

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВА ХН65ВМТЮ

© 2011 О. Б. Бердник, И. Н. Царева, Е. Н. Разов

Нижегородский филиал Учреждения Российской академии наук Института машиноведения им. А.А. Благонравова, НПЦ «Трибоника», г. Нижний Новгород

Целью работы являлось изучение постэксплуатационного состояния материала рабочих лопаток газотурбинных двигателей, прошедших длительный срок эксплуатации и определение их ремонтпригодности. Для решения поставленной задачи проведены исследования химического, фазового состава, микроструктуры, физико-механических свойств жаропрочного никелевого сплава. Были разработаны режимы высокотемпературной термической обработки сплава ХН65ВМТЮ (ЭИ893) для продления ресурса изделия.

Рабочие лопатки, термическая обработка, микроструктура, физико-механические свойства, продление ресурса.

Введение

В качестве объектов исследования были использованы лопатки турбины из сплава ХН65ВМТЮ (ЭИ893), имеющие наработки 53000, 60142, 62449 и 112000 часов. Лопатки изготовлены методом горячей штамповки. Лопатки могут длительное время (десятки тысяч часов) эксплуатироваться при высокой температуре $\sim 700\text{--}750^\circ\text{C}$. При этом в материале неизбежно происходят структурно-фазовые превращения, которые влияют на их работоспособность. В процессе эксплуатации накапливаются коррозионные, эрозионные, статические, термоусталостные и усталостные повреждения.

Методика исследования

Для восстановления структуры и свойств материала опытных лопаток вырезанные из них заготовки термически обрабатывали по различным режимам:

1) нагрев до 1160°C , выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе + нагрев до 1000°C , выдержка 4 часа, охлаждение на воздухе + нагрев до 900°C , выдержка 8 часов + нагрев до 820°C , выдержка 15 часов, охлаждение на воздухе;

2) нагрев до 1160°C , выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе + нагрев до 950°C , выдержка 6 часов, охлаждение на воздухе + старение при 820°C в течение 12 часов, охлаждение на воздухе;

3) нагрев до 1160°C , выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе + старение при 800°C в течение 12 часов, охлаждение на воздухе;

4) нагрев до 1050°C , выдержка 3 часа, охлаждение на воздухе + старение при 850°C в течение 12 часов, охлаждение на воздухе;

5) нагрев до 1030°C , выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе + старение при 850°C в течение 12 часов, охлаждение на воздухе.

Для анализа состояния материала использовали методы оптической металлографии на микроскопе «НЕОФОТ-32» и растровой электронной микроскопии (VEGA/TESCAN). Испытания плоских образцов на растяжение при комнатной температуре проводили на разрывной машине У10Т. Микродеформации определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «Дрон-3М». Испытания образцов на длительную прочность (растяжение при температуре $(800\pm 1)^\circ\text{C}$ и нагрузке $\sigma_p = 300$ МПа) проведены на универсальной машине ZWICK/ROELL.

Результаты исследований

С помощью анализа пробы определили химический состав материала лопаток, он соответствует нормам, установленным ТУ14-1-322-72 на сплав ХН65ВМТЮ.

На рис. 1 - 4 представлена микроструктура материала ХН65ВМТЮ после наработки 53000ч, 60142ч, 62449ч и 112000ч. Из анализа структуры металла всех лопаток следует, что в результате длительной эксплуатации при рабочих температурах структурно-фазовое состояние материала существенно изменяется, деградирует. Транс- и интеркристаллитные микротрещины в структуре не обнаружены, но микрострукту-

ра сплава характеризуется разнотернистостью. Известно, что на границах разнотернистого металла в процессе эксплуатации могут возникать трещины, так как объемы крупного и мелкого зерна по-разному деформируются. Металл в замковой части имеет более однородную микроструктуру. В сплаве с меньшей наработкой (53000 часов) имеем следующую картину: упрочняющая интерметаллидная γ' -фаза ($\text{Ni}_3\text{Al,Ti}$) практически полностью растворилась в твердом растворе, а ее остатки имеют хаотичное распределение по объему зерен. Границы зерен линейны, заполнены мелкодисперсной карбидной и интерметаллидной фазами (рис. 1).

