

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СУПЕРСПЛАВОВ

©2011 Е. А. Тихомирова¹, А. А. Живушкин¹, Л. Б. Гецов², А. И. Рыбников²

¹ОАО «Климов», г. Санкт-Петербург

²ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург

Работа посвящена проблеме обеспечения гарантируемой конструкционной прочности монокристаллических рабочих лопаток авиационных ГТД с учетом анизотропии свойств, обусловленной их кристаллографической ориентацией. Особое внимание уделяется исследованию термоусталостных свойств образцов из монокристаллических суперсплавов. На примере сплава ЖС36ВИ показано влияние интервалов термоциклирования на долговечность образцов с заданной ориентацией.

Монокристаллические лопатки авиационных газотурбинных двигателей, анизотропия свойств, термоусталость, никелевые суперсплавы.

В настоящее время из-за возможной анизотропии жаропрочных свойств монокристаллов вопросам исследования влияния кристаллографической ориентации на механические свойства образцов и деталей уделяется большое внимание [1- 26 и др].

В основном это касается высокотемпературных характеристик длительной прочности и ползучести при статическом нагружении, а также кратковременных свойств при повышенных температурах. Работ, посвященных исследованию усталостных и термоусталостных характеристик, значительно меньше. Особый интерес среди них вызывают исследования сопротивления термоусталости монокристаллов образцов и деталей из жаропрочных никелевых суперсплавов [6-9]. В настоящей работе рассматривается методика испытаний и исследование образцов на термоусталость и связь с их кристаллографической ориентацией.

В качестве материалов исследований выбраны монокристаллы жаропрочных сплавов ЖС36-ВИ и ЖС32-ВИ, имеющие практическое применение и являющиеся характерными представителями соответственно никелевых безуглеродистых и углеродосодержащих суперсплавов. Отправным пунктом для исследователей анизотропии характеристик статической и динамической прочности монокристаллов жаропрочных никелевых суперсплавов (ЖНС) является анализ вероятного развития деформации кристалла в соответствии с основным кристаллографическим положением для ГЦК-металла. Согласно ему для кубического кристалла ГЦК – металла, относящегося к то-

чечной группе $m\bar{3}m$ имеются 24 различные системы скольжения [27].

В качестве основного критерия для определения действия сдвиговых напряжений используется выражение [28]

$$\tau = \Phi \sigma \quad (1)$$

где τ –напряжение, действующее в данной плоскости для данного направления;

σ – внешнее растягивающее напряжение;

Φ – фактор Шмида, причем

$$\Phi = \sin \chi \cos \lambda \quad (2)$$

где χ – угол между плоскостью скольжения и осью растяжения;

λ – угол между направлением скольжения и осью растяжения.

Фактор Шмида в настоящей работе рассчитывался как отношение $\tau / \sigma = \sin \chi \cos \lambda$ при $\sigma = 1$.

В соответствии с правилом Шмида действующей системой скольжения является та из множества кристаллографически эквивалентных, для которой приведенное сдвиговое напряжение больше некоторого критического значения. Кристаллографическая ориентация определялась в рабочей части плоских корсетных образцов (рис.1).

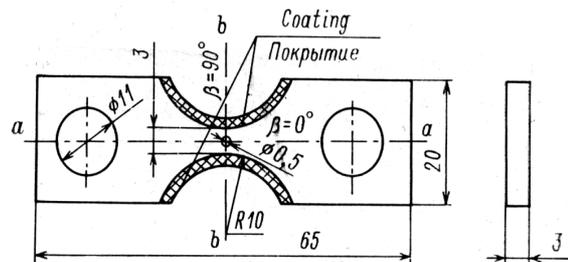


Рис. 1. Чертеж образца для испытаний на термоусталость

Измерялись отклонения плоскостей образца OX, OY, OZ , составляющих систему координат образца (ОСК) от ближайшей плоскости и нормали к плоскости кристаллической решетки с простейшими индексами. Вычислялись матрицы ориентации кристаллографической системы координат (КСК) по отношению к ортам (ОСК). Матрица ориентации A_i i -го образца представляет собой оператор вращения, составленный из строк – координат ортов КСК, записанных в базисе ОСК. В общем виде для схемы (рис. 2) матрица A_i представлена как (3) [29].

