

УДК 621.74.045: 669. 24: 621.981

Н. А. ЛЫСЕНКО<sup>1</sup>, В. В. КЛОЧИХИН<sup>1</sup>, В. В. НАУМИК<sup>2</sup><sup>1</sup>АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина<sup>2</sup>Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ОТЛИВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИНЫ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

*Изучено влияние процесса горячего изостатического прессования (ГИП) на плотность, микроструктуру и физико-механические свойства отливок корпусных деталей турбины из никелевых жаропрочных сплавов ВХ4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ. Комплексные исследования показали, что ГИП обеспечивает получение более качественных отливок за счет снижения усадочной микропористости. Проведение операции газостатирования с последующей термообработкой по стандартному режиму способствует повышению механических и жаропрочных свойств. Анализ полученных результатов позволяет рассмотреть возможность совмещения процесса ГИП и высокотемпературной термической обработки с последующим проведением старения, который обеспечивает более высокую производительность, снижение потребления электроэнергии и значительную экономию затрат по сравнению с отдельными процессами ГИП и термообработки.*

**Ключевые слова:** жаропрочные сплавы, корпусные отливки, газостатирование, микропористость.

### Введение

С развитием авиационного двигателестроения возрастают требования, предъявляемые к качеству материалов газотурбинных двигателей (ГТД), в особенности, деталей горячего тракта. Широкое применение для изготовления деталей горячего тракта современных авиационных двигателей получили жаропрочные гетерофазные сплавы на никелевой основе типа ЖС, ВЖЛ и ВЖМ. Основными методами изготовления деталей из данных сплавов являются: равноосное литье по выплавляемым моделям, литье с направленной кристаллизацией и монокристаллическое литье. Всем видам литья присуще наличие микропористости, точечное и дислокационное несовершенство структуры, ликвация, несоответствие фазового состава, которые определяют надежность и эксплуатационные свойства деталей [1,2]. Одним из перспективных направлений уменьшения микропористости отливок ответственного назначения, позволяющее повысить усталостную прочность, а, следовательно, и эксплуатационную надежность, является горячее изостатическое прессование (ГИП) [3]. При этом выбирают предельно высокую температуру обработки, ограничиваясь уровнем, при котором ещё не возникает плавления.

Улучшение качества отливок методом ГИП связано с удалением внутренних дефектов, таких как пористость, внутренняя усадка и междендритные трещины, которые образуются в процессе затвердевания металла. ГИП устраняет эти дефекты вначале смыканием стенок пустот по механизмам

ползучести и пластической деформации, а затем диффузионной сваркой приведенных в контакт поверхностей пор. Следует отметить, что баротермическая обработка не удаляет дефекты, сообщающиеся с поверхностью [4].

В последние годы на АО «Мотор Сич» были проведены исследования по изучению особенностей структуры и свойств лопаток турбины из высоколегированных литейных жаропрочных сплавов (равноосных и монокристаллических) типа ЖС, содержащих ~ 60...67% упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, прошедших операцию ГИП [5, 6, 7].

В настоящей работе исследовали влияние процесса горячего изостатического прессования на структуру и свойства отливок корпусных деталей из жаропрочных сплавов на никелевой основе – ВХ4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ с небольшим содержанием упрочняющей фазы. Количество упрочняющей интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы в ВХ4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ сплавах после проведения полной термообработки, предусматривающей гомогенизацию с последующим старением, составляет ~ 5 и 16%, соответственно [8].

### 1. Экспериментальная часть

Цельнолитые корпусные детали (корпуса и сопловые аппараты), а также образцы для испытания механических и жаропрочных свойств были отлиты из сплавов ВЖЛ14-ВИ и ВХ4Л-ВИ методом равноосной кристаллизации.

Процесс горячего изостатического прессования осуществляли на установке QUINTUS QIN 0,9×1,5-2070-1400MURC фирмы «AVURE» (Швеция) в атмосфере аргона при температурах  $1120^{\pm 10}$  °C (для сплава ВЖЛ14-ВИ) и  $1190^{\pm 10}$  °C (для сплава ВХ4Л-ВИ) с выдержкой в течение 4 часов и давлении 160 МПа.

Исследование литых деталей и образцов из сплавов ВЖЛ14-ВИ и ВХ4Л-ВИ проводили по следующим вариантам:

*вариант «1»* – в литом состоянии (без термообработки и ГИП);

*вариант «2»* – после ГИП (без термообработки);

*вариант «3»* – после ГИП с последующей стандартной для соответствующего сплава термообработкой:

- сплав ВХ4Л-ВИ – гомогенизация при температуре  $1180^{\pm 15}$  °C – 4 часа, вакуум + старение при температуре  $900^{\pm 10}$  °C – 16 часов, охлаждение на воздухе;

- сплав ВЖЛ14-ВИ – гомогенизация при температуре  $1130^{\pm 10}$  °C – 4 часа, вакуум + старение при температуре  $700^{\pm 10}$  °C – 16 часов, охлаждение на воздухе.

