

П.Д. Жеманюк, к.т.н., технический директор, В.В. Клочихин, Н.А. Лысенко, инженеры (АО «Мотор Сич»), В.В. Наумик, д.т.н., профессор (Запорожский национальный технический университет), г. Запорожье, Украина

Комплексное влияние технологических операций на структуру и свойства отливок из жаропрочного никелевого сплава

Изучено комплексное влияние технологических операций термовременной обработки расплава (ТВО), модифицирования ультрадисперсными частицами (УДП) карбонитрида титана $Ti(C,N)$ и последующего горячего изостатического прессования (ГИП) на структуру и свойства отливок и образцов из жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ после стандартной термической обработки. По результатам проведенных исследований разработана комплексная технология изготовления ответственных отливок из жаропрочных никелевых сплавов.

Ключевые слова: термовременная обработка расплава, модифицирование, ультрадисперсные частицы, горячее изостатическое прессование, термообработка, структурная однородность, пластичность, прочность, жаропрочность, микропоры, усадочные рыхлоты.

Досліджено комплексний вплив технологічних операцій термочасової обробки розплаву (ТЧО), модифікування ультрадисперсними частками карбонітриду титану $Ti(C,N)$ та наступного горячого ізостатичного пресування (ГІП) на структуру і властивості виливків та зразків з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ після стандартної термічної обробки. За результатами проведених досліджень розроблено комплексну технологію виготовлення відповідальних виливків з жароміцних нікелевих сплавів.

Ключові слова: термочасова обробка, модифікування, ультрадисперсні частки, горяче ізостатичне пресування, термообробка, структурна однорідність, пластичність, міцність, жароміцність, мікропори, усадкові рихлоты.

It is studied the complex influence of technological operations of fusion thermal-time treatment (TTT), retrofitting by ultra disperse particles (UDP) of carbonitride of titan $Ti(C,N)$ and subsequent hot isostatical pressing (HIP) on a structure and properties of casts and specimens of the heatproof nickel alloy ЖСЗДК-ВИ after standard heat treatment. On results the conducted researches complex technology of making of the responsible heatproof nickel alloys casts is developed.

Keywords: thermal-time treatment of fusion, retrofitting, ultra disperse particles, hot isostatic pressing, heat treatment, structural homogeneity, plasticity, strength, heat resistance, micro pores, shrink friables.

Изготовление ответственных литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов требует разработки новых технологических и металлургических процессов, обеспечивающих улучшение комплекса эксплуатационных характеристик.

Одним из важных направлений таких разработок является обеспечение повышенной чистоты и однородности расплавов в процессе литейных технологических переделов, а, следовательно, и материала готовых литых изделий.

Известно, что свойства материалов во многом зависят от структурного строения материала на мезо- и макроуровнях. Так, в металлургии и литейном производстве установлено, что стали и сплавы с мелкокристаллической структурой обладают рядом преимуществ конструкционных и технологических свойств перед сталями и сплавами с крупнокри-

сталлической структурой. Одним из перспективных направлений получения сплавов с мелкокристаллической структурой является модифицирование их нерастворимыми ультрадисперсными порошками (УДП). Применение нанотехнологии позволяет получать материалы с принципиально улучшенными свойствами, многократно повышать эффективность процессов [1, 2].

Литые детали горячего тракта авиационных двигателей, изготавливаемые из жаропрочных никелевых сплавов, характеризуются сложной конфигурацией и часто отбраковываются по причине наличия внутренних несплошностей усадочного характера.

Эффективным способом исправления внутренних дефектов ответственных отливок из алюминиевых, титановых и жаропрочных никелевых сплавов является метод горячего изостатического прессо-

вания (ГИП), сущность которого состоит во всестороннем сжатии отливок специальными жидкостями или газами при высоких температурах [3].

Последующая термическая обработка позволяет снять остаточные напряжения и повысить пластичность материала при сохранении уровня прочностных свойств [4, 5].