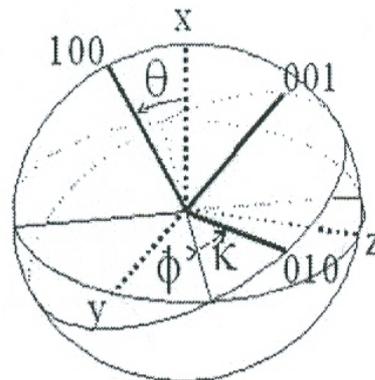


Рис. 2. Схема КСК по отношению к ОСК θ, ϕ, κ - углы Эйлера

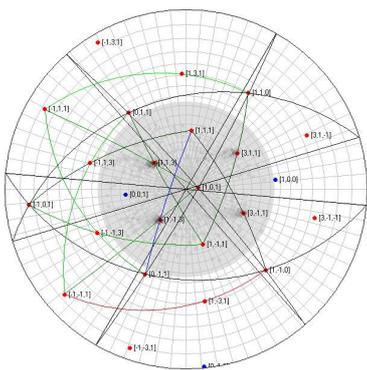
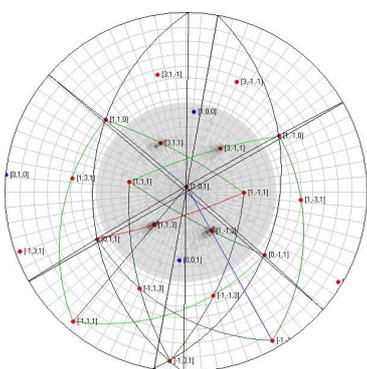
По данным измерений строились полюсные фигуры и в зависимости от фактора Шмида, наносились соответствующие линии скольжения (табл. 1) и вычисления A_i (рис. 3).

$$A_i = \begin{pmatrix} u_{100} \\ u_{010} \\ u_{001} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & -\sin \theta \cos \phi \\ \sin \kappa \sin \theta & -\sin \kappa \cos \theta \sin \phi + \cos \kappa \cos \phi & \sin \kappa \cos \theta \cos \phi + \cos \kappa \sin \phi \\ \cos \kappa \sin \theta & -\cos \kappa \cos \theta \sin \phi - \sin \kappa \cos \phi & \cos \kappa \cos \theta \cos \phi - \sin \kappa \sin \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

Таблица 1. Линии скольжения $\{111\} \langle 110 \rangle$

Образец серии 1			
	n	Наклон	Шмид
	1	27°56'	0.2533
	2	50°0'	0.3341
	3	92°36'	0.08795
	4	163°35'	0.2431
Образец серии 2			
	n	Наклон	Шмид
	1	0°10'	0.00264
	2	6°9'	0.07467
	3	84°15'	0.4406
	4	99°3'	0.4063

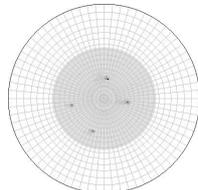
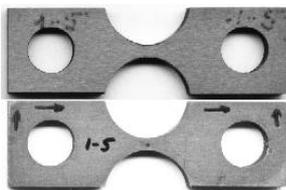
Окончание табл. 1

Образец серии 4			
	n	Наклон	Шмид
	1	16°45'	0.1655
	2	60°9'	0.4226
	3	131°11'	0.4715
	4	174°53'	0.05213
Образец серии 5			
	n	Наклон	Шмид
	1	29°50'	0.3755
	2	79°49'	0.4293
	3	89°12'	0.4344
	4	139°13'	0.4307

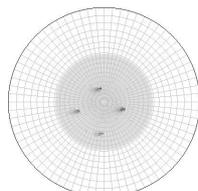
Образец

Полюсная фигура

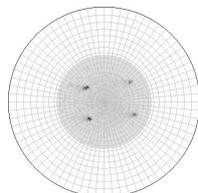
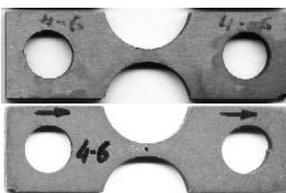
Ориентационная матрица A



