



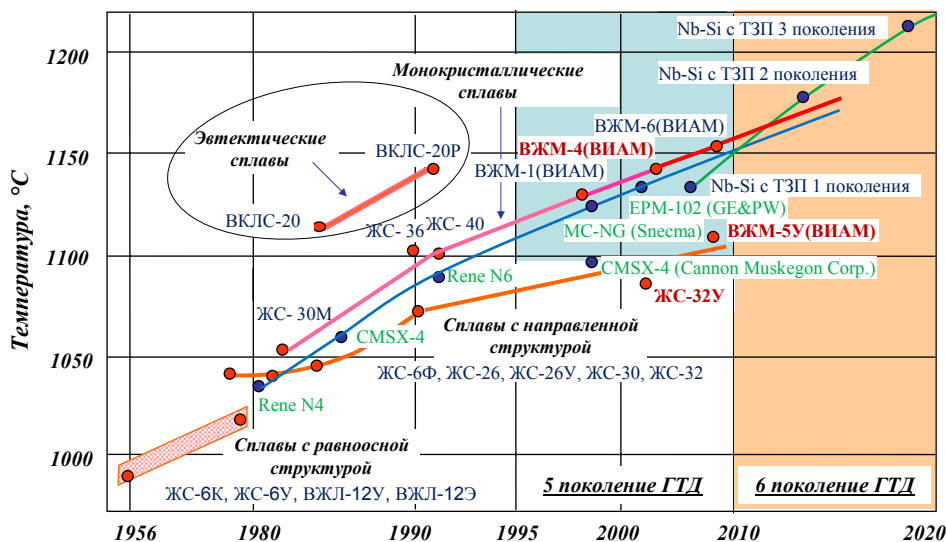
## Rhenium in the thermally stable nickel alloys for single-crystal blades of gas-turbine engines

*E.N. Kablov, N.V. Petrushin, V.V. Sidorov*  
*All-Russian Institute of aviation materials*  
*(VIAM)*



### Динамика изменения температурного уровня работоспособности литейных жаропрочных сплавов

Температурный уровень работоспособности литейных жаропрочных сплавов за последние 40 лет вырос на 400°C (в среднем 6,7°C в год). В перспективе до 2020 года переход от никелевых сплавов к сплавам системы ниобий-кремний может повысить рабочую температуру еще на 150-200°C.



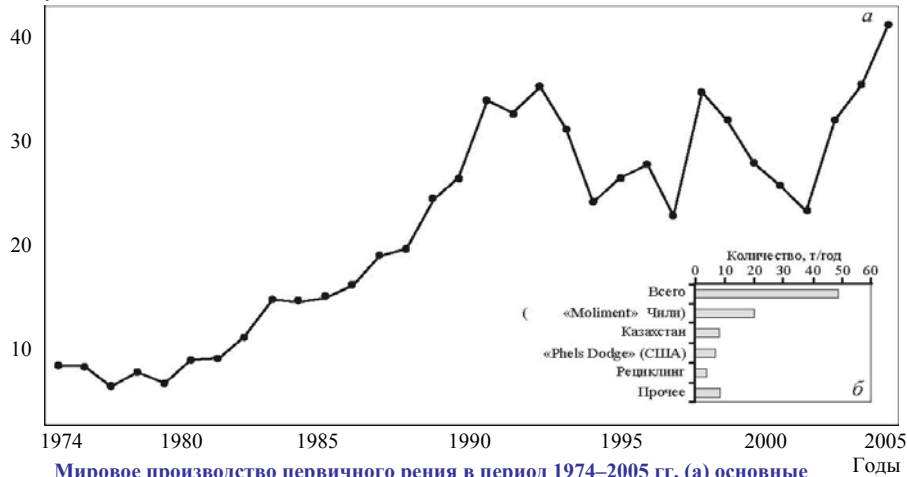


## Производство первичного рения

Первое промышленное производство рения было организовано в Германии в 1930-х г.г. и составляло 120 кг/год.

