

УДК 621.452.3

## ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ ВЛИЯНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТИРОВКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЬНЫХ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

© 2011 Е. А. Тихомирова<sup>1</sup>, А. А. Живушкин<sup>1</sup>, Е. Ф. Сидохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «КЛИМОВ», г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ЗАО «НТЦ Экспертцентр», г. Москва

В опубликованных работах ориентационную зависимость эксплуатационных свойств монокристаллических турбинных лопаток рассматривают, как правило, по отношению к трем кристаллографическим направлениям:  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ . При этом к испытаниям допускаются образцы с отклонением оси приложения нагрузки от названных направлений до  $10^\circ$ , считая, что в этом интервале влияние ориентировки можно не принимать во внимание. Поскольку пластическая деформация осуществляется посредством кристаллографического скольжения, а оно зависит от величины приведенных сдвиговых напряжений в системах скольжения, проведен расчет ориентационных факторов для ориентировок оси в пределах  $10^\circ$ -градусного допуска от направления  $\langle 001 \rangle$ , которое реально применяют в промышленных лопатках. Установлено, что отклонения ориентировки оси в пределах допуска может существенно изменять картину развития пластической деформации. Поэтому в технологических испытаниях и при изучении влияния различного рода воздействий на свойства сплава целесообразно учитывать реальную ориентировку образцов и величины сдвиговых, а не только приложенных напряжений.

*Монокристаллические образцы и лопатки, аксиальная и азимутальная ориентация, ориентационный фактор, системы скольжения.*

Вопросу влияния кристаллографической ориентировки (КГО) на свойства монокристаллов из жаропрочных никелевых сплавов посвящен целый ряд отечественных и зарубежных исследований [1-7]. Однако практически во всех этих работах рассматриваются свойства (предел текучести, долговечность, характеристики ползучести, усталость, термоусталость и др.) монокристаллических изделий (образцов и лопаток) для трех положений оси нагружения: вдоль  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$  и влияние КГО рассматривается, как отличие свойств. То, что различия в поведении монокристаллов жаропрочных сплавов этих ориентировок должны быть, не удивительно. Результаты подобных исследований для многих других металлов и сплавов с ГЦК решеткой известны и объяснены.

Полученные сведения и выявленные закономерности для жаропрочных сплавов имеют несомненную ценность, но для перспективных разработок.

Реально же в настоящее время все моторостроительные заводы изготавливают лопатки, ось (аксиальное направление) которых располагается вблизи кристаллографического направления  $\langle 001 \rangle$ . Допустимое отклонение составляет  $10^\circ$ , а у зарубежных - даже  $15^\circ$ , и контролю подвергают аксиальный угол  $\alpha_{001}$  изделий (угол между осью на-

гружения и  $\langle 001 \rangle$ ). **Вопросу же о том, как влияет отклонение оси лопатки от  $\langle 001 \rangle$  в пределах  $10^\circ$ -градусного допуска,** внимания не уделяют и исследований не проводят. Можно даже встретить утверждение (и у выше названных авторов в том числе), что в пределах допуска такое влияние на свойства лопаток можно не принимать в расчет.

Однако вряд ли такую позицию можно признать правильной. На эту мысль наталкивает, прежде всего, необычайно большой разброс результатов измерений в любых испытаниях для образцов и лопаток, выделенных в группы с идентичной ориентировкой ( $001$ ,  $011$ ,  $111$ ) [3]. Причин к тому, конечно, множество, принимая во внимание сложность химического состава сплавов, его неоднородность в выращенных монокристаллических образцах и лопатках, сложность и неоднородность структуры, хотя, по крайней мере, образцы стараются изготавливать из одной монокристаллической отливки. Каковы же могут быть причины разброса и нельзя ли его устранить или снизить? Этот вопрос нигде не ставится, а выявить закономерности стремятся посредством подходящей статистической обработки результатов измерений.

