

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ

«Современные металлы и сплавы»

ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ
105005, ул. Радио, 17, Тел.: (499) 261-8677,
Факс: (499) 267-2209, E-mail: admin@viam.ru





Перспективы развития зарубежной гражданской авиации

В 2008 году NASA выделило \$12,4 миллиона объединённым командам институтов и промышленных гигантов на проработку передовых концепций самолётов, уходящих на три поколения дальше существующих коммерческих лайнеров, обеспечивающих:

- сокращение уровня шума на **71 децибел** против существующих авиационных норм
 - **75%** сокращения выбросов окислов азота
 - **более чем 70-процентное** снижение расхода топлива



Silent Efficient Low Emissions Commercial Transport

компании Northrop Grumman: взлётная полоса всего в 1,5 километра



Double Bubble D8

(Массачусетский технологический институт): фюзеляж представляет собой пару сращённых продольно классических фюзеляжей - сочетание прочности, лёгкости и невиданного простора



Сверхзвуковой пассажирский лайнер 2035 года Icon-II

(Boeing): крейсерская скорость 1,6 М, расстояние 5-9 тысяч км; значительно экономичнее и намного тише сверхзвуковых-предшественников



«Ультразелёный» лайнер Volt (Boeing): гибридная силовая установка - газовая турбина, и встроенный в неё же 5500-сильный электромотор

Требуются: сплавы с памятью формы, керамические и композиционные материалы, углеродные нанотрубки и волоконно-оптические системы, самовосстанавливающаяся «кожа» и др.



Перспективы развития зарубежной военной авиации



Истребитель шестого поколения (Boeing), предназначенный для замены самолетов F/A-18E/F "Супер Хорнет" после 2025 года: самолет может быть разработан как в пилотируемой, так и в беспилотной версии



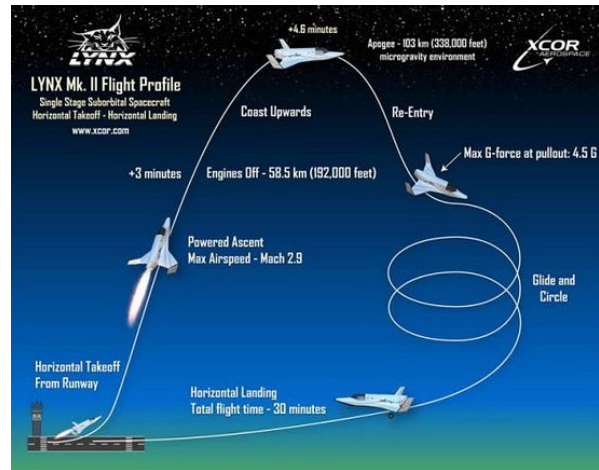
Гиперзвуковой беспилотный аппарат X-51A: скорость до 6 тысяч км/ч



Сверхскоростной легкий вертолет огневой поддержки следующего поколения (Sikorsky): скорость 470 км/ч, вес 2400 кг; лопасти из композитных материалов



Летающий внедорожник: в режиме вертолета скорость до 225 км/ч



Суборбитальный корабль XCOR Lynx для регулярных перевозок: способен поднимать пассажиров и грузы на полчаса на высоту до 100 км, а затем приземляться по-самолетному на обычную взлетно-посадочную полосу длиной 2400 метров; оснащен четырьмя ракетными двигателями, которые работают на керосине и жидком кислороде

Уже просматриваются новые образцы следующих поколений летательных аппаратов, но «пересечь» на них пока невозможно из-за того, что необходимы принципиально новые технологические решения – **авиация ждет существенного качественного скачка в материаловедении и технологиях**



Развитие двигателестроения гражданской и военной авиации (зарубежный опыт)

НАСА ведет проектные исследования по перспективным двигателям, которые позволят к 2025-2035 гг. создать тяжелые гиперзвуковые самолеты.

Наибольшее внимание уделяется комбинированным двигательным установкам, работающим на всех этапах полета: от момента старта до достижения гиперзвуковых скоростей и выхода на околоземную орбиту.

В первую очередь это ракетно-прямоточные двигатели RBCC (Rocket-Based Combined Cycle), функционирующие в режиме обычного ЖРД и по схеме прямоточных воздушно-реактивных двигателей со сверхзвуковым горением, а также ракетно-турбинные двигатели TBCC (Turbine-Based Combined Cycle).

НАСА изучает двигатели с детонацией топлива PDE (Pulse Detonation Engine). На базе подобных двигательных установок предполагается разработка многоразовой транспортной космической системы третьего поколения, которая позволит после 2025 г. на два порядка снизить затраты на выведение космических аппаратов на околоземную орбиту.



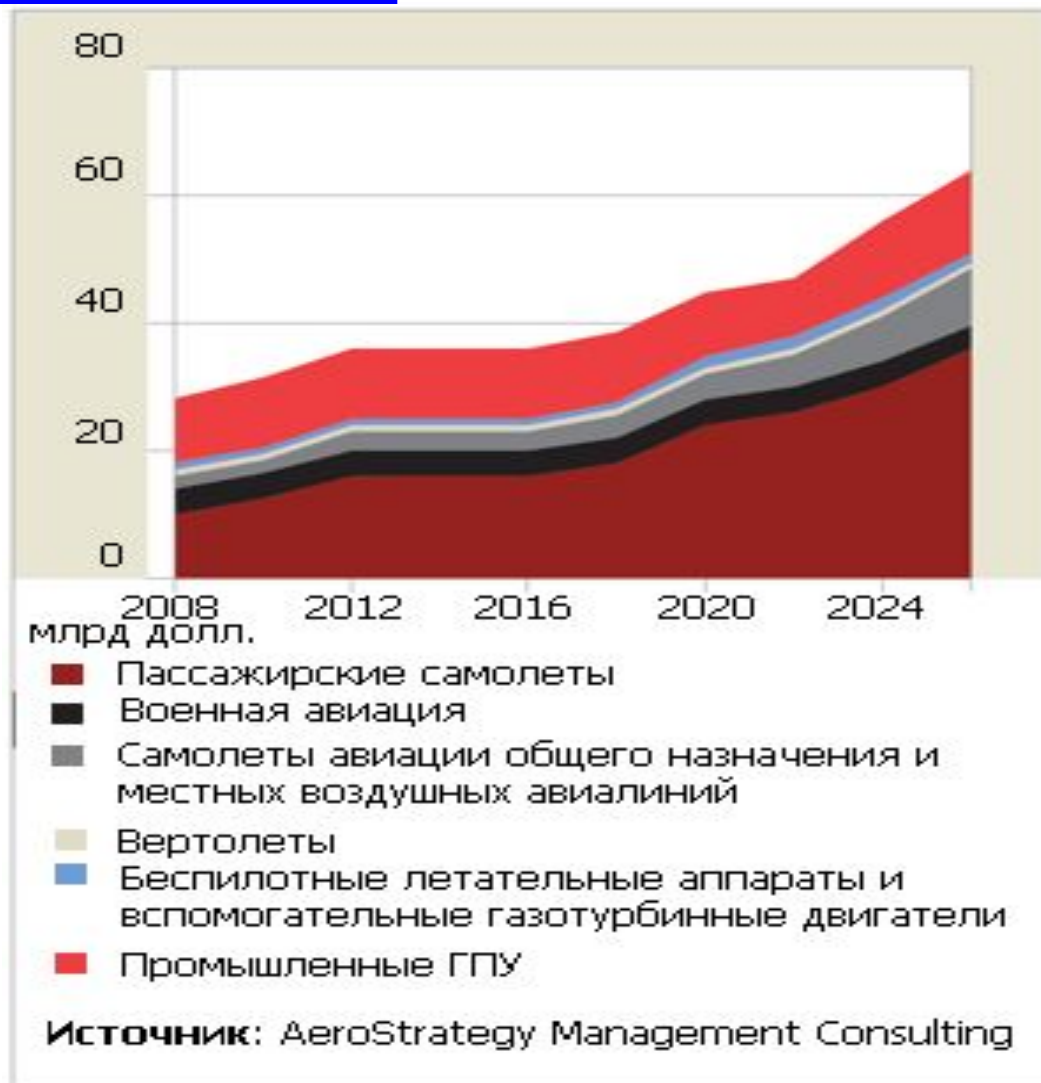
Беспилотный 227-килограммовый самолет с гибридным крылом и уникальным водородным гиперзвуковым прямоточным ракетным двигателем, силуэтом напоминающий ската манту, создается в рамках проекта НАСА по Экологически Ответственной Авиации [ERA - Environmentally Responsible Aviation], который направлен на разработку технологий, необходимых для создания более тихих, чистых [по выбросам] и топливосберегающих самолетов будущего.

