

УДК 621.74.045: 669. 24: 621.981

Н. А. Лысенко¹, В. В. Клочихин¹, д-р техн. наук Э. И. Цивирко²¹ОАО «Мотор Сич», ²Национальный технический университет; г. Запорожье**ВЛИЯНИЕ ГИП НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВА
ЖС26-ВИ**

Горячее изостатическое прессование обеспечило существенное снижение усадочной микропористости монокристаллических турбинных охлаждаемых лопаток из сплава ЖС26-ВИ, что улучшило однородность их микроструктуры и повысило физико-механические свойства. Для таких лопаток определены оптимальный режим термообработки и рациональная схема поверхностного газового алитирования. Качественные показатели полученных лопаток вполне удовлетворяют требованиям действующих нормативов к ответственным деталям ГТД.

Горячее изостатическое прессование, монокристаллические лопатки, никелевый сплав, газовое алитирование

Монокристаллическая структура рабочей охлаждаемой лопатки ГТД позволила повысить рабочую температуру лопаток на 80...120 °С по сравнению с лопатками, имеющими равноосную структуру. При этом температура газа перед рабочей лопаткой первой ступени на современных газотурбинных двигателях может повышаться до 1800 °С [1]. Для монокристаллической структуры лопаток из никелевых жаропрочных сплавов характерно наличие микропористости и эвтектической (γ - γ')-фазы. При термической обработке лопаток, особенно при высокотемпературной гомогенизации, на месте растворившейся в матрице эвтектической (γ - γ')-фазы остаются микронесплошности округлой формы. В результате, после гомогенизации таких лопаток объемная доля пор в них увеличивается в 3...4 раза, а их средний размер – в 1,5...2 раза [2]. Среди причин, приводящих к разрушению рабочих лопаток в эксплуатации и при проведении усталостных испытаний, не последнее место занимает наличие в приповерхностном слое лопаток (в зоне действия максимальных напряжений) микропор. Поэтому исследования и технологические разработки по существенному снижению микропористости в монокристаллической структуре рабочих лопаток являются важными и вполне актуальными.

Одним из перспективных направлений уменьшения микропористости отливок ответственного назначения является горячее изостатическое прессование (ГИП), позволяющее повысить усталостную прочность сплавов IN 738LC [3], DS MAR-M200 [4] и улучшить свариваемость отливок из сплава IN 738 [5]. ГИП монокристаллических отливок из сплава CMSX-4 обеспечило получение структуры металла без микропор и заметно улучшило характеристики механической и усталостной прочности [6].

В настоящей работе изучали влияние горячего изостатического прессования на структуру и свойства монокристаллических отливок из сплава ЖС26-ВИ.

Литые монокристаллические образцы и лопатки из стандартного сплава ЖС26-ВИ были получены по серийной технологии на вакуумной установке УВНК-8П. На первом этапе исследования на литых пальчиковых образцах определяли оптимальный режим термической обработки после ГИП с последующей проверкой его на лопатках. На втором этапе – влияние ГИП на лопатках, прошедших газоциркуляционное алитирование.

Горячее изостатическое прессование образцов и лопаток выполняли на установке HIRP25/70-20002500 по режиму: нагрев до температуры 1235 °С в течение 4 ч с одновременным повышением давления в установке с 0,1 до 200 МПа; выдержка при указанных температуре и давлении в течение 3,5 ч; охлаждение до температуры 200 °С с одновременным понижением давления до 75 МПа в течение 3,5 ч.

В исследуемых образцах и лопатках определяли химический состав, изучали макро- и микроструктуру, механические свойства и усталостную прочность.

Образцы без ГИП проходили термообработку по режиму: гомогенизация при температуре 1235 °С в течение 2 ч и охлаждение на воздухе. Для образцов, проходящих ГИП по вышеприведенному режиму, процесс гомогенизации совместили с горячим изостатическим прессованием.