Методика исследований

Исследовали образцы из жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ, изготовленные по следующим вариантам комплексных технологических процессов:

- 0 – по серийной технологии;
- 1 – по серийной технологии с последующим горячим изостатическим прессованием (ГИП);
- 2 – с применением предварительной термовременной обработки расплава (ТВО);
- 3 – с применением предварительной термовременной обработки

расплава (ТВО) после горячего изостатического прессования (ГИП);

4 – с применением предварительной термовременной обработки расплава (ТВО) и модифицирования ультрадисперсными частицами карбонитрида титана $Ti[Ti(C,N)]$;

5 – с применением предварительной термовременной обработки расплава (ТВО) и модифицирования ультрадисперсными частицами карбонитрида титана $Ti[Ti(C,N)]$ после горячего изостатического прессования (ГИП).

Все опытные образцы подвергали термической обработке по стандартному режиму (гомогенизация при 1210 ± 10 °С в течение 4 часов в вакууме).

Исходный сплав был получен на АО «Мотор – Сич» на установке FM 1-2-100 фирмы «ULVAC».

Плавки по изготовлению опытных образцов проводили в печи УППФ-3М при температуре 1570 ± 10 °С.

При выплавке по вариантам 2, 3, 4 и 5 расплав подвергали термовременной обработке (ТВО) при температуре 1800 °С в течение 6 минут.

Заливку расплава осуществляли при температуре 1540 ± 10 °С в полученные по выплавляемым моделям керамические формы, нагретые до температуры 810 ± 40 °С.

Согласно вариантам 4 и 5 сплав ЖСЗДК-ВИ модифицировали ультрадисперсными частицами (УДП) карбонитрида титана $[Ti(C,N)]$ в количестве 0,05 % по массе.

Для присадки модификатора использовали таблетки на основе титана $Ti[Ti(C,N)]$. Содержание компонентов в таблетке составляли следующее соотношение: Ti – 90%; $Ti(C,N)$ – 10%. Присадку таблеток $Ti[Ti(C,N)]$ осуществляли при температуре 1650 °С с выдержкой от 1 мин. 55 с. до 2 мин. 45 с.

Образцы, изготовленные по вариантам 1, 3 и 5, подвергали операции горячего изостатического прессования (ГИП).

Процесс горячего изостатического прессования проводили по следующему режиму:

- начальное давление в СВД – 38 МПа;
- нагрев от комнатной температуры до 1040 ± 10 °С со скоростью $8 \dots 10$ °С/мин;
- выдержка при температуре 1040 ± 10 °С – 1,5 часа;
- давление в СВД при температуре 1040 °С – 120 МПа;
- нагрев до температуры 1210 ± 10 °С со скоростью – 4°/мин.;
- выдержка при температуре 1210 ± 10 °С – 2 часа;
- давление в СВД при температуре 1210 °С – 160 МПа;
- охлаждение отливок до тем-

пературы 300 °С со скоростью 26 °/мин.

Результаты исследований

Химический состав опытных вариантов образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ представлен в табл. 1.

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что содержание элементов в исследуемых образцах, в основном, соответствует требованиям ОСТ 1.90126-85. При этом следует отметить, что в образцах, модифицированных $Ti[Ti(C,N)]$, содержание титана примерно на 11% превышает уровень требований ОСТ.

На рис. 1 показано макрофотографическое строение изломов образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ, полученного по различным вариантам.

Макроструктуру выявляли методом химического травления в реактиве, состоящем из 80% HCl и 20% H_2O_2 (рис. 2).

