

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-36-42

УДК (UDC) УДК 629.7+669.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗ ИГОЛЬЧАТОЙ (ПЛАСТИНЧАТОЙ) МОРФОЛОГИИ В МАТЕРИАЛЕ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© Федор Дмитриевич Киселев

ЦНИИ ВВС Минобороны России, Москва, Россия; e-mail: kiselev_fd@mail.ru

Статья поступила 4 августа 2017 г.

Представлены результаты исследований особенностей выделения фаз игольчатой (пластинчатой) морфологии в структуре материала лопаток в процессе эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Выявлено и показано на конкретном примере снижение прочностных характеристик и пластичности материала пера лопаток в зоне выделения фаз, что послужило фактором, способствующим усталостному разрушению рабочей лопатки турбины в эксплуатации. Выделения фаз игольчатой (пластинчатой) морфологии можно рассматривать в качестве одного из критериев качества структуры и работоспособности материала лопаток турбин ГТД, их контроль требует соответствующего нормирования. Отмечены трудности выявления идентификационных отличий топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз и карбидов типа Me_6C игольчатой (пластинчатой) морфологии. Методом расчета химического состава по числу электронных вакансий можно оценить склонность жаропрочного сплава к образованию σ -фазы и тем самым его эксплуатационную пригодность. Вместе с тем выявление и отбраковка лопаток с недопустимыми выделениями σ -фаз возможны путем непосредственного контроля неразрушающими методами. Предложен способ неразрушающего электромагнитного контроля выделений ТПУ-фаз (типа σ) в структуре материала значительно окисленных лопаток (также и при наличии во внутренних полостях посторонних ферромагнитных частиц). Своевременное выявление σ -фаз в структуре материала лопаток в процессе производства и при ремонте позволит исключить установку на ГТД изделий с пониженными прочностными и пластическими характеристиками.

Ключевые слова: эксплуатационная работоспособность турбинных лопаток; структурные изменения материала лопаток в процессе наработки; критерии качества структуры материала лопаток; фазы игольчатой (пластинчатой) морфологии, ТПУ-фазы (типа σ); карбидные выделения; неразрушающий электромагнитный контроль лопаток.

STUDY OF THE PHASES OF ACICULA (LAMELLAR) MORPHOLOGY IN THE MATERIAL OF TURBINE BLADES OF GAS TURBINE ENGINES

© Fedor D. Kiselev

Air forces central scientific research institute of the Ministry of defense, Moscow, Russia; e-mail: kiselev_fd@mail.ru

Submitted August 4, 2017.

We present the results of studying features of separating phases of acicular (lamellar) morphology in the structure of blade material of operating gas turbine engines (GTD). A decrease in the strength characteristics and plasticity of the blade feather material in the zone of phase separation which contributes to in-service fatigue destruction of the turbine blade is revealed and illustrated with a specific example. Separation of the phases of needle (lamellar) morphology can be considered a criterion for the quality control of the structure and performance of the turbine blade material which requires appropriate rating. Difficulties in revealing the identification differences in the topologically close-packed (TCP) phases and carbides of Me_6C type with acicular (lamellar) morphology are noted. A tend of a heat-resistant alloy to form σ -phase (i.e., the serviceability of the alloy) can be estimated in calculation of the chemical composition from the number of electron vacancies. At the same time, detection and rejection of the blades with inadmissible discharge of σ -phases can be done methods of direct non-destructive control. We develop a method of non-destructive electromagnetic control of TCP-phase (of σ -type) present in the structure of the material of highly oxidized blades (also with extraneous ferromagnetic particles present in internal cavities. Timely detection of σ -phases present in the structure of blade materials upon manufacture or repair will eliminate using the blades with reduced strength and plastic characteristics in GTE.

Keywords: operational performance of the turbine blades; in-service structural changes in the blade material; quality criteria; phases of acicular (lamellar) morphology; topologically close-packed (TCP) phases (type σ); carbides; non-destructive electromagnetic monitoring of the blades.

Диаграммы состояния жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) показывают, что матрица ЖНС — поле γ -твердого раствора (γ -фаза) различной степени легированности, имеющего градиентированную кубическую (ГЦК) решетку, и когерентно связанные с ним мелкодисперсные частицы упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы также с ГЦК-решеткой. Это поле граничит с полями твердых растворов с ОЦК-решеткой, представляющих собой фазовые области σ , μ , R и других подобных им фаз, называемых топологически плотно упакованными (ТПУ).