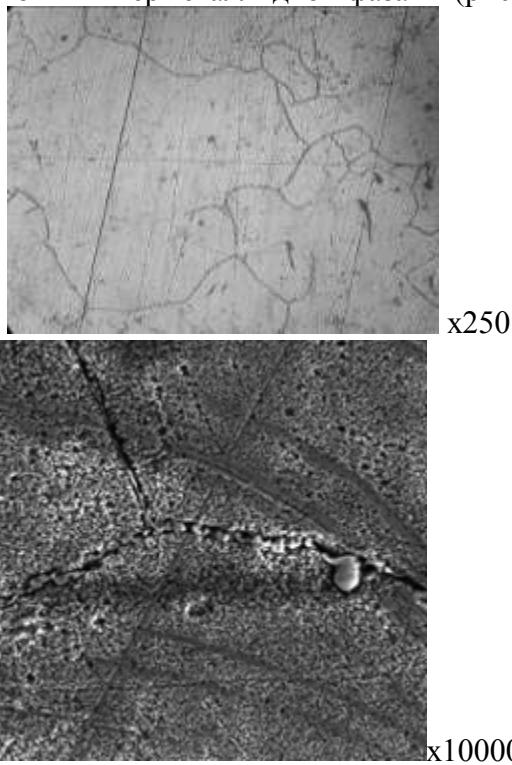


Рис. 1. Микроструктура сплава ХН65ВМТЮ после эксплуатации 53000 часов (образец из первой части)

При увеличении срока эксплуатации до 60142 часов в микроструктуре образцов наблюдаются выделения крупных карбидов (до 3 мкм), выстраивающихся в цепочки по границам зерен. Произошло перераспределение упрочняющей интерметаллидной фазы, большая часть которой выделилась около границ зерен, что обедняет тело зерна (рис. 2).

При увеличении срока эксплуатации материала до 62449 часов происходит дополнительное выделение и укрупнение карбидов типа MeC , MeC_6 , Me_{23}C_6 дисперсностью от 0,5 до 6 мкм и выделение большого

количества мелкодисперсной γ' -фазы ($\text{Ni}_3\text{Al,Ti}$) (рис. 3). Согласно инструкции по продлению срока службы металла основных элементов турбин СО 153-34.17.448-2003 в микроструктуре сплава ХН65ВМТЮ не допускаются конгломераты хромистых карбидов размером более 5 мкм. Сплав с наработкой более 62000 часов эксплуатироваться далее не может.

В результате длительной эксплуатации (112000 часов) структурно-фазовое состояние существенно изменяется, деградирует. Произошло частичное растворение γ' -фазы, выделение крупной карбидной фазы по границам зерен (~3 мкм). Границы зерен линейны, заполнены карбидной и интерметаллидной фазами (рис. 4).

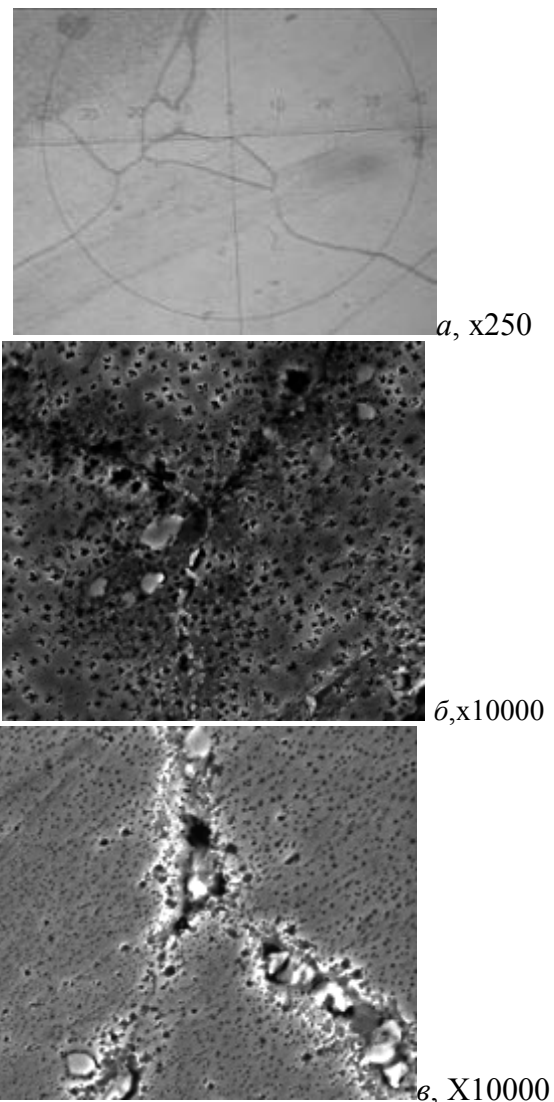
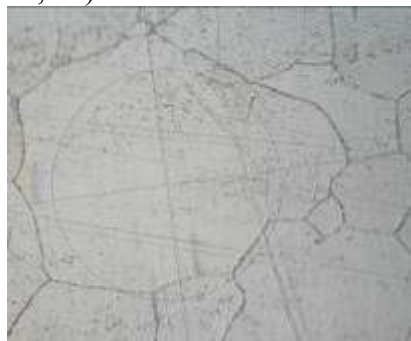
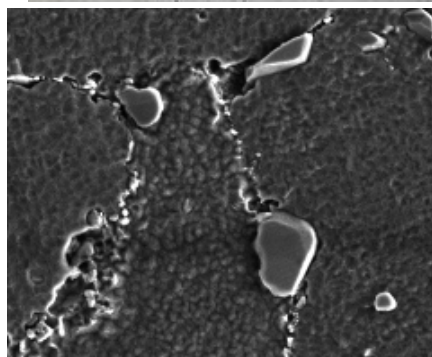