Одной из причин возникновения разброса результатов может быть отклонение в пределах допуска ориентировки оси образцов от заявленного направления  $\langle 001 \rangle$ . Раз-

рушение лопаток сопряжено с образованием и развитием трещин. Однако их зарождению предшествует пластическая деформация, которая осуществляется посредством движения дислокаций, их взаимодействия друг с другом, с дислокационными ансамблями типа малоугловых границ и разного рода включениями типа карбидов и  $\gamma'$ - фазы при обязательном участии вакансий. Движение дислокаций в монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов происходит по кристаллографическим плоскостям преимущественно  $\{111\}$  и вдоль направлений типа  $\langle 011 \rangle$ . Всего имеется 12 комбинаций систем скольжения  $\{111\}\langle 011 \rangle$ . Скорости дислокаций, работа источников и преодоление препятствий в каждой системе скольжения определяются уровнем приведенных сдвиговых напряжений в них. Они-то и зависят от ориентации оси приложения нагрузки  $\omega$  по отношению к  $\{111\}$  и  $\langle 011 \rangle$ . Именно в этом проявляется влияние ориентировки на поведение деформируемого монокристалла и на эксплуатационные свойства лопатки. Поскольку систем скольжения 12 и одновременно в деформации могут участвовать многие из них в различных комбинациях, возникает многообразие ситуаций развития деформации и разрушения в лопатках. На начальном же этапе развития пластической деформации в случае одноосного нагружения образцов все это уж точно зависит от ориентации систем скольжения относительно оси приложения нагрузки  $\omega$ .

Приведенные сдвиговые напряжения  $\tau$  в каждой системе скольжения при растягивающих напряжениях  $\sigma$  определяются величиной ориентационного фактора (он же фактор Шмида), который представляет собой произведение косинусов двух углов: между осью монокристалльного образца  $\omega$  и направлением скольжения  $\langle 011 \rangle - \lambda$  и нормалью к плоскости скольжения  $\{111\} - \varphi$ . Посмотрим для примера, как отличаются факторы Шмида систем скольжения, когда ось растяжения  $\omega$  находится в **разных** положениях вблизи  $\langle 001 \rangle$  в пределах регламентируемого угла в  $10^\circ$ . В табл. 1, 2 представлены результаты расчета для совпадения  $\omega$  и  $001$  (точка 4), а также, когда между  $\omega$  и  $001$  угол  $10^\circ$ , но проекции оси  $\omega$  находятся в точках 1, 2, 3 ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ) стереографического треугольника (рис.1).

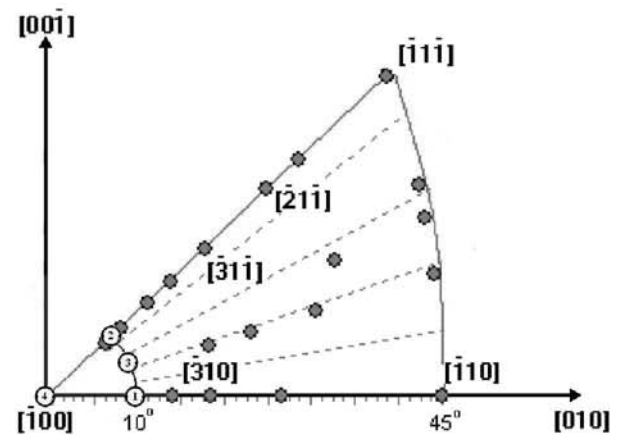


Таблица 1. Результаты расчета

Плоск. скольж. (HKL)	Направл. скольж. [HKL]	Ориентационный фактор ( $\cos \varphi \times \cos \lambda$ ) (для положений оси $\omega$ по ...)		
		ось 100	ось 110	ось 111
-111	110	0.408	0	0.272
	101	0.408	0	0.272
	0-11	0	0	0
111	1-10	0.408	0	0
	0-11	0	0.408	0
	-101	0.408	0.408	0
1-11	110	0.408	0	0.272
	011	0	0	0.272
	-101	0.408	0	0
-1-11	-110	0.408	0	0
	011	0	0.408	0.272
	101	0.408	0.408	0.272

