

УДК 621.74.045: 669. 24: 621.981

Н. А. ЛЫСЕНКО¹, В. В. КЛОЧИХИН¹, В. В. НАУМИК²¹ АО «Мотор Сич»² Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПУСТОТЕЛЫХ ОТЛИВОК ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

Проведено исследование отливок турбинных охлаждаемых лопаток из никелевых жаропрочных сплавов с монокристаллической и равноосной структурой после горячего изостатического прессования (ГИП). Установлено, что ГИП обеспечивает получение более качественных отливок за счет снижения усадочной микропористости, а совместно с последующей стандартной термообработкой и улучшение однородности материала. Проведение после ГИП промежуточного высокотемпературного нагрева, соответствующего стандартному режиму термообработки, с последующим нагревом при температуре 1050°С в течение 4 часов способствует получению более однородной структуры сплавов, что оказывает положительное влияние на механические и жаропрочные свойства материала. Газостатирование отливок лопаток со стержнем способствует получению качественной поверхности внутреннего (охлаждаемого) канала.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, лопатки, газостатирование, микропористость.

Введение

Для литой структуры (как равноосной, так и монокристаллической) лопаток газотурбинных двигателей из никелевых жаропрочных сплавов характерно наличие микропористости. Одним из перспективных направлений уменьшения микропористости отливок ответственного назначения, позволяющее повысить усталостную прочность, а, следовательно, и эксплуатационную надежность, является горячее изостатическое прессование (ГИП).

В настоящей работе изучали влияние горячего изостатического прессования на структуру и свойства отливок пустотелых охлаждаемых рабочих лопаток из жаропрочных сплавов на никелевой основе – ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК).

Методика проведения исследований

Рабочие лопатки и образцы из сплава ЖС6К-ВИ получены методом равноосной кристаллизации с поликристаллической структурой, а из сплава ЖС32-ВИ – методом высокоскоростной на-

правленной кристаллизации (ВНК) и имеют монокристаллическую структуру.

Процесс горячего изостатического прессования осуществляли в атмосфере аргона при температуре 1210^{±10} °С (для сплава ЖС6К-ВИ) и 1250^{±10} °С [для сплава ЖС32-ВИ(ВНК)] с выдержкой в течение 1,5 часов и давлением 160...170 МПа.

Исследование проводили в сравнении с аналогичными лопатками без проведения операции ГИП.

В таблице 1 представлены технологические варианты обработки лопаток и образцов, отлитых из сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК).

Кроме того, следует отметить, что газостатирование лопаток осуществляли как после выщелачивания керамического стержня из внутренней полости охлаждаемого канала (вариант «1^а»), так и вместе с керамическим стержнем с последующим выщелачиванием после ГИП (вариант «1^б»).

В исследуемых образцах и лопатках определяли химический состав, механические и жаропрочные свойства, изучали микроструктуру.

Таблица 1

Технологические варианты обработки лопаток и образцов из сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК)

Вариант	Наименование	Температура при ГИП, °С		Давление при ГИП, МПа	
		ЖС6К-ВИ	ЖС32-ВИ(ВНК)	ЖС6К-ВИ	ЖС26-ВИ(ВНК)
«0»	Исходный без ГИП	-	-	-	-
«1»	После ГИП	1210 ^{±10}	1250 ^{±10}	160	170
«2»	ГИП + термообработка	-«-	-«-	-«-	-«-

Химический состав сплавов определяли методами спектрального и химического анализов.

Пористость по сечению отливок оценивали люминесцентным контролем методом ЛЮМ1-ОВ.

Исследование микроструктурного состояния производили на микрошлифах методами оптической (микроскоп «Axio Observer. Dlm») и растровой электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп «JEOL JSM T-300»).

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) рабочих лопаток в исходном литом состоянии (до ГИП, без термообработки), а также прошедших операцию ГИП (до и после термообработки), проводили на растровом электронном микроскопе «JEOL JSMA-6360LA».

Временное сопротивление разрыву определяли при комнатной температуре на установке Р-5. Длительную прочность образцов с диаметром рабочей зоны 5мм – на установке ДСТ-500 при температуре 975°С и напряжении 200 МПа (для равноосного сплава ЖС6К-ВИ) и 1000°С и 280МПа (для монокристаллического сплава ЖС32-ВИ).

Анализ полученных результатов

Химический состав рабочих лопаток и образцов из сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК) удовлетворительный и отвечает требованиям нормативной технической документации (НТД), табл. 2. Внешний осмотр показал, что отливки лопаток после ГИП отличаются более темным цветом поверхности в сравнении с лопатками до проведения ГИП и после ГИП с последующей стандартной термообработкой в вакууме.

При металлографическом исследовании на поверхности отливок лопаток после горячего изостатического прессования (*вариант «1»*) обнаружены неметаллические включения темно-серого цвета, характерные для окислов, проникающих на глубину ~ 10 мкм.