Рис. 2. Микроструктура сплава ХН65ВМТЮ после эксплуатации 60142 часа: а, б – образцы из первой части; в – образец из замковой части

Результаты микроспектрального анализа карбидных включений, расположенных на границе и внутри зерен металла, показали, что выделившиеся карбиды на основе вольфрама, молибдена и хрома. Они соответствуют сложному карбиду II группы типа (W, Mo, Cr)C.



x250

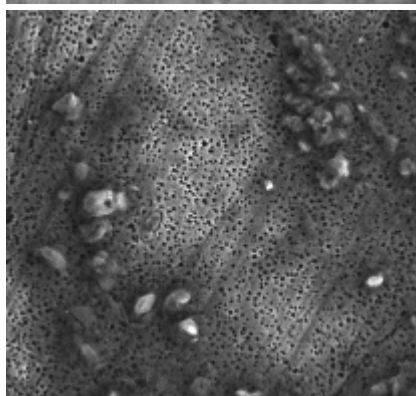


x1000

Рис. 3. Микроструктура сплава ХН65ВМТЮ после эксплуатации 62449 часов



x250



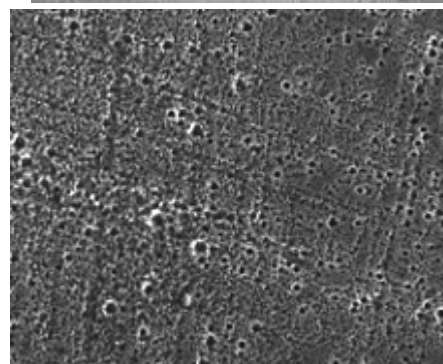
x1000

Рис. 4. Микроструктура сплава ХН65ВМТЮ после эксплуатации 112000 часов

На рис. 5 - 8 показана микроструктура сплава ХН65ВМТЮ с наработкой 53000 часов после различных вариантов ВТО. Из анализа микрофотографий следует, что микроструктура материала становится более однородной, происходит снижение разнородности. Термическая обработка приводит к некоторой стабилизации структуры, повышению количества γ' -фазы: в случае использования ступенчатых режимов ВТО содержание γ' -фазы увеличивается до 3 - 4 %, в случае применения одноступенчатого старения при 820°C или 850°C количество γ' -фазы повышается ~ до 10 %, что является допустимым содержанием для данного сплава.



x500



x10000

Рис. 5. Микроструктура сплава ХН65ВМТЮ с наработкой 53000 ч после ВТО: 3. с 1160°C, выдержка 2 часа, охл. на воздухе + 1000°C, выдержка 4 часа, охл. на воздухе + до 900°C, выдержка 8 часов + ст.820°C, выдержка 15 часов, охл. на воздухе

При проведении ВТО образцов по режиму – закалка с 1050°C на воздухе и последующее старение при 850°C и 750°C в течение ~30 часов происходит полная регенерация деградированной структуры металла лопаток. В данном случае избыточная интерметаллидная γ' -фаза наблюдается в виде мелкодисперсных выделений. Содержание γ' -фазы после ВТО повышается ~ до 12 %, однако при длительном старении происходит выделение крупных карбидов на границе зерен, которые являются концентраторами напряжений.

