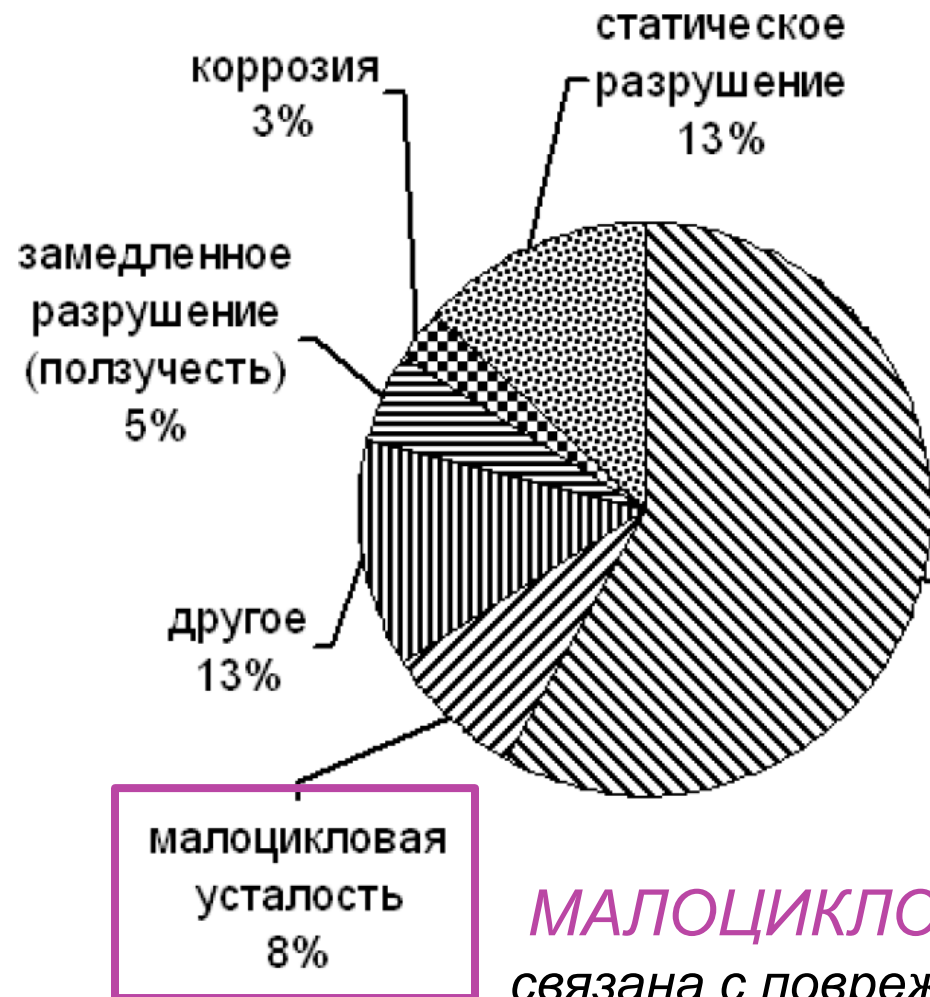




# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

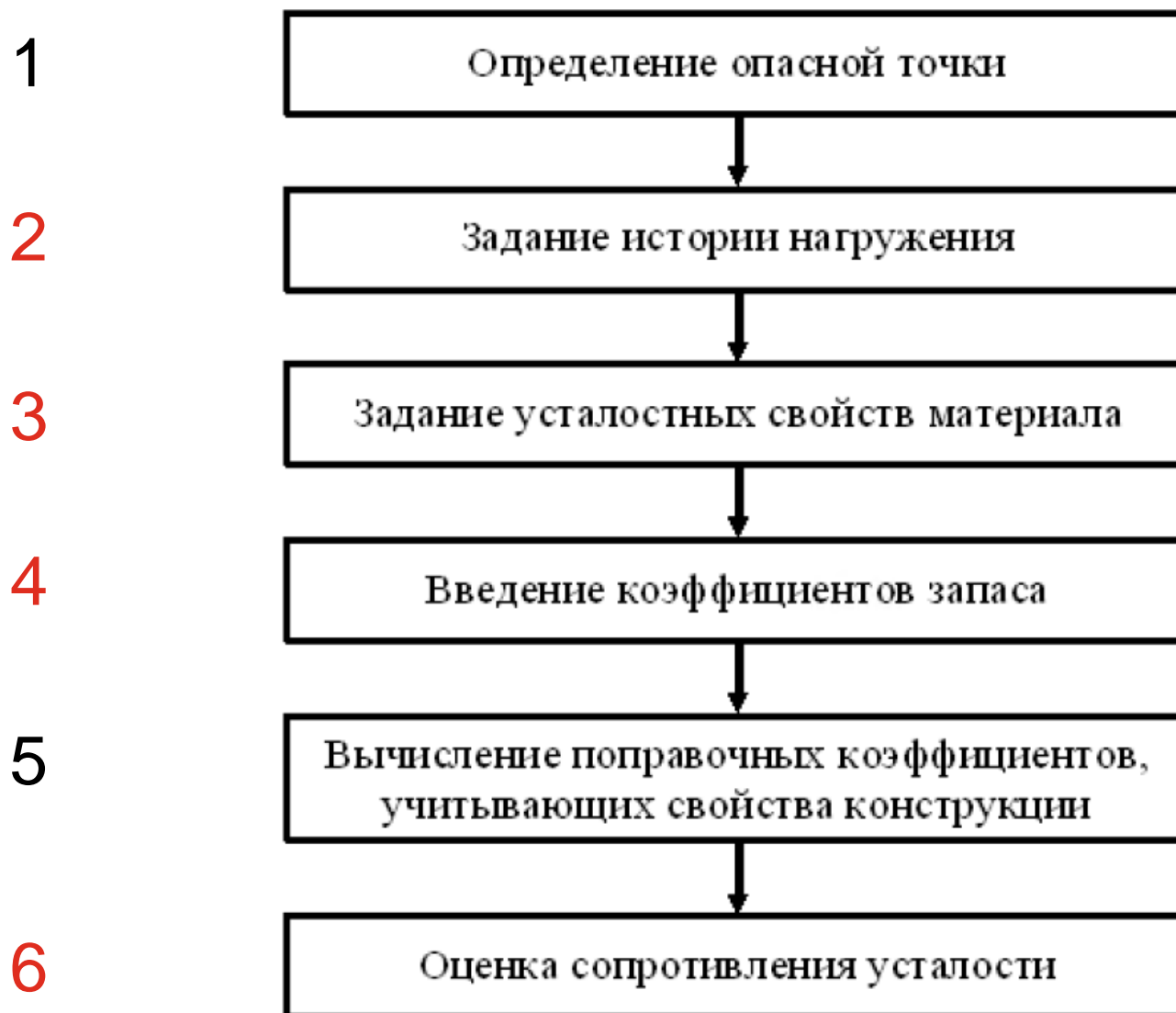


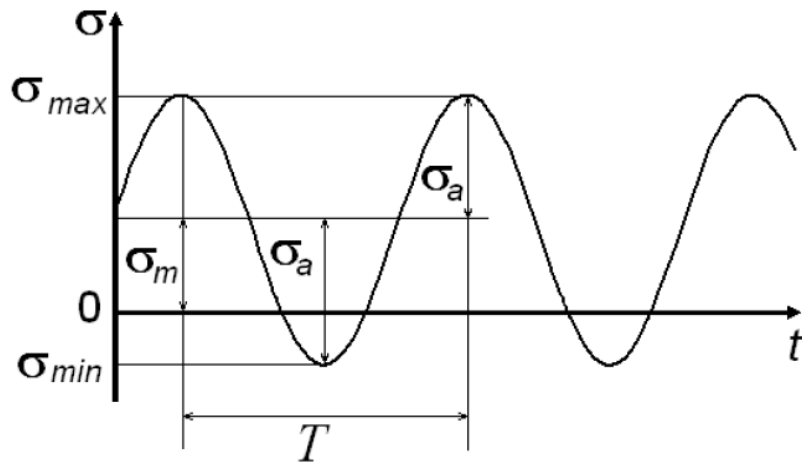
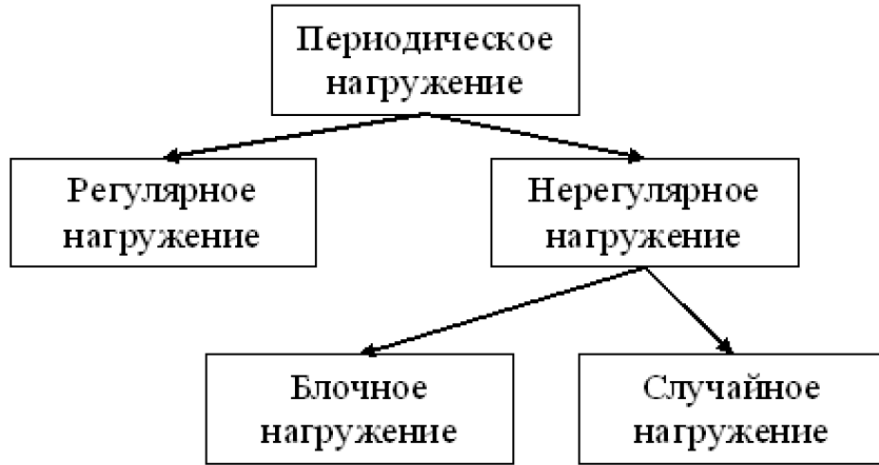
**МНОГОЦИКЛОВАЯ** усталость  
связана с повреждением или разрушением  
в основном при упругом деформировании.

**МАЛОЦИКЛОВАЯ** усталость  
связана с повреждением или разрушением  
при упругопластическом деформировании.

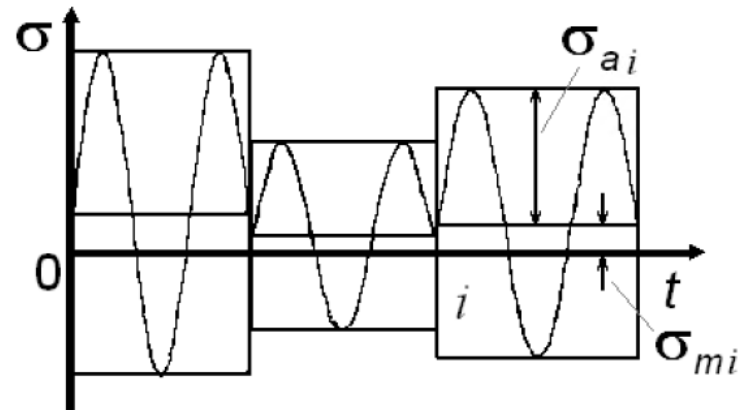
1. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
2. ГОСТ 25.505-85. Методы испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении.
3. ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения.
4. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.
5. ГОСТ 25.504-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.
6. СНиП 53-100-2010. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции. Нормы проектирования.
7. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue.