На поверхности лопаток до проведения операции ГИП (*вариант «0»*), а также после ГИП + термообработка по стандартному режиму (*вариант*

«2») окисление практически отсутствует. Отсутствие окисления на поверхности деталей, обработанных по 2-му варианту, обусловлено обдувкой микропорошком наружной поверхности при подготовке лопаток к термообработке, а также вакуумной очисткой поверхности в процессе высокотемпературной обработки в вакууме после проведения операции ГИП.

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) рабочих лопаток в исходном литом состоянии (до ГИП, без термообработки), а также прошедших операцию ГИП (без последующей термообработки), показал, что на поверхности деталей после ГИП наблюдается повышение содержания кислорода, алюминия, титана и углерода примерно в 3 раза по сравнению с концентрацией данных элементов на поверхности исходных лопаток (до проведения ГИП) (рис. 1). Повышение указанных элементов на поверхности лопаток, прошедших ГИП, свидетельствует об окислении вследствие использования в процессе ГИП недостаточно чистого аргона.

Кроме того, следует отметить, что одновременное приложение высоких температур (1210°-1250°С) и давлений (160-170МПа) в процессе изостатического прессования приводит к интенсивному диффузионному массопереносу атомов алюминия и титана от центра к поверхности с образованием на поверхности сплава слоёв, обогащенных этими элементами. Это также согласуется с литературными данными по диффузии алюминия и титана в никеле [1].

Исследовали состояние поверхности внутренних (охлаждаемых) каналов рабочих лопаток, отлитых из сплава ЖС32-ВИ(ВНК), прошедших газостатирование после выщелачивания керамического стержня из внутренней полости охлаждаемого канала, а также газостатированных вместе с керамическим стержнем (до выщелачивания).

На внутренней поверхности лопаток, газостатированных с открытым охлаждаемым каналом (после выщелачивания керамического стержня), обнаружено окисление до темно-серого цвета.

Таблица 2

Химический состав рабочих лопаток из сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК)

Марка сплава	Содержание элементов, %											
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Nb	Ta	Re	Fe	Si
ЖС6К-ВИ	0,14	10,60	4,46	4,80	5,94	2,70	4,02	-	-	-	< 0,5	< 0,25
Нормы НТД	0,13-0,20	9,5-12,0	4,0-5,5	4,5-5,5	5,0-6,0	2,5-3,2	3,5-4,5	-	-	-	≤ 2,0	≤ 0,4
ЖС32-ВИ (ВНК)	0,15	4,85	9,43	8,68	5,85	-	1,17	1,55	4,10	3,80	< 0,5	< 0,2
Нормы НТД	0,12-0,17	4,5-5,5	9,0-9,5	8,1-8,9	5,7-6,2	-	0,9-1,3	1,4-1,8	3,7-4,3	3,6-4,3	≤ 0,5	≤ 0,3

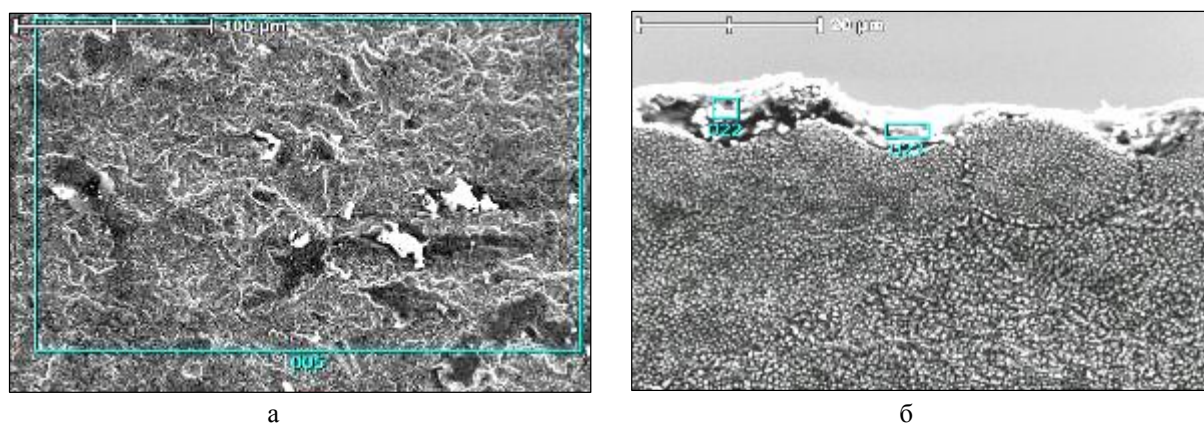
После газостатирования лопаток вместе с керамическим стержнем и последующего выщелачивания в автоклаве согласно технологическому процессу (с очисткой каналов методом ГАО) поверхность охлаждаемого канала светлая, без наличия окисления.

Следует отметить, что на внутренней поверхности (охлаждаемых) каналов рабочих лопаток, газостатированных после выщелачивания стержня, имеются микропоры (рис. 2 а). Тогда как, при газостатировании лопаток со стержнем происходит «залечивание» пор, находящихся на поверхности охлаждаемого канала (рис. 2 б).