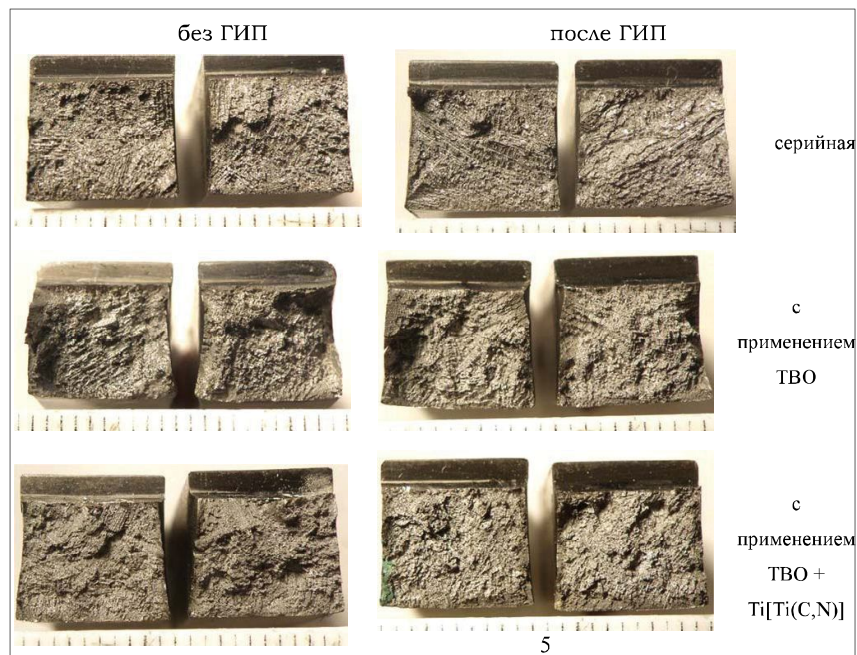


Рис. 1. Строение изломов опытных образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ × 2

Таблица 1. Химический состав опытных вариантов сплава ЖСЗДК-ВИ

Вариант	Содержание элементов, %; Ni - остальное									
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Si	Mn
0	0,068	11,78	9,55	4,28	4,54	3,05	4,26	< 2,0	< 0,4	< 0,4
1	0,071	11,92	9,62	4,21	4,53	3,07	4,23	< 2,0	< 0,4	< 0,4
2	0,060	11,60	9,56	4,30	4,48	3,06	4,27	< 2,0	< 0,4	< 0,4
3	0,077	11,55	9,66	4,23	4,60	3,20	4,24	< 2,0	< 0,4	< 0,4
4	0,067	11,44	9,55	4,29	4,67	3,42	4,27	< 2,0	< 0,4	< 0,4
5	0,070	11,41	9,63	4,32	4,60	3,49	4,26	< 2,0	< 0,4	< 0,4
Нормы ОСТ 1.90126-85	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	≤ 2,0	≤ 0,4	≤ 0,4

Установлено, что проведение термовременной обработки расплава (ТВО) способствует некоторому укрупнению макрозерна (рис. 2, варианты 2 и 3), а модифицирование карбонитридными частицами Ti(C,N) приводит к измельчению зерна (рис. 2, варианты 4 и 5, табл. 2).

Физико-механические свойства определяли на отдельно отлитых пальчиковых образцах (\emptyset и \square 12 мм) после их термической обработки по стандартному режиму (гомогенизация при температуре 1210 °С с выдержкой 3,5 часа и охлаждением на воздухе).

Результаты испытаний механических свойств при комнатной температуре и жаропрочных – при температуре 850 °С и напряжении 35 кгс/мм² представлены в табл. 3.

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что механические и жаропрочные свойства исследованных образцов (за исключением варианта 2), удовлетворительные и отвечают требованиям ОСТ 1.90126-85.

Наиболее оптимальное сочетание прочностных (σ_b) и пластических (δ , Ψ , KCU) характеристик, а также длительной прочности при

температуре 850 °С и нагрузке 35 кгс/мм², характеризующееся стабильностью результатов испытаний, получено на образцах, модифицированных Ti(C, N) (варианты 4 и 5).

Металлографическим исследованием в материале образцов, изготовленных по варианту 2, выявлены структуры, характерные для состояния сплава ЖСЗДК-ВИ, перегретого в процессе термической обработки (рис. 3), что, видимо, явилось причиной снижения значений предела прочности (σ_b) и длительной прочности (время до разрушения τ_p). Образование структур перегрева, вероятно, обусловлено

снижением температуры солидус в результате проведения ТВО при температуре 1800 °С в течение 6 минут.

При этом в образцах варианта 3 после газостатирования по выше указанному режиму при температуре 1210 °С и давлении 160 МПа, микроструктура материала после проведения последующей стандартной термообработки соответствует сплаву ЖСЗДК-ВИ в нормально термообработанном состоянии без перегрева (рис. 4).

