

УДК 621.777:669.018.28

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-10-14

И.Л. Светлов<sup>1</sup>, К.К. Хвацкий<sup>1</sup>, М.А. Горбовец<sup>1</sup>, М.С. Беляев<sup>1</sup>**ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

*Рассмотрено влияние горячего изостатического прессования (ГИП) на статические и циклические механические характеристики литейных жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС). Предложен коэффициент, который позволяет дать численную оценку воздействия ГИП на анализируемые характеристики механических свойств. Рассмотрено изменение следующих характеристик при различных температурах испытания: пределов прочности и текучести, предела длительной прочности на базе 100 ч, пределов многоциклового и малоциклового усталости. Отсутствует отрицательное влияние ГИП, т. е. снижение каких-либо характеристик. При статическом нагружении, а также при испытаниях на МЦУ влияние ГИП небольшое или отсутствует. Однако ГИП вызывает значительное повышение пределов многоциклового усталости – при комнатной температуре оно составляет 27–46%, при эксплуатационных: 5–23%.*

**Ключевые слова:** литейные жаропрочные никелевые сплавы, горячее изостатическое прессование (ГИП), статические и циклические механические характеристики.

*An influence of Hot Isostatic Pressing (HIP) on static and fatigue mechanical properties of casting Ni-based superalloys was investigated in this work. A special coefficient was proposed to evaluate quantitatively the effect of HIP on mechanical properties. Changing of UTS, yield strength, rupture strength at 100 h, LCF and HCF characteristics was considered at different test temperatures. There is no negative effect of HIP on mechanical properties. There is also no a considerable effect of HIP at tension and LCF characteristics at static loading, but HIP increased HCF by 27–46% at room temperature and 5–23% at operating temperatures.*

**Keywords:** casting Ni-based superalloys, Hot Isostatic Pressing (HIP), static and fatigue mechanical properties.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Лопатки турбин, отлитые из никелевых жаропрочных сплавов с поликристаллической и монокристаллической структурой, содержат различного рода дефекты, в том числе и поры [1, 2]. Эти поры возникают на разных стадиях производства лопаток и в процессе их эксплуатации: при кристаллизации из-за ограниченного доступа расплава к фронту роста, при термической обработке, в частности при высокотемпературной гомогенизации, в результате растворения неравновесных ликватов, а также в процессе высокотемпературной ползучести вследствие особенностей дислокационного механизма деформации [3–5]. Наибольшую опасность представляют крупные кристаллизационные поры, возникающие в междендритном пространстве. Хорошо известно, что поры являются концентраторами напряжений, поэтому от них стараются избавиться всеми способами. Наиболее радикальный способ уплотнения литой структуры – горячее изостатическое прессование (ГИП) в газостатах. В научно-технической литературе достаточно подробно освещены данные о технологических принципах ГИП [6–8], критериях выбора оптимальных параметров (температура, давление, продолжительность) [9, 10], о механиз-

мах «залечивания» пор [11, 12]. Имеются также противоречивые сведения о влиянии ГИП на механические свойства образцов и лопаток [13–15].

В статье проведено систематическое обобщение данных из литературных источников и результатов экспериментальных исследований влияния ГИП на статические и циклические механические свойства литейных никелевых жаропрочных сплавов в широком температурном интервале, накопленных в течение значительного периода в ВИАМ и других организациях.

**Материалы и методы**

Объектами исследований служили образцы литейных никелевых жаропрочных сплавов различных поколений с поликристаллической и монокристаллической структурой, а также монокристаллические лопатки турбин. Исследованные сплавы, их структура и поколение, к которому относится сплав в соответствии с международной классификацией, приведены в табл. 1. Вполне естественно, что в различных сплавах, условно относящихся к одному и тому же поколению, основные легирующие элементы присутствуют в различных комбинациях. Жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) первого поколения содержат

Таблица 1

## Жаропрочные никелевые сплавы

Сплав	Структура	Поколение
ЖС6У ВЖЛ12У ЖС26	Равноосная Равноосная Направленная	I
ЖС32 ЖС36	Направленная Монокристаллическая	II
ВЖМ5 ВЖМ5У	Монокристаллическая	III
ВЖМ4	Монокристаллическая	IV
ВКНА-4-ВИ	Монокристаллическая	–

