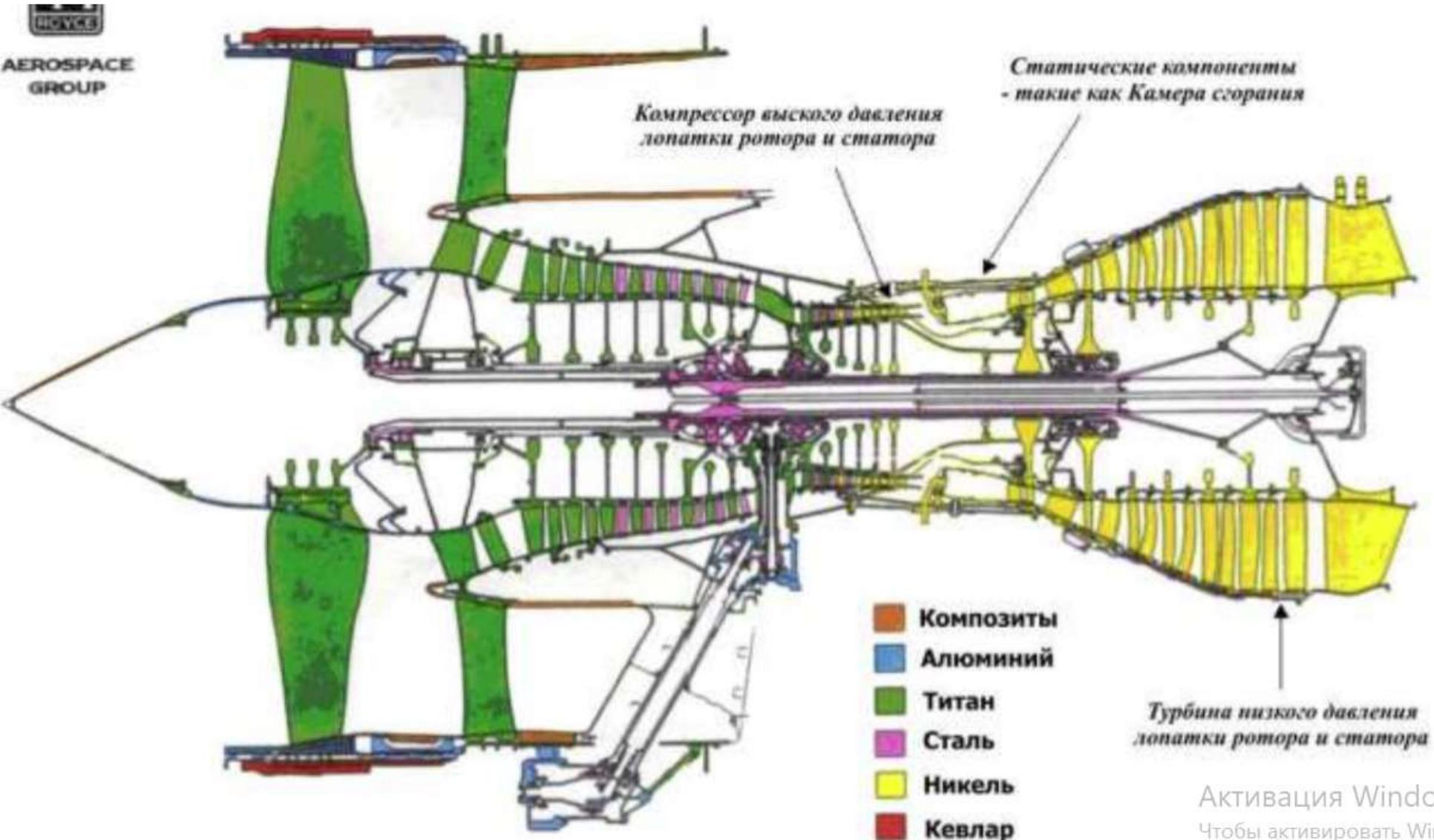


Интерметаллиды и интерметаллидные сплавы



Турбина низкого давления – основной узел для потенциального применения интерметаллидов



При замещении в ТНД никелевого сплава интерметаллидом отношение в авиационном двигателе «подъёмная сила/вес» увеличивается до 25-30%!

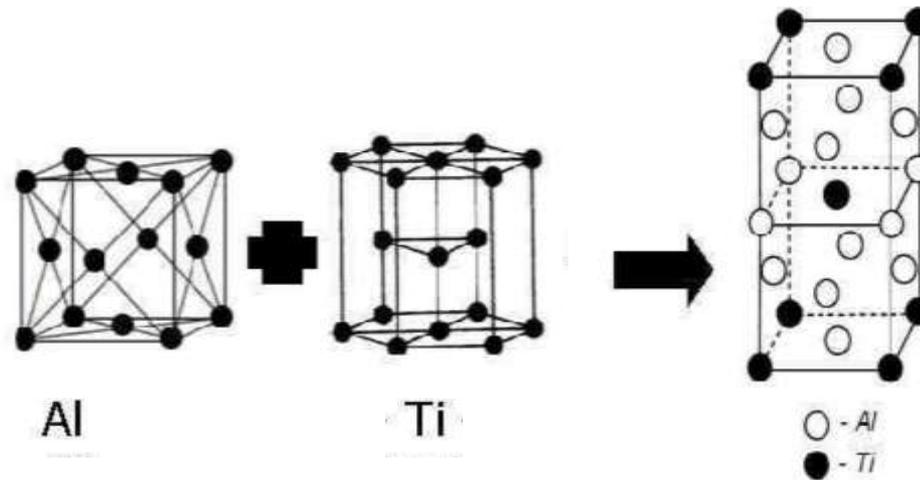
Интерметаллидные сплавы для лопаток турбин

Высокотемпературные интерметаллидные сплавы должны обладать следующими свойствами: высокими прочностными и жаропрочными удельными характеристиками, достаточным сопротивлением усталости, приемлемой пластичностью и технологичностью,



Интерметаллиды

Интерметаллиды химические соединения металлов, обладающие кристаллической структурой, отличающейся от структуры составляющих их компонентов и четким соотношением компонентов. Имеют собственную температуру кристаллизации и точный химический состав.



Интерметаллиды представляют собой уникальный класс материалов, которые сохраняют упорядоченную структуру вплоть до температуры плавления. **Дальний порядок обеспечивает более сильную межатомную связь. Интерметаллиды существуют в определенных, довольно узких диапазонах составов** и имеют простое стехиометрическое соотношение. При отклонении состава от стехиометрического соотношения структура может стать менее упорядоченной

Интерметаллиды

Интерметаллиды обладают прекрасными свойствами: высокая прочность, которая не деградирует с возрастанием температуры; аномальная зависимость предела текучести, наблюдаемая в некоторых интерметаллидах; низкая и очень низкая плотность интерметаллидов на основе Al, Ti, Si, что приводит к высокой удельной прочности; высокие модули упругости, причем с ростом температуры они уменьшаются медленнее, чем в разупорядоченных сплавах; высокая стойкость к окислению, которую имеют интерметаллиды с высоким содержанием Al; низкие коэффициенты диффузии и в результате более низкая скорость ползучести, рекристаллизации и коррозии.

Главная особенность физических свойств интерметаллидов – низкая плотность. Плотность Ni-superalloys около 9 г/см³, а γ -TiAl-сплавов около 4 г/см³.