НАСА и компании Боинг завершила первый этап летных испытаний уменьшенной модели X-48B, выполненной по схеме летающее крыло, в Летно-исследовательском центре имени Драйдена [Калифорния].



Зарубежные программы создания новых технологий для двигателестроения гражданской и военной авиации

По прогнозам экспертов, объемы продаж ГТД и ГТУ к 2026 году достигнут 850 млрд. долл.





Зарубежные программы создания новых технологий для двигателестроения гражданской и военной авиации

По прогнозам экспертов, объемы продаж ГТД и ГТУ к 2026 году достигнут 850 млрд. долл.

Versatile Affordable Advanced Turbine Engine (VAATE) – до 2017 г.

- революционные концепции двигателей новой архитектуры;
- эксплуатация без технического обслуживания с допустимым уровнем повреждений деталей.

Должна обеспечить снижение на 25 % удельного расхода топлива, повышение на 60 % отношения тяги к весу и снижение на 60 % стоимости двигателя, обеспечение коэффициента доступности 10.

Ultra Efficient Engine Technology (UEET) – программа NASA.

Должна обеспечить снижение уровня эмиссии на 70 – 80 %, увеличение нагруженности турбины на 50 % и снижение массы на 20 %.

- перспективные дисковые сплавы, в т.ч. биметаллические с рабочими температурами более 820 °С;
- перспективные жаропрочные сплавы, интерметаллиды и естественные композиты типа Nb-Si с теплозащитными покрытиями (коэффициент теплопроводности в 2 - 3 раза ниже существующих), интерметаллиды γ -Ti для лопаток турбины;
- композиты на основе керамической матрицы для сопловых лопаток и камеры сгорания;
- легкие жаропрочные сплавы и сплавы с эффектом памяти.



Национальные планы и стратегии в США и Европе в области авиационных исследований



Новые материалы – ключевое направление для создания перспективной аэрокосмической техники



Стратегические направления развития материалов и технологий в «Национальный план развития науки и технологий в авиастроении на период до 2030 года»

1. Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали в том числе с высокой вязкостью разрушения
2. Слоистые металлополимерные, биметаллические и гибридные материалы
3. Комплексная антикоррозионная защита, многослойные износ-, эррозионностойкие и теплозащитные покрытия
4. Интерметаллидные материалы
5. Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций
6. Компьютерные методы моделирования структуры и свойств материалов при их создании и работе в конструкции
7. Монокристаллические, высокожаропрочные суперсплавы, естественные композиты
8. Материалы с эффектом памяти формы
9. Магнитные материалы
10. Металломатричные и полиматричные композиционные материалы
11. Полимерные композиционные материалы
12. Высокотемпературные керамические и керамоподобные материалы
13. Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия
14. Сверхлегкие пеноматериалы
15. Интеллектуальные, адаптивные материалы и покрытия
16. Новые методы исследований, испытаний, включая квалификационные, и неразрушающего контроля

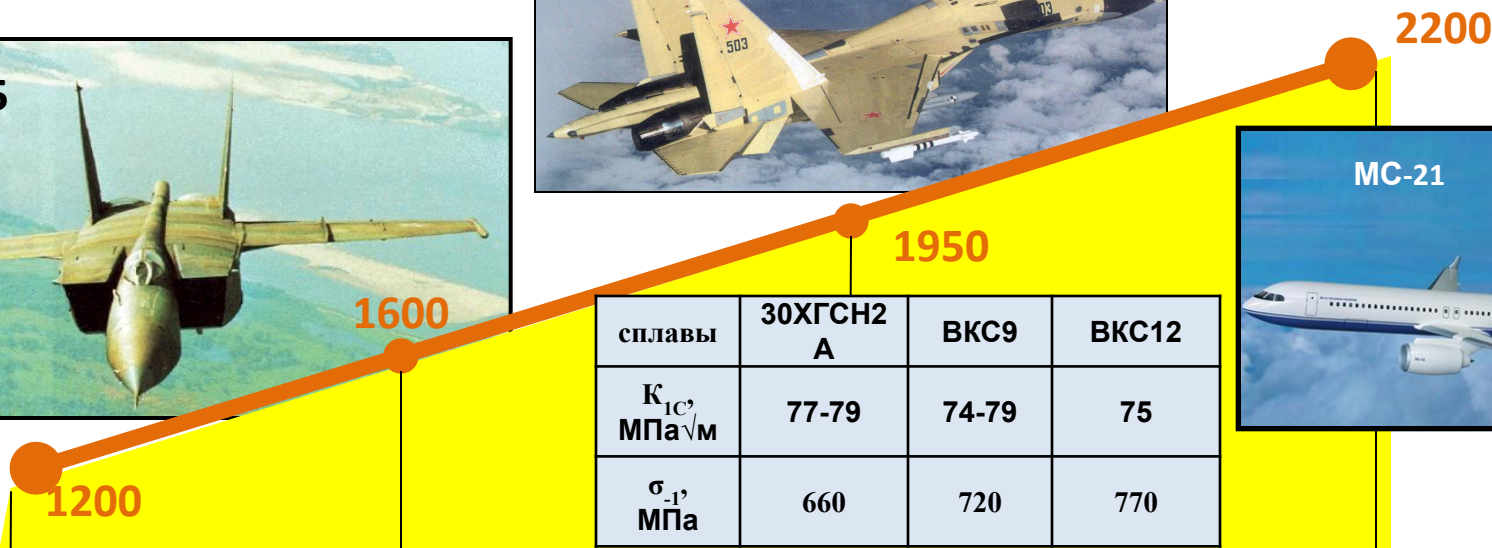
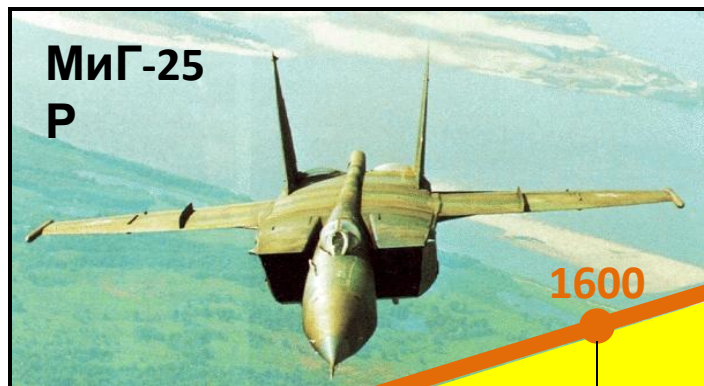
Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие свариваемые стали с высокой вязкостью разрушения (лаб. 5, 16, 23, 4)