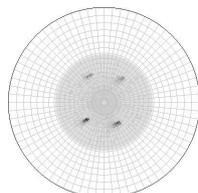
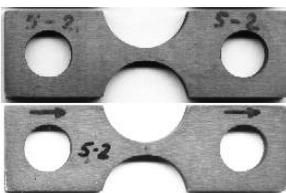
$$A_{1-5} = \begin{pmatrix} -0.61959 & 0.78375 & 0.043025 \\ -0.60948 & -0.51492 & 0.60282 \\ 0.49461 & 0.34728 & 0.79672 \end{pmatrix}$$



$$A_{2-3} = \begin{pmatrix} 0.67134 & 0.71931 & 0.17857 \\ -0.7385 & 0.66958 & 0.079232 \\ -0.062577 & -0.18507 & 0.98073 \end{pmatrix}$$



$$A_{4-6} = \begin{pmatrix} 0.79265 & 0.083846 & 0.60389 \\ -0.099575 & 0.995 & -0.00745 \\ -0.60149 & -0.054227 & 0.79704 \end{pmatrix}$$



$$A_{5-2} = \begin{pmatrix} 0.072701 & 0.74345 & 0.66483 \\ -0.99544 & 0.095314 & 0.0022691 \\ -0.061681 & -0.66197 & 0.74699 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Пример составления ориентационной матрицы

Идентичные по кристаллографической ориентации образцы группировались и испытывались на термостойкость по методике и на установке НПО «ЦКТИ». Результаты

испытаний и расчетов [30] образцов монокристаллов сплава ЖС36-ВИ представлены в табл. 2, 3 и на рис. 4-6.

Таблица 2. Режимы испытаний и результаты испытаний механических свойств сплава ЖС36-ВИ для [001]

$T_{max},$ °C	$T_{min},$ °C	$\sigma_b,$ МПа	E $10^5,$ МПа	$C^{cp} = \ln \frac{1}{1 - \varphi T_{max}}$	$\Delta \epsilon, \%$	
					способствующее разрушению после 10^3 циклов	по формуле Мэнсона, соответствующее 10^3 циклов (расчет при 1000°C)
850	150	1020	0,95	0,340	0,63	1,70
1050	500	780	-	-	0,52	-

Таблица 3. Влияние концентратора напряжений на число циклов до разрушения N (ЖС36-ВИ)

Вид образца	Ориентация	$T_{min},$ °C	$T_{max},$ °C	N, число циклов
Гладкий С концентратором	[111]	150	900	823
	[111]			50
Гладкий С концентратором	[011]	500	1000	317
	[011]			62
Гладкий С концентратором	[011]	150	900	308
	[011]			25

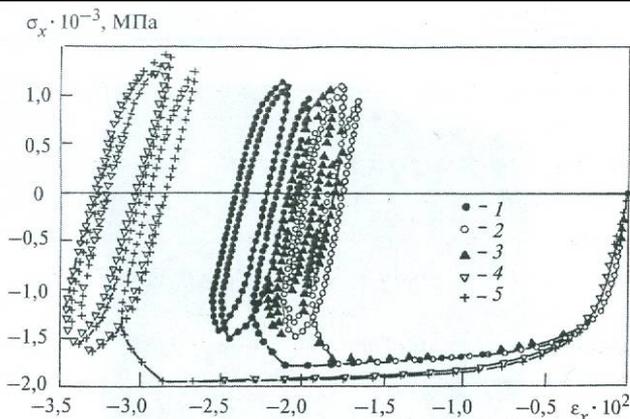


Рис. 4. Сравнение кривых деформирования образцов с различной ориентацией в условиях цикла 150-900°С. Кривые 2-4 соответствуют образцам с одинаковой аксиальной [001], но разной азимутальной ориентацией. Ориентация: 1- [111]; 2- [011]; 3- [011]; 4- [011]; 5- [001]

