

П.Д. Жеманюк, к.т.н., технический директор, В.В. Клочихин, инженер, нач. лаборатории специальной металлургии, Н.А.Лысенко, инженер, (ОАО «Мотор-Сич»), В.В. Наумик, докт. техн. наук, с.н.с., доцент, (Национальный технический университет), г. Запорожье, Украина

Разработка комплексной технологии получения ответственных отливок из жаропрочных никелевых сплавов

Разработана комплексная технология, предусматривающая применение термовременной обработки расплава, модифицирование ультрадисперсными порошками TiCN и последующее горячее изостатическое прессование точных отливок из жаропрочных никелевых сплавов.

Ключевые слова: ультрадисперсные частицы, карбонитрид титана, модифицирование, литейные дефекты, горячее изостатическое прессование, дендритная ячейка, микроструктура, лопатка.

Розроблено комплексну технологію, що передбачає застосування термовременної обробки розплаву, модифікування ультрадисперсними порошками TiCN та наступне гаряче ізостатичне пресування точних виливків з жароміцних нікелевих сплавів.

Ключові слова: ультрадисперсні частки, карбонітрид титану, модифікування, ливарні дефекти, гаряче ізостатичне пресування, дендритна чарунка, мікроструктура, лопатка.

The complex technology, including application of timethermal treatment of fusion, retrofitting the ultradisperse TiCN powder and subsequent hot isostatical pressing of the exact castings from heatproof nickel alloys, is developed.

Keywords: ultradisperse particles, titan carbonitride, retrofitting, castings defects, hot isostatical pressing, dendrite cell, microstructure, blade.

Одним из перспективных направлений получения сплавов с заданной микроструктурой и принципиально новым уровнем свойств является модифицирование их нерастворимыми ультрадисперсными порошками (УДП) [1].

На базе АО «Мотор – Сич» был проведен комплекс исследований по оценке влияния модифицирования ультрадисперсными частицами различного состава, полученными различными способами, на состав, структуру и свойства литых образцов жаропрочного никелевого сплава и изготовленных из него рабочих лопаток.

В общем, модифицирование жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ различными ультрадисперсными порошками способствует снижению микропористости по сравнению с серийным сплавом и, несомненно, является перспективным направлением улучшения комплекса его физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик, как материала рабочих лопаток газотурбинных двигателей. Однако в отдельных отливках зафиксировано наличие дефектов литейного происхождения, что и

приводило к образованию трещин в процессе их испытания на изгиб.

Эффективным способом исправления внутренних дефектов ответственных отливок из алюминиевых, титановых и жаропрочных никелевых сплавов является метод горячего изостатического прессования (ГИП), сущность которого состоит во всестороннем сжатии отливок специальными жидкостями или газами при высоких температурах [2].

Методика исследований

Для сравнительной оценки качества материала были исследованы рабочие лопатки турбины, отлитые из жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ, модифицированного карбонитридными частицами в количестве 0,05 %, до и после обработки методом горячего изостатического прессования.

Химический состав лопаток соответствовал требованиям ОСТ 1.90.126-85.

Процесс горячего изостатического прессования проводили по следующему режиму. Лопатки при комнатной температуре загружали в камеру газостата с начальным давлением 38 МПа. Производили нагрев до температуры $1040 \pm 10^\circ\text{C}$

со скоростью $8 \dots 10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Производили выдержку при данной температуре в течение 1,5 часа. Повышали давление в газостате до 120 МПа. Повышали температуру до $1210 \pm 10^\circ\text{C}$ со скоростью $4^\circ\text{C}/\text{мин}$. и выдерживали при ней в течение 2 часов. Далее повышали давление до 160 МПа и охлаждали отливки до температуры 300°C со скоростью $100^\circ/\text{мин}$.

Опытные образцы исследовали современными методами неразрушающего контроля, макрофрактографии, металлографии, проводили испытания на изгиб.

Основной материал исследований

Рентгенографическими исследованиями в некоторых лопатках до газостатирования была обнаружена пористость. После операции ГИП видимые дефекты на рентген-снимках таких лопаток не обнаружены.