Таблица 2. Результаты расчета

Плоскость скольжения (HKL)	Направление скольжения [HKL]	Ориентационный фактор ( $\cos \varphi \times \cos \lambda$ )			
		ось $\omega_1$	ось $\omega_2$	ось $\omega_3$	ось $\omega_4$
-111	110	0.465	0.458	0.440	0.408
	101	0.384	0.353	0.344	0.408
	0-11	0.081	0.096	0.097	0
111	1-10	0.315	0.331	0.329	0.408
	0-11	0.055	0.080	0.097	0
	-101	0.371	0.295	0.434	0.408
1-11	110	0.315	0.325	0.333	0.408
	011	0.063	0.030	0.0	0
	-101	0.371	0.251	0.329	0.408
-1-11	-110	0.465	0.446	0.415	0.408
	011	0.100	0.048	0.0	0
	101	0.384	0.398	0.435	0.408

Как можно видеть из табл. 2, когда нагрузка приложена по  $\omega_1$ , фактор Шмида имеет большое значение 0.465 в системах скольжения (-1-11)[-110] и (-111)[110] и можно ожидать именно их активность при деформации. Для двух других ориентировок  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  можно тоже ожидать включение двух и трех систем соответственно, но значение фактора Шмида ниже. В сравнении с ориентировкой  $\omega_4$  (см. табл. 1) для ориентировок  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  фактор Шмида больше на 10 – 15% и при одних и тех же растягивающих напряжениях  $\sigma$  приведенные сдвиговые напряжения  $\tau$  будут больше и выше вероятность активности возможных систем скольжения, причем не безразлично каким будет их сочетание.

Вероятно, что при проведении испытаний, с целью изучения влияния напряжений на эксплуатационные свойства, следует ориентироваться не на растягивающие напряжения  $\sigma$ , а на  $\tau$  и число систем скольжения, которые могут быть активизированы. Считать же, что отклонение ориентировки оси растяжения  $\omega$  в пределах допуска в  $10^\circ$  не влияет на результаты, ошибочно.

Цель этих предварительных рассуждений - показать, что необходимо экспериментальное и теоретическое исследование влияния КГО на эксплуатационные свойства монокристаллических лопаток для ориентировки, которая реально применяется в промышленности в настоящее время, а именно –  $\langle 001 \rangle$ . Без учета этого могут оказаться бес-

полезными усилия по повышению эксплуатационных свойств лопаток посредством термической обработки, т.к. ожидаемый с ее помощью эффект просто утонет в разбросе результатов измерений, вызванных влиянием геометрии скольжения.

Заслуживает внимания и еще один вопрос, касающийся контроля КГО. Согласно техническим инструкциям контроль КГО лопаток предусматривает определение аксиального  $\alpha_{001}$  и азимутального  $\alpha_{100}$  углов, которые задаются относительно важных геометрических направлений лопатки и определены относительно оси двигателя. В работах по исследованию влияния КГО, проводимых на лопатках, можно предполагать, исходя из физических принципов, что **существует связь между азимутальным углом и прочностными характеристиками** на том основании, что лопатка имеет сложную геометрическую форму и находится в сложном напряженном состоянии в процессе работы и испытаний. Ее деформация не является одноосной и могут появиться сдвиговые напряжения, активизирующие системы скольжения, удачно ориентированные относительно азимутального направления. Однако авторы названных исследований ставят такую задачу и при работе с образцами, которые нагружают одноосно. Какими физическими причинами руководствуются в этом случае, неясно и нигде об этом не сообщается, но кажется, что для этого нет оснований, т.к. у образцов всегда свободная,

не нагруженная боковая поверхность. К тому же ни в одной из работ не сообщается, какими критериями руководствуются авторы, обозначая то или иное направление как азимутальное.