традиционный набор легирующих элементов, таких как Al, Ti, Cr, Mo, W, Ta, Nb, Hf. В состав ЖНС второго и третьего поколений входит легирующий элемент рений в различной концентрации. К четвертому поколению относятся ренийсодержащие ЖНС, дополнительно легированные рутением. Каждое новое поколение ЖНС позволяет повысить рабочую температуру турбинной лопатки на 20–25°C. Использование в качестве объектов исследования ЖНС различных поколений позволило выявить общие закономерности влияния ГИП на механические свойства сплавов, несмотря на различия в составе и структуре. Все испытания проводили на образцах после полной термической обработки, соответствующей определенной марке сплава.

Испытания на длительную прочность и ползучесть проводили на цилиндрических образцах  $\varnothing 5$  мм и длиной рабочей части 25 мм в условиях одноосного растяжения на компьютеризированных стендах ZST2/3-ВИЭТ в соответствии с требованиями ГОСТ 10145 «Металлы. Метод испытания на длительную прочность» и ГОСТ 3248 «Металлы. Метод испытания на ползучесть». Испытания на ползучесть проводили с замером в процессе испытаний продольной деформации образцов. В результате испытаний для каждого образца были получены первичные кривые ползучести, начиная с момента приложения основной нагрузки и до разрушения образца, и экспериментальные значения времени до разрушения  $\tau_r$  и относительного удлинения  $\epsilon_r$ .

Испытания на малоцикловую усталость (МЦУ) и определение пределов МЦУ проведены на машинах PSB 10 фирмы SCHENCK в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502 на гладких цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 5 мм, поверхность которых подвергалась продольному шлифованию. Испытания проведены в условиях циклического растяжения при коэффициенте асимметрии  $R=0,1$ , форма цикла нагружения близка к треугольной. Контролируемый параметр – нагрузка, частота нагружения составляла 1 Гц. Температура измерялась непосредственно на рабочей части образца с помощью присоединенной термопары. Средние значения предела МЦУ определены на базе  $10^4$  циклов по результатам

испытаний партии образцов 10–15 шт.

Испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) и определение пределов выносливости осуществляли в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502. Испытания проведены на машинах МВИ611М при чистом изгибе с вращением образца. Гладкие корсетные образцы кругового сечения с минимальным диаметром рабочей части 7,5 мм испытаны при симметричном цикле нагружения ( $R=-1$ ), форма цикла близка к треугольной. Контролируемый параметр – нагрузка, частота нагружения составляла 50 Гц. Средние значения предела выносливости определены на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов по результатам испытаний партии образцов 10–15 шт. [16].

## Результаты

Для количественной оценки степени влияния ГИП на механические свойства удобно использовать простой коэффициент

$$K = \frac{\sigma_i^{\text{ГИП}}}{\sigma_i}$$

где  $\sigma_i$  и  $\sigma_i^{\text{ГИП}}$  – механические свойства в исходном состоянии и после ГИП соответственно (пределы прочности и текучести ( $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$ ), длительной прочности ( $\sigma_{100}$ ), многоцикловой и малоцикловой усталости ( $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_{0,1}$ )).

Значения коэффициентов  $K$  для характеристик, определяемых при испытаниях ЖНС на статическое растяжение и длительную прочность, приведены в табл. 2. Видно, что ГИП практически не влияет на пределы прочности и текучести, а также на предел длительной прочности и долговечность образцов ЖНС с равноосной (ЖС6У), направленной (ЖС32) и монокристаллической (ВЖМ4) структурами в исследованном интервале температур – во всех случаях коэффициент  $K$  близок к 1.