Темные пятна, характерные для усадочной раковины, наблюдались на снимках как до, так и после газостатирования лопаток.

Люминесцентный контроль методом ЛЮМ1-ОВ рабочих лопаток показал, что после проведения горячего изостатического прессования

наблюдается некоторое уменьшение точечного свечения люминофора как по количеству, так и по размерам.

Ряд лопаток, полученных без модифицирования, с присадкой карбонитрида титана и модифицированных после ГИП были испытаны на изгиб. Результаты испытания лопаток на изгиб соответствуют требованиям ОСТ 1.90.126-85 и представлены в табл. 1.

Из приведенных данных видно, что модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ ультрадисперсными частицами $Ti[Ti(C,N)]$ и газостатирование способствуют получению более стабильных результатов при испытании рабочих лопаток на изгиб в сравнении с лопатками, отличными по серийной технологии.

Макрофрактографические исследования строения изломов в местах трещин, образовавшихся на лопатках в процессе испытания на изгиб, показало, что трещины на лопатках, модифицированных карбонитридами титана (рис. 1, б), а также после газостатирования, образовались по месту наличия дефектов литейного происхождения (рис. 1, в, г). Тогда как, в изломах, вскрытых по трещинам на серийных лопатках, дефекты не обнаружены (рис. 1, а).

Следует отметить, что на газостатированных лопатках трещины образовались, в основном, в местах сквозной усадочной рыхлоты.

Металлографическим исследованием микрошлифов, изготовленных в поперечном и продольном сечениях пера и хвостовика лопаток, установлено, что проведение операции горячего изостатического прессования способствует «залечиванию» микропор и рыхлот, не вы-

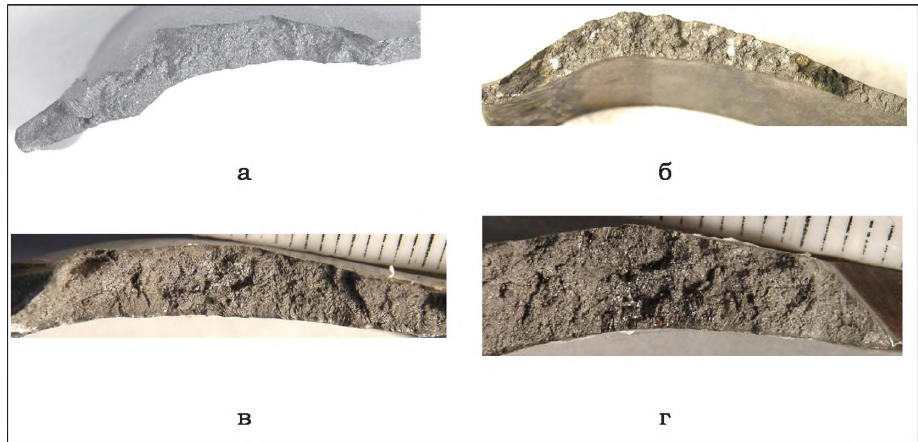


Рис. 1. Строение изломов по месту трещин на лопатках после испытания на изгиб: а – серийная технология; б – модифицирование $Ti[Ti(C,N)]$; в, г – модифицирование $Ti[Ti(C,N)]$ + ГИП

ходящих на поверхность деталей (рис. 2, в; табл. 2).

В модифицированных лопатках без ГИП размер и количество микропор в ~ 3 раза меньше, чем в серийных (рис. 2, а, б).

Модифицирующее воздействие частиц карбонитрида титана также проявляется на распределении, изменении размеров и морфологии первичных карбидов.