Химический состав σ -фазы можно представить формулой $(Cr, Mo, W)_X(Ni, Co)_Y$, где X и Y меняются в пределах от 1 до 7, но чаще всего они примерно одинаковы. В составе μ -фазы доминируют Mo и Co . В микрообъемах сплава, где образуются ТПУ-фазы, γ -твердый раствор обеднен тугоплавкими легирующими элементами (W , Mo), что приводит к разупрочнению ЖНС [1].

Крайне негативно сказывается на структуре материала рабочих турбинных лопаток выделение фаз игольчатой (пластинчатой) морфологии (ТПУ-фаз), которые зачастую делают ЖНС не пригодным для использования в деталях авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2]. Кроме того, ухудшение характеристик механических свойств материала может происходить за счет выделения карбидов (также в виде игольчатых (пластинчатых) частиц).

Даже когда удастся создать и зафиксировать термообработкой состояние жаропрочного сплава без нежелательных ТПУ-фаз, при контроле качества структуры материала лопаток турбин ГТД необходимо учитывать, что применяемые для их изготовления ЖНС при рабочих температурах метастабильны, и зафиксированное структурное состояние в большей или меньшей степени мо-

жет меняться с наработкой в зависимости от условий термомеханического нагружения материала в различных зонах конструкции лопатки [3, 4].

Фазы игольчатой (пластинчатой) морфологии наблюдаются в материале рабочих лопаток турбин как авиационных ГТД [5], так и газотурбинных установок наземного применения [5, 6].

Цель работы — идентификация выявленных в материале лопаток ГТД игольчатых (пластинчатых) фаз с применением металлографического и микрорентгеноспектрального анализов, а также разработка способа неразрушающего контроля для обнаружения и отбраковки изделий с нежелательными фазами в структуре материала.

Исследовали лопатки с различной наработкой, в том числе разрушившиеся в процессе эксплуатации, из сложнолегированных деформируемых и литейных ЖНС с равноосной и направленной кристаллизацией, а также в монокристаллическом исполнении. Использовали методы неразрушающего капиллярного и электромагнитного анализов, в необходимых случаях определяли механические свойства материала на вырезанных из лопаток образцах.

Выделения фаз игольчатой (пластинчатой) морфологии фиксировали в материале лопаток турбин после эксплуатационной наработки на двигателе в зонах с измененным химическим составом, например вблизи полостей трещин, контактирующих с высокотемпературным газовым потоком, под защитными покрытиями и в основном материале (рис. 1, 2). Это объясняется изменением состава легирующих элементов, расходуемых на окисление, или их перераспределением при диффузионном взаимодействии защитного покрытия и основного материала при высоких температурах, когда в значительной сте-

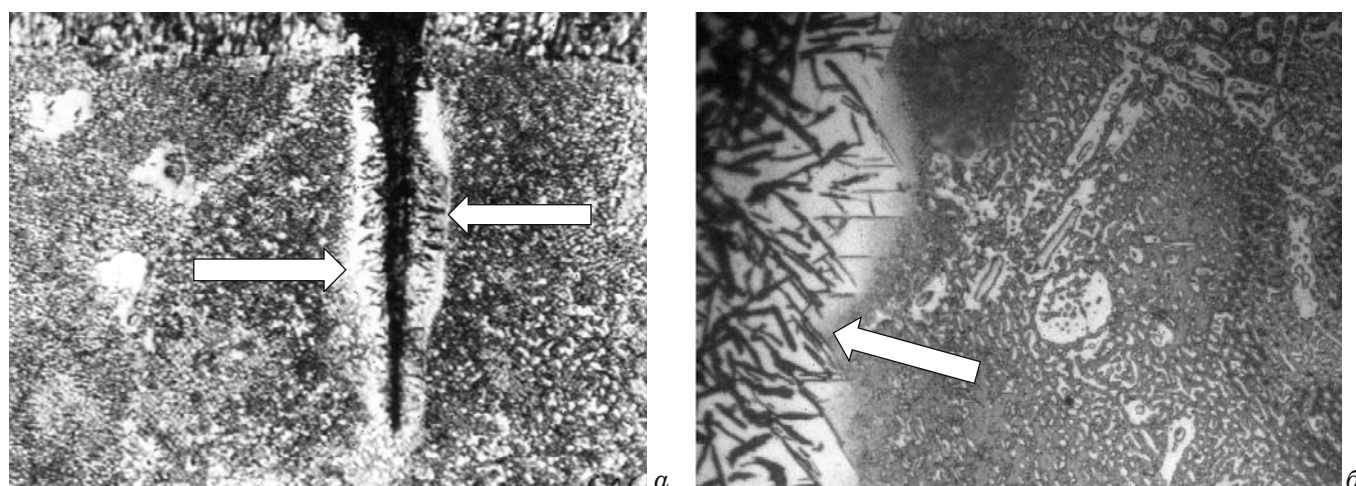


Рис. 1. Микроструктура материала вблизи термоусталостных трещин на входных кромках рабочих турбинных лопаток из сплава ВЖЛ12У (а, $\times 500$) и ЖС32 (б, $\times 1000$) (стрелками показаны выделения фаз игольчатой морфологии)