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

Химический состав сплавов определяли методами спектрального и химического анализов.

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

Микроструктуру материала литых деталей и образцов исследовали на микрошлифах методами оптической (микроскоп «Axio Observer. Dlm» фирмы «Zeiss») и растровой электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп «JEOL JSM T-300»).

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 800°C и напряжении 210 МПа (для сплава ВХ4Л-ВИ) и 600°C и 600 МПа (для сплава ВЖЛ14-ВИ).

## 2. Анализ полученных результатов

Химический состав исследованных литых корпусных деталей и образцов из сплавов ВХ4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ удовлетворительный и отвечает требованиям нормативной технической документации (НТД), табл. 1.

Внешний вид исследованных отливок после проведения операции ГИП (*вариант «2»*) представлен на рис. 1.

При люминесцентном контроле методом ЛЮМ1-ОВ в осевом и поперечном сечениях отливок из сплавов ВЖЛ14-ВИ и ВХ4Л-ВИ до проведения ГИП выявлено точечное свечение (рис. 2 а, б). В аналогичных сечениях отливок после проведения операции ГИП свечения люминофора практически отсутствуют (рис. 2 в, г).

На нетравленных микрошлифах, изготовленных по месту точечных свечений люминофора, в отливках обоих сплавов без ГИП (*вариант «1»*) обнаружены микропоры, а также усадочные рыхлоты размером до 100  $\mu\text{m}$  (рис. 3 а).

Карбиды типа MeC [(Nb,Ti)C и Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>] в отливках из сплава ВЖЛ14-ВИ выделяются как в виде дискретных глобулярных частиц, так и пластин, располагающихся преимущественно на границах зерен.

В отливках деталей из сплава ВХ4Л-ВИ карбиды и карбонитриды, в основном, имеют виде дискретных глобулярных частиц, располагающихся как на границах зерен, так и в междендритных пространствах.

Проведение операции горячего изостатического прессования (*вариант «2»*) способствует «залечиванию» пор и рыхлот. В материале отливок после ГИП микропоры и рыхлоты практически отсутствуют (рис. 3 б). Размер выявленных после ГИП единичных микропор составляет ~ 4...5  $\mu\text{m}$ , что примерно в 20 раз меньше по сравнению с порами, обнаруженными в деталях до проведения операции ГИП. Следует отметить, что на наружной поверхности деталей после ГИП имеются микропоры. 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.

Металлографическим исследованием установлено, что микроструктура корпусных деталей в литом состоянии из сплавов ВХ4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ (*вариант «1»*) имеет существенные отличия и представляет собой:

– сплав ВХ4Л-ВИ –  $\gamma$ -твердый раствор с наличием небольшого количества карбидов, карбонитридов, интерметаллидных фаз:  $\gamma'$ -фазы состава (Ni,Cr)<sub>3</sub>(Al,Ti,Nb), фазы типа Ni(Cr,Mo,W), а также эвтектики типа ( $\gamma$ - $\gamma'$ );

– сплав ВЖЛ14-ВИ –  $\gamma$ -твердый раствор с наличием интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы, карбидов, карбонитридов и небольшого количества эвтектической фазы ( $\gamma$ - $\gamma'$ ).

Таблица 1

Химический состав литых деталей из сплавов ВХ4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ

Марка сплава	Содержание элементов, % по массе									
	C	Cr	Nb	W	Al	Ti	Mo	Fe	Si	S
ВХ4Л-ВИ	0,09	32,6	0,92	5,09	0,83	0,96	3,13	<0,5	<0,3	0,003
Нормы НТД	0,03-0,10	32,0-35,0	0,7-1,3	4,3-5,5	0,7-1,3	0,7-1,3	2,3-3,5	≤ 0,5	≤ 0,3	≤ 0,010
ВЖЛ14-ВИ	0,07	18,72	-	-	1,35	2,60	5,05	8,79	<0,4	0,003
Нормы НТД	0,05-0,08	18,0-20,0	-	-	1,2-1,5	2,5-3,1	4,5-5,5	6,0-10,0	≤ 0,4	≤ 0,010