Задачи:

- Создание, с применением математического моделирования химического и фазового состава, новых принципов легирования лигатурами высокопрочных конструкционных и коррозионностойких свариваемых сталей, в том числе со сверхравновесным содержанием азота (до 1.5 %), обладающих вязкостью разрушения в 1,5 раза более высокой, чем у существующих, для ответственных деталей узлов и агрегатов авиационной техники и газотурбинных двигателей, обеспечивающих повышение уровня выносливости и прочности до 1,5 раз.
- Разработка технологий выплавки, деформации, термической и термомеханической обработки материалов, обеспечивающих заданный уровень эксплуатационных свойств

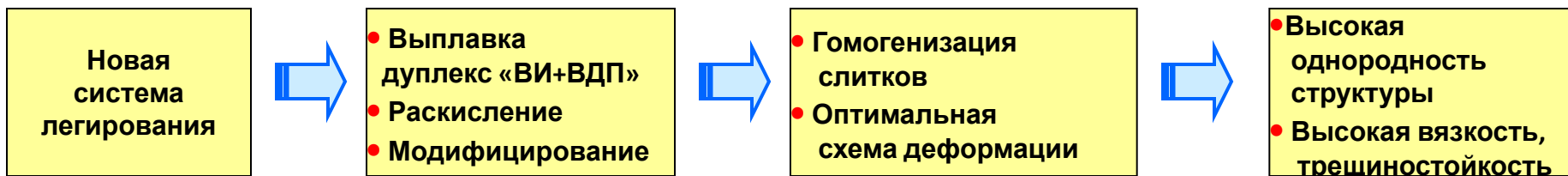


Высокопрочные конструкционные стали для силовых деталей планера и шасси



30 ХГСА 30ХГСН2А ВКС9 ВКС12

Разработана технология выплавки, режимы термообработки, технология ЭЛС



ЗАДАЧИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНИКИ

Разработка технологии изготовления крупногабаритных полуфабрикатов (поковок, штамповок) из высокопрочных конструкционных сталей для повышения надежности и весовой эффективности конструкций элементов шасси и планера



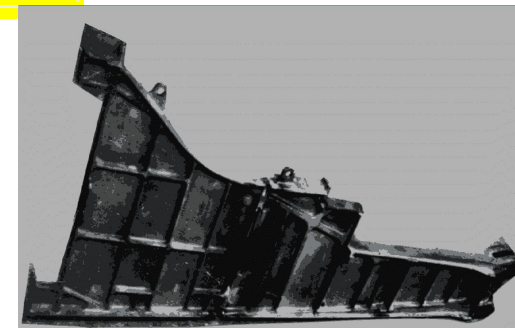
Высокопрочная коррозионностойкая сталь ВНС-65

ДЛЯ СИЛОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ПЛАНЕРА

• рамы • лонжероны • крепежные детали



σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$		σ_{-1} , МПа		$\sigma_{кр}$ (к.п.н.), МПа (камера соляного тумана)
		Т, °С		K_t		
		20	- 50	1	1,7	
1800	1350	145	90	950	750	980



Разработана технология выплавки на заданный фазовый состав, режимы деформации и термообработки полуфабрикатов (прутки, поковки)

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНИКИ

Разработка технологии изготовления крупногабаритных штамповок из высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-65 для повышения надежности и весовой эффективности конструкций силовых элементов планера



КОРРОЗИОННОСТОЙКАЯ СТАЛЬ ВНС-9Ш

ДЛЯ ТОРСИОНОВ НЕСУЩЕГО И ХВОСТОВОГО ВИНТОВ ВЕРТОЛЕТА

ОАО «МЗ «Электросталь»

ОАО «ММЗ «Серп и молот»

прецизионная
плавка
· аустенит

горячая
прокатка
· получение
сляба

холодная прокатка
с промежуточной
закалкой (10-12
переходов)
· $\epsilon=35-50\%$

регламентированная
холодная деформация
· $\epsilon=40\%$
мартенсит
деформации
+ нагартовка

ленты толщиной 0,3 мм

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

ПРОЧНОСТЬ, МПа

1500

ТЕКУЧЕСТЬ, МПа

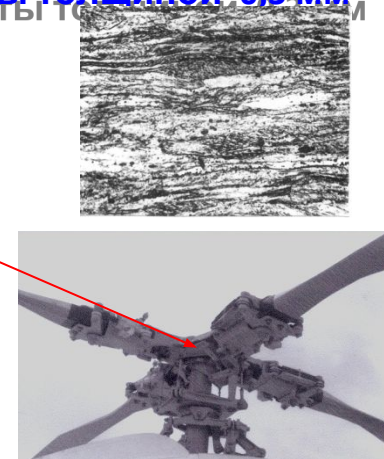
1300

ВЫНОСЛИВОСТЬ, МПа,

400

УДЛИНЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЕ, %

12



ОБЕСПЕЧИВАЕТ:

- СОЗДАНИЕ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПЛАСТИНЧАТОГО ТОРСИОНА
- ЖИВУЧЕСТЬ КОНСТРУКЦИИ, НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ РАБОТЫ ИЗДЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНИКИ: Отработка технологии изготовления холоднокатанной ленты из коррозионностойкой стали ВНС-9Ш и технологии изготовления пластин торсионов несущего и хвостового винта вертолетов для повышения живучести и надежности конструкции.



