

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Ажажа В.М., Свердлов В.Я., Ладыгин А.Н., Богуслаев А.В., Клочихин В.В.,  
Лысенко Н.А. (ИФТТМТ ННЦ ХФТИ, г. Харьков; ОАО «Мотор–Сич», г. Запорожье,  
Украина).**

*The results of the research connected with perfection of single structure of heat-resistant alloys on Ni-basis are presented. The main direction of increasing the working properties of GTE blades are the following: high-gradient direct solidification, hot isostatic pressure (HIP) treatment and plastic deformation.*

Монокристаллические лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) работают в экстремальных условиях переменных растягивающих напряжений, высоких температур и в агрессивной окружающей среде. Монокристаллические лопатки ГТД первых ступеней с каналами для принудительного охлаждения считаются одними из наиболее сложных деталей современного машиностроения. Поэтому в технологии их изготовления используют новейшие достижения современного материаловедения. Главной характеристикой конструкционных материалов являются их прочностные свойства. Прочность и пластичность являются структурно чувствительными свойствами реальных материалов и при прочих равных условиях полностью определяются числом, типом и пространственным распределением дефектов в кристаллической решетке [1]. Для повышения прочностных характеристик материалов необходимо повышать их структурное совершенство.

Повышение свойств материалов путем оптимизации «состава» (легирование твердого раствора) является экстенсивным приемом [2,3]. В настоящее время для этой цели используются дорогостоящие элементы редкоземельных металлов, рассеянных элементов VI и драгоценных металлов VIII- платиновой групп. Напротив, достижение высоких эксплуатационных свойств материалов путем совершенствования структурно-технологического фактора относится к интенсивным методам. В связи с этим повышается актуальность исследований, направленных на совершенствование методологии получения новых материалов с совершенной структурой и повышенными эксплуатационными свойствами.

Целью данной работы была экспериментальная проверка перспективности метода высокоградиентной направленной кристаллизации для получения монокристаллов жаропрочных сплавов типа ЖС32-ВИ а также баротермической обработки и пластической деформации монокристаллов сложнолегированных жаропрочных сплавов.

### **Материалы и методика эксперимента**

Исходным материалом для получения монокристаллов сложнолегированного никелевого сплава ЖС32-ВИ методом высокоградиентной направленной кристаллизации служили отходы монокристалльного литья лопаток ГТД из сплава ЖС32-ВИ. Отходы предварительно подвергались очистке. Каждая заготовка проходила контроль химического состава. Для усреднения состава шихтовку осуществляли методом квартования.

Монокристаллические образцы выращивали по технологии высокоградиентной направленной кристаллизации [4] с применением затравок, ориентированных направлением [001] вдоль направления роста. Температурный градиент на фронте направленной кристаллизации достигал  $G_T \approx 400$  град/см. Скорость направленной

кристаллизации составляла  $R=20\text{мм/мин}$ . Выращенные образцы имели форму цилиндров диаметром 20мм и высотой 170мм. Высокотемпературную изобарическую обработку образцов проводили на лабораторной газостатической установке ГАУС-4/2000-35. Рабочие параметры установки ГАУС-4/2000-35:

рабочий газ – аргон;

максимальное давление – 400МПа;

максимальная температура – 2000 °С;

размеры внутripечного пространства: диаметр 35мм, высота 170мм.

Давление газа до 400 МПа в установке создается криогенным термокомпрессором КРИТ-4Л. Компрессор разработан и изготовлен в НИЦ ХФТИ, он не имеет многих недостатков, присущих поршневым, мембранным газовым компрессорам и мультипликаторам. Действие термокомпрессора основано на последовательности операций предварительного охлаждения до жидкого состояния и дальнейшего нагрева в замкнутом объеме рабочего газа аргона. Особенностью такого компрессора является отсутствие в конструкции движущихся механизмов, следовательно, отсутствие износа трущихся деталей, приводящих к загрязнению газовой среды продуктами износа и смазочными материалами. Монокристаллические образцы литых сплавов размещали при помощи специальной оснастки в рабочей зоне. Температуру вблизи образца контролировали вольфрам-рениевыми термопарами WRe<sub>5</sub>-WRe<sub>20</sub>.

Управление нагревом в установке ГАУС-4/2000-35 осуществляется в автоматическом режиме по заданной программе при помощи микропроцессорного прецизионного регулятора температуры ПРТЕРМ-100 (точность поддержания температуры в режиме выдержки  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При обработке образцов был установлен темп нагрева 30 °С/мин, темп охлаждения - 15 °С/мин.