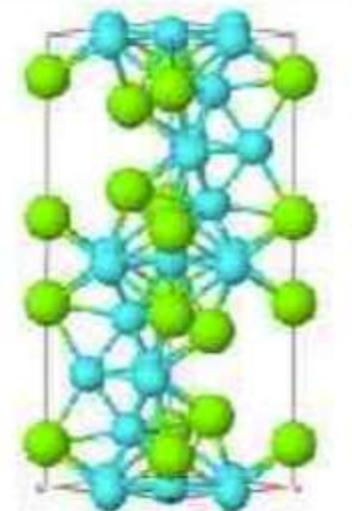
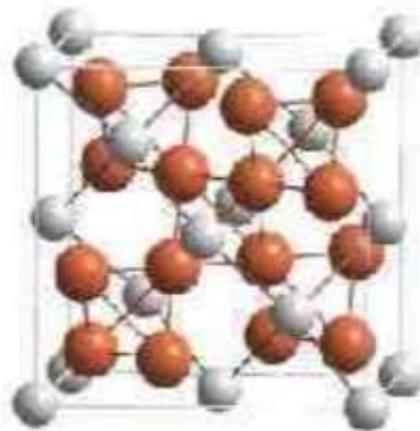
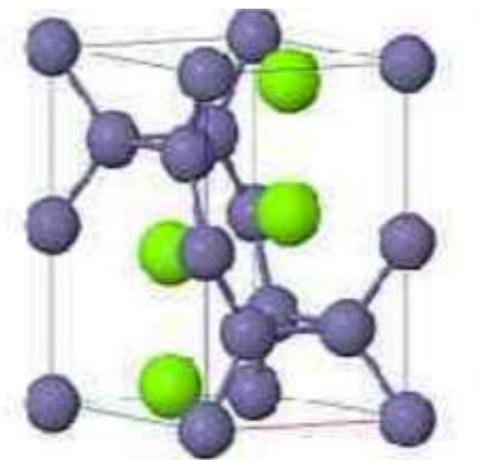
В зависимости от области применения интерметаллиды делят на две большие группы: сплавы **конструкционного и функционального назначения.**

Основными представителями конструкционной группы являются

- 1. алюминиды никеля, титана, железа, циркония**
- 2. силициды молибдена, вольфрама, титана, ниобия и хрома.**

Типы фаз в интерметаллидах:

- 1) фазы типа A_3B с кубической кристаллической решеткой $L1_2$ (Ni_3Al , Ni_3Si , Ni_3Fe , Ni_3Mn , Zr_3Al);
- 2) фазы типа A_3B с гексагональной решеткой DO_{19} (Ti_3Al , Ti_3Sn);
- 3) алюминиды типа Me_3Al (A_3B) со структурой, отличной от $L1_2$ и DO_{19} (Fe_3Al - DO_3 ; Nb_3Al - $0A_h^3$);
- 4) алюминиды типа $MeAl_3$ ($NbAl_3$, $NiAl_3$, $TaAl_3$, $TiAl_3$, $ZrAl_3$); их кристаллические структуры различны;
- 5) фазы типа AB с кристаллической решеткой $L1_0$ ($TiAl$, $CuAu$);
- 6) фазы типа AB с кристаллической структурой $B2$ ($NiAl$, $CoTi$, $CoZr$, $NiBe$, $FeAl$, $FeCo$, $TiNi$);



Силициды. Структура и свойства

По типу образующих их элементов силициды можно разделить на следующие группы:

- 1) силициды на основе железа и никеля;
- 2) силициды тугоплавких металлов.

В первую группу входит соединение **Ni₃Si**. К характерным для него особенностям можно отнести аномальную зависимость предела текучести от температуры, хорошую стойкость к окислению и коррозии, а также низкую пластичность, которая может быть повышена путем микролегирования бором или легирования титаном.

Интерметаллид **Fe₃Si** имеет повышенную твердость и хрупкость, а также высокую коррозионную стойкость даже в кипящей серной кислоте.

Наибольшее внимание привлекают тройные сплавы системы **Fe-Si-Al**, обладающие отличными магнитными свойствами, повышенным сопротивлением коррозии и изнашиванию.

Среди силицидов, относящихся **ко второй группе**, особо выделяют **дисилициды молибдена, вольфрама, титана и хрома**, важнейшим достоинством которых является повышенная стойкость в окислительной среде. Основная проблема связана с хрупкостью этих материалов в диапазоне температур ниже 1000 °С.

Силициды состава **M₅Si₃** (где **M = Nb, Ta, Mo, Ti, Zr**) характеризуются высокими значениями температуры плавления.

Силициды. Применение

Силициды применяют в современной аэрокосмической промышленности в качестве высокотемпературных конструкционных материалов, а также используют для изготовления нагревательных элементов высокотемпературных печей и в качестве защитных высокотемпературных покрытий.

Дисилициды применяют для изготовления термопар, эксплуатирующихся в особо коррозионных средах, где их химическая инертность является критическим параметром.

Силициды на основе тугоплавких металлов могут быть использованы для изготовления элементов термоядерных реакторов.