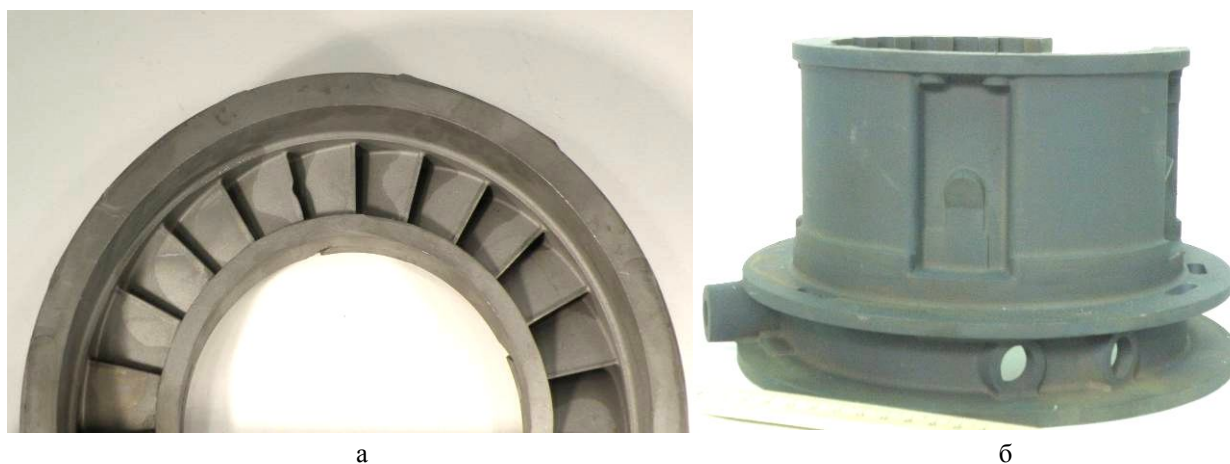


Рис. 1. Внешний вид корпусных деталей из сплавов ВХ4Л-ВИ (а) и ВЖЛ14-ВИ (б) после проведения операции ГИП

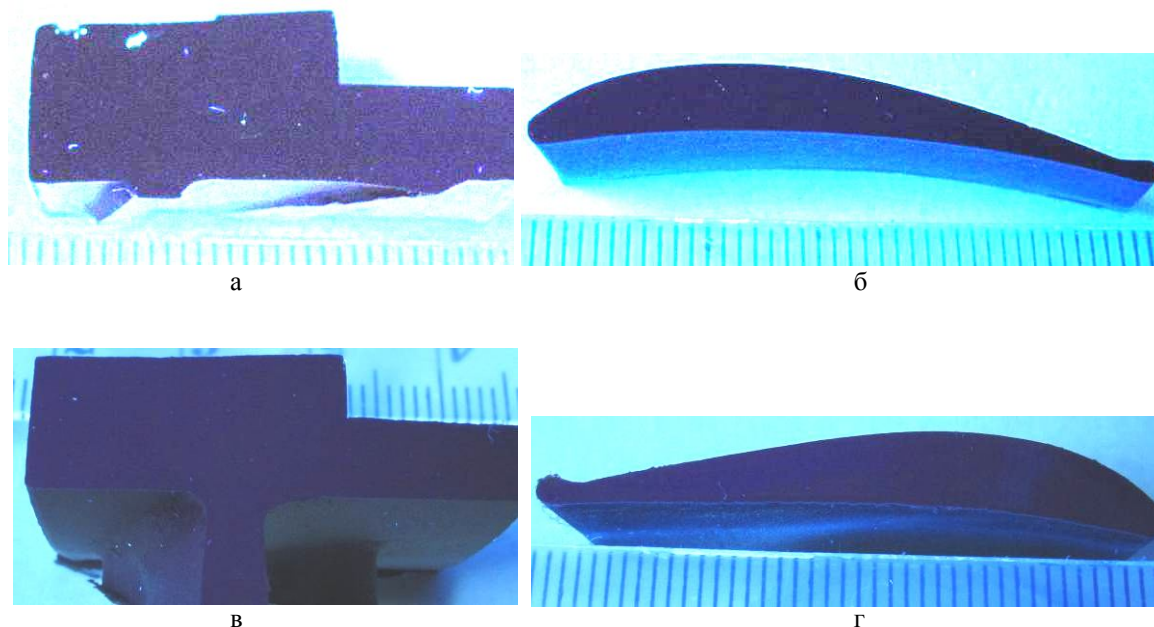


Рис. 2. Внешний вид фрагментов отливок корпусных деталей из сплавов ВЖЛ14-ВИ (а, в) и ВХ4Л-ВИ (б, г) в осевом и поперечном сечениях под источником УФС: а, б – до ГИП (вариант «1»); в, г – после ГИП (вариант «2»)