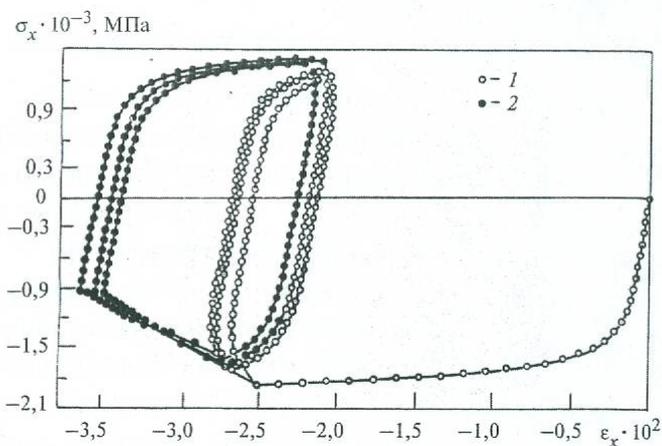


Рис. 5. Влияние двухминутной выдержки при $T=900^\circ\text{C}$ на вид гистерезисных кривых деформирования в центральной точке образца: 1- без выдержки; 2- после двухминутной выдержки

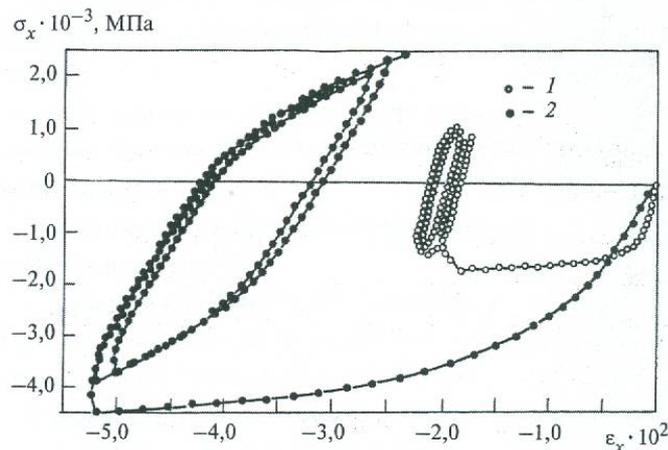


Рис. 6. Гистерезисные кривые для точек поперечного сечения непосредственно на контуре отверстия образца без концентратора (1) и с концентратором напряжений (2)

Приведенные испытания сплава ЖС36-ВИ позволили сделать следующие выводы:

- значения сопротивления термической усталости (СТУ) существенно зависят от кристаллографической ориентации;

- концентрация напряжений оказывает значительное влияние на термоусталостную долговечность;

- использование формулы Нортон для установившейся ползучести дает ошибочные результаты в оценке влияния выдержки при максимальной температуре цикла (СТУ);

- использование формулы Мэнсона может дать ошибку 300...500% $\Delta \varepsilon_{\text{экспер}}$ при заданном числе циклов до разрушения, что свидетельствует о необходимости применения расчетно-экспериментальных методов определения СТУ;

- проведенные расчеты кинетики напряженно-деформированного состояния корсетного образца при термоциклическом нагружении позволяют на качественном уровне объяснить закономерности СТУ монокристаллов образцов жаропрочных сплавов разной кристаллографической ориентации, влияние выдержки при максимальной температуре и концентраторов напряжения.

Для углеродосодержащего сплава ЖС32-ВИ также получены экспериментальные полюсные фигуры и матрицы ориентаций кристаллографической решетки в лабораторной системе координат, на основании которых определены возможные направления полос скольжения по кристаллографическим плоскостям вдоль заданных направлений при испытаниях. При определении кристаллографической ориентации данного сплава отмечалось, что отклонение оси от направления $\langle 001 \rangle$ в пределах допустимого значения 10° может существенно сказаться на свойствах даже для группы образцов с идентичной ориентировкой.

По расчетам разница в факторах Шмида для случаев точного совпадения нагрузки с осью $[001]$ и когда ось образца наклонена и составляет с $[001]$ один и тот же угол 10° , может составлять до 10%.

В табл. 4 для сплава ЖС32-ВИ приведены значения остаточных напряжений в поверхностных слоях образцов (определенные методом Биргера), в зависимости от их кристаллографической ориентации, исследованной методом Лауэ на рентгенографической установке Galaxy.