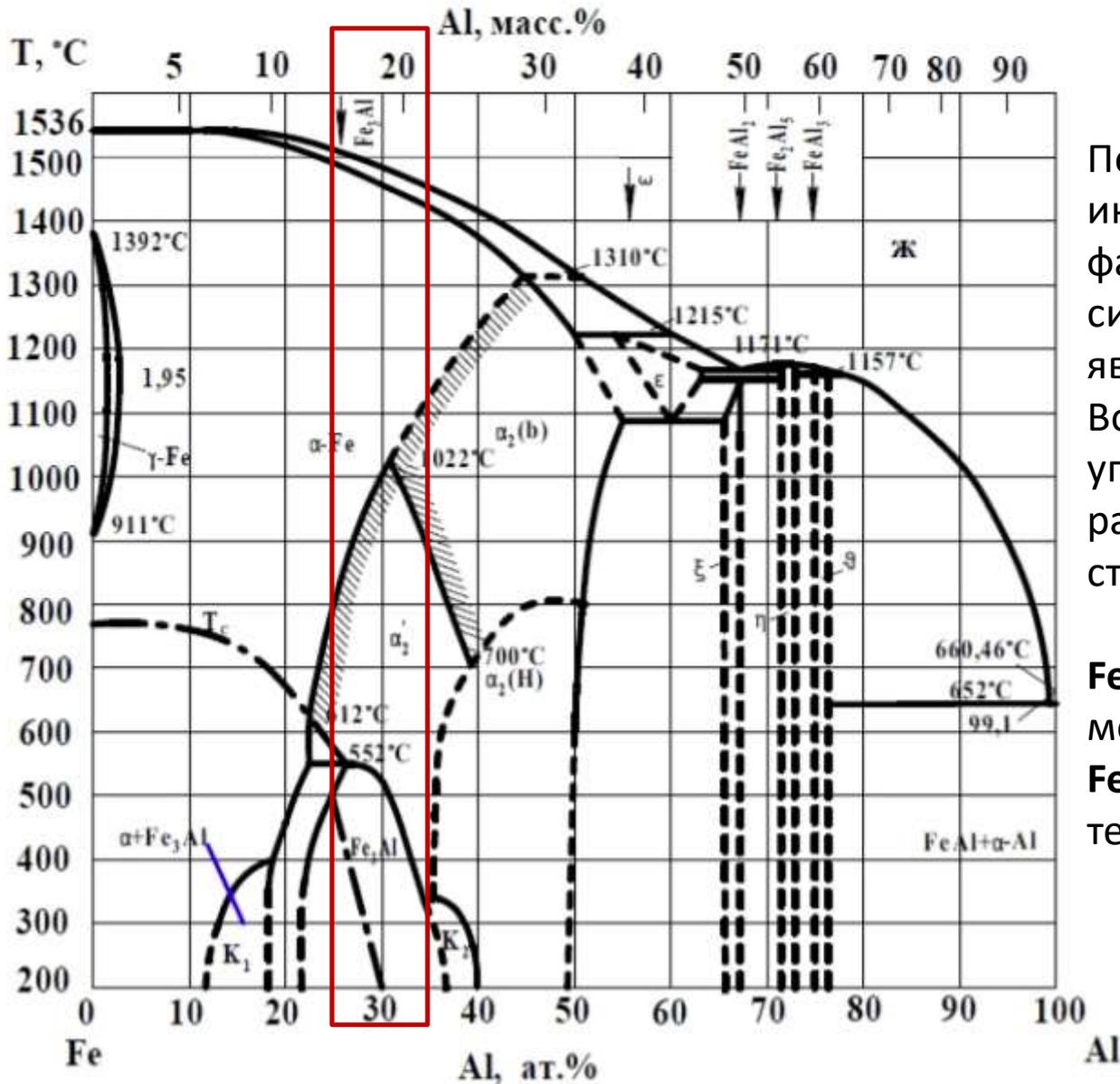


термопары



**нагревательные элементы
высокотемпературных печей**

Алюминиды железа. Структура

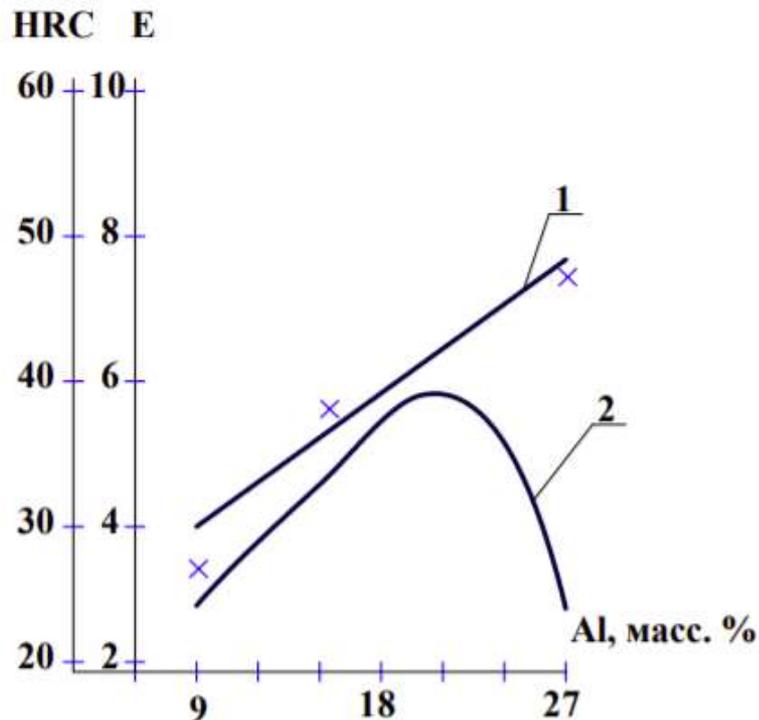


Перспективными интерметаллидными фазами, возникающими в системе Al-Fe (25-34 ат. % Al), являются **Fe₃Al** и **FeAl**. Возникают они путем упорядочения твердого раствора на основе ОЦК-структуры.

Fe₃Al получают при медленном охлаждении. **FeAl** – при закалке от температуры 600°C и выше.

Алюминиды железа. Свойства

Алюминиды железа Fe_3Al и FeAl привлекают внимание своей низкой стоимостью, простотой получения, устойчивостью к коррозии и окислению, высокая жаростойкость и твердость, обеспечивающая повышенную износостойкость. Недостатком их является повышенная хрупкость во влажной среде. Устранить ее можно, легируя сплавы на основе FeAl и Fe_3Al бором и хромом (никелем), соответственно. Пластичность соединения Fe_3Al улучшают также путем **термомеханической обработки**. Формирование дополнительных фаз благоприятно отражается также на прочностных характеристиках материала.

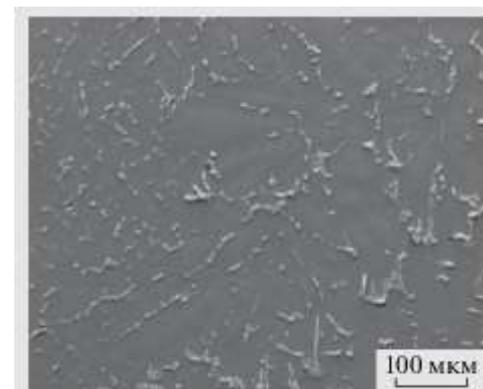
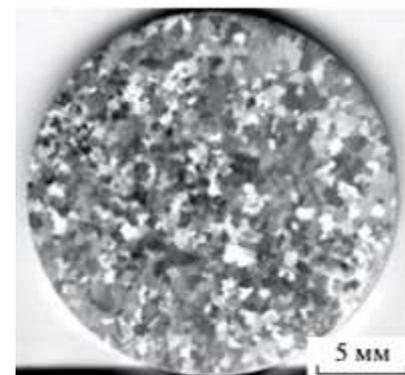
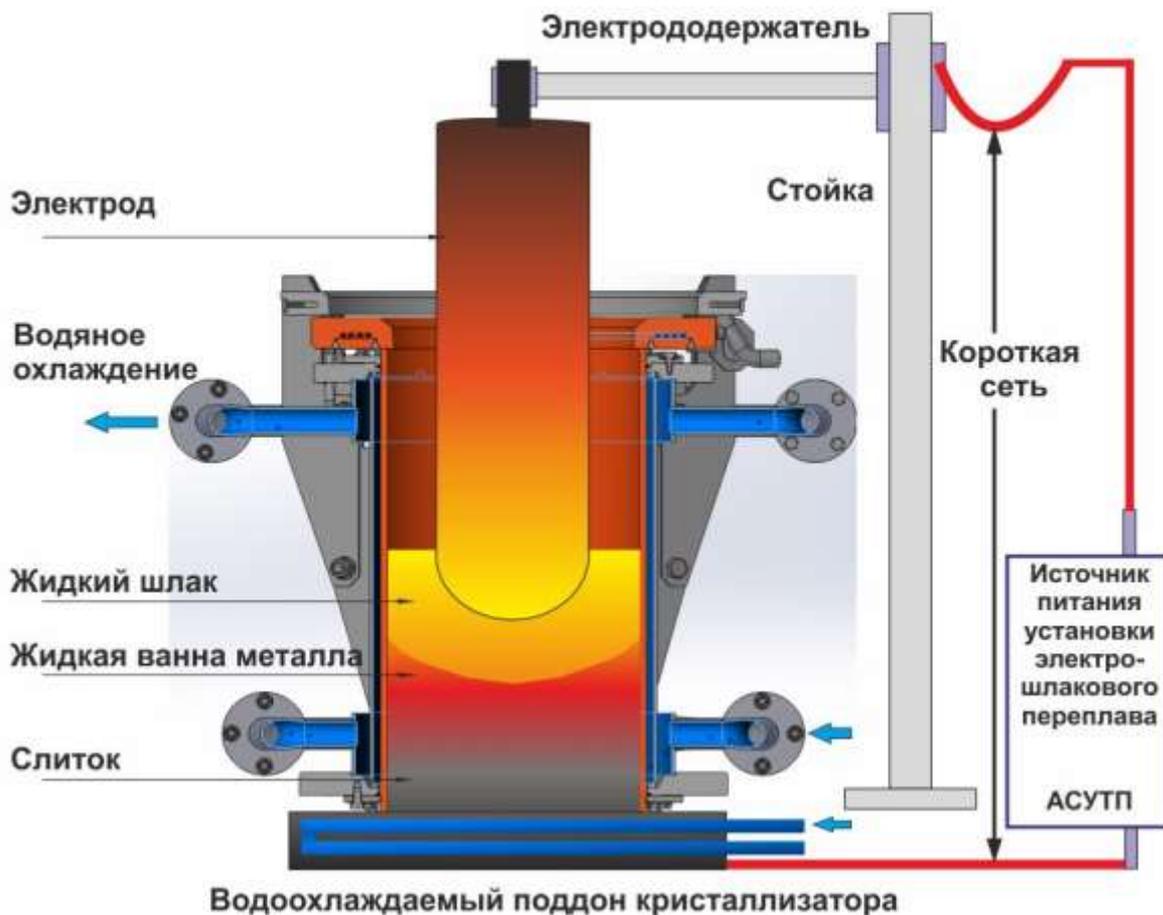