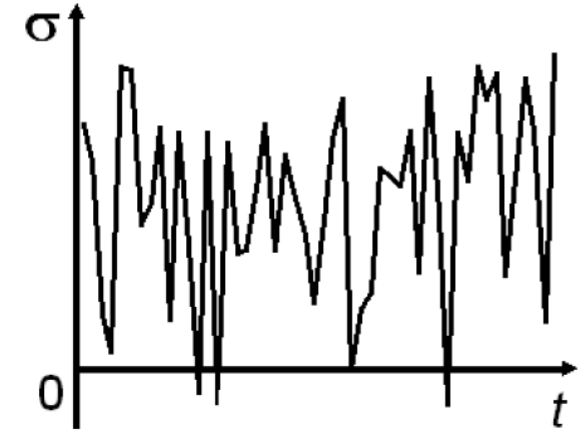




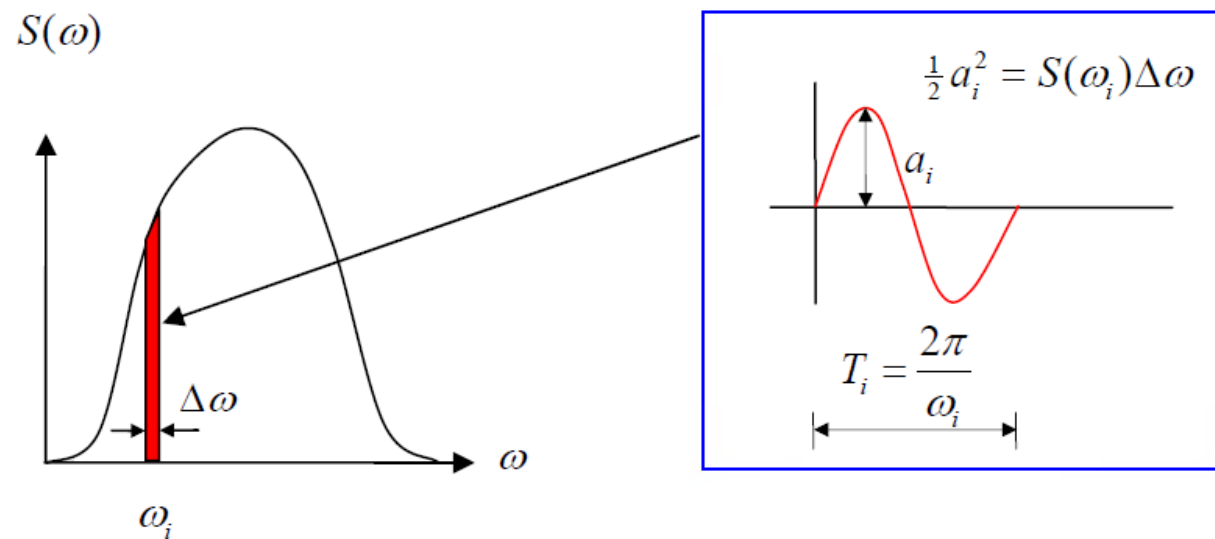
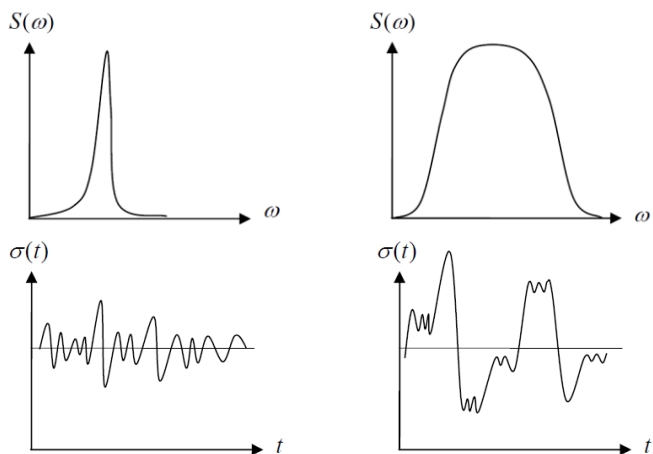
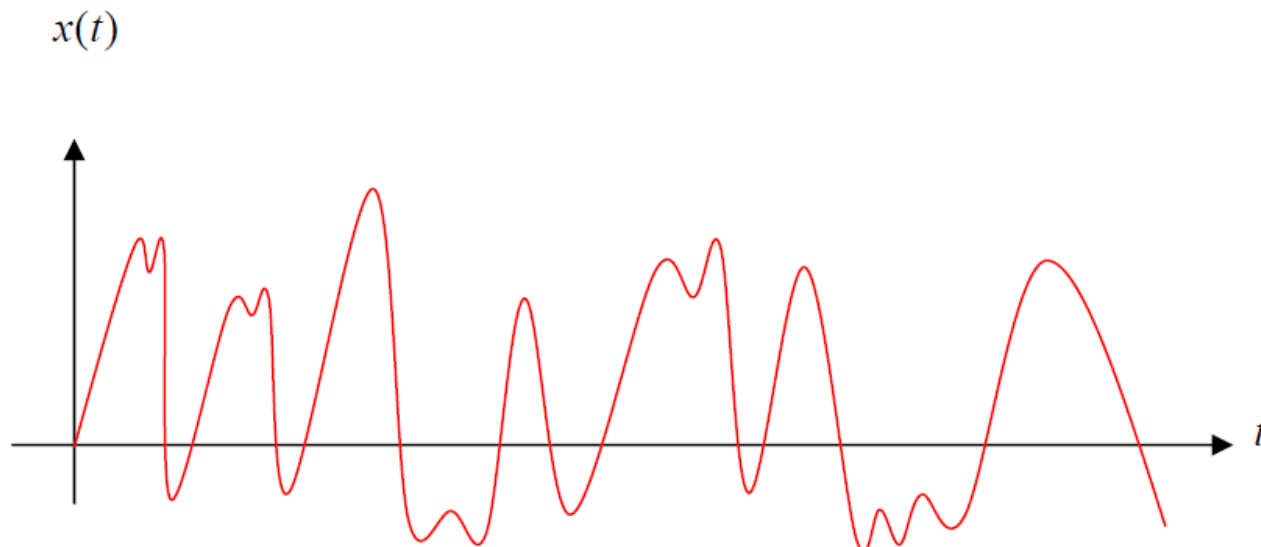
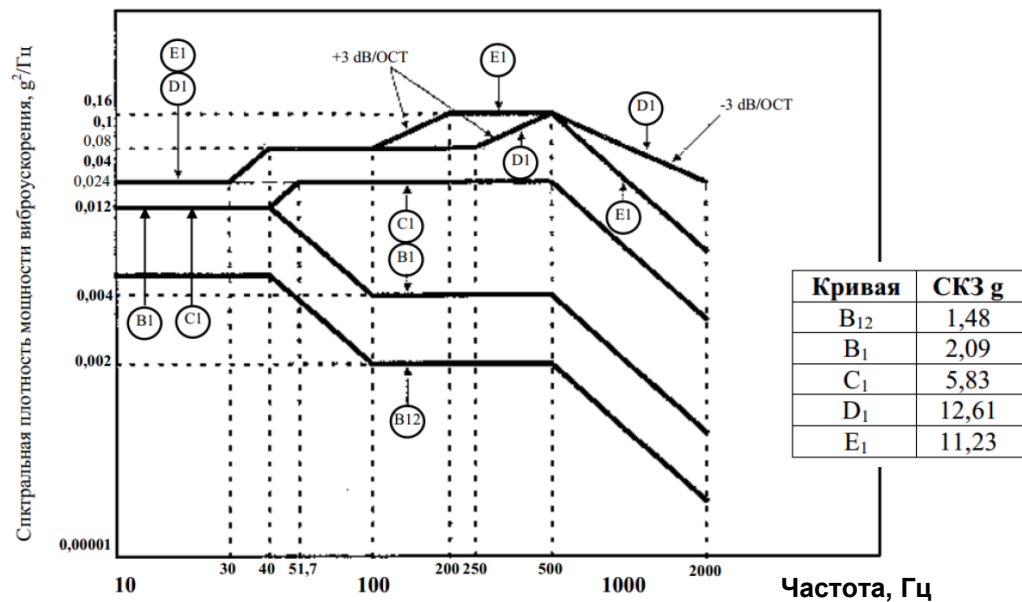
Регулярное нагружение



Блочное нагружение



Случайной нагружение



Усталостная многостадийная случайная нагрузка - Все загрузки

Общие параметры нагрузки

☒ Включить для расчета ☐ Расчет через вын. колебания

Число повторений многостадийной нагрузки: 3.6e+05

Общая частота оцифровки для всех стадий, [Гц]: 20000

Число точек для межстадийного сглаживания: 10 = 0.0005, [с]

№.	Тип стадии	Имя стадии	Статус	Флаг	Число точек
1	Спектральная зависимость	Не задано	Включен	Вычислен	1000

Работа со стадиями усталостной нагрузки

Добавить стадию по корреляционной функции

Добавить стадию по спектральной плотности мощности

Добавить стадию, загружаемую из файла

Итоговые параметры многостадийной усталостной нагрузки

Суммарное число точек графика: 1000

Суммарное время графика, [с]: 0.05

Суммарное время заданного нагружения, [с]: 0.05

График усталостной нагрузки

Экспорт

В текстовый файл...

В график для нагружения

Суммарная нагрузка

Интервалов гистограммы: 12

Показать

OK Отмена

Настройка стадии усталостной нагрузки - Все загрузки

☒ Включить для расчета

Название стадии нагрузки: Не задано

Пересчитать

Вычисленные параметры

dD 0.1473 eD 0.26887 Циклов 65

As/As0 -0.26125 Ex/Ex0 -33.003 NCS 65

NR 0.55303 STD 0.63288 NTS 0.05

Графики стадии нагрузки

Формат сохранения: Нагрузка приведенная

Текстовый...

Двоичный...

Интервалов гистограммы: 12

Показать

OK Отмена

Входные параметры нагрузки, заданной СПМ

Параметры спектральной плотности мощности

Название: B2 Задать СПМ...

Частотные параметры

Jk 3 KOm 300 ☐ Log10 по частоте

Линейное преобразование:  $F(x)=Ax+B$

Применить ☐ A 1 B 0

Общие параметры расчета

T, [с] 0.05 Точек 1000 Пов-торов 1

Спектральная плотность мощности - Все загрузки

Наименование: B2

Шаблон СПМ: B2, СКЗ=0.70 Выбрать

N	f, Гц	A, m/c^2	Угол наклона, дБ/окт.
1	10	0.003	0
2	40	0.003	-5.89
3	100	0.0005	0
4	500	0.0005	-6.11
5	2000	3e-05	

Точка  
+ Перед  
+ После  
- Удалить

Текущие значения точки  
f: 10 A: 0.003 Применить

Вычисленные параметры  
f\_min: 10 f\_max: 2000  
Точек: 5 СКЗ: 0.740155

Таблица СПМ  
Загрузить...  
Сохранить...

