]. Основными задачами при этом, как правило, являются измельчение зерна, и повышения комплекса физико-механических прочностных и других эксплуатационных свойств.

В литературе описано достаточное количество исследований [2, 3], свидетельствующих о гораздо большей эффективности модифицирования сплавов ультрадисперсными порошками тугоплавких соединений по сравнению со стандартными способами. Такие частицы гораздо более равномерно аспределяются как внутри зерен, так и по межфазным границам. При этом для каждого сплава и вида модификатора существует своё определенное количество, обеспечивающее наибольшую эффективность процесса [4].

Для модифицирования жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК используется ультрадисперсный порошок карбонитрида титана.

Модификатор  $TiCN$  в расплав вводится в виде либо порошка, либо брикетов, как правило, основой при изготовлении таких брикетов является титан. Модификатор вводят в количестве 0,05...0,1 % по массе [5].

На базе АО «Мотор Сич» провели комплекс исследований по разработке рациональной технологии модифицирования жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК ультрадисперсными порошками карбонитрида титана, полученными методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) при изготовлении литых крупногабаритных лопаток газотурбинных двигателей.

Исследование качества сплава ЖСЗДК-ВИ, модифицированного ультрадисперсными частицами карбонитрида, в виде порошка и брикетов

Исследовали влияния присадок карбонитрида титана  $Ti(C, N)$  в виде порошка и брикетов на структуру и физико-механические свойства сплава ЖСЗДК-ВИ, применяемого для изготовления литых рабочих лопаток турбин авиационных двигателей.

### Методика проведения исследований

На установке ВИП-10 сплав ЖСЗДК-ВИ проходил предварительную высокотемпературную обработку расплава (ВТОР) по следующей технологии: после нагрева расплава в основной индукционной печи до температуры  $1600 \pm 20$  °С и при остаточном давлении 0,66...1,33 Па в рабочее пространство печи вводили аргон марки А до давления  $1 \times 10^4$  Па, нагревали расплав до температуры  $1830 \pm 20$  °С и выдерживали при этой температуре 7 мин. Затем понижали температуру металла до  $1600 \pm 20$  °С и заливали в металлическую форму для получения заготовки диаметром 60 мм и весом ~10 кг, от верхней части которой отрезали металл с усадочной раковиной весом 2,0...2,2 кг.

На установке УППФ-3М шихту весом ~18 кг расплавляли в основном тигле. Расплав нагревали до температуры  $1600 \pm 20$  °С. В жидкий металл за 20...30 с до слива через загрузочное устройство вводили ультрадисперсные частицы карбонитрида титана  $Ti(C, N)$  в количестве 60...80 г в виде брикетов или порошка, завернутого в никелевую фольгу. Равномерность распределения частиц карбонитрида титана  $Ti(C, N)$  в объеме расплава обеспечивалась его индукционным перемешиванием в тигле. При остаточном давлении в печи 0,665 Па и температуре  $1590 \pm 10$  °С металл заливали в нагретые до 800 °С электрокорундовые керамические формы для получения пальчиковых образцов диаметром 12 мм, пластин толщиной 4 мм и лопаток.

Физико-механические свойства образцов определяли после их термической обработки по стандартному режиму (гомогенизация при температуре 1210 °С, выдержка 3,5 часа, охлаждение на воздухе).

Определяли химический состав сплава исследуемых вариантов. Макроструктуру изучали на специально подготовленных пластинах толщиной ~4 мм. Выявляли макроструктуру методом химического травления в реактиве, состоящем из 80 %  $HCl$  и 20 %  $H_2O_2$ , при комнатной температуре в течение 15...20 минут. Макрофрактографическое исследование производили на изломах после испытания ударных и разрывных образцов (увеличение до  $\times 4$ ).

Микроструктуру до и после термообработки оценивали на нетравленных микрошлифах и после травления в реактиве Марбле (40 г  $CuSO_4$ , 200 см<sup>3</sup>  $HCl$ , 200 см<sup>3</sup>  $H_2O$ ) с использованием микроскопа «Axio Observer» фирмы «Zeiss» при увеличениях до  $\times 500$ .

