

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Кафедра “Авиатопливообеспечение и ремонт летательных аппаратов”

Ю.Н.Макин, В.П.Фролов, О.Ю.Макина

Ремонт летательных аппаратов и авиационных двигателей

Пособие к практическим занятиям  
Для студентов специальностей 160900 и 160901  
Всех форм обучения

Москва - 2008

ББК  
М

Печатается по решению редакционно-издательского совета Московского государственного технического университета ГА

Рецензент: доцент А.Н.Ерошкин

Макин Ю.Н. Ремонт летательных аппаратов и авиационных двигателей. Пособие к практическим занятиям. Для студентов специальностей 160900 и 160901. Всех форм обучения.- М.: МГТУ ГА, 2008.- с.

ISBN .....

Пособие к практическим занятиям по дисциплине “Ремонт летательных аппаратов и авиационных двигателей” отражает содержание соответствующих разделов учебных программ по подготовке инженеров по специальности 160901 всех форм обучения и магистров по специальности 160900. Оно может быть полезно как справочно-вспомогательный материал для аспирантов, обучающихся по специальности 05.22.14 – эксплуатация воздушного транспорта, и соискателей ученых степеней.

В нем в сжатой, конспективной форме показаны современные методы инженерных расчетов и построения математических моделей, раскрывающих суть изучаемых технологических процессов ремонта авиационной техники.

## Оглавление

	Стр.
Принятые обозначения.....	3
Введение.....	4
1. Практическое занятие по теме: Проблема выбора материалов-заменителей при ремонте и восстановлении изделий авиационной и космической техники.....	5
2. Практическое занятие по теме: Изучение химического состава и механических свойств алюминиевых сплавов – аналогов по данным «Международного транслятора современных сталей и сплавов», как возможный путь к решению международных задач по замене материалов в изделиях авиакосмической техники.....	7
3. Практическое занятие по теме: Сравнение эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов Д16 и В95 по комплексным критериям А. В. Орлова, М. Т. Губерта и С. Н. Боброва в широком диапазоне температур.....	13
4. Практическое занятие по теме: Выбор материала для решетчатого крыла.....	14
5. Практическое занятие по теме: Выбор материала – заменителя титанового сплава Вт 16.....	19
6. Практическое занятие по теме: .....	24
7. Практическое занятие по теме: Просмотр документального телевизионного фильма о беседе журналистов с дочерью погибшего летчика – космонавта дважды героя Советского Союза Комарова Владимира Михайловича. ....	28
8. Практическое занятие по теме: «Анализ достоинств метода комплексной механизации работ при ремонте корпуса камеры сгорания ГТД».....	29
Литература .....	33

## Введение

Важнейшей целью изучения дисциплины «Ремонт летательных аппаратов и авиационных двигателей» является формирование знаний и умений, позволяющих научно обосновано решать задачи по ремонту и восстановлению изделий авиационной техники с использованием достижений науки в области технологии и производства в части их формализации, математического моделирования, инженерных расчетов и применения математических методов при проектировании процессов ремонта АТ.

Огромный выбор конструкционных материалов и возникновение в эксплуатации ситуаций, когда нет возможности получить материал заданный в конструкторско-технологической документации, ставят проблему научно обоснованного выбора материалов заменителей. Для этих целей разработаны комплексные критерии эффективности. Над данной проблемой работали Н.В.Гевелинг, Фролов В.П., Б.Стевердинг, А.В.Орлов, В.В.Сыроегин, С.Н.Бобров и другие ученые. Ими были выработаны критерии для оценки адекватности пазличных материалов, например:

### Критерий Н.В.Гевелинга, 1934 г.

$$A = \sigma_{0,2} E \sigma_{-1} / \gamma ;$$

Где:  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести;  $E$  – модуль упругости;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости;  $\gamma$  - плотность материала.

### Критерий Б.Стевердинга, 1963 г.

$$F = [(\sigma_{0,2} / \gamma)^\alpha a \sqrt[3]{E}] / k^{1/3} T_{xp}^{\alpha + 4/3} \Delta^{\alpha + 1} \gamma ;$$

Где:  $a$  – ударная вязкость;  $k$  – константа Больцмана;  $T_{xp}$  – температура хрупкого разрушения;  $\Delta$  - уменьшение прочности при повышении температуры;  $\alpha$  - произвольное положительное число.

### Критерий В.П.Фролова, 1968 г.

$$\Phi = 10^{-6} \int_{T_0}^{T_p} \exp(2 * 10^{-3} T - 1,1) d T / \gamma \int_{T_0}^{T_p} [(D_n / \sqrt[3]{E^T}) + (D_B / f_T^{-1} \sigma_B^T)] d T ;$$

Где:  $T_0$  и  $T_p$  – начальная и расчетная максимальная температура;

$T$  – текущая температура;

$D_n$  и  $D_B$  – коэффициенты;

$f_T$  – коэффициент безопасности;

В данном пособии показаны некоторые практические способы применения критериев адекватности при выборе материалов-заменителей.

## **1. Практическое занятие по теме: Проблема выбора материалов-заменителей при ремонте и восстановлении изделий авиационной и космической техники**

Целью занятия является принятие решения о возможности применения для восстановления поврежденной обшивки самолетов ГА, выполненной из алюминиевого сплава Д16Т, сплава Д19Т – в качестве материала – заменителя.

В связи со сложившейся экономической обстановкой за последние 15 лет в авиаремонтном производстве, с резким снижением взаимодействия поставщиков сырья с заводами – производителями, а так же в связи с общей тенденцией старения парка ВС ГА и роста стоимости его ТО и Р, возникла проблема качественного и быстрого восстановления поврежденной АТ в ГА.

Одним из наиболее применяемых методов решения этой проблемы может стать применение материалов – заменителей при ремонте ВС ГА.

Примером подобных работ может стать замена Д16Т на Д19Т при ремонте обшивки ВС ГА.

Возможность такой работы основана на научных трудах Фролова В. П., а так же на подтвержденных опытных испытаниях образцов по 3 критериям оценки: Критерий Орлова; критерий Губера; Критерий Боброва.

Исследование этих работ показало однозначную целесообразность такой замены, что показано на графике (см. приложение 1). По всем критериям материал Д19Т выгоднее в применении. Так же он дешевле, что дает экономический эффект подобной замены.

Таким образом, применение материала – заменителя Д19Т при ремонте обшивки ВС ГА не только целесообразно, но и необходимо стратегически, для накопления опыта с возможным дальнейшим переносом технологии в ВВС РФ.

При выполнении задания:

1. Необходимо учесть возможные условия эксплуатации поврежденных участков обшивки ЛА по температуре: от 213°К до 523° К (т.е. от – 60° до + 250°С).

2. Рекомендуется в расчетах использовать комплексные критерии А.В. Орлова, М.Т. Губера и С.Н. Боброва.

3. Исходные экспериментальные данные о свойствах сплавов Д16АТ и Д19Т заимствовать из раздаточных таблиц.

Критерии:

- 1). Губера М. Т.

$$U_{\Phi}^T = ((1 + \mu) / 3E) \cdot \sigma_{0,2}^2$$

2). Боброва С. Н.

$$K_{\text{изм}}^T = \sigma_{\text{в}}^T \psi^T$$

3). Орлова А. В.

$$R_T = (\sigma_{0,2} / E) \cdot (\lambda / \alpha) \cdot ((1 - \mu) / (1 - \mu))$$

Где:  $(\sigma_{0,2})$  – предел текучести;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  –  $\sigma_{\text{в}}^T$  –  $\psi^T$  –  $\lambda$  –  $\alpha$  –

### Содержание отчета

Данные: Диапазон рабочих температур сплава Д16Т по условиям эксплуатации составляет 213°К ... 523°К (- 60°С ... + 250°С).

Выполнение: Для выработки рекомендаций о возможности применения материала – заменителя комплексными критериями оценки эксплуатационных свойств КМ:

1). Критерий Орлова:

$R_T = (\sigma_{0,2} \cdot \lambda(T) \cdot [1 - \mu(T)]) / (E(T) \cdot \alpha(T) \cdot [1 - \psi(T)])$  – Критерий тепловой прочности;