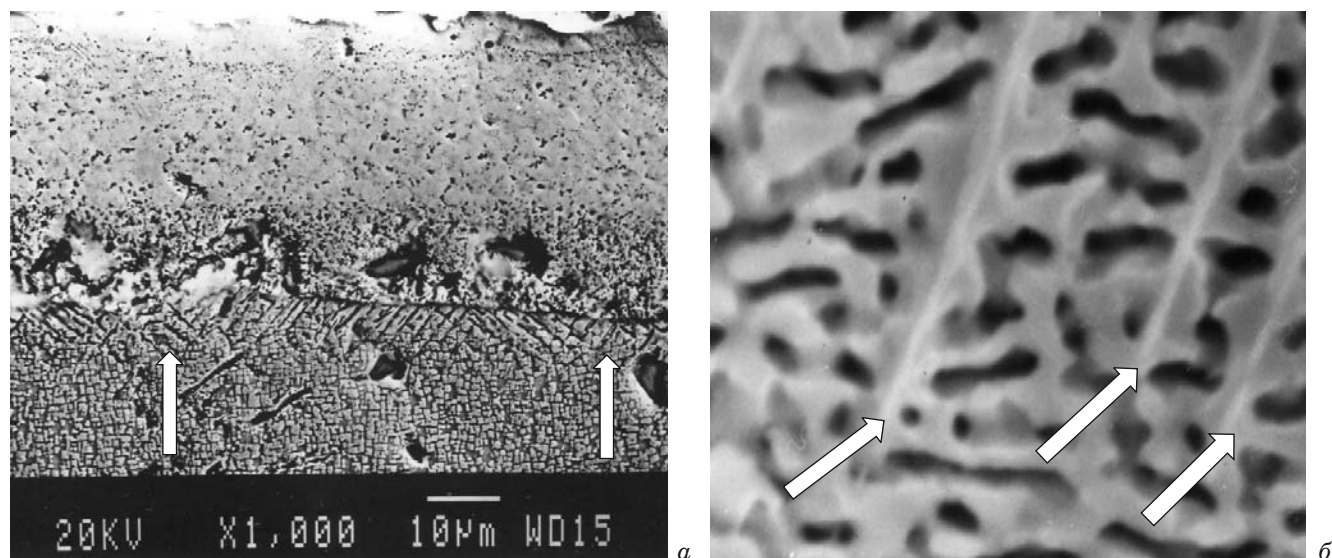


Рис. 2. Выделения фаз игольчатой (пластинчатой) морфологии (показаны стрелками) вблизи границы основной материал — алюминидное покрытие (а, $\times 1000$) и в основном материале (б, $\times 20\,000$) наиболее нагреваемой зоны входной кромки рабочих лопаток из сплава ЖС6У (наработка в эксплуатации 300 ч)

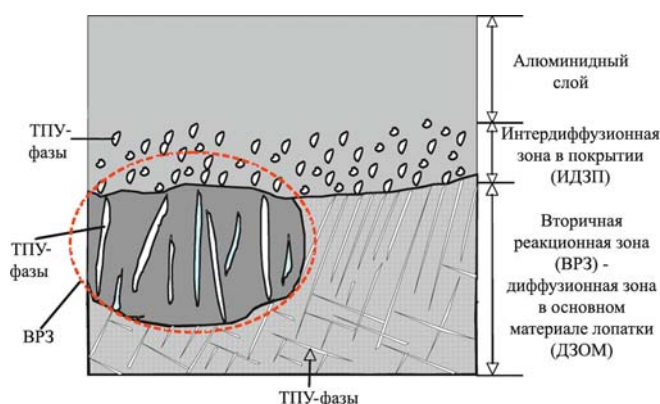


Рис. 3. Схематическое изображение микроструктуры зон взаимодействия алюминидного покрытия с ЖНС с выделением ТПУ-фаз в ИДЗП и ДЗОМ [7]

пени интенсифицируется диффузионная подвижность, например Al и Cr, содержание которых в покрытии в 2 – 3 раза превышает их содержание в ЖНС.