Электронно-микроскопические исследования и

рентгеновський мікроаналіз (РСМА) проводили на растровому електронному мікроскопі JSM-IT300LV при збільшеннях до 10000 раз.

Микротвердість визначали на приладі «Microtest» фірми «BUHLER» при навантаженні на індентор 100 г. Временне опір розриву ( $\sigma_B$ ), відносне подовження ( $\delta$ ), відносне звуження ( $\Psi$ ) і ударну в'язкість ( $KCU$ ) визначали при кімнатній температурі. Испитання на довготривалу міцність проводили при температурі 850 °С і навантаженні 350 МПа. Испитання лопаток на вигин (до  $\alpha = 90^\circ$ ) здійснювали на ручному гвинтовому пресі в відповідності з ГОСТ 14019-80 з використанням спеціальних пристосувань, що мають углиблення V-образної форми.

### Мікроструктура брикетів Ti+TiCN

Для якісного модифікування необхідно забезпечити рівномірне розподілення частинок карбонітриду титану в об'ємі расплаву. Частинки карбонітриду титану в брикеті повинні бути рівномірно розподілені по границям порошку титану (рис. 1).

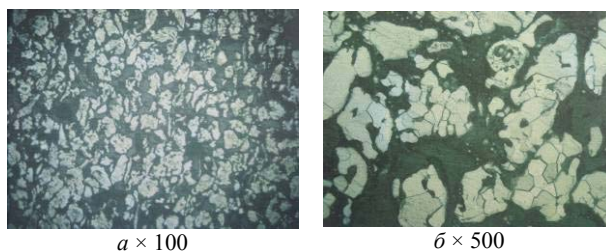


Рис. 1. Мікроструктура брикетів при різних збільшеннях

Фрактограма розриву брикетів (рис. 2а) показала кристалічне строення з пористістю, характерне для крихкого розриву. При більшому збільшенні видно, що частинки TiCN рівномірно розподілені на поверхні порошку титану (рис. 2б).

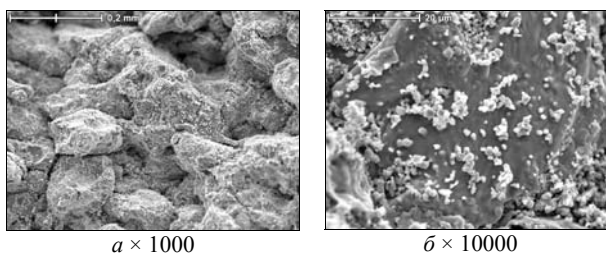
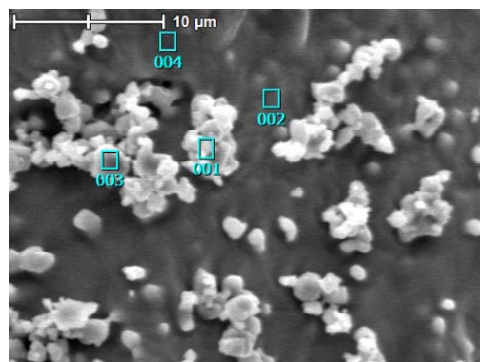


Рис. 2. Фрактограми брикетів при різних збільшеннях

Рентгеноспектральний мікроаналіз (РСМА) розривів зразків (рис. 3, 4) підтверджує достатньо рівномірне розподілення карбонітриду титану в об'ємі брикетів.