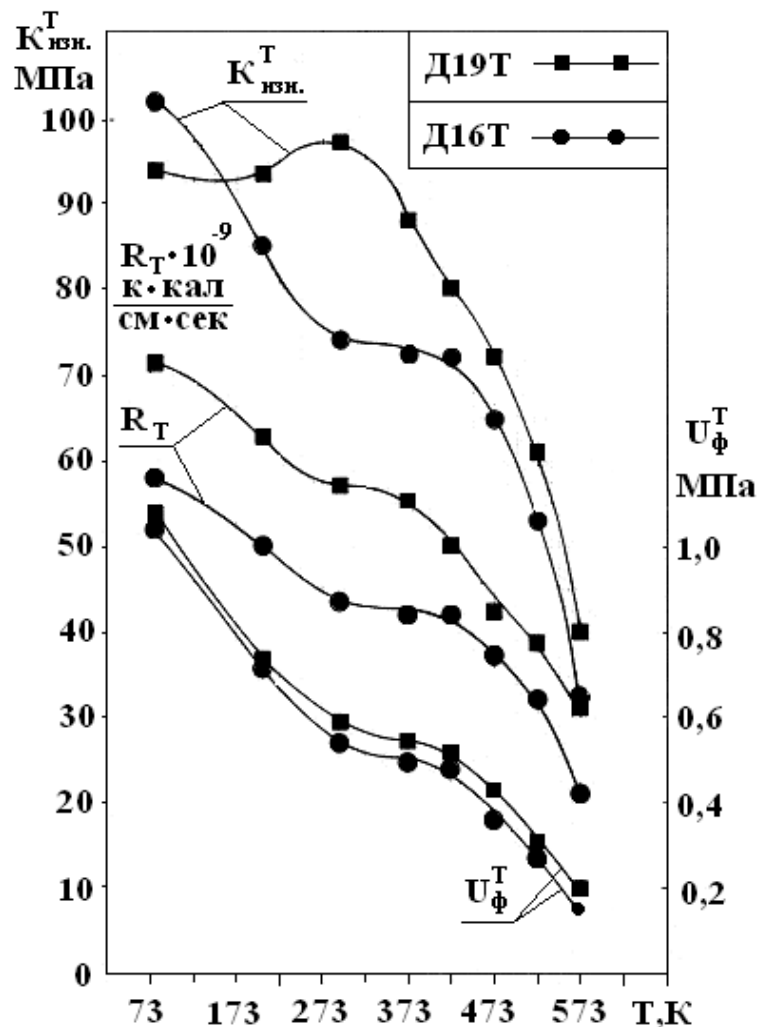
2). Критерий Губера М. Т.:

$U_{\text{пот}}^T = ((1 + \mu(T)) / 3E(T)) \cdot \sigma_{0,2}^2(T)$  – Критерий предельного значения формоизменения;

3). Критерий Боброва С. Н.

$K_{\text{изм}}^T = \sigma_{\text{в}}(T) \cdot \psi(T)$  – Критерий износостойкости.

### Приложение 1



## **2. Практическое занятие по теме: Изучение химического состава и механических свойств алюминиевых сплавов – аналогов по данным «Международного транслятора современных сталей и сплавов», как возможный путь к решению международных задач по замене материалов в изделиях авиакосмической техники**

В отечественном издании вышел "Международный транслятор современных сталей и сплавов" (далее - "Транслятор") [Международный транслятор современных сталей и сплавов. Россия, США, европейские страны, Япония. Т.3, под ред. проф. В.Я. Кершенбаума, М., Международная инженерная энциклопедия. Центр "Наука и техника", Союз научных и инженерных обществ. 1993, 577 с.].

*Применение международного транслятора современных сталей и сплавов – путь к решению международных задач по замене материалов в изделиях авиакосмической техники.*

Основное назначение "Транслятора" - оказать помощь инженерам разных стран в установлении общего профессионального языка, что облегчит совместную работу специалистов, позволит выполнять заказы зарубежных фирм, осваивать зарубежную технику, решать не только локальные задачи, например по ремонту с применением пайки, но и глобальные интернациональные, требующие усилий специалистов разных стран.

В качестве примера использования "Транслятора" выбраны деформируемые алюминиевые сплавы (глава I «Алюминий и алюминиевые сплавы»). В качестве аналогов гостированным отечественным сплавам подбирались сплавы по стандартам США, Германии и Японии. Это сплавы АДО, АМц, АМд1, Д16, Д19 и В95. В табл. 1 представлены названия и обозначения соответствующих сплавов в указанных странах. Сплав Д19 не имеет аналогов в зарубежных странах по данным "Транслятора".

Для подтверждения правомерности взаимозаменяемости этих сплавов приведены химические составы указанных сплавов (табл. 2, 4, 6, 8, 10) и их механические свойства (табл. 3, 5, 7, 9, 11) [Конструкционные материалы: Энциклопедия современной техники. Гл. ред. А.Т. Туманов. Т.1. - М., Госнаучиздат. "Советская энциклопедия", 1963, 416 с.]

По данным "Транслятора" химические составы аналогичных сплавов и приведенные механические свойства близки по своему значению.

Это дает основание специалистам-пользователям сделать соответствующие замены аналогичными сплавами.

Впервые указанные возможности приведены в докладе (авторы: д.т.н. Фролов В.П. и к.т.н. Маркова И.Ю.) на семинаре в Центральном Российском Доме Знаний 13 апреля 2000г. [В сб. материалов семинара:

Стандартизация, сертификация и обеспечение единства измерений в области пайки.- М.: ЦРДЗ, 2000 г. – с. 3 – 8.]

Отчет должен содержать конспект уникальных сведений по алюминиевым сплавам – аналогам России, США, Германии и Японии.

Таблица 1

*Деформируемые алюминиевые сплавы*

Марка сплава в России и название норматива	Соответствующие марки сплава и название норматива		
	США	Германия	Япония
АДО (1011) ГОСТ 4784	AA 1050 ANSI H 35.2	Al 99,5 (3.0255) DIN 1712	1050 JIS H4000
АМц (1400) ГОСТ 4784	AA3003 ANSI H35.2	Al Mn (3.0515) DIN 1725	3003 JIS H4000
Амд 1 (1510) ГОСТ 4784	AA 5005 ANSI H35.2	Al Mg1 (3.3315) DIN 1725	5005 JIS H4000
Д16Т (1160) ГОСТ 4784	AA 2024 ANSI H35.2	Al CuMg2 (3.1359) DIN 1725	2024 JIS H4000
Д19Т (1190) ОСТ 190048	-	-	-
В95 (1950) ГОСТ 4784	AA7075 ANSI H35.2	Al ZnMgCu 1,5 (3.4365) DIN 1725	7075 JIS H4000

Таблица 2

Химический состав сплава АДО и аналогичных ему деформируемых алюминиевых сплавов

Страна, марка сплава, стандарт	Массовая доля элементов, %							
	Си	Mg	Mn'	Fe	Si	Zn	Ti	Прочие
Россия АДО (1011) ГОСТ 4784	0,02	0,03	0,025	0,3	0,3	0,07	0,05	0,5
США AA 1050 ANSI H35.2	0,05	0,05	0,05	0,4	0,25	0,05	0,03	0,5
Германия Al 99,5 DIN 1712	0,05	-	0,03	0,4	0,3	0,07	0,05	0,5
Япония 1050 JIS H4000	0,05	0,05	0,05	0,4	0,25	0,05	0,03	0,5



Таблица 3

**Механические характеристики сплава АДО и аналогичных ему  
алюминиевых деформируемых сплавов**

Страна, марка сплава, стандарт	Механические свойства листовых материалов		
	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительно е удлинение, %
Россия АДО ГОСТ 21631	80	30	35
США AA1060 ASTM B-209	55 – 05	15	25
Германия Al 99,9 (3.0305) DIN 1745	70	60	30
Япония 1080 JIS H4000	55 – 95	15	35

Таблица 4

**Химический состав сплава АМц и аналогичных ему деформируемых  
алюминиевых сплавов**

Страна, марка сплава, стандарт	Массовая доля элементов, %								
	Cu	Mg	Mn'	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Прочие
Россия АМц ГОСТ 4784	0,1	0,2	1,0- 1,6	0,7	0,6	0,10	0,20	-	0,1
США AA 3003 ANSI H35.2	0,05- 0,20	-	1,0- 1,5	0,7	0,6	0,10	-	-	0,15
Германия Al Mn (3.0515) DIN 1745	0,10	0,30	0,9- 1,4	0,6	0,5	0,20	0,10	0,30	0,15
Япония 3003 JIS H4000	0,05- 0,20	-	1,0- 1,5	0,7	0,6	0,1	-	-	0,15

Таблица 5

**Механические характеристики сплава АМц и аналогичных ему  
алюминиевых деформируемых сплавов**

Страна, марка сплава, стандарт	Механические свойства листовых материалов		
	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Россия Амц (1400) ГОСТ 21631	130	50	23
США AA3003 ASTM B-209	95 - 130	35	25
Германия Al Mn (3.0515) DIN 1745	100	40	21
Япония 3003 JIS H4000	95 - 130	35	25

Таблица 6

Химический состав сплава АМg1 и аналогичных ему деформируемых  
алюминиевых сплавов

Страна, марка сплава, стандарт	Массовая доля элементов, %								
	Cu	Mg	Mn'	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Прочие
Россия АМg (1510) ГОСТ 4784	0,10	0,7 - 1,6	0,20	0,10	0,30	0,25	-	-	0,15
США AA 5005 ANSI H35.2	0,20	0,5 - 1,1	0,20	0,70	0,1	-	-	-	0,10
Германия Al Mg1 (3.3315) DIN 1725	0,05	0,8 - 1,2	0,20	0,40	0,30	0,20	0,10	-	0,15
Япония 5005 JIS H4000	0,20	0,5 - 1,1	0,20	0,70	0,30	0,20	0,10	-	0,15

Таблица 7

Механические характеристики сплава АМg1 и аналогичных ему  
алюминиевых деформируемых сплавов