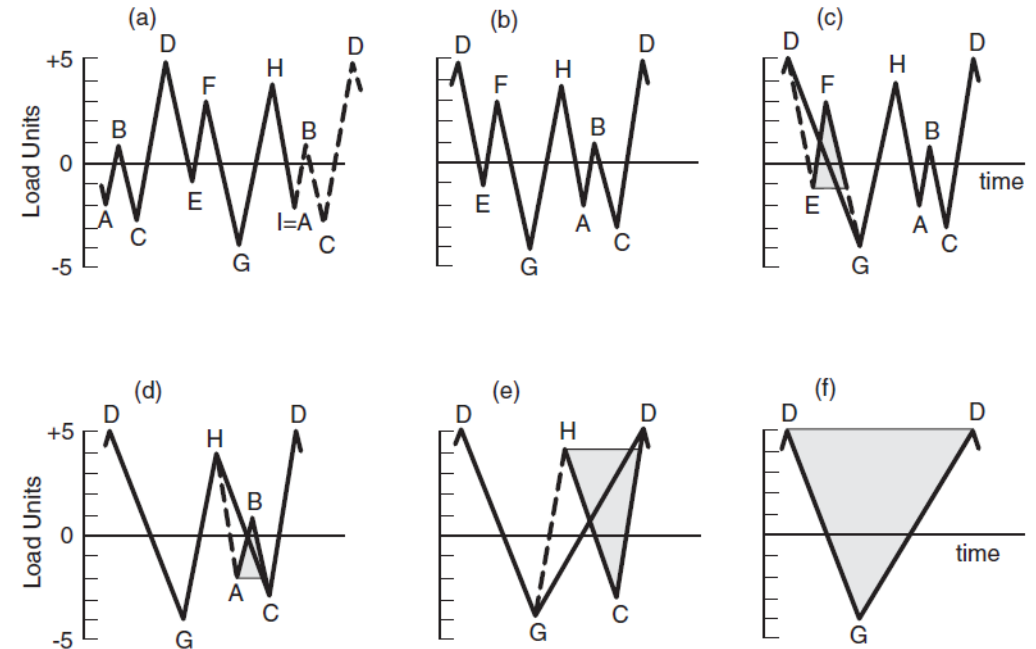
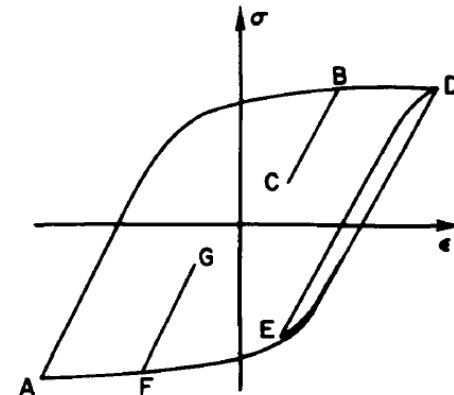
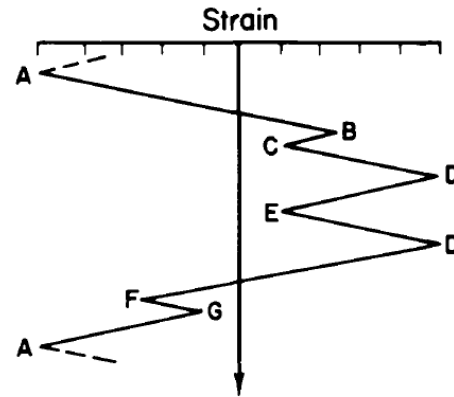
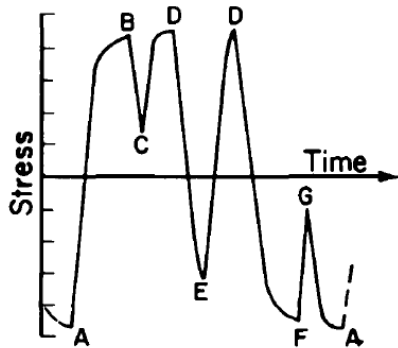
OK Cancel





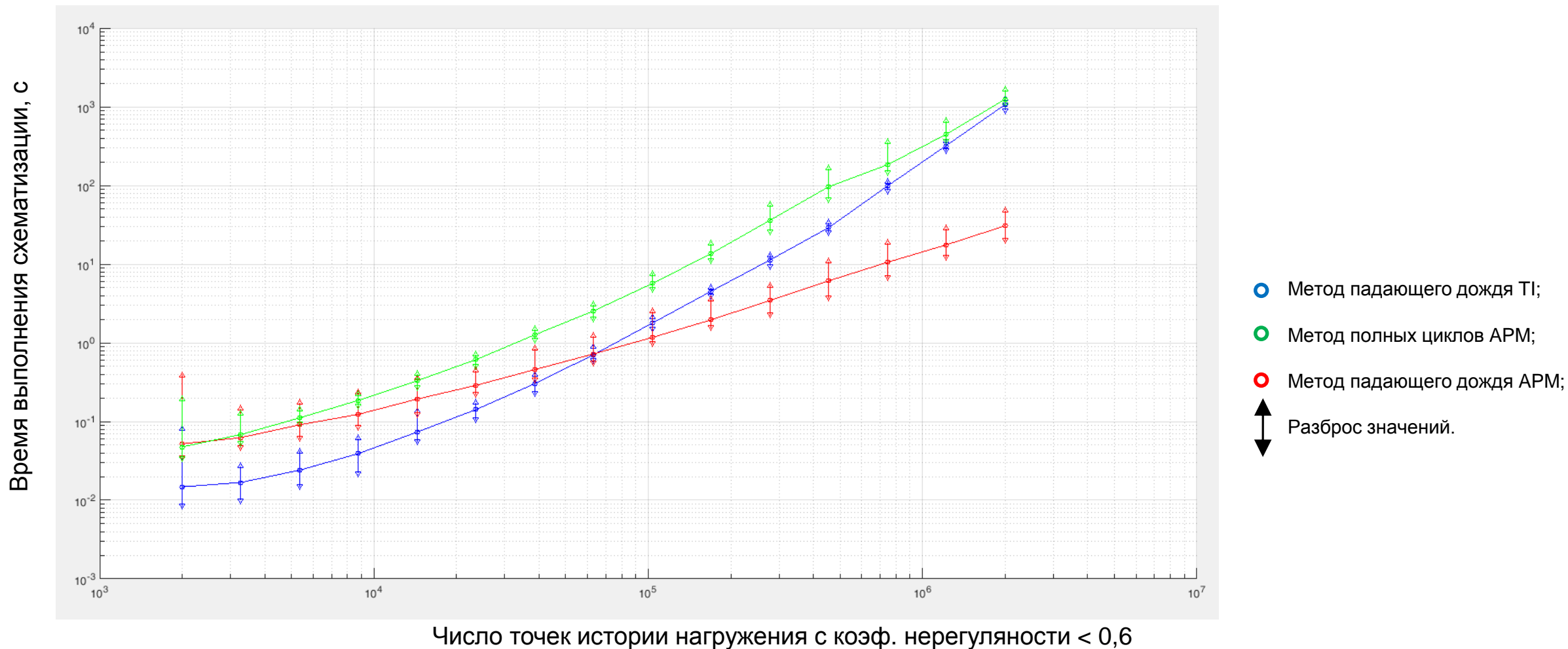
### Методы схематизации:

- Метод падающего дождя
- Метод полных циклов;
- Метод резервуаров;

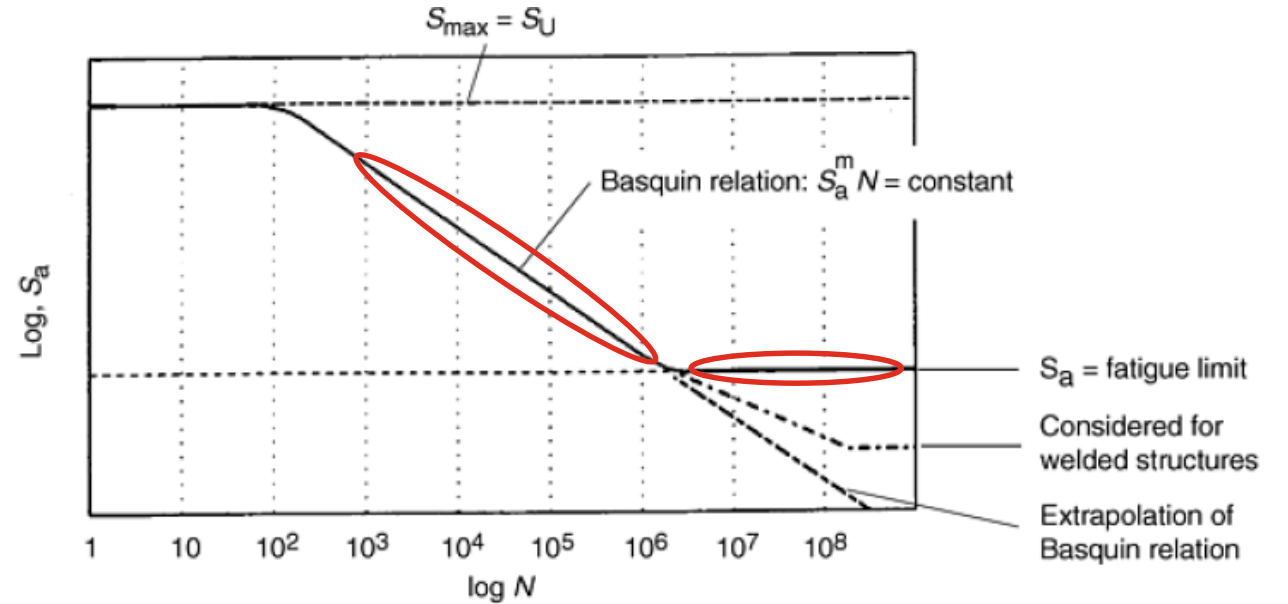
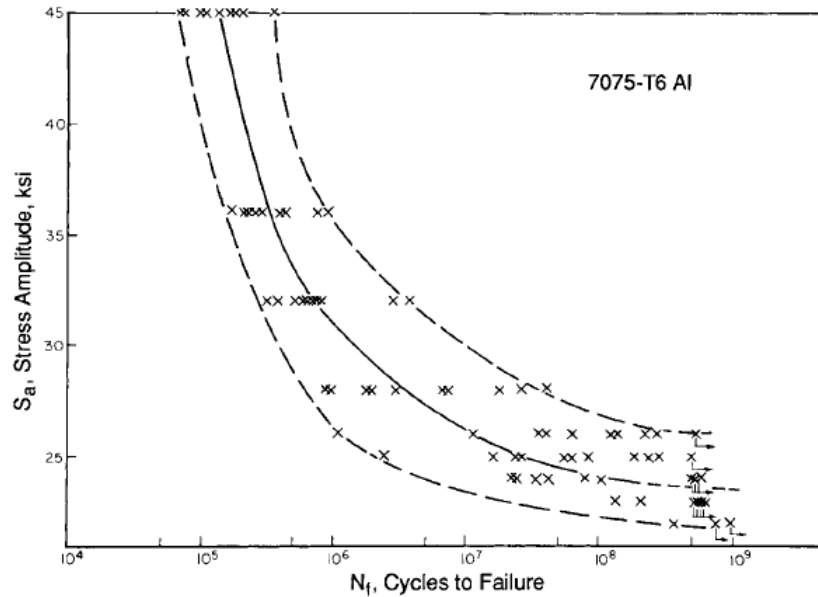