ВЫСАДНОЙ КРЕПЕЖ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ АЗОСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ 05X16H5ФБ

ИМЕТ РАН
им. А.А.
Байкова

Совместная работа

ВИАМ, ИМЕТ им. Байкова РАН и ОАО «Нормаль»

Особенность легирования $C_{\text{мин}} = 0,05\% + N = 0,13\%$

Механические свойства стали

σ_B	$\sigma_{0,2}$	$T_{\text{ср}}$	σ_{-1}^{σ} ($N=10^7$ цикл)
МПа			
1400	1200	950	730



Свойства болтов М8

ПРЕИМУЩЕСТВА:

- отсутствие в составе дорогостоящих компонентов (Mo, Co)
- повышенная в 1,3-1,5 раза прочность по сравнению с серийными сталями для крепежа, обеспечивающая **надёжную работу болтов с перекосом до 8°**
- высокая технологическая пластичность, обеспечивающая холодную высадку крепежа **со степенью деформации 70%**

Разрушающая нагрузка, кгс	
На разрыв	На срез
5500	4725

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНИКИ

Разработка нормативной документации на высадной крепеж и технологии изготовления (выплавка деформация, термическая обработка) прутков и профилей из коррозионностойкой азотосодержащей стали 05X16H5ФБ

Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения (лаб. 34)

Задачи:

- Создание высокочистых алюминиевых сплавов с минимальным содержанием примесей – $Fe+Si \leq 0,05\%$ (по массе)
- Создание самозакаливающихся алюминиевых сплавов для получения сварных соединений с высокой прочностью ($\sigma_{\text{в}}^{\text{св. соедин.}} / \sigma_{\text{в}}^{\text{осн. Ме}} \geq 0,95$)
- Создание нового поколения свариваемых алюминий-литиевых сплавов с повышенной до $70 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ вязкостью разрушения
- Создание алюминиевых материалов, упрочненных керамическими наночастицами, обеспечивающих повышение прочности до 1000 МПа



Обшивочные листы из высокоресурсных сплавов системы Al-Cu-Mg

Сплав	Направление	Характеристика				
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	СРТУ, мм/цикл ($\Delta K=31$ МПа $\sqrt{м}$)	K_{cY} , МПа $\sqrt{м}$ ($W=760$ мм)	МЦУ (N_{cp}), циклы
1163AT	П	≥ 420	≥ 275	2,0	127	110
Alclad 2524T3 (США)		≥ 420	≥ 275	$\leq 3,0$	≥ 120	-



ЗАДАЧИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНИКИ

Разработка технологии изготовления обшивочных листов **шириной более 2200 мм** из высокоресурсных сплавов системы Al-Cu-Mg для повышения весовой эффективности конструкции

Разработка нового высокоресурсного сплава **с улучшенными (до 20 %) характеристиками усталости и трещиностойкости:**

$$N_{cp} = 140 \text{ цикл } (\sigma_{max} = 157 \text{ МПа}, K_t = 2,6),$$

$$K_{cY} \geq 115 \text{ МПа}\sqrt{м} \text{ (} B = 400 \text{ мм)}$$

Сплав 1163 применен в российских самолетах длительного ресурса Ту-204 (а), SSJ (б)



Для самолета MC-21 необходимы обшивочные листы шириной 2200 мм и более

В рамках ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002 - 2010 годы и на период до 2015 года», предусмотрена реализация мероприятий НИР по разработке нового алюминиевого сплава на основе системы Al-Cu-Mg с повышенными на 10-25% характеристиками усталости, пластичности и трещиностойкости по сравнению с серийным сплавом 1163 и технологии получения на ОАО «СМК» и ОАО «КУМЗ» из него крупногабаритных катанных полуфабрикатов.



Особопрочный алюминиевый сплав В96ц-Зпч для верха крыла, лонжеронов и др. силовых элементов

Испытания ЦАГИ-ВИАМ. Плиты 25 мм

Сплав	Самолет	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	МЦУ, кциклы	dI/dN м/кцикл	K_{1C} МПа $\sqrt{м}$
В96ц-ЗпчТ12	Ту-204СМ, Т-50	634 (≥ 615)	594 (≥ 590)	9,9 (≥ 8,0)	320	5,0	- (≥ 25)
7055-Т7751	В-777, А-380	618 (≥ 615)	594 (≥ 590)	6,7 (≥ 7,0)	300	3,5 (<5,0; ΔK=25)	- (≥ 24)

В скобках – гарантированные значения по стандартам

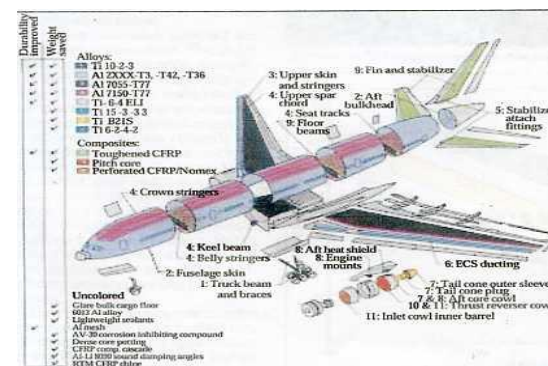
ЗАДАЧИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНИКИ

Разработка технологии изготовления длинномерных крыльевых плит длиной более 15 м

Разработка технологии формообразования деталей из плит в режиме ползучести

Разработка технологии изготовления в производстве прессованных полуфабрикатов ($\sigma_B \geq 645$ МПа) для лонжеронов и др. силовых элементов

Сплав 7055Т77 (США) аналог сплава В96ц-3 применен для обшивок верха крыла В-777 и А-380

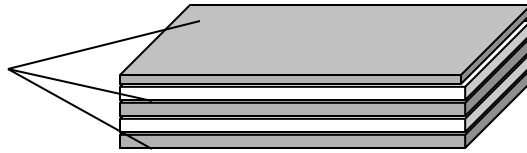


В рамках ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002 - 2010 годы и на период до 2015 года», предусмотрена реализация мероприятий НИР по разработке технологических параметров, изготовление на ОАО «КУМЗ» и исследование прессованных полос для лонжеронов из высокопрочного сплава В96ц-Зпч.



