

УДК 621.74.045:669.24:21.981

Канд. техн. наук П. Д. Жеманюк¹, В. В. Клочихин¹, Н. А. Лысенко¹,
д-р техн. наук В. В. Наумик²

¹ АО «Мотор Сич», ² Запорожский национальный технический университет; г. Запорожье

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИТЫХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС26-ВИ ПОСЛЕ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

В результате горячего изостатического прессования (ГИП) литых лопаток авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВИ происходит «залечивание» микропор и рыхлот, не выходящих на поверхность деталей, что способствует стабилизации структуры и свойств материала. Обработка ГИП и последующая гомогенизация обеспечивают получение наиболее благоприятной структуры, сочетание прочностных, пластических характеристик и длительной прочности.

Ключевые слова: лопатка, горячее изостатическое прессование, микропоры, усадочные рыхлоты, «рафт»-структура, термообработка, структурная однородность, пластичность, прочность, жаропрочность.

Литые лопатки являются наиболее ответственными деталями газотурбинных двигателей (ГТД) и служат для превращения кинематической энергии горячих газов в тяговую мощность рабочего вала и силовых устройств [1]. Лопатки ГТД работают в жестких условиях одновременного воздействия центробежной силы собственной массы и поперечных аэродинамических сил, создаваемых потоком газа в турбине, в агрессивной среде при высоких температурах, достигающих $0,80,9 T_{nl}$ [1].

Для современных ГТД лучшим материалом, как для неохлаждаемых, так и охлаждаемых воздухом лопаток являются высокопрочные литейные никелевые сплавы, в состав которых кроме основы никеля могут входить хром (5,515%), кобальт (4,615%), титан (0,94,2%), вольфрам (2,018,6%), тантал (2,812,1%) [2]. Одним из широко распространенных таких сплавов является ЖС26-ВИ.

Одним из распространенных дефектов литых лопаток, характеризующихся очень сложной геометрией, является наличие внутренних дефектов усадочного характера [3]. Для устранения последних может применяться горячее изостатическое прессование (ГИП) [4–8], сущность которого состоит в одновременном воздействии на отливки высоких температур и всестороннего сжатия в среде специальных жидкостей или газов.

Провели исследования качества материала рабочих лопаток из жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВИ, изготовленных методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК) по следующим вариантам:

1 – после горячего изостатического прессования (ГИП), при этом:

1-а – ГИП лопаток осуществляли после выщелачивания керамического стержня из внутренней полости охлаждаемого канала;

1-б – ГИП лопаток проводили вместе с керамическим стержнем (до выщелачивания) с последующим выщелачиванием после газостатирования;

2 – после горячего изостатического прессования (ГИП) и термической обработки по стандартному режиму (гомогенизация при температуре 1210 ± 10 °С в течение 4 часов в вакууме), при этом:

2-а – ГИП лопаток осуществляли после выщелачивания керамического стержня из внутренней полости охлаждаемого канала;

2-б – ГИП лопаток проводили вместе с керамическим стержнем (до выщелачивания) с последующим выщелачиванием после газостатирования.

Исследования проводили в сравнении с аналогичными лопатками без проведения операции ГИП (вариант 0).

Процесс горячего изостатического прессования проводили по следующему режиму. При начальном давлении в СВД 51 МПа лопатки нагревали от комнатной температуры до 1040 ± 10 °С со скоростью 9 °С/мин и выдерживали 1 час. Далее давление поднимали до 120 МПа, нагревали лопатки до температуры 1250 ± 10 °С со скоростью 5 °С/мин и выдерживали их в течении 1,5 часов. После давление в СВД поднимали до 170 МПа и охлаждали отливки до температуры 800 °С со скоростью 30 °С/мин.

Визуальный осмотр показал, что поверхность лопаток после проведения операции ГИП (вариант 1-а) имеет темно-серый цвет. Поверхность остальных лопаток – светло-серого матового цвета.

Анализ химического состава материала исследованных лопаток показал, что содержание элементов в них находится на одном уровне и отвечает требованиям ТУ1-92-177-91 (табл. 1).