Изучали качественные показатели образцов по четырем технологическим вариантам:

1) без ГИП; 2) после ГИП; 3) после ГИП с последующей термообработкой (выдержка

1 час при температуре 1050 °С + 24 ч при 850 °С); 4) после ГИП + 24 ч при 850 °С.

Структуру исследовали на протравленных микрошлифах методами оптической (микроскоп «Neophot-32») и растровой электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп JSM T-300).

Металлографические исследования показали, что в образцах без ГИП (вариант 1) наблюдались многочисленные поры размером до 40 мкм. В образцах, прошедших ГИП (варианты 2; 3; 4), при увеличении $\times 100$ микропоры не обнаружены.

Микроструктура литого сплава ЖС26-

ВИ(ВНК) состояла из γ -твердого раствора, упорядоченного интерметаллидной γ' [$\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$], карбидной (типа MeC) и эвтектической (γ - γ')-фазами (рис. 1, *a, б*).

В образцах после ГИП частицы γ' -фазы имеют оптимальные размеры. Размер их составляет 0,3...0,5 мкм в осях дендритов и 0,5...0,6 мкм в межосных пространствах. Промежутки между более крупными выделениями заполнены мелкими частицами γ' -фазы с размерами 0,1...0,2 мкм. После ГИП не наблюдался распад карбидов типа MeC на избыточную γ' -фазу, ТПУ-фазы, карбиды Me_{23}C_6 в зернограничной и междендритной областях (см. рис. 1).