Отметим, что применение в ЖНС в качестве легирующего элемента рения интенсифицирует процесс образования игольчатых ТПУ-фаз. Если не приняты соответствующие технологические меры, то ТПУ-фазы могут формироваться уже на стадии изготовления лопаток при температурах термической обработки под покрытием во вторичной реакционной зоне (ВРЗ) (рис. 3), что приводит к ухудшению характеристик механических свойств поверхностных слоев ЖНС на глубину нескольких сотых миллиметра [7].

Для сплавов с высоким содержанием рения игольчатые (пластинчатые) ТПУ-фазы в процессе изготовления лопаток при температурах тер-

мической обработки могут образовываться не только под защитным покрытием, но и в объеме основного материала [8].

Исследования турбинной лопатки из сплава ХН55ВМТКЮ (разрушилась по усталостному механизму с началом разрушения от выходной кромки (50 мм от основания хвостовика) после наработки в эксплуатации 1058 ч) с помощью металлографического анализа показали, что в структуре материала вблизи места разрушения, кроме карбидов (в виде сплошного слоя), по границам зерен присутствуют выделения (внутри зерен) фаз игольчато-дендритной морфологии (рис. 4). Их количество постепенно уменьшалось по мере удаления от места начала разрушения как в продольном, так и поперечном направлениях.

Механические свойства материала при растяжении определяли на машине ИМ-4Р при комнатной температуре на образцах (диаметр рабочей части 3 мм), вырезанных из пера и хвостовика лопатки. Распределение твердости по длине (высоте) — на продольных плоскопараллельных темплатах. Значения характеристик механических свойств материала лопаток приведены в таблице.

Видно, что на пера (по сравнению с хвостовиком) предел текучести и твердость увеличиваются, а пластические характеристики снижаются (примерно в 2 раза).

Распределение твердости материала по длине (высоте) лопаток приведено на рис. 5. Видно, что твердость монотонно возрастает, достигая максимума на расстоянии 40 – 50 мм от основания хвостовика (345 НВ, что превышает верх-

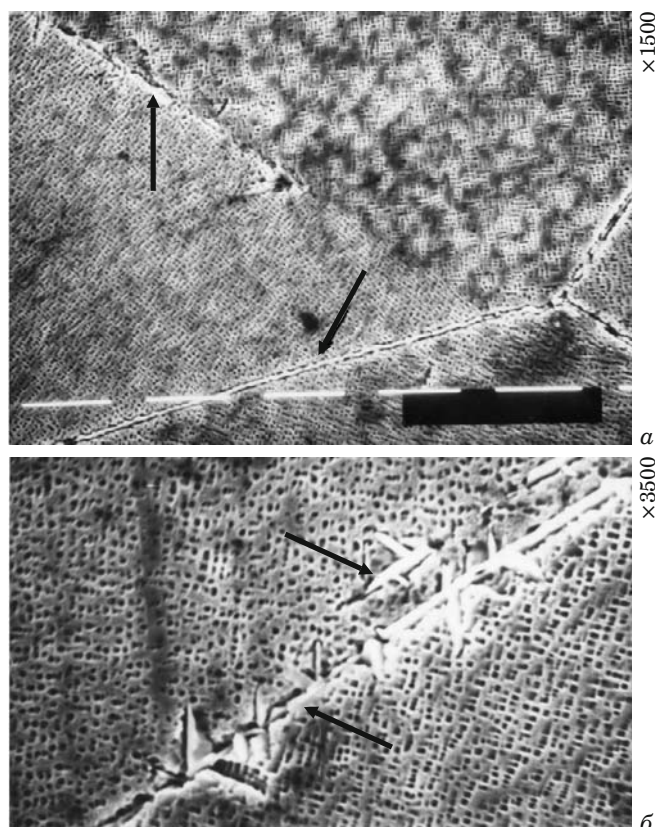


Рис. 4. Структура материала вблизи места начала разрушения (на выходной кромке) рабочей турбинной лопатки из сплава ХН55ВМТКЮ с выделениями карбидов по границам зерен (а) и игольчатой фазы (б) (показаны стрелками, наработка в эксплуатации 1058 ч)

ную границу по ТУ). Затем она уменьшается (305 НВ вблизи законцовок пера лопатки).