При осмотре внешнего состояния внутренней полости после вскрытия охлаждаемых каналов на внутренней поверхности лопаток прошедших операцию ГИП после выщелачивания керамического стержня с открытым охлаждаемым каналом (вариант 1-а) обнаружено окисление до серого цвета. После ГИП лопаток вместе с керамическим стержнем по варианту 1-б и последующего выщелачивания в автоклаве согласно технологическому процессу поверхность охлаждаемого канала имеет серый матовый цвет, окисление не обнаружено.

Внутренняя поверхность охлаждаемых каналов рабочих лопаток, прошедших термообработку по стандартному режиму при температуре 1265 °С в вакууме (варианты 2-а и 2-б), также светлая, блестящая, без следов окисления.

При металлографическом исследовании на наружной поверхности лопаток после горячего изостатического прессования по варианту 1-а обнаружены неметаллические включения темно-серого цвета, характерные для окислов, проникающие на глубину до 7 мкм. На внутренней поверхности (охлаждаемых) каналов также выявлены окислы глубиной, не превышающей 2 мкм.

Отсутствие окисленного слоя на наружной поверхности лопаток после ГИП по варианту 1-б обусловлено тем, что после газостатирования в процессе выщелачивания керамических стержней в автоклаве в растворе щелочей окисленный слой с наружной поверхности был удален. Кроме того, при подготовке лопаток к термообработке, осуществлялась обдувка наружной поверхности микропорошком, а в процессе высокотемпературной обработки в вакууме после проведения опе-

рации ГИП – наблюдалась вакуумная очистка как наружной, так и внутренней поверхностей лопаток.

При этом, на внутренней поверхности (охлаждаемых) каналов рабочих лопаток без газостатирования (вариант 0), наличие окислов, а также измененного слоя от взаимодействия стержня с материалом лопатки не обнаружено (рис. 1).

На внутренней поверхности (охлаждаемых) каналов рабочих лопаток, прошедших ГИП после выщелачивания стержня (варианты 1-а и 2-а), имеются микропоры (рис. 2). Тогда как, при газостатировании лопаток со стержнем (варианты 1-б и 2-б) происходит «залечивание» пор, находящихся на поверхности охлаждаемого канала (рис. 2).

Таким образом, «залечивание» микропор, располагающихся на открытых поверхностях деталей (как наружных, так и внутренних), не происходит. Это согласуется с механизмом баротермического воздействия, при котором устранение, а также уменьшение микропористости происходит только во внутренних объемах металла.

Люминесцентный контроль методом ЛЮМ1-ОВ в осевом сечении хвостовика и поперечном сечении пера исследованных лопаток показал, что на лопатках до проведения ГИП выявлено точечное свечение в виде множественных мелких ярко светящихся точек (рис. 3). В аналогичных сечениях лопаток после проведения операции ГИП свечения люминофора практически отсутствуют (рис. 3).

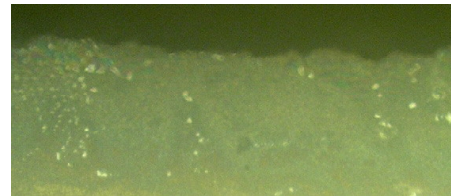


Рис. 1. Микроструктура внутренней поверхности (охлаждаемых) каналов рабочих лопаток до проведения операции ГИП (вариант 0), × 250

Таблица 1 – Химический состав рабочих лопаток из сплава ЖС26-ВИ (ВНК)

Вариант	Содержание элементов, %										
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Nb	Si	V
0	0,15	4,60	9,05	11,77	6,00	0,89	0,98	<0,5	1,53	<0,2	0,98
1-а	0,14	4,80	9,03	11,73	5,93	0,93	0,98	<0,5	1,50	<0,2	0,95
1-б	0,14	4,70	9,01	11,68	5,95	0,95	0,96	<0,5	1,57	<0,2	0,93
2-а	0,14	4,70	9,09	11,67	6,09	0,92	0,95	<0,5	1,56	<0,2	1,00
2-б	0,14	4,90	9,09	11,78	5,83	0,97	0,90	<0,5	1,51	<0,2	0,92
ТУ1-92-177-91	0,12-0,18	4,3-5,6	8,0-10,0	10,9-12,5	5,5-6,2	0,8-1,2	0,8-1,4	≤1,0	1,4-1,8	≤0,3	0,8-1,2