Микроструктура образцов, изготовленных по серийной технологии (варианты 0 и 1), а также после модифицирования частицами

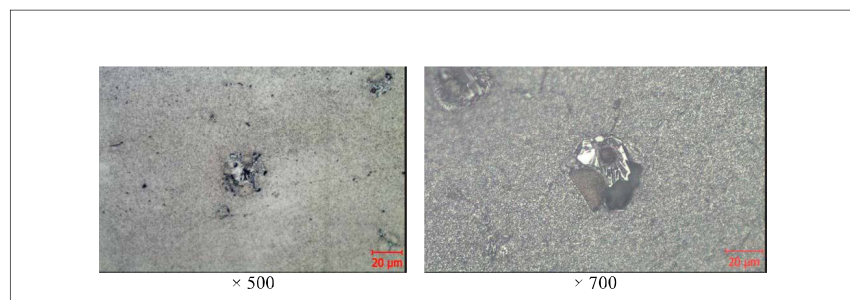


Рис. 3. Микроструктура образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ, изготовленных по варианту 3 (с применением ТВО после ГИП)

Таблица 2. Размер макрозерна, мм образцов \emptyset 12 мм из опытных вариантов сплава ЖСЗДК-ВИ

0	1	2	3	4	5
3,0...8,5	2,5...13,5	3,0...18,0	~ 26,0	0,5...3,0 (единичные кристаллы до 7 мм)	0,5...2,0 (мелкие частицы ~0,07 мм)

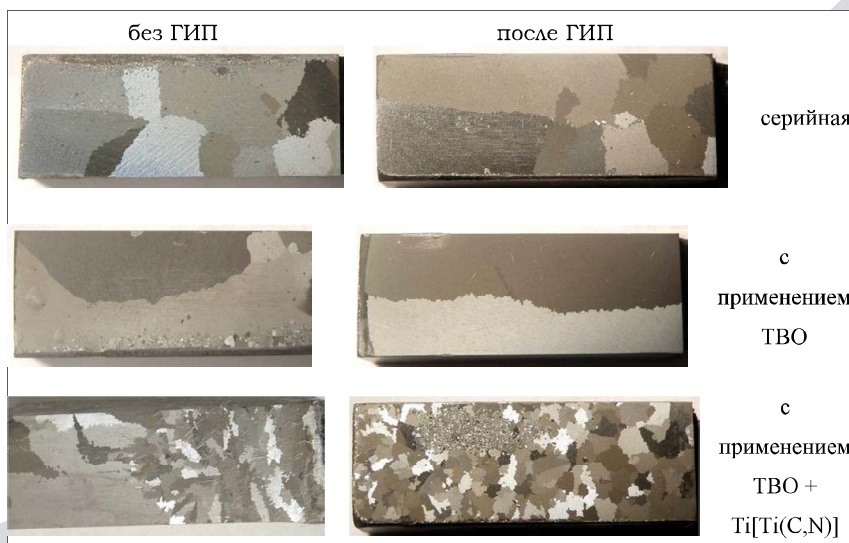


Рис. 2. Макроструктура опытных образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ; \times 2

Ti(C,N) (варианты 4 и 5), как до, так и после газостатирования, удовлетворительная для сплава ЖСЗДК-ВИ в нормально термообработанном состоянии (рис. 5).

В материале образцов, изготовленных по вариантам 4 и 5 обнаружены включения нитридов и карбонитридов (рис. 6), размеры которых составляют 3...12 мкм (табл. 4). В немодифицированном металле нитридные включения встречаются редко, и размер их не превышает 2 мкм (табл. 4).

В образцах, полученных без проведения операции газостатирования (варианты 0, 2 и 4) обнаружены микропоры, а также усадочные рыхлоты размером до 30 мкм (табл. 4; рис. 7).

Проведение операции горячего изостатического прессования (варианты 1, 3 и 5) способствует «залечиванию» усадочных дефектов. В структуре исследованных лопаток после ГИП микропоры и рыхлоты практически отсутствуют (табл. 4; рис. 8).

В серийных образцах карбиды типа MC выделяются, в основном, в виде дискретных глобулярных

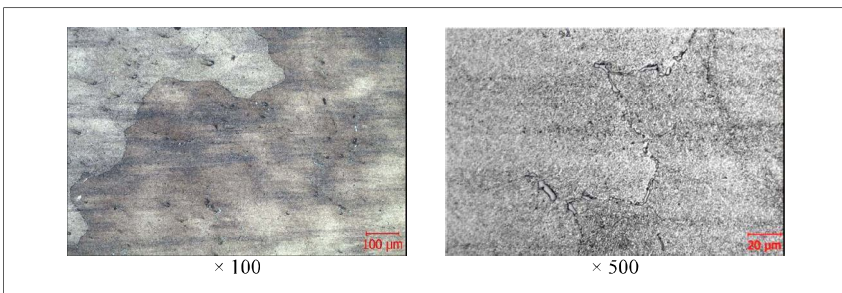


Рис. 4. Микроструктура образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ, изготовленных по варианту 3 (с применением ТВО после ГИП)

частиц с наличием пластин эвтектических карбидов типа M_6C размером до $40 \mu\text{m}$, располагающихся преимущественно на границах зерен и в междендритных пространствах (табл. 4; рис. 9, вариант 0).