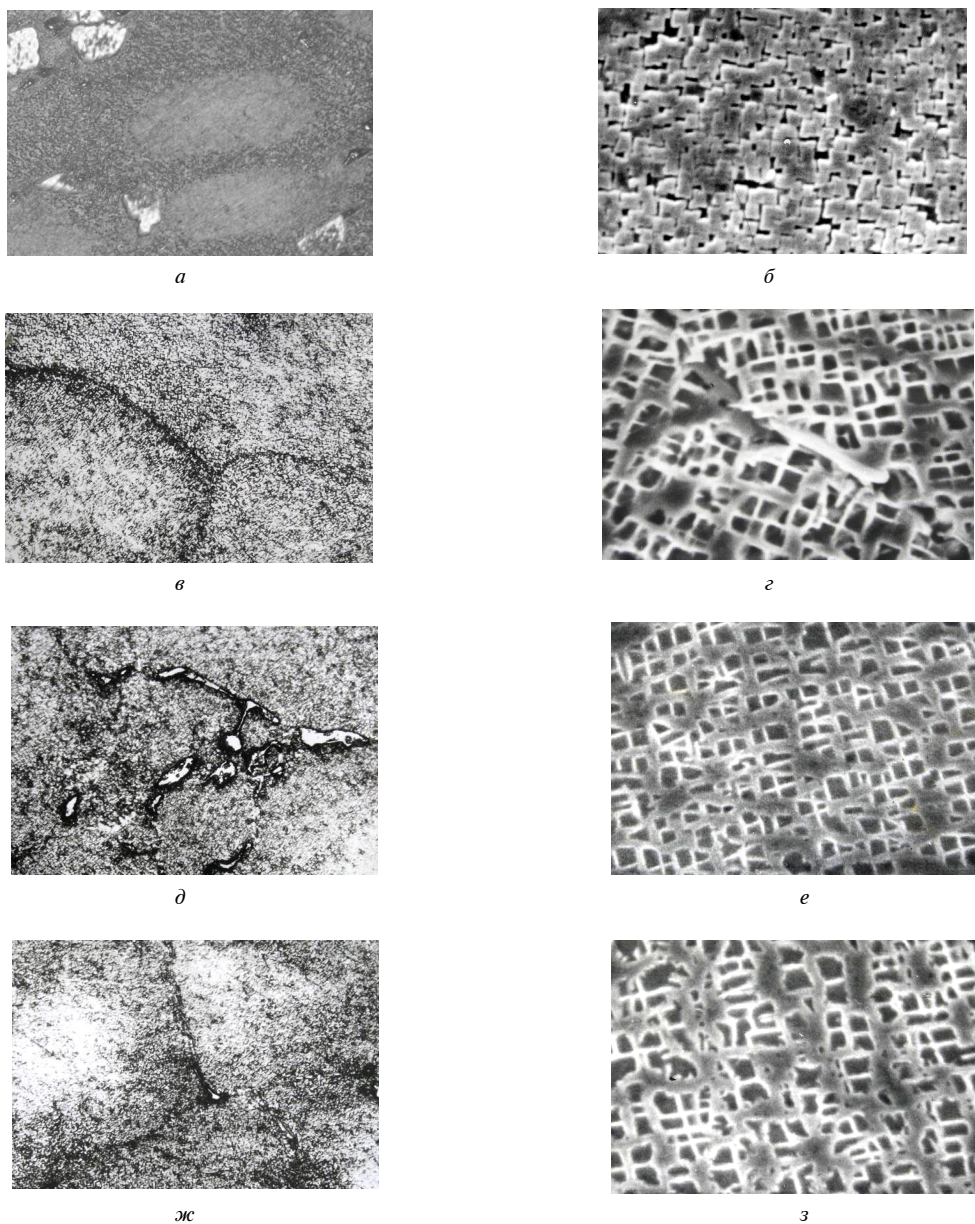


Рис. 1. Микроструктура образцов из сплава ЖС26-ВИ(ВНК) (*a, в, д, ж* – $\times 500$; *б, з, е, з* – $\times 5000$): *a, б* – без ГИП; *в, з* – после ГИП; *д, е* – после ГИП+1050 °С, 1 ч + 850 °С, 24 ч; *ж, з* – после ГИП+850 °С, 24 ч

В образцах, подвергнутых старению (варианты 3; 4), по границам зерен образовались крупные зубчатые выделения вторичной γ' - фазы, которые положительно повлияют на усталостные характеристики сплава. После проведения двойного старения (вариант 3) в образцах образовались неблагоприятной формы выделения боридной фазы (рис. 1, *д*).

Таким образом, лучшей структурой среди рассмотренных вариантов обладали образцы, подвергнутые ГИП и низкотемпературному старению (вариант 4). При этом в структуре обеспечивалось выделение вторичной γ' -фазы оптимальных размеров и отсутствие грубых выделений боридной фазы.

Лопатки из сплава ЖС26-ВИ(ВНК) обрабатывали по оптимальному режиму ГИП (вариант 4). При этом предварительно замок лопатки (с одной стороны) механически обработали. Опреде-

ляли изменение основных химических элементов по глубине от поверхности в зависимости от состояния поверхности: литая или механически обработанная (табл. 1). Массовая доля основных элементов на глубине до 500 мкм литой поверхности, по сравнению с механически обработанной, была более стабильной. По-видимому, оказывала свое влияние дендритная ликвация, особенно по осям и междендритным пространствам.

В микроструктуре пера и замка лопаток (рис. 2) после ГИП по оптимальному варианту (4) микропоры и микротрещины не обнаружены. В целом, она аналогична структуре ранее исследованных образцов. Некоторое различие в микроструктуре и размерах частиц γ' - фазы (рис. 2, *в*, *е*) пера и замка лопатки, скорее всего, связано с различными условиями кристаллизации легирующих элементов.

Таблица 1 – Содержание основных элементов у поверхности замка лопатки из сплава ЖС26-ВИ(ВНК) после ГИП по оптимальному режиму, (вариант 4)

Расстояние от поверхности, мкм	Массовая доля элементов, %					
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	W
0...5	<u>3,1</u> ^{*)}	<u>2,9</u>	<u>16,1</u>	<u>9,2</u>	<u>60,0</u>	<u>8,4</u>
	4,0	3,3	15,6	8,1	62,2	5,9
100 \pm 10	3,8	2,9	15,6	8,8	59,5	9,0
	4,3	4,6	16,9	7,9	61,3	4,9
500 \pm 10	<u>3,9</u>	<u>3,0</u>	<u>15,6</u>	<u>8,8</u>	<u>59,6</u>	<u>8,7</u>
	4,2	3,8	15,6	8,8	61,0	6,3

Примечание: *) числитель – литая поверхность; знаменатель – механически обработанная поверхность.