Шлифы с рабочей плоскостью [001] для металлографических исследований вырезали из образцов вулканитовым кругом и затем подвергали механической шлифовке и полировке алмазными пастами. На заключительном этапе шлифы обрабатывали электролитической полировкой. Микроструктуру образцов исследовали с помощью оптических микроскопов Neophot – 32 и ММР – 4 , а также методом электронной растровой микроскопии с использованием микроскопов JСMT – 300 и РЕММА-202. Микротвердость HV определяли на приборе “Micromet” фирмы “Buehler” при нагрузке  $P=100\text{г}$ .

Таблица 1. Химический состав (%мас.) жаропрочного сплава

Сплав	Cr	Ti	Mo	W	Re	Ta	Al	Co	Nb	B	Zr	C	Σ
ЖС 32	5,0	-	1,0	8,3	4,0	4,0	6,0	9,0	1,5	0,015	0,05	0,15	17,3

$\Sigma = W + \text{Re} + \text{Ta} + \text{Mo}, \text{ \%мас}$

## Результаты и их обсуждение

Современная технология получения монокристаллических лопаток ГТД основывается на методе высокоградиентной направленной кристаллизации, который позволяет значительно улучшить структуру изделий из жаропрочных сплавов и в значительной мере удовлетворить современным требованиям к оптимальным условиям для получения монокристаллических отливок жаропрочных никелевых сплавов [5]. В процессе направленной кристаллизации в высоком градиенте температуры формируется монокристаллическая высокодисперсная дендритно-ячеистая структура, в

которой оси первого порядка дендритных ячеек размером  $\sim 100\text{-}200\text{ мкм}$  ориентированы в направлении продольной оси лопатки. Такая структура обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики изделий (рис.1).

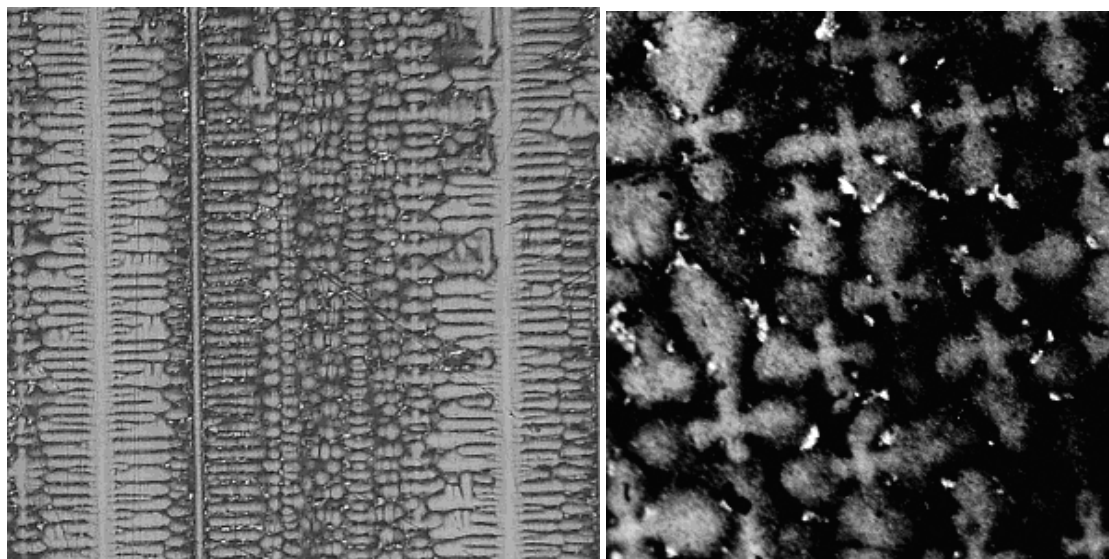


Рис.1. Типичная структура монокристалла жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ.  $G_T=25^\circ\text{C}/\text{мм}$ ,  $R=10\text{ мм}/\text{мин}$ . а - продольный шлиф, б - поперечный шлиф. X100.