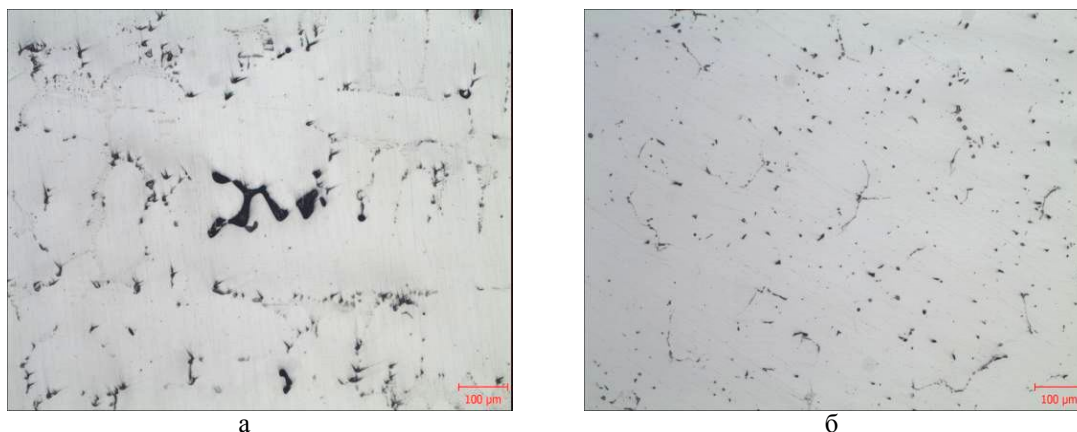


Рис. 3. Микропористость и усадочная рыхлота в материале корпусных деталей из сплавов ВЖЛ14-ВИ и ВХ4Л-ВИ,  $\times 100$ : а – до операции ГИП – вариант «1»; б – после операции ГИП – вариант «2»

В процессе горячего изостатического прессования при температуре  $1120^{\circ}\text{C}$  (вариант «2») и давлении  $160\text{МПа}$  в сплаве ВЖЛ14-ВИ наблюдается практически полное растворение и перекристаллизация эвтектической фазы ( $\gamma$ - $\gamma'$ ) в твердом растворе, а также утонение границ зерен. При этом следует отметить, что распад карбидов типа  $\text{MC}$  с образованием избыточной  $\gamma'$ -фазы, ТПУ-фаз, карбидов  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  в зернограницных и междендритных областях не наблюдается.

Микроструктура материала деталей из сплава ВХ4Л-ВИ, прошедших операцию горячего изостатического прессования при температуре  $1190^{\circ}\text{C}$  и давлении  $160\text{МПа}$ , характерна для гомогенизированного состояния сплава ВХ4Л-ВИ, состоящего из  $\gamma$ -твердого раствора с небольшим количеством карбидов, карбонитридов и эвтектической фазы типа ( $\gamma$ - $\gamma'$ ). Микроструктура материала исследованных деталей после ГИП удовлетворительная и соответствует шкале микроструктур, утвержденной ВИАМ, перегрева нет.

При исследовании микроструктурного состояния деталей, отлитых из сплавов ВХ4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ, прошедших операцию ГИП (вариант «2»), на травленых микрошлифах по контуру «залечившихся» микропор и рыхлот наблюдается выделение небольшого количества интерметаллидных частиц в виде «оторочки» (рис. 4). Данные зоны по месту «залечивания» пор располагаются как в междендритных пространствах, так и на границах зерен. Области, характерные для «рафт»-структуры, в газостатированных корпусных деталях из исследуемых сплавов не обнаружены, что обусловлено достаточно низким содержанием  $\gamma'$ -фазы.

В процессе стандартной термообработки отливок из сплавов ВЖЛ14-ВИ и ВХ4Л-ВИ, состоящей из гомогенизирующего нагрева и старения, происходит выделение из твердого раствора интерметал-

лидных фаз и карбидов типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ . Упрочнение достигается за счет выделения мелкодисперсных карбидов и интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы, что способствует повышению жаропрочных ( $\tau_p$ ) и прочностных ( $\sigma_b$ ) характеристик материала.

При этом следует отметить, что наряду с указанными выше структурными составляющими в сплаве ВХ4Л-ВИ наблюдается выделение частиц игольчатой морфологии избыточной фазы на основе хрома ( $\alpha$ -Cr). При старении сплава ВХ4Л-ВИ интерметаллидная  $\gamma'$ -фаза выпадает в мелкодисперсном состоянии.

В результате указанных структурных изменений в процессе стандартной термообработки также происходит повышение структурной однородности сплавов.