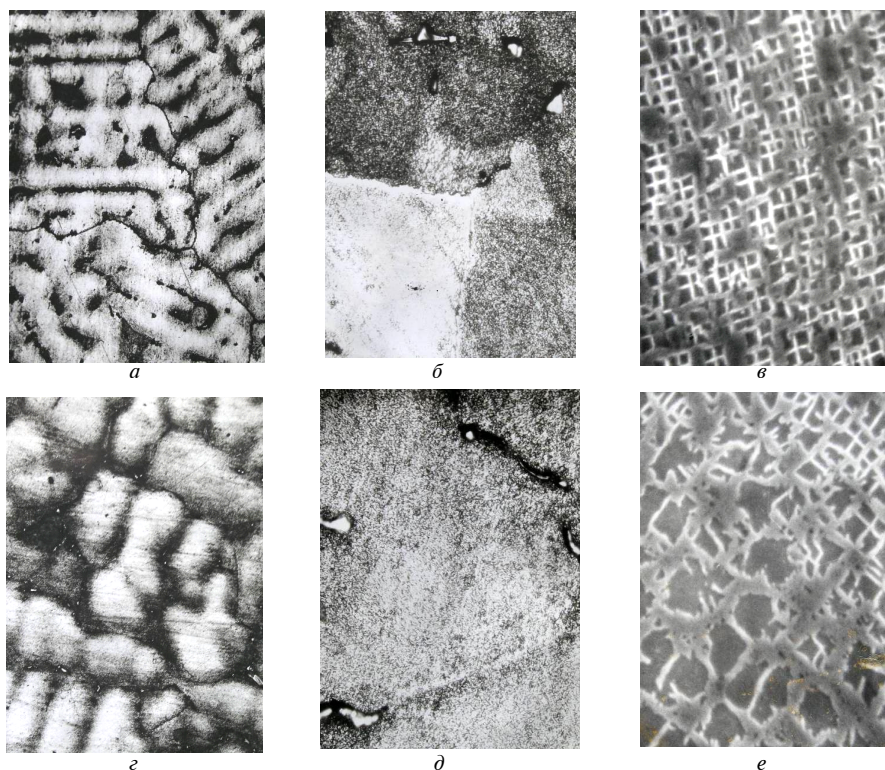


Рис. 2. Микроструктура пера (*а, б, в*) и замка (*г, д, е*) рабочей лопатки ТВД из сплава ЖС26-ВИ(ВНК) после ГИП+850 °С, 24 ч: *а, г* – $\times 100$; *б, д* – $\times 500$; *в, е* – $\times 5000$

На образцах, вырезанных из пера и замка лопатки, определяли механические свойства при различных температурах (табл. 2). Установили, что прочностные (σ_{σ} , $\sigma_{0,2}$) и пластические (δ) свойства металла пера и замка лопатки мало отличались между собой и заметно превышали требования нормативно-технической документации (НТД) на поставку лопаток.

Провели испытания трех лопаток из сплава ЖС26-ВИ(ВНК) на усталость по методике, предусмотренной «Едиными техническими условиями на усталостные испытания лопаток газотурбинных установок». Лопатки, прошедшие ГИП по оптимальному режиму, испытывались при возбуждении первой изгибной формы колебаний при температуре 20 ± 5 °С. При задании уровня переменных напряжений динамический модуль упругости для данного материала был принят равным 210 ГПа. За критерий разрушения лопатки принималось снижение резонансной частоты на 1 % относительно исходного значения. Для визуального обнаружения усталостной трещины испытания продолжались до снижения резонансной частоты на 10 %, но наработанные при этом циклы не учитывались. Нагружение лопатки задавалось по тензорезистору, показывающему максимальное напряжение.