а

№ точки	C	N	Ti
001	2,21	1,71	96,08
002	-	-	100
003	3,83	2,51	93,66
004	-	-	100

б

Рис. 3. Результати рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) зразка брикета:

а – електронна мікрофотографія з позначеними ділянками рентгеноспектрального мікроаналізу; б – прикладний хімічний склад позначених місць

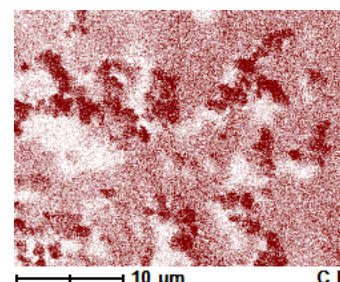
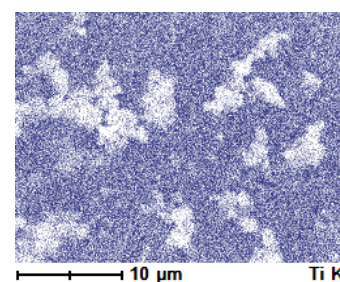
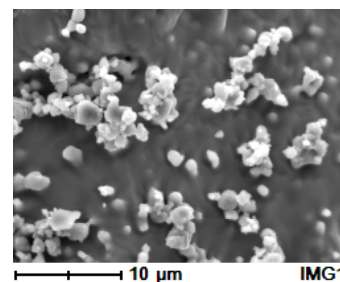


Рис. 4. Результати рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) в режимі картографування зразка брикета

Большей интенсивности окраски соответствует большая концентрация элемента.

### Результаты исследований опытного сплава

Химический состав сплава ЖСЗДК-ВИ всех вариантов выплавки соответствует требованиям ОСТ 1.90.126-91 (табл. 1).

Изучение макроструктуры показало, что модифицирование карбонитридом титана способствовало существенному измельчению макрозерна (рис. 5). Причем, с увеличением количества модификатора размер

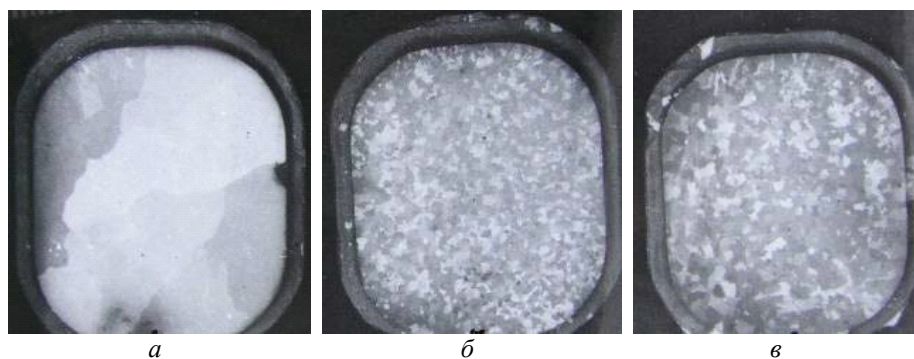
зерна уменьшался. Следует отметить, что на образцах для испытаний механических и жаропрочных свойств, а также на лопатках, отлитых по указанным выше вариантам модифицирования, получена макроструктура, аналогичная представленной на рис. 5.

Фрактографическое исследование строения изломов ударных и разрывных образцов показало (рис. 6), что для образцов, полученных по серийной технологии, характерна крупнокристаллическая структура в отличие от мелкокристаллической модифицированной структуры с присадками Ti(C,N).

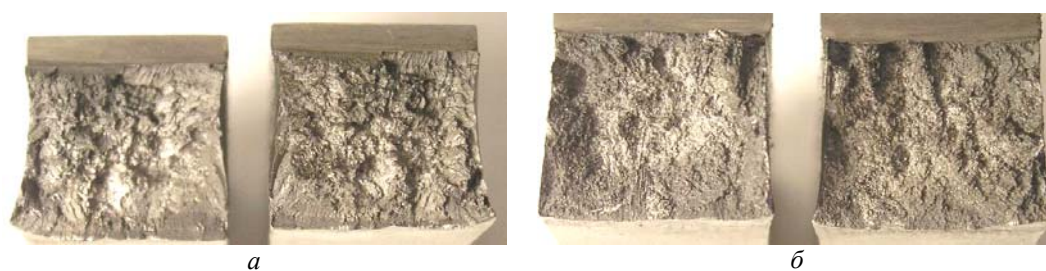
**Таблица 1** – Химический состав жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ после модифицирования по различным вариантам

