

УДК 621.74.045: 669. 24: 621.981

**Н. А. ЛЫСЕНКО<sup>1</sup>, В. И. ВОРОБЬЕВ<sup>2</sup>, Н. Е. СУСЛОВА<sup>1</sup>,  
В. В. КЛОЧИХИН<sup>1</sup>, А. Я. КАЧАН<sup>3</sup>**<sup>1</sup> АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина<sup>2</sup> НПП «Юпитер», Запорожье, Украина<sup>3</sup> Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ

Проведены работы по имитации режимов кратковременной приёмистости. При этом исследовали влияние кратковременных нагревов при 1160...1260°С на изменение микроструктурного состояния материала рабочих лопаток 1 ступени ТК из жаропрочного никелевого сплава ЖС6К-ВИ. Установлено, что кратковременные однократные забросы температуры (до 8 секунд – при 1160°С и до 4 секунд – при 1200...1260°С) не оказывают существенного влияния на микроструктуру лопаток ТК, а также защитного покрытия ВСДП-11. При нагреве лопаток до температуры 1260°С в течение 16 секунд происходило образование структур, характерных для эксплуатационного перегрева. Циклические кратковременные нагревы при температурах 1160...1260°С способствовали образованию множественных трещин, без признаков изменения микроструктуры исследуемых лопаток.

**Ключевые слова:** жаропрочные сплавы, лопатки, кратковременные нагревы

### Введение

В последнее десятилетие эксплуатации турбовальных двигателей на вертолетах Ка-32, Ми-17 и др., интенсивно эксплуатирующихся при тушении пожаров, логгинге, погрузочно-разгрузочных работах и т.п., имели место случаи обрыва верхней части пера рабочих лопаток 1 ступени турбины компрессора (ТК), что приводило к последующему повреждению всех рабочих лопаток 1...4 ступеней.

В наибольшей степени обрывы лопаток наблюдались на двигателях, эксплуатировавшихся на логгинге (транспортировка древесины) в условиях многоциклового приёмистости (с форсированием мощности путём подрегулировки автомата приёмистости для частых подрывов тяжёлых грузов). Однако, при металлографических исследованиях сохранившейся нижней части пера рабочих лопаток 1 ступени ТК, указанных двигателей, структурные изменения (в зоне действия максимальных температур), свидетельствующие о нагреве лопаток выше температуры 1050°С, либо полностью отсутствовали, либо наблюдались незначительные структурные изменения в виде коагуляции интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы.

Следует отметить, что максимальная температура газов ( $T_g=990^\circ\text{C}$ ) на входе в сопловой аппарат 1 ступени (1СА) при работе двигателя на установившихся режимах в диапазоне  $\Pi_{\text{ТК}}$  -102 84% ограничивается объектовым регулятором РТ - 12-6 ( $\Pi_{\text{ТК}}$  – частота вра-

щения турбокомпрессора). Наибольшая интенсивность напряжений при действии только центробежных сил составляет менее 1 МПа. Наибольшая интенсивность напряжений при совместном действии центробежных сил и температурного поля составляет 260 МПа [1].

Ранее имевшиеся случаи оплавления и последующего разрушения рабочих лопаток 1 ступени ТК (с наличием растворения интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы, что свидетельствует о длительных нагревах лопаток выше температуры 1200°С) обычно были вызваны длительным помпажом из-за недопустимого абразивного износа лопаток компрессора или нарушения работоспособности топливного регулятора, в том числе вследствие перепутывания местами жиклеров автомата приёмистости и автомата запуска. Возникновение помпажа характеризовалось быстрым ростом температуры газов и падением частоты вращения турбокомпрессора ниже 84%, что приводило к отключению РТ - 12-6 и неконтролируемому забросу  $T_g$  выше 1350°С с оплавлением рабочих лопаток турбины [2].

В процессе ремонта отдельных двигателей, эксплуатировавшихся на погрузочно-разгрузочных работах, преимущественно в странах с жарким климатом, бракуется значительное количество рабочих лопаток 1 и 2 ступеней ТК по короблению наиболее тонких (в верхней части пера) выходных кромок. При этом микроструктуры в виде коагуляции и частичного растворения интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы, в том числе на выходных кромках, характерные для

разогрева материала лопаток (сплав ЖС6К-ВИ) выше 1050°C, не выявлены.