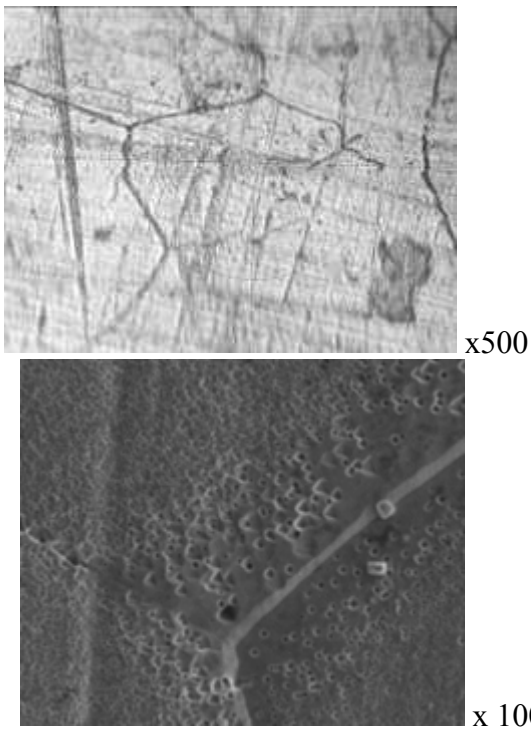


Рис. 6. Микроструктура сплава XH65BMTЮ с наработкой 53000 ч после ВТО: 3. с 1160°C, выдержка 2,0 часа, охл. на воздухе + 950°C, выдержка 6,0 часов, охл. на воздухе + ст. при 820°C в течение 12 часов, охл. на воздухе

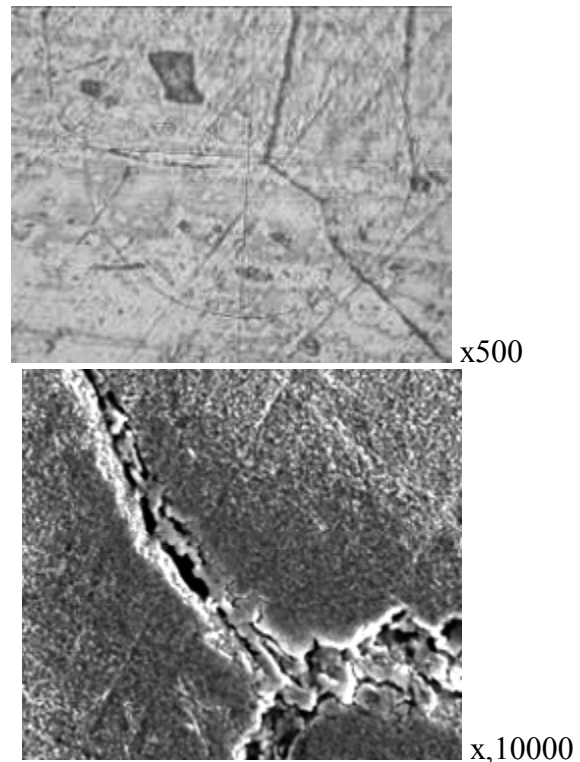


Рис. 8. Микроструктура сплава XH65BMTЮ с наработкой 53000 ч после ВТО: 3. с 1050°C, выдержка 3,0 часа, охл. на воздухе + ст. при 850°C, выдержка 12 часов, охл. на воздухе + 750°C, выдержка 24 часа, охл. на воздухе

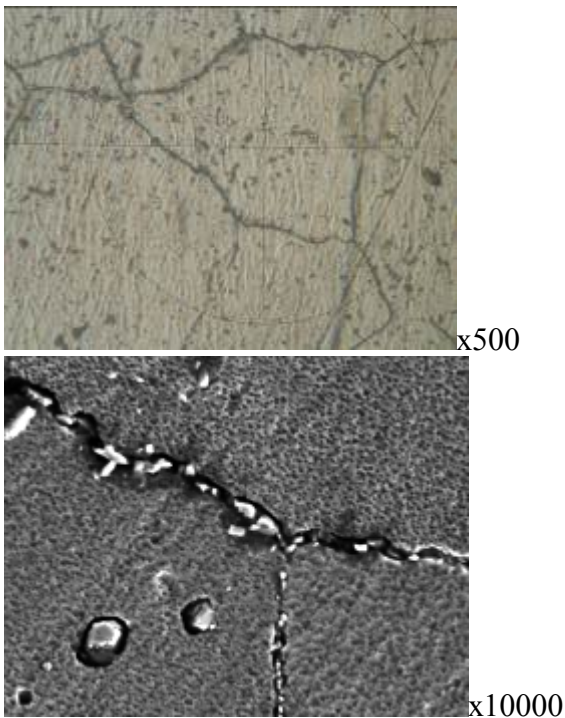


Рис. 7. Микроструктура сплава XH65BMTЮ после ВТО: 3. с 1050°C, 3 часа, охл. на воздухе + ст. 850°C, 12 часов, охл. на воздухе