Таблица 4. Значения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава ЖС32-ВИ

Номер образца	КГО		Значение остаточных растягивающих напряжений на глубине 100 мкм, МПа
	Направление оси	Угол отклонения, град.	
1-1	101	37,96	23
1-2	001	1,75	30
1-3	111	51,67	10
2-1	001	10,51	10
2-2	001	8,59	5
2-3	001	8,43	15

Данные таблицы свидетельствуют о том, что КГО образцов может сказываться на величине остаточных напряжений в поверхностных слоях.

Сравнение СТУ сплавов ЖС36-ВИ и ЖС32-ВИ для кристаллографически идентичных образцов показало преимущество ЖС32-ВИ при испытаниях в интервале температур $150 \leftrightarrow 900$ °С в 1,5 раза (соответственно термостойкость ЖС32-ВИ соста-

вила по результатам испытаний 3564 цикла против 2350 циклов для ЖС36-ВИ), что объясняется, по-видимому, природой двойного упрочнения углеродосодержащего сплава (интерметаллидное упрочнение γ' - Ni_3Al) и карбидно-аустенитного. Последнее подтверждается фрактографическим анализом излома после термоусталостных испытаний.

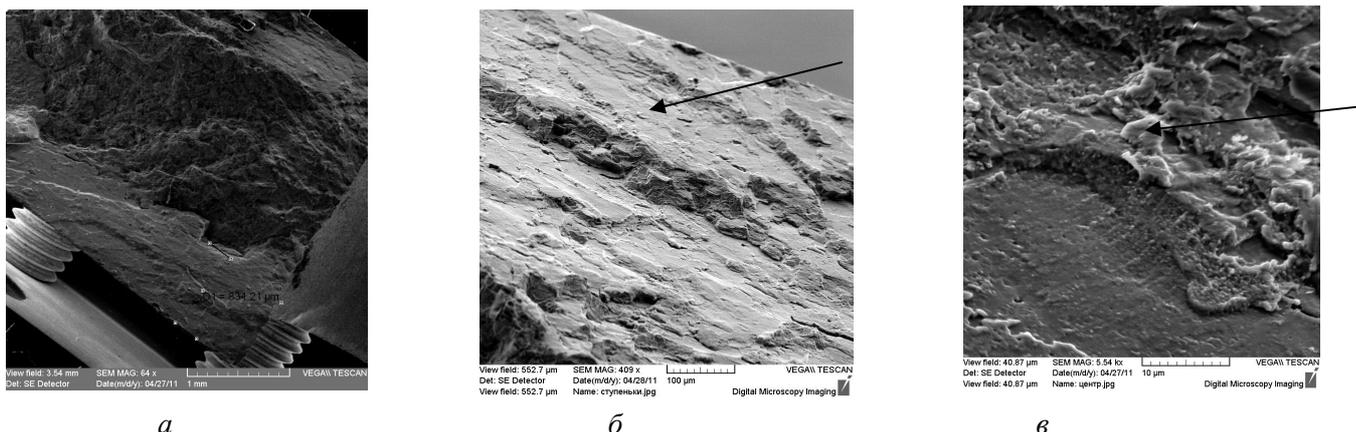


Рис.7. Результаты фрактографического излома корсетного образца после испытаний на термоусталость: общий вид (а), складчатость в зоне замедленного развития трещины (б) и усталостные микробороздки в зоне ускоренного развития трещины (в)

Излом состоит из 3 зон (2 моды термоусталостного развития трещины и зона долома, рис.7,а. Разрушение произошло под углом 45 градусов к оси образца. Зона 1 (рис. 7, б) замедленного развития термоусталостной трещины притерта и имеет складчатое строение. Ширина раскрытия термоусталостной трещины составляет порядка 800 мкм. Вторая зона (рис.7,в) - зона ускоренного развития термоусталостной трещины протяженностью 1,5 мм имеет характерные признаки усталостного разрушения - выраженные микробороздки. Количество циклов, определенное по числу бороздок без учета квазистатического разрушения, составляет не менее 140.