Усталостные испытания каждой лопатки проводились в два этапа:

1) испытания при нагружении на уровне требований технических условий ($\sigma = 240$ МПа на базе $2 \cdot 10^7$ циклов). После испытаний лопатки подвергались люминесцентному контролю на наличие возможных усталостных трещин;

2) лопатки, прошедшие этап 1 без возникновения трещин, подвергались дальнейшим испытаниям до разрушения при ступенчато-возрастающей нагрузке (280, 320, 360 МПа) по методике ОСТ 100870-77.

Усталостные испытания рабочих лопаток ТВД из сплава ЖС26-ВИ(ВНК) после ГИП по оптимальному режиму показали, что при уровне нагружения 240 МПа все три лопатки прошли базу $2 \cdot 10^7$ циклов без разрушения, что свидетельствует о соответствии предоставленной выборки лопаток требованиям НТД на поставку лопаток по пределу выносливости.

Условный предел выносливости лопаток на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, определенный по результатам второго этапа испытаний, колебался для разных лопаток от 260 до 340 МПа. При этом разрушение лопаток происходило в зоне не далее, чем 56 мм от основания хвостовика. Внешних дефектов в местах усталостных трещин ни на одной из испытанных лопаток не обнаружено.

На охлаждаемых лопатках из сплава ЖС26-ВИ(ВНК) изучали влияние ГИП на качество поверхностного защитного алитированного покрытия (ГЦП), выполненного методом газодиффузионного насыщения поверхности по следующим вариантам:

1) ГИП без ГЦП; 2) ГИП + ГЦП; 3) ГЦП + ГИП + ГЦП.

Для контроля качества внутренней поверхности лопаток после ГЦП их разрезали по 5^{ти} сечениям и изготовили микрошлифы.

С поверхностей лопаток, обработанных по третьему варианту, после ГИП удаляли предварительно нанесенный алитированный слой по следующей схеме: гидроабразивное полирование поверхности; травление в растворе состава: кислота соляная HCl (390420 г/л), железо хлорное FeCl₃·6H₂O (2030 г/л), остальное вода H₂O (до 1 л), при температуре 25 °С в течение 24 ч.

Качественные показатели поверхностей лопаток из сплава ЖС26-ВИ(ВНК), исследуемых 3-х вариантов, изучали методами люминесцентной дефектоскопии (ЛЮМ1-ОВ) и металлографического анализа микроструктуры.

Визуальным осмотром и с помощью лупы ($\times 8$) наружной поверхности лопаток после ГИП установлено:

1) у лопаток без предварительного алитирования (вариант 2) поверхность имела темный, почти черный цвет;

2) у лопаток с предварительным алитированием (вариант 3) поверхность светло-серого цвета, на которой визуально дефекты в виде растрескиваний, отшелушивания, вспучивания и т.п. не выявили.

На лопатках всех трех вариантов исследованиями не обнаружено компенсационных вмятин, но в зоне бандажных полок наблюдали единичные мелкие поры.

Таблица 2 – Механические свойства образцов из сплава ЖС26-ВИ(ВНК) после ГИП по оптимальному режиму (вариант 4)

Место отбора образцов	Температура испытания, °С	Средние значения механических свойств		
		σ_{σ} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
перо	20	881	790	6,8
	850	847	777	5,6
замок	20	928	818	6,0
	850	850	798	13,0
Требования НТД	20	≥ 870	≥ 770	$\geq 3,0$
	850	≥ 800	≥ 740	$\geq 5,0$

Внутренняя поверхность (охлаждаемых каналов) лопаток после ГИП была серого цвета и заметно светлее по сравнению с наружной.