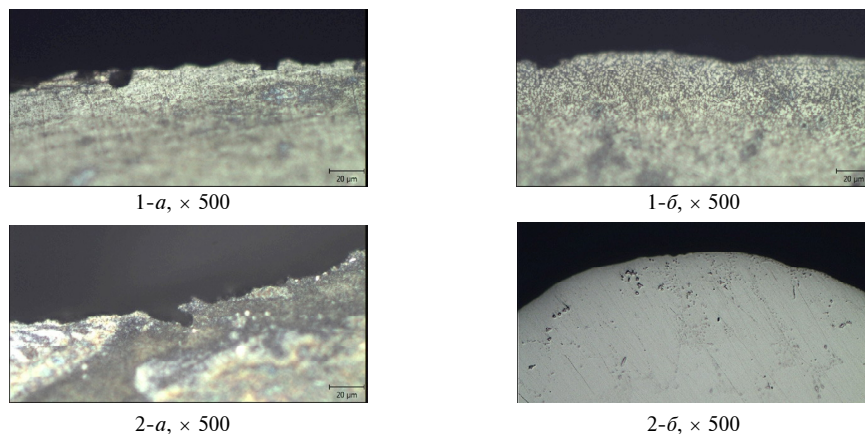


Рис. 2. Состояние внутренней поверхности (охлаждаемых) каналов рабочих лопаток опытных вариантов после ГИП

При осмотре нетравленных микрошлифов, изготовленных в осевом сечении хвостовика и поперечном сечении пера лопаток без ГИП (вариант 0) по месту точечного свечения люминофора обнаружены микропоры размером до 40 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.

Проведение операции горячего изостатического прессования (варианты 1 и 2) способствует «залечиванию» пор. В структуре поступивших на исследование лопаток после ГИП микропоры практически отсутствуют (рис. 4-б; табл. 2). Размер выявленных после ГИП микропор не превышает 6 мкм, что примерно в 7 раз меньше по сравнению с порами, обнаруженными в лопатках до проведения операции ГИП (рис. 4-в; табл. 2).

Металлографическим исследованием установлено, что макроструктура исследованных рабочих лопаток – монокристаллическая.

Основными составляющими микроструктуры материала опытных лопаток являются γ -твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' -фазы, эвтектической фазы (γ - γ'), карбидов и карбонитридов, что соответствует литому состоянию сплава ЖС26-ВИ (ВНК) (рис. 5).

Исследование показало, что в процессе горячего изостатического прессования при температуре 1250 °С и давлении 170 МПа (вариант 1) произошло значительное растворение и перекристаллизация эвтектической фазы (γ - γ'). В междендритных пространствах наблюдается выделение скоагулированных частиц γ' -фазы.

Микроструктура материала рабочих лопаток после ГИП удовлетворительная и соответствует шкале микроструктур, утвержденной ВИАМ, перегрева нет (рис. 6).

В микроструктуре лопаток после ГИП наблюдается уменьшение размеров структурных состав-

ляющих (пластины эвтектических карбидов утончаются), по сравнению с лопатками до газостатирования (см. табл. 2).

Размер структурных составляющих, а также расстояние между осями дендритов первого и второго порядка в пера лопаток в ~ 2 раза меньше, чем в хвостовой части (см. табл. 2).

При микроструктурном исследовании на травленных микрошлифах, вырезанных из рабочих лопаток, прошедших операцию ГИП (вариант 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. 7-а, б).

Аналогичные области, характеризующиеся образованием «рафт»-структуры, также обнаружены вокруг некоторых карбидов типа MeC (рис. 7-в). 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 ~ 0,3 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. В зонах «залечивания» микропор наряду с мелкими интерметаллидными частицами также наблюдается скопление скоагулированных вытянутых частиц γ' - фазы размером ~ 2 мкм.