Люминесцентный контроль методом ЛЮМ1-ОВ в осевом сечении хвостовика и поперечном сечении

пера поступивших на исследование лопаток показал, что на лопатках до проведения ГИП выявлено свечение в виде множественных мелких ярко светящихся точек (рис. 3 а). В аналогичных сечениях лопаток после проведения операции ГИП свечения люминофора не обнаружены (рис. 3 б, в).

При осмотре нетравленных микрошлифов, изготовленных в осевом сечении хвостовика и поперечном сечении пера лопаток без ГИП (*вариант «0»*), обнаружены единичные микропоры размером до 110 мкм (рис. 4 а). Карбиды MeC выделяются как в виде дискретных глобулярных частиц, так и пластин типа «китайских иероглифов», располагающихся преимущественно в междендритных пространствах и по границам зерен.



Марка сплава	№ точки	C	O	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W	Fe	Ca
ЖС32-ВИ(ВНК)	005	21,1	19,59	31,65	-	3,52	0,86	8,46	1,60	2,56	1,99	1,01
ЖС6К-ВИ	022	11,8	18,13	27,99	8,69	6,94	3,09	9,12	3,54	4,21	1,76	1,38
	023	29,7	18,2	19,5	11,9	1,45	0,1	5,85	2,29	3,47	2,62	2,96

Рис. 1. Результаты РСМА поверхности рабочих лопаток из сплавов ЖС32-ВИ(ВНК) (а) и ЖС6К-ВИ (б) после проведения операции ГИП (а – х430; б – х2000)

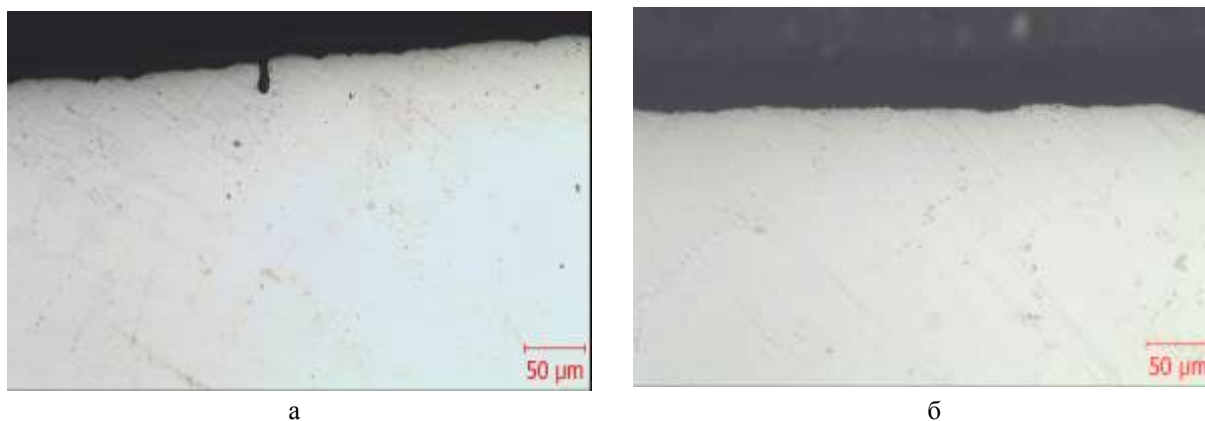


Рис. 2. Состояние внутренней поверхности (охлаждаемых) каналов рабочих лопаток после ГИП, х200: а – ГИП с открытым охлаждаемым каналом (после выщелачивания керамического стержня – *вариант «1^а»*); б – ГИП вместе с керамическим стержнем – *вариант «2^а»*

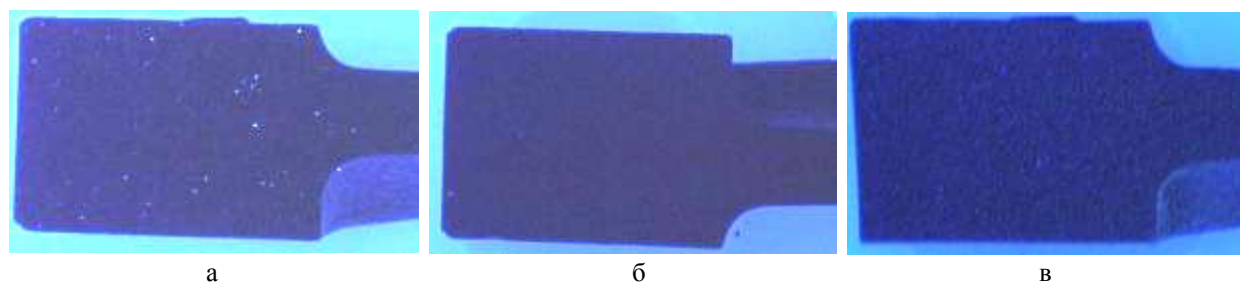


Рис. 3. Внешний вид отливок лопаток в осевом сечении хвостовой части под источником ультрафиолетового света: а – вариант «0» - до проведения операции ГИП; б – вариант «1» - после проведения операции ГИП; в – вариант «2» - после проведения операции ГИП + стандартная термообработка

