

УДК 669.24:621.762:621.777:621.78

А. А. ПЕДАШ, В. В. КЛОЧИХИН, В. Г. ШИЛО

АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГОРЯЧЕГО ТРАКТА ГТД ПОСЛЕ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

Рассмотрены особенности термической обработки деталей горячего тракта газотурбинных двигателей, в частности дисков турбины, изготовленных из гранульного жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП предварительно компактированных с помощью горячего изостатического прессования. Показано, что проведение как вакуумной, так традиционной термической обработки (с проведением закалки в потоке воздуха создаваемого промышленными вентиляторами) способствует обеспечению уровня механических свойств в заготовках, отвечающего требованиям нормативно-технической документации с существенным запасом.

Ключевые слова: *гранульная металлургия, диски турбины, горячее изостатическое прессование, вакуумная термическая обработка, жаропрочный никелевый сплав*

Введение

Металлургия гранул, сочетающая затвердевание расплава в виде микрослитков-гранул с высокой скоростью охлаждения (10^3 - 10^4 град/с) с их последующей консолидацией (в том числе горячим изостатическим прессованием (ГИП)) и с достижением плотной беспористой структуры позволяет избежать дендритной и зональной неоднородности, возникновения пор, рыхлот и микротрещин. При этом данная технология не чувствительна к химическому составу сплава и к конфигурации заготовки [1, 2].

При изготовлении качественных крупногабаритных заготовок детали, полученные методом гранульной металлургии с помощью ГИП с размерами, близким к конечным, продолжают вытеснять обычные поковки и штамповки. Рост мирового объема производства деталей полученных металлургией гранул составляет порядка 10% в год [1]. Важные преимущества данной технологии заключаются в том, что она обеспечивает получение коэффициента использования материалов до 95%, высокую равномерность химического состава и, соответственно, свойств, что является крайне важным для изделий ответственного назначения.

При реализации технологической цепочки получения дисков турбины ГТД неизбежным является проведение горячего изостатического прессования капсулы заполненной гранулами жаропрочного сплава. При этом за счет приложения к капсуле с гранулами всестороннего давления инертным газом, происходит компактирование гранул по механизмам ползучести и пластической деформации [3 – 5]. Таким образом, формируется единый компакт, с равномерной усадкой по всем направлениям, практически полностью повторяющий конфигурацию заготовки.

Одним из важных этапов, определяющих формирование структуры и механических характеристик материала, является термическая обработка, позволяющая управлять уровнем свойств сплавов в широком диапазоне значений. Типичный режим термической обработки жаропрочного никелевого сплава, применяемого в качестве материала турбинных дисков, состоит из закалки и старения (одно-, двух- или трехступенчатого) [1, 6]. Как правило закалка деталей изготовленных из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов производится из однофазной области (сплавы ЭП741НП, ВВ750, ВВ751 и др.) когда происходит растворение крупной некогерентной γ' -фазы, с последующим выделением частиц γ' -фазы более мелкого размера при охлаждении. Существующая технология закалки дисков из гранульных сплавов предусматривает охлаждение компактированных капсул (или предварительно механически обработанных дисков) в потоке воздуха для обеспечения регламентируемых скоростей охлаждения заготовок. Данная технология не лишена недостатков, в частности в области охраны труда, когда требуется извлечение нагретой до высоких температур массивной заготовки из камерной печи, ее подвешивание и расположение между охлаждающими источниками (промышленными вентиляторами). Кроме того, следует отметить и интенсивное окалинообразование с поверхности заготовок при температурах закалки. Таких недостатков лишена технология термической обработки с использованием вакуумных печей. Охлаждение в данном случае происходит без извлечения деталей из рабочего пространства печи, а в качестве охлаждающей среды используется инертный газ (аргон, азот, гелий).

Цель работы – опробование технологии ваку-

умной термической обработки заготовок дисков турбин ГТД изготовленных их гранулированного жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП.

1. Экспериментальная часть

В качестве объекта для исследований использовали заготовки дисков турбины скомпактированные методом ГИП из капсул заполненных гранулами сплава ЭП741НП на горячем изостатическом прессе QUINTUS QIN 09×1,5-2070-1400MURC (ф. AVURE, Швеция). ГИП проводили по режиму: $1200 \pm 10^\circ\text{C}$, длительность выдержки составляла 3...4 ч. и назначалась в зависимости от максимального сечения капсулы, давление в сосуде высокого давления составляло 140 МПа; при охлаждении капсул была использована функция высокоскоростного равномерного охлаждения.