Отмеченное коробление выходных кромок обусловлено относительно быстрым (в течение 1...2 секунд) нагревом выше температур 1100°...1200°C с удлинением и короблением наиболее тонких участков выходных кромок (в условиях действия центробежных сил), при более медленном разогреве более массивной центральной зоны (Смах) рабочих лопаток. Указанный быстрый нагрев кромок может происходить в процессе выполнения зарегулированной кратковременной частичной (менее 3 секунд) приёмистости в результате догорания частиц избыточного топлива на лопатках 1СА из-за ещё недостаточного поступления воздуха в жаровую трубу при низкой частоте вращения компрессора (коэффициент избытка воздуха  $\alpha \sim 2$ ) [2].

Это подтверждается экспериментальной работой [3] на малоразмерном газотурбинном двигателе (ГТД). При выполнении кратковременной (~1,5с) приёмистости за 0,5с температура газов перед турбиной повысилась с 900°C до 1200°C. Следует учесть, что термпары открытого спая имеют инерционность 1с, а термпары полузакрытого типа (Т-102) – 2,5...3,0 с.

Кроме того, при исследовании одного из двигателей, отстраненного от эксплуатации после наработки 56 часов по возникновению повышенных вибраций, на выходных кромках 70 рабочих лопаток 1 ступени ТК было обнаружено по 1...2 окисленных трещин длиной 2...9 мм (с отрывом верхней части пера на двух лопатках 1 ступени и повреждением лопаток остальных ступеней). Причиной массового образования трещин на тонких выходных кромках большинства рабочих лопаток 1 ступени ТК явилась зарегулировка времени частичной приёмистости до 1...2 с (при норме 3...6 с). При этом термпары Т-102 и охлаждаемые лопатки 1СА ТК повреждений не имели, что косвенно может свидетельствовать о догорании топлива в зоне рабочих лопаток ТК в процессе кратковременных приёмистостей (за 56 часов наработки на морском вертолёте ориентировочно могло быть проведено около 50...100 приёмистостей).

В конце кратковременной частичной приёмистости на второй-третьей секундах при выходе турбокомпрессора на заданную частоту вращения расход воздуха через камеру сгорания становится близким к расчетному, температура газов в зоне рабочих лопаток 1 и 2 ступеней ТК резко снижается до расчетных 750 и 650°C. При этом наиболее тонкие удлинившиеся покоробленные выходные кромки, нагретые выше 1100...1250°C, резко охлаждаются до температуры 750 и 650°C, что может приводить к образованию микротрещин в защитном покрытии выходных кромок. Одновременно в наиболее тонких

участках выходных кромок создаются значительные статические растягивающие напряжения, что в сочетании с действующими растягивающими центробежными нагрузками могут приводить к появлению начальных трещин на выходных кромках.

В процессе дальнейшей эксплуатации двигателя наличие концентратора напряжений может приводить к образованию начальной трещины на выходной кромке, а также ускоренному развитию термоусталостной трещины от действующих вибрационных и динамических нагрузок.

В настоящей работе изучали влияние кратковременных нагревов при температурах 1160...1260°C на изменение микроструктурного состояния материала рабочих лопаток 1 ступени ТК из сплава ЖС6К-ВИ.

### Методика проведения исследований

Исследование проводили с использованием новых окончательно изготовленных по серийной технологии рабочих лопаток ТК, отлитых методом равноосной кристаллизации из жаропрочного никелевого сплава ЖС6К-ВИ. На поверхность пера лопаток нанесено жаростойкое Al-Si-Y защитное ионно-плазменное покрытие ВСДП-11.

С целью выявления признаков изменения микроструктуры сплава ЖС6К-ВИ при кратковременных нагревах рабочих лопаток ТК в интервале температур 1160...1260°C проведены работы по имитации режимов кратковременной приёмистости. При этом рабочие лопатки нагревали в закалочной ванне, содержащей расплавленную хлор-бариевую соль, при температурах 1160°C, 1200°C и 1260°C. Время выдержки лопаток в закалочной ванне при указанных температурах составляло: 2,4,8,16 сек, с последующим охлаждением через ~ 1 сек под струей сжатого воздуха на расстоянии 0,5 м от сопла.

Кроме того, лопатки подвергали циклическому нагреву при указанных выше температурах (15 циклов нагрева – по 2 сек) с охлаждением после каждого цикла по 2 секунды под струей сжатого воздуха.