Проведение термовременной обработки расплава при температуре $1850 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 минут и в особенности модифицирование карбонитридами титана способствует дроблению карбидных пластин и равномерному их распределению в объеме металла (рис. 9, варианты 2 и 4).

Расстояние между осями дендритов второго порядка в образцах, отлитых по серийной технологии, а также с проведением ТВО примерно на 20 % больше, чем в модифицированных образцах (табл. 4).

Выводы

1. Химический состав опытных образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ, изготовленных по различным вариантам, в основном, соответствует требованиям ОСТ 1.90126-85. При этом в образцах, модифицированных $Ti[Ti(C,N)]$ (варианты 4 и 5), содержание титана примерно на 11 % превышает уровень требований ОСТ.

2. Проведение термовременной обработки расплава (ТВО) способствует некоторому укрупнению макрозерна (варианты 2 и 3), а модифицирование карбонитридными частицами $Ti(C,N)$ (вариант 5) – приводит к измельчению зерна.

3. Механические и жаропрочные свойства исследуемых образцов после различных вариантов (за исключением варианта 2), удовлетворительные и отвечают требованиям ОСТ 1.90126-85. Снижение механических (σ_0) и жаропрочных (время до разруше-

ния τ_p) свойств материала образцов, изготовленных по варианту 2, обусловлено наличием структур перегрева, образовавшихся в процессе термической обработки, вероятно, вследствие снижения температуры солидус в результате проведения ТВО при температуре $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ в течении 6 минут.

4. Наиболее оптимальное сочетание прочностных (σ_0) и пластических (δ , Ψ , KCU) характеристик, а также длительной

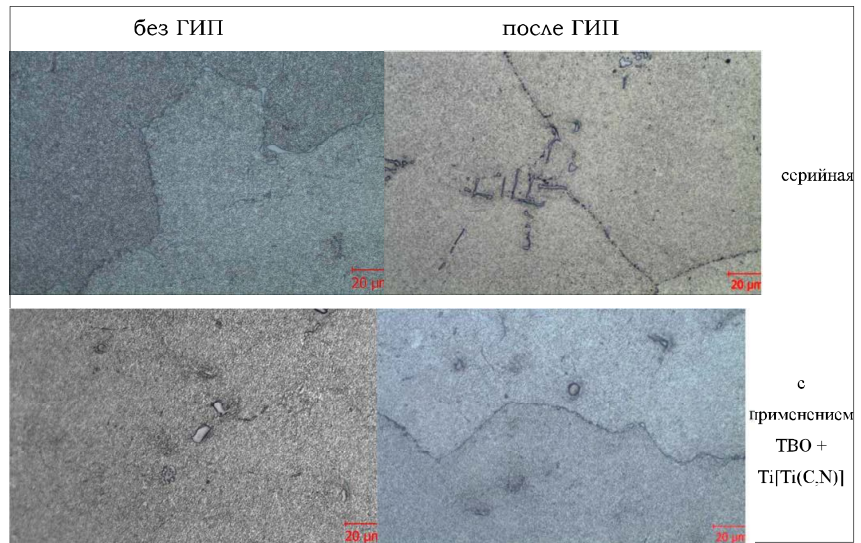


Рис. 5. Микроструктура образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ, изготовленных по различным вариантам, $\times 500$

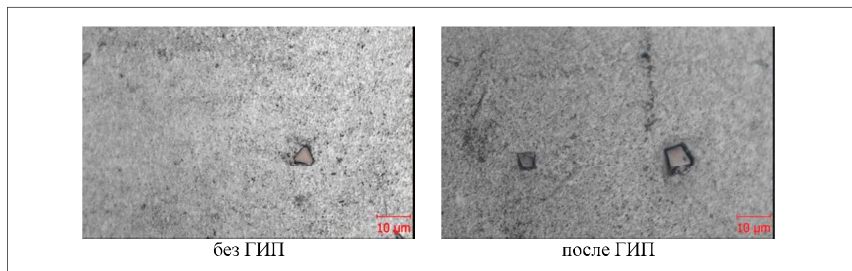


Рис. 6. Микроструктура образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ, модифицированного $Ti[Ti(C,N)]$, $\times 1000$