Страна, марка сплава, стандарт	Механические свойства листовых материалов		
	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Россия АМg (1510) ГОСТ 4784 [	120	50	27
США AA 5005 ASTM B-209	105 - 145	35	21
Германия Al Mg1 (3.3315) DIN 1745	100	40	20
Япония 5005 JIS H4000	110 - 145	35	21

Таблица 8

**Химический состав сплава Д16 и аналогичных ему деформируемых  
алюминиевых сплавов**

Страна, марка сплава стандарт	<i>Массовая доля элементов, %</i>								
	Cu	Mg	Mn'	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Прочие
Россия Д16 (1160) ГОСТ 4784	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,5	0,5	0,3	0,10	-	0,1
Россия Д19Т (1190) ОСТ 190048	3,8-4,3	1,7-2,3	0,5-1,0	0,5	0,5	0,1	0,02	0,0001-0,005	0,1
США АА 2024 ANSI H35.2	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,5	0,5	0,25	0,15	0,10	0,15
Германия Al CuMg2 (3.1355) DIN 1725	4,0-4,8	1,2-1,8	0,3-0,9	0,4	0,4	0,25	0,2	0,1	0,2
Япония 2024 JIS H4000	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,5	0,5	0,25	0,15	0,1	0,15

Таблица 9

**Механические характеристики сплава Д16Т и  
аналогичных ему алюминиевых деформируемых сплавов**

Страна, марка сплава, стандарт	<i>Механические свойства листовых материалов</i>		
	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Россия Д16Т (1160) ГОСТ 2163	440	300	16
Россия Д19Т (1190) ОСТ 190048	440	300	18
США АА 2024 ASTM B-209	≤ 220	≤ 95	12
Япония 2024 JIS H4000	≤ 220	≤ 110	10

Таблица 10

**Химический состав сплава В95 и аналогичных ему деформируемых  
алюминиевых сплавов**

Страна, марка сплава, стандарт	Массовая доля элементов, %								
	Cu	Mg	Mn'	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Проч.
Россия В95 (1950) ГОСТ 4784	1,4-2,0	1,8-2,8	0,2-0,6	0,5	0,5	5,0-7,0	0,05	0,10 - 0,25	0,10
США AA 7075 ANSI H35.2	1,2-2,0	2,1-2,9	0,3	0,5	0,4	5,1-6,1	0,2	0,18 - 0,28	0,15
Германия Al ZnMgCu1,5 (3.4365) DIN 1725	1,2-2,0	2,1-2,9	0,3	0,7	0,5	5,1-6,1	0,2	0,18 -0,3	0,15
Япония 7075 JIS H4000	1,2-2,0	2,1-2,9	0,3	0,5	0,4	5,1-6,1	0,2	0,18 - 0,28	0,15

Таблица 11

**Механические характеристики сплава В95 и  
аналогичных ему алюминиевых деформируемых сплавов**

Страна, марка сплава, стандарт	Механические свойства листовых материалов		
	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Россия В95Т (1950) ГОСТ 21631	535	468	12
США AA 7075 ASTM B-209	≤ 275	≤ 145	10
Япония JIS H4000	≤ 275	≤ 145	10

### **3. Практическое занятие по теме: Сравнение эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов Д16 и В95 по комплексным критериям А. В. Орлова, М. Т. Губерта и С. Н. Боброва в широком диапазоне температур**

Цель: Выявление предельной температуры нагрева обшивки ЛА, при которой алюминиевый сплав В95 может еще использоваться в качестве материала – заменителя при восстановлении поврежденной обшивки из сплава Д16.

#### Примечания.

1. Использовать сведения об эксплуатационных свойствах сплава Д16 в функции температуры, полученные на практическом занятии № 1.
2. Исходные экспериментальные данные о свойствах сплава В95 заимствовать из таблиц, имеющих на кафедре РЛА и АД МГТУ ГА.

#### 4. Практическое занятие по теме: Выбор материала для решетчатого крыла

##### Ситуация

Конструкторское бюро № 000 сделало запрос двум авторитетным промышленным предприятиям, успешно применяющим в своих изделиях жаропрочные никелевые сплавы, о том, какую марку из листовых никелевых сплавов следует применить в конструкции решетчатого крыла, если ожидаемый диапазон эксплуатационных температур крыла составляет от 293 до 1473 К.

Существенно важно, подчеркивалось в указанном запросе, чтобы рекомендуемый для этой цели сплав имел температуру начала плавления (солидус) при нагреве не ниже 1580 К, а значения прочности и пластичности такого сплава в области высоких температур нагрева были бы максимальными из числа имеющихся в вашем предприятии сплавов.

К намеченному сроку оба предприятия сообщили в КБ № 000 свои рекомендации: одно указало сплав марки ЭИ 602, другое – сплав марки ЭИ 868.

В течение полугода КБ № 000 теоретически и экспериментально исследовало оба рекомендованных сплава, проводя сравнительный анализ их служебных качеств. В итоге для проектируемой конструкции крыла из этих двух сплавов была выбрана наиболее достойная марка материала.

##### Задание

Используя известные критерии оценки эксплуатационных свойств сплавов ( $R^T$ ,  $U^T_{\text{Ф}}$ ,  $K^T_{\text{изм}}$ ) рассчитать их значения в функции температуры  $T$  (в Кельвинах) и представить для этих двух марок сплавов графически.

Исходные справочные данные в таблицах 1 – 2 – 3.

Результаты расчетов указать в таблицах 4 – 5 – 6 – 7. Дать заключение о выбранной марке из двух сплавов для применения в конструкции крыла.

Таблица 12.

Химический состав никелевых сплавов  
ХН75МБТЮ (ЭИ602) и ХН60ВТ (ЭИ868).

Химический элемент	Концентрация элементов в % по массе	
	ХН75МБТЮ (ЭИ602)	ХН60ВТ (ЭИ868)
Хром	19 – 22	23,5 – 26,5
Молибден	1,8 – 2,3	-
Ниобий	0,9 – 1,3	-
Вольфрам	-	13 – 16
Титан	0,35 – 0,75	0,3 – 0,7
Алюминий	0,35 – 0,75	≤ 0,5
Железо	≤ 3,0	≤ 4,0
Марганец	≤ 0,4	≤ 0,5
Кремний	≤ 0,8	≤ 0,8
Углерод	≤ 0,1	≤ 0,1
Сера	≤ 0,012	≤ 0,013
Фосфор	≤ 0,020	≤ 0,013

<i>Никель</i>	<i>Остальное</i>	<i>Остальное</i>
<b>T<sub>пл</sub> сплавов, К</b>	<b>1587</b>	<b>1615</b>

Таблица 13.

## Механические и физические свойства сплава ЭИ602

t	T	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$E \times 10^{-3}$	$\psi$	$\mu$	$\lambda$	$\alpha$
°C	К	МПа	МПа	МПа	%	-	Вт/(м·К)	$10^6 \cdot [1/К]$
-273	0	-	-	-	-	0,243	-	-
20	293	860	400	190	37	0,250	13,4	12,4
100	373	835	375	178	37	0,253	13,45	12,4
200	473	810	350	170	36	0,259	15,3	13,4
300	573	790	337	166	36	0,267	16,7	14,2
400	673	770	320	165	37	0,276	18,5	15,0
500	773	750	320	163	40	0,286	20,2	15,8
600	873	670	300	150	38	0,298	22,3	16,5
700	973	560	270	137	40	0,311	24,4	18,1
800	1073	297	150	100	40	0,326	26,8	19,0
900	1173	177	53	80	72	0,342	29,3	19,6
1000	1273	95	33,5	58	75	0,360	31,8	20,8
1100	1373	47	20	44	80	0,379	34,0	21,6
1200	1473	37	10	33	85	0,400	36,5	22,4

Таблица 14.

## Механические и физические свойства сплава ЭИ868

t	T	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$E \times 10^{-3}$	$\psi$	$\mu$	$\lambda$	$\alpha$
°C	К	МПа	МПа	МПа	%	-	Вт/(м·К)	$10^6 \cdot [1/К]$
-273	0	-	-	-	-	0,244	-	-
20	293	800	320	190	52	0,250	9,6	12,7
100	373	780	300	180	52	0,253	10,5	12,7
200	473	760	288	178	53	0,259	11,7	13,2
300	573	730	275	172	53	0,267	13,8	13,6
400	673	700	259	162	54	0,276	16,3	14,1
500	773	670	250	147	55	0,286	18,8	14,5
600	873	620	246	141	56	0,297	21,3	15,1
700	973	530	230	130	58	0,310	23,4	15,6
800	1073	400	210	112	60	0,325	25,5	16,0
900	1173	230	120	81	60	0,340	28,0	16,2
1000	1273	140	65	50	60	0,358	30,0	16,8
1100	1373	85	50	45	68	0,376	32,0	19,0
1200	1473	43	37	40	75	0,396	31,0	22,0

Таблица 15

Результаты расчета значений критериев  $K_{изн}^T$  и  $U_{\Phi}^T$  для сплава ЭИ602

t	T	$\sigma_B$	$\psi$	$K_{изн}^T$	$\sigma_{0,2}$	$E \times 10^{-3}$	$\mu$	$U_{\Phi}^T$
°C	К	МПа	%	МПа	МПа	МПа	-	МПа
20	293	860	37	318,20	400	190	0,25	350,88
100	373	835	37	308,95	375	178	0,253	329,17
200	473	810	36	291,6	350	170	0,251	302,41
300	573	790	36	284,4	337	166	0,267	288,94