Низкая плотность в сочетании с высокотемпературными свойствами дает основания считать сплавы на основе FeAl перспективными конструкционными материалами.

Зависимость твердости (1) и относительной износостойкости (2) от содержания алюминия в сплаве, полученном электро-дуговой наплавкой.

Алюминиды железа. Получение

Схема электрошлакового переплава

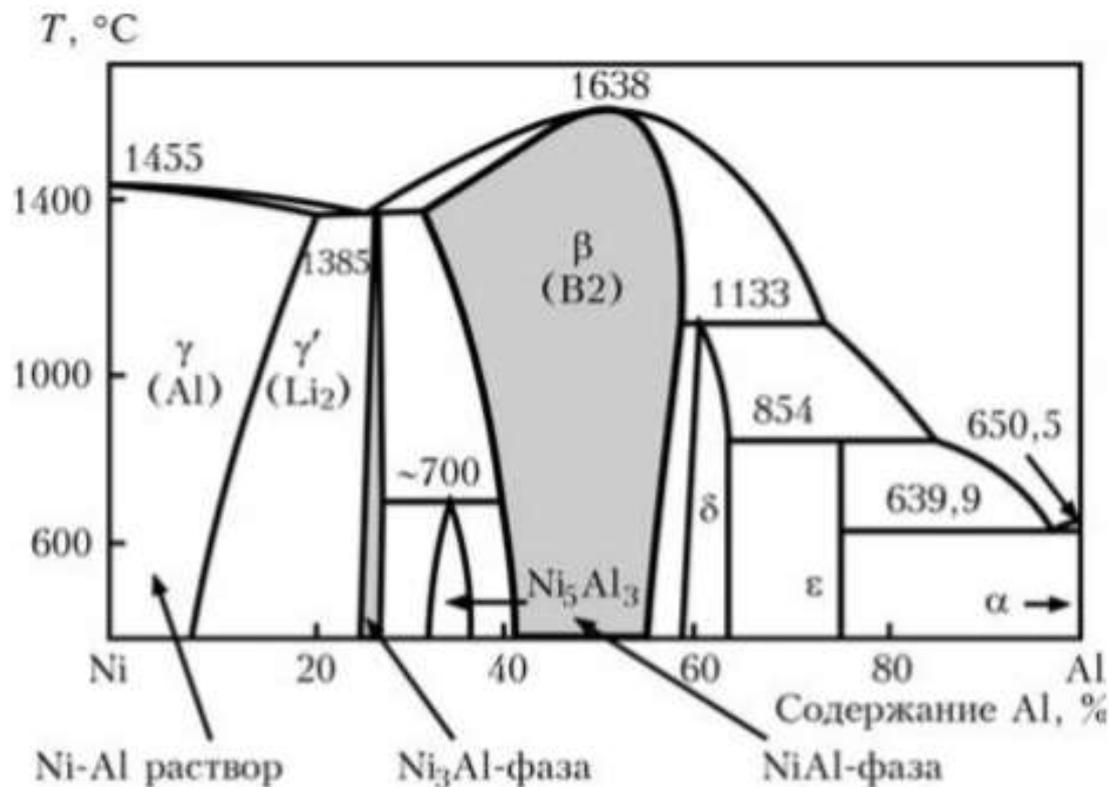


Алюминиды железа. Применение

Разработка сплавов на основе алюминидов железа ориентирована главным образом на **замену коррозионностойких сталей**. Кроме того, из них предлагается изготавливать **передаточные валки для станов горячей прокатки сталей**, лотки для термообработки, нагреватели, пористые фильтры, **автомобильные поршневые клапаны**, элементы автомобильных выхлопных систем, трубы теплообменников, емкости для катализа. **Один из вариантов их использования связан с получением коррозионно- и износостойких покрытий на стальных изделиях.**



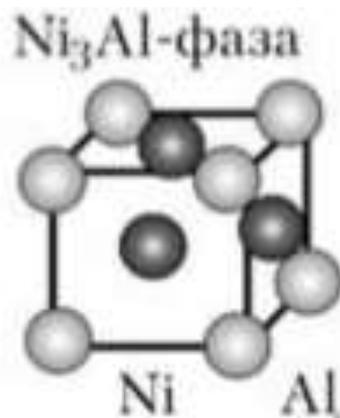
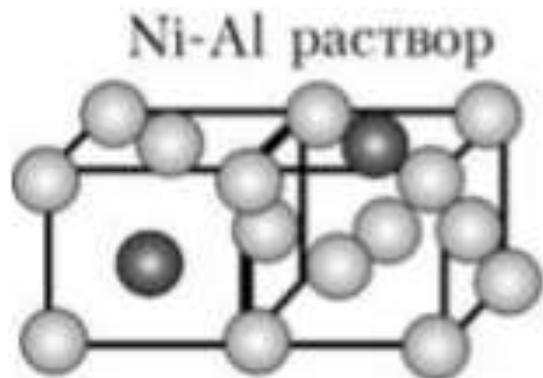
Алюминиды никеля. Структура



Интерметаллиды Ni_3Al и NiAl имеют упорядоченную кристаллическую решетку, что обеспечивает им повышенную стабильность структур из-за значительного торможения процессов, контролируемых диффузией. Высокая термическая стабильность этих соединений обеспечивает повышение их жаропрочности при меньшем содержании тугоплавких элементов.