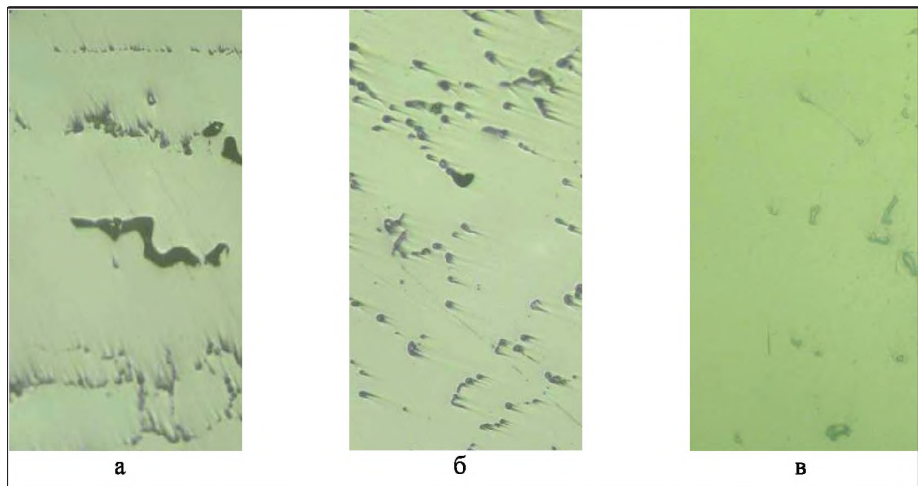


Рис. 2. Микропоры в лопатках из сплава ЖСЗДК-ВИ, $\times 200$: а – серийного; б – модифицированного $Ti[Ti(C,N)]$; в – модифицированного $Ti[Ti(C,N)]$ после ГИП

Таблица 1. Результаты испытания лопаток на изгиб

Состояние сплава ЖСЗДК-ВИ	Количество модификатора, %	Углы загиба, градус
Серийный сплав	0	35; 95
Модифицирование $Ti[Ti(C,N)]$	0,05	27; 55; 74; 85; 40; 62; 80; 55
Модифицирование $Ti[Ti(C,N)]$ + ГИП		56; 58; 52; 69; 86; 41
Нормы ОСТ 1.90.126-85	$\geq 20,0$	

Таблица 2. Размеры структурных составляющих в лопатках из сплава ЖСЗДК-ВИ

Состояние сплава	Размер глобулярных карбидов типа MeC , мкм	Размер нитридов, мкм	Размер микропор и рыхлот, мкм	Расстояние между осями дендритов 2го порядка, мкм
Исходный сплав	3...20	практически отсутствуют	15...25	50...70
Модифицирование $Ti[Ti(C,N)]$	2...10	2...6	5...50	45...60
Модифицирование $Ti[Ti(C,N)]$ + ГИП	2...10	2...6	единичные до 6	45...60

Введение в расплав УДП $Ti[Ti(C,N)]$ приводит к более равномерному распределению первичных карбидов, выделяющихся, в основном, в виде дискретных глобулярных частиц.

В материале лопаток после проведения ГИП размеры карбидов, нитридов и расстояние между осями дендритов второго порядка аналогичны размерам структурных составляющих модифицированных лопаток (табл. 2).

При этом в зонах с наличием грубых усадочных раковин, сквозной усадочной рыхлоты, а также рыхлоты, выходящей на поверхность, «залечивание» раковин и рыхлот не происходит.

В местах темных пятен, выявленных при рентгенконтроле на лопатках, обнаружены раковины усадочного происхождения размером $\sim 2,5$ мм, вокруг которых наблюдается сквозная усадочная рыхлота с размером пор от 10 до 120 мкм (рис. 3).

На рис. 4 показана микроструктура рабочих лопаток до и после проведения операции ГИП.

Микроструктура лопаток без газостатирования до термообработки представляет собой γ -твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' -фазы, карбидов,

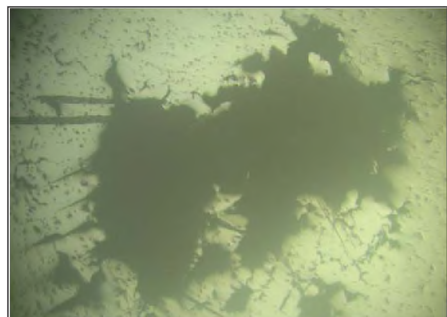


Рис. 3. Усадочная раковина в перелопатки из сплава ЖСЗДК-ВИ, модифицированного $Ti[Ti(C,N)]$ после ГИП, $\times 50$