400	673	770	37	284,9	320	165	0,276	263,96
500	773	750	40	300	320	163	0,286	269,3
600	873	670	38	254,6	300	150	0,298	259,6
700	973	560	40	224	270	137	0,311	232,5
800	1073	297	40	118,8	150	100	0,326	99,45
900	1173	177	72	127,44	53	80	0,342	15,7
1000	1273	95	75	71,25	33,5	58	0,36	8,77
1100	1373	47	80	37,6	20	44	0,379	4,18
1200	1473	37	85	30,45	10	33	0,4	1,41

Таблица 16

Результаты расчета значений критериев  $K_{изн}^T$  и  $U_{\Phi}^T$  для сплава ЭИ868

t	T	$\sigma_B$	$\psi$	$K_{изн}^T$	$\sigma_{0,2}$	$E \times 10^{-3}$	$\mu$	$U_{\Phi}^T$
°C	K	МПа	%	МПа	МПа	МПа	-	МПа
20	293	800	52	416	320	190	0,25	0,225
100	373	780	52	405,6	300	180	0,253	0,209
200	473	760	53	402,8	288	178	0,259	0,195
300	573	730	53	386,9	275	172	0,267	0,186
400	673	700	54	378	259	162	0,276	0,176
500	773	670	55	368,5	250	147	0,286	0,182
600	873	620	56	347,2	246	141	0,297	0,185
700	973	530	58	307,4	230	130	0,31	0,178
800	1073	400	60	240	210	112	0,325	0,174
900	1173	230	60	138	120	81	0,34	0,079
1000	1273	140	60	84	65	50	0,358	0,038
1100	1373	85	68	57,8	50	45	0,376	0,025
1200	1473	43	75	32,25	37	40	0,396	0,016

Таблица 17

Результаты расчета значений критерия  $R^T$  для сплава ЭИ602

t	T	$\sigma_{0,2}$	$E \times 10^{-3}$	$\mu$	$\psi$	$\lambda$	$\alpha$	$R^T$
°C	K	МПа	МПа	-	%	Вт/(м·К)	$10^6 \cdot [1/K]$	[Вт/( $10^9 \cdot м$ )]
20	293	400	190	0,25	37	13,4	12,4	2,506
100	373	375	178	0,253	37	13,45	12,4	2,709
200	473	350	170	0,259	36	15,3	13,4	2,383
300	573	337	166	0,267	36	16,7	14,2	2,734
400	673	320	165	0,276	37	18,5	15	2,749
500	773	320	163	0,286	40	20,2	15,8	2,987
600	873	300	150	0,298	38	22,3	16,5	3,061
700	973	270	137	0,311	40	24,4	18,1	3,051
800	1073	150	100	0,326	40	26,8	19	2,377
900	1173	53	80	0,342	72	29,3	19,6	2,327
1000	1273	33,5	58	0,36	75	31,8	20,8	2,261
1100	1373	20	44	0,379	80	34	21,6	2,222
1200	1473	10	33	0,4	85	36,5	22,4	1,975



Таблица 18.

Результаты расчета значений критерия  $R^T$  для сплава ЭИ868

t	T	$\sigma_{0,2}$	$E \times 10^{-3}$	$\mu$	$\psi$	$\lambda$	$\alpha$	$R^T$
°С	К	МПа	МПа	-	%	Вт/(м·К)	$10^6 \cdot [1/К]$	$[Вт/(10^9 \cdot м)]$
20	293	320	190	0,250	52	9,6	12,7	$1,99 \cdot 10^{-3}$
100	373	300	180	0,253	52	10,5	12,7	$2,14 \cdot 10^{-3}$
200	473	288	178	0,259	53	11,7	13,2	$2,26 \cdot 10^{-3}$
300	573	275	172	0,267	53	13,8	13,6	$2,53 \cdot 10^{-3}$
400	673	259	162	0,276	54	16,3	14,1	$2,87 \cdot 10^{-3}$
500	773	250	147	0,286	55	18,8	14,5	$3,49 \cdot 10^{-3}$
600	873	246	141	0,297	56	21,3	15,1	$3,03 \cdot 10^{-3}$
700	973	230	130	0,310	58	23,4	15,6	$4,36 \cdot 10^{-3}$
800	1073	210	112	0,325	60	25,5	16,0	$5,04 \cdot 10^{-3}$
900	1173	120	81	0,340	60	28,0	16,2	$4,22 \cdot 10^{-3}$
1000	1273	65	50	0,358	60	30,0	16,8	$3,73 \cdot 10^{-3}$
1100	1373	50	45	0,376	68	31,0	19,0	$3,54 \cdot 10^{-3}$
1200	1473	37	40	0,396	75	31,0	22,0	$3,15 \cdot 10^{-3}$

#### Реализация задачи (студент №1)

В результате расчетов, что приведены в табл. 4 – 5 – 6 и построения графиков  $R^T$ ,  $U^T_{\Phi}$ ,  $K^T_{изн}$  можем сделать заключение, что в условиях работы при повышенных температурах наиболее целесообразно использование сплава ЭИ868.

Вывод: в условиях высоких температур материал ЭИ868 по критерию

$$R^T \text{ за } T = 750 \text{ К, } R^T_{868} > R^T_{602};$$

$$U^T_{\Phi} \text{ за } T = 1300 \text{ К, } U^T_{\Phi 868} > U^T_{\Phi 602};$$

$$K^T_{изн} \text{ за } T = 1275 \text{ К, } K^T_{изн 868} > K^T_{изн 602}.$$

Следовательно будем использовать ЭИ<sub>868</sub>.

#### Реализация задачи (студент №2)

Выполнение практического задания №4 основано на использовании исходных данных, предоставленных проф. д.т.н. Фроловым В. П. Исходные данные включают в себя:

- данные о химическом составе никелевых сплавов ЭИ602 и ЭИ868 (табл. 1);
- данные о механических и физических свойствах сплава ЭИ868 (табл. 3).

Используя исходные данные рассчитаем критерий оценки эксплуатационных свойств сплавов:

- Критерий Орлова:

$$R_T = (\sigma_{0,2}(T) / E(T)) \cdot (\lambda(T) / \alpha(T)) \cdot ([1 - \mu(T)] / [1 - \psi(T)]);$$

- Критерий Боброва:

$$K^T_{изм} = \sigma_B(T) \cdot \psi(T);$$

- Критерий Губера:

$$U^T_{\Phi} = [(1 + \mu(T)) / 3E(T)] \cdot \sigma_{0,2}^2.$$

На основе полученных расчетов, представленных в таблицах 5, 7, построим зависимости критериев оценок эксплуатационных свойств сплавов от температуры и дадим заключение о выбранной марке сплава, используя графические данные 2 ОКБ.

Вывод: на основе построенных графиков рис. 1.

По критерию Боброва материал ЭИ868 лучше с  $T = 1275^{\circ}\text{K}$ ;

По критерию Губера материал ЭИ868 лучше с  $T = 1030^{\circ}\text{K}$ ;

По критерию Орлова материал ЭИ868 лучше с  $T = 750^{\circ}\text{K}$ .

Таким образом для эксплуатации при высоких температурах материал ЭИ868 лучше чем материал ЭИ602.

Так же материал ЭИ868 более свежий (выпущен на 20 лет позже). В его состав входит вольфрам, обеспечивающий экономию средств по сравнению с ЭИ602 (в его составе – ниобий, который в 10 раз дороже вольфрама), а так же обеспечивает большую термостойкость.