Алюминиды никеля. Структура

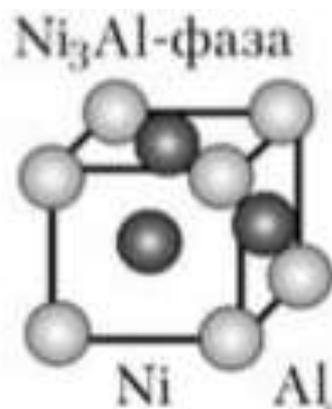
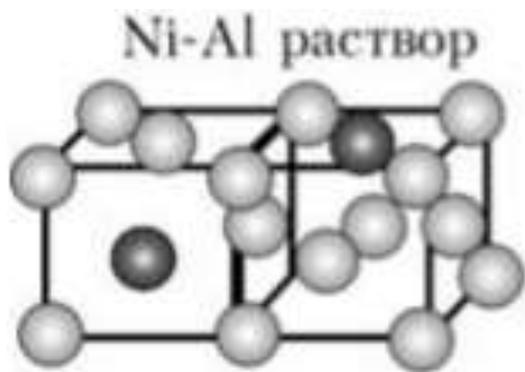
Соединение **NiAl** представляет собой упорядоченную структуру типа B2 с параметром 0,287 нм. Атомы никеля расположены в вершинах ячейки, алюминий занимает ее центральные позиции. Предел прочности интерметаллида NiAl зависит от содержания алюминия, которое может варьироваться в широких пределах и в среднем составляет ~ **110 МПа**. Алюминид никеля типа NiAl чрезвычайно хрупкий материал, однако при повышении температуры до 400 °С и более его пластичность возрастает.



С целью повышения механических характеристик 36 соединение NiAl легируют такими элементами как **Cr, Ti, Zr и Hf**. Предел текучести легированного сплава может достигать **600 МПа**. При высоких скоростях охлаждения соединение NiAl претерпевает мартенситное превращение с образованием структуры типа L10.

Алюминиды никеля. Структура

Алюминид Ni_3Al имеет сверхструктурную решетку типа L1₂. Атомы алюминия занимают позиции в вершинах куба, атомы никеля находятся в центре граней. Сплав Ni_3Al обладает повышенным по сравнению с NiAl пределом текучести, который максимален (**520 МПа**) при температуре 700 °С. Пластичность монокристаллического Ni_3Al достаточно высока, относительное удлинение изготовленных из него образцов может достигать 100 %.



В поликристаллическом состоянии материал является чрезвычайно хрупким. С целью повышения пластичности целесообразно введение в сплав микродобавок **бора, циркония, гафния, хрома, марганца и железа.**

Сплавы на основе алюминида никеля. Структура

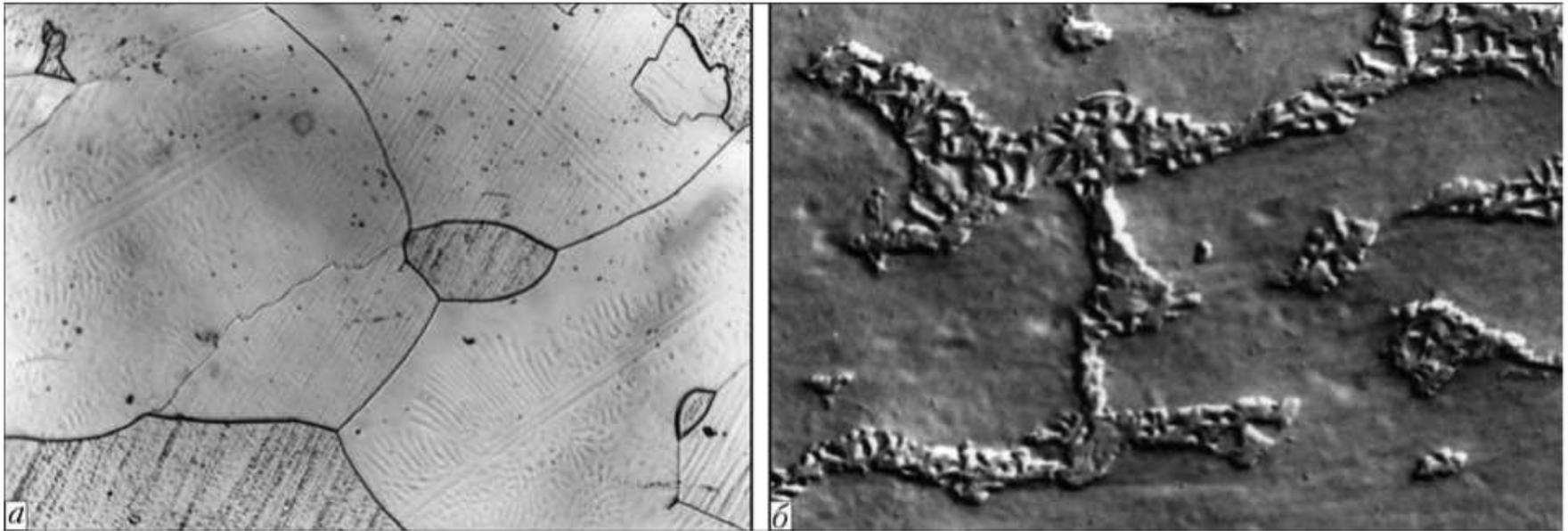


Рис. 4. Микроструктура сплава на основе Ni_3Al в системе Ni–Al–Cr–Mo–W: *a* — твердый раствор на основе Ni_3Al ($\times 250$); *б* — участки с выделениями $\gamma + \gamma'$ -фазы по границам твердого раствора ($\times 10000$)

Установлено, что оптимальные свойства при температуре $1200\text{ }^\circ\text{C}$ при испытании в воздушной среде имеет интерметаллидное соединение **Ni_3Al** , в котором часть атомов никеля заменены **Cr** и **Co**, а часть атомов алюминия - **Cr, Ti, W и Mo**.

В подобных сплавах формируется микроструктура, состоящая из зерен твердого раствора на основе Ni_3Al с прослойками смеси γ - и γ' -фаз. Наличие в объеме зерна небольшого количества пластинчатой γ -фазы и выделение по границам зерен упрочняющих фаз исключает охрупчивание материала по границам и повышает жаропрочность.

Сплавы на основе алюминиды никеля. Свойства

Сплавы на основе соединения Ni_3Al нашли промышленное применение. Прежде всего они известны благодаря своим высокотемпературным свойствам (высокое сопротивление ползучести, сохранение прочностных характеристик при повышенных температурах, хорошая стойкость к окислению).