При оценке эксплуатационной повреждаемости турбинных лопаток, как правило, применяют комплекс методик [4], позволяющих исследовать, в частности, распределение твердости материала на продольных плоскопараллельных темплатах (для лопаток из деформируемых ЖНС) для сравнения твердости в наиболее нагреваемой зоне пера лопатки и хвостовика. При этом уменьшение твердости на пере по сравнению с хвостовиком (с наличием минимума в наиболее нагреваемой зоне) свидетельствует о работе материала лопатки при температурах, превышающих максимально допустимые в эксплуатации (выше температур начала растворения частиц упрочняющей γ' -фазы).

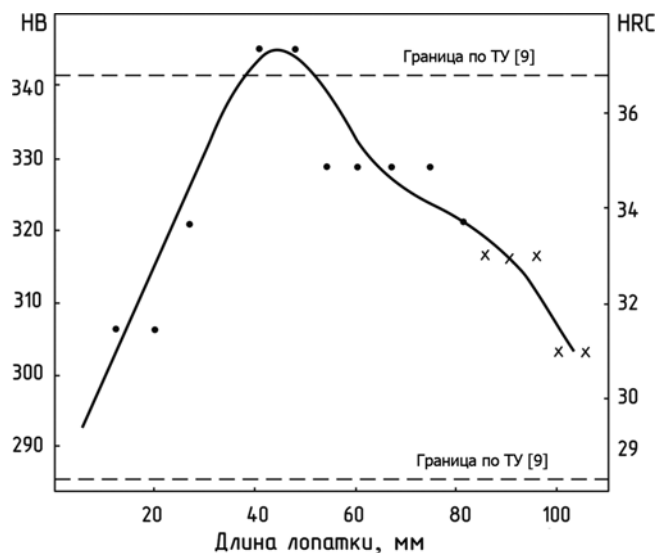


Рис. 5. Распределение твердости материала по длине (от основания хвостовика) рабочих турбинных лопаток из сплава ХН55ВМТКЮ: • — по Бринеллю; × — по Роквеллу (наработка на двигателе в эксплуатации 1058 ч)

На исследуемых лопатках признаков перегрева не обнаружили, наоборот, зафиксировали повышение твердости материала пера по сравнению с хвостовиком (см. рис. 5).

Таким образом, повышение твердости материала пера лопатки, существенное снижение пластических характеристик и структурные изменения в виде выделения фаз игольчато-дендритной морфологии в зоне максимальных значений твердости произошли в процессе эксплуатационной наработки при нормальном функционировании двигателя, что подтверждается и данными средств объективного контроля параметров работы ГТД.

Отметим, что режимы работы двигателя, на которых лопатки преимущественно эксплуатировались, были близки к максимальным (в пределах 10 %). В соответствии с конструктивно заданным распределением газодинамических параметров ГТД рабочая температура материала лопаток турбины в зоне максимального повышения твердости составляла примерно 700 °С. Это совпадает с результатами, полученными при длительном старении (при температуре 700 °С) сплава ХН55ВМТКЮ, свидетельствующими о существенном увеличении твердости по сравнению

Характеристики механических свойств материала лопаток из сплава ХН55ВМТКЮ после наработки в эксплуатации 1058 ч и по ТУ [9] (температура испытания 20 °С)

Место измерения	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	НВ, кгс/мм ²
Хвостовик	91,7 – 98,8	70,7 – 77,0	9,4 – 10,4	8,5 – 13,0	292 – 306
Перо	91,3 – 99,0	78,8 – 80,3	4,2 – 5,8	3,4 – 7,2	345
По ТУ	90 – 110	75 – 80	6 – 12	8 – 12	285 – 341

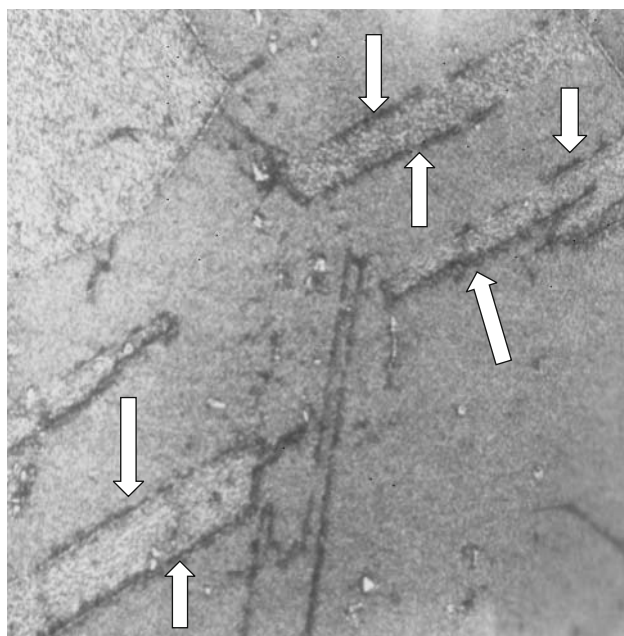


Рис. 6. Двойникование в материале турбинной лопатки из сплава ХН55ВМТКЮ (стрелками показаны границы двойников и выделения вторичных фаз, $\times 500$)

с исходным закаленным и состаренным состоянием [9].