В заключение отметим, что рентгенографическое определение ориентационных характеристик монокристалльных изделий при производстве лопаток следует сделать более полным, а не ограничиваться только определением аксиальной ориентировки на тех изделиях, которые можно поместить в держатели дифрактометра. Целесообразно перейти к выполнению контроля ориентировки методом Лауэ, который давно уже применяют зарубежные фирмы.

### Библиографический список

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

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

3. К вопросу о влиянии кристаллографической ориентации на длительную прочность и ползучесть никелевого сплава [Текст] / Е.Р. Голубовский [и др.] // Проблемы прочности. -1987. -№9. -С.11-17.

4. Голубовский, Е.Р. Температурно-временная зависимость анизотропии характеристик длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов [Текст] / Е.Р. Голубовский, И.Л. Светлов // Проблемы прочности. - 2002. - №2. - С.5-19.

5. Петухов, А.Н. Вопросы многоциклового усталости литых жаропрочных никелевых сплавов с заданной кристаллографической структурой [Текст] / А.Н. Петухов // Вестн. двигателестроения. -2004. -№2. -С.128-131.

6. Голубовский, Е.Р. Анизотропия характеристик статической и циклической прочности монокристаллов жаропрочного сплава [Текст] / Е.Р. Голубовский, А.И. Епишин, И.Л. Светлов // Вестн. двигателестроения. - 2004. - №2. - С.143-146.

7. Закономерности аксиальной и азимутальной анизотропии прочностных характеристик монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов для лопаток ГТД [Текст] / Е.Р. Голубовский [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. - 2005. - №10/26. - С. 50-54.

## ABOUT INVESTIGATIONS THE ORIENTATION DEPENDENCE OF SINGLE-CRYSTAL TURBINE BLADE EXPLOITATION PROPERTIES

© 2011 E. A. Tikhomirova<sup>1</sup>, A. A. Givushkin<sup>1</sup>, E. F. Sidokhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «KLIMOV», S.-Petersburg

<sup>2</sup>JSC «NTC Expertcentre», Moscow

In published investigations the orientation dependence of single-crystal turbine blade exploitation properties was considered for three load directions:  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  and  $\langle 111 \rangle$ . A maximum load axis deviation of  $10^\circ$  was allowed. The deviation influence below this allowed limit is considered negligible. Plastic deformation is caused by slip and is contingent on shear stress in the slip plane. Crystal orientation parameters were calculated for the load axes deviation from the  $\langle 001 \rangle$  direction, as is used in industrial blade testing. It was established that orientation axis deviation within the accepted 10 degree range may substantially alter plastic deformation development. Therefore, it is expedient to take into account the actual sample orientation and the slip plane tension and not only the applied tension during technological testing and when studying the impact of various influences on alloy properties.

*Single samples and blades, axial and azimuthal orientation, orientation factor, slide systems.*

### **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](mailto:uc@klimov.ru), [tixomirova00@mail.ru](mailto:tixomirova00@mail.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](mailto:uc@klimov.ru). Область научных интересов: материаловедение.

**Сидохин Евгений Федорович**, ведущий специалист ЗАО «НТЦ Экспертцентр», г. Москва. Тел.: (495) 535-08-77, 534-94-64. E-mail: [esidohin@yandex.ru](mailto:esidohin@yandex.ru). Область научных интересов: металловедение и физика металлов.

**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](mailto:uc@klimov.ru) , [tixomirova00@mail.ru](mailto:tixomirova00@mail.ru). Area of research: metallografical research.

**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](mailto:uc@klimov.ru). Area of research: material science.

**Sidokhin Evgeniy Fedorovich**, engineer of NTC Expertcentre JSC, Moscow. Phone: (495) 535-08-77, 534-94-64. E-mail: [esidohin@yandex.ru](mailto:esidohin@yandex.ru). Area of research: material science and phisics of metal.