Высокий градиент температуры обеспечивает высокие скорости отвода тепла с фронта кристаллизации, небольшую высоту твердо-жидкой зоны, и как следствие этого, малый дендритный параметр  $\lambda$ , который описывается соотношением Броди-Флемингса  $\lambda=A(G_Z R)^{-1}$ . Высокая дисперсность микроструктуры монокристаллов жаропрочных сплавов обуславливает ее структурно-фазовую однородность и высокий уровень эксплуатационных характеристик. Зачастую, значение дендритного параметра  $\lambda$  используют в качестве одной из основных структурных характеристик монокристаллов сложнолегированных жаропрочных никелевых сплавов. Поэтому развитие методики получения монокристаллических изделий из жаропрочных сплавов происходит, в основном, в направлении повышения градиента температуры на фронте кристаллизации [6]. Градиент температуры влияет на профиль макроскопического фронта кристаллизации. Как показано в [7], отношение  $G_T/R$  определяет не только тип морфологии микроскопического фронта кристаллизации: плоский фронт кристаллизации, ячеистый или дендритный фронт, но также и форму макроскопического фронта кристаллизации. При заданной скорости выращивания монокристалла макроскопический фронт кристаллизации с ростом осевой составляющей  $G_T^Z$  изменяется от вогнутого в сторону кристалла к плоскому и затем к выпуклому в сторону жидкой фазы. При этом напряжения внутри кристалла изменяются от растягивающих к сжимающим, что также способствует повышению степени структурного совершенства монокристаллов [8].

В работе [9] для направленной кристаллизации жаропрочных сплавов ЖС32-ВИ использовали устройство с повышенным температурным градиентом  $G_T \approx 25^\circ\text{C}/\text{мм}$ , создаваемым благодаря использованию кристаллизатора с жидкометаллическим галлиевым теплоносителем с температурой плавления  $T_{\text{пл}} \approx 30^\circ\text{C}$ . Применяли различные варианты конструкций для направленной кристаллизации. В первом варианте при направленной кристаллизации керамическая форма с расплавом непосредственно контактировала с жидкометаллическим галлиевым теплоносителем кристаллизатора. Во втором варианте керамическая форма размещалась в графитовой

опоке с гранулированным графитом в качестве наполнителя. Было показано, что благодаря направленной кристаллизации в повышенном градиенте температуры, длительная жаропрочность монокристаллов сплава ЖС32-ВИ повышалась по сравнению с аналогичными монокристаллами, выращенными в серийной установке УВНК-8П ( $G_T \approx 6^\circ\text{C}/\text{мм}$ ) в 1,5...2 раза (см. Рис.2).

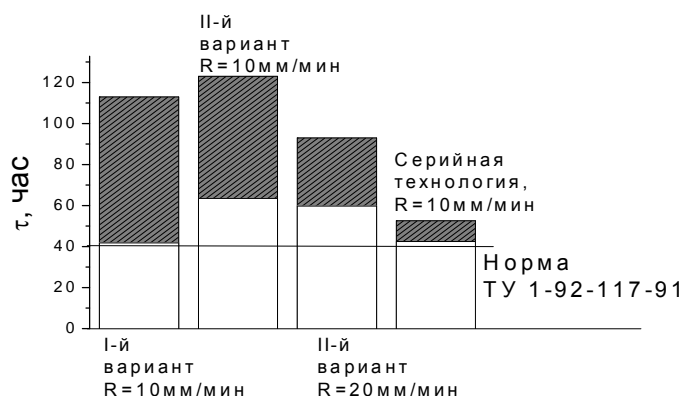


Рис.2. Длительная прочность монокристаллов сплава ЖС32-ВИ, изготовленных с использованием различных вариантов кристаллизации.

Однако, неравновесное состояние жаропрочного сплава, получаемое высокоградиентной направленной кристаллизацией не позволяет полностью избавиться от усадочных микропор и эвтектических выделений  $\gamma$ - $\gamma'$  фазы. Для оптимизации механических свойств проводят термообработку (гомогенизацию) жаропрочных никелевых сплавов [10]. В процессе гомогенизации (приближению к равновесному состоянию) происходит полное или частичное растворение грубых выделений эвтектики  $\gamma$ - $\gamma'$ , уменьшение ликвационной неоднородности в осях дендритов и межосном пространстве, более полное выделение упрочняющей интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы из  $\gamma$ -твердого раствора. Однако длительная выдержка при достаточно высоких ( $1265$ - $1280^\circ\text{C}$ ) для жаропрочных никелевых сплавов температурах приводит к увеличению объемной доли и среднего размера усадочных микропор. Поэтому гомогенизирующий отжиг не является безальтернативным в технологии получения лопаток газотурбинных двигателей. Улучшить микроструктуру литых монокристаллов возможно путем баротермической обработки материала в атмосфере аргона при давлении  $\sim 150$ - $200 \text{ МПа}$ , приводящей к коллапсу микропор, образовавшихся как за счет усадки при литье, так и по другим механизмам.