Металлографическим исследованием ($\times 100$), а также люминесцентным контролем (ЛЮМ1-ОВ) в осевом сечении (рис. 3) в опытных лопатках не обнаружили внутреннюю микропористость, но выявили несколько участков с микропористостью, выходящей на поверхность и не устраняемую газостатированием.

Микроисследования шлифов, вырезанных из пера газостатированных лопаток, показали:

1) на наружной и внутренней поверхностях неалитированных пустотелых (охлаждаемых) лопаток структурные изменения не обнаружены (рис. 4, а, б);

2) в наружном поверхностном слое алитированных лопаток глубина слоя после газостатирования увеличилась до $0,070...0,075$ мм (рис. 4, в, з); за алитированным слоем на глубину до $0,2$ мм от наружной поверхности наблюдался измененный слой с субзеренной структурой и обеднением по краям карбидов; в поверхностном слое внутренних (охлаждаемых) каналов алитированной лопатки глубина защитного покрытия составляла $0,008...0,01$ мм (рис.4, д, е); субзеренных изменений структуры от внутренней поверхности не выявлено, но имелись участки с обеднением по краям карбидов.

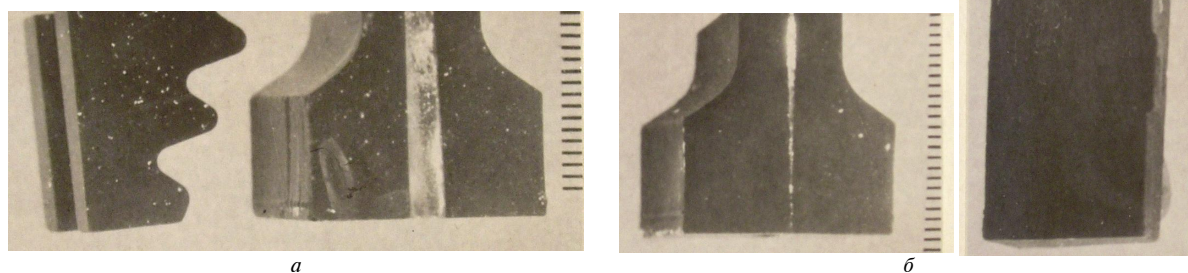


Рис. 3. Свечение люминофора (ЛЮМ-контроль) на поверхности осевого сечения замков сериных лопаток (а) и лопаток после ГИП (б)