Скомпактированным заготовкам проводили предварительную механическую обработку и подвергали термической обработке в вакуумной печи 10.0VPT-4035/36HV (ф. SECO/WARWICK, Польша) по режиму: Закалка $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ с выдержкой в 4 ч. в среде динамического вакуума $1 \times 10^{-1} \dots 5 \times 10^{-2}$ мбар, охлаждение в потоке инертного газа (аргона). Варьируя давлением подачи охлаждающего газа в рабочую камеру печи и скоростью вращения вентилятора охлаждения обеспечили в заготовках скорость охлаждения на уровне $70\text{-}80^\circ\text{C}/\text{мин}$. Далее проводили трехступенчатое старение в вакуумной печи.

Для сравнения проводили термическую обработку компактированных капсул по тому же режиму в камерных печах с воздушной атмосферой, с охлаждением в потоке воздуха создаваемого промышленными вентиляторами производительностью $30000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

После термической обработки заготовки проходили механическую обработку до размеров, предусмотренных технической документацией.

Заготовки подвергали неразрушающему люминесцентному контролю методом ЛЮМ1-ОВ на наличие внешних дефектов и ультразвуковому контролю на установке УД2-70 на наличие внутренних дефектов.

От исследуемых дисков отрезали технологические припуска для проверки механических свойств. Из одной заготовки прошедшей вакуумную термическую обработку образцы вырезали также из основного металла диска в хордовом и радиальном направлении.

Механические свойства (σ_b , σ_{02} , δ , ψ) образцов испытывали на разрывной машине ZDMY 30.

Ударную вязкость определяли на ударных образцах испытанных на маятниковом копре Instron SI-1M.

Твердость заготовок определяли на твердомере

LECO AMH-43.

Длительную прочность образцов определяли на установке Instron M3 при температуре 650°C и постоянно приложенной нагрузке 1000 МПа ($102 \text{ кгс}/\text{мм}^2$).

Испытания на малоцикловую усталость (МЦУ) проводили на универсальной испытательной машине Instron 8862 при температуре 650°C , частоте приложенной нагрузки 1 Гц и максимальном напряжении цикла 980 МПа ($100 \text{ кгс}/\text{мм}^2$).

При испытаниях на длительную прочность и МЦУ образцы доводили до разрушения.

Исследование микроструктуры проводили на нетравленных и травленных микрошлифах на микроскопе «Axio Observer. Dlm» и методом растровой электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп «JEOL JSM 6360LA»).

2. Анализ полученных результатов

При выполнении неразрушающего контроля методом ЛЮМ1-ОВ под источником ультрафиолетового света на контролируемой поверхности исследуемых заготовок дефектов не было выявлено. По результатам проведения неразрушающего ультразвукового контроля продольными и сдвиговыми волнами в заготовках, сигналов, превышающих браковочный уровень, не обнаружено.

По результатам исследования химического состава все исследуемые заготовки были изготовлены из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП и соответствовали требованиям ОСТ 1 92111-85.

Макроструктура заготовки прошедшей вакуумную термообработку, после травления в реактиве Васильева, характеризовалась равномерным, мелкозернистым строением, величина макрозерна не превышала 1 мм. Дефектов металлургического происхождения, видимых невооруженным глазом, выявлено не было.

Изломы, исследованные на разрушенных ударных образцах всех заготовок, внутригранульные, межгранульные изломы не выявлено (рис. 1).

Микроструктура сплавов, после травления представляла собой γ -твердый раствор, упрочненный интерметаллидной, γ' -фазой с наличием карбидов и карбонитридов, характерная для термообработанного жаропрочного сплава ЭП741НП. Структура характеризовалась мелким, равномерным зерном (рис. 2). Анализом микроструктуры образцов, изготовленных из заготовок в нетравленном виде установили отсутствие микропористости вследствие перегрева при ГИП и термообработки. Микроструктурным анализом выявлены границы отдельных гранул допустимые НТД (рис. 3). Сплошной сетки гранул не выявлено.