Исследование микроструктурного состояния осуществляли на микрошлифах, вырезанных из рабочих лопаток ТК (до и после проведения имитационных режимов), методами оптической (микроскоп «Axio Observer. Dlm») и растровой электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп «JEOL JSM T-300»).

Химический состав сплава определяли методами спектрального и химического анализов.

### Анализ и обсуждение полученных результатов

Химический состав рабочих лопаток ТК удовлетворительный и отвечает требованиям нормативной технической документации (НТД) для сплава ЖС6К-ВИ.

При металлографическом исследовании окончательно изготовленных рабочих лопаток ТК из сплава ЖС6К-ВИ установлено, что до проведения имитационных нагревов основными структурными составляющими являются:  $\gamma$ -твердый раствор, упрочненный интерметаллидной  $\gamma'$ -фазой, с наличием карбидов, карбонитридов и небольшого количества эвтектической фазы ( $\gamma$ - $\gamma'$ ).

Микроструктурное исследование лопаток после кратковременных нагревов показало, что нагревы в течение 2, 4 и 8 секунд при температуре 1160°C не оказывают влияние на изменение микроструктуры материала лопаток (рис. 1 а,б,в), а также защитного покрытия ВСДП-11. Нагрев при 1200...1260°C в течение 2 и 4 секунд также не приводит к изменениям структурного состояния исследуемых лопаток ТК (рис. 1 д,е,и,к).

При нагреве до 1160°C структурные изменения в виде частичного растворения и коагуляции интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы наблюдаются, начиная с 16-ти секундной выдержки (рис. 1г).