Методом растровой электронной микроскопии при увеличении  $\times 5000$  изучали микроструктурное состояние деталей из сплава ВХ4Л-ВИ, обработанных по вариантам «1», «2» и «3», после электролитического травления микрошлифов в реактиве, состоящем из  $80\text{ мл H}_3\text{PO}_4$  и  $10\text{ г CrO}_3$ . В результате проведенного исследования было установлено, что в исходном сплаве (до проведения ГИП) основное количество упрочняющей интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы растворено в  $\gamma$ -твердом растворе (рис. 5 а). Незначительное количество выделившихся частиц  $\gamma'$ -фазы имеют, в основном, кубическую морфологию, размер которых составляет  $0,27 \dots 0,5\ \mu\text{m}$ . В междендритных пространствах исходного сплава ВХ4Л-ВИ (вариант «1») наряду с частицами  $\gamma'$ -фазы также наблюдается некоторое выделение карбидов типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ . Микроструктура материала исследуемых деталей после газостатирования при температуре  $1190^{\circ}\text{C}$  (вариант «2») аналогична структуре сплава ВХ4Л-ВИ до ГИП и характерна для гомогенизированного состояния, при котором практически вся упрочняющая  $\gamma'$ -фаза растворена в  $\gamma$ -матрице (рис. 5 б).

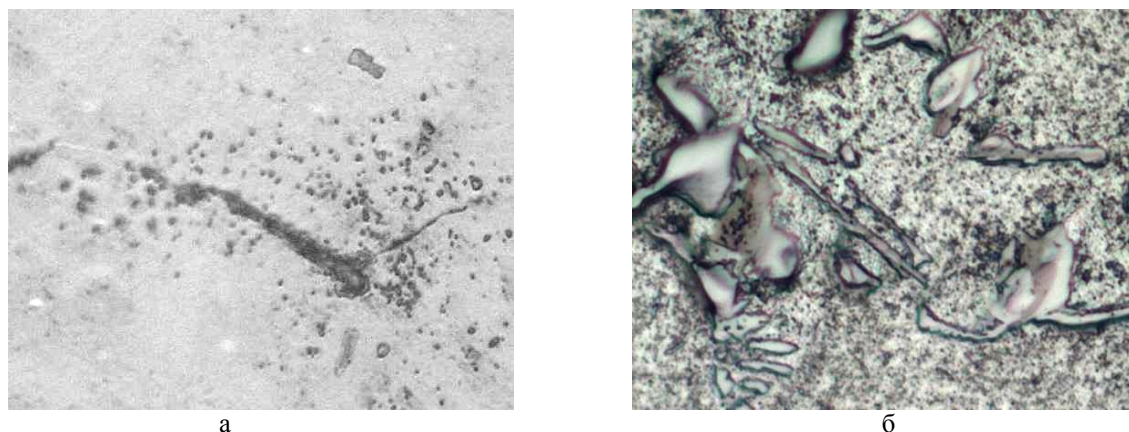


Рис. 4. Зоны «залечивания» микропор в корпусных деталях после операции ГИП,  $\times 800$ :  
а – сплав VX4Л-ВИ; б – сплав ВЖЛ14-ВИ

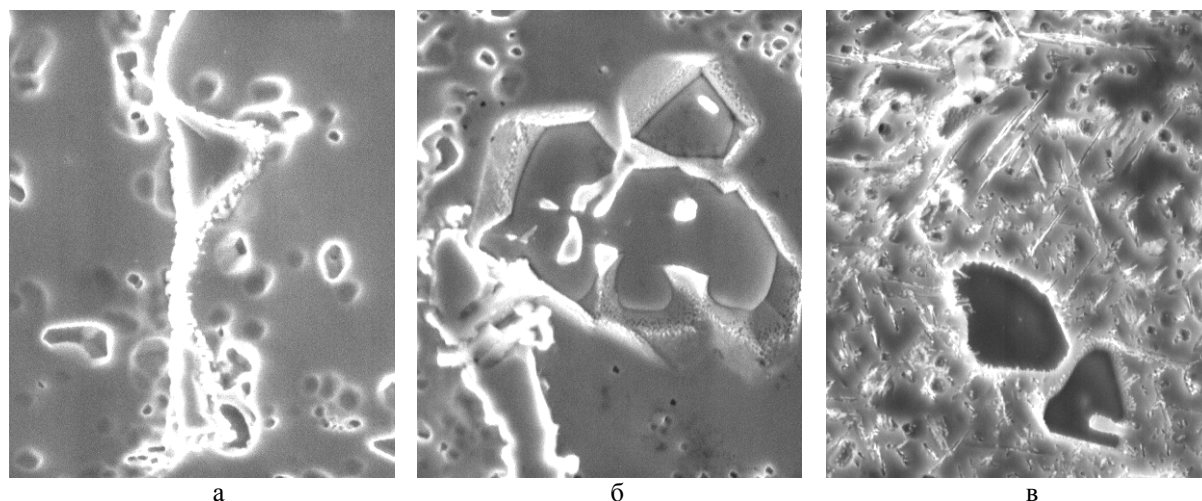


Рис. 5. Микроструктура корпусных деталей из сплава VX4Л-ВИ,  $\times 5000$ :  
а – до ГИП (без термообработки) – вариант «1»; б – после ГИП (без термообработки) – вариант «2»;  
в – после ГИП + стандартная термообработка – вариант «3»

Проведение 16-ти часового старения при температуре  $900^{\circ}\text{C}$  после гомогенизации ( $1180^{\circ}\text{C}$ , 4 часа) (вариант «3») способствует карбидному и интерметаллидному упрочнению  $\gamma$ -твердого раствора (рис. 5 в). При этом количество выделившихся карбидов и частиц  $\gamma'$ -фазы существенно увеличивается, а размеры их уменьшаются примерно в 3 раза.