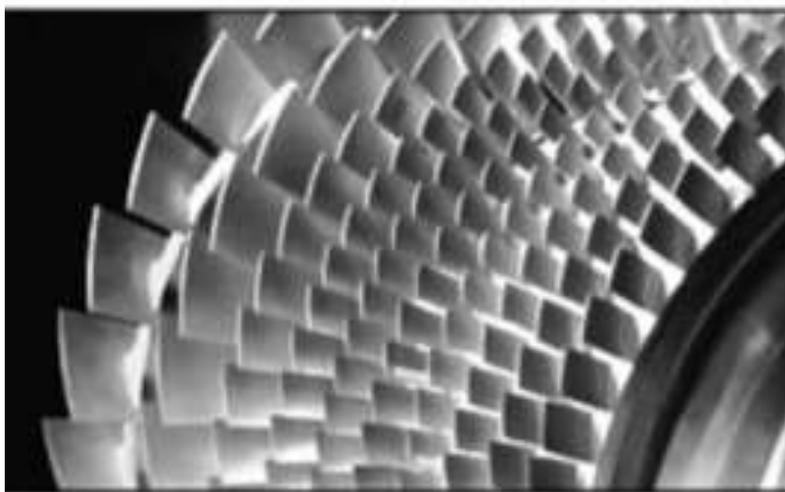
Механические свойства литейных сплавов на основе интерметаллида Ni_3Al

Марка сплава, паспорт	Структура отливок	Плотность, $кг/м^3$	Механические свойства при температурах, °С							
			20			900		1100		1200
			σ_B , МПа	δ , %	σ_{-1} , МПа (при $2 \cdot 10^7$ цикл)	σ_{100} , МПа	σ_{-1} , МПа (при $2 \cdot 10^7$ цикл)	σ_{100} , МПа	σ_{-1} , МПа (при $2 \cdot 10^7$ цикл)	σ_{100} , МПа
ВКНА-4, № 1484	Поликристаллическая	7840	720	11,5	150	230	250	55	100	23
ВКНА-1В, № 1649	Дендритная столбчатая	7938	740	50	130	250	240	65	120	43
ВКНА-4У, № 1598	» »	7910	770	30	230	280	310	95	150	45
ВКНА-25, № 1775	Монокристалл <111>	8104	1120	10	240	420	370	130	—	48

Сплавы на основе алюминидов никеля. Применение

Сплавы на основе алюминидов никеля применяют для изготовления литейных форм (в производстве стекла), штампов, валков для прокатки стальных заготовок, направляющих роликов при реализации процесса непрерывного литья, элементов муфельных печей и др. Высокая стойкость к коррозии и эрозии позволяет использовать сплавы на основе Ni3Al при производстве высокотемпературных химических реакторов, при изготовлении рабочих колес насосов для перекачки суспензий, а также воздушных датчиков, используемых при сжигании высокосернистого топлива. **Легирование позволяет улучшать свойства никелидов алюминия. Промышленные сплавы типа Ni-16,3Al-8,2Mo-0,26B (ат. %) используют для изготовления лопаток турбин, работающих при температурах более 1000 °С .**

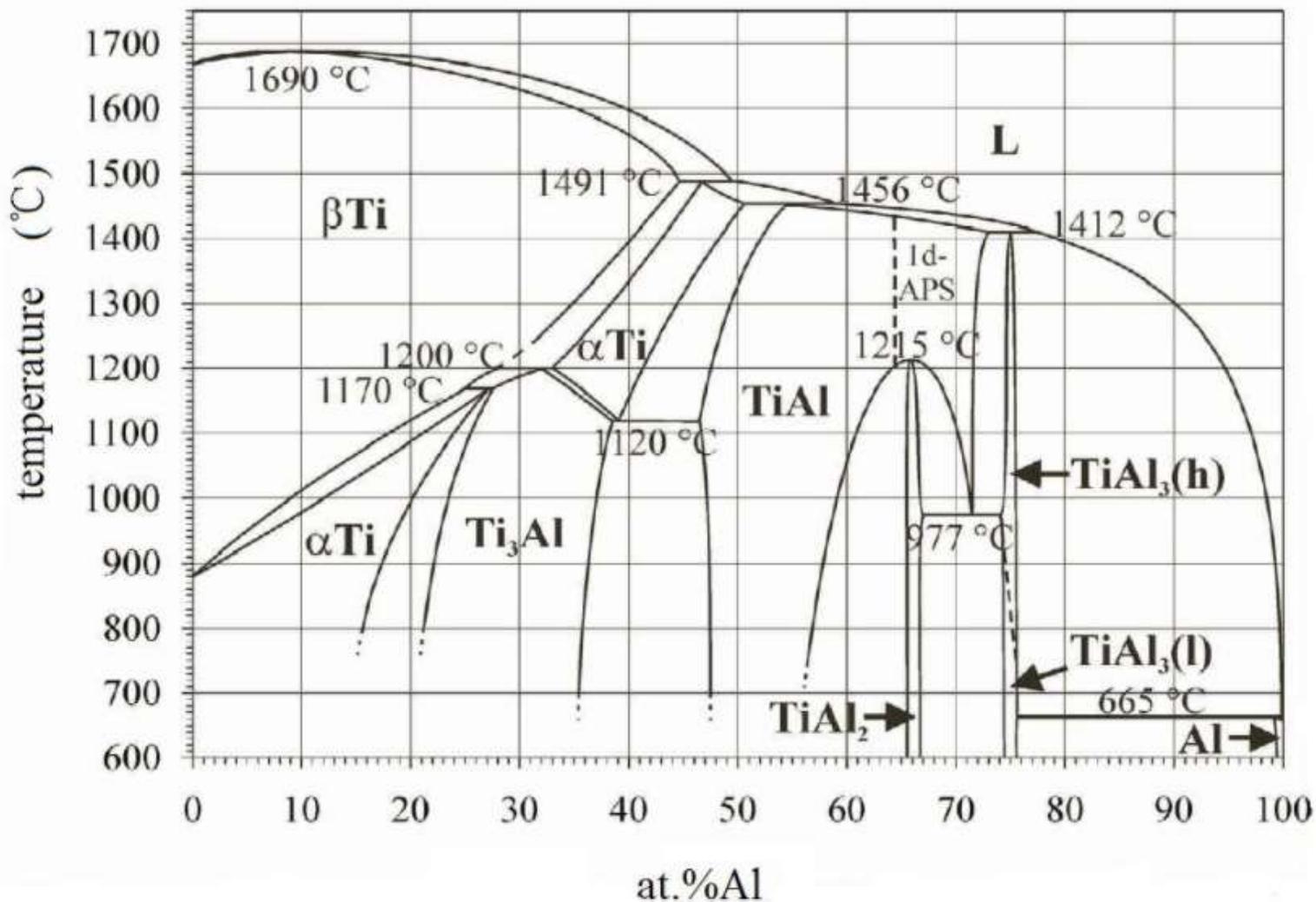
Демонстрационный образец ротора двигателя



• снижение массы ротора на 30%

Сплавы имеют хорошую технологичность при отливке деталей методом точного литья по выплавляемым моделям, и по свойствам не уступают серийным никелевым сплавам.