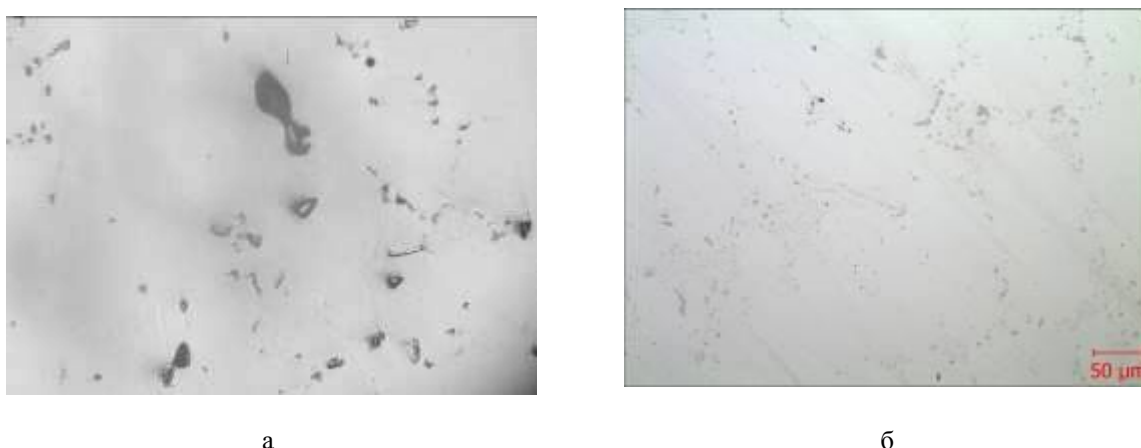


Рис. 4. Микропористость в материале рабочих лопаток, $\times 200$: а – до проведения операции ГИП; б – после проведения операции ГИП – вариант «1»

Проведение операции горячего изостатического прессования (варианты «1» и «2»), способствует «залечиванию» пор. В структуре поступивших на исследование лопаток после ГИП микропоры во внутренних объемах металла практически отсутствуют (рис. 4 б).

Металлографическим исследованием установлено, что основными структурными составляющими исследуемых лопаток до газостатирования из сплава ЖС6К-ВИ с равноосной структурой, а также из сплава ЖС32-ВИ(ВНК) с монокристаллической структурой являются: γ -твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' -фазы, карбидов, карбонитридов и эвтектической фазы (γ - γ'). Размер структурных составляющих, а также расстояние между осями дендритов в пере исследуемых лопаток примерно в 2 раза меньше, чем в хвостовой части.

В структуре материала лопаток после горячего изостатического прессования наблюдается частичное растворение и перекристаллизация эвтектической фазы (γ - γ'), перегрева нет.

При микроструктурном исследовании методами оптической и растровой электронной микроскопии на травленых микрошлифах, вырезанных из рабочих лопаток, прошедших операцию ГИП (вари-

ант «1»), в местах полного либо частичного «залечивания» микропор выявлены зоны кратерообразной формы в виде концентрически расположенных вытянутых частиц упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы, характерные для «рафт»-структуры (рис. 5 а). Данные зоны по месту «залечивания» пор в исследуемых сплавах располагаются в междендритных пространствах, а в ЖС6К-ВИ и на границах зерен. Аналогичные области, характеризующиеся образованием «рафт»-структуры, также обнаружены вокруг некоторых карбидов типа МС (рис. 5 б). Установлено, что по мере приближения к центру указанных областей, соответственно направлению результирующих напряжений, наблюдается увеличение плотности и искажения интерметаллидных частиц, размер которых находится на уровне 0,22...0,33 мкм. Следовательно, в результате пластической деформации, инициируемой процессом горячего изостатического прессования, концентрация искажений структурных компонентов в локальном объеме материала, в прилежащих к микропорам, карбидам и т.д. зонах, существенно возрастает. Средний размер микрочастиц γ' -фазы в удаленных зонах составляет 0,5...0,8 мкм.