Вариант модифицирования	Количество Ti(C,N)	Содержание элементов, %						
		C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo
Без модификатора	-	0,085	11,35	8,71	4,04	4,05	2,88	4,00
Ti(C,N) в брикетах	60г	0,09	12,11	9,63	4,36	4,05	3,20	4,19
	80г	0,09	12,48	9,33	4,50	4,48	3,20	4,36
Ti(C,N) в порошке	60г	0,085	11,69	9,82	4,28	4,42	3,05	4,28
	80г	0,095	12,19	9,63	3,83	4,25	3,06	4,15
Нормы ОСТ 1.90.126-91		0,06-0,11	11,0-12,5	8,0-10,0	3,8-4,5	4,0-4,8	2,5-3,2	3,8-4,5

*Примечание.* В сплаве ЖСЗДК-ВИ всех вариантов выплавки массовая доля железа не превышала 2,0 %, кремния – 0,4 %, марганца – 0,4 %.



**Рис. 5.** Макроструктура сплава ЖСЗДК-ВИ после термообработки по стандартному режиму: *а* – без присадки Ti(C,N); *б* – модифицирование Ti(C,N) в брикетах; *в* – модифицирование Ti(C,N) в порошке



**Рис. 6.** Строение изломов термообработанных по стандартному режиму образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ  $\times 2,5$ : *а* – без присадки Ti(C,N); *б* – модифицирование Ti(C,N) в брикетах

Металлографическим исследованием установлено, что литейный жаропрочный сплав ЖСЗДК-ВИ имел типичную дендритную структуру. Оси дендритов – никелевая матрица (ГЦК-твердый раствор), из которой при охлаждении выделялись частицы вторичной интерметаллидной  $\gamma'$ - фазы. В междендритных пространствах и на границах зерен наблюдали выделения первичных фаз в виде карбидов типа  $MeC$  и карбонитридов типа  $Me(C,N)$ .

Модифицирование сплава  $Ti(C,N)$  как в виде брикетов, так и в порошке, приводило к измельчению дендритной структуры. При этом уменьшался размер дендритной ячейки и расстояние между осями дендритов второго порядка.

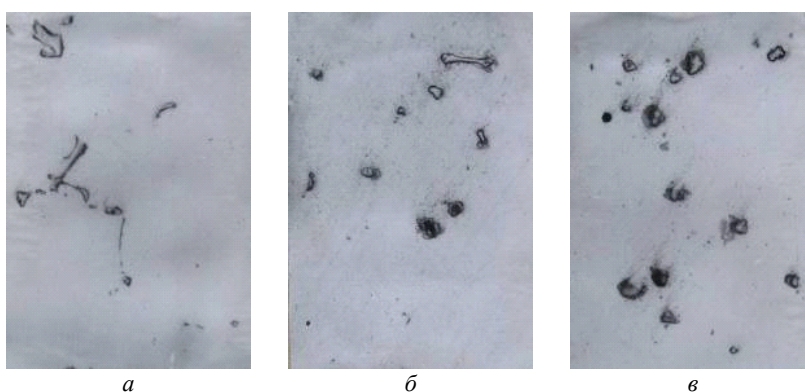
Модифицирующее воздействие ультрадисперсных частиц карбонитрида титана также проявлялось на распределении и изменении морфологии первичных карбидов (рис. 7). При введении в расплав  $Ti(C,N)$  происходило более равномерное распределение карбидных фаз. Первичные карбиды приобретали более благоприятную морфологию, выделяясь в виде дискретных глобу-

лярных или полиэдрических частиц. Для серийного сплава ЖСЗДК-ВИ характерно выделение карбидов преимущественно в эвтектическом виде (типа «китайских иероглифов»).