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.

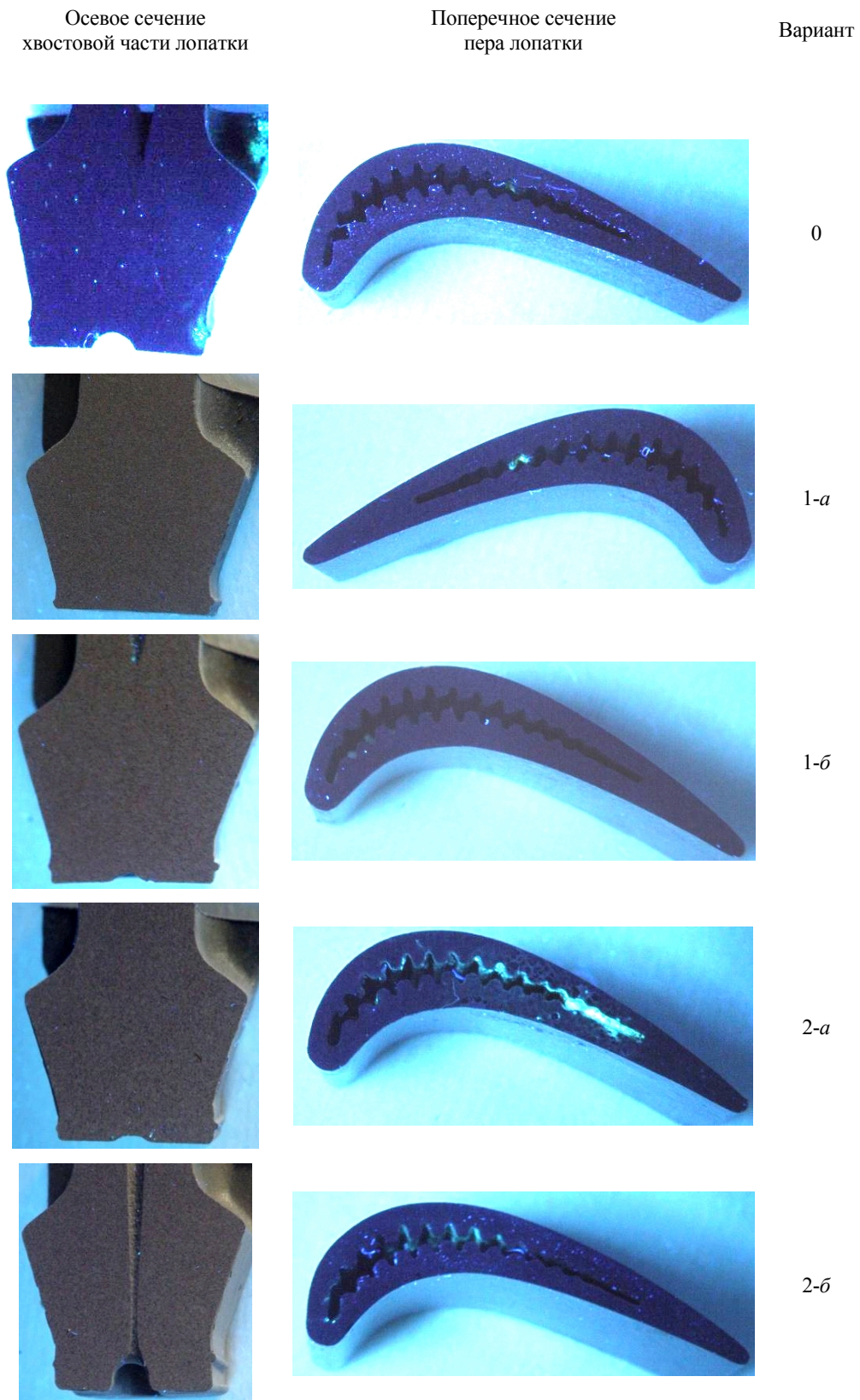


Рис. 3. Внешний вид рабочих лопаток опытных вариантов в осевом сечении хвостовой части и в поперечном сечении пера под источником УФС