Результаты механических испытаний образцов на растяжение при комнатной температуре показали, что материал в постэксплуатационном состоянии не соответствует требованиям ТУ108.02.005-76 по пределу текучести и пластическим свойствам независимо от сроков наработки. Из табл. 1 следует, что в процессе длительной эксплуатации в материале пера лопатки в результате дополнительного выделения дисперсных частиц γ' -фазы произошло увеличение прочностных и снижение пластических свойств. Предел прочности материала повысился до 1000 - 1090 МПа при 850 МПа, допустимых по ТУ108.02.005-76. Предел текучести снизился до 340 - 430 МПа при норме 490-660 МПа.

Экспериментальные режимы восстановительной термической обработки (ВТО) были опробованы на материале с наименьшей наработкой (53000 часов). Их применение привело к снижению уровня прочностных и значительному росту пластических свойств (относительного удлинения и относительного сужения). Оптимальный резуль-

тат получен после применения 4-го и 5-го вариантов ВТО (табл. 1).

Таблица 1. Механические свойства материала ХН65ВМТЮ

Состояние материала	Механические свойства			
	$\sigma_{в,}$ МПа	$\sigma_{0,2,}$ МПа	$\delta, \%$	$\psi, \%$
ТУ108.02.005-76	≥ 850	490-660	≥ 20	≥ 25
без наработки	1070	605	23	34
наработка 53000ч	990	340	19	22
	1030	445	26	23
наработка 60142ч	1090	430	22	28
наработка 62449ч	1000	350	21	26
наработка 112000ч	1000	460	6,5	14
1. З. 1160°C, 2 ч, охл. воздух + 1000°C, 4 ч, охл. воздух + ст. 900 °С, 8 ч, охл. воздух, + 820 °С, 15ч, охл. воздух	770	350	44	41
2. З. 1160°C, 2,0 ч, охл. воздух + ст. 950°C, 6 ч, охл. воздух + 820°C, 12 ч, охл. воздух	680	410	22	22
3. З. 1160°C, 2,0 ч, охл. воздух + ст. 800°C, 12 ч., охл. воздух	790	415	42	39
4. З. 1050°C, 3,0 ч, охл. воздух + ст. 850°C, 12 ч, охл. воздух	920	490	36	25
5. З. 1050°C, 3,0 ч, охл. воздух + ст. 850°C, 12 ч, охл. воздух + ст. 750°C, 24 ч, охл. воздух	980	460	30	26
наработка 60142ч + ТО	990	555	28	43
наработка 62449ч + ТО	940	485	20	24
наработка 112000ч + ТО	914	460	19	22

Для сплавов с наработкой 60142, 62449 и 112000 часов в качестве восстановительной была применена термическая обработка: закалка 1050°C, 3 часа, охлаждение на воздухе + старение 850°C, 12 часов, охлаждение на воздухе, так как данный режим показал оптимальные значения структурных и механических показателей на образцах из

сплава с наработкой 53000 часов. Фотографии микроструктуры представлены на рис. 9 - 11.

При применении термической обработки на сплавах с наработкой 60142 и 62449 ч получен удовлетворительный результат: произошло растворение и перераспределение интерметаллидной фазы, измельчение карбидов. Изменения в микроструктуре положительно отразились на механических характеристиках материала, которые представлены в табл. 1. ВТО привела к снижению предела прочности до 990- 940 МПа и повышению предела текучести до 555 - 485 МПа, что соответствует нормируемым значениям механических свойств.

ВТО на сплаве с наработкой 112000 часов приводит к некоторой стабилизации структуры сплава, повышению количества γ' -фазы, измельчению карбидной фазы и более равномерному распределению. Применение ВТО за счет снижения уровня прочностных свойств дало значительный рост пластических свойств – относительного удлинения в ~3 раза (с 6,5 до 19 %) и относительного сужения (с 14 до 22%). Значения находятся на нижнем пределе.