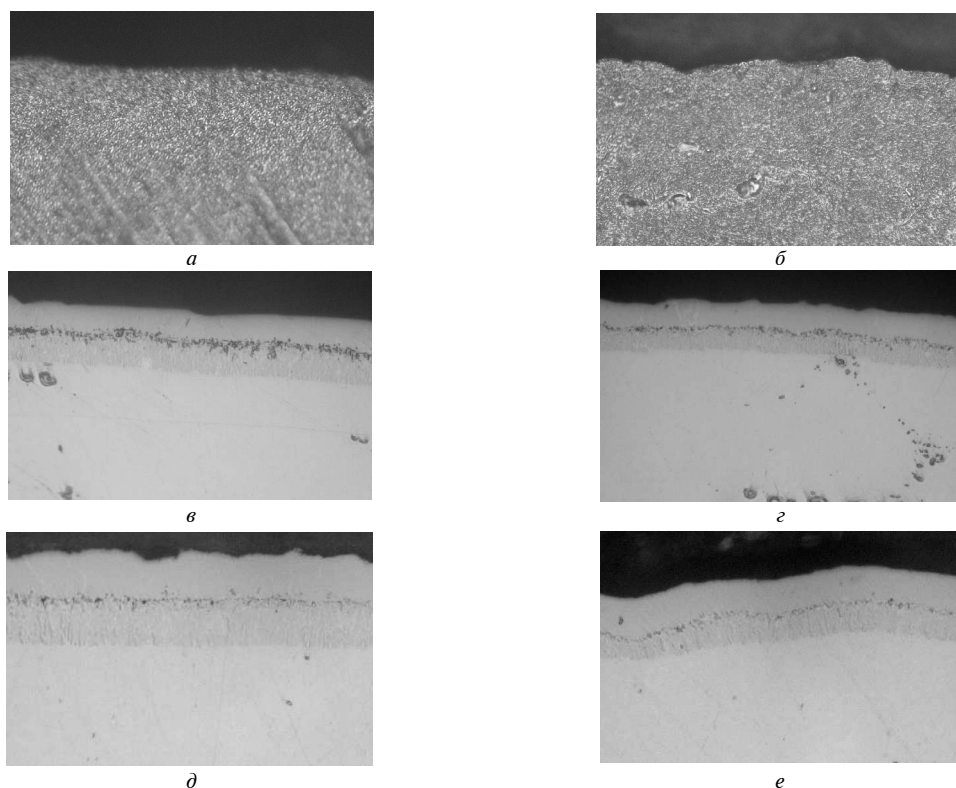


Рис. 4. Микроструктура наружных (а, в, д) и внутренних (б, з, е) поверхностных слоев лопаток из сплава ЖС26-ВИ(ВНК), прошедших ГИП, $\times 500$:

а, б – без алитирования; в, з – алитированный слой на лопатках варианта 2; д, е – алитированный слой на лопатках варианта 3

Микроструктура основы серийной (неалитированной) лопатки, а также после алитирования идентична. Характер микроструктуры указывает на то, что лопатки прошли высокотемпературный нагрев.

В термообработанных лопатках исследованных вариантов дисперсность γ' -фазы в осях дендритов и в межосных пространствах была практически одинаковой.

Люминесцентным контролем методом ЛЮМ1-ОВ на лопатках без предварительного алитирования (вариант 1) наблюдались единичные точечные свечения люминофора, не превышающие требования НТД. На алитированных лопатках имелось сплошное фоновое свечение, состоящее из мельчайших близко расположенных точек. Вероятно это связано с изменениями в алитированном слое после газостатирования и закалки.

При изучении полноты удаления алитированного слоя с поверхности лопаток, полученных по третьему варианту, установили, что алитированный слой удален неполностью. На всей поверхности лопаток сохранилась часть внутренней зоны алитированного слоя толщиной 0,01...0,02 мм (лопатки с толщиной остаточного слоя $\leq 0,02$ мм удовлетворяют требованиям НТД).

Лопатки из сплава ЖС26-ВИ (ВНК), полученные по вариантам 2 и 3, прошли серийное газовое алитированное и ЛЮМ-контроль.

Визуальным осмотром лопаток после ГА на поверхности пера дефекты не обнаружили. Поверхность данных лопаток была чистой, гладкой, без нарушения покрытия. ЛЮМ-контролем на поверхности пера лопаток свечения не обнаружены. Ранее наблюдавшееся фоновое свечение после операции «закалка» отсутствовало. В то же время на лопатках в зоне радиуса перехода от пера к замку и на проточной поверхности замка наблюдались многочисленные слабосветящиеся точки, вызванные, предположительно, наличием не удаленного при ГА шлама.

Микроструктура алитированных слоев на лопатках из сплава ЖС26-ВИ(ВНК) соответствует «эталонам микроструктур алитированного слоя рабочих лопаток после газового алитирования». На исследуемых лопатках глубина алитированного слоя составляла:

1) вариант 2 – на наружной поверхности 0,032...0,040 мм, на внутренней поверхности – 0,020...0,022 мм;

2) вариант 3 – на наружной поверхности 0,036...0,040 мм на внутренней поверхности – 0,022...0,024 мм. При нормах, согласно требованиям НТД – на наружной поверхности 0,02...0,05 мм, на внутренней – 0,01...0,05.

Выводы

1. Горячее изостатическое прессование (ГИП) рабочих лопаток из сплава ЖС26-ВИ(ВНК)

улучшило микроструктуру за счет существенного снижения усадочной микропористости.