Механические и жаропрочные свойства определяли на пальчиковых образцах (сечением 12мм), отлитых методом равноосной кристаллизации из сплавов VX4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ, изготовленных по вариантам «1», «2» и «3», как до термообработки, так и после проведения термообработки по стандартным режимам.

Из данных, представленных на гистограммах (рис. 6), видно, что механические и жаропрочные свойства образцов из сплавов VX4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ до ГИП с проведением термообработки по стан-

дартному режиму и по варианту «3» (после ГИП + стандартная термообработка) – удовлетворительные и отвечают требованиям НТД.

После ГИП (вариант «2») в образцах обоих сплавов наблюдается снижение значений предела прочности ( $\sigma_b$ ) [а в сплаве ВЖЛ14-ВИ и длительной прочности ( $\tau_p$ )], обусловленное недостаточным упрочнением  $\gamma$ -твердого раствора вследствие отсутствия операции старения после проведения газостатирования.

Термическая обработка (как до, так и после газостатирования) по стандартному режиму способствует повышению механических и жаропрочных свойств исследуемых сплавов за счет более полного упрочнения матрицы в процессе 16-часового старения. Термообработка обеспечивает уменьшение разброса физико-механических характеристик вследствие повышения структурной однородности сплава.

Наиболее благоприятное сочетание прочностных ( $\sigma_b$ ) и пластических ( $\delta$ ,  $\Psi$  и КСУ) характеристик, а также длительной прочности ( $\tau_p$ ), получено на образцах, обработанных по варианту «3» (ГИП + термообработка по стандартному режиму).

Кроме того, был опробован совмещенный режим горячего изостатического прессования (ГИП) и высокотемпературной термической обработки с последующим проведением старения по режиму, соот-

ветствующему данному сплаву. При этом полученные механические и жаропрочные свойства имели значения, удовлетворяющие требованиям НТД, и находились на уровне 3<sup>го</sup> варианта обработки.

Микроструктура пальчиковых образцов (сечением 12мм), обработанных по различным вариантам как до, так и после термообработки аналогична структуре, наблюдаемой в деталях, обработанных в соответствии с указанными режимами.