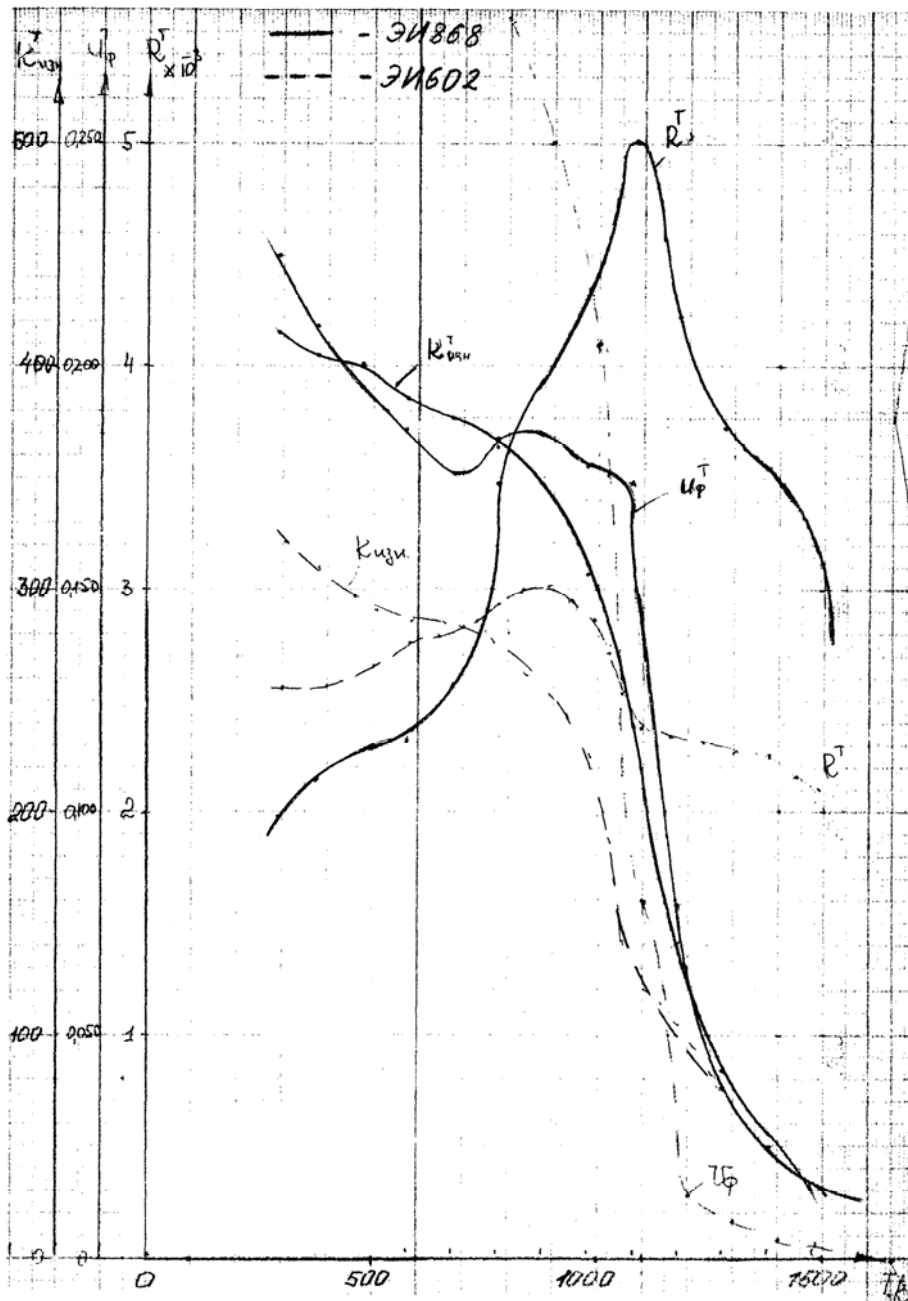


Рис. 1. Критерии оценки материалов

**5. Практическое занятие по теме:**

Содержание задания (объем на 4 часа)

Для создания нового ракетно-космического двигателя необходимо выбрать наиболее термостойкий (жаропрочный) из двух предлагаемых титановых сплавов (BT16 и BT18) для замены ранее применявшегося сплава BT6.

На основе имеющихся исходных данных об этих материалах и результатов расчетов по комплексным критериям оценки эксплуатационных свойств сплавов дать заключение о выбираемой марке материала.

Построить графики значений комплексных критериев  $U_{\Phi}^T$ ,  $R_T$ ,  $K_{изн}^T$  для сплавов BT6, BT16, BT18.

Свойства жаропрочного сплава BT6 по результатам расчетов значений комплексных критериев оценки эксплуатационных качеств конструкционных материалов в функции температуры

Таблица 19

T, К	73	173	273	373	473	573	673	773	873	973	1073
$U_{\Phi}^T$ , МПа	8,0	5,20	3,50	2,60	2,00	1,50	1,20	0,80	0,70	0,60	0,50
$R_T \cdot 10^{-9}$ к-кал см·сек	19,0	18,5	18,5	18,0	17,0	15,0	14,0	13,3	13,0	11,0	8,0
$K_{изн}^T$ , МПа	480	400	340	330	280	240	170	165	160	130	70

Химический состав сплава BT6: 6 % Al; 4 % V; Ti – остальное.  
 $T_{пл} = 1899$  К.

Для создания нового ракетно – космического двигателя необходимо выбрать наиболее термостойкий (жаропрочный) из двух предлагаемых титановых сплавов (BT16 и BT18) для замены ранее применявшегося сплава BT6.

На основе имеющихся исходных данных об этих материалах и результатов по комплексным критериям оценки эксплуатационных свойств сплавов дать заключение о выбираемой марке материала.

Построить графики значений комплексных критериев  $U_{\Phi}^T$ ,  $R_T$ ,  $K_{изн}^T$  для сплавов BT6, BT16, BT18.

Для оценки эксплуатационных свойств сплавов воспользуемся критериями оценки свойств сплавов:

- Критерий Орлова:

$$R_T = (\sigma_{0,2}(T) / E(T)) \cdot (\lambda(T) / \alpha(T)) \cdot ([1 - \mu(T)] / [1 - \psi(T)]);$$

- Критерий Боброва:

$$K_{изм}^T = \sigma_B(T) \cdot \psi(T);$$

- Критерий Губера:

$$U_{\Phi}^T = [(1 + \mu(T)) / 3E(T)] \cdot \sigma_{0,2}^2.$$

Исходные данные для оценки эксплуатационных свойств сплавов были предоставлены проф. д.т.н. Фроловым В. П.

Таблица 20

Критерии оценки свойств сплава ВТ – 6

T [K]	73	173	273	373	473	573	673	773	873	973	1073
$U_{\Phi}^T$ [МПа]	8,0	5,20	3,50	2,60	2,00	1,50	1,20	0,80	0,70	0,60	0,50
$R_T \cdot 10^{-9}$ [к·кал/см·сек]	19,0	18,5	18,5	18	17	15	14	13,3	13	11	8
$K_{изм}^T$ [Мпа]	480	400	340	330	280	240	170	165	160	130	70

Таблица 21

Критерии оценки свойств сплава ВТ – 16

T [K]	293	573	623	673	723	773	873
$U_{\Phi}^T$ [МПа]	0,5557	0,3629	0,3504	0,3508	0,2486		
$R_T \cdot 10^{-9}$ [к·кал/см·сек]	22,3	22,8	-	24,9			
$K_{изм}^T$ [Мпа]	21,59	16,92	16,56	16,38	15,77	15,08	10,75

На основе полученных критериев построим зависимости  $U_{\Phi} - f(T)$ ,  $R - f(T)$ ,  $K_{изм} - f(T)$  для сплавов ВТ – 6, ВТ – 16, ВТ – 18 и на основе этих зависимостей выберем наиболее термостойкий из 2-х сплавов (ВТ – 16 и ВТ – 18) для замены сплава ВТ – 6.

Таблица 22

Исходные данные по сплаву ВТ 16

$$T_{пл} = 1913 \text{ K}$$

$t$ , °C	20	100	200	300	350	400	450	500	600	700	800
T, K	293	373	473	573	623	673	723	773	873	973	1073
$\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	127			94	92	91	83	79	43		
$\sigma_{0,2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	117			85	82	80	66	55	16		
$\psi$ , %	17			18	18	18	19	20	25		

$E$ , кг/мм <sup>2</sup>	11000			9000	8700	8300	8000				
$\lambda$ , кал/с м·сек· °С	0,024	0,026	0,029	0,032		0,035		0,038	0,040		
$\alpha$ , 10 <sup>6</sup>	9,1	9,1	9,8	10,4		10,5		10,3	7,7		
$\mu$ $\mu_0 =$ 0,334	0,339 8	0,343 5	0,349 3	0,356 4	0,360 5	0,365	0,369 7	0,374 9	0,386 1	0,398 8	0,412 8
$K_{изн} \cdot 10^0$ , [Мпа]	21,59			16,92	16,56	16,38	15,77	15,08	10,75		
$U_{\phi} \cdot 10^7$ , [Мпа]	0,555 7			0,362 9	0,350 4	0,350 8	0,248 6				
$R \cdot 10^{-9}$ [к·кал /см·се к]	22,3			22,8		24,9					

Химический состав ВТ – 16: Al = 2,5 %; Mo = 5 %; V = 4,5 %; Ti – остальное.

Выводы: На основе полученных зависимостей делаем вывод:

- По критерию Губера: предпочтительнее использовать материал ВТ – 16 (см. Рис. 1);
- По критерию Орлова: предпочтительнее использовать материал ВТ – 16 (см. Рис. 1);
- По критерию Боброва: до температуры 700 К целесообразнее использовать материал ВТ – 6, а далее – материал ВТ – 18.

Таким образом однозначный ответ на вопрос о замене материала ВТ – 6 дать нельзя без учета условий эксплуатации изделий, выполненных из ВТ – 6, т.к. материал ВТ – 16 менее износостоек по сравнению с материалами ВТ – 6 и ВТ – 18.

Сплав ВТ – 16 можно использовать для замены ВТ – 6 только в случае нанесения эрозионно-стойкого и износостойкого покрытий.

Сплав ВТ – 18 можно использовать для замены ВТ – 6 только при  $T_{\text{эксп}} \geq 700$  К.

