

УДК 669.018

А.И. ВИНОГРАДОВ, А.А. ЖУКОВ, О.В. НОВИКОВА, В.А. КОЧЕТКОВ

*ГОУ ВПО «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева», Рыбинск, Россия*

## ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГТД СПОСОБОМ ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

*На основе использования методов рентгеноструктурного и электронного анализа показана возможность восстановления структуры и свойств сплава ЖС6У-ВИ в лопатках ГТД после эксплуатации. При проведении исследований использован метод упругих релаксационных свойств, который позволил выявить влияние процессов упорядочения и рекристаллизации на восстановление эксплуатационных характеристик сплава. В результате проведенных экспериментальных исследований установлены основные закономерности структурных и фазовых превращений при газостатическом прессовании и определены технологические режимы восстановительной обработки. Приведены практические результаты восстановительной обработки лопаток ГТД.*

**Ключевые слова:** газостатическое прессование, лопатки ГТД, рентгеноструктурный и электронный анализ, внутреннее трение, упорядочение структуры, рекристаллизация.

### Введение

На основе использования методов рентгеноструктурного и электронного анализа показана возможность восстановления структуры и свойств сплава ЖС6У-ВИ в лопатках ГТД после эксплуатации. Кроме металлографического анализа проводили механические испытания, а также использовали метод упругих и релаксационных свойств, который позволил выявить влияние процессов упорядочения и рекристаллизации на восстановление структурного состояния лопаток после наработки. В результате экспериментальных исследований установлены закономерности структурных и фазовых превращений в процессе горячего газостатического прессования (ГИП). Приводятся практические результаты использования ГИП для повышения качества и эксплуатационного ресурса лопаток ГТД.

### 1. Постановка проблемы

Для изготовления деталей горячего тракта современных авиационных двигателей применяются жаропрочные гетерофазные сплавы на никелевой основе типа ЖС6У ВИ, ЖС26 и т.д. Основными методами изготовления деталей из данного сплава являются: равноосное литьё по выплавляемым моделям, литьё с направленной кристаллизацией и монокристаллическое литьё. Всем видам литья присуще наличие таких дефектов, как структурная и фазовая неоднородность, микропористость, дислокационное несовершенство структуры, которые, в свою оче-

редь, определяют надежность и эксплуатационные свойства деталей.

Длительная эксплуатация рабочих лопаток турбины сопровождается развитием обратимых и необратимых структурных и фазовых превращений, приводящие к исчерпанию работоспособности сплава.

Детали горячего тракта газотурбинных двигателей 5-го поколения, работающие в более жестких условиях при повышенных температурах эксплуатации и более высоких нагрузках требуют применение новых подходов к технологии их изготовления. Дальнейшее повышение эксплуатационных свойств деталей горячего тракта газотурбинных двигателей невозможно без кардинального изменения технологии их изготовления. Одним из методов повышения качества литых деталей из гетерофазных сплавов является горячее изостатическое прессование (ГИП).

Сущность ГИП заключается в одновременном воздействии на обрабатываемую деталь высокого барометрического давления и высокой температуры. В результате ГИП происходит залечивание внутренних дефектов структуры отливки, вследствие чего увеличивается плотность материала отливки, уменьшается дефективность тонкой структуры, повышаются эксплуатационные характеристики деталей (усталостная и длительная прочность). Поэтому своевременная и эффективная восстановительная термообработка лопаток ГТД является актуальной проблемой и имеет важное научное и практическое значение. Несмотря на широкое использование ГИП, в настоящее время отсутствуют аргументиро-

ванные рекомендации по выбору технологических режимов ГИП обеспечивающих:

1) устранение (залечивание) микро и макродефектов;

2) восстановление исходной структуры сплава.

Это обусловлено:

1) многообразием и сложностью структурных и фазовых превращений в жаропрочных никелевых сплавах;

2) необходимостью сбалансированного сочетания механических и эксплуатационных свойств;

3) особенностями протекания структурных и фазовых превращений при одновременном воздействии температуры и давления.

Цель работы – оценка эффективности ГИП рабочих лопаток ГТД и дальнейшее развитие теории и технологии баротермической обработки жаропрочных никелевых сплавов.

## 2. Изложение основного материала

На начальной стадии исследований рассмотрено влияние термической и малоцикловой усталости на структуру и жаропрочность сплава ЖС6У-ВИ.