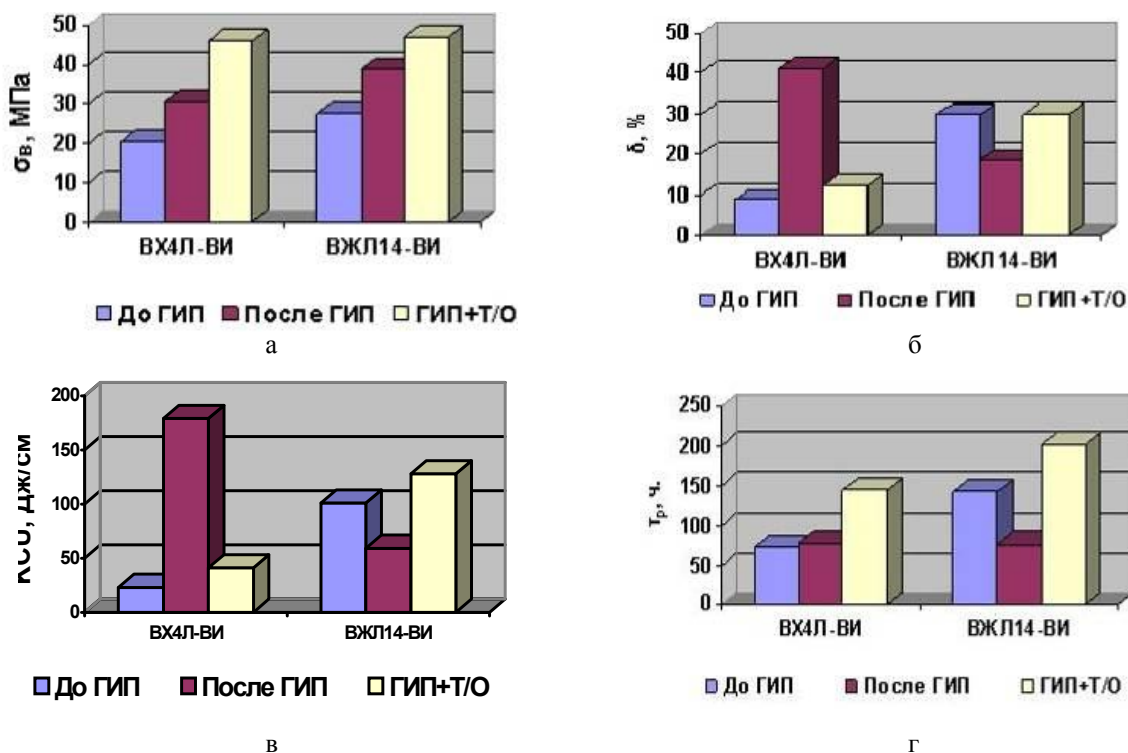


Рис. 6. Гистограммы механических (а, б, в) и жаропрочных (г) свойств сплавов VX4Л-ВИ и ВЖЛ14-ВИ – до ГИП (стандартная термообработка), после ГИП (без термообработки) и после ГИП + стандартная термообработка: а – предел прочности  $\sigma_b$ , МПа; б – относительное удлинение  $\delta$ , %; в – относительное сужение  $\Psi$ , %; г – время до разрушения  $\tau_p$ , ч.

## Выводы

1. Качество материала корпусных деталей, а также образцов, отлитых из жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ14-ВИ и VX4Л-ВИ, как до, так и после проведения процесса горячего изостатического прессования с последующим проведением термообработки по стандартному режиму, соответствует требованиям технической документации.

2. Горячее изостатическое прессование способствует «залечиванию» микропор и рыхлот, располагающихся во внутренних объемах металла.

3. Термическая обработка как до, так и после газостатирования способствует повышению предела прочности ( $\sigma_b$ ), а также длительной прочности ( $\tau_p$ ) исследуемых сплавов за счет более полного упроч-

нения матрицы (в процессе старения). Кроме того, при термообработке по стандартному режиму происходит повышение структурной однородности сплава вследствие релаксации напряжений, введенных в процессе горячего изостатического прессования.

4. Наиболее благоприятное сочетание прочностных ( $\sigma_b$ ) и пластических ( $\delta$ ,  $\Psi$  и КСУ) характеристик, а также длительной прочности ( $\tau_p$ ), получено на образцах, обработанных по варианту «3» (ГИП + термообработка по стандартному режиму).

5. Совмещенный цикл процесса горячего изостатического прессования (ГИП) и высокотемпературной термической обработки с последующим проведением старения в течение 16 часов обеспечивает более высокую производительность, снижение

потребления электроэнергии и значительную экономию затрат по сравнению с отдельными процессами ГИП и термообработки.

### Литература

1. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических промышленных энергетических установок [Текст] ; под ред. Ч. Т. Симса. – М. : Металлургия. – 1995. – 305 с.

2. Качанов, Е. Б. Состояние и перспективы развития работ по жаропрочным сплавам для лопаток турбин [Текст] / Е. Б. Качанов // Технология лёгких сплавов. – 2005. – № 1. – С. 10-17.

3. Мак-Холвин, Дж. М. Многоцикловая усталость никелевых сплавов [Текст] / Дж. М. Мак-Холвин // Жаропрочные сплавы для газовых турбин : матер. Междунар. конф. – М. : Машиностроение. – 1981. – С. 322–341.

4. Падалко, А. Г. Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов [Текст] : монография / А. Г. Падалко – М. : ИЦК Академкнига, 2007. – 230 с.

5. Лысенко, Н. А. Влияние ГИП на структуру и свойства монокристаллических лопаток из сплава ЖС26-ВИ [Текст] / Н. А. Лысенко, В. В. Клочихин, Э. И. Цивирко // Вестник двигателестроения. – 2010. – № 1. – С. 109-115.

6. Влияние горячего изостатического прессования и термообработки на структуру и свойства отливок из жаропрочного никелевого сплава [Текст] / П. Д. Жеманюк, В. В. Клочихин, Н. А. Лысенко и др. // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 1. – С. 9-18.

7. Качество отливок рабочих лопаток турбины, модифицированных наночастицами тугоплавких соединений и обработанных ГИП [Текст] / А. Я. Качан, Н. А. Лысенко, А. С. Дудников и др. // Вестник двигателестроения. – 2014. – №1. – С. 75-81.

8. Сорокин, Л. И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях [Текст] / Л. И. Сорокин // Сварочное производство. – 1997. – № 4. – С. 4-11.

### References

1. Supersplavy II. Zharoprochnye materialy dla aerokosmicheskikh promishlennykh energeticheskikh ustanovok [Superalloys II. Heat-resistant materials for aerospace industrial power plants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1995. 305 p.

2. Качанов, Е. Б. Состояние и перспективы развития работ по жаропрочным сплавам для лопаток турбин [The state and prospects for the development of works on heat-resistant alloys for turbine blades]. *Tekhnologiya logkikh splavov*, 2005, no. 1, pp. 10-17.