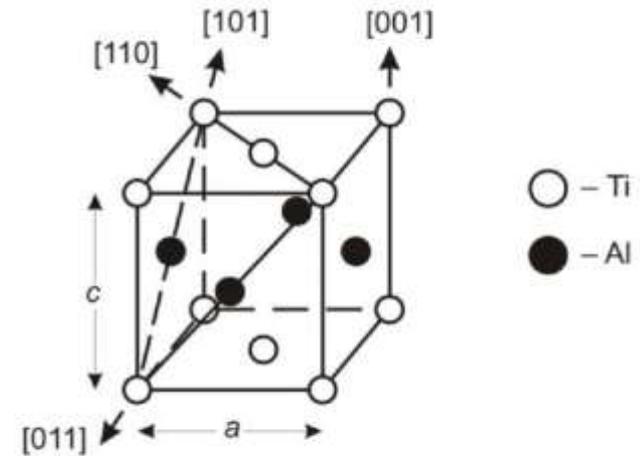
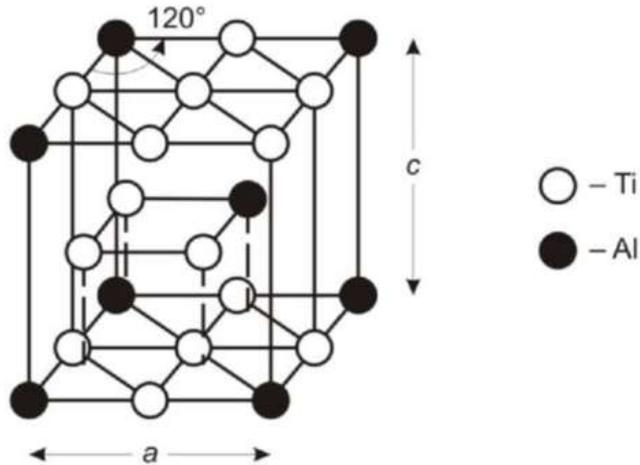
Алюминиды титана. Структура



Система **Ti-Al** характеризуется наличием основных соединений: **Ti₃Al**, **TiAl**, **TiAl₂** и **TiAl₃**. Соединения **TiAl** и **TiAl₃** образуются по перитектическим реакциям при температурах 1460 и 1340 °C соответственно, а **Ti₃Al** — по перитектоидной при 1255 °C.

Алюминиды титана. Структура

Наиболее перспективными оказались – $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ и $\gamma\text{-TiAl}$.



Тип решетки у $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ гексагональный плотноупакованный (ГПУ). Фаза $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ имеет решетку, близкую к решетке α -фазы, но отличается от нее упорядоченным расположением атомов титана и алюминия. Данная решетка может быть представлена как совокупность четырех взаимопроникающих подрешеток, три из которых содержат атомы Ti, а одна - атомы Al. Плотность алюминида Ti_3Al равна $4,20 \text{ г/см}^3$

Алюминид $\gamma\text{-TiAl}$ обладает упорядоченной тетрагонально-искаженной гранецентрированной решеткой, в которой слои, упакованные атомами титана, чередуются со слоями, занятыми атомами алюминия. Плотность алюминида TiAl составляет $3,76 \text{ г/см}^3$

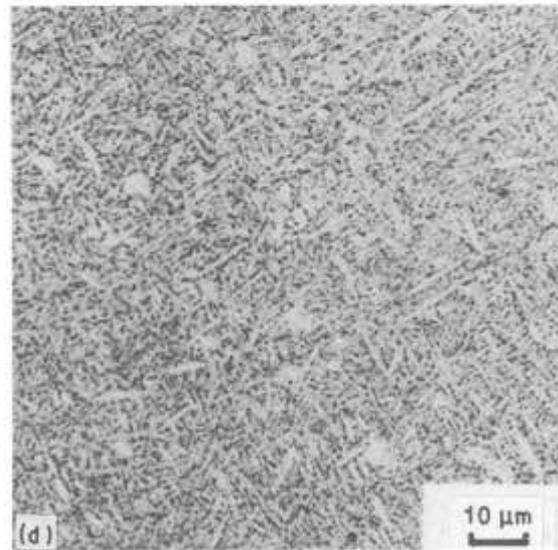
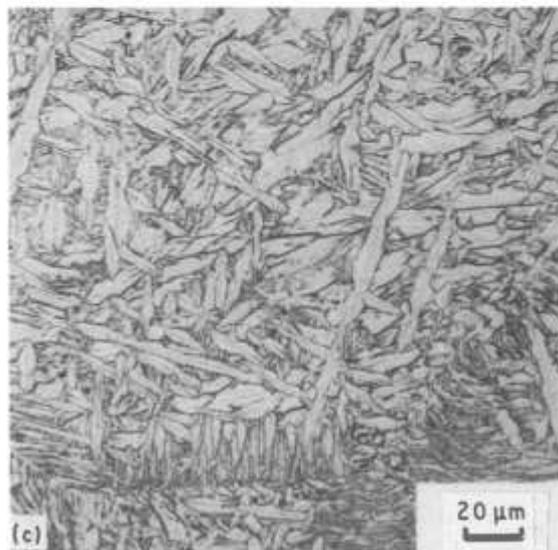
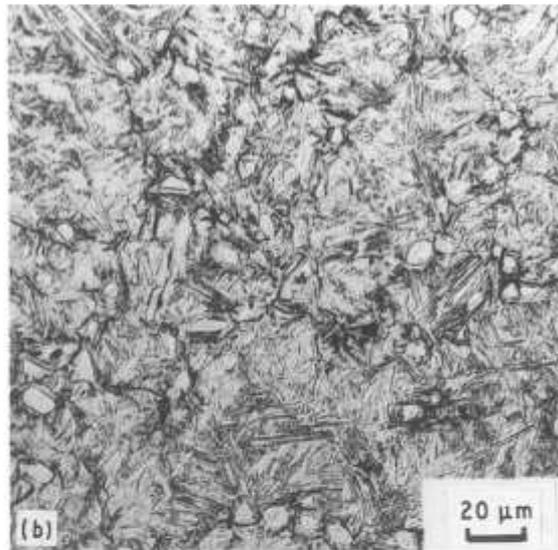
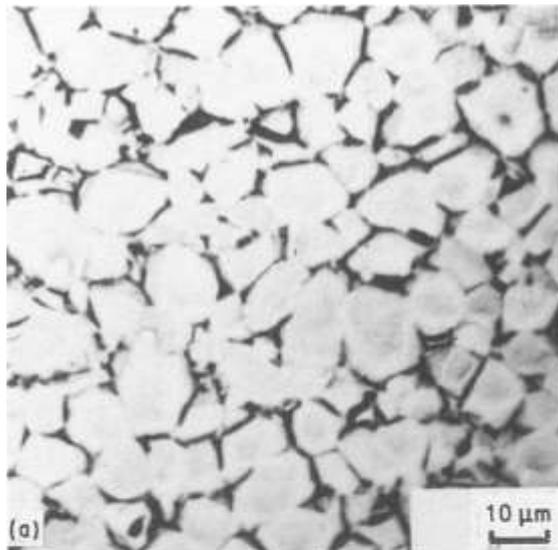
С увеличением содержания алюминия в интерметаллидах наблюдается снижение твердости с одновременным повышением пластичности.

Так, моноалюминид титана γ -TiAl обладает значительной **высокотемпературной прочностью и малой пластичностью при нормальной температуре**. Это обусловлено тем, что в нем приблизительно 70 % металлической и 30 % ковалентной связи.

Для повышения пластичности подобных сплавов необходимо ослабить ковалентную связь между Ti и Al путем легирования элементами с большим атомным радиусом или с большим числом валентных электронов. К таким элементам относятся **цирконий, гафний, ниобий, молибден, ванадий**.

К настоящему времени известны алюминидные титановые сплавы Ti_3Al (« α -2»-фаза. В США — «супер α -2»-сплавы, в РФ — сплав ВТИ-2); Ti_2AlNb («орто»-фаза) «орто»-сплавы, сплав «22-23» (США), ВТИ-4 (РФ) и TiAl (γ -фаза, «46-1-1», США), ВТИ-3 (РФ), которые отличаются повышенными удельной жаропрочностью, усталостью и стойкостью к окислению по сравнению с титановыми сплавами.