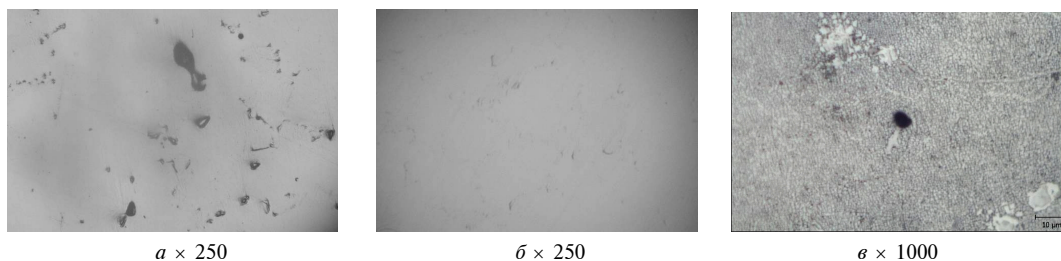


Рис. 4. Микропористость в материале опытных рабочих лопаток из сплава ЖС26-ВИ:

a – *v* исходном состоянии до ГИП (вариант 0); *б*, *в* – после проведения ГИП (вариант 1)

Таблица 2 – Параметры структурных составляющих сплава ЖС26-ВИ (ВНК)

Состояние материала и место сечения		Размеры структурных составляющих, мкм			
		карбиды		эвтектика типа (γ - γ')	микропоры
		глобулярные типа МС	эвтектические типа M_6C		
исходное (без ГИП) до термообработки	перо	2...8	до 20	5...18 (единичные до 65)	до 40
	хвостовик	3...12	до 35	8...70 (единичные до 110)	до 28
после ГИП без термообработки	перо	1,5...6	до 20 (утонение пластин)	3...15	до 2
	хвостовик	3...12	до 30 (утонение пластин)	8...60 (единичные до 85)	до 6
после ГИП и стандартной термообработки	перо	1,5...6	до 20 (утонение пластин)	редко до 14	до 2
	хвостовик	3...12	до 30 (утонение пластин)	редко до 55	до 6



× 200

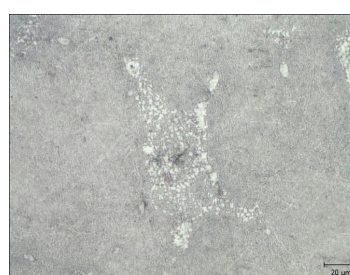


× 500

Рис. 5. Микроструктура рабочей лопатки из сплава ЖС26-ВИ в исходном состоянии до ГИП (вариант 0)



× 200



× 500

Рис. 6. Микроструктура рабочей лопатки из сплава ЖС26-ВИ после проведения операции ГИП (вариант 1)

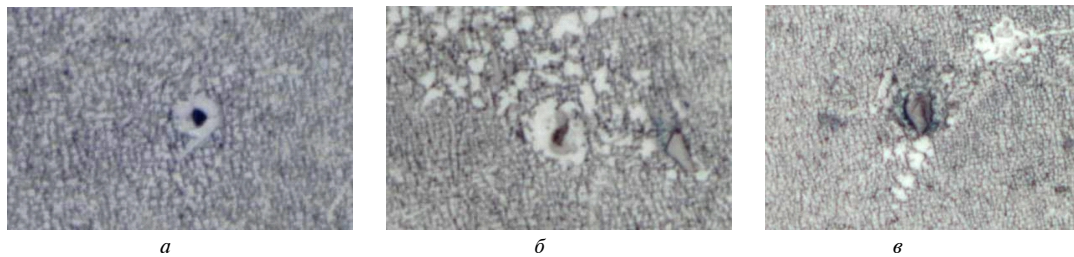


Рис. 7. «Рафт»-структура в материале рабочих лопаток из сплава ЖС26-ВИ после операции ГИП в зонах «залечивания» микропор (а, б), а также вокруг карбидов типа МС (в), $\times 2000$