Cycle	Range	Mean
E-F	4.0	1.0
A-B	3.0	-0.5
H-C	7.0	0.5
D-G	9.0	0.5

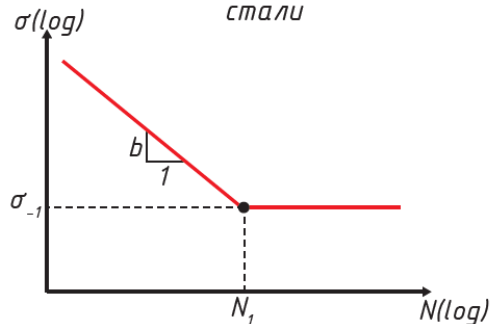
### Сравнение быстродействия методов схематизации



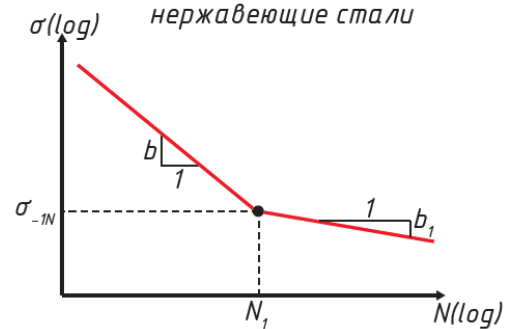
## Кривая Вёлера – общие свойства



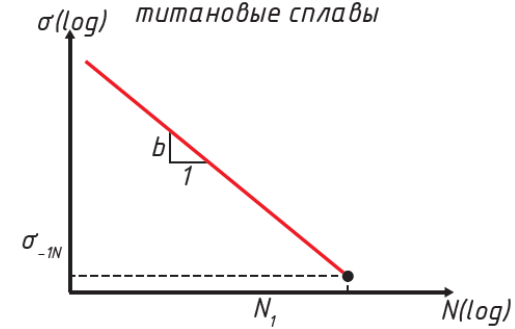
Углеродистые и среднелегированные стали



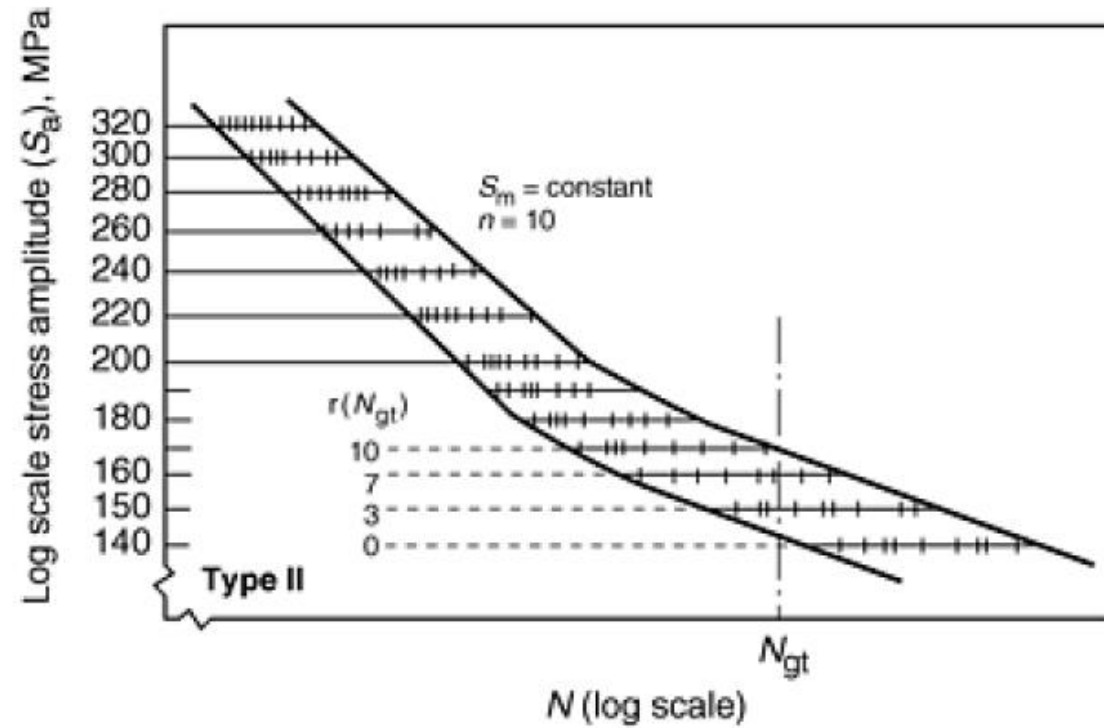
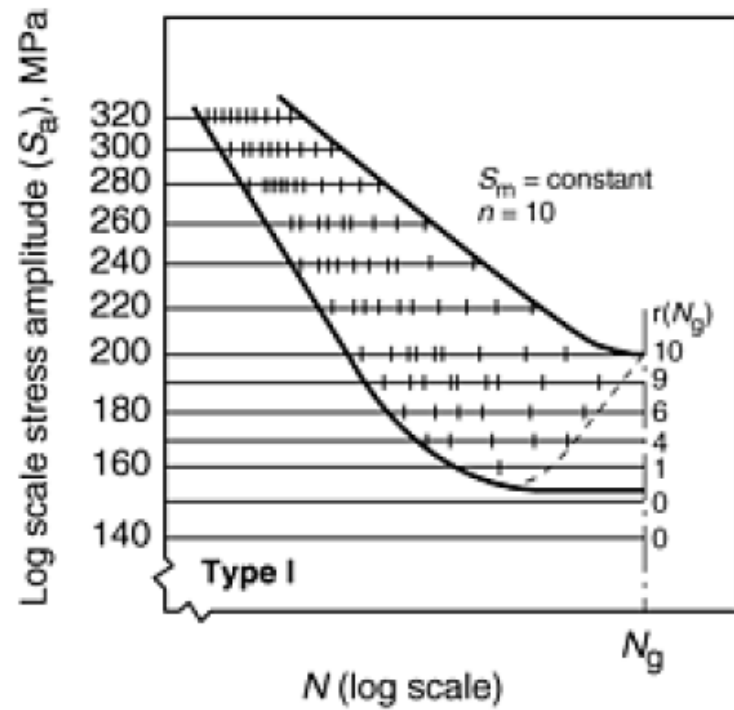
Алюминий, медь и их сплавы и нержавеющие стали



Высокопрочные стали и титановые сплавы

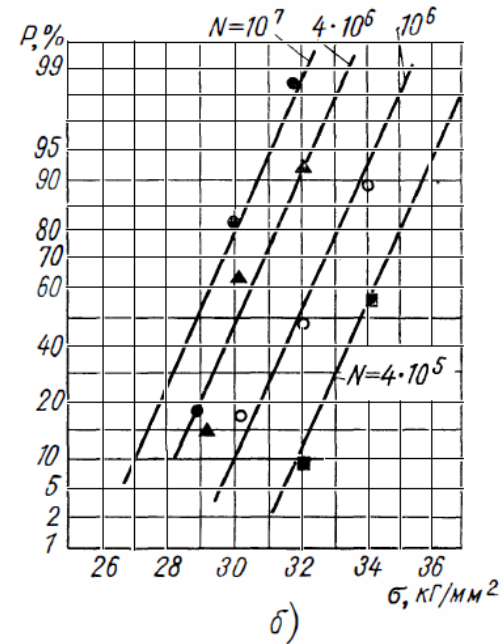
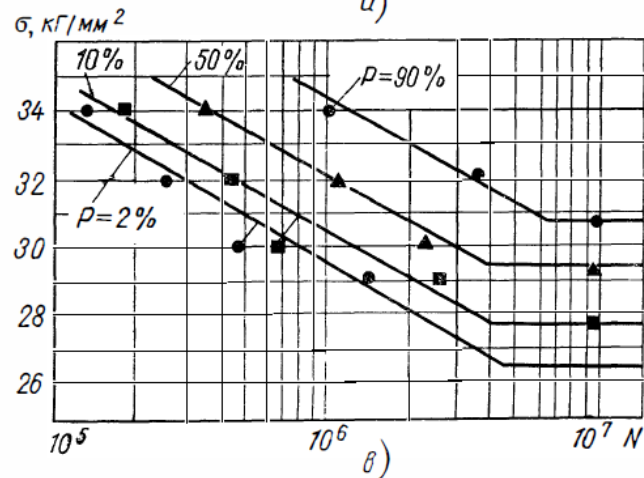
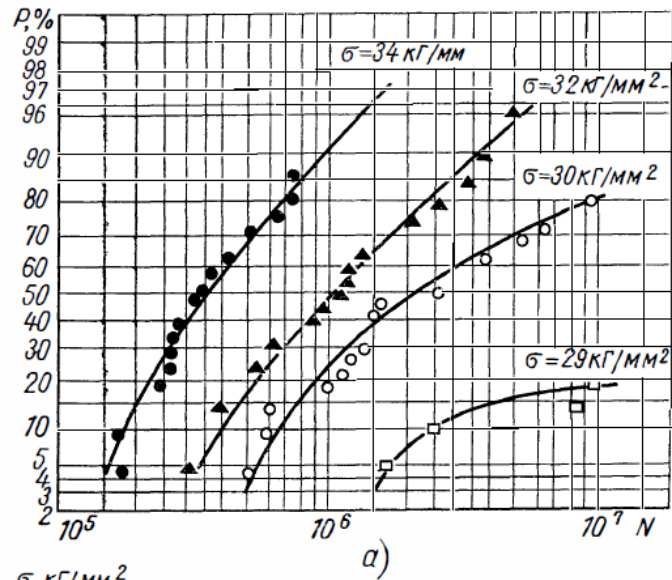


## Кривая Вёлера и базовое число циклов



### 3 – Задание усталостных свойств материала:

Полная вероятностная диаграмма усталости



Вероятность отказа	Коэффициент надежности $C_R$
0.5	1.000
0.90	0.897
0.95	0.868
0.975	0.843
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659

Гладкие образцы из стали 45, диаметром 25 мм, испытанные до появления первой макротрещины при плоском изгибе с частотой 280 Гц.