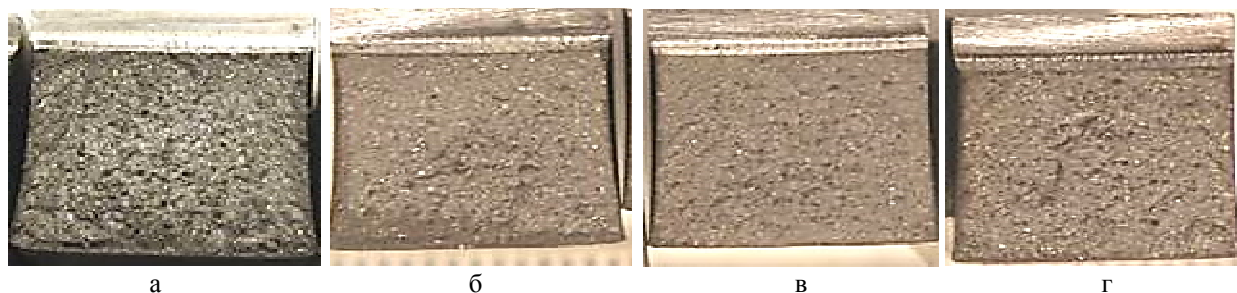


Рис. 1. Структура изломов ударных образцов вырезанных из технологического припуска исследуемых дисков, $\times 4$: а – вакуумная термообработка; б, в, г – традиционная термообработка

На границах гранул выявили скопления мелкодисперсных карбидов и карбонитридов титана, молибдена, вольфрама, ниобия, гафния образовавшиеся в процессе ГИП и которые остались и после проведения термообработки (рис. 4). Следует отметить, что данные карбиды равномерно распределены по телу и границам зерен. Результаты фрактографического и микроструктурного анализа, в целом свидетельствуют о прохождении полноценного компактирования гранул в процессе ГИП.

Испытанием механических свойств установлено их соответствие требованиям НТД (табл. 1). Следует отметить, что в заготовках прошедших вакуум-

ную термическую обработку наблюдаются повышенные значения времени до разрушения (~ 1500 ч.). Традиционная термическая обработка способствует получению повышенных показателей предела малоциклового усталости (превышающий требования НТД \sim в 6 раз). Вакуумная термообработка также способствовала получению высоких значений малоциклового усталости. Высокие эксплуатационные характеристики вероятно связаны с отсутствием в структуре сплава некогерентно связанной избыточной γ' -фазы, которая не обеспечивает упрочнения материала.

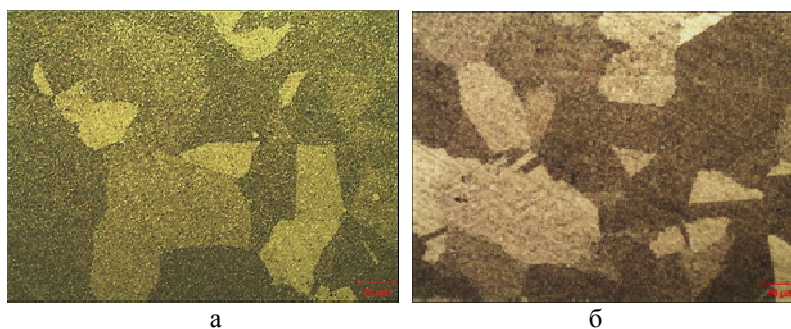


Рис. 2. Микроструктура заготовок дисков после ГИП и термообработки, $\times 500\%$: а – вакуумная термообработка; б, – традиционная термообработка

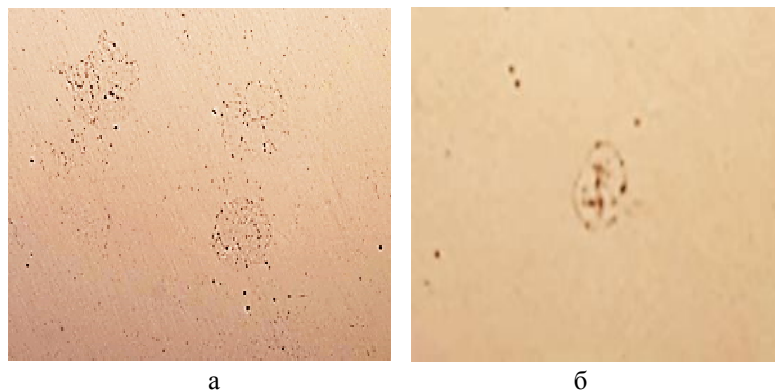


Рис. 3. Границы отдельных гранул в структуре заготовок после ГИП и термообработки: а – вакуумная термообработка; б, – традиционная термообработка