Слоистые алюмокомпозиты СИАЛы на базе Al-Li сплава 1441 для обшивок, перегородок и соединительных лент

Листы 1441



Материал	σ_B , МПа	d , г/см ³	E, ГПа	СРТУ, мм/цикл ($\Delta K=31\text{МПа}\sqrt{m}$)
1441 - СИАЛ	>600	2,35	62	<0,2
2024 -GLARE	>600	2,47	57	<0,2

1441-СИАЛ по сравнению с GLARE

- снижение веса на 5 %
- увеличение модуля упругости на 10 %

1441-СИАЛ по сравнению Al листами

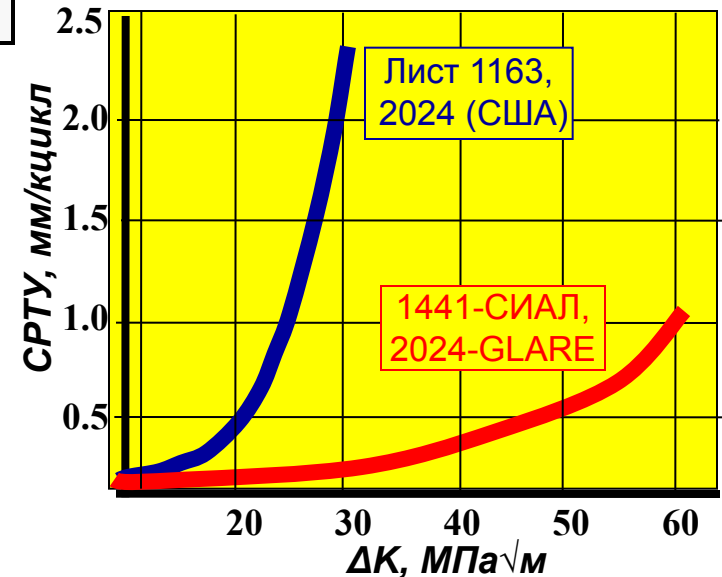
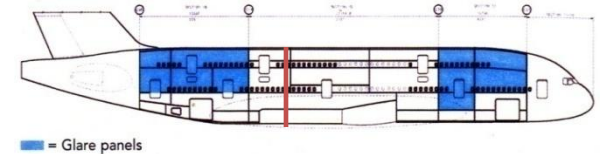
- снижение веса на 20-30 %
- увеличение ресурса в 2-3 раза

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТЕХНИКИ

Исследование пожаростойкости для внутренних перегородок планера

Испытания конструктивных элементов (фрагмента обшивочной панели)

**Применение GLARE в А-380
(снижение веса планера на 500 кг)**

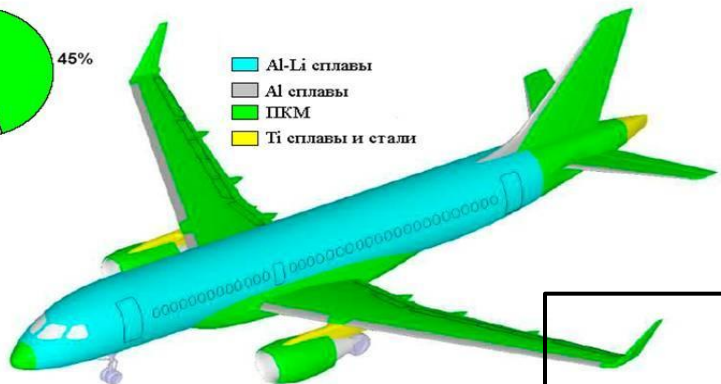
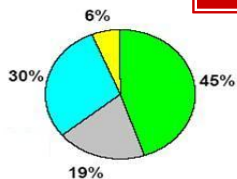


В рамках ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002 - 2010 годы и на период до 2015 года», предусмотрена реализация мероприятий НИР по исследованию пожаростойкости листовых заготовок сверхлегкого СИАЛ на базе сплава 1441 в зависимости от типа структуры, разработка технологии изготовления конструктивных элементов, имитирующих фрагмент обшивочной панели со стрингерами, испытания и установление закономерности появления и развития усталостной трещины для повышения надежности авиационных конструкций.



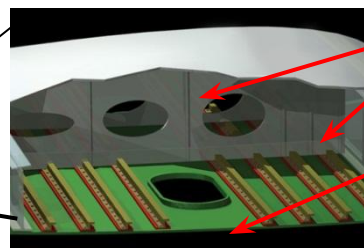
Высокопрочный Al-Li сплав В-1469

Применение алюминий-литиевых сплавов в перспективных ближне-среднемагистральных самолетах CSeries компании Bombardier



■ Al-Li сплавы
■ Al сплавы
■ ПКМ
■ Тi сплавы и стали

**Обшивка и силовой набор из Al-Li сплава 2198 (российский аналог – В-1469)
Фюзеляж – сварной, крыло - клепаное**



Верхняя обшивка крыла и нервюры - ПКМ

Нижняя обшивка крыла – сплав 2198

Сравнительные свойства листов

Сплав	ρ , г/см ³	E, ГПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	СРТУ, dI/dN, мм/цикл $\Delta K=28 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (ДП)	МКК, мм	РСК, баллы	$\sigma_{кр}$, МПа (П)
В-1469	2,67	78	520/500	470/440	13/15	1,7	0,07-0,14	3	400 (45 сут.)
2198	2,7	76	500/480	440/430	8/9	1,8	-	-	240 (30 сут.)

В числителе – направление Д; знаменателе – П

В рамках ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002 - 2010 годы и на период до 2015 года», предусмотрена реализация мероприятий НИР по исследованию влияния температурно-временных режимов гомогенизации, прокатки и термической обработки на формирование структурно-фазового состояния и разработка технологии изготовления холоднокатаных неплакированных листов (толщиной 1-3 мм) из алюминий-литиевого сплава В-1469 с повышенными трещиностойкостью ($K_{Ic}^y=130 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ при $B=750 \text{ мм}$) и пластичностью $\delta \geq 8 \%$ применительно к элементам обшивки фюзеляжа.

Естественные композиционные материалы на основе титана с регламентированной β структурой (лаб. 8)

- Задачи:

- Создание естественных композиционных материалов на основе титана с регламентированной β структурой за счет выделений дисперсных частиц металлидных соединений (TiB, MoSi, TiC и др.), обладающих высокими прочностью при комнатной и рабочей температурах ($\sigma_{В}^{20}=1600$ МПа, $\sigma_{В}^{350}=1100$ МПа) и технологичностью для изготовления сложнопрофильных полуфабрикатов



ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЙ ТИТАНОВЫЙ ПСЕВДО- β -СПЛАВ ВТ32

ДЛЯ ЛИСТОВЫХ, ШТАМПОСВАРНЫХ И СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПЛАНЕРА

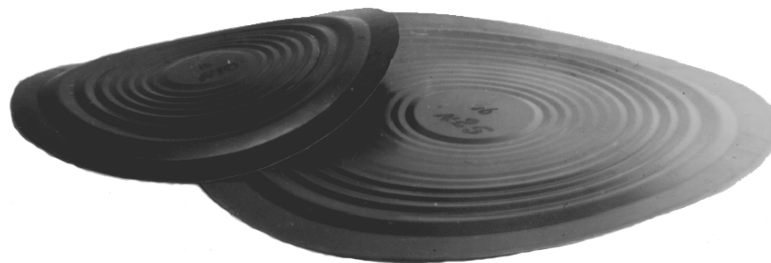
С Траб $\leq 350^{\circ}\text{C}$

Типичные свойства сплавов / лист /

Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_{100}^{350} , МПа
ВТ32	1200-1300	1160-1230	5-9	960



тарельчатые пружины



сотовый наполнитель

Свойства сплавов при холодной листовой штамповке

Сплав	σ_B , МПа	δ , %	Вытяжка $K_{\text{выт}}$	Отбортовка, $K_{\text{отб}}$	Гибка, r_{min}
ВТ32	800-900	16-20	1,75-1,9	1,6-1,75	(2,3-2,6)t