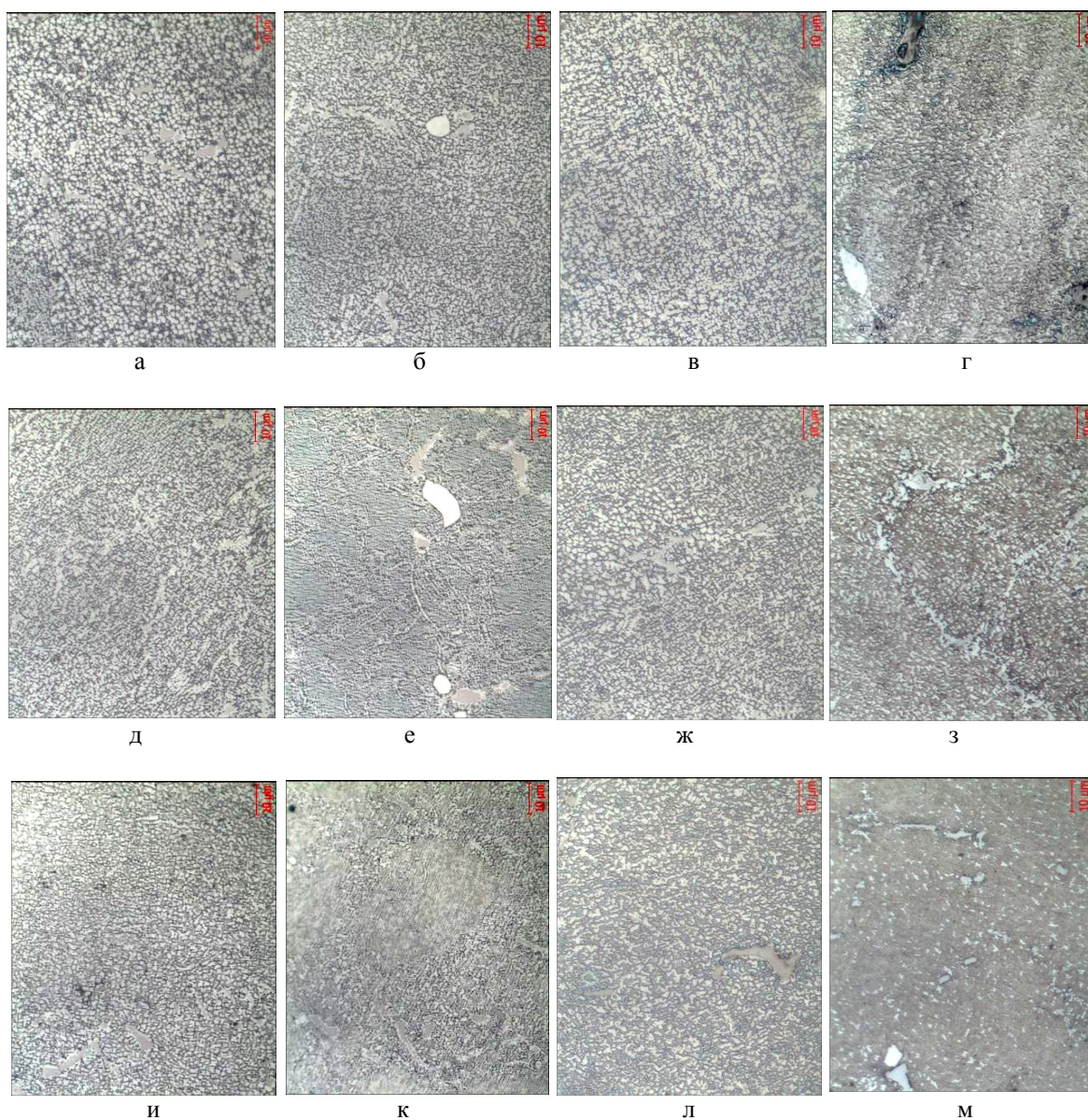


Рис. 1. Микроструктура рабочих лопаток ТК после кратковременных нагревов при температурах 1160°C (а, б, в, г), 1200°C (д, е, ж, з), 1260°C (и, к, л, м),  $\times 1000$ : а, д, и – 2 с; б, е, к – 4 с; в, ж, л – 8 с; г, з, м – 16 с

Частичное растворение и коагуляция частиц  $\gamma'$ -фазы при 1200°C и 1260°C происходит уже при выдержке в течение 8 секунд (рис. 1ж,з,л). Увеличение выдержки при 1260°C до 16 секунд способствует практически полному растворению упрочняющей фазы (рис. 1м). Причем, чем выше температура нагрева, тем большее количество  $\gamma'$ -фазы растворяется в матрице.

Электронно-микроскопическим исследованием при увеличениях 10000<sup>x</sup> установлено, что интерметаллидные частицы  $\gamma'$ -фазы в осях и междендритных пространствах материала исследуемых лопаток (сплав ЖС6К-ВИ) имеют примерно одинаковые размеры и образуют блоки, состоящие из четырех частиц. Форма  $\gamma'$ -частиц – кубоидная.

Микроанализ показал, что частицы  $\gamma'$ -фазы в материале лопаток нагретых при 1160°C до 8 секунд имеют кубическую форму, без каких-либо видимых изменений в сравнении с исходной структурой лопаток до проведения кратковременных нагревов.

Аналогичное морфологическое состояние  $\gamma'$ -фазы выявлено при нагреве 1200... 1260°C и выдержках до 4 секунд (рис. 2 а).

При выдержках в течение 16 секунд (1160°C) и 8 секунд (1200...1260°C) наряду с коагуляцией и частичным растворением интерметаллидной фазы наблюдается срашивание  $\gamma'$ -частиц (рис. 2 б). В структуре лопатки с 16-ти секундной выдержкой (1260°C) происходит практически полное растворение  $\gamma'$ -фазы, коагуляция карбидов, а также выделение из твердого раствора мелкодисперсных частиц вторичной интерметаллидной фазы  $\gamma''$  (рис. 2 в), что характерно для структуры перегрева при эксплуатации.

Микроструктурное состояние защитного покрытия ВСДП-11 на поверхности пера лопаток до и после проведения имитационного нагрева при 1260°C (выдержка – 16 секунд), представлено на рис. 3. Установлено, что существенные изменения, характерные для высокотемпературного воздействия, наблюдаются и в структуре защитного слоя при нагреве 1260°C в течение 16 секунд (рис. 3 б). На границе раздела «диффузионная зона – основной металл» выявлено обеднение металла легирующими элементами. Величина диффузионной зоны увеличивается в ~ 2 раза.