карбонитридов и небольшого количества эвтектической фазы ($\gamma-\gamma'$), а также боридной эвтектики в виде скелетообразных частиц, располагающихся, в основном, на границах зерен и в междендритных пространствах, что соответствует литому состоянию сплава ЖСЗДК-ВИ (рис. 4, а, б). Размер карбидов типа MC, а также расстояние между осями дендритов второго порядка в перелопаток примерно в 1,5...2,5 раза меньше, чем в хвостовой части. Эвтектика типа ($\gamma-\gamma'$) в перелопаток в $\sim 3...5$ раз

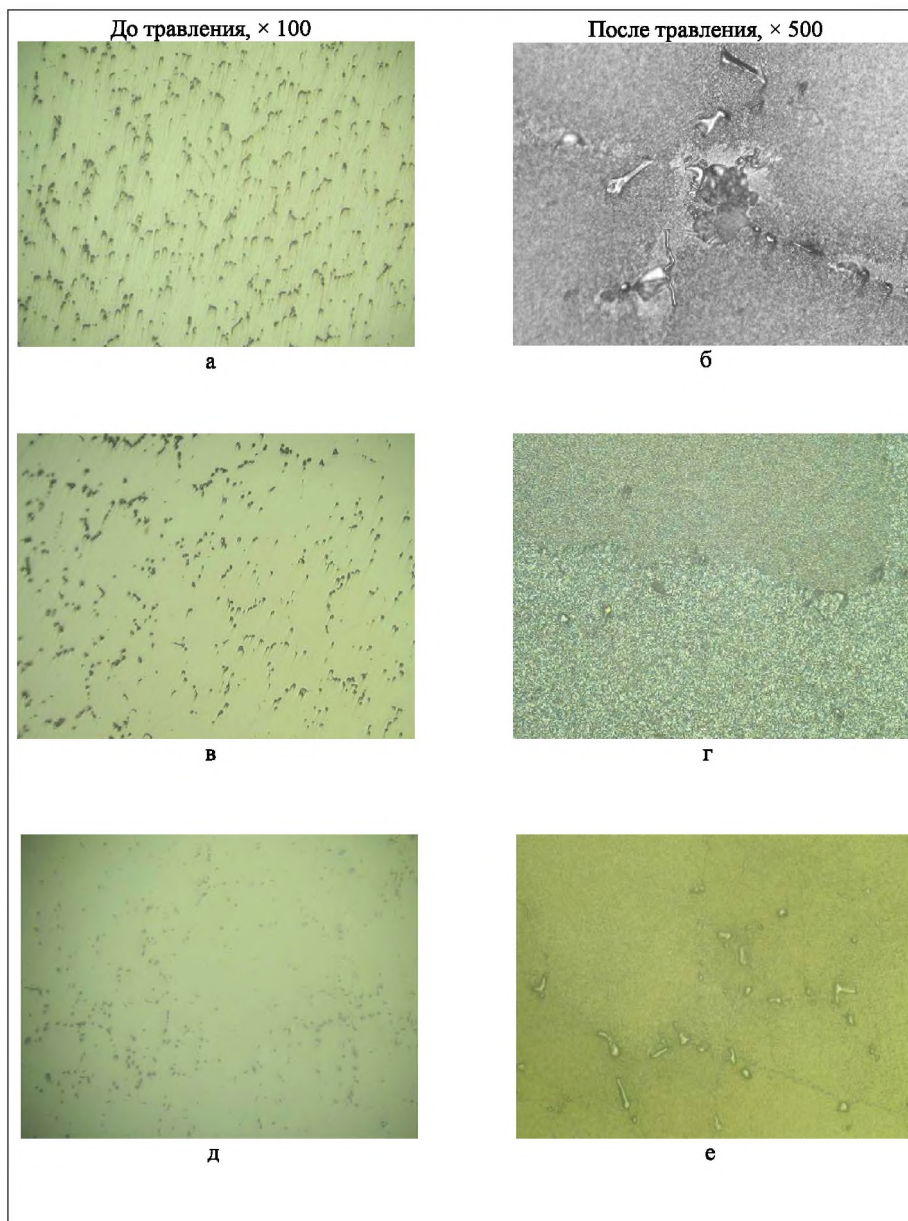


Рис. 4. Микроструктура лопаток, модифицированных $Ti[Ti(C,N)]$: а, б – без ГИП и термообработки; в, г – без ГИП после термообработки; д, е – после ГИП без термообработки

меньше, чем в хвостовике.