Фрактографический анализ излома позволяет предположить наличие высокого значения сдвиговых напряжений (1), которые не могут быть реализованы лишь в рассматриваемых плоскостях первичной системы скольжения. Это значит, что когда полюс оси растяжения «достигает» дуги большого круга стереографической проекции, соединяющей полюса (001) и (111) и являющейся плоскостью зеркального отражения, компо-

ненты скалывающих напряжений по двум системам скольжения становятся одинаковыми и скольжение уже происходит по обеим системам одновременно, то есть происходит двойное (сдвоенное) скольжение.

В процессе двойного, или сопряженного, скольжения ориентировка кристаллической решетки по отношению к растягивающей силе меняется, чему есть явное подтверждение при испытаниях монокристаллов ЖС36-ВИ. Так, например, при растяжении ГЦК-металлов направления $\langle 112 \rangle$ представляют собой устойчивые ориентировки, расположенные «посередине» между двумя направлениями $\langle 110 \rangle$. Когда ось растяжения достигает полюса $\{112\}$, то дальше ориентировка уже не может меняться при условии, что каждая система скольжения вносит одинаковый вклад в деформацию [27].

По результатам предварительных испытаний для монокристаллов сплава ЖС32-ВИ можно сделать следующие выводы:

- необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования о влия-

нии КГО, заданной в пределах нормативной документации на предприятиях;

- остаточные напряжения в поверхностных слоях могут зависеть от КГО;

- СТУ может существенно зависеть от механизма упрочнения жаропрочного сплава и его микроструктуры;

- результаты фрактографических исследований образца сплава ЖС32-ВИ после термоциклических испытаний косвенно свидетельствуют о происходящих процессах двойного или сопряженного скольжения;

- необходимо внести корректировки в расчеты НДС для монокристаллов ЖНС с учетом нормальных напряжений относительно рассматриваемым плоскостям скольжения.

Авторы признательны А.Е. Калабушкину и Е.Ф. Сидохину за оказанную помощь при выполнении данной работы, а также за участие в дискуссиях и замечания при обсуждении результатов работы.

Библиографический список

1. Ягодкин, Ю.Д. Механические свойства кристаллов никелевого сплава с различной кристаллографической ориентацией [Текст] / Ю.Д. Ягодкин, В.П. Шуляк, В.Б. Орехов // Энергомашиностроение, 1987. - №6. - С. 30-32.

2 Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов [и др.] - М: Машиностроение, 1997.- 333 с.

3. Ножницкий, Ю.А. Обеспечение прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД [Текст] / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский // Труды междунар. науч. конф. «Научные идеи академika С. Т. Кишкина и современное материаловедение», 25-26 апреля 2006. – М.: ВИАМ. - С. 65-71.

4 Ножницкий, Ю.А. Монокристаллические рабочие лопатки высокотемпературных турбин перспективных ГТД [Текст] / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский // Авиационная космическая техника и технология, 2006. - №9 [35]. - С. 117-125.

5. Onyszko A., Bogdanowicz W., Kubiak K. and Sieniawski. X-ray topography and crystal orientation study of a nickel- based CMSX-4

superalloy single crystal.- Cryst. Res. Technol, 2001 45, №12. P. 1326-1332.

6. Гецов, Л.Б. Критерии разрушения поликристаллических и монокристаллических материалов при термоциклическом нагружении [Текст] / Л.Б. Гецов, А.С. Семенов // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования: тр. ЦКТИ. Вып. 296. – СПб., 2009. - С. 83-91.

7. Гецов, Л.Б. Особенности термоусталостного разрушения монокристаллического жаропрочного сплава [Текст] / Л.Б. Гецов, А.И. Рыбников, Н.И. Добина // Тяжелое машиностроение, 2007. - №8. - С.12-15.

8. Гецов, Л.Б. Сопротивление термической усталости жаропрочных сплавов [Текст] / Л.Б. Гецов, А.И. Рыбников, А.С. Семенов // Теплоэнергетика, 2009. - №5. - С. 51-58.

9. Сопротивление термической усталости монокристаллического сплава [Текст] / Л.Б. Гецов, Н.И. Добина, А.И. Рыбников [и др.] // Проблемы прочности, 2008. - №5.- С.54-71.