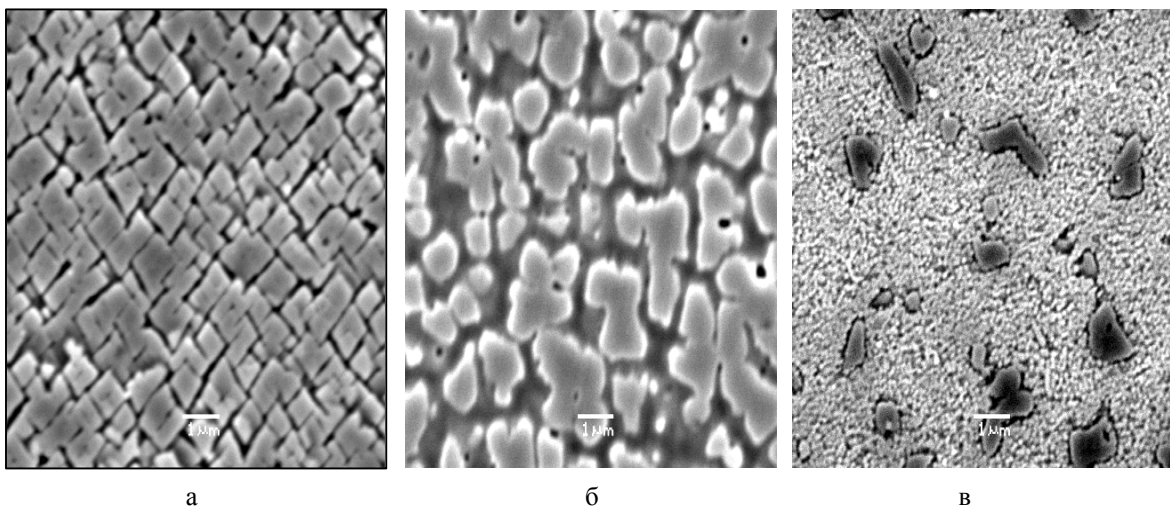


Рис. 2. Морфологическое состояние интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы после кратковременного нагрева при температуре 1260°C,  $\times 10000$ : а – 4 с; б – 8 с; г – 16 с

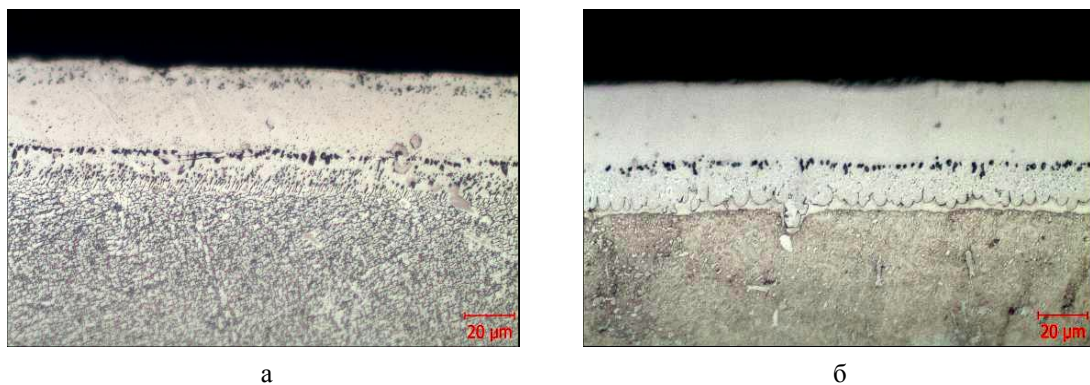


Рис. 3. Микроструктура защитного покрытия ВСДП-11 на поверхности пера рабочей лопатки до (а) и после нагрева при температуре 1260°C в течение 16 секунд (б),  $\times 500$

Микроисследование структурного состояния материала рабочих лопаток ТК, подвергавшихся циклическим нагревам при температурах 1160 °С, 1200°С и 1260°С (15 циклов нагрева – по 2 сек, с охлаждением после каждого цикла по 2 секунды под струей сжатого воздуха), показало, что кратковременные циклические нагревы по указанным режимам не приводят к заметным изменениям структуры сплава ЖС6К-ВИ; перегрева нет (рис. 4). Вместе с тем следует отметить, что на пере лопаток ТК в процессе термоциклирования при температурах 1200°С и 1260°С произошло образование множественных трещин, распространяющихся на глубину защитного покрытия (включая диффузионную зону) (рис. 5 а,б). Трещины имеют извилистое строение, характерное для межзеренного разрушения. На лопатках после циклических нагревов при 1160°С трещины не обнаружены.

Известно [4], что нагрев и охлаждение детали вызывает неравномерную деформацию, что приводит к возникновению напряжений вследствие термического удара. Необходимо учитывать, что действие повторных нагревов сопровождается сложным комплексом явлений, проходящих в материалах при высоких температурах – окислением, изменением диффузионной подвижности атомов, старением, рекристаллизацией, ползучестью и пр. [5].