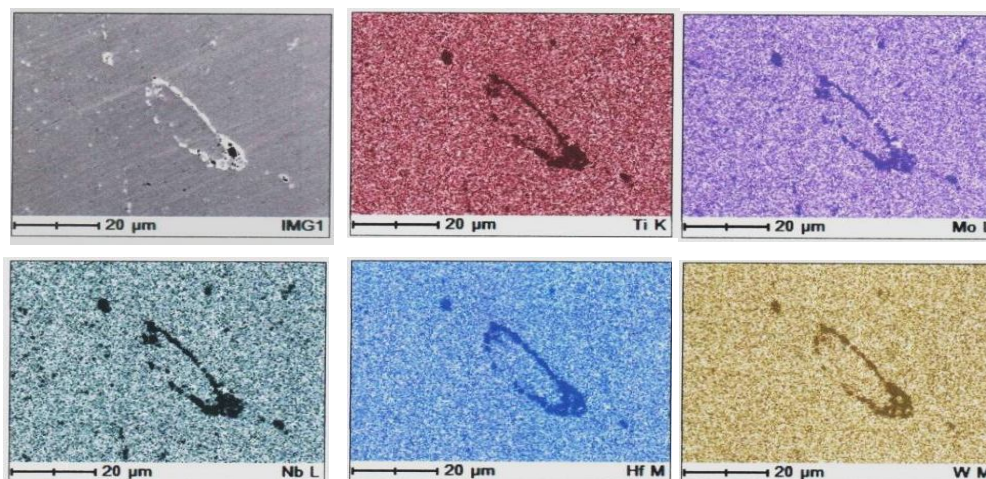


Рис. 4. Распределение элементов во включениях по границам гранул в структуре исследуемых заготовок после ГИП и термообработки (РСМА). Большой интенсивности окраски соответствует большая концентрация элемента

Таблица 1
Механические свойства, показатели длительной прочности и малоциклового усталости заготовок дисков, после ГИП и термообработки

Номер заготовки	Направление вырезки образцов	Механические свойства						τ_{102}^{650} , Ч	$N_{1/100}^{650}$
		σ_b , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	КСУ, $\frac{\text{кгс}\cdot\text{м}}{\text{см}^2}$	НВ, ($d_{отп.}$), мм		
1 (вак. т/о)	Хордовое	153,2	113,5	24,0	26,6	7,04	1,55	496,5	14464
	Радиальное	152,4	112,1	23,6	26,3	5,57	1,55	1387,5	22536
	Хордовое (технол. припуск)	155,3	115,9	24,0	23,2	5,01	1,60	1510,0	13267
2 (вак. т/о)	Хордовое (технол. припуск)	154,5	116,4	18,6	22,6	4,38	1,60	562,0	>5000
3 (вак. т/о)	Хордовое (технол. припуск)	156,0	115,5	20,0	19,4	4,50	1,55	726,0	>5000
4 (вак. т/о)	Хордовое (технол. припуск)	151,2	111,6	18,4	19,3	4,13	1,60	1319,0	>5000
5 (трад. т/о)	Хордовое (технол. припуск)	152,1	110,7	22,0	19,7	9,48	1,60	622,0	30320
6 (трад. т/о)	Хордовое (технол. припуск)	152,4	109,4	26,0	23,2	5,52	1,55	733,0	28127
7 (трад. т/о)	Хордовое (технол. припуск)	153,7	112,6	22,0	19,7	6,04	1,55	467,5	29534
Нормы НТД		≥ 145	≥ 102	≥ 18	≥ 18	$\geq 4,0$	1,50-1,75	≥ 100	≥ 5000

Заключение

Так как при эксплуатации дисков турбины критическими параметрами определяющими их работоспособность являются показатели длительной прочности и малоциклового усталости, то разработанная технология включающая горячее изостатическое прессование с последующей вакуумной термической обработкой заготовок дисков турбины из гранульного жаропрочного сплава позволяет получать заданный уровень свойств с существенным запасом и обеспечением эксплуатационной долговечности. При этом реализуются преимущества вакуумной термической обработки (отсутствие окислительных

влияний, поверхностных дефектов, минимальные коррозии, экологическая безопасность и др.).

Литература

1. Логунов, А. В. *Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии)* [Текст] / А. В. Логунов, Ю. Н. Шмотин. – М. : Наука и технологии, 2013. – 264 с.
2. Береснев, А. Г. *Порошковые и гранульные материалы* [Текст] / А. Г. Береснев, И. М. Разумовский, А. В. Логунов [Текст] // *Технология металлов*. – 2009. – №12. – С. 24-36.
3. Падалко, А. Г. *Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов*

[Текст] / А. Г. Падалко. – М. : ИКЦ Академкнига, 2007. – 267 с.

4. Орлов, М. Р. Аналитическая оценка кинетики устранения пор в литых лопатках турбины при горячем изостатическом прессовании [Текст] / М. Р. Орлов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2009. – № 2. – С. 17-20.