В настоящее время ежегодное потребление Re оценивается в 50 - 60 т, из которых компания «Cannon Muskegon» (поставщик «Rolls Royce») потребляет ~ 14 т, «General Electric» ~ 14 т, P&W ~ 5 - 6 т;

Выпуск, т



Мировое производство первичного рения в период 1974–2005 гг. (а) основные производители в 2006 г. (б)

Источник – USGS



## Динамика изменения цен на рений (весь мир)



В России в 2010 году стоимость рения составляла от 4000 до 6000 долл. США/кг.



Динамика и причины изменения цен на рений

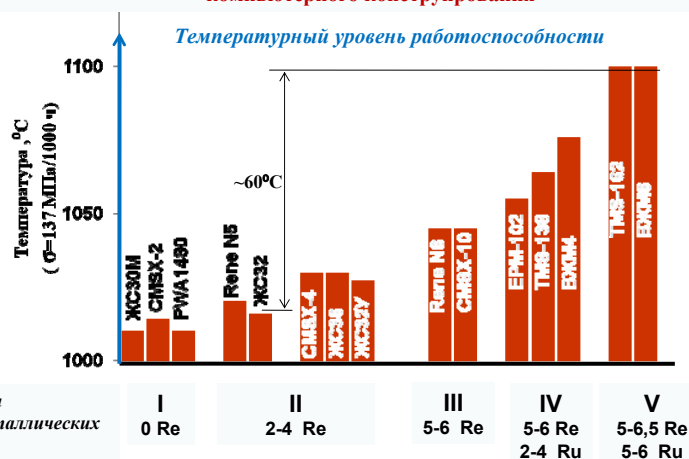
Источник – USGS



## Направления развития литейных жаропрочных сплавов

- разработка специально легированных монокристаллических сплавов;
- легирование рением и рутением и другими элементами платиновой группы;
- микролегирование РЗМ (La, Ce и др.);

Современные жаропрочные сплавы разрабатывают при помощи методов компьютерного конструирования



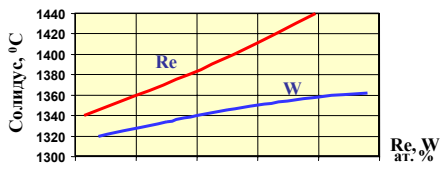
## Химический состав жаропрочных никелевых сплавов для монокристаллических лопаток ГТД

Сплав	Содержание легирующих элементов, масс. %									d, г/см <sup>3</sup>
	Cr	Ti	Mo	W	Re	Ta	Al	Co	Ru	
I поколение										
CMSX-2	8	1	0,6	8	-	6	5,6	5	-	8,56
ЖС40	6,1	-	4	6,9	-	7	5,6	0,5	-	8,8
II поколение										
ЖС36	4	1,1	1,6	11	2	-	5,8	7	-	8,72
CMSX-4	6,5	1	0,6	6	3	6,5	5,6	9	-	8,7
III поколение										
Rene N6	4,2	-	1,4	6	5,4	7,2	5,75	12,5	-	8,97
CMSX-10	2	0,2	0,4	5	6	8	5,7	3	-	9,05
ВЖМ1	2,5	-	2	1,3	9	8,8	5,8	11	-	9,09
IV поколение										
ЕРМ-102	2	-	2	6	5,95	8,25	5,55	16,5	3	9,2
ВЖМ4	2,5	-	4	4	6,5	4,5	6	6	4	8,87
V поколение										
TMS-162	3	-	3,9	5,8	4,9	5,6	5,8	5,8	6	9,04
TMS-196	4,6	-	2,4	5	6,4	5,6	5,6	5,6	5	9,01
ВЖМ6	-	-	-	-	6,3	-	-	-	5	8,89