3. Mac-Holvin, J. M. *Mnogotsiklovaya ustalost nikelovykh splavov* [Multi-cycle fatigue of nickel alloys]. *Zharoprochnye splavy dla gazovykh turbin. Materiali mezhdunar. konf.* [Heat-resistant alloys for gas turbines : proceedings of the international conference]. Moscow, Mashynostroyeniye Publ., 1981, pp. 322–341.

4. Padalko, A. G. *Praktika gorachego izostaticheskogo pressovaniya neorganicheskikh materialov: monografiya* [The practice of hot isostatic pressing of inorganic materials]. Moscow, ITK Akademkniga Publ., 2007, pp. 194-230.

5. Lysenko, N. A., Klochikhin, V. V., Tsevirko, E. I. Vliyanie GIP na strukturu i svoistva monokristallicheskikh lopatok iz splava ЖС26-ВИ [Influence of HIP on the structure and properties of monocrystalline blades from ЖС26-ВИ alloy]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2010, no. 1, pp. 109-115.

6. Zhemaniuk, P. D., Klochikhin, V. V., Lysenko, N. A. Vliyanie gorachego izostaticheskogo pressovaniya i termoobrabotki na strukturu i svoistva otlivok iz zharoprochnogo nikelovogo splava [The effect of hot isostatic pressing and heat treatment on the structure and properties of castings from a heat-resistant nickel alloy]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2013, no. 1, pp. 9-18.

7. Качан, А. Я., Лысенко, Н. А., Дудников, А. С. Kachestvo otlivok rabochikh lopatok turbiny, modifitsirovannykh nanochastitsami tugoplavkikh soedineniy i obrabotannykh GIP [Quality of castings of turbine blades modified by nanoparticles of refractory compounds and processed with HIP]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2014, no. 1, pp. 75-81.

8. Sorokin, L. I. Svarivaemost zharoprochnykh splavov, primenyayemykh v aviatsionnykh gazoturbinnykh dvigateliakh [Weldability of heat-resistant alloys used in aircraft gas turbine engines]. *Svarochnoye proizvodstvo*, 1997, no. 4, pp. 4-11.

Поступила в редакцию 08.05.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технологии авиационных двигателей» А. Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

**СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ВІДЛИВОК КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБІНИ ІЗ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ**

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

Вивчено вплив процесу гарячого ізостатичного пресування (ГІП) на щільність, мікроструктуру та фізико-механічні властивості відливок корпусних деталей турбіни із нікелевих жароміцних сплавів ВХ4Л-ВІ і ВЖЛ14-ВІ. Комплексні дослідження показали, що ГІП забезпечує одержання більш якісних відливок за рахунок зниження усадочної мікропористості. Проведення операції газостатування з послідуною термообробкою по стандартному режиму сприяє підвищенню механічних та жароміцних властивостей. Аналіз отриманих результатів дозволяє розглянути можливість поєднання процесу ГІП та високотемпературної термічної обробки з послідуючим проведенням старіння, що забезпечує більш високу продуктивність, зниження споживання електроенергії і значну економію витрат порівняно з окремими процесами ГІП та термообробки.

**Ключові слова:** жароміцні сплави, корпусні відливки, газостатування, мікропористість.

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF CASTINGS OF BODY PARTS TURBINES FROM NICKEL ALLOYS AFTER HOT ISOSTATIC PRESSING**

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

The influence of hot isostatic pressing (HIP) on the density, microstructure and physico-mechanical properties of castings of body parts of the turbine from heat-resistant Nickel alloys ВХ4Л-ВІ and ВЖЛ14-ВІ. Comprehensive studies have shown that the HIP provides the quality of castings by reducing shrinkage microporosity. Surgery of the hip, followed by heat treatment according to the standard mode enhances the mechanical and heat resistant properties. The analysis of obtained results allows to consider the possibility of combining the process of the HIP and high-temperature thermal processing followed by aging, which provides higher performance, lower energy consumption and significant cost savings compared to the individual processes of the HIP and heat treatment.

**Keywords:** heat-resistant alloys, body casting, 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, профессор, профессор кафедры машин и технологии литейного производства Запорожского национального технического университета (ЗНТУ), Запорожье, Украина, e-mail: naumik@zntu.edu.ua.

**Lysenko Nataliia Alexeyevna** – project engineer in chief of metallurgical engineers department JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Klochikhin Vladimir Valerievich** – chief of metallurgical engineers department JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Naumyk Valeriy Vladilenovich** – doctor of technical sciences, professor, Professor of the Department of foundry machinery and technology of Zaporizhzhya National Technical University (ZNTU), Zaporozhye, Ukraine, e-mail: naumik@zntu.edu.ua.