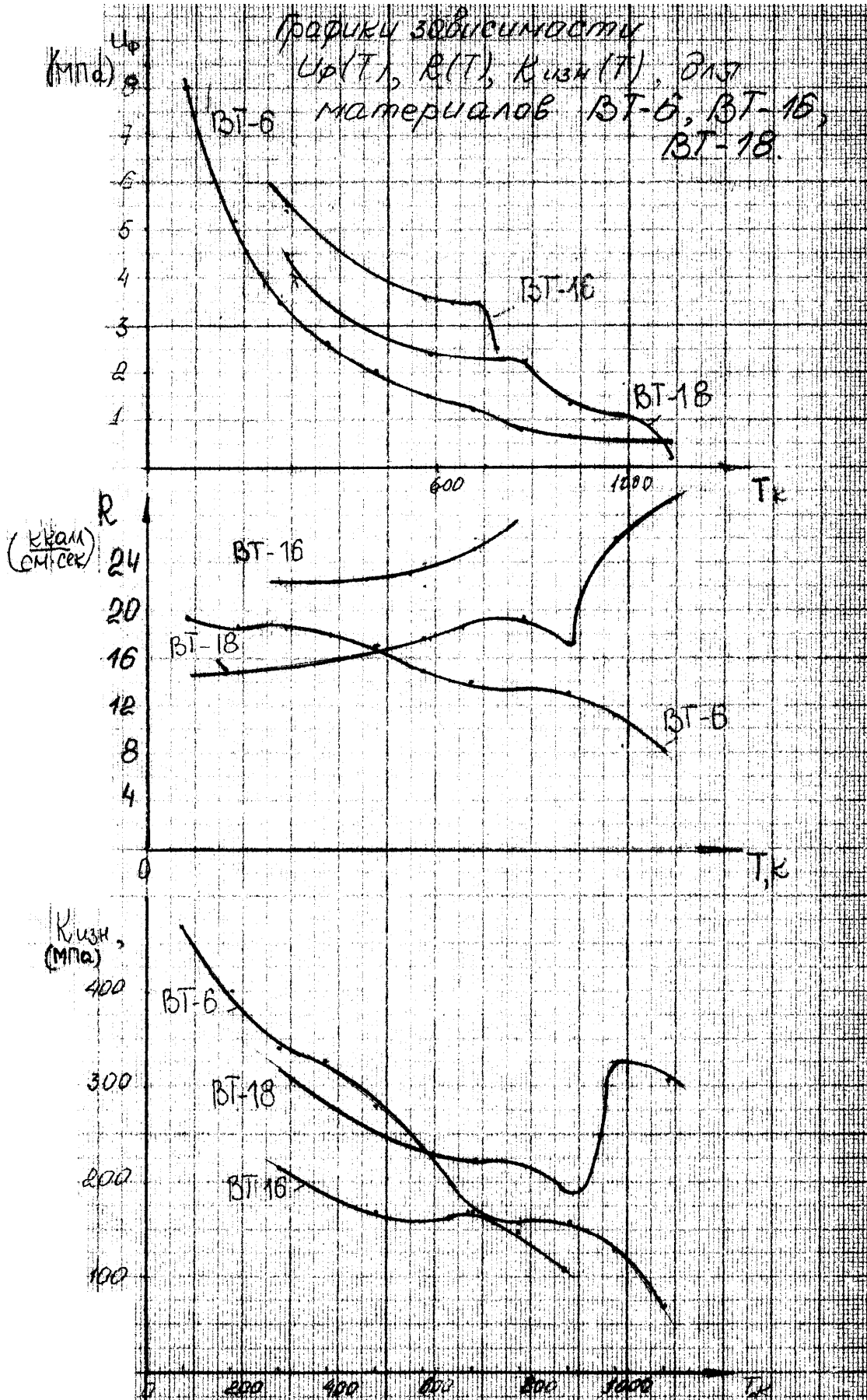


Рис. 2

Таблица 23

## Исходные данные по сплаву ВТ – 18

$$T_{\text{пл}} = 1875 \text{ К}$$

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	20	100	200	300	350	400	450	500	600	700	800
$T, \text{ К}$	293	373	473	573	623	673	723	773	873	973	1073
$\sigma_{\text{в}}, \text{ кг/мм}^2$	115					90		88	77	65	38
$\sigma_{0,2}, \text{ кг/мм}^2$	110					71		69	50	38	14
$\Psi, \text{ \%}$	27,5			25		25		25	25	50	80
$E, \text{ кг/мм}^2$	12000					9800		9500	8500	6500	5700
$\lambda, \text{ кал/см}\cdot\text{сек}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$	0,017	0,019	0,023	0,026		0,029		0,033	0,037	0,040	0,044
$\alpha, 10^6$	9,0	9,0	9,3	9,5		9,8		10,0	10,2	10,4	10,7
$\mu$ $\mu_0 = 0,344$	0,35	0,354	0,360	0,368	0,372	0,377	0,382	0,388	0,40	0,413	0,428
$U_{\text{ф}} \cdot 10, \text{ [Мпа]}$	0,453					0,236		0,232	0,137	0,105	0,016
$K_{\text{изн}} \cdot 10, \text{ [Мпа]}$	31,6					22,5		22	19,25	32,5	30,4
$R \cdot 10^{-9}$ [к·кал/см·сек]	15					17,8		19,6	17,1	26,4	28,9

## Химический состав ВТ – 18:

Al = 7,7 %;

Mo = 0,6 %;

Nb = 1,0 %;

Zr = 11 %;

Si = 0,15 %;

Ti – остальное.

## 6. Практическое занятие по теме: Выбор материалов-заменителей сталей

Известно, что в 1955 году для инженерно – технического состава частей ВВС Советской армии было издано пособие: «Войсковой ремонт авиационного двигателя ВК – 1», объемом в 448 страниц. Управлением Главнокомандующего ВВС это пособие официально предназначалось, как справочный материал, для восстановления ГТД типа ВК – 1, вышедших из строя до выработки установленного ресурса.

Актуальность подобных пособий ныне возросла в связи с известными фактами повреждения АТ при осуществлении диверсионных актов международным терроризмом. Авиатехника ГА в подобных ситуациях так же подтверждается.

В ходе данного занятия обучающимся предлагается проанализировать сведения, приведенные на стр. 444 указанного пособия, о материалах – заменителях по конструкционным сталям 30ХГСА, 30ХМА и оценить в заключении достоверность изложенных рекомендаций.

С этой целью рекомендуется использовать выданные справочные сведения о физико – механических свойствах указанных сталей, провести расчеты по критериям  $R_T$ ,  $U^T_{\Phi}$  и  $K^T_{изн}$  и построить графически необходимые характеристики:

Таблица 24

Сталь 40ХНМА = 40ХН2МА

t, °С	T, К	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$E \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\psi$ , %	$\alpha \cdot 10^6$ , 1 / °С	$\lambda$ , Вт/м·°С	$\mu$
20	293	1090	970	20,4	58	11,7	48	0,28
100	373	1060	940	20,0	56	12,0	46	0,3011
200	473	1020	890	19,5	60	12,5	44	0,314
300	573	985	840	19,2	62	12,7	39,8	0,3299
400	673	970	790	19,0	63	13,5	37,7	0,3489
500	773	710	690	18,0	80	14,2	35,0	0,3709

Химический состав: С = 0,4 %; Cr = 0,75 %; Ni = 1,6 %; Mo = 0,2 %; Mn = 0,65 %;

Si = 0,27%.

$T_{пл} = 1447,52$  К;  $t_{пл} = 1174,37$ °С.

Таблица 25

Сталь 30ХМА

t, °С	T, К	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$E \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\psi$ , %	$\alpha \cdot 10^6$ , 1 / °С	$\lambda$ , Вт/м·°С	$\mu$
20	293	745	600	21,3	70	12,3	38	0,28
100	373	742	595	20,9	72	12,4	36,5	0,3005
200	473	740	580	20,8	71	12,5	34,5	0,3131
300	573	730	535	20,1	68,5	12,9	32,7	0,3286
400	673	640	490	19,2	75,0	13,9	32	0,347



500	773	580	450	17,0	77,0	14,7	30	0,3684
-----	-----	-----	-----	------	------	------	----	--------

Химический состав: C = 0,30 %; Cr = 0,95 %; Mo = 0,2 %; Mn = 0,55 %.

$$T_{\text{пл}} = 1190 \text{ К}; t_{\text{пл}} = 917^\circ\text{С}.$$

Таблица 26

## Сталь 30ХГСА

t, °С	T, К	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$E \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\psi$ , %	$\alpha \cdot 10^6$ , 1 / °С	$\lambda$ , Вт/м·°С	$\mu$
20	293	1100	950	19,8	55	11	48,5	0,28
100	373	1060	900	19,2	50	11,2	47	0,301
200	473	1010	860	18,5	45	11,7	45	0,3138
300	573	955	820	17,2	56	12,3	42	0,3296
400	673	920	800	16,9	69	13,0	38	0,3484
500	773	700	650	15,9	84	13,7	36	0,3703

Химический состав: C = 0,30 %; Cr = 1,0 %; Mn = 1,0 %; Si = 1,1 %; Ni = 0,25 %.

$$T_{\text{пл}} = 1451,53 \text{ К}; t_{\text{пл}} = 1178,38^\circ\text{С}.$$

Расчетная часть.