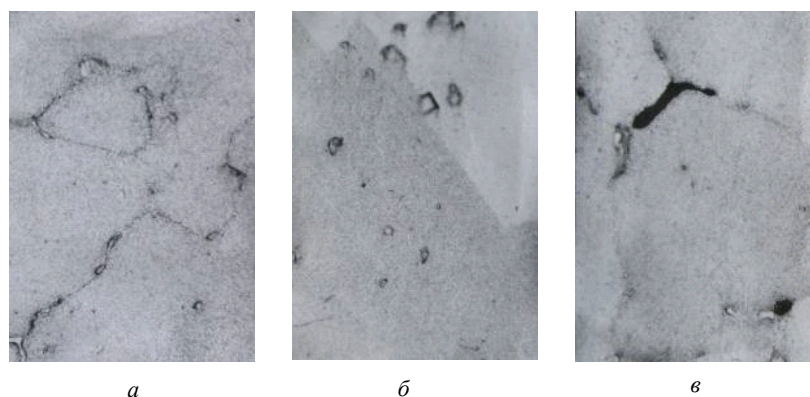
В металле, полученном по серийной технологии без использования модификаторов, карбонитриды встречаются редко. Размер их не превышает 2 мкм. После присадки модификатора во всех вариантах модифицирования наблюдалось повышение количества карбонитридных частиц. Карбонитриды равномерно распределялись в объеме металла (см. рис. 7).

Микроструктура серийного сплава показана на рис. 8а. Структура сплава, модифицированного  $Ti(C,N)$  в виде брикетов, отличалась более чистыми границами зерен (рис. 8б), что способствовало повышению физико-механических свойств сплава.

Присадка порошкообразного  $Ti(C,N)$  приводила к образованию повышенной пограничной микропористости (рис. 8в), что, вероятно, обусловило снижение ударной вязкости.



**Рис. 7.** Карбидная и карбонитридная фазы в сплаве ЖСЗДК-ВИ,  $\times 500$ :  
 а – без присадки  $Ti(C,N)$ ; б – модифицирование  $Ti(C,N)$  в брикетах;  
 в – модифицирование  $Ti(C,N)$  в порошке



**Рис. 8.** Микроструктура сплава ЖСЗДК-ВИ,  $\times 500$ :  
 а – без присадки  $Ti(C,N)$ ; б – модифицирование  $Ti(C,N)$  в брикетах; в – модифицирование  $Ti(C,N)$  в порошке

Микротвердость матрицы после модифицирования Ti(C,N) возрастала примерно на 25 % в сравнении с серийным сплавом, что свидетельствует о дополнительном легировании  $\gamma$  - твердого раствора титаном. Повышение содержания титана в металле способствовало увеличению количества упрочняющей  $\gamma'$  - фазы вследствие перехода титана в твердый раствор и дополнительного его участия в образовании вторичной  $\gamma'$  - фазы при распаде твердого раствора в процессе охлаждения.

Сравнительный анализ результатов механических испытаний показал, что модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ ультрадисперсными частицами Ti(C,N) обуславливает повышение механических и жаропрочных свойств материала (табл. 2). Наилучшие результаты при оптимальном соотношении прочностных и пла-

стических свойств и, удовлетворяющие требованиям ОСТ 1.90.126-91, получены на образцах, отлитых с присадкой Ti(C,N) в виде брикетов. При этом, значения пластических характеристик ( $\delta$ ,  $\Psi$  и  $KCU$ ) примерно в 2 раза превышали требования ОСТ.