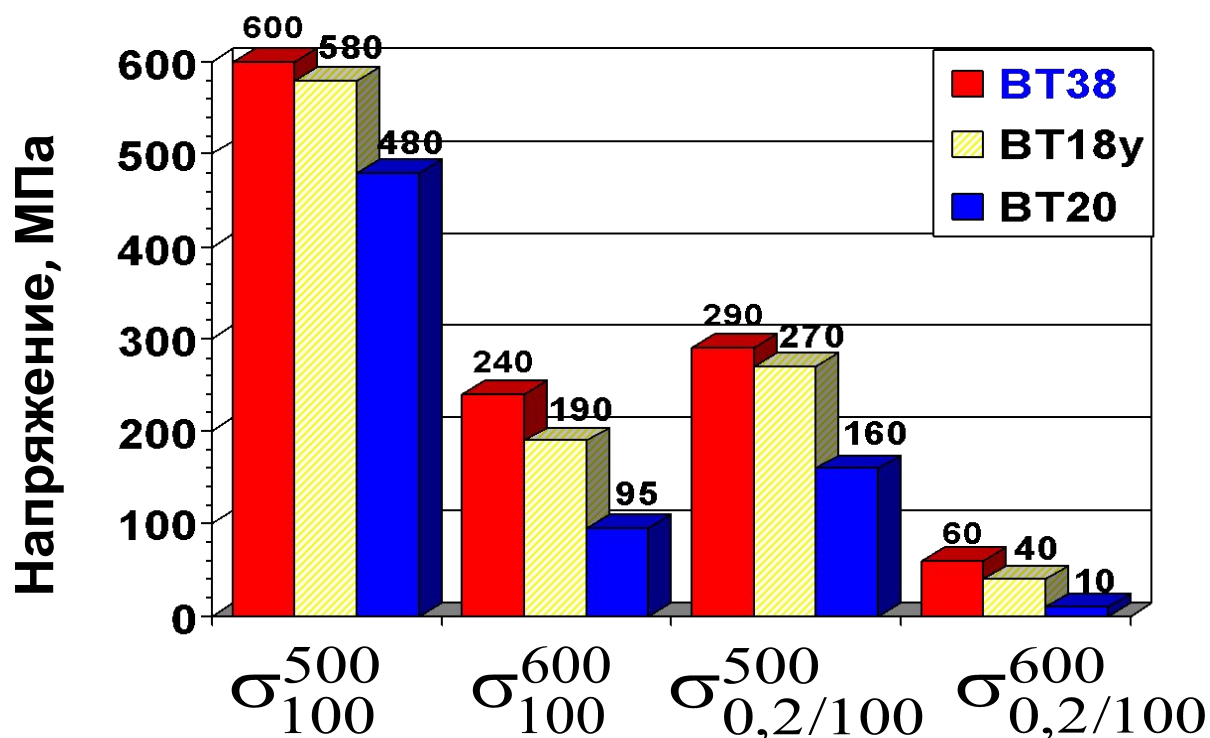




КОНСТРУКЦИОННЫЙ ЛИСТОВОЙ ТИТАНОВЫЙ ПСЕВДО- α СПЛАВ ВТ38 ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРИМЕНЕНИЯ для обшивки ракет и космических аппаратов, РАБОТАЮЩЕЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 600°C

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При температурах 500 и 600 °С



Сплав ВТ38 при
температуре 20 °С

Предел прочности:
 $\sigma_B^{20}=970$ МПа;

Относительное удлинение:
 $\delta_5=8\%$;

Малоцикловая усталость
($N=2 \cdot 10^5$ ц.) при $K_t=2,6$:
 $МЦУ^{20}=350$ МПа

Эффективность применения

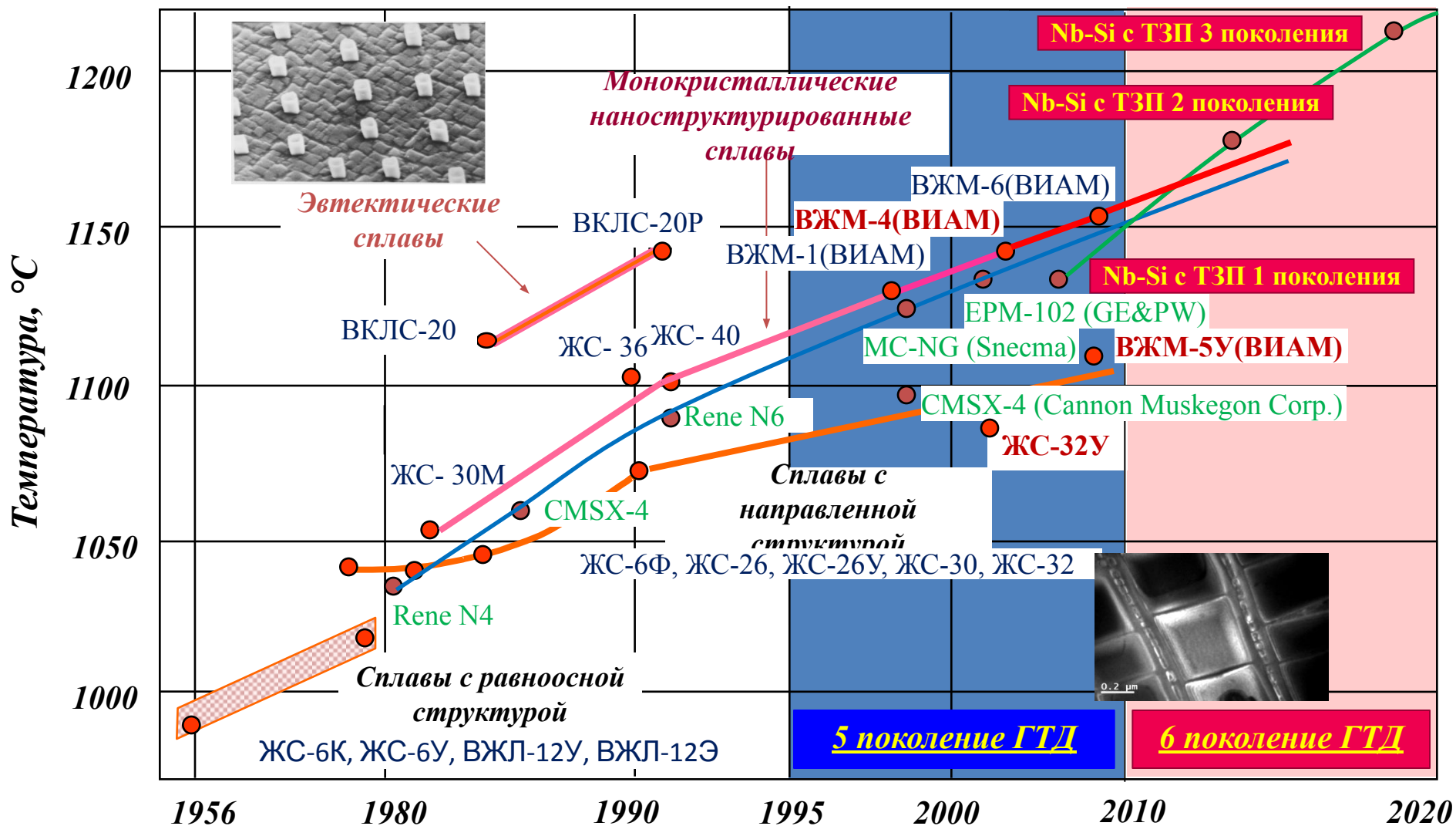
- Сплав обладает высокими характеристиками длительной прочности и сопротивлением ползучести;
- Поставляется в виде листов толщиной (0,6-3,0) мм.