Что касается оценки влияния ГИП на жаропрочные свойства ЖНС, то рассчитывать  $K$  следует либо по отношению средних значений пределов длительной прочности  $\sigma_b$ , либо по долговечности (время до разрушения)  $\tau_r$ . Первый вариант предпочтительнее, поскольку разброс данных по долговечности при одинаковых условиях испытаний довольно высокий. Сравнительные кривые

Таблица 2

**Влияние ГИП на механические свойства ЖНС,  
определяемые при испытаниях на растяжение и длительную прочность**

Сплав	Коэффициент определяемой характеристики	Значения коэффициента $K$ , при температурах, °С			
		20	800	1000	1150
ЖС32 [13]	$K = \frac{\sigma_{в}^{ГИП}}{\sigma_{в}}$	1,08	–	1,0	–
	$K = \frac{\sigma_{0,2}^{ГИП}}{\sigma_{0,2}}$	1,04	–	1,0	–
	$K = \frac{\tau_{р}^{ГИП}}{\tau_{р}}$	–	–	1,12	–
ЖС6У	$K = \frac{\sigma_{100}^{ГИП}}{\sigma_{100}}$	–	1,05	–	–
ВЖМ4 [11]	$K = \frac{\tau_{р}^{ГИП}}{\tau_{р}}$	–	–	–	1,12

Таблица 3

**Влияние ГИП на многоцикловую усталость образцов и лопаток**

Сплав	Температура испытания, °С	$K = \sigma_{-1}^{ГИП} / \sigma_{-1}$	МнЦУ: $\sigma_{-1}$ , МПа, при $N=2 \cdot 10^7$ цикл (среднее значение) в состоянии	
			исходном	после ГИП
ВЖЛ12У	700	1,2	–	–
	900	1,05	–	–
ЖС26НК	900	1,12	320	360
ЖС36	20	1,46	260	380
ВЖМ5	20	1,40	300	420
	900	1,17	340	400
	1000	–	–	280
ВЖМ5У	20	1,46	300	440
	900	1,23	340	420
ВЖМ4	20	1,27	300	380
	900	1,11	360	400
	1000	–	280	–
	1100	–	200	–
ЖС6У (лопатка)	20	1,30	–	–
ЖС32 (лопатка) [13]	20	1,4	–	–

Таблица 4

**Влияние ГИП на малоцикловую усталость при «мягком» цикле нагружения**

Сплав	Температура испытания, °С	$K = \sigma_{0,1}^{ГИП} / \sigma_{0,1}$	МЦУ: $\sigma_{0,1}$ , МПа, при $N=10^4$ цикл (среднее значение) в состоянии	
			исходном	после ГИП
ЖС32У	750	1,04	980	1020
ВЖМ5	750	1,00	1040	1040
	850	1,04	940<001>	980<001>
		1,00	740<011>	740<011>
1,02	900<111>	920<111>		
ВЖМ5У	850	1,04	960<001>	1000<001>
		1,02	960<111>	980<111>
ВКНА-4-ВИ	850	1,00	480	480
ВЖМ4	900	1,00	980	980

ползучести при температуре 1150°C и напряжении 110 МПа монокристаллов сплава ВЖМ4 с ориентацией <001> в исходном состоянии и после ГИП приведены на рис. 1. Исходя из значения

$$K = \tau_p^{\text{ГИП}} / \tau_p = 1,12 \quad (\text{см. табл. 2}),$$

можно сделать вывод об отсутствии влияния ГИП на ползучесть монокристаллов ВЖМ4 при высокой температуре, что согласуется с результатами Рида, полученными при испытании монокристаллов CMSX-4 при тех же условиях.

Аналогичные данные по влиянию ГИП на характеристики циклической прочности, в частности на многоцикловую (МнЦУ) и малоцикловую (МЦУ) усталость образцов и лопаток, приведены в табл. 3 и 4.

По данным табл. 3 видно, что ГИП повышает предел многоциклового усталости ЖНС при комнатной и высоких температурах. Значительное повышение наблюдается при комнатной температуре при испытании как образцов, так и лопаток, оно составляет 27–46%. Наличие покрытий на лопатках не оказывает существенного влияния на свойства после ГИП. В работе [15] приведены результаты испытаний на МнЦУ при комнатной температуре лопаток из сплава ЖС32 с композиционным покрытием и показано, что ГИП повышает предел усталости на 25%. При высоких температурах влияние ГИП уменьшается и при температуре 900°C повышение предела усталости при испытании образцов изменяется в интервале 5–23%. При этом более высокий прирост отмечается у сплавов с направленной и монокристаллической структурой по сравнению со сплавом ВЖЛ12У с равноосной структурой.