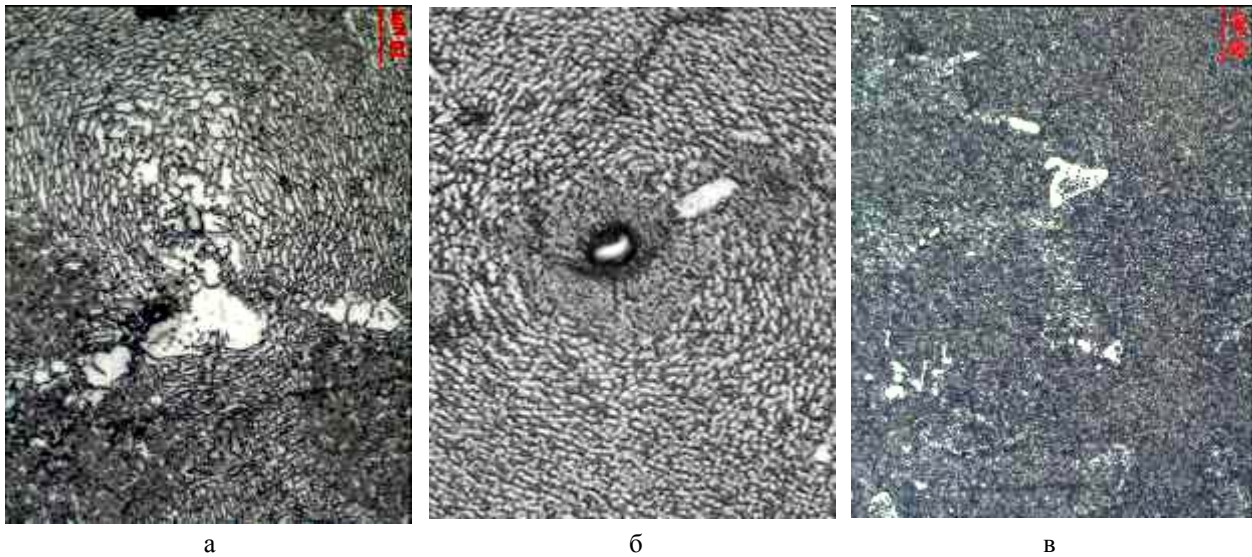


Рис. 5. «Рафт»-структура в рабочих лопатках после операции ГИП в зонах «залечивания» микропор (а, б – $\times 1000$) и микроструктура после ГИП+ стандартная термообработка (б – $\times 500$)

В зонах «залечивания» микропор в материале монокристаллических лопаток наряду с мелкими интерметаллидными частицами также наблюдается скопление скоагулированных вытянутых частиц γ' -фазы размером 1,1...2,2 мкм.

Размер выявленных после ГИП единичных микропор составляет $\sim 0,25 \dots 6,0$ мкм, что примерно в 20 раз меньше по сравнению с порами, обнаруженными в лопатках до проведения операции ГИП.

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, а также вокруг некоторых карбидов.

Также было замечено, что в процессе пластической деформации при газостатировании значительное количество пластинчатых карбидов, располагающихся в междендритных пространствах, приобрели дугообразную форму с ориентацией в направлении образования концентрических окружностей.

При этом следует отметить, что «залечивание» микропор, располагающихся на поверхности деталей, не происходит. Это согласуется с механизмом баротермического воздействия, при котором устранение, а также уменьшение микропористости может быть достигнуто применительно только к внутренним объемам металла.

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

Термообработка по стандартному режиму после газостатирования (вариант «2») способствует практически полной перекристаллизации упроч-

няющей интерметаллидной γ' -фазы, заключающейся в растворении в γ -матрице фазы γ' и повторном ее выделении в виде дисперсных частиц кубической морфологии с наличием небольшого количества скоагулированной интерметаллидной γ' -фазы, выделившейся в междендритных пространствах. В результате указанных структурных изменений происходит устранение зональных участков «рафт»-структуры, образовавшейся в процессе ГИП в местах «залечивания» пор и вокруг карбидов, что приводит к повышению структурной однородности сплава (рис. б в). При этом также наблюдается некоторое растворение эвтектики (γ - γ') и утонение пластин эвтектических карбидов.

При исследовании состояния упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы в осях и межосных пространствах дендритов пера и хвостовика рабочих лопаток (варианты «0», «1» и «2») установлено, что в исходном материале лопаток (до проведения ГИП) частицы γ' -фазы имеют кубическую морфологию и образуют блоки, состоящие из четырех частиц (рис. б а). Размер γ' -частиц, измеренный по стороне эквивалентного по площади квадрата, в осях дендритов составляет $0,25 \dots 0,50$ мкм (табл. 3). В межосных пространствах дендритов наряду с частицами γ' размером $0,3 \dots 1,0$ мкм имеется значительное количество скоагулированной фазы до 2,5 мкм. Следует отметить, что существенных различий в морфологии и величине интерметаллидной фазы, выделившейся в хвостовой части лопатки по сравнению с ее пером, не наблюдается.

В структуре лопаток после газостатирования (вариант «1») наблюдается измельчение интерметаллидной фазы γ' (рис. б б). В материале лопаток после изостатического прессования обнаружено вы-

Таблица 3

Размеры частиц γ' -фазы в материале рабочих лопаток из сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК), изготовленных в соответствии с вариантами «0», «1» и «2»

Марка сплава	Зона замера	Размер частиц γ' -фазы, мкм		
		вариант «0» (до ГИП)	вариант «1» (после ГИП)	вариант «2» (после ГИП + т/о)
ЖС6К-ВИ	оси	0,27...0,50	0,25...0,35 (микрочастицы – 0,14...0,20 мкм)	0,20...0,38
	межоси	0,30...0,67 (скоагулированные частицы – до 1,6 мкм)	0,27...0,60 (микрочастицы – 0,15...0,20 мкм)	0,20...0,40 (скоагулированные частицы ~ 1,1 мкм)
ЖС32-ВИ(ВНК)	оси	0,25...0,42	0,18...0,33 (микрочастицы – 0,14...0,17 мкм)	0,15...0,33
	межоси	0,58...1,00 (скоагулированные частицы – до 2,5 мкм)	0,48...0,63 (микрочастицы – 0,15...0,17 мкм; скоагулированные частицы – 1,42...2,5 мкм)	0,20...0,33 (скоагулированные частицы – 0,52...0,75 мкм)

деление небольшого количества микрочастиц γ' -фазы размером ~ 0,16 мкм, а в лопатках с монокристаллической структурой из сплава ЖС32-ВИ(ВНК) также имеются зональные междендритные выделения скоагулированных интерметаллидных частиц, размер которых достигает 2,5 мкм.