2. Оптимальный режим термообработки лопаток, прошедших ГИП, обеспечил улучшение структуры сплава и повышение механических свойств. При этом усталостными испытаниями установлено, что опытные лопатки, прошедшие ГИП, имели условный предел выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов 260...340 МПа (нормативный условный предел выносливости при уровне нагружения 240 МПа исследуемые лопатки прошли базу испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов без разрушения).

3. Предварительное газовое алитирование лопаток, прошедших ГИП, имело удовлетворительное состояние (шелушение, отслоение и вспучивание не обнаружено). Однако воздействие высоких температур привело к увеличенной шероховатости и образованию окислов на поверхности, что, вероятно, послужило причиной фонового свечения при контроле методом ЛЮМ1-ОВ.

4. Удаление, предварительно нанесенного алитированного слоя с поверхности газостатированной лопатки (вариант 3), травлением в растворе хлорного железа и соляной кислоты в течение 24ч обеспечили съём алитированного слоя с 0,075...0,080 мм до $\sim 0,02$ мм на наружных поверхностях и с 0,02 мм до 0,01 мм на внутренних.

5. Структура алитированного слоя после газового алитирования по серийному технологическому процессу на лопатках вариантов 2 и 3 удовлетворяет требованиям НТД.

Перечень ссылок

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. Монография. / [Богуслав В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др.]; [изд. 2-е, перераб. и доп.]. – Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2007. – 496 с.
2. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / [Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др.]. – М. : Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Мак-Холвин Дж. М. Многоцикловая усталость никелевых сплавов : матер. междунар. конф. [в кн.: Жаропрочные сплавы для газовых турбин] / Мак-Холвин Дж. М. – М. : Машиностроение. – 1981. – С. 322–341.
4. The Effect of Hot Isostatic Pressing of the Creep and Fracture Behavior of the Cast Superalloy Mar-M002 / [Burt H., Dennison J.P., Elliot J.C., Welshire B.]. – Metals Scienc and Engineering, 1982. – N53. – P. 245–250.
5. Hot Isostatic Pressing of the alloy IN-718 / [Laberigts M., Herman G., Lonis P., Wellemag

- E. A.] – High Temperature Alloys for Gas Turbines, Proceedings of a Conference Held in Liege, Belgium, 4-6 October, 1982. – Dordrecht. – P. 999–1013.
- 6.. Allison Manufacturing Property and Turbine Engine Performance of CMSX-4 Single Crystal airfoils / [Thomas M. C., Helmink R. C., Prasler D. J., Whetstone J. R. Indiana]. – USA. – 1994.

Поступила в редакцию 03.07.2009

N. A. Lysenko, V. V. Klochikhin, E. I. Tsivirko

INFLUENCE OF HOT ISOSTATIC PRESSING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MONOCRYSTAL BLADES OF ЖС26-ВИ ALLOY

Гаряче ізостатичне пресування забезпечило суттєве зниження усадкової мікропористості монокристалічних турбінних охолоджувальних лопаток із сплаву ЖС26-В, що покращило однорідність їх мікроструктури та підвищило фізико-механічні властивості. Для таких лопаток визначені оптимальний режим термообробки та раціональна схема поверхневого газового алітирування. Якісні показники одержаних лопаток впевнено задовольняють вимогам діючих нормативів до відповідальних деталей ГТД.

Гаряче ізостатичне пресування, монокристалічні лопатки, нікелевий сплав, газове алітирування

Hot isostatic pressing has provided substantial reduction of contraction microporosity of the cooled monocrystal turbine blades made of ЖС26-ВИ alloy. It has improved homogeneity of their microstructure and increased their physical-mechanical properties. Optimum heat treatment mode and rational scheme of surface gas aluminizing has been determined for such blades. Quality characteristics of the produced blades fully meet requirements of the current norms concerning critical parts of GTE.

Hot isostatic pressing, monocrystal blades, nickel alloy, gas aluminizing