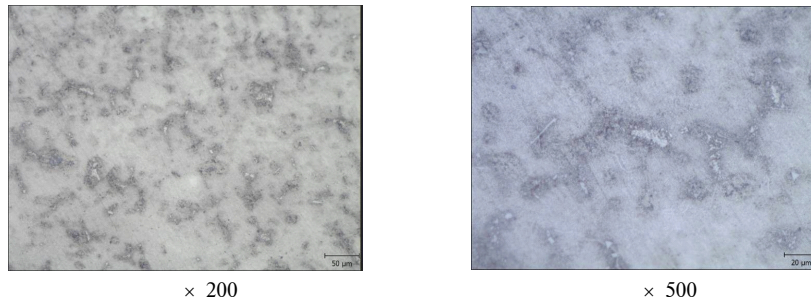


Рис. 8. Микроструктура рабочей лопатки из сплава ЖС26-ВИ после проведения операции ГИП и стандартной термической обработки (вариант 2)

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

Термообработка в вакууме по стандартному режиму (при $1265\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч 15 мин) после ГИП (вариант 2) способствует практически полной перекристаллизации упрочняющей 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 (рис. 8).

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 материала опытных лопаток. При этом также наблюдается частичное растворение эвтектики (γ - γ') и утонение пластин эвтектических карбидов.

Механические и жаропрочные свойства определяли на образцах диаметром 15 мм и длиной 135 мм, отлитых методом направленной кристаллизации без термообработки, а также после термической обработки по стандартному режиму (гомогенизация в вакууме при температуре $1265 \pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч 15 мин).

По стартовым конусам образцов с монокристаллической структурой, отлитых из сплава ЖС26-ВИ методом высокоскоростной направленной кристаллизации, определили их кристаллографическую ориентацию (КГО). Максимальные значения отклонения направления [001] от оси Z не превышали $6,2$ угл. град, при норме согласно ТУ — не более 20 угл. град. На остальных образцах выявлена направленная структура, состоящая более чем из двух зерен.

Результаты механических испытаний и испытаний на длительную прочность (табл. 3) показали, что свойства исследуемых образцов всех опытных вариантов, удовлетворительные и отвечают требованиям соответствующей нормативно-технической документации.

Термическая обработка по стандартному режиму после ГИП (вариант 2) способствует повышению пластичности сплава, при сохранении прочностных и жаропрочных свойств, что обусловлено повышением структурной однородности сплава и релаксацией напряжений, наведенных в процессе горячего изостатического прессования.

Исследованием фрактографического строения изломов, полученных при испытании опытных образцов, отлитых из сплава ЖС26-ВИ (ВНК), на растяжение до проведения операции ГИП, после ГИП, а также после ГИП и стандартной термообработки установлено, что разрушение во всех случаях произошло по кристаллографической плоскости [001].

Микроструктура направленно закристаллизованных образцов диаметром 15 мм и длиной 135 мм различных опытных вариантов как до, так и после термообработки по стандартному режиму, идентична структуре лопаток, обработанных в соответствии с указанными вариантами.

Таблица 3 – Механические и жаропрочные свойства сплава ЖС26-ВИ (ВНК) до и после операции горячего изостатического прессования

Состояние материала	Механические свойства при 20 °С			Время до разрушения при 975 °С под нагрузкой 26 кгс/мм ² , τ _p , час
	σ _B , кгс/мм ²	δ, %	Ψ, %	
Исходное (без ГИП) после стандартной термообработки	105,1	10,0	12,4	73,5
	93,9	14,8	12,4	86,5
после ГИП без термообработки	101,8	7,2	13,5	86,0
	102,8	8,0	11,2	57,0
после ГИП и стандартной термообработки	86,6	20,0	19,0	62,25
	94,9	20,0	24,6	54,5
8Т-ТУ165; 36ТУ-179; 436Т-ТУ6; 317ТУ-2	≥ 85,0	≥ 6,0	-	≥ 40,0

Выводы

Горячее изостатическое прессование при температуре 1250 °С и давлении 170 МПа способствует повышению качества литых рабочих лопаток турбины из сплава ЖС26-ВИ (ВНК) за счет стабилизации структуры и свойств в результате уменьшения микропористости.