5. Клещев, А. С. Исследование механизма и кинетики залечивания пор при горячем изостатическом прессовании сплавов [Текст] / А. С. Клещев, А. В. Лебедев // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. – 2001. – № 3. – С. 7-10.

6. Волков, А. М. Влияние температурных режимов закалки на структуру и механические свойства дискового гранулируемого жаропрочного никелевого сплава [Текст] / А. М. Волков, Г. С. Гарибов // *Технология легких сплавов*. – 2013. – № 2. – С. 51-56.

References

1. Logunov, A. V., Shmotin, Y. N. *Sovremennyye zharoprochnyye nikelovyye splavy dlya diskov gazovyykh turbin (materialy i tehnologii)* [Modern thermal resistant nickel-base alloys for gas turbine discs (materials and technologies)]. Moscow, Nauka i tehnologii Publ., 2013. 264 p.

2. Beresnev, A. G., Razumovsky, I. M., Logunov, A. V., Logachova, A. I. *Poroshkovyye i granulnyye materialy* [Powder and granular materials]. *Technologia metallor*, 2009, no. 12, pp. 24-36.

3. Padalko, A. G. *Praktika goriachego izostaticheskogo pressovania neorganicheskikh materialov* [Practice of non-organic materials hot isostatic pressing]. Moscow, IKC Akademkniga Publ., 2007. 267 p.

4. Orlov, M. R. *Analiticheskaya ozenka kinetiki ustraneniya por v litykh lopatkakh turbiny pri goriachem izostaticheskom pressovanii* [Analytical estimation of pores elimination in casted turbine blades at hot isostatic pressing]. *MiTOM*, 2009, no. 2, pp. 17-20.

5. Kleshev, A. S., Lebedev, A. V. *Issledovaniye mekhanizma i kinetiki zalechivaniya por pri goryachem izostaticheskom pressovanii spлавov*. [Pores healing mechanism and kinetics research at hot isostatic pressing]. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*, 2001, no. 3, pp. 7-10.

6. Volkov, A. M., Garibov, G. S. *Vliyaniye temperaturnykh rezhimov zakalki na strukturu i mekhanicheskiye svoystva diskovogo granuliruемого zharoprochnogo nikelovogo сплава* [Influence of hardening temperature modes on structure and mechanical properties of disc granulated thermal resistant nickel-base alloy]. *Tekhnologia legkikh сплавov*, 2013, no. 2, pp. 51-56.

Поступила в редакцию 2.6.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Э. И. Цивирко, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

ОСОБЛИВОСТІ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ГАРЯЧОГО ТРАКТУ ГТД ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО ІЗОТЕРМІЧНОГО ПРЕСУВАННЯ

О. О. Педаш, В. В. Ключихін, В. Г. Шило

Розглянуто особливості термічної обробки деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів, зокрема дисків турбіни, що виготовлені з гранульного жароміцного нікелевого сплаву ЭП741НП, що попередньо були скомпактовані за допомогою гарячого ізостатичного пресування. Показано, що проведення як вакуумної, так і традиційної термічної обробки (з проведенням гартування в потоці повітря, що створюється промисловими вентиляторами) сприяє забезпеченню рівня механічних властивостей в заготовках, що відповідає вимогам нормативно-технічної документації з суттєвим запасом.

Ключові слова: гранульна металургія, диски турбіни, гаряче ізостатичне пресування, вакуумна термічна обробка, жароміцний нікелевий сплав

SPECIAL ASPECTS OF GTE HOT SECTION PARTS HEAT TREATMENT FOLLOWING HIP

A. A. Pedash, V. V. Klochikhin, V. G. Shilo

Heat treatment features of the hot section details of turbine engines as a turbine disks, produced from granular heat-resistant nickel alloy ЭП741НП pre-compacted by hot isostatic pressing are observed. It is shown that both vacuum and traditional heat-treatment (in air flow which made by industrial fans) promotes maintenance of the level of mechanical properties in the part blanks, meeting the requirements of the specifications and technical documentation with an essential margin.

Key words: granular metallurgy, turbine disks, hot isostatic pressing, vacuum heat-treatment, nickel superalloy

Педаш Алексей Александрович – канд. техн. наук, начальник бюро управления главного металлурга АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Ключихин Владимир Валериевич – главный металлург АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Шило Валерий Григорьевич – начальник отдела управления главного металлурга АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Pedash Alexey Alexandrovich – Ph.D., Bureau chief 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.

Shilo Valeriy Grigorievich – chief of the department JSC «MOTOR SICH», Zaporozhye, Ukraine.