Термостойкость материалов уменьшается с ростом максимальной температуры цикла. Это можно объяснить возрастанием напряжений с повышением температуры, в особенности, в поверхностных слоях [6].

Для данного циклического разрушения характерно множественное возникновение трещин, что объясняется локальностью действия термических напряжений и, главное, относительно быстрой их релаксацией. При повторном термическом воздействии наибольшие напряжения возникают в других местах, что приводит к образованию новых трещин. Вначале скорость развития трещины обычно относительно велика – по мере распространения вглубь она постепенно падает [7]. Поэтому трещины, образовавшиеся в результате действия кратковременных циклических нагревов, на первых этапах их возникновения редко имеют большую протяженность.

Влияние термических напряжений, приводящее к образованию трещин, также наблюдается при однократном кратковременном высокотемпературном нагреве лопатки ТК (1260°С, выдержка - 2с) с последующим ее охлаждением в воде. При этом образуются тонкие прерывистые трещины, проникающие на глубину, не превышающую толщины защитного слоя ВСДП-11 (рис. 5 в). Структурные изменения в материале лопатки (сплав ЖС6К-ВИ) при указанном режиме не выявлены.

Кроме того, были проведены исследования рабочих лопаток 1 ступени ТК, наработавших в эксплуатации ~1500 часов, обработанных по аналогичным режимам кратковременного нагрева (как однократным, так и циклическим). Состояние микроструктуры материала и защитного покрытия эксплуатирувавшихся лопаток после кратковременных нагревов идентично структуре новых лопаток (до постановки на двигатель) после указанных выше режимов обработки.

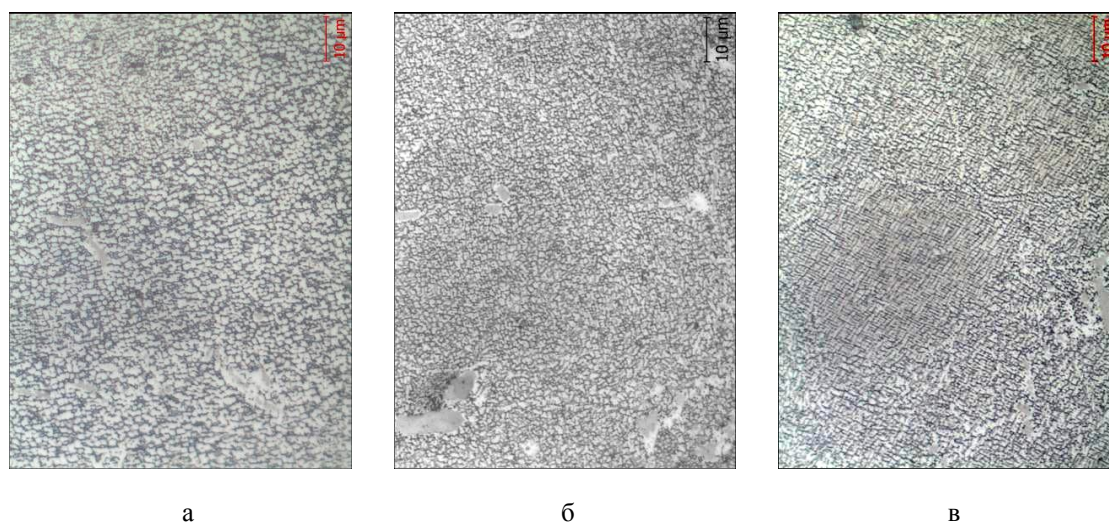


Рис. 4. Микроструктура рабочих лопаток ТК после циклических нагревов при температурах 1160°С (а), 1200°С (б) и 1260°С (в), x1000