Выделение в структуре материала фазы игольчатой морфологии наряду с образованием по границам зерен слоя карбидов ($M_{23}C_6$) привело к росту твердости и значительному снижению (примерно в два раза) пластических характеристик и способствовало разрушению лопатки в эксплуатации. Фрактографическим и металлографическим анализами установили, что распространение поверхности излома на некоторых участках проходило по плоскостям расположения игольчатых (пластинчатых) выделений, что, очевидно, снижало сопротивление распространению усталостной трещины. (В нормативно-технической документации нормы допустимости (недопустимости) выделений нежелательных фаз пластинчатой (игольчатой) морфологии отсутствуют.)

Идентификация выделений фаз игольчатой морфологии путем поиска отличий между карбидными и ТПУ σ - и μ -фазами затруднительна. С одной стороны, карбидные превращения (в первую очередь распад наименее устойчивых $Cr_{23}C_6$, Mo_6C , WC , Co_2C) приводят к перераспределению легирующих элементов, переходу Cr , W , Co , Mo в γ -твердый раствор, способствуя образованию пластин σ -фазы в соответствии с ее стехиометрическим составом $(Cr, Mo, W)_x(Ni, Co)_y$. С другой стороны, карбиды, например $M_{23}C_6$, имеют сложную кубическую структуру, чрезвычайно близкую к ТПУ структуре σ -фазы [1].

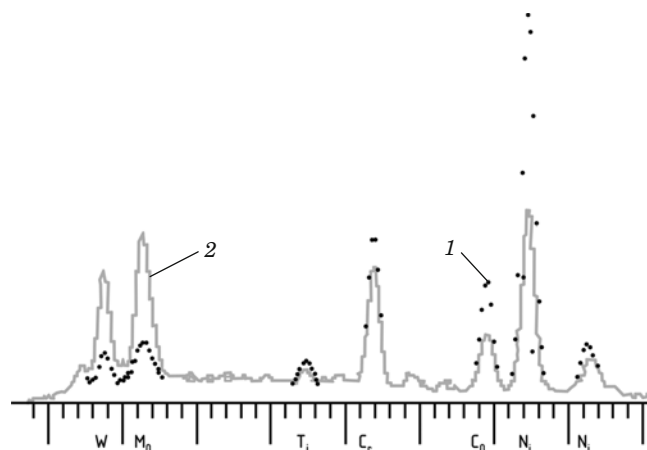


Рис. 7. Спектрограмма Link матрицы материала лопатки из сплава ХН55ВМТКЮ (1) и фазы игольчато-дендритной морфологии (2) (см. рис. 4)

Зарождение σ -фазы происходит на частицах $M_{23}C_6$. Карбиды, кроме их преимущественного формирования по границам зерен, могут выделяться, как и ТПУ-фазы, вдоль плоскостей двойников и иметь пластинчатую (игольчатую в плоскости шлифа) морфологию (рис. 6).

Микрорентгеноспектральный анализ на установке Link (СЭМ JSM-840) показал, что в отличие от матрицы сплава выделения фазы игольчато-дендритной морфологии характеризуются повышенным содержанием вольфрама и молибдена и пониженным — титана, хрома, кобальта и никеля (рис. 7).

Пониженное содержание хрома в исследуемой фазе не позволяет считать ее карбидом типа $M_{23}C_6$, поскольку последний представляет собой соединение на основе $Cr_{23}C_6$. Травление в реактиве Мураками (10 г $NaOH$; 10 г $K_3[Fe(CN)_6]$; 100 мл H_2O), обычно применяемом для выявления σ -фаз [11], также ничего не дало. С учетом этого фазы игольчато-дендритной морфологии следует отнести к соединениям типа двойных карбидов на основе $Ni_3(W, Mo)_3C$.