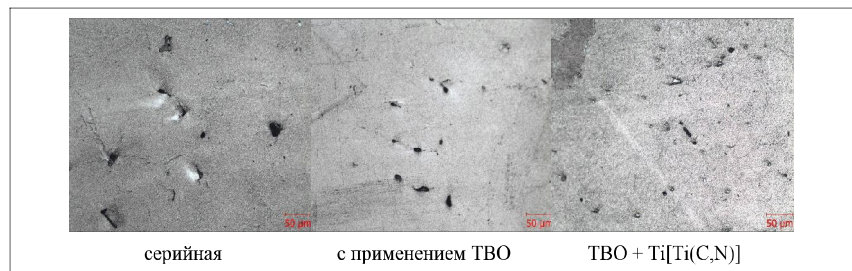


Рис. 7. Микропористость в образцах из сплава ЖСЗДК-ВИ, изготовленных по различным вариантам без проведения операции ГИП, $\times 200$

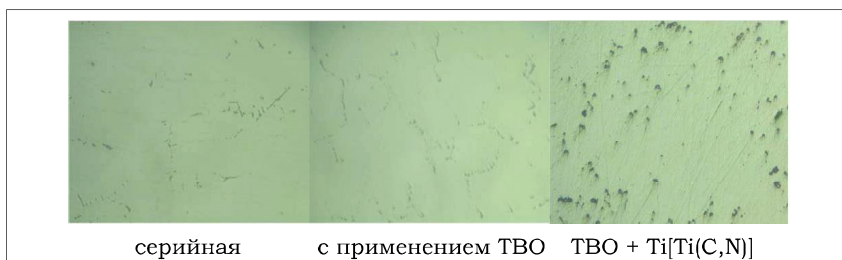


Рис. 8. Нетравленая структура образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ, изготовленных по различным вариантам с применением операции ГИП, × 200

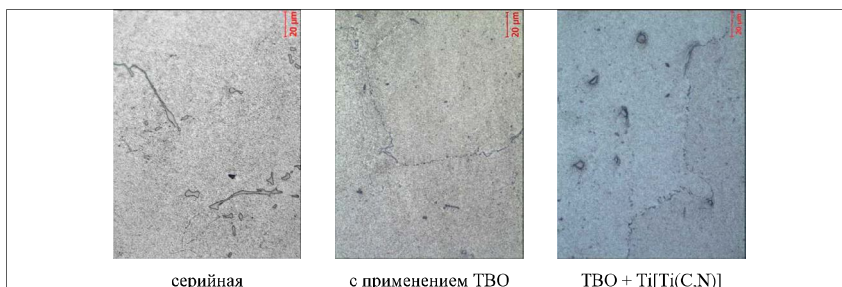


Рис. 9. Карбиды в образцах из сплава ЖСЗДК-ВИ, изготовленных по различным вариантам без применения операции ГИП, × 500

прочности при температуре 850 °С и нагрузке 35 кгс/мм², характеризующееся стабильностью результатов испытаний, получено на образцах, модифицированных Ti(C,N) (варианты 4 и 5).

5. Проведение операции горячего изостатического прессования способствует «залечиванию» усадочных дефектов типа пор и рыхлот.

6. По результатам проведенных исследований разработана комплексная технология, предусматривающая термовременную обработку расплава (ТВО), модифицирование ультрадисперсными частицами (УДП) карбонитрида титана Ti(C,N) и последующие горячее изостатическое прессование (ГИП) и термическую обработку отливок.