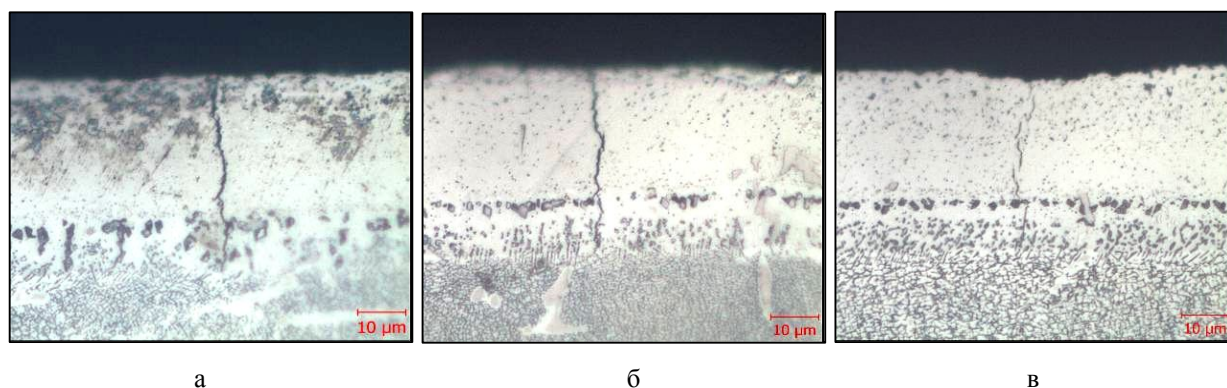


Рис. 5. Микротрещины в защитном покрытии ВСДП-11 на поверхности пера лопаток ТК после циклических нагревов при температурах 1200°C (а) и 1260°C (б), а также после нагрева до температуры 1260°C (2сек) и охлаждения в воде (в), x1000

### Выводы

1. Однократные забросы температуры в условиях кратковременной приёмистости (при разгоне двигателя) до 8 секунд при 1160°C и до 4 секунд – при 1200...1260°C не оказывают влияния на изменение микроструктуры материала рабочих лопаток ТК, а также защитного покрытия ВСДП-11.

2. При нагреве до 1160°C структурные изменения в виде частичного растворения и коагуляции интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы наблюдаются, начиная с 16-ти секундной выдержки, а при 1200...1260°C – с 8 с.

3. При увеличении выдержки до 16 секунд (1260°C) происходит образование структур, характерных для перегрева в процессе эксплуатации.

4. Кратковременные циклические нагревы при температурах 1160...1260°C не приводят к заметным изменениям структуры сплава ЖС6К-ВИ, но при 1200°C и 1260°C способствуют образованию множественных трещин, распространяющихся на глубину защитного покрытия ВСДП-11.

### Литература

1. Анализ термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД [Текст] / Р. Жондковски, Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова [и др.] // *Механика та машинобудування*. – 2013. – № 1 – С. 23 – 28.

2. Дубровкин, И. Д. *Физико-химические свойства реактивных топлив* [Текст] : справочник / И. Д. Дубровкин. – М. : Химия – 1985. – 387 с.

3. McLain, R. D. *Control system requirements and considerations for high temperature engines* [Text] / R. D. McLain // *SAE Preprints*. – 1970. – № 700823.

4. Малинкина, Е. И. *Образование трещин при термической обработке стальных изделий* [Текст] / Е. И. Малинкина. – М. : Машиностроение. – 1965. – 176 с.

5. Фридман, Я. Б. *Механические свойства металлов* [Текст] / Я. Б. Фридман // *Механические испытания, конструкционная прочность*. – Ч. 2. – М. : Машиностроение. – 1972. – 368 с.

6. *Разрушение лопаток газовых турбин при теплосменах в газовом потоке, содержащем соли морской воды* [Текст] / Г. Н. Третьяченко, В. А. Конев, Л. В. Кравчук [и др.] // *Прочность материалов и конструкций : сб. науч. тр.* – К. : Наук. думка. – 1975. – С. 276 – 286.

7. Гордеева, Т. А. *Анализ изломов при оценке надежности материалов* [Текст] / Т. А. Гордеева, И. П. Жегина. – М. : Машиностроение, 1978. – 200 с.

### References

1. Zhondkovski, R., Vorobyov, Y. S., Ovcharova, N. Y., Yevchenko, T. Y. *Analiz termouprugogo sostoyaniya ohlajdayemoy monokristallichesoy lohatki GTD* [Turbine engine cooled monocrystalline blade thermal-elastic state analysis]. *Mekhanika ta mashinobuduvannya*, 2013, no. 1, pp. 23-28.

2. Dubrovkin, I. D. *Fiziko-khimicheskiye svoystva reaktivnih topliv* [Physical-chemical properties of jet fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 387 p.

3. McLain, R. D. *Control system requirements and considerations for high temperature engines*. *SAE Preprints*, 1970, no. 700823.

4. Malinkina, Y. I. *Obrazovaniye treshchin pri termicheskoy obrabotke stalnih izdeliy* [Cracks origination at steel products thermal treatment]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1965. 176 p.