Предложен безразмерный критерий для оценки формы включений  $\gamma'$  – фазы. Выполнен анализ структуры, фазового состава и свойств сплава ЖС6У-ВИ в исходном состоянии и после эксплуатации в течение  $\approx 12.000$  час. При этом выявлены следующие структурные изменения:

– наряду с монокарбидами  $MeC$  формирование более сложных карбидов  $Me_6C$  и  $Me_{23}C_6$ ;

– трансформация  $\gamma'$  – фазы из кубической в глыбообразную, частичное растворения  $\gamma'$  – фазы и выделения «сыпи» в  $\gamma$  – твердом растворе;

– коалесценция частиц  $\gamma'$  – фазы и формирование «рафт» – структуры;

– выделение пластин топологически плотноупакованной  $\sigma$  – фазы;

– образование микропор в  $\gamma$  – матрице и надрывов по поверхности раздела «рафт» частиц и матрицы.

Перечисленные изменения в структуре сплава приводят к снижению предела прочности  $\sigma_B$  до (630...760) МПа и предела выносливости  $\sigma_{-1}$  до (150...165) МПа.

Усталостные испытания лопаток проводили согласно ОСТ 1.0870-77 на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400.

Оценка пористости лопаток после эксплуатации осуществлялась на шлифах, вырезанных из пера лопаток с использованием металлографического микроскопа «НЕОФОРТ-21» путем сканирования

4...5 полей и последующей обработки экспериментальных данных по программе EXPRES.

В результате количественного металлографического анализа установлено:

– суммарная доля пор на поверхности шлифа составляет (0,7...1,8)%;

– средний размер пор (5,5...10,6) мкм;

– максимальный размер пор (32...68) мкм.

Необходимо отметить, что на температурной зависимости внутреннего трения образцов после обработки имеется максимум при температуре ( $\approx 450...500$ ) °С который обусловлен эффектом горячей пластической деформации при многократных термоциклических напряжениях. Это согласуется с максимальным значением предела текучести  $\sigma_{02}$  сплава ЖС6У-ВИ при 500 °С [1].

Следующий этап работы посвящен выбору режимов ГИП. Очевидно, что наибольший эффект термической обработки можно получить только с учетом характеристических температур сплавов – это температуры ликвидуса, солидуса, растворения (или выделения)  $\gamma'$  – фазы, эвтектики ( $\gamma + \gamma'$ ) и карбидов  $M_xC_y$ .

Специфика структурных и фазовых превращений происходящих в сплавах в условиях баротермического воздействия изложены в работах [2, 3].

Влияние давления на величину характеристических температур учитывается с помощью соответствующих барических коэффициентов

$$B = dT/dP \text{ (К/МПа)}.$$

Значения этих коэффициентов приведены в работе [3].

С учетом этих коэффициентов получены следующие характеристические температуры для сплавов типа ЖС при давлении  $P = 170$  МПа:

– плавление эвтектики – (1327...1293) °С;

– конец кристаллизации эвтектики – (1305...1242) °С;

– температура полного растворения  $\gamma'$  – фазы – (1300...1280) °С;

– температура выделения  $\gamma'$  – фазы (при охлаждении) – 1295 °С;

– температура солидуса (при нагреве) – 1345 °С;

– температура солидуса (при охлаждении) – 1255 °С;

– температура ликвидуса (при нагреве) – 1415 °С;

– температура ликвидуса (при охлаждении) – 1390 °С;

– растворение карбидов (при нагреве) – (1355...1403) °С;

– выделение карбидов (при охлаждении) – (1378...1330) °С.

В зависимости от характера структурных изменений, прошедших в сплаве при эксплуатации, температура ГИП должна назначаться из условий:

1) обеспечения растворения  $\gamma'$  – фазы (1280...1300)°С;

2) обеспечения растворения образовавшихся сложных карбидов (1355...1400)°С.

При этом необходимо также учитывать, что температура нагрева не должна превышать температуру солидуса – 1345°С.

С учетом изложенных рекомендаций выбраны следующие режимы ГИП:

– температура нагрева  $t = 1250 \pm 10$ °С,

– давление  $P = 170$  МПа,

– время выдержки  $\tau = 3$  часа.

После газостатирования временное сопротивление составило  $\sigma_B = 920$  МПа относительное удлинение  $\delta = 4,4\%$ , что удовлетворяет требованиям ТУ ( $\sigma_B \geq 850$  МПа,  $\delta \geq 3,0\%$ ). Предел выносливости лопаток после газостатирования увеличился на 36 % и составил  $\sigma_{-1} = 220$  МПа. При этом суммарная доля пор снижается по сравнению с наработкой в 2...4 раза и составляет (0,30...0,50)% средний размер оставшихся пор 3,2...4,6 мкм, максимальный размер пор уменьшается в 3...4 раза и равен 11,0...24,0 мкм.

Микроструктура сплава после ГИП в значительной степени восстанавливается: происходит вторичное выделение  $\gamma'$  – фазы в виде строчек, а также в форме двойной эвтектики ( $\gamma - \gamma'$ ), практически полностью устранены цепочные включения высокотемпературных карбидов.