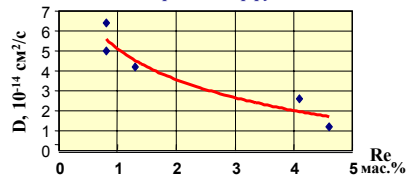


## Механизм повышения жаропрочности никелевых сплавов

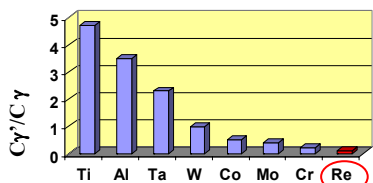
Влияние Re и W на температуру солидуса



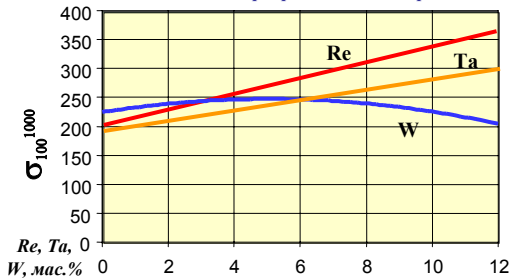
Влияние Re на скорость диффузии атомов Ni



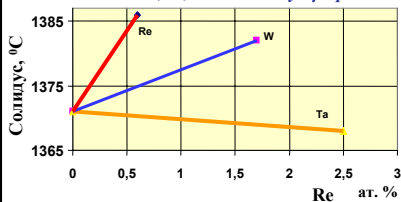
Кэф. распределения элементов между фазами



Влияние Re, Ta, W на жаропрочность монокристаллов



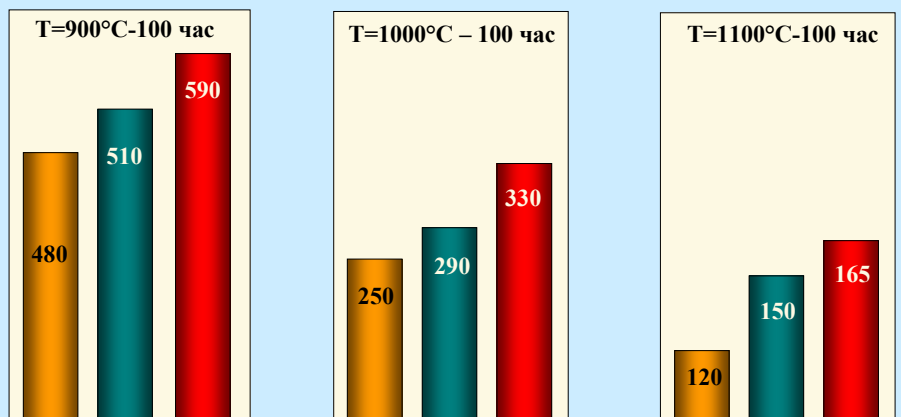
Влияние Re, W, Ta на солидус γ' фазы



Современная тенденция развития жаропрочных никелевых сплавов предусматривает использование рения, который, растворяясь в матрице жаропрочного никелевого сплава, затормаживает диффузионные процессы при высоких температурах, и обеспечивает длительную работоспособность материала в составе изделия.



## Длительная прочность (МПа) жаропрочных ренийсодержащих никелевых сплавов



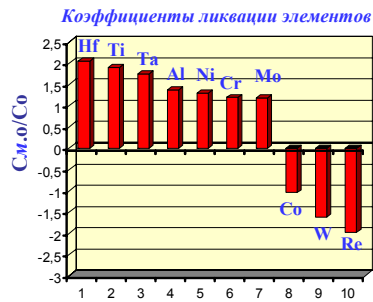
-ЖС32М (4%Re)

-CMSX-10 (6%Re)

-ВЖМ1 (9%Re)

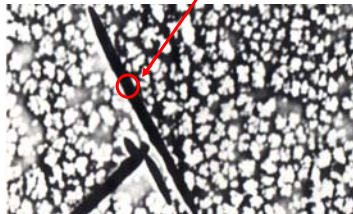


## Химическая и структурная неоднородность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов с высоким содержанием Re

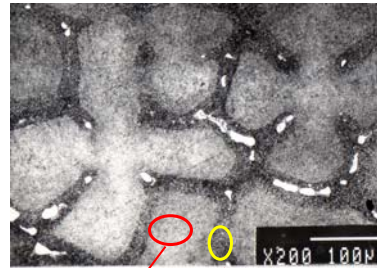


- фазовая нестабильность

Образование ТПУ-фаз (Re-W-Mo)