Значительное повышение предела многоциклового усталости вследствие применения процесса ГИП можно объяснить следующим образом. Испытания образцов и лопаток проведены при изгибе – в этих условиях очаг трещины усталости располагается, как правило, на поверхности образца или лопатки. В роли очага усталостной трещины

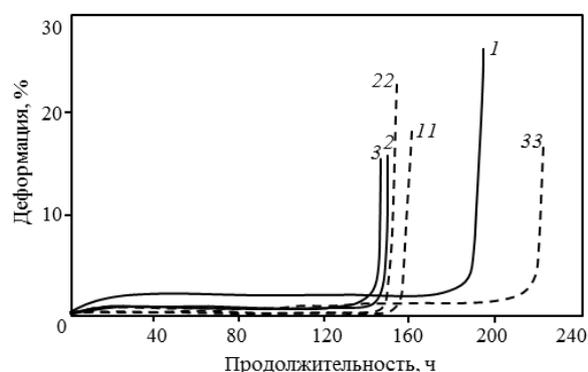


Рис. 1. Кривые ползучести монокристаллов сплава ВЖМ4 с ориентацией <001> при температуре 1150°C и напряжении 110 МПа в исходном состоянии и после ГИП: 1, 2, 3 – исходное состояние; 11, 22, 33 – после ГИП

обычно выступают поверхностные дефекты механической обработки и объемные дефекты в виде литейных и гомогенизационных пор. Если на поверхности рабочей части образцов и лопаток, предназначенных для испытаний на усталость, отсутствуют дефекты и качество поверхности соответствует требованиям нормативной документации, то следующей задачей становится сокращение количества пор. Применение ГИП позволяет устранить значительную часть литейных пор, в том числе в поверхностных слоях материала, и повысить предел МнЦУ.

В случае испытаний при высокой температуре большое влияние на процесс образования и развития трещины усталости оказывает окисление поверхности образца и трещины. Окисление ускоряет процесс зарождения и развития трещины усталости. По этой причине повышение предела МнЦУ при высокой температуре не столь значительно, как при комнатной.

Горячее изостатическое прессование не оказывает существенного влияния на пределы малоциклового усталости при «мягком» и «жестком» циклах нагружения ЖНС в интервале температур 750–900°C. Для «мягкого» нагружения значения предела МЦУ и коэффициента  $K$  для сплавов приведены в табл. 4. Видно, что после ГИП предел МЦУ либо не меняется, либо незначительно возрастает на величину до 4%.

Сравнительные результаты испытаний на МЦУ при «жестком» цикле нагружения и температуре 850°C образцов из сплава ВЖМ4 с монокристаллической структурой с КГО <001> в исходном состоянии и после ГИП приведены на рис. 2 [17]. Видно, что влияние ГИП на МЦУ отсутствует, как и в случае «мягкого» нагружения.

### Обсуждение и заключения

Рассмотрено влияние горячего изостатического прессования (ГИП) на статические и циклические механические характеристики литейных жаропрочных никелевых сплавов

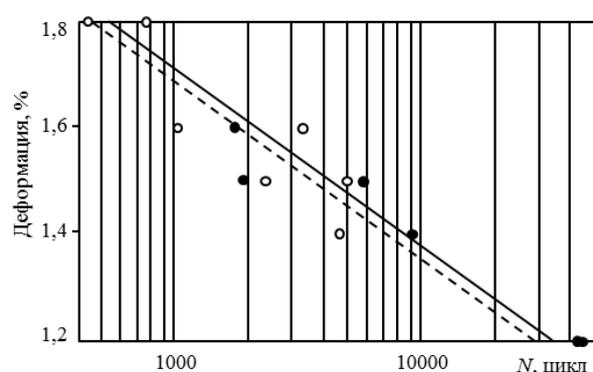


Рис. 2. Испытания на МЦУ образцов из сплава ВЖМ4 с монокристаллической структурой с КГО <001> при заданной деформации и температуре 850°C в исходном состоянии (- -) и после ГИП (—)

(ЖНС). Предложен коэффициент  $K = \sigma_i^{\text{ГИП}} / \sigma_i$ , который позволяет дать численную оценку воздействия ГИП на анализируемые характеристики механических свойств.