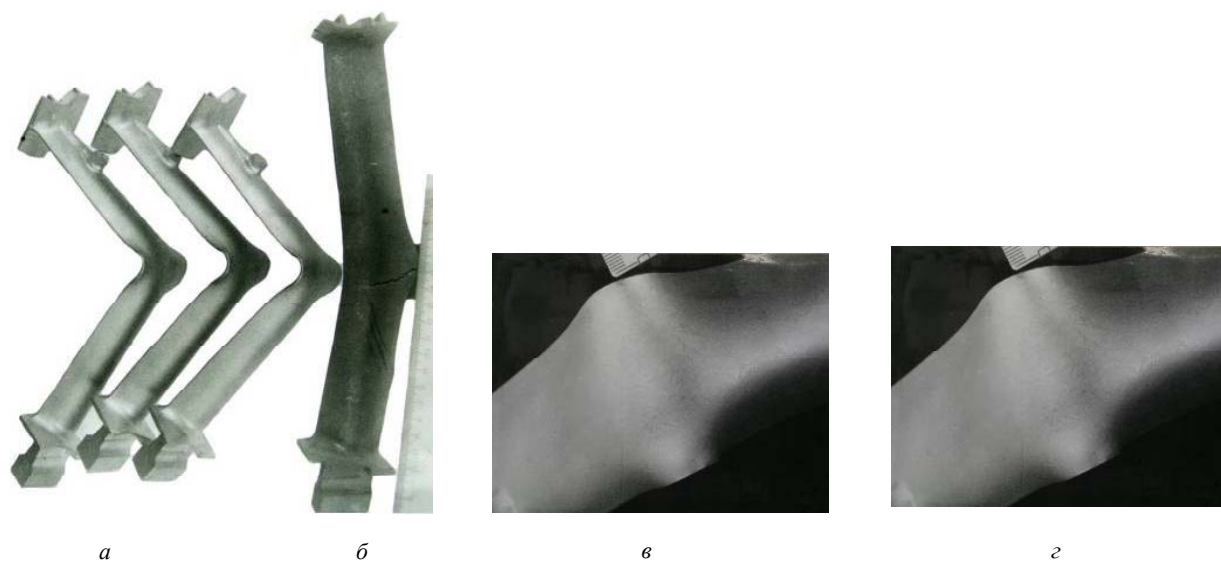
При использовании порошкообразного модификатора происходило снижение значений ударной вязкости ниже уровня требований ОСТ.

При повышении количества вводимого модификатора с 60 г до 80 г повышались показатели как прочности, так и пластичности сплава.

При испытании рабочих лопаток турбины на изгиб установлено, что лопатки, полученные по серийной технологии, разрушались после изгиба на угол равный примерно  $20^\circ$  (рис. 9б, з). Лопатки, отлитые из сплава ЖСЗДК-ВИ, модифицированного Ti(C,N), согнуты на угол  $\alpha = 90^\circ$  без разрушения (рис. 9а, в).

**Таблица 2** – Механические и жаропрочные свойства сплава ЖСЗДК-ВИ после модифицирования по различным вариантам

Вариант модифицирования	Количество модификатора Ti(C, N)	Механические свойства при 20 °С				Время до разрушения при 850 °С, под нагрузкой 350 МПа, ч
		$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$KCU$ , кгс·м/см <sup>2</sup>	
Без модификатора	–	952,0	9,4	13,1	31,7	308,7
Ti(C,N) в брикетах	(60г)	1147,0	17,6	18,2	71,8	533,5
	(80г)	1167,0	13,2	16,1	78,7	491,3
Ti(C,N) в порошке	60г	1119,0	12,8	14,6	26,3	396,7
	80г	1131,0	14,8	15,7	28,7	288,0
Нормы ОСТ 1.90.126-91	–	$\geq 950,0$	$\geq 7,0$	–	$\geq 30,0$	$\geq 50,0$



**Рис. 9.** Внешний вид рабочих лопаток турбины из сплава ЖСЗДК-ВИ после испытания на изгиб:

а, б – общий вид; в, з – зона изгиба; а, в – из сплава модифицированного Ti(C,N); б, з – полученные по серийной технологии

## Выводы

Использование ультрадисперсных порошков карбонитрида титана для объемного модифицирования жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ позволяет повысить механические и жаропрочные свойства материала.

Модифицирование порошкообразным  $Ti(C, N)$  приводит к снижению значений ударной вязкости, по-видимому, вследствие образования пограничной микропористости.

Повышение количества модификатора способствует измельчению зерна.

Более стабильные свойства и благоприятная структура получены при модифицировании расплава  $Ti(C, N)$  в виде брикетов.