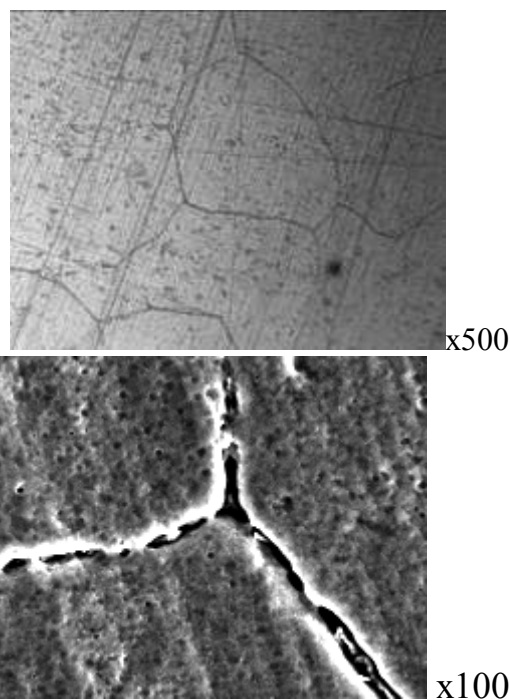
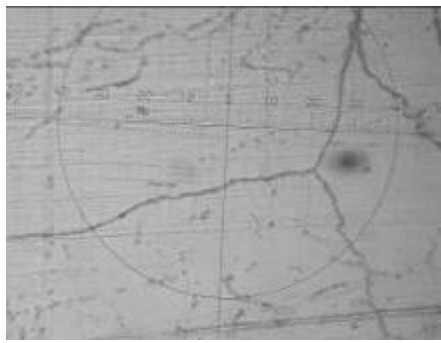
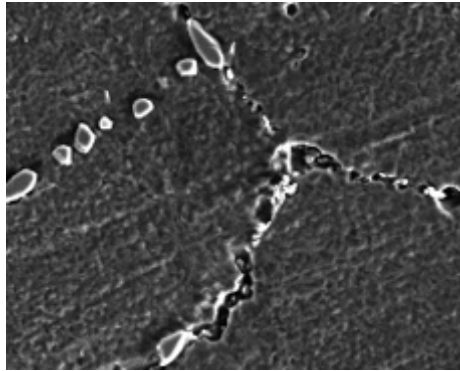


Рис. 9. Микроструктура сплава ХН65ВМТЮ после ВТО: 3. с 1050°C, 3 часа, охл. на воздухе + ст. 850°C, 12 часов, охл. на воздухе (наработка 60142 часа)

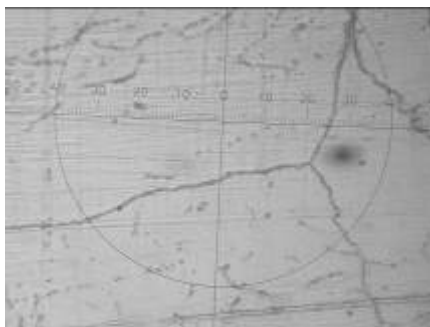


x500

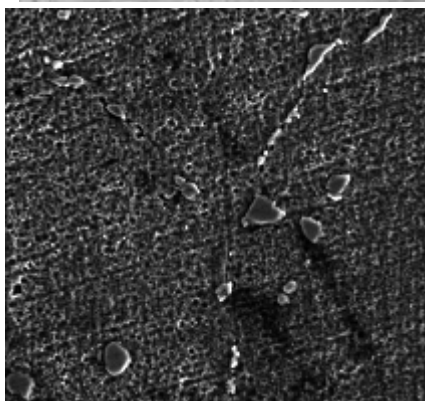


x10000

Рис. 10. Микроструктура сплава XH65BMTЮ после ВТО: 3. с 1050°C, 3 часа, охл. на воздухе + ст. 850°C, 12 часов, охлаждение на воздухе (наработка 62449 часов)



x500



x10000

Рис. 11. Микроструктура сплава XH65BMTЮ после ВТО: 3. с 1050°C, 3 часа, охл. на воздухе + ст. 850°C, 12 часов, охл. на воздухе (наработка 112000 часов)

Для восстановления геометрических размеров рабочих лопаток применяли сварочно-наплавочные работы проволокой на никелевой основе марки Св.ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП648-ВИ) следующего химического

состава: С–0,04%; Мn – 0,14%; Si – 0,25%; Cr – 22,2%; Ni – 66,3%; Nb – 1,26 %; Мо – 2,4%; Ti –1,6%; Al – 0,4 %; Fe – 0,95 %; W – 4,4 %.