Приближения:

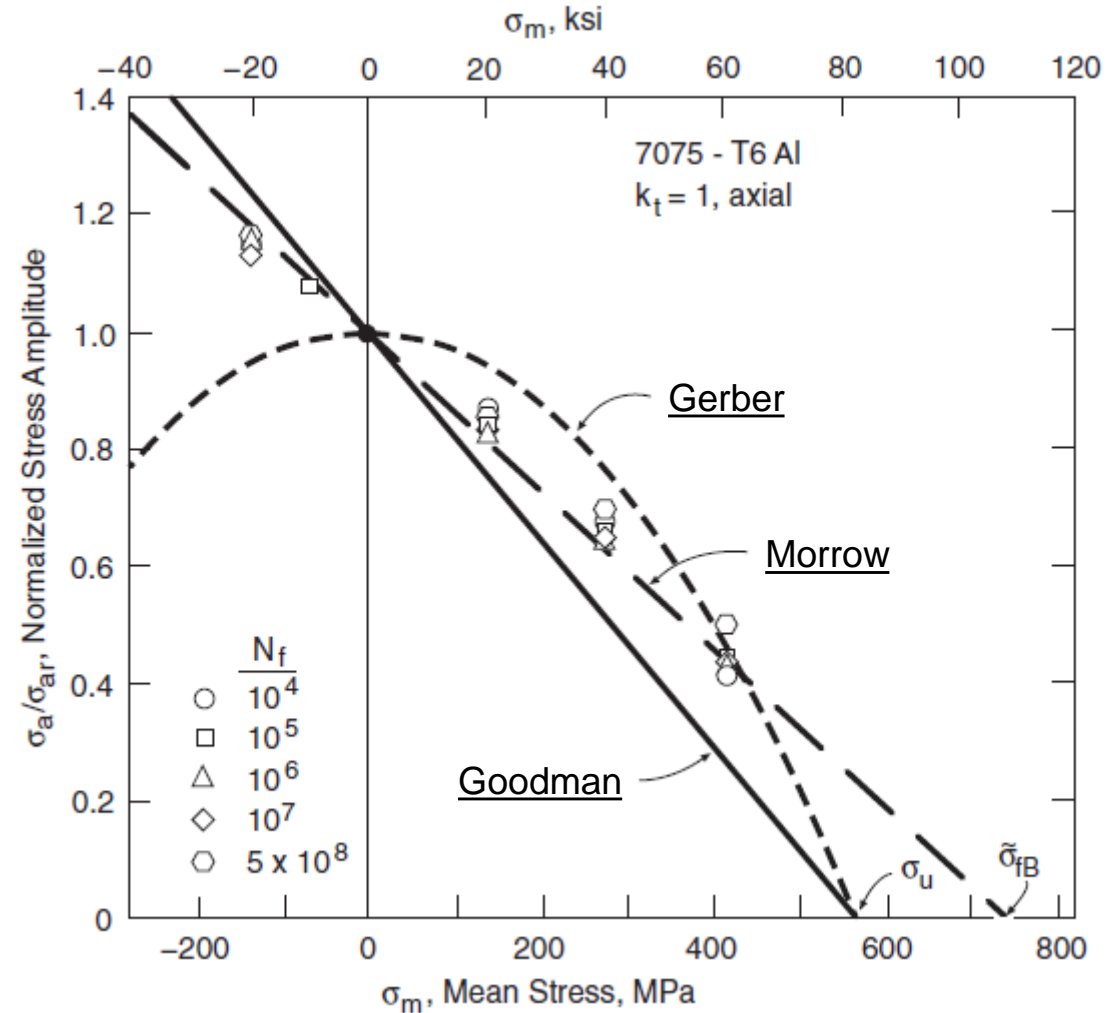
Гудман  $\sigma_a = \sigma_{-1} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)$

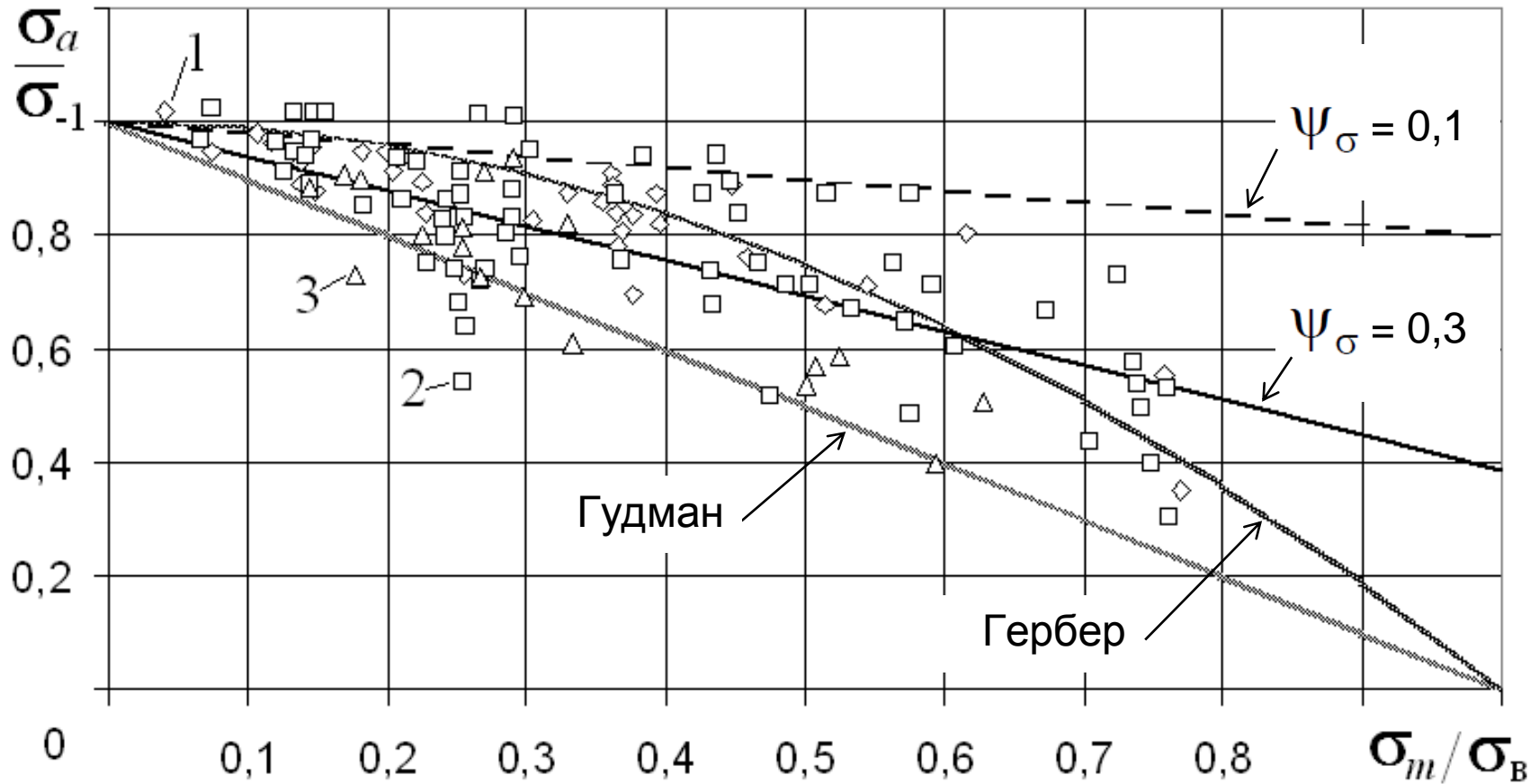
Гербер  $\sigma_a = \sigma_{-1} \left( 1 - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 \right)$

Зодерберг  $\sigma_a = \sigma_{-1} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right)$

Серенсен-Кинасошвили  $\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_m$   

$$\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}$$



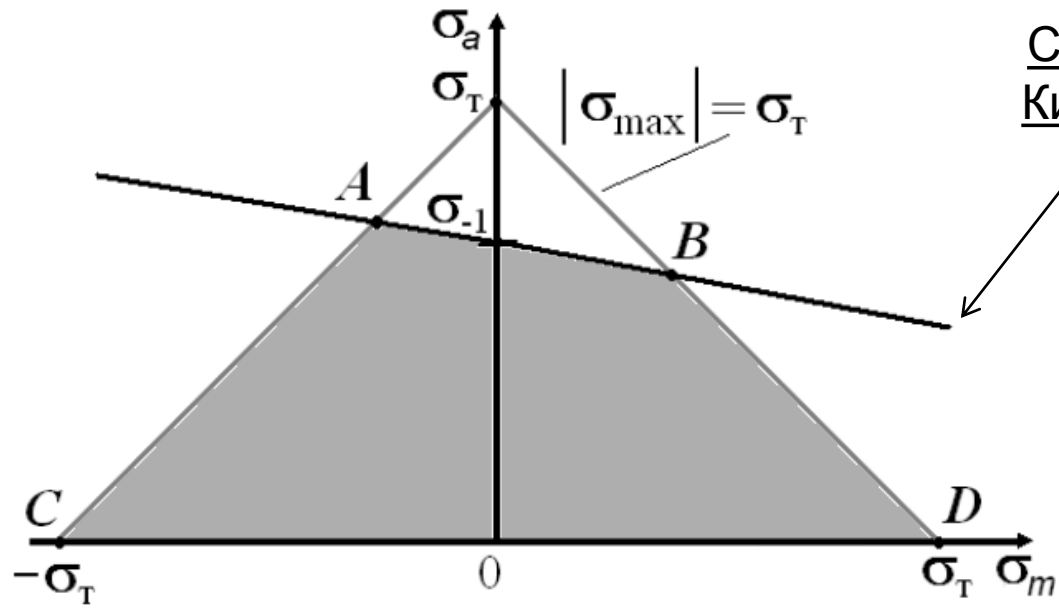


Материалы:

1 – Сталь;

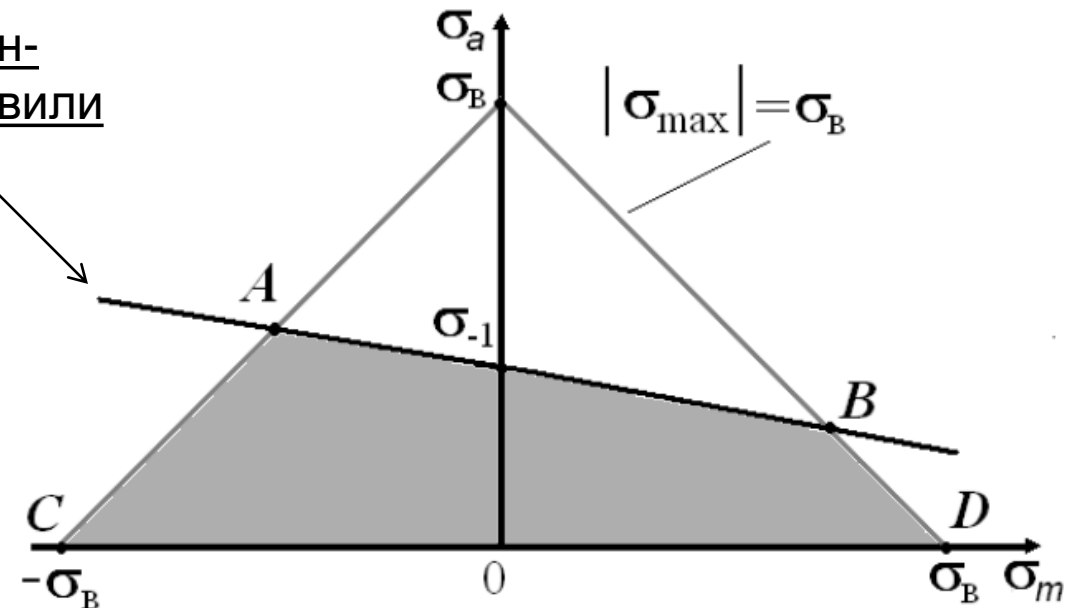
2 – Алюминиевые сплавы;

3 – Титановые и магниевые сплавы.