Кроме того, при высоком давлении преимущественно в межосных пространствах дендритов формируются γ' -частицы с неравновесной морфологией, заметно отличающейся от кубической, с наличием 60-градусных углов по их сечениям, а также в виде зональных участков «рафт»-структуры в местах «залечивания» пор и вокруг некоторых карбидов типа МС. Разница между размерами частиц γ' в осях и межосных пространствах дендритов уменьшается по сравнению с состоянием γ' -фазы в указанных зонах исходного литого сплава.

В процессе гомогенизации, проведенной после операции газостатирования (вариант «2»), происходит выравнивание размеров частиц интерметаллидной фазы γ' в осях и межосных пространствах дендритов (рис. 6 в). Количество сохранившихся скоагулированных частиц γ' -фазы размером 0,52...1,1 мкм незначительно (см. табл. 3).

Кроме того, в материале газостатированных лопаток (как до, так и после термообработки по стандартному режиму) происходит утонение пластинчатых (эвтектических) карбидов. При этом толщина карбидных пластин составляет:

- до ГИП – 0,30...0,50 мкм;
- после ГИП – 0,125...0,18 мкм;
- после ГИП + т/о – 0,08...0,125 мкм.

Механические и жаропрочные свойства определяли на образцах из сплавов ЖС6К-ВИ и

ЖС32-ВИ(ВНК), изготовленных в соответствии с вариантами «0», «1» и «2», как до, так и после термообработки по стандартному режиму:

А – для сплава ЖС6К-ВИ

- гомогенизация в вакууме при температуре 1210^{±15} °С в течение 4 часов;

В – для сплава ЖС32-ВИ(ВНК)

- гомогенизация в вакууме при температуре 1270^{±10}°С в течение 1 ч 15 мин.

Образцы из сплава ЖС6К-ВИ отливали методом равноосной кристаллизации, а из сплава ЖС32-ВИ(ВНК) – высокоскоростной направленной кристаллизации.

Максимальные значения отклонения направления [001] от оси Z при определении кристаллографической ориентацию (КГО) на монокристаллических образцах не превышали 5,7 угл.град., при норме по ТУ – не более 20 угл.град.

Результаты механических испытаний и испытаний на длительную прочность приведены в таблице 4.

Из данных, представленных в таблице 4, видно, что механические и жаропрочные свойства исследуемых образцов после различных вариантов (варианты «0», «1» и «2»), удовлетворительные и отвечают требованиям НТД.

Термическая обработка по стандартному режиму после газостатирования (вариант «2») способствует повышению пластичности сплава, при некотором снижении прочностных характеристик (в пределах требований НТД), что обусловлено повышением структурной однородности сплава и релаксацией напряжений, наведенных в процессе горячего изостатического прессования.

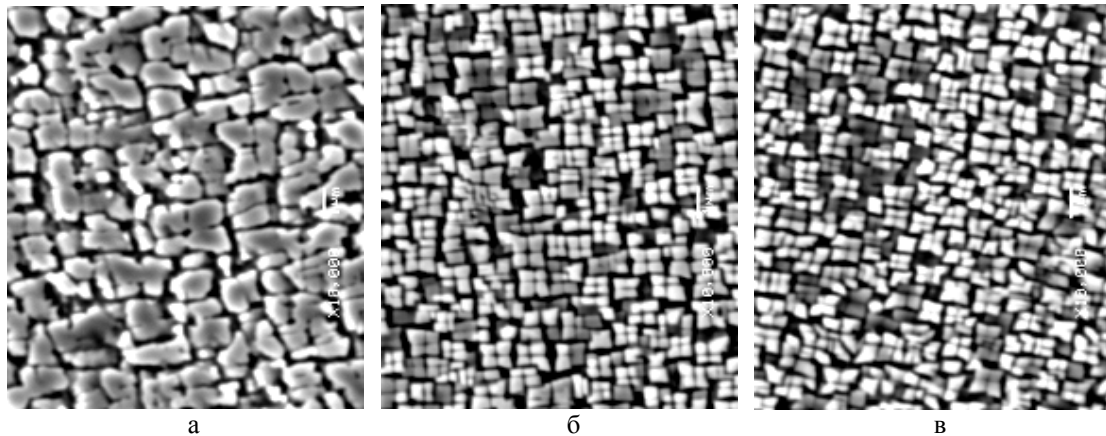


Рис. 6. Интерметаллидная γ -фаза в осях дендритов отливках лопаток из сплава ЖС32-ВИ(ВНК), $\times 10000$: а – до проведения операции ГИП – вариант «0»; б – после проведения операции ГИП – вариант «1»; в – после ГИП+стандартная термообработка – вариант «2»