Склонность сплава к образованию σ -фазы и тем самым его эксплуатационную пригодность оценивали методом расчета химического состава по числу электронных вакансий (N_V) [12 – 14]. Данный метод позволял также соотнести химический состав исследуемой плавки с критическим для данного сплава, что важно для дифференцированного подхода к отбраковке лопаток (как правило, после одинаковой наработки материал лопаток из одного сплава, но разных плавки характеризуется разной склонностью к образованию ТПУ-фаз). Сплавы, имеющие максимально допустимые концентрации таких элементов, как Cr , W , Co и Mo , характеризовались наибольшей склонностью к образованию σ -фазы, поскольку

эти элементы входят в ее состав и при определенном стехиометрическом соотношении способствуют ее образованию.

В последнее время становится актуальной задача контроля выделений нежелательных ТПУ-фаз в структуре материала неразрушающими методами.

Поскольку в процессе технологических нагревов и наработки в эксплуатации в материале турбинных лопаток (сплавы ЖС6У-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС32-ВИ) формируются пластины ТПУ-фаз — очаги зарождения деформационных пор и трещин, ориентированные по плоскостям плотной упаковки металлической матрицы {111} [15], разработали следующий способ неразрушающего электромагнитного контроля качества структуры материала [16]. При охлаждении лопаток до криогенных температур σ -фазы переходят в ферромагнитное состояние, поэтому намагничивание и измерение величины поля остаточной индукции в охлажденном состоянии позволяют выявить наличие ТПУ-фаз на фоне исходной намагниченности ЖНС (изначально сплав немагнитен).

Замечено, что в процессе высокотемпературных воздействий магнитные свойства материала меняются (например, за счет окисления материала и образования магнитных окислов) по сравнению с исходным немагнитным состоянием. Способ неразрушающего электромагнитного контроля позволяет выявлять ТПУ-фазы (типа σ) в структуре материала значительно окисленных лопаток, а также и при наличии во внутренних полостях посторонних ферромагнитных частиц.

Своевременное обнаружение σ -фаз в процессе производства и при ремонте исключит установку на ГТД лопаток с пониженными прочностными и пластическими характеристиками.

Таким образом, при изготовлении и в процессе наработки лопаток ГТД из высоколегированных деформируемых и литейных ЖНС в структуре материала формируются выделения ТПУ- и карбидных фаз игольчатой (пластинчатой) морфологии как под защитными покрытиями, ухудшая характеристики механических свойств поверхностных слоев ЖНС на глубину десятков микрон, так и в объеме основного материала, понижая его прочностные и пластические свойства. Установлено, что наличие ТПУ-фаз в основном материале приводит к значительному росту его твердости и снижению (примерно в два раза) пластических характеристик, что способствует разрушению лопатки в эксплуатации.

Для выявления наличия в материале лопаток недопустимого количества σ -фаз предложен способ неразрушающего электромагнитного контро-

ля, позволяющий в процессе производства и при ремонте исключить установку на ГТД лопаток с пониженными прочностными и пластическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Кн. 1 / Под ред. Ч. Т. Симса, Н. С. Столофа, У. К. Хагеля. — М.: Металлургия, 1995. — 384 с.
2. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. — М.: Машиностроение, 1997. — 336 с.
3. Кузнецов В. П., Лесников В. П., Попов Н. А. Материаловедение: монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы. — М.: Юрайт, 2017. — 161 с.
4. Киселев Ф. Д. Диагностика разрушений и оценка эксплуатационной работоспособности рабочих турбинных лопаток авиационных двигателей. — М.: Изд. МАТИ, 2013. — 296 с.
5. Назаркин Р. М., Колодочкина В. Г., Оспенникова О. Г., Орлов М. Р. Необратимые изменения тонкой структуры монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов в процессе длительной эксплуатации турбинных лопаток / Труды ВИАМ. 2015. № 12.
6. Казанский Д. А. Проблемы продления срока службы рабочих и направляющих лопаток современных газовых турбин / Электрические станции. 2016. № 6.
7. Suzuki A., Rae C. Secondary Reaction Zone Formations in coated Ni-base Single Crystal Superalloys. Int. Conf. on Adv. Str. and Functional Mat. Design / J. of Ph.: Conference Series. 2008. P 1–6.
8. Морозова Г. И., Тимофеева О. Б., Петрушин Н. В. Особенности структуры и фазового состава высокоренивого никелевого жаропрочного сплава / МТМ. 2009. № 2.
9. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1968. — 407 с.
10. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. — М.: Металлургия, 1986. — 480 с.
11. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: справочник / Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1988. — 400 с.
12. Woodyatt L. R., Sims C. T., Beattie H. J. Prediction of Sigma-Type Phase Occurrence from Compositions in Austenitic Superalloys / Trans. AIME. 1966. Vol. 236. P 519–534.
13. Копылов А. А., Копылова В. А., Лесников В. П., Писарев Б. К. К вопросу о прогнозировании фазовой стабильности по программе PHACOMP / ФММ. 1989. Т. 67. Вып. 2. С. 361–364.
14. Жуков А. А., Смирнова О. А. Оценка эксплуатационной пригодности жаропрочных сплавов для ГТД и ГТУ / Авиационно-космическая техника и технология. 2005. № 10(26). С. 60–66.
15. Орлов М. Р. Технологическое обеспечение ресурса рабочих лопаток первых ступеней турбины авиационных и наземных газотурбинных двигателей: дис. ... д. т. н. — М., 2009.
16. А. с. 1280509 СССР, G 01 N 27/80. Способ электромагнитного контроля качества структуры материала изделий и устройство для его осуществления / Киселев Ф. Д. — № 3955971; заявл. 08.08.1985; опубл. 30.12.1986. Бюл. № 48.