Известно [11,12], что в сложнолегированных сплавах на основе никеля с добавками углерода при более высоких значениях давления  $P \sim 15$ ... $25 \text{ ГПа}$  при температурах  $T \approx 1300$ ... $1400^\circ\text{C}$  возможно образование сверхтвердых упрочняющих фаз типа алмаза. Жаропрочные никелевые суперсплавы содержат в своем составе углерод, поэтому исследование влияния баротермической обработки на структуру и свойства никелевых суперсплавов могут расширить возможности упрочнения этих материалов и улучшить их эксплуатационные характеристики. При баротермической обработке возможно существенно влиять на фазовый состав и морфологию упрочняющих частиц  $\gamma'$ -фазы. На Рис.3 показано изменение микроструктуры монокристалла жаропрочного сплава ЖС32-ВИ после баротермической обработки при температуре  $T = 1300^\circ\text{C}$ , давлении  $P = 180 \text{ МПа}$  в течение 2 часов.

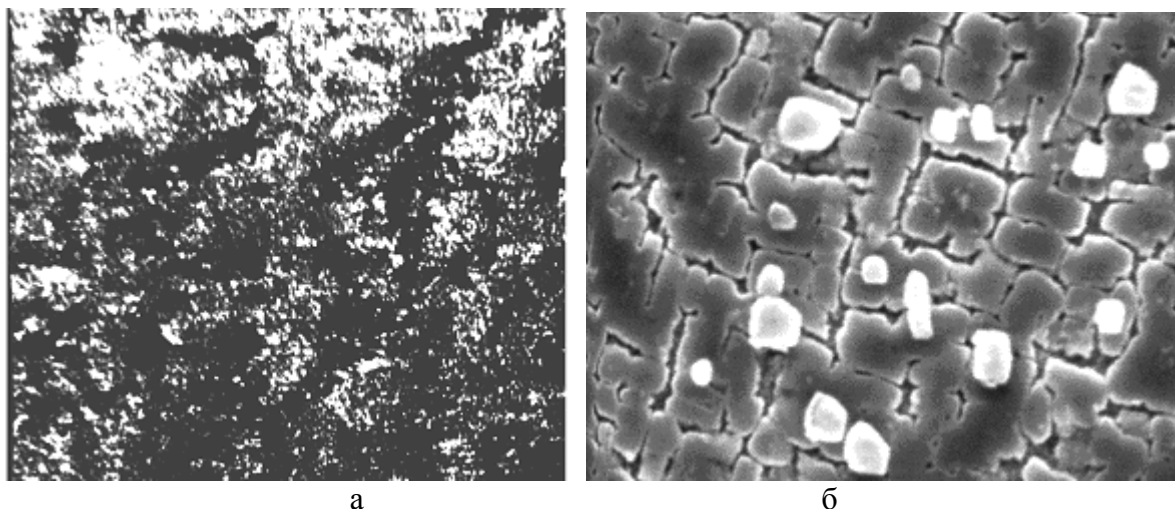


Рис.3. Микроструктура монокристалла ЖС32-ВИ после баротермической обработки.  
а - X200; б - X10000.

Полученные результаты исследований микротвердости жаропрочного никелевого суперсплава ЖС32-ВИ от давления при баротермической обработке показывают, что зависимость микротвердости от давления при баротермической обработке отличается нелинейностью. Это характерно для процессов самоорганизации, протекающих в неравновесных системах.

Жаропрочные никелевые суперсплавы типа ЖС32-ВИ с высокой объемной долей упрочняющей  $\gamma'$ -фазы принято считать литейными, т.е. недеформируемыми, сплавами [13]. Технология высокоградиентной направленной кристаллизации позволяет формировать совершенную монокристаллическую структуру никелевых жаропрочных суперсплавов, способную пластически деформироваться при повышенных температурах со степенями деформации, составляющими десятки процентов. При этом структура становится более однородной, измельчается, происходит коллапс усадочных микропор. Типичная структура жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, деформированного экструзией при температуре 1200°C показана на рис.4.