Пластичные материалы

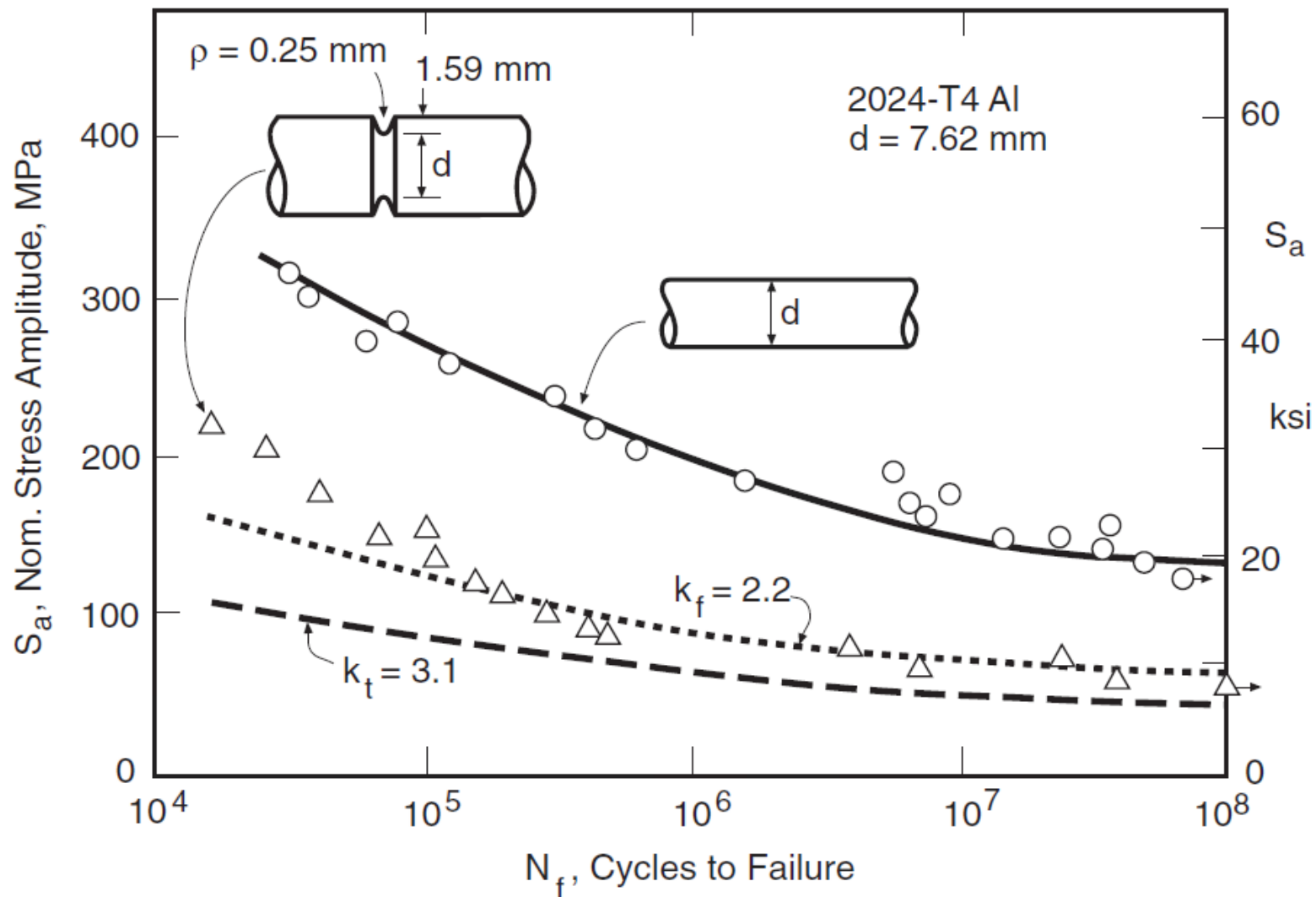
Серенсен-Кинашвили



Хрупкие материалы

### 3 – Задание усталостных свойств материала:

Влияние надреза на кривую усталости



**Уравнения связи напряжений в образцах с надрезом и эквивалентных симметричных  $S_{ar}$**

Уравнение SWT (Smith, Watson and Topper)

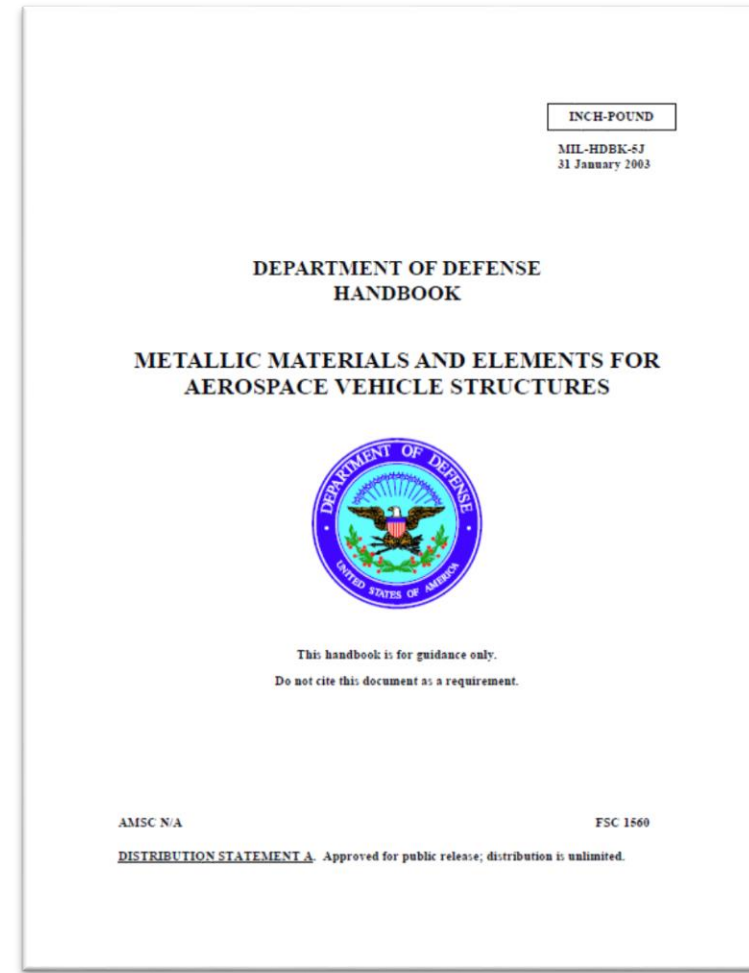
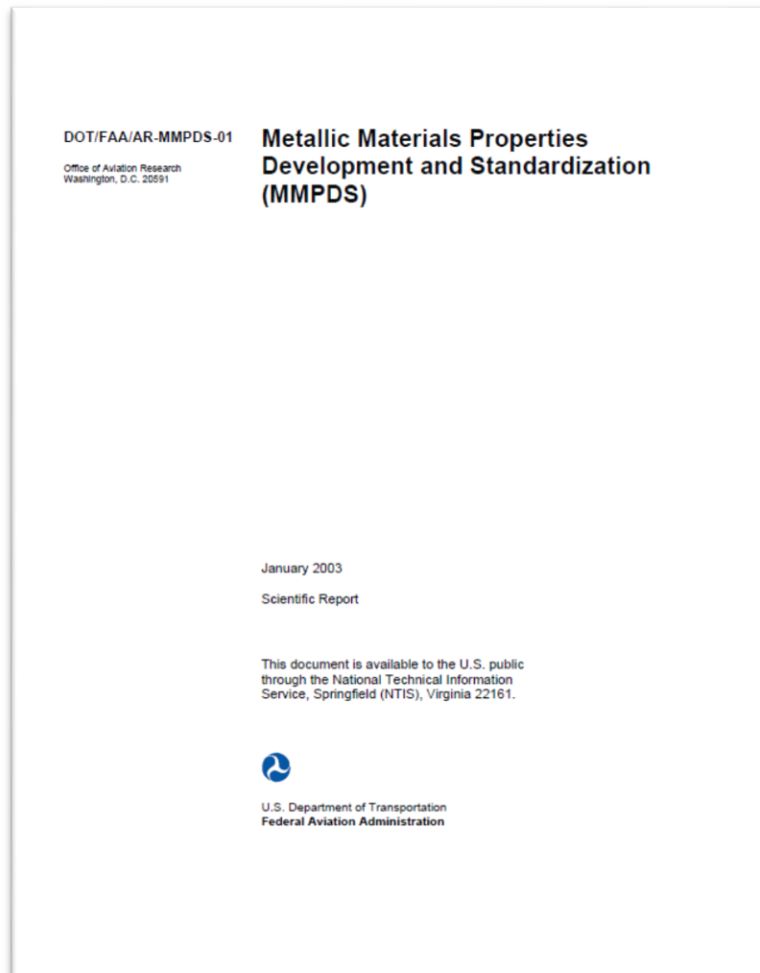
$$S_{ar} = \sqrt{S_{\max} S_a}, \quad S_{ar} = S_{\max} \sqrt{\frac{1-R}{2}}$$

Уравнение Уолкера (Walker)

$$S_{ar} = S_{\max}^{1-\gamma} S_a^{\gamma}, \quad S_{ar} = S_{\max} \left( \frac{1-R}{2} \right)^{\gamma}$$



## Кривая Вёлера: где взять?



### 3 – Задание усталостных свойств материала: Зарубежные источники усталостных свойств металлов

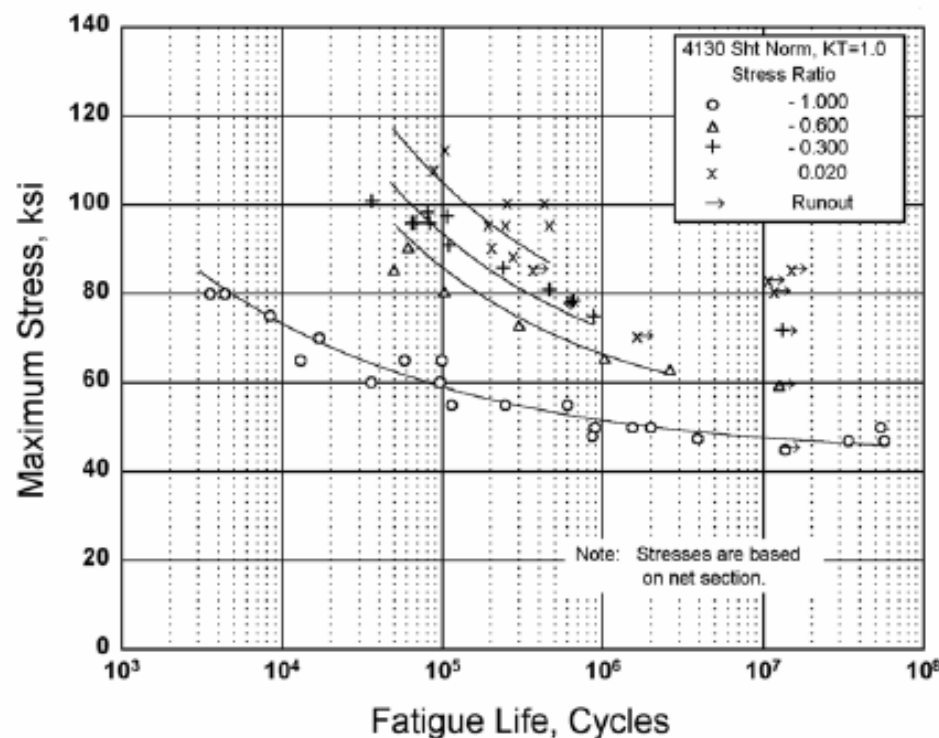


Figure 2.3.1.2.8(a). Best-fit S/N curves for unnotched 4130 alloy steel sheet normalized, longitudinal direction.