Представим расчетные формулы для решения предложенной задачи:

$$t_{\text{пл}} = 1530 - \Delta t_{\text{н.к.}} - \sum_{i=1}^n c_i \Delta I - \text{температура плавления для материала имеющего сложный состав;}$$

$$R_T = (\sigma_{0,2}(T) \cdot \lambda(T) \cdot [1 - \mu(T)]) / (E(T) \cdot \alpha(T) \cdot [1 - \psi(T)]) - \text{типовой критерий прочности Орлова;}$$

$$U_{\text{Ф}}^T = ((1 + \mu(T)) / 3E(T)) \cdot \sigma_{0,2}^2(T) - \text{критерий энергии формоизменения Губера;}$$

$$K_{\text{изн}}^T = \sigma_{\text{в}}^T \cdot \psi(T) - \text{критерий износостойкости Боброва.}$$

Вся методика расчета и исходные данные представлены проф. д.т.н. Фроловым В. П.

Литература: - «Справочник по пайке» по ред. Петрунина И.Е. 2003г.

- «Войсковой ремонт авиационного двигателя ВК – 1», издан в 1955г.

Таблица 27

## Материал 30ХГСА

№	T, К	$K_{\text{изн}}^T$	$U_{\text{Ф}}^T$	$R_T \cdot 10^{-9}$
1	293	605,0	1,94	33
2	373	530,0	1,82	27
3	473	454,5	1,75	22
4	573	534,8	1,73	24
5	673	634,8	1,70	29
6	773	588,0	1,21	42

Таблица 28

## Материал 40ХНМА

№	T, K	$K_{изн}^T$	$U_{\phi}^T$	$R_T \cdot 10^{-9}$
1	293	632,2	1,9678	33,4
2	373	593,6	1,9160	28,6
3	473	612	1,7791	27,5
4	573	610,7	1,6291	24,1
5	673	611,1	1,4769	20,4
6	773	568,0	1,2086	29,7

Таблица 29

## Материал 30ХМА

№	T, K	$K_{изн}^T$	$U_{\phi}^T$	$R_T \cdot 10^{-9}$
1	293	521,5	0,7211	20,8
2	373	534,24	0,7343	20,9
3	473	525,4	0,7078	18,2
4	573	500,05	0,6306	14,3
5	673	480,0	0,5614	15,3
6	773	446,6	0,5433	14,8

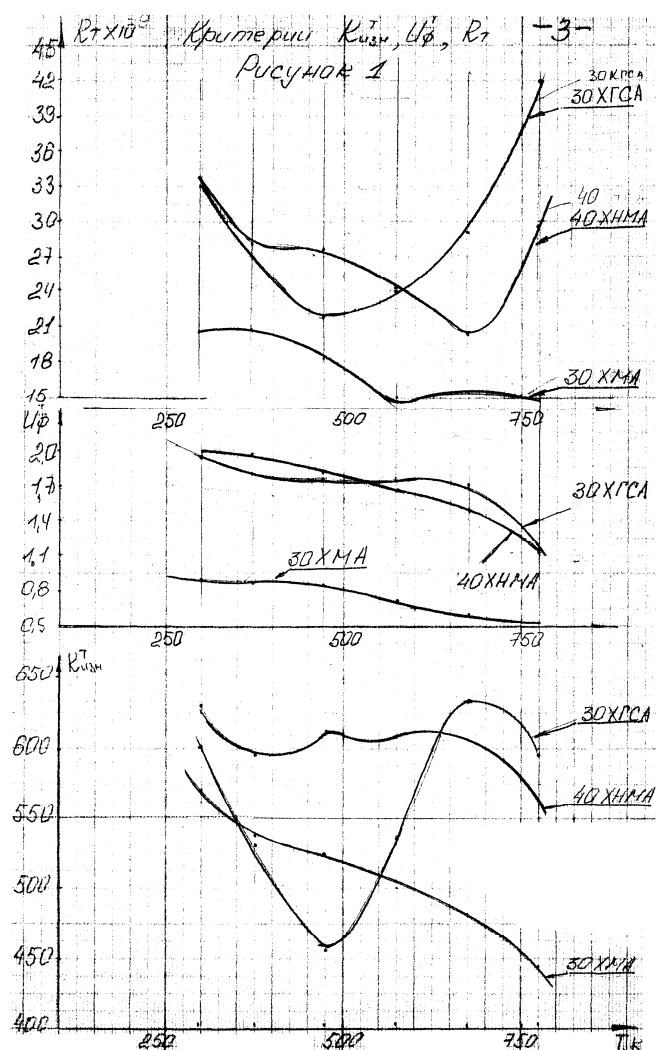


Рис. 3

Вывод: На основе построенных графиков (см. рис. 1) можно сделать вывод о том, что сталь 30ХМА однозначно может быть заменена на сталь

40ХНМА, т.к. эта сталь по всем рассмотренным критериям превосходит 30ХМА.

А сталь 30 ХГСА может быть заменена на сталь 40ХНМА лишь в определенных диапазонах температур:

$K_{изн}$ : 40ХНМА эффективнее до 650 К;

$U_{\phi}$ : 40ХНМА эффективнее до 550 К;

R: 40ХНМА эффективнее до 575 К.

Таким образом, сталь 30ХГСА может заменяться на сталь 40ХНМА в поле эксплуатационных температур от 20°С до 280°С.

## **8. Практическое занятие по теме: «Анализ достоинств метода комплексной механизации работ при ремонте корпуса камеры сгорания ГТД»**

Цель занятия: Уяснение сущности метода комплексной механизации ремонтных работ по устранению нескольких сквозных одиночных трещин (5 трещин длиной от 15 до 25 мм) на гладкой поверхности корпуса камеры сгорания ГТД (материал конструкции: жаропрочный никелевый сплав ХН68ВМТЮК толщиной 1,5 мм); процесс ремонта спланирован в 2 этапа.

На первом этапе устраняются дефектные участки путем алмазно – электролитической вырезки вращающимися стальными цилиндрами диаметром 20 и 30 мм, армированными слоем зерен технических алмазов, припаяных к инструменту. Затем по размерам отверстий изготавливаются профилированные вставки из того же никелевого сплава, согласно чертежу (рис. 4).

На втором этапе осуществляется процесс пайки жаропрочным припоем профилированных вставок по местам выполненных отверстий в корпусе камеры сгорания с применением терморadiaционной паяльной установки.

Заданием на проведение практического занятия № 6 предусматривается:

- 1). – проведение расчетов для оценки длительности ремонтных операций по первому и второму этапам работ;
- 2). – оценка прочности паяльного соединения, выполненного припоем системы Ni – Mn – Cr – Co – Fe при температурах пайки от 1000 до 1200°С по формулам проведенного ранее полного факторного эксперимента.

### Методические указания

Первый этап. Вырезка поврежденных участков. Производительность алмазно – электролитического резания  $U$  [мм<sup>3</sup>/мин] может быть рассчитана по уравнению:

$$U = 101 + 7,7 x_1 + 30,8 x_2 + 11 x_3 + 4,5 x_2 \cdot x_3 - 2,8 x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \text{ [мм}^3\text{/мин]}, \quad (1)$$

где  $x_1$  – частота переменного тока [Гц] при алмазно – электролитическом резании, которая варьировалась в эксперименте от 40 до 60 Гц;

$x_2$  – напряжение электрического тока на электродах в пределах от 4 до 10 Вольт [В];

$x_3$  – удельное усилие прижатия инструмента к обрабатываемой детали от 0,2 до 0,8 МПа.

Примечание: Оптимальный режим процесса резания реализуется при следующих значениях факторов:

$$x_1 = 50 \text{ Гц};$$

$$x_2 = 6 \text{ В};$$

$$x_3 = 0,5 \text{ МПа}.$$

Целесообразно выяснить, как влияют на изменение  $U$  [мм<sup>3</sup>/мин] отклонение величин  $x_1, x_2, x_3$  от их оптимальных значений на  $\pm 10\%$  или  $\pm 20\%$ .

Пример расчета по уравнению (1) при оптимальном режиме процесса резания:

$$U = 101 + 7,7 \cdot 50 + 30,8 \cdot 6 + 11 \cdot 0,5 + 4,5 \cdot 6 \cdot 0,5 - 2,8 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 0,5 = 101 + 385 + 184,8 + 5,5 + 13,5 - 420 = 269,8 \approx 270 \text{ [мм}^3\text{/мин]}.$$

Площадь резания  $S$  [мм<sup>2</sup>] и объем  $V_1$  [мм<sup>3</sup>] снимаемого металла при диаметре отверстия 30 мм и толщине материала  $\delta_1 = 1,5$  мм составляет:

$$S = 2\pi R \cdot \delta_1 = 2\pi \cdot 15 \cdot 1,5 = 6,28 \cdot 22,5 = 141,3 \text{ мм}^2.$$

При ширине кольцевого реза  $l = 3$  мм (толщина стенки цилиндрического сверла) объем снимаемого металла составляет:

$$S_1 \times l = V_1 = 141,3 \cdot 3 = 423,9 \approx 424 \text{ мм}^3.$$

Итак, длительность вырезки отверстия определится как отношение объема  $V_1$  срезаемого металла, (согласно геометрическим размерам обрабатываемого дефектного участка) и объема  $V_2 = U'$  (т. е. производительности резания в течение одной минуты):

$$\tau_1 = V_1 : V_2 = 424 : 270 \cong 1,57 \text{ мин}.$$

Учитывая, что необходимо вырезать 5 отверстий (округленно принимая их все одинакового диаметра, т. е. по 30 мм), получим суммарное расчетное время обработки :  $\tau_{\text{общ}} = 1,57 \cdot 5 = 7,85 \approx 8$  мин.