В процессе термообработки по стандартному режиму (гомогенизация при температуре 1210°C в течение 3,5 часов, охлаждение на воздухе) происходит растворение в γ -твердом растворе эвтектической ($\gamma-\gamma'$)-фазы и боридной эвтектики (рис. 4, в, г).

Исследование микроструктуры модифицированных лопаток, прошедших операцию ГИП (без проведения последующей стандартной термообработки) показало, что в процессе горячего изостатического прессования при температуре 1210°C и давлении 160 МПа произошло полное растворение эвтектической фазы ($\gamma-\gamma'$) в γ -матрице (рис. 4, д, е). Микроструктура материала рабочих лопаток после

ГИП удовлетворительная и соответствует шкале микроструктур, утвержденной ВИАМ. Структуры, характерные для перегретого состояния в материале рабочих лопаток, прошедших операцию ГИП, не выявлены.

При исследовании микроструктуры на травленных микрошлифах, вырезанных из рабочих лопаток, прошедших операцию ГИП, в местах полного либо частичного «залечивания» микропор, а также усадочной рыхлоты выявлены зоны кратерообразной формы с наличием концентрически расположенных вытянутых частиц упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы, характерных для «рафт»-структуры (рис. 5). Аналогичные области, характеризующие

еся образованием «рафт»-структуры, также обнаружены вокруг некоторых карбидов типа MC . Установлено, что по мере приближения к центру указанных областей, соответственно направлению результирующих напряжений, наблюдается увеличение плотности и искажение интерметаллидных частиц, размер которых находится на уровне $\sim 0,1$ мкм. Следовательно, в результате пластической деформации, инициируемой процессом горячего изостатического прессования, концентрация искажений структурных компонентов в локальном объеме материала, прилежащем к микропорам, карбидам и т.д. зонах, существенно возрастает. В зонах «залечивания» микропор наряду с мелкими интерметаллидными частицами также наблюдается скопление скоагулированных частиц γ' -фазы.

Таким образом, материал рабочих лопаток турбины, подвергнутых горячему изостатическому прессованию, характеризуется структурной неоднородностью вследствие образования «рафт»-структуры в виде зональных участков, сосредоточенных в местах «залечивания» пор, рыхлоты, а также вокруг некоторых карбидов.

В исходной микроструктуре литых лопаток (до газостатирования) образование «рафт»-структуры вблизи микропор, рыхлот, карбидов и т.д. не наблюдается.

Следует отметить, что «залечивание» микропор, располагающихся на поверхности деталей, а также в зонах наличия сквозной рыхлоты усадочного характера и выходящей на поверхность, не происходит. Это согласуется с механизмом баротермического воздействия, при котором устранение, а также уменьшение микропористости может быть достигнуто применительно только к внутренним объемам металла.

Термообработка по стандартному режиму ($1210^\circ C$, 4 часа) после газостатирования способствует практически полной перекристаллизации упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы, заключающейся в растворении в γ -матрице γ' -фазы и повторном ее выделении в виде дисперсных частиц кубической морфологии с наличием небольшого количества скоагулированной интерметаллидной γ' -фазы. В результате происходит