#### Correlative Information for Figure 2.3.1.2.8(a)

Product Form: Sheet, 0.075 inch thick

Properties: TUS, ksi 117 TYS, ksi 99 Temp., °F RT

Specimen Details: Unnotched  
2.88-3.00 inches gross width  
0.80-1.00 inch net width  
12.0 inch net section radius

Surface Condition: Electropolished

References: 3.2.3.1.8(a) and (f)

[Caution: The equivalent stress model may provide unrealistic life predictions for stress ratios beyond those represented above.]

Test Parameters:

Loading - Axial  
Frequency - 1100-1800 cpm  
Temperature - RT  
Environment - Air

No. of Heats/Lots: Not specified

Equivalent Stress Equations:

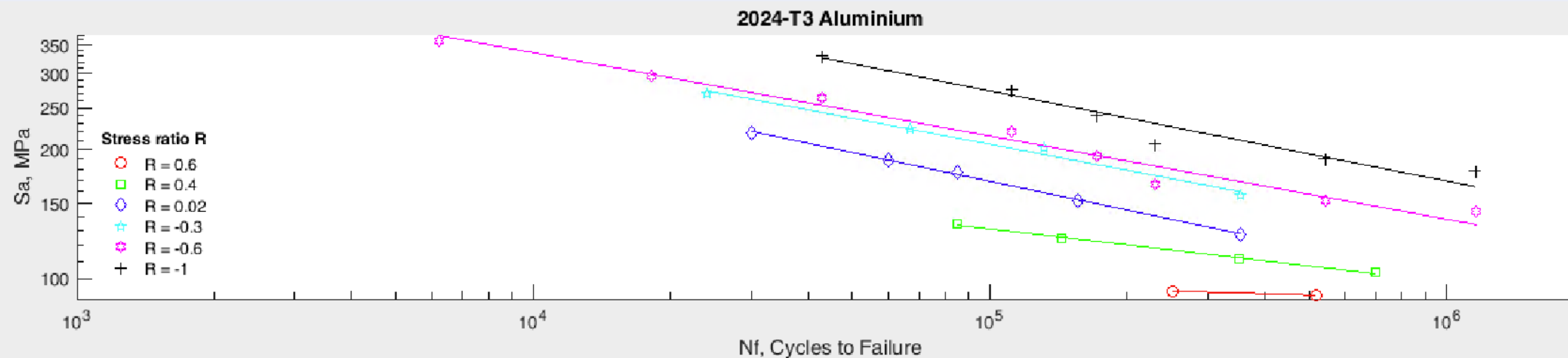
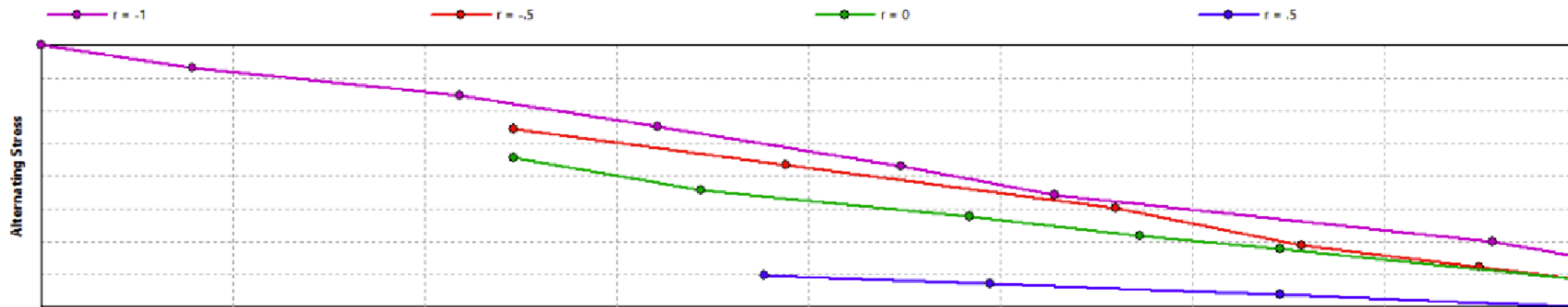
For stress ratios of -0.60 to +0.02  
 $\log N_f = 9.65 - 2.85 \log (S_{eq} - 61.3)$   
 $S_{eq} = S_{max} (1-R)^{0.41}$   
Std. Error of Estimate,  $\log (\text{Life}) = 0.21$   
Standard Deviation,  $\log (\text{Life}) = 0.45$   
 $R^2 = 78\%$

Sample Size = 23

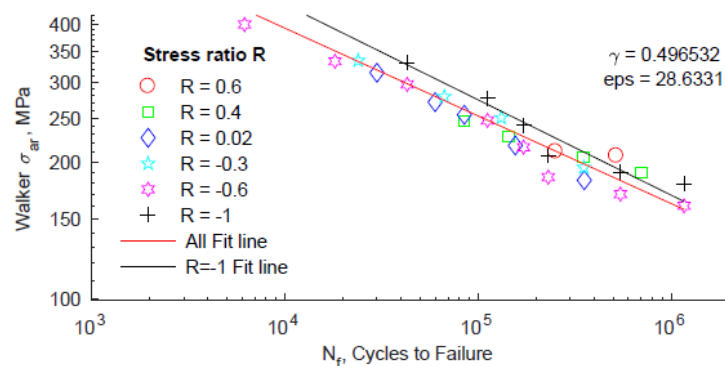
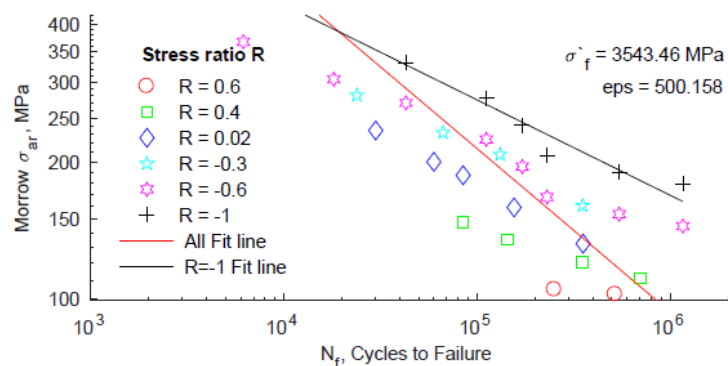
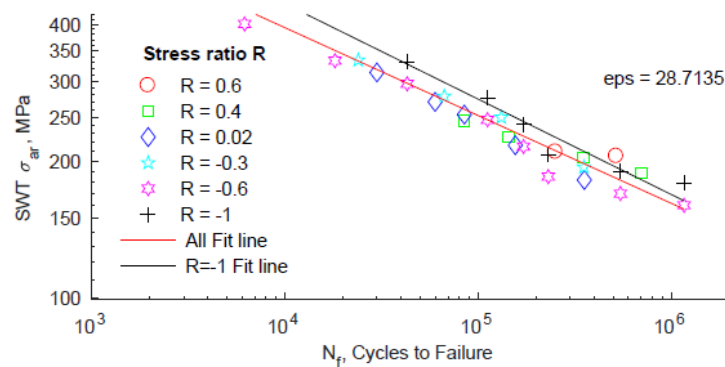
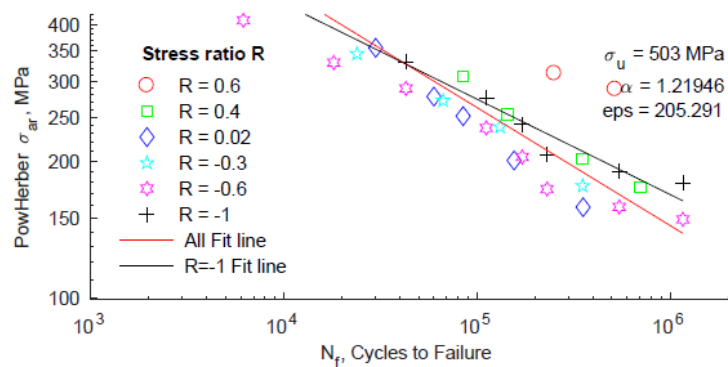
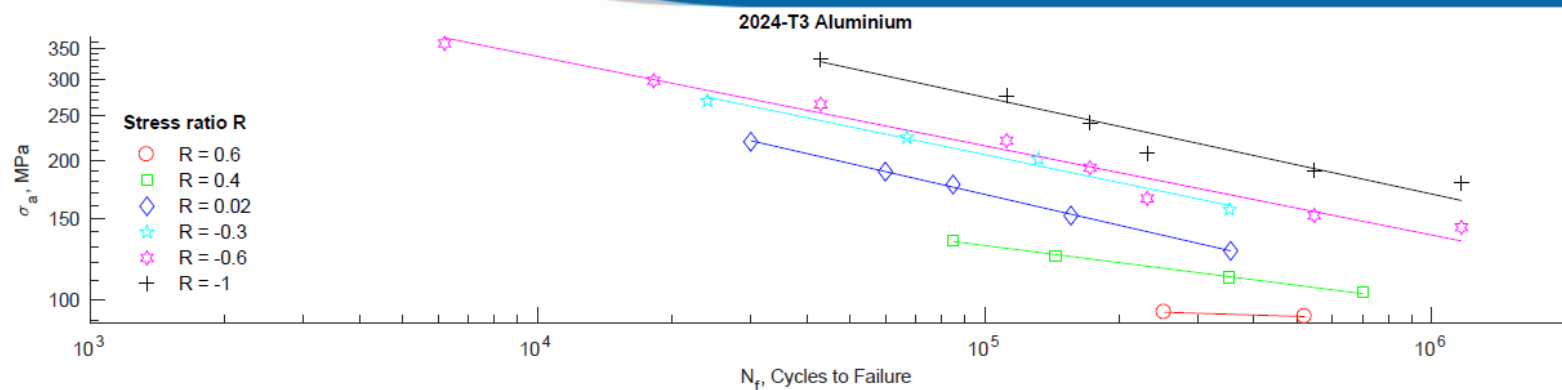
For a stress ratio of -1.0  
 $\log N_f = 9.27 - 3.57 \log (S_{max} - 43.3)$