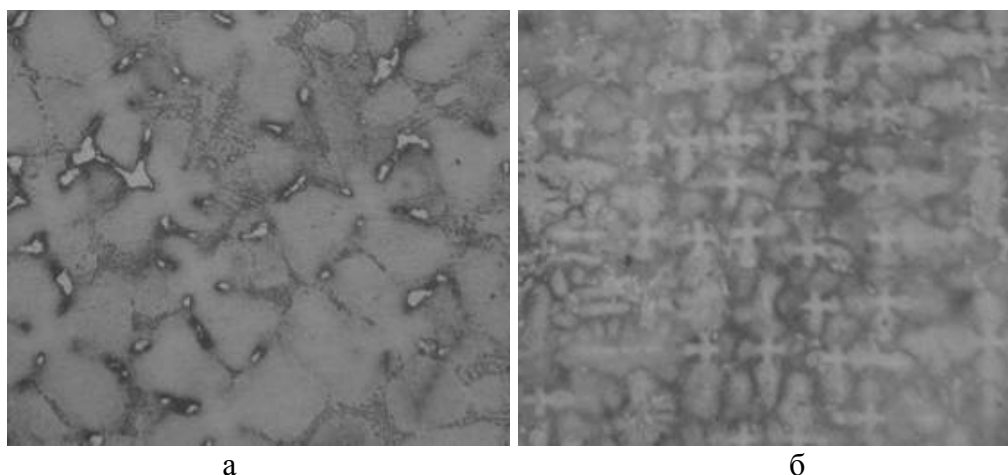


Рис.4. Микроструктура монокристалла ЖС32-ВИ в исходном состоянии (а) и после экструзии при  $T=1200^{\circ}\text{C}$ ,  $\varepsilon=70\%$ (б), X200.

В результате экструзии наблюдали однородную деформацию по всему сечению монокристалла, и как следствие этого, уменьшение дендритного параметра  $\lambda$  до

~60мкм. На Рис.5 показано изменение морфологии упрочняющих частиц  $\gamma'$ -фазы в процессе пластической деформации при повышенной температуре от кубической (в литом состоянии) до сферической. При этом размер выделяющихся частиц  $\gamma'$ -фазы уменьшается до 0,005мкм (50нм) (см. Рис.5,б). В периферийной части образца наблюдали текстурированное распределение частиц  $\gamma'$ -фазы (см. Рис.5,в).

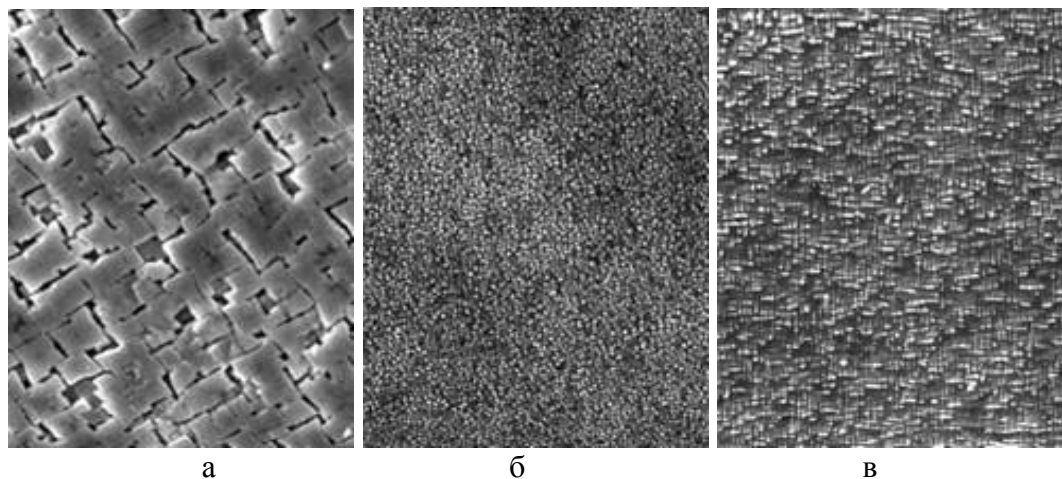


Рис.5. Микроструктура сплава ЖС32-ВИ: а – литое состояние; б – центральная часть после деформации при  $T=1065^{\circ}\text{C}$ ,  $\varepsilon=18\%$ ; в – периферия после деформации при  $T=1170^{\circ}\text{C}$ ,  $\varepsilon=60\%$ . X2000.

Формирование изделий из жаропрочных никелевых суперсплавов кристаллизационно-деформационным способом, включающим получение монокристаллической заготовки и последующую ее пластическую деформацию [14], может создать серьезную альтернативу методу точного литья по выплавляемым моделям.