Рассмотрено изменение следующих характеристик при различных температурах испытания: пределов прочности и текучести ( $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$ ), предела длительной прочности на базе 100 ч ( $\sigma_{100}$ ), пределов многоциклового ( $\sigma_{-1}$ ) и малоциклового ( $\sigma_{0,1}$ ) усталости. Горячее изостатическое прессование (ГИП) оказывает различное влияние на механические характеристики литейных жаропрочных никелевых сплавов. При этом отсутствует отрицательное влияние ГИП, т. е. снижение каких-либо характеристик.

При статическом нагружении, т. е. при растяжении или испытаниях на длительную прочность,

влияние ГИП небольшое или отсутствует. Следует отметить повышение характеристик статической прочности (до 12%) у сплава четвертого поколения.

При циклическом нагружении ГИП способствует повышению пределов многоциклового усталости. Значительное повышение наблюдается при комнатной температуре при испытании образцов и лопаток (27–46%). При эксплуатационных температурах влияние ГИП исследовано только при испытании образцов, повышение предела МнЦУ составляет 5–23%.

ГИП не оказывает существенного влияния на пределы малоциклового усталости при «мягком» и «жестком» циклах нагружения ЖНС в интервале температур 750–900°C.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
2. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3, Ст.01 (viam-works.ru).
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
4. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34.
5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
6. Береснев А.Г., Разумовский И.М., Маринин С.Ф., Тихонов А.А., Бутрим В.Н. Технологические принципы горячего изостатического прессования монокристаллических лопаток авиационных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов //Цветные металлы. 2011. №12. С. 84–88.
7. Каблов Е.Н., Орлов М.Р., Оспенникова О.Г. Механизмы образования пористости в монокристаллических лопатках турбины и кинетика ее устранения при горячем изостатическом прессовании //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 117–129.
8. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
9. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Конакова И.П., Хадыев М.С. Высокотемпературная газостатическая обработка монокристаллического сплава ЖС36-ВИ //МиТОМ. 2011. №4. С. 9–14.
10. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Мороз В.В., Иноземцев А.А., Коряковцев А.С., Черкашнев Г.В. Высокотемпературная газостатическая обработка монокристаллических рабочих лопаток ГТД //Газотурбинные технологии. 2006. №11–12. С. 30–32.
11. Светлов И.Л., Исходжанова И.В., Евгенов А.Г., Наприенко С.А. Исследование высокотемпературной ползучести и дефектности структуры монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов после горячего изостатического прессования //Деформация и разрушение металлов. 2011. №3. С. 28–31.
12. Epishin A., Fedelich B., Link T., Feldman T., Svetlov I.L. Pore annihilation in a single-crystal nickel-base superalloy during hot isostatic pressing: experiment and modeling //Materials Science and Engineering. A. 2013. V. 586. P. 342–349.
13. Логунов А.В., Тихонов А.А., Маринин С.Ф., Береснев А.Г., Разумовский И.М., Шмотин Ю.Н., Виноградов К.И., Новиков А.С., Вертий К.Е. Газостатическое уплотнение лопаток с монокристаллической структурой из сплава ЖС32 //Материаловедение. 2011. №3. С. 38–45.
14. Береснев А.Г. Влияние горячего изостатического прессования на структуру и свойства литых поликристаллических лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов //Металлы. 2012. №3. С. 48–56.
15. Береснев А.Г., Разумовский И.М., Бутрим В.Н., Быценко О.А., Маринин С.Ф., Тихонов А.А. Горячее изостатическое прессование монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей с защитным композиционным покрытием //Конструкции из композиционных материалов. 2014. №2. С. 20–23.
16. Беляев М.С., Кошкин С.Б., Горбовец М.А. Определение предела усталости жаропрочного сплава способом ступенчатого изменения нагрузки //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 27–30.
17. Epishin A., Link T., Fedelich B., Svetlov I.L., Golubovskiy E.R. Hot isostatic processing of single crystal nickel-base superalloys: mechanism of pore closure and effect on mechanical properties /In: 2-nd European Symposium an Superalloys and their Application «Eurosuperalloys–2014». Giens. 2014. P. 44.