Дендритная структура литого сплава



Ветвь дендрита

Междендритный участок



x10000



## Жаропрочный монокристаллический наноструктурированный никелевый сплав ВЖМ4

Длительная прочность (МПа) монокристаллов рений-содержащих сплавов, легированных Ru

T=1100°C, 100 час

145

145

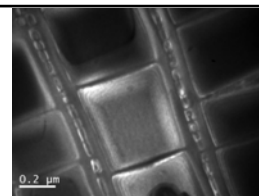
180

T=1100°C, 1000 час

95

125

- -MC-NG (4%Re, 4%Ru) - SNECMA, Франция
- -EPM-102 (6%Re, 3%Ru) - GE, США
- -ВЖМ-4 (6%Re, 4%Ru) - ВИАМ, Россия



Монокристаллическая лопатка с проникающим охлаждением из сплава ВЖМ4 обеспечивает  $T_r=2000-2200K$

Упрочняющая  $\gamma'$ -фаза [интерметаллид  $Ni_3(Al,Ta)$ ]



### ПРИМЕНЕНИЕ:



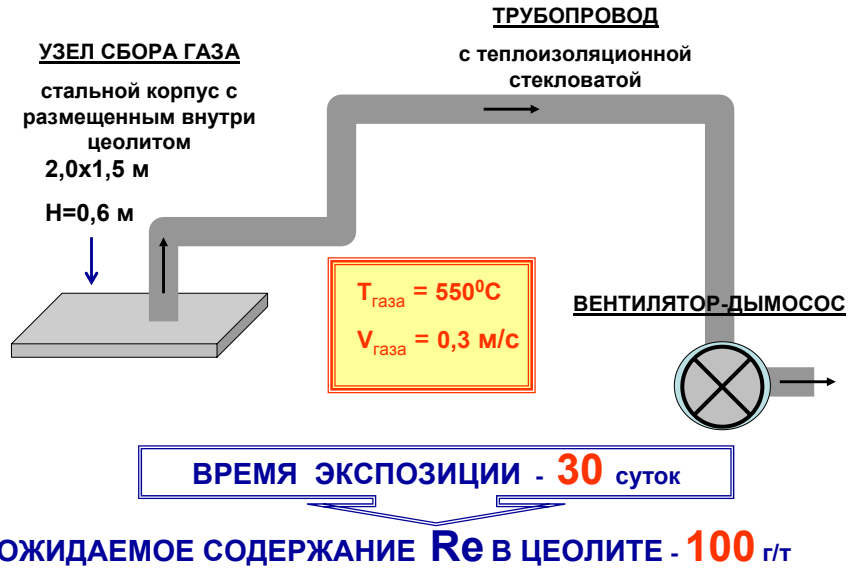
- ✓ рабочие лопатки ТВД (двигатель ЦД-14 ОАО «Авиадвигатель»)
- ✓ рабочие лопатки ТВД («Турбина-ПП» ОАО «НПО «Сатурн»)