### Выводы

1. Применение высокоградиентной направленной кристаллизации для получения монокристаллических лопаток ГТД открывает широкие возможности для формирования однородной высокодисперсной, имеющей высокую степень совершенства структуры. Такая структура способна обеспечить высокий уровень эксплуатационных свойств лопаток ГТД. Длительная жаропрочность монокристаллов сплава ЖС32-ВИ, выращенных в условиях повышенного градиента температуры  $G_T=25^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ , в 1,5...2 раза больше, чем у аналогичных монокристаллов, выращенных в серийной установке УВНК-8П ( $G_T=6^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ ).
2. Баротермическая обработка повышает фазовую и структурную стабильность монокристаллов жаропрочных сплавов, полностью устраняет микропористость, способствует растворению в твердом состоянии эвтектических выделений, что способствует повышению степени легирования и однородности  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз.
3. При высокоградиентной направленной кристаллизации формируется структура благоприятная для дальнейшей пластической деформации. Поэтому дальнейшие перспективы развития метода высокоградиентной направленной кристаллизации при изготовлении монокристаллических лопаток ГТД связаны с созданием экстремальных технологий, сочетающих направленную кристаллизацию с последующей пластической деформацией сложнолегированных жаропрочных сплавов.

**Литература:** 1. Рыбинг В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986, 224с. 2. Лякишев Н.П. Конструкционные и некоторые функциональные материалы. Настоящее и будущее. В сб. Современное материаловедение XXI век., 1998. г. Киев. Национальная академия наук Украины. Отделение физико-химических проблем материаловедения. с.284-296. 3. Каблов Е.Н. Монокристаллические лопатки для перспективных газотурбинных двигателей. // Информационно-аналитический бюллетень «Горный». М.: 2005. Тематическое приложение «Функциональные материалы». с.159-171. 4. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом. // МиТОМ. 2002. №7. с.20-23. 5. Толораия В.Н., Каблов Е.Н., Орехов Н.Г., Остроухова Г.А.. Структура и ростовые дефекты монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов. // Информационно-аналитический бюллетень «Горный». М.: 2005. Тематическое приложение «Функциональные материалы». с.190-202. 6. Ажажа В.М., Свердлов В.Я. Перспективы высокоградиентной направленной кристаллизации. // Материаловедение. 2006. №11.с.50-55. 7. Ажажа В.М., Свердлов В.Я., Кондратов А.А. и др. Влияние условий кристаллизации на макроскопический фронт кристаллизации и структурное совершенство монокристаллов Ni-сплавов. // Вісник харківського національного університету. 2007. №781. Вип..3(35). с.73-80. 8. Багдасаров Х.С.. Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит-2004. 160с. 9. Ажажа В.М., Свердлов В.Я., Ладыгин. А.Н. и др. Роль теплофизических условий в процессе формирования структуры при направленной кристаллизации жаропрочных сплавов на никелевой основе. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2004. №6 (14). с.128-135. 10. Шалин Р.Е., Светлов Н.Л., Качанов Е.Б., Толораия В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов, М: Машиностроение, 1997. 336с. 11. Бланк В.Я., Денисов В.Н., Кульницкий В.А., Терентьев С.А.. Синтез при высоких давлениях и свойства высококачественных кристаллов алмаза и других углеродных структур. // Тезисы докладов XII Национальной конференции по росту кристаллов. Москва 23-27 октября 2006г. с.5. 12. Чепуров А.И., Жемулев Е.И., Солнцев В.П.. Определение содержания включений Ni-Fe сплава в выращенных кристаллах боросодержащих алмазов. // Тезисы докладов XII Национальной конференции по росту кристаллов. Москва 23-27 октября 2006г. с.292. 13. Каблов Е.Н.. Перспективы и направления развития высокотемпературных материалов для авиационных и стационарных газотурбинных двигателей (ГТД).// Труды III сессии Научного совета по новым материалам Международной ассоциации академий наук. 13-16 мая 1998г. г. Киев. с.10. 14. Ажажа В.М., Свердлов В.Я., Ладигін О.М. та ін. Спосіб отримання монокристалічних виробів складної конфігурації із жароміцних сплавів. Декл. патент України 17232, B22D27/04 C22F1/00. №u200603252. Заявлено 27.03.2006; Опубл. 15.09.2006. Бюл.№9. -2с.

Сдано в редакцию 2.04.08