10. Голубовский, Е.Р. Закономерности аксиальной и азимутальной анизотропии прочностных характеристик монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов для лопаток ГТД [Текст] / Е.Р. Голубовский, И.Л. Светлов, К.К. Хвацкий // Авиационно-космическая техника и технология 10/26, 2005.- С.50-54.

11. Golubovskiy E., Svetlov I., Nozhnitskiy Yu. Relationship of stress rupture and crystallographic orientation for Ni-base superalloys single crystal. EUCASS. European conference for aerospace sciences. July 4-7, 2005, Moscow, Russia, CD.

12. Ножницкий, Ю.А. О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД [Текст] / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский // Труды ЦКТИ. Вып.296, 2009. – С. 74-82.

13. Erickson G.L., Harris K. DS and SX superalloys for industrial gas turbines // Proc. 5 th Liege Conf. on Materials for Advanced Power Engineering, Part II, October, 1994, Belgium. - P. 1055-1074.

14. Li S.X., Smith D.J. An overview of combined fatigue and creep response of single crystal nickel base superalloys. Proc. 5-th Liege Conf. on Materials for Advanced Power Engi-

neering, Part II, October, 1994, Belgium-P.1175-1184.

15. Telesman J., Ghosn L. Fatigue Crack Growth Behavior of a PWA 1484 Single Crystal Superalloy at Elevated Temperatures. ASME Paper 95-GT-452, 1995.

16. Rtishchev V.V. Anisotropic alloys with columnar and single crystal structures used for blades of stationary gas turbine plants. Proc. 5th-Liege Conf. on Materials for Advanced Power Engineering, Part II, October, 1994, Belgium, - P.1135-1144

17. Голубовский, Е.Р. Анизотропия характеристик статической и циклической прочности монокристаллов литого никелевого жаропрочного сплава [Текст] / Е.Р. Голубовский, А.И. Епишин, И.Л. Светлов // Вестн. двигателестроения, 2004. - №2. - С. 143-147.

18. Chan K.S., Leverant G.R. Elevated-temperature fatigue crack growth behavior of MAR-M200 single crystals// Metallurgical Transactions. 1987, v.18A, N4.- P. 1-9.

19. Ориентационная зависимость термической усталости монокристаллов никелевого сплава [Текст] / Р.А. Дульнев, И.Л. Светлов, Н.Г. Бычков [и др.] // Проблемы прочности, 1988. - №11. - С. 3-9.

20. Придорожный, Р.П. Особенности влияния кристаллографической ориентации на усталостную прочность монокристаллических лопаток турбин [Текст] / Р.П. Придорожный, А.В. Шереметьев // Авиационно-космическая техника и технология, 10/26, 2005. - С. 55-59.

21. JoC.-Y., Kim H.-M. Effect of recrystallisation on microstructural evolution and mechanical properties of single crystal nickel based superalloy CMSX-2 Part 2 - Creep behaviour of surface recrystallised single crystal. *Materials Science and Technology*, Volume 19, Number 12, December 2003, P. 1671-1676(6).

22. Aspects of thermomechanical fatigue of two single crystal nickel based superalloys // Zhou H.; Harada H.; Kobayashi T.; Koizumi

Y./ *Materials Science and Technology*, Volume 19, Number 7, July 2003, P. 847-852(6).

23. Reed P.A.S., Wu X.D., Sinclair I. Fatigue crack path prediction in UDIMET 720 nickel-based alloy single crystals // Metallurgical and Materials. Vol. 31A. 2000. P. 109-120.

24. Schubert F., Rieck T., Ennis P.J. The Growth of Small Cracks in the Single Crystal Superalloy CMSX-4 at 750 and 1000 C. Proc. Superalloys 2000 Edited by T.M. Pollock, R.D. Kissinger, R.R. Bowman, K.A. Green, M. McLean, S. Olson, and J.J. Schirra TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2001.

25. Marchal N., Forest S, Remy L., Duvinage S.. Simulation of fatigue crack growth in single crystal superalloys using local approach to fracture. Euromech-Mecamat 2006. Local approach to fracture EMMC 9, 2006. -P.353-358

26. Gabb T.P., Gauda J., Miner R.V. Orientation and temperature of some mechanical properties of single-crystal nickel-base superalloy Rene 4. Part 2./Low cycle fatigue 1986, A17, v. 6, № 1.