### ПРОИЗВОДСТВО:

ФГУП «ВИАМ» (до 300 тонн/год) ТУ 1.595-1-948-2006



### Схема опытной установки для сорбции Re из парогазовой фазы (Вулкан Кудрявый, о. Итуруп)

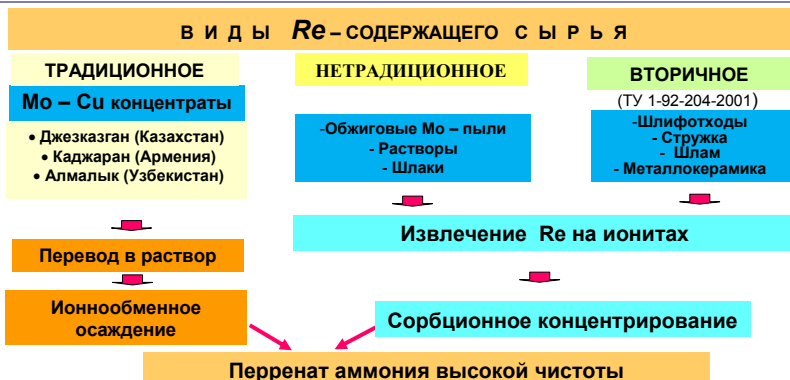


### Обеспечение рением производства жаропрочных сплавов





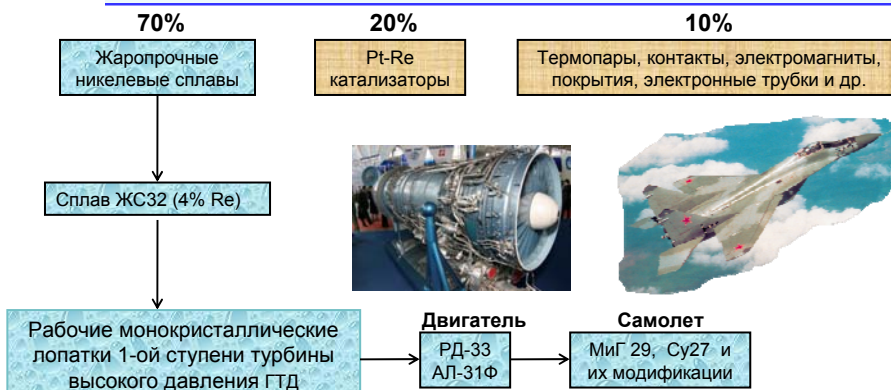
## Технологические схемы получения Re из различных видов сырья



ВИДЫ Re – СОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ	Re, %	Содержание примесей, ppm (1 ppm= 10 <sup>-4</sup> мас.%)							
		Na	K	Si	Mg	Ca	S	P	Cu
ТРАДИЦИОННОЕ	69,2	4	50	5	0,2	1	15	0,5	0,2
ВТОРИЧНОЕ	69,0	2	40	5	0,5	3	20	8	0,2
Re продукт с вулкана Кудрявый	69,2	5	9	5	0,5	5	10	5	-
Нормы ТУ 48-7-1-90	69,2	10	50	10	4	10	20	10	0,5



## Баланс применения Re в промышленности



### Технические характеристики двигателей:



Двигатель	Максимальная температура газа перед турбиной, К	Тяга, т	Степень Сжатия
РД-33	1680	9,7	20-21
АЛ-31Ф	1665	12,5	23



## НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ВЫСОКОЖАРОПРОЧНЫХ РЕНИЙ СОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ на Ni-основе

### Технологический процесс изготовления заготовок сплавов

- выплавка сплавов на свежих шихтовых материалах  
- переработка литейных Re содержащих отходов



Вакуумная индукционная печь ВИМ-50

- извлечение заготовок из труб



Гидравлический пресс с усилием 100 т

- отрезка прирубной части заготовок



Абразивно-отрезной станок МВ 332

- шлифовка поверхности заготовок с обеспечением глубины съема металла 0,5-1 мм и чистоты с шероховатостью Rz=10,0



Обдирочно-шлифовальный станок ВС3-4208



Готовая продукция

### Контроль качества готовой продукции

#### Определение содержания:

химсостава сплавов с узкими пределами содержания легирующих элементов ( $\pm 0,2-0,3\%$ )



Оптический спектрометр ARL 4460

примесей  $O_2, N_2 \leq 0,0008\%$  каждого,  $S \leq 0,0006\%$ ,  $C \leq 0,005\%$



Анализаторы фирмы LECO

примесей Pb, Bi, Sb, As, Se, Ag, Sn, Zn



Масс-спектрометр PQ-3

#### Определение механических свойств ( $\sigma, \sigma_{0.2}, \delta, \psi$ )



Высокотемпературный испытательный комплекс

Паспорт на готовую продукцию  
(Сертификат качества продукции в соответствии ТУ на сплавы)