Таблица 4

Механические и жаропрочные свойства сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК) до и после операции горячего изостатического прессования (варианты «0», «1» и «2»)

Состояние материала	Марка сплава	Механические свойства при $t=20^{\circ}\text{C}$			Длительная прочность		
		$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	$T_{\text{исп.}}, ^{\circ}\text{C}$	$\sigma, \text{МПа}$	$\tau_{\text{р}}, \text{ч}$
исходное (без ГИП) до термообработки	ЖС6К-ВИ	975,0	4,4	4,5	975	200	90 ⁰⁰
	ЖС32-ВИ(ВНК)	1192,0 1125,0	7,6 8,4	10,9 11,3	1000	280	52 ⁰⁰ 53 ³⁰
исходное (без ГИП) после термообработки	ЖС6К-ВИ	1043,0 1046,0	4,8 4,0	6,3 6,7	975	200	79 ⁰⁰ 119 ⁰⁰
	ЖС32-ВИ(ВНК)	1156,0 1126,0	6,0 4,4	8,2 8,2	1000	280	86 ³⁰ 61 ³⁰
после ГИП	ЖС6К-ВИ	1005,0 1000,0	4,4 5,6	8,6 8,6	975	200	76 ⁰⁰ 90 ³⁰
	ЖС32-ВИ(ВНК)	999,0 1043,0	9,6 8,8	15,8 15,0	1000	280	55 ⁰⁰ 57 ³⁰
после ГИП и термообработки	ЖС6К-ВИ	979,0 974,0	8,4 9,2	15,6 12,2	975	200	71 ³⁰ 63 ⁰⁰
	ЖС32-ВИ(ВНК)	1248,0 1103,0	8,0 14,8	11,7 14,6	1000	280	102 ³⁵ 91 ⁰⁵
Нормы НТД	ЖС6К-ВИ	-	-	-	975	200	$\geq 50,0$
	ЖС32-ВИ(ВНК)	$\geq 900,0$	$\geq 6,0$	-	1000	280	$\geq 40,0$

В процессе стандартной термической обработки происходит уменьшение дендритной ликвации сплава, а также частичное растворение эвтектических фаз и утонение карбидных пластин, что оказывает положительное влияние на пластические характеристики исследуемых сплавов.

В связи с тем, что рабочие лопатки турбины в процессе изготовления подвергаются диффузионному отжигу было исследовано влияние термической обработки при температуре 1050°C в течение 4 часов на физико-механические свойства и структуру сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК), из которых были отлиты исследуемые лопатки турбины. Диффузионный отжиг осуществляли непосред-

ственно после операции ГИП, а также после ГИП и стандартной термообработки.

Анализ результатов, полученных при испытании образцов после проведения диффузионного отжига по указанным режимам показал, что после термообработки при температуре 1050°C в течение 4 часов непосредственно после газостатирования значения механических и жаропрочных свойств нестабильны с заметной тенденцией их к снижению. При этом пластические характеристики (δ и Ψ) снижаются более чем в 2 раза, а снижение длительной прочности не превышает 15%.

Проведение термообработки по режимам: [ГИП+ 1270°C (1 ч 15 мин) + 1050°C (4 ч)] и

[ГИП+1210°C (4 ч)+1050°C (4 ч)] для сплавов ЖС32-ВИ(ВНК) и ЖС6К-ВИ, соответственно, способствует получению более стабильных результатов механических и жаропрочных свойств, значения которых превышают требования НТД. Установлено, что снижение свойств после четырёхчасового нагрева при 1050°C, проведенного непосредственно после газостатирования [ГИП+1050°C (4 ч)], вероятно, обусловлено структурной неоднородностью, вследствие ликвации сплава, а также наличием областей, характерных для «рафт»-структуры, образовавшейся в процессе ГИП в местах «залечивания» пор и вокруг некоторых карбидов.

Кроме того, в сплаве ЖС6К-ВИ, полученном методом равноосной кристаллизации, наблюдается огрубление структуры вследствие выделения по границам зерен скоагулированных частиц интерметаллидной γ -фазы, имеющих вид сплошных «оторочек», что, по-видимому, также послужило причиной снижения физико-механических характеристик.

Для материала образцов, обработанных по режиму, предусматривающему проведение после газостатирования промежуточного высокотемпературного нагрева при температуре 1270°C (1 ч 15 мин, с последующим нагревом при температуре 1050°C (4 ч), характерна более однородная структура, обусловленная перекристаллизацией упрочняющей интерметаллидной γ -фазы, вследствие чего происходит выравнивание размеров γ -фазы между осями и межосевыми пространствами дендритов, а также практически полное устранение зональных участков «рафт»-структуры, образовавшейся в процессе ГИП в местах «залечивания» пор и вокруг карбидов.