При ГИП лопаток со стержнем происходит «залечивание» пор, находящихся на поверхности внутреннего (охлаждаемого) канала. На внутренней поверхности внутренних каналов рабочих лопаток, прошедших ГИП после выщелачивания стержня, имеются микропоры.

Для материала рабочих лопаток турбины и образцов [сплав ЖС26-ВИ (ВНК)] после ГИП характерна структурная неоднородность вследствие образования «рафт»-структуры в виде зональных участков, сосредоточенных в местах «залечивания» пор, а также вокруг некоторых карбидов типа МС.

Гомогенизация при температуре 1265 °С в течение 1 часа 15 мин после ГИП способствует повышению структурной однородности сплава и релаксации напряжений, наведенных в процессе газостатирования, что оказывает положительное влияние на физико-механические свойства.

Список литературы

1. Миллер Г. Е. Конструкция газовой турбины и суперсплавы // Сб. Суперсплавы II : Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Симса Ч. Т., Столоффа Н. С., Хагеля У. К. : пер. с англ. Кн. 1 / Под ред. Шалина Р. Е. – М. : Металлургия, 1995. – С. 49–83.
2. Погутов А. В. Опыт литья лопаток ГТД / А. В. Погутов, С. И. Язык // Авиационная промышленность. – 1992. – № 5. – С. 57–62.

3. Орлов М. Р. Образование пор в монокристаллических рабочих лопатках турбины в процессе направленной кристаллизации / М. Р. Орлов // Металлы. – 2008. – № 1. – С. 70–75.
4. 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.
5. Оспенникова О. Г. Повышение свойств жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ путем горячего изостатического прессования и последующей термической обработки / О. Г. Оспенникова, М. Р. Орлов // Материаловедение. – 2007. – № 9. – С. 32–36.
6. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. Монография. Изд. 2-е, переработанное и дополненное / [Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич». – 2007. – 496 с.
7. Особенности механизма пластической деформации сплава ЖС6У-ВИ при нормальной и повышенной температурах / [Жеманюк П. Д., Яценко В. К., Орлов М. Р., Рубель О. В.] // Металлознание та обробка металів. – 2000. – № 3. – С. 31–37.
8. Исследование влияния горячего изостатического прессования на структуру и свойства литых деталей авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖС6К-ВИ / [П. Д. Жеманюк, В. В. Клочихин, О. В. Гнатенко и др.] // Газотурбинные технологии. – 2013. – № 6. – С. 20–24.

Поступила в редакцию 24.11.2014

Жеманюк П.Д., Ключихин В.В., Лисенко Н.О., Наумик В.В. Структура і властивості литих лопаток авіаційних двигунів з жароміцних нікелевих сплавів ЖС26-В після гарячого ізостатичного пресування

В результаті гарячого ізостатичного пресування (ГП) литих лопаток авіаційних двигунів з жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-В відбувається «заліковування» мікропор та рихлот, що не виходять на поверхню деталей, що сприяє стабілізації структури та властивостей матеріалу. Обробка ГП та наступна гомогенізація забезпечують отримання найбільш сприятливої структури, сукупність міцності, пластичності та довготривалої міцності.

Ключові слова: лопатка, гаряче ізостатичне пресування, мікропори, усадочні рихлоти, «рафт»-структура, термообробка, структурна однорідність, пластичність, міцність, жароміцність.

Zhemanjuk P., Klochyhyn V., Lysenko N., Naumyk V. Structure and properties of cast aircraft engines blades (HA26-VI alloy) from heatproof nickeliferous alloy after of hot isostatic pressing heatproof nickeliferous alloy

In the result of hot isostatic pressing (HIP) of cast aircraft engines blades (HA26-VI alloy) occurs the «healing» of micropores and friables, which are not coming to the surface of parts, what results in stabilize of the material structure and properties. HIP processing and the subsequent homogenization provide the most favorable structure, reception of strength, plastic properties and long-term strength.

Key words: blade, hot isostatic pressing, micropores, shrink friables