Происходящие структурные изменения согласуются с температурной зависимостью внутреннего трения образцов после наработки и последующего газостатистического прессования. На кривой исчез деформационный максимум ( $t=450...500$ °С) в результате рекристаллизации, но появился низкотемпературный максимум в интервале ( $t=450...500$ °С).

Появление этого максимума можно связать с формированием упорядоченных структур в системе Ni-Cr (К – состояния) в результате медленного охлаждения образцов в газостате. Известно [4], что эти

структуры играют определяющую роль в формировании  $\gamma'$  – фазы.

Таким образом, использование метода внутреннего трения, при изучении прессов ГИП, дополнительно к металлографическому анализу подтвердило возможность восстановления исходной структуры сплава ЖС6У-ВИ после эксплуатации.

## Выводы и рекомендации

1. Выявлены особенности структурных и фазовых превращений в сплаве ЖС6У-ВИ в процессе термоциклических воздействий.

2. С учётом барических коэффициентов и температур фазовых превращений назначены технологические режимы ГИП.

3. В результате проведения газостатистического прессования образцов и лопаток после эксплуатации (наработки), произошло восстановление структуры и свойств сплава ЖС6У-ВИ до исходного уровня.

4. Впервые показана возможность оценки эффективности ГИП по изменению характера температурной зависимости внутреннего трения.

5. Подтверждена целесообразность практического использования предлагаемого метода восстановления эксплуатационных свойств для лопаток ГТД.

## Литература

1. Патон Б.Е. *Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления* / Б.Е. Патон, Г.Н. Строганов, С.Т. Кишкин и др. – К.: Наук. думка, 1987 – 256 с.

2. Шиняев А.Я. *Фазовые превращения и свойства сплавов при высоком давлении* / А.Я. Шиняев – М.: Наука, 1973 – 155 с.

3. Падалко А.Г. *Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов* / А.Г. Падалко – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007 – 267 с.

4. Симса Ч.Т. *Суперсплавы. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок* / Под ред. Симса Ч.Т., Столлоффа Н.С., Хагеля У.К. в 2-х книгах. Кн. 1 – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.

Поступила в редакцию 15.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. зав. кафедрой, проректор А.А. Шатульский, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия.

**ТЕОРИЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЮЮЧОЇ ОБРОБКИ ЛОПАТОК ГТД  
ЗА ДОПОМОГОЮ ГАЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ***О.І. Виноградов, А.О. Жуков, О.В. Новікова, В.А. Кочетков*

На основі використання методів рентгеноструктурного і електронного аналізу показана можливість відновлення структури і властивостей сплаву ЖС6У-ВІ в лопатках ГТД після експлуатації. При проведенні досліджень був використаний метод пружних релаксаційних властивостей, що дозволив виявити вплив процесів впорядкування і рекристалізації на відновлення експлуатаційних характеристик сплаву. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлені основні закономірності структурних і фазових перетворень при газостатичному пресуванні і визначені технологічних режимів відновлюючої обробки. Наведено практичні результати відновлюючої обробки лопаток ГТД.

**Ключові слова:** газостатичне пресування, лопатки ГТД, рентгено-структурний і електронний аналіз, внутрішнє тертя, впорядкування структури, рекристалізація.

**THEORY AND TECHNOLOGY OF RESTORATION TREATMENT  
FOR GAS-TURBINE ENGINES BLADES BY METHOD  
OF GAS-STATIC COMPRESSION***A.I. Vinogradov, A.A. Zhukov, O.V. Novikova, V.A. Kochetkov*

Opportunity of restoration of structure and properties of alloy GS6U-VI for gas-turbine engines blades after its exploitation was shown on bases of methods roentgen- structure and electronical analyses. In the process of investigation was used method of elastic and relaxation properties, which provided for expose of influence of process of regulation and recrystallization on restoration of exploitation properties of alloy. The results of experimental investigation gave opportunity to receive the bases conformity with low for structure and phases transformations during gas-static compression and determine technological parameters of restoration treatment. The article represent practical results of restoration treatment for gas-turbine engines blades.

**Key words:** gas-static compression, gas-turbine engines blades, roentgen- structure and electronical analyses, internal friction, regulation of structure, recrystallization.

**Виноградов Александр Иванович** – главный металлург, НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия, e-mail: alexandr.vinogradov@npo-saturn.ru.

**Жуков Анатолий Алексеевич** – канд. техн. наук, профессор кафедры металловедения, литья и сварки, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия, e-mail: gukovv@rambler.ru.

**Новикова Ольга Викторовна** – зам. главного металлурга, НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия, e-mail: alexandr.vinogradov@npo-saturn.ru.

**Кочетков Владимир Андреевич** – канд. техн. наук, зам. главного металлурга, НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия, e-mail: alexandr.vinogradov@npo-saturn.ru.