Учитывая дополнительное время перестановки инструмента на различные места обработки (по 2 мин. на один рез), получим в сумме 10 мин., а общее операционное время составит около 18 мин.

Время вырезки вставок из материала большей толщины оценим экспертно. Толщину листа для изготовления профилированных вставок можно подсчитать по чертежу (рис. 4).

$$\text{Так: } \delta_2 = c_1 + c_2 + a + \delta_1, \tag{2}$$

где:

$c_1$	$c_2$	$a$	$\delta_1$	$\delta_2$	$l_H$
0,5 мм	0,15 мм	0,15 мм	1,5 мм	2,3 мм	1,8 мм

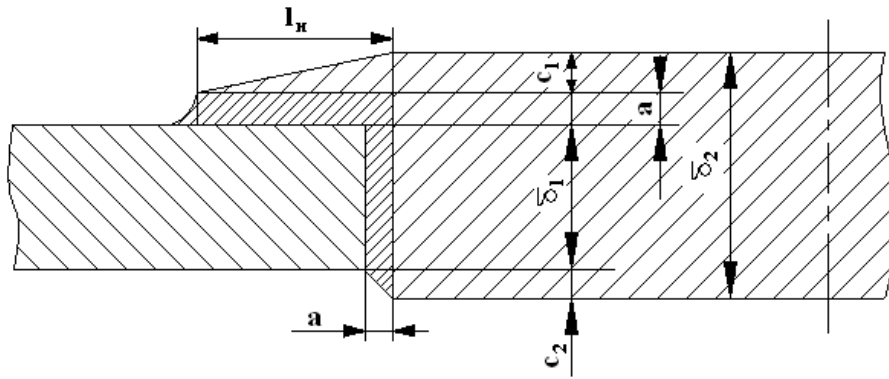


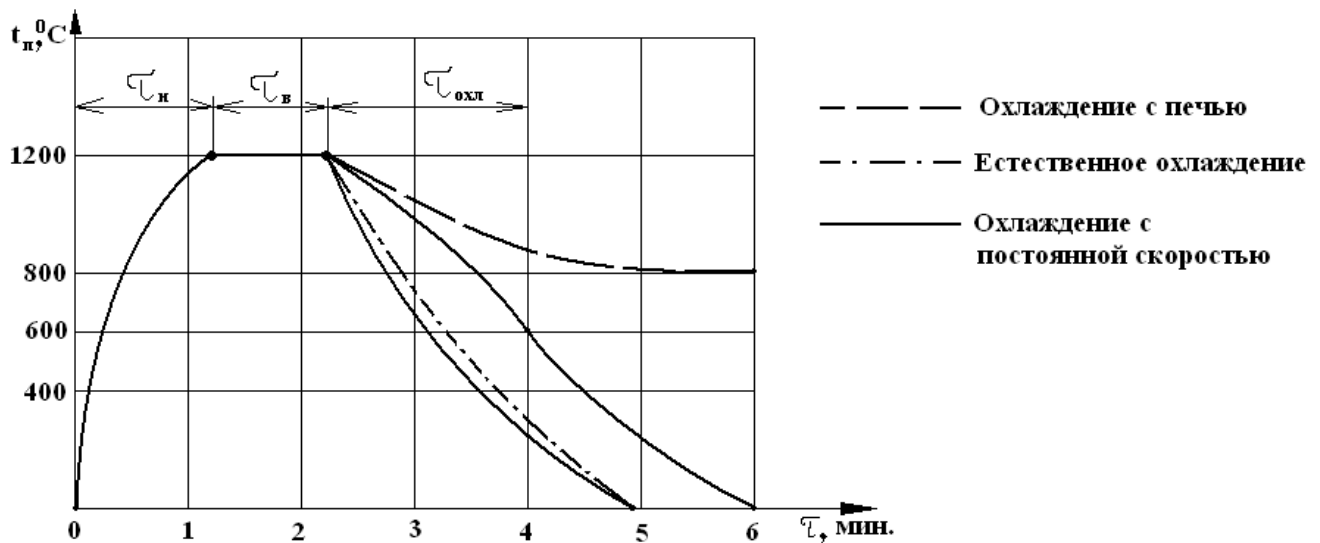
Рис. 4. Геометрические параметры профилированной вставки

Округляя размер  $\delta_2 = 2,3$  мм до стандартной толщины листа, принимаем  $\delta_2 = 2,5$  мм. Поскольку соотношение толщин  $\delta_2 / \delta_1 = 2,5 : 1,5 = 1,67$ , увеличим объем снимаемого металла для вставки в 1,67 раза. При этом получим объем снимаемого металла  $V_3$  равный:  $V_3 = 424 \cdot 1,67 = 708 \text{ мм}^3$ .

Следовательно время резания одной вставки составляет:  $708 : 270 = 2,62$  мин., а для пяти вставок составит:  $2,62 \cdot 5 = 13$  мин.

Второй этап.

Пайка вставок в отверстия корпуса камеры сгорания производится при температурах 1000 – 1200 °С, согласно графику на рис. 5.



Режим пайки:  $T_n = 1473 \text{ К}$

$$\tau_n = 1,25;$$

$$\tau_v = \tau_n = 1 \text{ мин};$$

$$\tau_{\text{охл}} = 1,7 \text{ мин}$$

Рис. 5. Температурно – временной цикл нагрева под пайку жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК

Таким образом, при  $t_n = 1200^\circ\text{С}$ , или иначе при  $T_n = 1473 \text{ К}$  длительность цикла пайки и охлаждения с постоянной скоростью (примерно

до 600°C) составляет (при применении терморadiационной паяльной установки):

$$\tau = \tau_n + \tau_b + \tau_{охл} = 1,25 + 1 + 1,7 \cong 4 \text{ мин.}$$

при общем числе паяк, равном пяти, суммарное время пайки составляет 20 мин.

Оценка прочности и долговечности паяльных соединений.

С целью обоснования цикла нагрева под пайку стареющего дисперсионно-твердеющего сплава марки ХН68ВМТЮК был (экспериментально и теоретически) реализован полный факторный эксперимент второго порядка.

В качестве факторов приняты:

температура пайки  $t_n$ , °С (или  $T_n$ , К) в диапазоне температур  $t_n = 900 - 1200$  °С ( $T_n = 1173 - 1473$ , К), а в качестве функции отклика – предел прочности  $\sigma^{293}_b$  [МПа] и относительное удлинение  $\delta^{293}$  [%] материала при температуре 293 К, а так же долговечность работы сплава  $\tau_d$  при эксплуатационной температуре  $T_3 = 1123$  К (т. е. при  $t_3 = 850$  °С) и напряжении  $\sigma = 196$  МПа.

Полученные математические модели при постоянных значениях факторов  $\tau_{охл} = 80$  мин и выдержке  $\tau_b = 1$  мин, имеют вид:

$$\sigma^{293}_b = 21680 - 34,4 T_n + 0,014 T_n^2, \text{ МПа}; \quad (3)$$

$$\delta^{293} = 460 - 0,7 T_n + 0,0003 T_n^2, \text{ \%}; \quad (4)$$

$$\tau_d = 15640 - 27 T_n + 0,012 T_n^2, \text{ час}; \quad (5)$$

Подготовка вставок и мест пайки должна заключаться в обезжиривании поверхностей. Процесс пайки осуществляется с флюсом марки ПВ201 (ГОСТ 23178 – 78. Флюсы паяльные высокотемпературные фторборатно – и боридно – галогенидные).

Расчет уравнения (3), проведенный при  $T_n = 1473$  К дает результат:

$$\sigma^{293}_b = 1384,6 \text{ МПа.}$$

Вычисления  $\sigma^{293}$  и  $\tau_d$  при  $T_n = 1273$  К показывают, что  $\sigma^{293} = 55,1$  % и  $\tau_d = 715$  час.

Резюме.

Сравнение полученных данных по длительности процесса ремонта при указанных условиях, в сравнении с ремонтом сваркой и последующей термообработкой корпуса камеры сгорания ГТД [общей длительностью более 12 часов] показывает явное преимущество метода комплексной механизации работ с применением новых технологических процессов.

**Литература:**

1. Реграги Абдеррахман. Методика оценки эксплуатационных свойств титановых сплавов – заменителей при ремонте ЛА и АД. Кандидатская диссертация. – М.: МГТУ ГА, 2002. – 181с.

2. Фролов В.П., Реграги А., Прохоров В.С. О расширении технико-экономических и конструкторско-технологических возможностей АРЗ на основе введения статуса материалов – заменителей. / В сборнике: «Организационные и технологические проблемы заводского ремонта образцов ВВТ» Тезисы докладов. Часть 2. Люберцы: Минобороны РФ, 2001. – с. 53 – 60.