Значения прочностных показателей выбранной наплавочной проволоки близки к значениям основного материала лопаток (по пределу прочности $\sigma_b=800$ МПа, $K=0,94 \cdot \sigma_b^{очн}$; по пределу текучести $\sigma_{0,2}=470$ МПа, $K=0,95 \cdot \sigma_{0,2}^{очн}$), что удовлетворяет требованиям для наплавленного материала. Для снятия остаточных напряжений после сварки был сделан отпуск при 700°C в течение 8 часов. В табл. 2 представлены результаты рентгеноструктурного анализа образцов.

Таблица 2. Данные рентгеноструктурного анализа наплавленных образцов

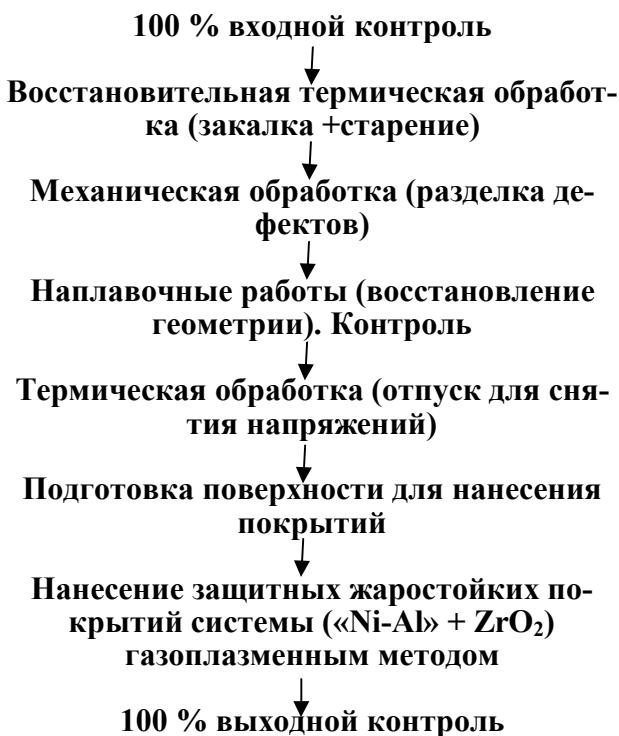
Состояние материала	D, нм	ϵ	$\rho_{L,2}$ см ⁻²	$\rho_{\epsilon,2}$ см ⁻¹
После эксплуатации	270	0,0004	$4,1 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^9$
Наплавка проволокой Св.ХН50ВМТЮБ-ВИ	57	0,00011	$9,2 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^8$
После наплавки и отпуска	~500	0,00046	$\sim 10^9$	10^{10}

В состоянии после эксплуатации в материале лопаток зарегистрированы средний уровень микродеформаций и однородное распределение плотности дислокаций внутри и на границах субзеренных блоков. Наплавка приводит к значительному размельчению субзерен и резкому повышению плотности граничных дислокаций (почти на 2 порядка), что, в свою очередь, может охрупчивать границы. Термообработка способствует укрупнению блоков мозаики и снижению плотности дислокационных дефектов на границе.

На основании проведенных исследований можно сделать заключение, что материал лопаток с разной наработкой от 53000 до 112000 часов имеет деградированную микроструктуру и нуждается в восстановительной термической обработке. Эксплуатация рабочих лопаток из сплава XH65BMTЮ более 62000 часов без восстановительного ремонта нежелательна, так как отрицательные изменения в микроструктуре (образование крупных карбидов на границах зерен) могут

привести к разрушению лопаток. Все исследованные в данной работе лопатки являются ремонтнопригодными и прошли полный восстановительный цикл, включающий в себя термическую обработку для восстановления структуры и физико-механических свойств, наплавочные работы для восстановления геометрических размеров изделия и нанесения газоплазменным методом защитного жаростойкого покрытия. В настоящее время рабочие лопатки установлены в агрегаты и находятся в эксплуатации. Технологический цикл ремонтно-восстановительной обработки можно представить в виде схемы:

РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН



DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY EXTENSION RESOURCE XH65BMTЮ ALLOY TURBINE BLADES

© 2011 O. B. Berdnik, I. N. Tsareva, E. N. Razov

Nizhny Novgorod branch Institutions of the Russian Academy of Sciences Institute of engineering them named A.A. Blagonravov, SPC «Tribonika», Nizhny Novgorod

The goal was to examine postэксплуатация of material working blades of gas turbine engines have a long lifespan and determining their maintainability. Looking for studies of chemical composition, microstructure, phase, physical and mechanical properties of heat-resistant nickel alloy. Have been developed for high-temperature heat treatment alloy modes (ЭИИ893) to save the product.