В материале образцов из сплава ЖС6К-ВИ с промежуточным высокотемпературным нагревом [ГИП+1210°C (4 ч)+1050°C (4 ч)] выделения скоагулированных частиц γ -фазы на границах зерен разрознены и не образуют замкнутых областей, что в меньшей степени влияет на снижение свойств материала.

Выводы

1. Качество материала равноосных и монокристаллических рабочих лопаток (а также образцов), отлитых из жаропрочных никелевых сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК), как до, так и после проведения процесса горячего изостатического прессования (ГИП) (варианты «0», «1» и «2») соответствует требованиям технической документации.

2. Горячее изостатическое прессование (ГИП) способствует повышению качества отливок рабочих лопаток турбины из сплавов ЖС26-ВИ и

ЖС32-ВИ(ВНК) за счет уменьшения микропористости вследствие «залечивания» пор.

3. При газостатировании лопаток со стержнем происходит «залечивание» пор, находящихся на поверхности внутреннего (охлаждаемого) канала. Установлено, что «залечивание» микропор, располагающихся на открытых поверхностях деталей, не происходит. Это согласуется с механизмом баротермического воздействия, при котором устранение, а также уменьшение микропористости может быть достигнуто применительно только к внутренним объемам металла.

4. Для материала рабочих лопаток турбины и образцов из сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС32-ВИ(ВНК), пошедших газостатирование, характерна структурная неоднородность вследствие образования «рафт»-структуры в виде зональных участков, сосредоточенных в местах «залечивания» пор, а также вокруг некоторых карбидов.

5. Термообработка по стандартному режиму после газостатирования способствует повышению структурной однородности сплава и релаксации напряжений, наведенных в процессе ГИП, что оказывает положительное влияние на физико-механические свойства.

6. Четырёхчасовая термообработка при температуре 1050°C непосредственно после проведения операции горячего изостатического прессования не устраняет структурную неоднородность, характеризующуюся наличием ликвационных зон, а также областей, характерных для «рафт»-структуры, образовавшихся в процессе газостатирования.

7. Проведение после газостатирования промежуточного высокотемпературного нагрева, соответствующего стандартному режиму термообработки, с последующим нагревом при температуре 1050°C в течение 4 часов способствует получению более однородной структуры сплавов, что оказывает положительное влияние на механические и жаропрочные свойства материала.

Литература

1. Падалко, А. Г. Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов [Текст] / А. Г. Падалко. – М. : ИЦК «Академкнига», 2007. – С. 194 – 230.

Поступила в редакцию 9.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Машины и технология литейного производства» В. В. Лунёв, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

**СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ПУСТОТЛИХ ВІДЛИВОК
ЛОПАТОК ТУРБИНИ ІЗ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО
ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ**

Н. О. Лисенко, В. В. Клочихін, В. В. Наумик

Проведено дослідження відливок турбінних охолоджувальних лопаток із нікелевих жароміцних сплавів з монокристалічною та рівновісною структурою після гарячого ізостатичного пресування (ГІП). Встановлено, що ГІП забезпечує одержання більш якісних відливок за рахунок зниження усадочної мікропористості, а разом з послідуною стандартною термообробкою і покращення однорідності матеріалу. Проведення після ГІП проміжного високотемпературного нагріву, що відповідає стандартному режиму термообробки, з наступним нагрівом при температурі 1050°C впродовж 4 годин сприяє отриманню більш однорідної структури сплавів, що чинить позитивний вплив на механічні та жароміцні властивості матеріалу. Газостатування відливок лопаток із стрижнем сприяє одержанню якісної поверхні внутрішнього (охолоджувального) каналу.

Ключові слова: жароміцні сплави, лопатки, газостатування, мікропористість.

**THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HOLLOW CASTINGS OF NICKEL
ALLOY TURBINE BLADES AFTER HOT ISOSTATIC PRESSING**

N. A. Lysenko, V. V. Klochihin, V. V. Naumyk

The investigation of castings of cooled turbine blades is reported. The turbine blades were made under hot isostatic pressing (HIP) from heat-resistant nickel alloys with monocrystalline equilibrium structure. It was found that the HIP provides the manufacture of higher quality castings due to reduction of contraction microporosity. Additional improvement of the material homogeneity is achieved by posterior standard heat treatment process. An intermediate high temperature heating of as – HIP samples corresponding to the standard heat treatment followed by a soaking at of a more homogenous structure of the alloys, which has a beneficial effect both on the room temperature mechanical properties and high temperature strength of the material. Gas-static treatment of the blade castings with rod yields the high-quality surface of the internal (cooled) channel.

Key words: heat-resistant alloys, turbine blades, gas-static treatment, microporosity.

Лысенко Наталия Алексеевна – ведущий инженер управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Клочихин Владимир Валерьевич – начальник управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Наумик Валерий Владиленович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Машины и технология литейного производства», учёный секретарь Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: naumik@zntu.edu.ua.