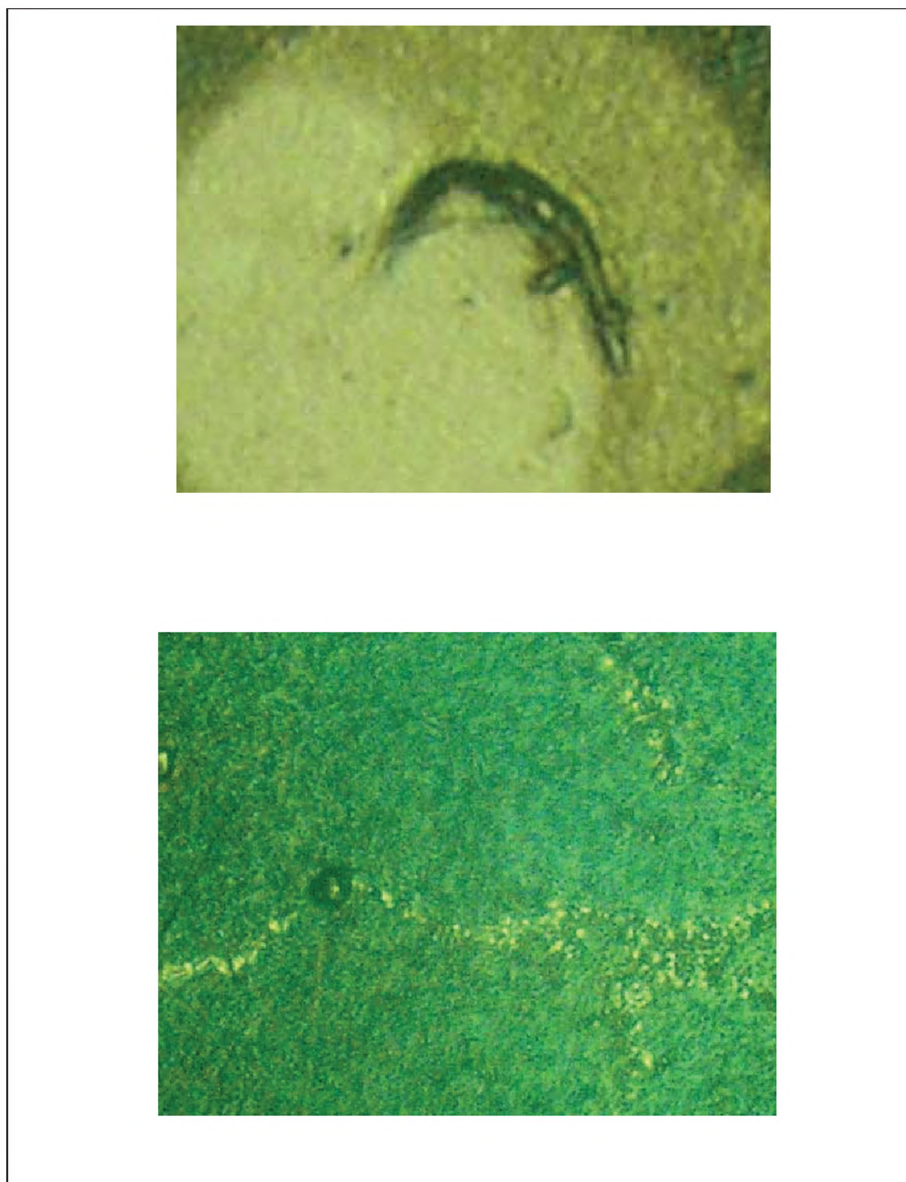


Рис. 5. Зоны «залечивания» микропор и рыхлоты в материале рабочих лопаток после модифицирования $Ti[Ti(C,N)]$ + ГИП, $\times 700$

устранение зональных участков «рафт»-структуры, образовавшейся в процессе ГИП в местах «залечивания» пор и вокруг карбидов, что приводит к повышению структурной однородности сплава.

Выводы

Модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ, прошедшего предварительную термовременную обработку, ультрадисперсными частицами $Ti[Ti(C,N)]$ приводит к некоторому измельчению дендритной структуры (уменьшаются расстояния между осями дендритов второго порядка и размер дендритной ячейки) и снижению микропористости. Последующее горячее изостатическое прессование позволяет «залечивать» литейные дефекты усадочного характера (микропоры и рыхлоты),

не выходящие на поверхность деталей, что способствует стабилизации структуры и свойств материала образцов и отливок. Стандартная термообработка (гомогенизация при $1210^\circ C$, 4 часа) отливок после газостатирования способствует повышению структурной однородности сплава и положительно влияет на его физико-механические свойства.

Список литературы:

1. Сабуров В.П. Упрочняющее модифицирование стали и сплавов / В.П. Сабуров – Литейное производство, 1988. – № 9. – С. 7 – 8.
2. Галдин Н.М. Цветное литье: справочник / Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук и др.; под общ. ред. Н.М. Галдина. – М.: Машиностроение, 1989. – 528 с.