Для обеспечения повышенного уровня эксплуатационных свойств готовых изделий при изготовлении литых рабочих лопаток газотурбинных двигателей, предлагается технология модифицирования жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ присадками ультрадисперсных частиц карбонитрида титана  $Ti(C, N)$  в виде брикетов в количестве 0,05 % по массе.

## Список литературы

1. Фаткуллин О. Х. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов дисперсными частицам тугоплавких соединений / О. Х. Фаткуллин // Литейное производство. – 1993. – № 4. – С. 13–14.
2. Сабуров В.П. Упрочняющее модифицирование стали и сплавов / В.П. Сабуров // Литейное производство. – 1988. – № 9. – С. 7–8.
3. Фурман Е. Л. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов ультрадисперсными порошками (УДП) тугоплавких частиц / Е. Л. Фурман, С. Н. Жеребцов, В. И. Гурдин // Технология машиностроения. – 2007. – № 1. – С. 7–9.
4. Седельников В. В. Закономерности влияния ультрадисперсных порошков на физико-механические свойства фосфатно-силикатных связующих и литых заготовок / В. В. Седельников – Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – Литейное производство. – 2006. – 130 с.
5. Использование нанотехнологий в литейном производстве / А. В. Богуслаев, В. В. Клочихин, Н. А. Лысенко др. // Вестник ДГМА. – 2011. – № 4 (25). – С. 23–28.

Одержано 28.12.2020

**Клочихін В. В., Данилов С. М., Лисенко Н. О., Наумик В. В. Розробка технології модифікування жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ ультрадисперсними порошками карбонітриду титану**

**Мета дослідження.** Вивчити вплив модифікування присадками ультрадисперсних частинок карбонітриду титану  $Ti(C, N)$  у вигляді порошку і брикетів на структуру і фізико-механічні властивості сплаву ЖСЗДК-ВІ, що застосовується для виготовлення литих робочих лопаток турбін авіаційних двигунів.

**Методи дослідження.** Попередню високотемпературну обробку розплаву (ВТОР) проводили на установці ВІП-10.

На установці УППФ-3М з основним тиглем проводили модифікування сплаву ЖСЗДК-ВІ ультрадисперсними частинками карбонітриду титану  $Ti(C, N)$  в кількості 60...80 г у вигляді брикетів або порошку, загорнутого в нікелеву фольгу.

Зразки піддавали гомогенізації при температурі 1210 °С з витримкою 3,5 години і охолодженням на повітрі.

Визначали хімічний склад сплаву досліджуваних варіантів. Макроструктуру вивчали на пластинах товщиною ~4 мм після хімічного травлення. Мікроструктуру оцінювали на мікросліфах до і після травлення в реактиві Марбле.

Мікротвердість, тимчасовий опір, відносні подовження і звуження, ударну в'язкість визначали при кімнатній температурі. Випробування на тривалу міцність проводили при 850 °С під навантаженням 350 МПа. Випробування лопаток на вигин здійснювали на ручному гвинтовому пресі відповідно до ГОСТ 14019-80.

**Отримані результати.** Вивчено мікроструктуру брикетів  $Ti + TiCN$  методами оптичної та електронної мікроскопії. Рентгеноспектральним мікроаналізом (РСМА) зламів зразків підтверджено досить рівномірний розподіл карбонітрида титану в обсязі брикетів.

Вивчено хімічний склад, макро- і мікроструктура дослідженого сплаву. Проведено фрактографічне дослідження будови зламів зразків.

Встановлено модифікуючу вплив ультрадисперсних частинок карбонітрида титану на дендритну структуру, розподіл і зміна морфології первинних карбідів, кількість і розподіл карбонітридним частинок.

Проведено порівняльний аналіз механічних та жароміцних властивостей сплаву ЖСЗДК-ВІ стандартного складу і модифікованого ультрадисперсними частинками  $Ti(C, N)$ . Проведено випробування робочих лопаток турбіни на вигин.