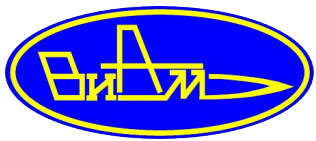


Динамика развития литейных жаропрочных сплавов

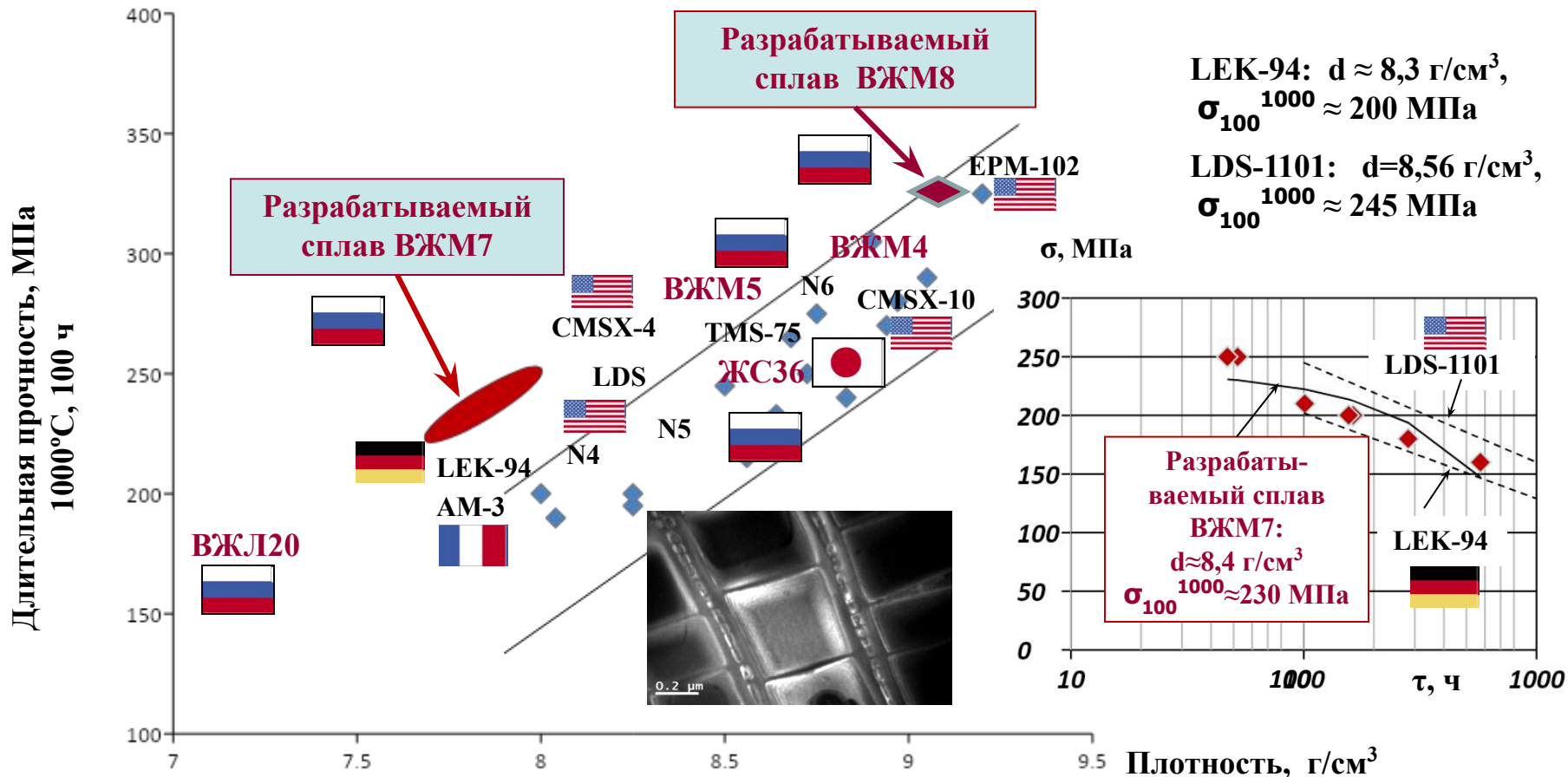
Температурный уровень работоспособности литейных жаропрочных сплавов за последние 40 лет вырос на 400°C (в среднем 6,7 °C в год).

В перспективе до 2030 года переход от никелевых сплавов к сплавам системы ниобий-кремний может повысить рабочую температуру еще на 150-200°C.





Развитие монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов



Развитие монокристаллических жаропрочных сплавов I, II, III и IV поколений сопровождалось одновременным увеличением длительной прочности и плотности за счет легирования тяжелыми тугоплавкими элементами. В настоящее время целью является увеличение длительной прочности без повышения плотности сплава.

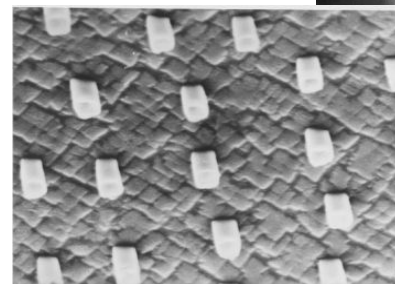
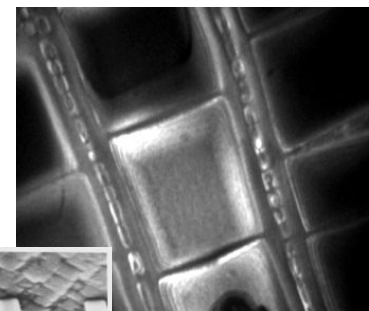
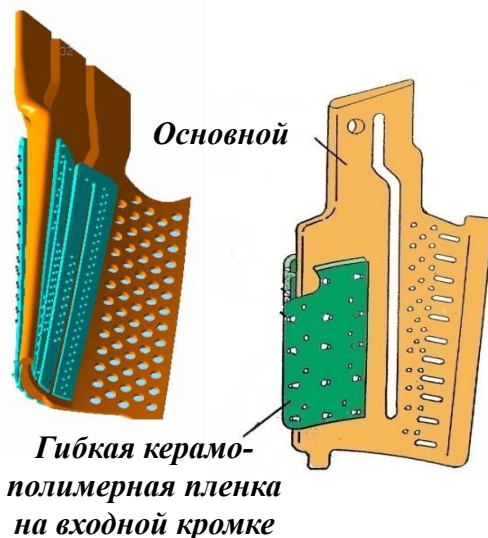
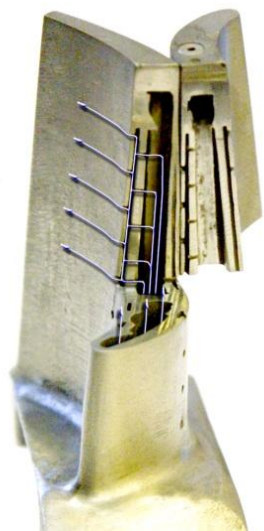