REFERENCES

1. Superalloys II: high-temperature materials for aerospace and industrial power plants. Book 1 / C. T. Sims, N. S. Stoloff, W. K. Hagele, eds. — Moscow: Metallurgiya, 1995. — 384 p. [in Russian].
2. Shalin R. E., Svetlov I. L., Kachanov E. B., et al. Monocrystals of nickel superalloys. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1997. — 336 p. [in Russian].
3. Kuznetsov V. P., Lesnikov V. P., Popov N. A. Materials: monocrystal heat-resistant nickel alloys. — Moscow: Yurait, 2017. — 161 p. [in Russian].

4. **Kiselev F. D.** Diagnosis of damage and assessment of operational health of workers turbine blades of aircraft engines. — Moscow: Izd. MATI, 2013. — 296 p. [in Russian].
5. **Nazarkin R. M., Kolodochkina V. G., Ospennikova O. G., Orlov M. R.** Irreversible changes in the fine structure of single crystals of heat-resistant Nickel alloys during long operation of turbine blades / Trudy VIAM. 2015. N 12 [in Russian].
6. **Kazanskii D. A.** The problem of prolongation of service life of blades and vanes of modern gas turbines / Elektricheskie stantsii. 2016. N 6.
7. **Suzuki A., Rae C.** Secondary Reaction Zone Formations in coated Ni-base Single Crystal Superalloys. Int. Conf. on Adv. Str. and Functional Mat. Design / J. of Ph.: Conference Series. 2008. P. 1 – 6.
8. **Morozova G. I., Timofeeva O. B., Petrushin N. V.** Features of structure and phase composition high-temperature nickel alloy / MiTOM. 2009. N 2 [in Russian].
9. **Khimushin F. F.** Heat-resistant steels and alloys. — Moscow: Metallurgiya, 1968. — 407 p. [in Russian].
10. **Novikov I. I.** Theory of heat treatment of metals. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 480 p. [in Russian].
11. **Beckert M., Klemm X.** Methods of metallographic etching / Russian translation. — Moscow: Metallurgiya, 1988. — 400 p. [in Russian].
12. **Woodyatt L. R., Sims C. T., Beatie H. J.** Prediction of sigma-type phase occurrence from compositions in austenitic superalloys / Trans. AIME. 1966. Vol. 236. P. 519 – 534.
13. **Kopylov A. A., Kopylova V. A., Lesnikov V. P., Pisarev B. K.** To the issue of prediction of phase stability on the program PHACOMP / FMM. 1989. Vol. 67. Issue 2. P. 361 – 364 [in Russian].
14. **Zhukov A. A., Smirnova O. A.** The assessment of the serviceability of high-temperature alloys for GTE and GTU / Aviats.-Kosm. Tekhn. Tekhnol. 2005. N 10(26). P. 60 – 66 [in Russian].
15. **Orlov M. R.** Technological support resource working blades of the first turbine stages of aviation and terrestrial gas turbine engines: doctoral thesis. — Moscow, 2009 [in Russian].
16. USSR Inventor's certificate 1280509 SSSR, G 01 N 27/80. Method of electromagnetic control of quality of structure material and device for its implementation / Kiselev F. D. — N 3955971; appl. 08.08.1985; publ. 30.12.1986. Byull. Otkryt. Izobret. 1986. N 48 [in Russian].