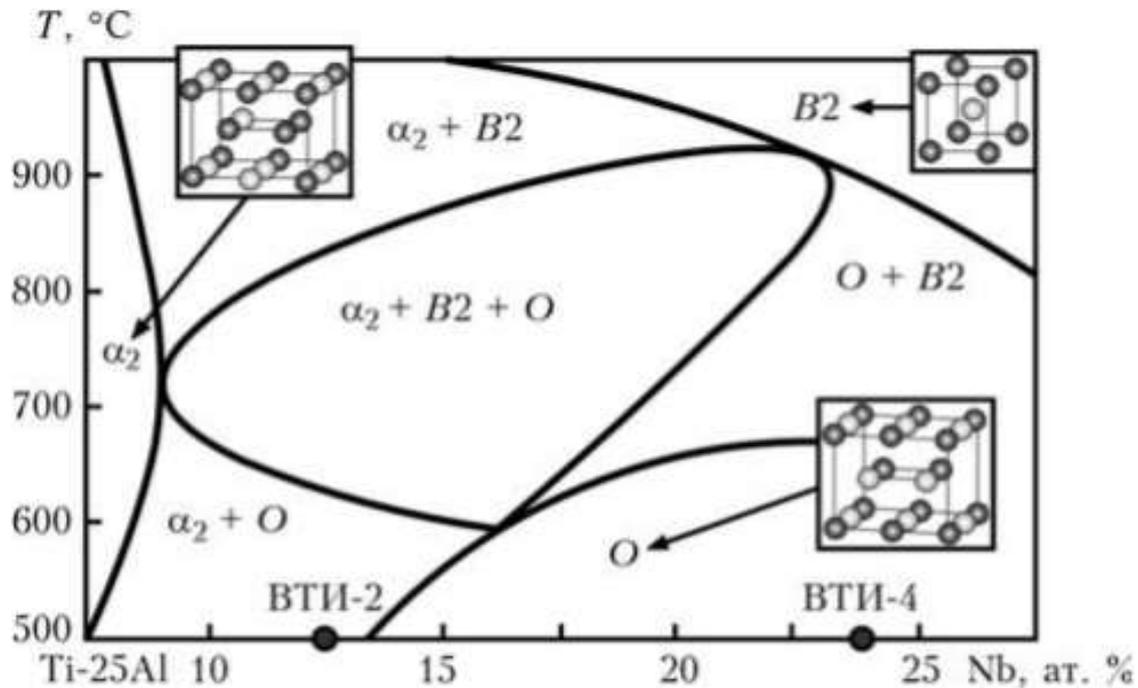
Микроструктуры, созданные в сплаве Ti-25Al-7.5Nb путем трансформации из β -фазы: равноосная микроструктура с большой объемной долей первичной α_2 -фазы (a), малообъемная доля первичной α_2 -фазы в матрице, преобразованной в Видманштетт (b), грубая микроструктура, преобразованная в Видманштетт (c), и тонкая микроструктура, преобразованная в Видманштетт (d)

Сравнение алюминидов титана с титановыми сплавами и суперсплавами

Свойство	Ti сплавы	α_2 -Ti ₃ Al	γ -TiAl	Суперсплавы
Плотность, г/см ³	4.54	4.84	4.04	8.3
Модуль Юнга, ГПа	96-100	100-145	160-176	206
Предел текучести σ_T , МПа	110	145	176	207
Предел прочности σ_B , МПа	480-1200	800-1140	450-800	-
Температура ползучести, °C	540	730	900	1090
Температура окисления, °C	590	705	815	1090
Пластичность при комнатной температуре, %	15	2-4	1-3	3-10
Пластичность при высокой температуре, %	15	5-12	5-12	10-20

У алюминидов титана высокая температура плавления, низкая плотность, высокие модули упругости, возрастание предела текучести (для TiAl) с повышением температуры, стойкость к окислению и возгоранию, высокое соотношение прочность/плотность, жаропрочность — все это создает благоприятные условия для применения этих материалов для авиакосмических двигателей нового поколения.

«Орто»-сплавы. Структура. Свойства



В самостоятельную группу выделяют сплавы на основе алюминида Ti_2AlNb (**орторомбическая фаза O**). Фаза O обладает упорядоченной орторомбической структурой DO19, в которой некоторые узлы, занятые атомами титана в решетке алюминида Ti_3Al , замещены атомами ниобия.

Имея более низкий коэффициент термического расширения, большую низкотемпературную прочность и пластичность, фаза O при 650..750 °C имеет меньший темп снижения модуля упругости, что свидетельствует о ее отличных **жаропрочных свойствах.**

«Орто»-сплавы

При создании «орто»-сплавов в качестве легирующих элементов используются тугоплавкие элементы — молибден, ванадий, титан, вольфрам и цирконий. Выбор указанных элементов обусловлен тем, что они повышают упругие и прочностные свойства тройных сплавов Ti–Al–Nb, снижают окисляемость, в результате изменения фазового состава и структурных превращений позволяют сформировать оптимальные типы структур, улучшающие характеристики пластичности и надежности. Для повышения жаропрочных свойств в сплавы вводится кремний и углерод, которые за счет образования сложных силицидов и карбидов повышают температурные характеристики — кратковременную и длительную прочность композиций.



**Опорное кольцо турбины
высокого давления, изготовленное
из алюминидов титана GE29**

К настоящему времени известны несколько сплавов этого типа — ВТИ-4 (РФ), Ti-22-23 (США), Ti-22-20-3 (Китай), Ti-22-20-2 (Япония) и Ti-22-25-2-0,5 (Франция). Основа сплавов состоит из Ti-(20-23)Al-(20-25)Nb-(1-5) (ат. %), других элементов — V+Mo+Zr+Si (ВТИ-4), Та (Китай), W (Япония), (Mo+Si) (Франция) [4].

Алюминиды титана. Производство

Традиционные методы легирования и создания слитков включают **индукционную плавку, вакуумную дуговую переплавку и плазменную плавку.**

Далее применяются традиционные методы производства заготовок, такие как **литье, ковка или порошковая металлургия**, но все они сопровождаются трудностями, которые необходимо преодолевать.

Испытанные технологические маршруты промышленного масштаба включают **обработку и ковку порошков, производство листов горячей прокаткой**, а также **центробежное литье или литье по выплавляемым моделям.**



Детали полученные порошковой металлургией

Алюминиды титана. Применение

Применение жаропрочных материалов на основе алюминидов титана:

- авиационная промышленность;
- для деталей горячего тракта газотурбинных двигателей;
- для деталей компрессора;
- сопловые и рабочие лопатки;
- кольца, корпуса, панельные конструкции;
- энергетическое машиностроение;
- стационарные турбины электрогенераторов;
- энергетические установки;
- транспортное машиностроение;
- поршневые и дизельные двигатели;
- газо- и нефтеперерабатывающие установки химической промышленности;
- атомное машиностроение;
- первая стенка термоядерного реактора;
- в качестве материалов-заменителей, которые создают дополнительную экономию дефицитных материалов.

**Спасибо за
внимание!**