Развитие монокристаллических жаропрочных суперсплавов и создание естественных композитов

Создание новых технологий изготовления лопаток ГТД с высокоэффективным охлаждением, включая керамические формы и стержни для лопаток из новых перспективных сплавов

Задачи:

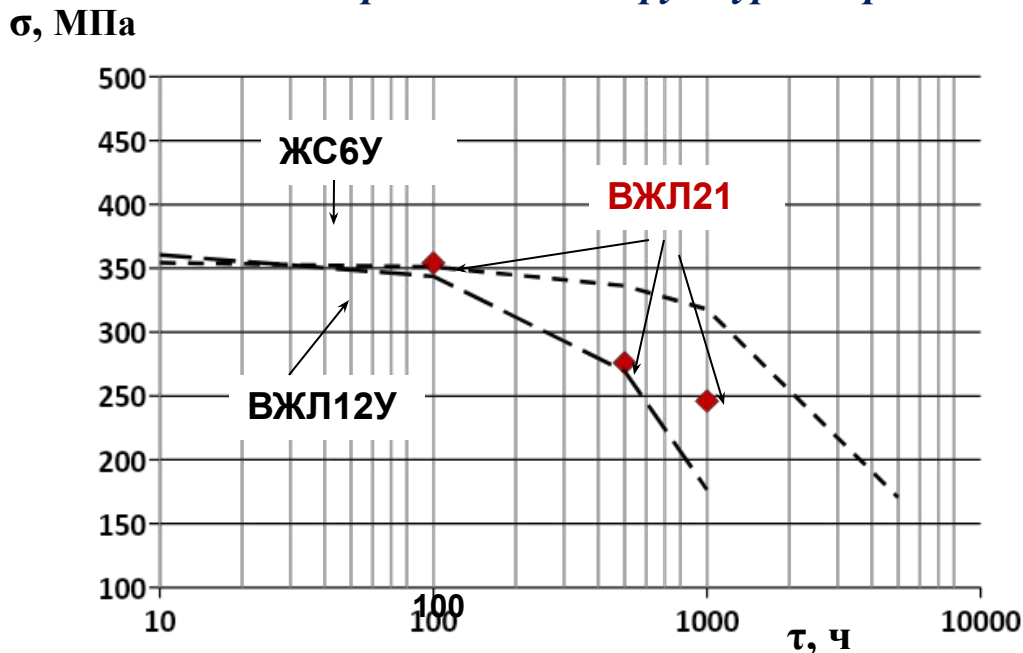
- 2020 г. Создание нового поколения никелевых жаропрочных монокристаллических сплавов с рабочей температурой до **1200 °С**, а также поли- и монокристаллических жаропрочных сплавов с повышенной удельной жаропрочностью
- 2030 г. Создание нового поколения эвтектических сплавов, направленно кристаллизующихся при скоростях не менее **0,5 мм/мин (в 5-10 раз выше существующих)**
 - Создание направленно кристаллизующихся жаропрочных сплавов с естественно-композиционной структурой на основе никелевых рений-рутениевых матриц, упрочненных карбидными нитевидными кристаллами, с рабочей температурой до **1250 °С**





Литейные поликристаллические жаропрочные никелевые сплавы

Длительная прочность литейных жаропрочных сплавов с равноосной структурой зёрен

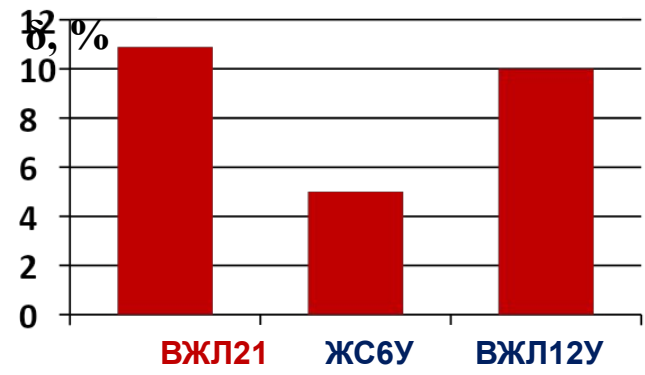
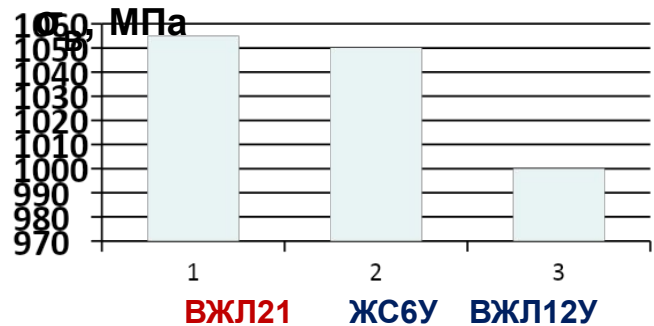
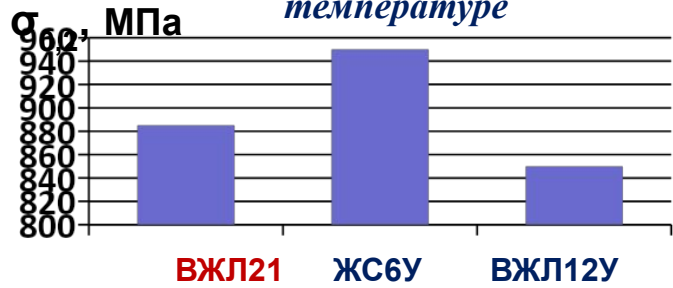


Разрабатываемый сплав ВЖЛ21: $d=8,2$ г/см³,
 $\sigma_{100}^{900} = 350$ МПа

ЖС6У: $d=8,4$ г/см³,
 $\sigma_{100}^{900} = 355$ МПа

ВЖЛ12У: $d=7,93$ г/см³,
 $\sigma_{100}^{900} = 300$ МПа

Кратковременные механические свойства при комнатной температуре



Применение сплава ВЖЛ21: сопловые лопатки турбины, створки, проставки и другие литые детали соплового аппарата и камеры сгорания



Развитие литейных сплавов на основе интерметаллидов никеля

Литейные сплавы ВКНА/ВИН