27. Келли, А. Кристаллография и дефекты в кристаллах [Текст] / А. Келли, Г. Гровс – М.: Мир, 1974. - 496 с.

28. Температурно-ориентационная зависимость характеристик кратковременной прочности, модуля Юнга и коэффициента линейного расширения монокристаллов сплава ЖС6Ф [Текст] / И.Л. Светлов, Н.Н. Суханов, А.И. Кривко [и др.] // Проблемы прочности, 1987. - №1. - С. 51-56.

29. T. Ohashi et al. X-ray microdiffraction and strain gradient crystal plasticity studies of geometrically necessary dislocation near a Ni bicrystal grain boundary. – *International Journal of Plasticity* 25, (2009), 920-941.

30. Гецов, Л.Б. Сопrotивление термической усталости жаропрочных сплавов [Текст] / Л.Б. Гецов, А.И. Рыбников, А.С. Семенов // Теплоэнергетика, 2009. - №5. – С. 51-58.

ON THE ISSUE OF RESEARCH OF THE PROPERTIES OF THE HEAT-RESISTANT NICKEL SINGLE-CRYSTAL SUPERALLOYS

© 2011 E. A. Tikhomirova¹, A. A. Zhivushkin¹, L. B. Getsov², A. I. Rybnikov²

¹Klimov JSC, St.-Petersburg
²NPO CKTI JSC, St.-Petersburg

The work studies issues to provide the guaranteed construction strength of the single-crystal rotor blades of the aviation gas turbine engines taking into account the anisotropic properties conditioned by their crystallographic orientation. Special attention is paid to research of the thermo-fatigue properties of the samples taken from the single-crystal superalloys. Influence of the thermo-cycling intervals on the durability of the samples with given orientation has been shown taking as an example ЖС36ВИ alloy.

Single-crystal blades of aviation gas turbine engines, anisotropic properties, thermo-fatigue, nickel superalloys.

Информация об авторах

Тихомирова Елена Александровна, инженер 1 категории ОАО «КЛИМОВ», г. Санкт-Петербург. Тел.: (812) 295-01-01, доб. 163, (812) 295-42-94, доб. 139. E-mail: uc@klimov.ru. Область научных интересов: металлографические исследования.

Живушкин Алексей Алексеевич, ведущий специалист ОАО «КЛИМОВ», г. Санкт-Петербург. Тел.: (812) 295-01-01, доб. 163, (812) 295-42-94, доб. 139. E-mail: uc@klimov.ru. Область научных интересов: материаловедение.

Гецов Леонид Борисович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург. Тел.: (812) 550-82-27. E-mail: metall126@mail.ru. Область научных интересов: проблемы прочности и пластичности материалов в газотурбостроении.

Рыбников Александр Иванович, доктор технических наук, начальник отдела ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург. Тел.: (812) 550-82-27. E-mail: metall126@mail.ru. Область научных интересов: проблемы материаловедения в газотурбостроении.

Tikhomirova Elena Aleksandrovna, Engineer of 1 rang of Klimov JSC, Saint-Petersburg. Phone: (812) 295-01-01, ext. 163, (812) 295-42-94, ext. 139. E-mail: uc@klimov.ru. Area of research: metallografical researts.

Zhivushkin Aleksey Alekseevich, Leading specialist of Klimov JSC, Saint-Petersburg. Phone: (812) 295-01-01, ext. 163, (812) 295-42-94, ext. 139. E-mail: uc@klimov.ru. Area of research: material science.

Getsov Leonid Borisovich, doctor of technical sciences, scientist of «CKTI» JSC, Saint-Petersburg. Phone: (812) 550-82-27. E-mail: metall126@mail.ru. Area of research: Problems of strength and plasticity materials of gas turbine engines.

Rybnikov Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, leader of department «CKTI» JSC, Saint-Petersburg. Phone: (812) 550-82-27. E-mail: metall126@mail.ru. Area of research: Problems of material science in gas turbine engines.