5. Fridman, Y. B. *Mekhanicheskiye svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. *Mekhanicheskiye ispitaniya, konstruktсионnaya prochnost*, Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974, no. 2. 368 p.

6. Tretyatenko, G. N., Konev, V. A., Kravchuk, L. V. *Razrusheniye lopatok gazovih turbin pri teplosmenah v gazovom potoke, sodержashchem soli morskoy vodi* [Gas turbine blades destruction at temperature changing of gas flow containing sea water salt]. *Prochnost materialov i konstruktsiy: sb. nauch. tr.*

[Strength of materials and structures. Collection of scientific papers]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, pp. 276-86.

7. Gordeyeva, T. A., Zhegina, I. P. *Analiz izlomov pri otsenke nadyozhnosti materialov* [Fracture analysis for materials reliability estimation]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1978. 200 p.

*Поступила в редакцию 01.04.2016, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. В. А. Титов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический университет», Киев, Украина.

### **ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСОВИХ ФАКТОРІВ НА ЗМІНУ МІКРОСТРУКТУРНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛУ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБІНИ**

*Н. О. Лисенко, В. І. Воробйов, Н. Є. Сулова, В. В. Ключихін, О. Я. Качан*

Проведені роботи по імітації режимів короткочасної прийомистості. При цьому досліджували вплив короткочасних нагрівів при 1160...1260°C на зміну мікроструктурного стану матеріалу робочих лопаток 1 ступені ТК з жароміцного нікелевого сплаву ЖС6К-ВІ. Встановлено, що короткочасні одноразові закидання температури (до 8 секунд – при 1160°C і до 4 секунд – при 1200...1260°C) не спричиняють істотного впливу на мікроструктуру лопаток ТК, а також захисного покриття ВСДП-11. При нагріванні лопаток до температури 1260°C впродовж 16 секунд відбувалось утворення структур, характерних для експлуатаційного перегріву. Циклічні короткотимчасові нагрівання при температурах 1160...1260°C сприяли утворенню множинних тріщин, без ознак зміни мікроструктури досліджуваних лопаток.

**Ключові слова:** жароміцні сплави, лопатки, короткочасні нагріви

### **THE INFLUENCE OF TEMPERATURE-TIME FACTORS ON THE CHANGE IN MICROSTRUCTURAL CONDITION OF A MATERIAL OF ROTOR BLADES OF THE TURBINE**

*N. A. Lysenko, V. I. Vorobyov, N. Y. Suslova, V. V. Klochihin, A. Y. Kachan*

The performed simulation modes short-term pickup. Thus investigated the effect short-term heating at 1160...1260°C on the microstructural change of the material condition of the workers the blades of stage 1 of the TC of heat-resistant nickel alloy ЖС6К-ВІ. Installed, that one short-time transitions of the temperature (up to 8 seconds – when 1160°C and up to 4 seconds – when 1200...1260°C) does not have a significant impact on the microstructure of the blades of the TC, as well as protective coating ВСДП-11. During heating of the blades to temperature of 1260°C in 16 seconds came the formation of structures characteristic of the exoperational overheating. Cyclic short-term heating at temperatures of 1160...1260°C contributed to the formation of multiple cracks, no signs of change in the microstructure of the investigated blades.

**Keywords:** high-temperature alloys, blade, short-term heating

**Лысенко Наталия Алексеевна** – ведущий инженер управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Воробьев Виктор Иванович** – ведущий инженер НИП «Юпитер», Запорожье, Украина, e-mail: jupiter@zp.ukrte.net.

**Сулова Наталия Евгеньевна** – начальник бюро управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Ключихин Владимир Валерьевич** – начальник управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Качан Алексей Яковлевич** – заведующий кафедрой ЗНТУ, Запорожье, Украина, e-mail: opt.ugt@motorsich.com.

**Lysenko Nataliia Alexeyevna** – project engineer in chief of metallurgical engineers department JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Vorobyov Victor Ivanovich** – project engineer in SPP «Yupiter», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: jupiter@zp.ukrte.net.

**Suslova Nataliia Yevgenyevna** – bureau chief in chief of metallurgical engineers department JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Klochihin Vladimir Valerievich** – chief of metallurgical engineers department JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Kachan Alexey Yakovlevich** – chief of department in ZNTU, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: opt.ugt@motorsich.com.