**Наукова новизна.** Показано, що використання ультрадисперсних порошків карбонітриду титану для об'ємного модифікування жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ дозволяє підвищити механічні та жароміцні властивості матеріалу. Підвищення кількості модифікатора сприяє подрібненню зерна.

Більш стабільні властивості і сприятливу структуру забезпечує модифікування розплаву ультрадисперсними частинками Ti(C, N) у вигляді брикетів. Встановлено, що модифікування порошкоподібним Ti(C, N) призводить до зниження значень ударної в'язкості внаслідок утворення приграничної мікропористості.

**Практична цінність.** Розроблено технологію модифікування жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, що застосовується для виготовлення литих робочих лопаток газотурбінних двигунів, присадками ультрадисперсних частинок карбонітриду титану Ti(C, N), що забезпечує підвищений рівень експлуатаційних властивостей готових виробів.

**Ключові слова:** модифікування, ультрадисперсні частинки, карбонітрид титану, брикет, макроструктура, мікроструктура, фізико-механічні властивості, жароміцні властивості.

#### **Klochikhin V., Danilov S., Lysenko N., Naumyk V. Development of technology for modification of heat-resistant nickel alloy ЖСЗДК-ВІ with titanium carbonitride ultrafine powders**

**Purpose.** To study the effect of modification by the titanium carbonitride Ti(C, N) ultrafine particles additives in the form of powder and briquettes on the structure and physical-mechanical properties of the ЖСЗДК-ВІ alloy used for the manufacture of aircraft engine turbines cast rotor blades.

**Research methods.** Preliminary high-temperature treatment of the melt was carried out on a VIP-10 installation.

On the UPPF-3M installation with the alkaline melting pot, the ЖСЗДК-ВІ alloy was modified with ultrafine particles of titanium carbonitride Ti(C,N) in an amount of 60...80 g in the form of briquettes or powder wrapped in nickel foil.

The samples were subjected to homogenization at a temperature of 1210 °C with a holding time of 3.5 hours and air cooling.

The chemical composition of investigated alloys was determined. The macrostructure was studied on plates ~4 mm thick after chemical etching. The microstructure was evaluated on microsections before and after etching in the Marble reagent.

Microhardness, ultimate strength, elongation and contraction, impact strength were determined at room temperature. Long-term strength tests were carried out at 850 °C under a load of 350 MPa. The bending test of the blades was carried out on a manual screw press in accordance with GOST 14019-80.

**Results.** The microstructure of Ti+TiCN briquettes has been studied by optical and electron microscopy. X-ray microanalysis of specimen fractures confirmed a fairly uniform distribution of titanium carbonitride in the volume of briquettes.

The chemical composition, macro- and microstructure of the experimental alloy have been studied. A fractographic study of the samples fracture structure was carried out.

The modifying effect of titanium carbonitride ultrafine particles on the dendritic structure, distribution and change in the morphology of primary carbides, the number and distribution of carbonitride particles has been established.

A comparative analysis of the mechanical and heat-resistant properties of the ЖСЗДК-ВІ alloy of standard composition and modified with ultradispersed Ti(C,N) particles has been carried out. Bending tests of turbine rotor blades were carried out.

**Scientific novelty.** It is shown that the use of ultrafine titanium carbonitride powders for bulk modification of the heat-resistant nickel alloy ЖСЗДК-ВІ makes it possible to increase the mechanical and heat-resistant properties of the material. Increasing the amount of modifier promotes grain refinement.

More stable properties and favorable structure are provided by melt modification with ultrafine Ti(C,N) particles in the form of briquettes. It was found that modification with powdered Ti(C,N) leads to a decrease in the impact toughness values due to the formation of boundary microporosity.

**Practical value.** The technology of the heat-resistant nickel alloy ЖСЗДК-ВІ, used for the manufacture of cast rotor blades of gas turbine engines, modification with additives of titanium carbonitride Ti(C,N) ultrafine particles, providing an increased level of performance properties of finished products, has been developed.

**Key word:** modification, ultrafine particles, titanium carbonitride, briquette, macrostructure, microstructure, physical-mechanical properties, heat-resistant properties.