Список литературы:

1 Рыбкин В.А. Направления развития технологий специальных способов литья [Текст] /

Таблица 3. Механические и жаропрочные свойства опытных образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ после стандартной термообработки

Вариант	Состояние материала	Механические свойства при 20 °С				Время до разрушения при 850 °С под нагрузкой 35 кгс/мм ² , τ _p , час.
		σ _в , кгс/мм ²	δ, %	Ψ, %	KCU, кгс·м/см ²	
0	серийная без ГИП	88,1	10,4	16,2	2,25	689,0 705,0
		91,4	10,8	12,4	3,50	
1	серийная после ГИП	97,3	12,0	15,4	3,13	685,5 445,5
		101,3	11,6	15,4	3,13	
2	с применением ТВО без ГИП	82,3	18,0 1	16,1	7,50	16,5 30,5 20,5
		87,2	7,6	22,8	8,50 -	
		80,4	21,2	23,5		
3	с применением ТВО после ГИП	99,6	16,8	14,2	6,00	499,0 454,0
		97,4	19,2	22,8	4,38	
		95,1	11,2	12,9	6,25	
4	с применением ТВО + Ti[Ti(C,N)] без ГИП	97,5	12,0	16,1	7,13	784,5 1050,5
		108,0	14,8	15,6	4,25	
5	с применением ТВО + Ti[Ti(C,N)] после ГИП	102,0	10,4	19,7	4,75	692,0 784,0
		111,7	13,6	12,6	5,75	
Нормы ОСТ 1.90126-85		≥95,0	≥7,0	-	≥3,0	≥50,0

Таблица 4. Размеры структурных составляющих в опытных образцах из сплава ЖСЗДК-ВИ

Вариант	Состояние сплава	Размер карбидов, мкм		Размер нитридов, мкм	Размер микропор, мкм	Расстояние между осями дендритов 2-го порядка, мкм
		глобулярные типа МС	пластинчатые типа М6С			
0	Серийная без ГИП	2...12	12...40	~ 2 (редко)	8...30	55...90
1	Серийная после ГИП	2...10	10...32	~ 2 (редко)	-	55...90
2	с применением ТВО без ГИП	2...6	до ~ 14 (редко)	~ 2 (редко)	6...28	55...85
3	с применением ТВО после ГИП	2...10	до ~ 18 (редко)	~ 2 (редко)	-	60...85
4	с применением ТВО + Ti[Ti(C,N)] без ГИП	2...14	до ~ 10 (редко)	3...7	6...20	50...60
5	с применением ТВО + Ti[Ti(C,N)] после ГИП	2...10	до ~ 16 (редко)	3...12	-	50...60

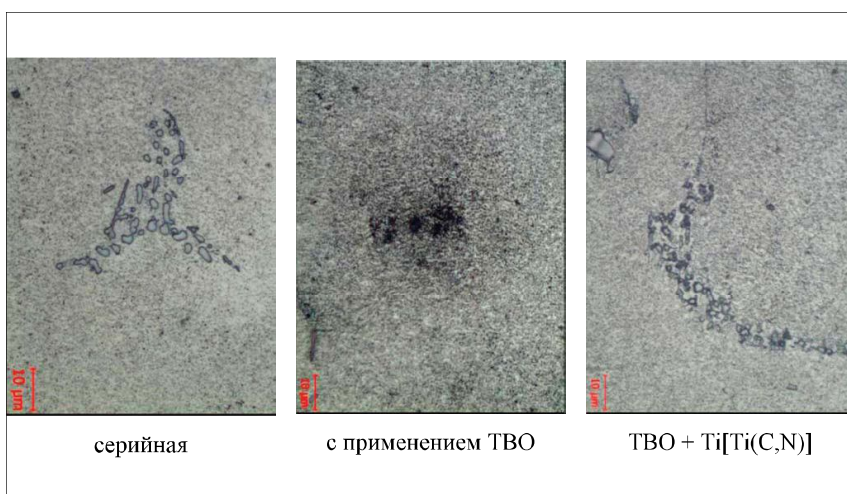


Рис. 10. Зоны «залечивания» микропор в образцах из сплава ЖСЗДК-ВИ после ГИП, $\times 1000$

В.А. Рыбкин // *Литейное производство*, 2010. – № 2.

2 Иншаков О. О приоритете государства в сфере нанотехнологий [Текст] / О. Иншаков, А. Фесин // *Экономист*, 2009. – № 10.

3. Галдин Н.М. Цветное литье: справочник [Текст] / Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук и др.; под общ. ред. Н.М. Галдина. – М.: Машиностроение, 1989. – 528 с.

4. Химушин Ф.Ф. Легирование, термическая обработка и свойства жаропрочных сталей и сплавов [Текст] / Ф.Ф. Химушин. – М.: Оборонгиз, 1962. – 336 с.

5. Гуляев А.П. Металловедение [Текст] / А.П. Гуляев – М.: Металлургия, 1948. – 556 с.