Working shoulder, thermal processing, microstructure, mechanical properties, the extension of the resource.

Выводы

На основании исследований лопаток ротора турбины, изготовленных из жаропрочного никелевого сплава ХН65ВМТЮ (ЭИИ893) установлено, что в процессе эксплуатации происходит деградация материала, которая отрицательно сказывается на его физико-механических свойствах. Разработанная технология позволяет полностью восстановить изделие (применив наплавочные работы), нормализовать его структурно-фазовое состояние материала и комплекс механических свойств с помощью термической обработки (закалка на воздухе с 1050°C + старение при 850°C с выдержкой не менее 12 часов).

Для защиты поверхности лопаток необходимо применять жаростойкое покрытие системы («Ni-Al» + ZrO₂), нанесенное газоплазменным методом.

Библиографический список

1. Гецов, Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. [Текст] / Л.Б. Гецов – Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2010. – Т.1.– 611 с.
2. Рыбников, А.И. Термическая обработка лопаток с покрытиями [Текст] / А.И. Рыбников, Л.Б. Гецов – МиТОМ.– 1995. –№9. – С.21-25.
3. Филатов, М.А. Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / М.А. Филатов, В.С. Судаков – МиТОМ. –1995.– №6. - С.12-15.

Информация об авторах

Бердник Ольга Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Нижегородского филиала Учреждения Российской академии наук Института машиноведения им.А.А. Благонравова РАН (г.Нижний Новгород). Тел.: (831) 432-03-01. E-mail: tribonikanpc@mail.ru. Область научных интересов: исследование покрытий на основе интерметаллической фазы и керамики, изучение объемных свойств сплавов, разработка технологий восстановительной термообработки металлов для повышения ресурса изделий.

Царева Ирина Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Нижегородского филиала Учреждения Российской академии наук Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Тел.: (831) 432-03-01. E-mail: tribonikanpc@mail.ru. Область научных интересов: поведение материалов в экстремальных условиях, технологии нанесения полифункциональных покрытий.

Разов Евгений Николаевич, научный сотрудник Нижегородского филиала Учреждения Российской академии наук Института машиноведения им.А.А. Благонравова РАН (г. Нижний Новгород). Тел.: (831) 432-03-01. E-mail: tribonikanpc@mail.ru. Область научных интересов: анализ микроструктуры материалов, обработка данных, полученных при использовании результатов электронной микроскопии, изучение объемных свойств материалов и покрытий.

Berdnik Olga Borisovna, Candidate of technical Sciences, senior researcher of the Nizhny Novgorod branch Institutions of the Russian Academy of Sciences Institute of mechanical engineering named A.A. Blagonravov RAS (Nizhniy Novgorod). Phone: (831) 432-03-01. E-mail: tribonikanpc@mail.ru. Area of research: multi-layer heat, thermal coatings based on by intermetallic phases and ceramics. Study of volumetric properties of alloys. Development of technologies of regenerative heat treatment of metals to improve resource products.

Tsareva Irina Nikolaevna, Candidate of Phisic and Matematik Sciences, senior researcher, the Nizhny Novgorod branch Institutions of the Russian Academy of Sciences Institute of mechanical engineering named A.A. Blagonravov RAS (Nizhniy Novgorod). Phone: (831) 432-03-01. E-mail: tribonikanpc@mail.ru. Area of research: an analysis of the behaviour of materials in the production environment, the development of technologies of regenerative heat treatment. Study of modified Polyfunctional Titanium Nitride coatings, as well as multi-layer coating on heat, heat by intermetallic basis and based on ceramics.

Rasov Evgeny Nikolaevich, researcher of Nizhny Novgorod branch Institutions of the Russian Academy of Sciences Institute of mechanical engineering named A.A. Blagonravov RAS (Nizhniy Novgorod). Phone: (831) 432-03-01. E-mail: tribonikanpc@mail.ru. Area of research: an analysis of the microstructure of materials, processing of data obtained from the use of electron microscopy, study of volumetric properties of materials and coatings.