Приближение Уолкера

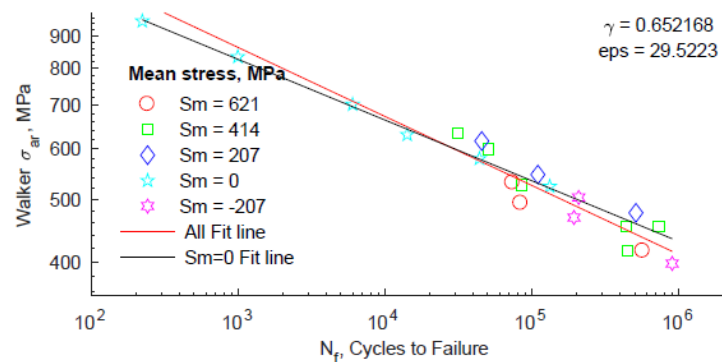
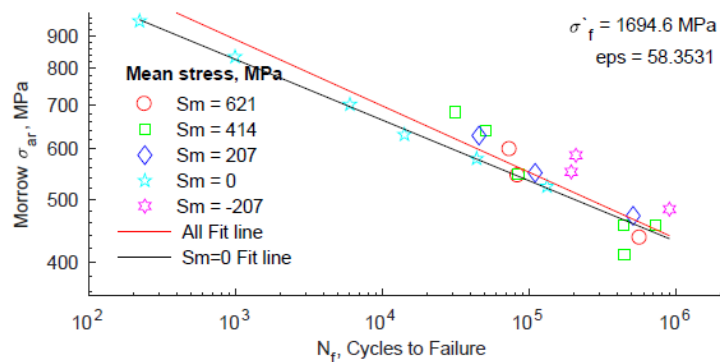
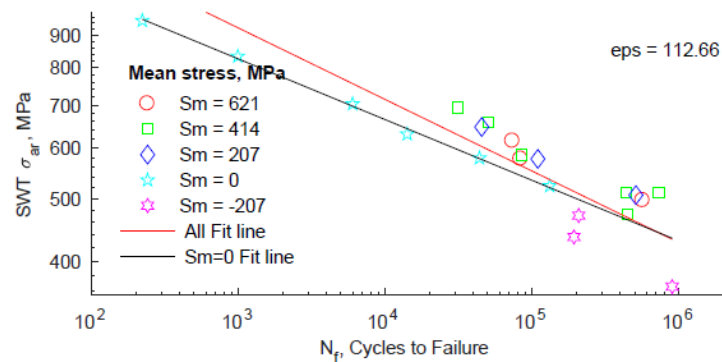
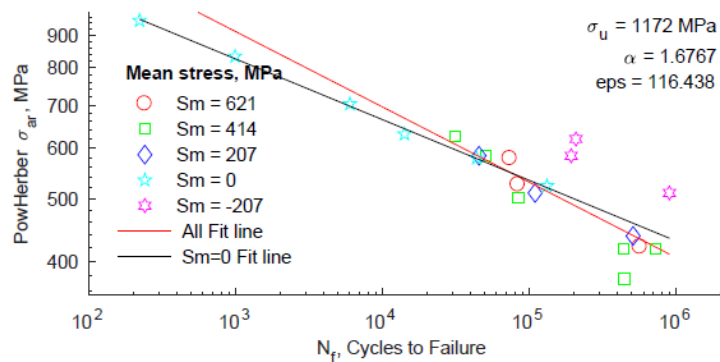
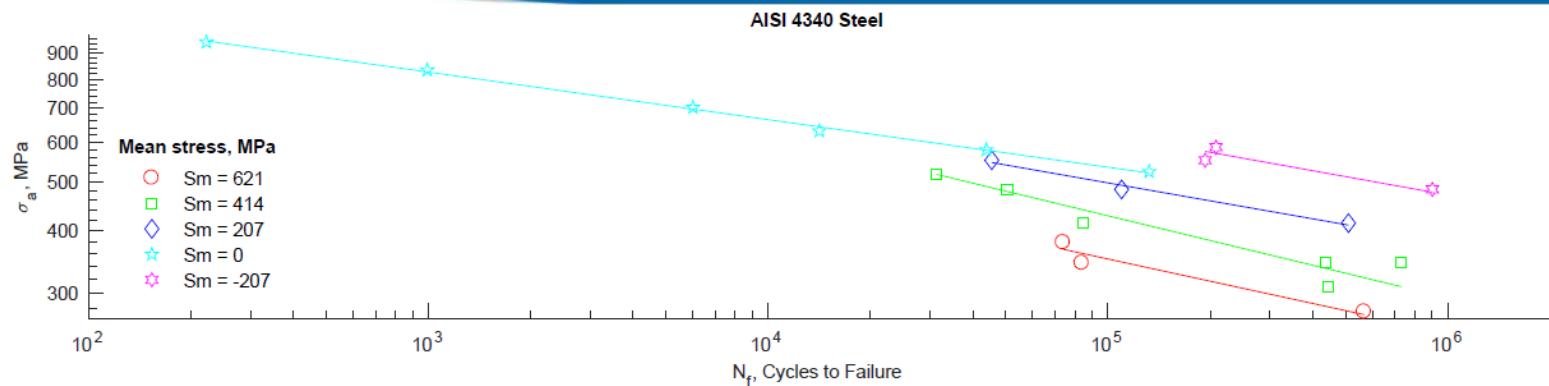
### 3 – Задание усталостных свойств материала: Сравнение диалога в ANSYS и реальных данных



# 3 – Задание усталостных свойств материала: Сравнение точности различных приближений для алюминия

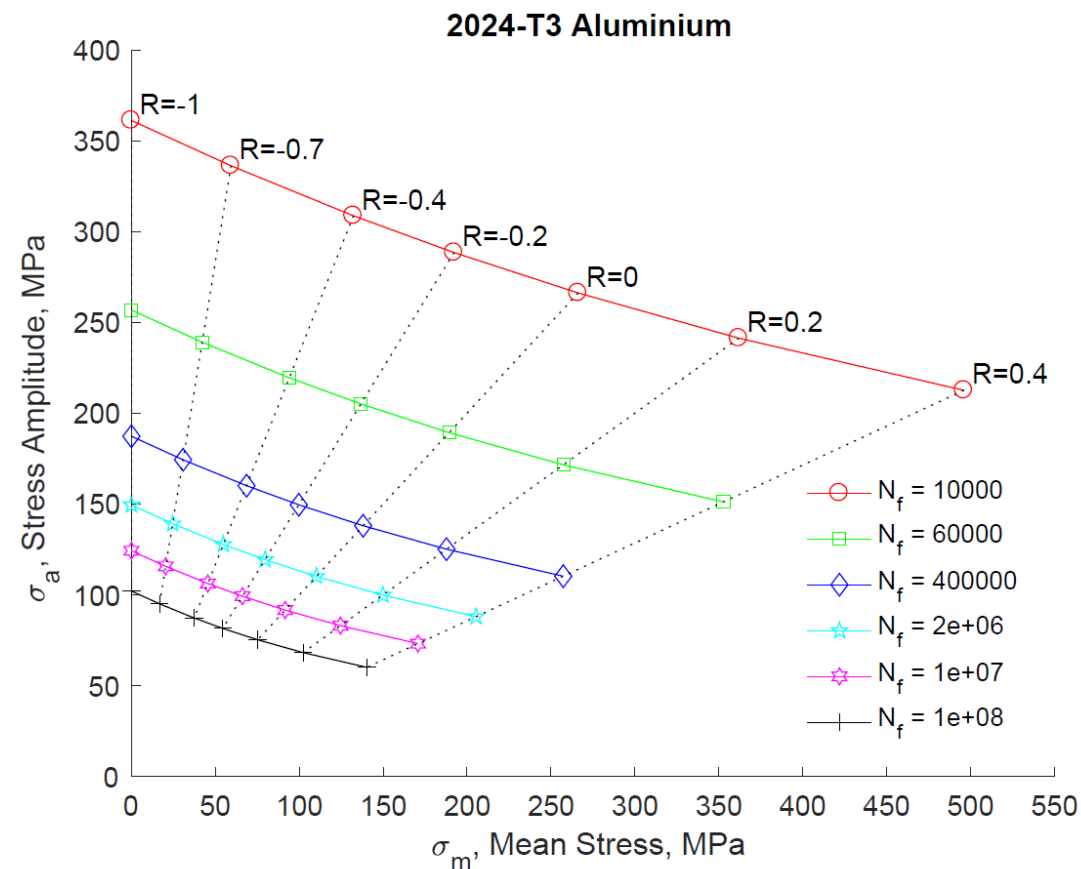
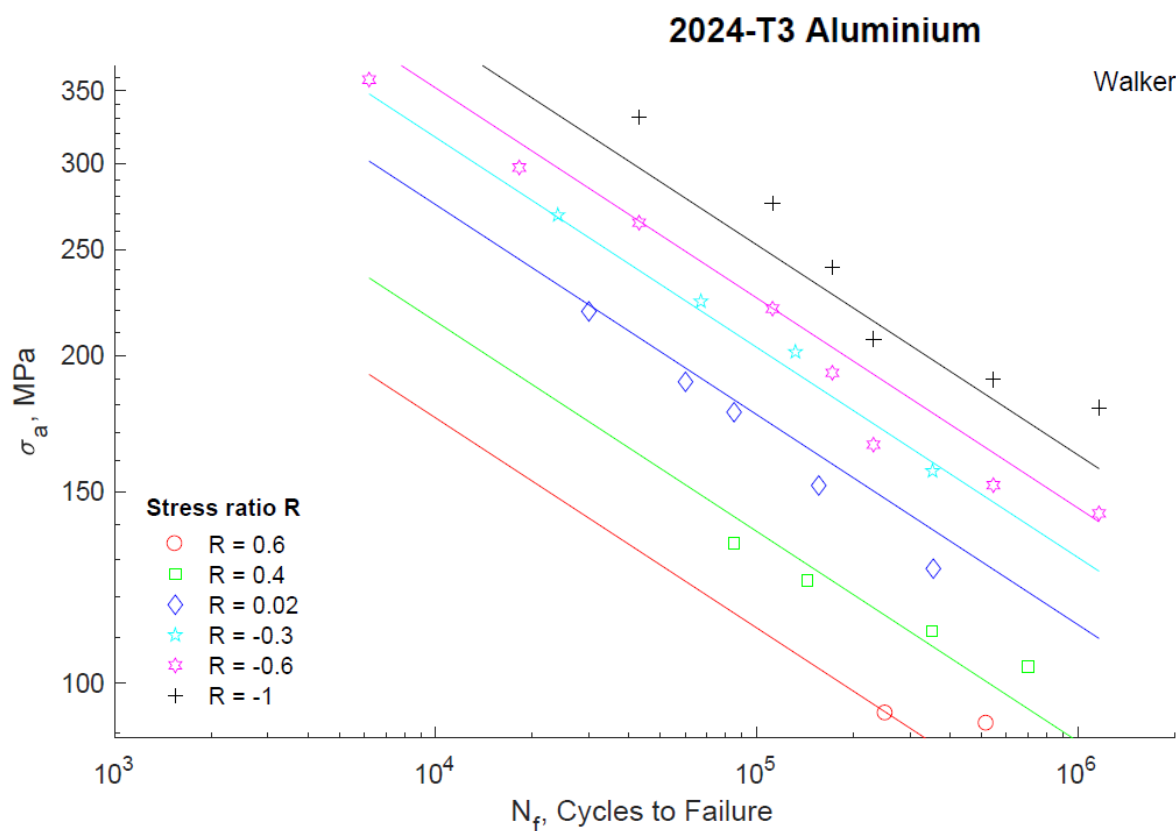


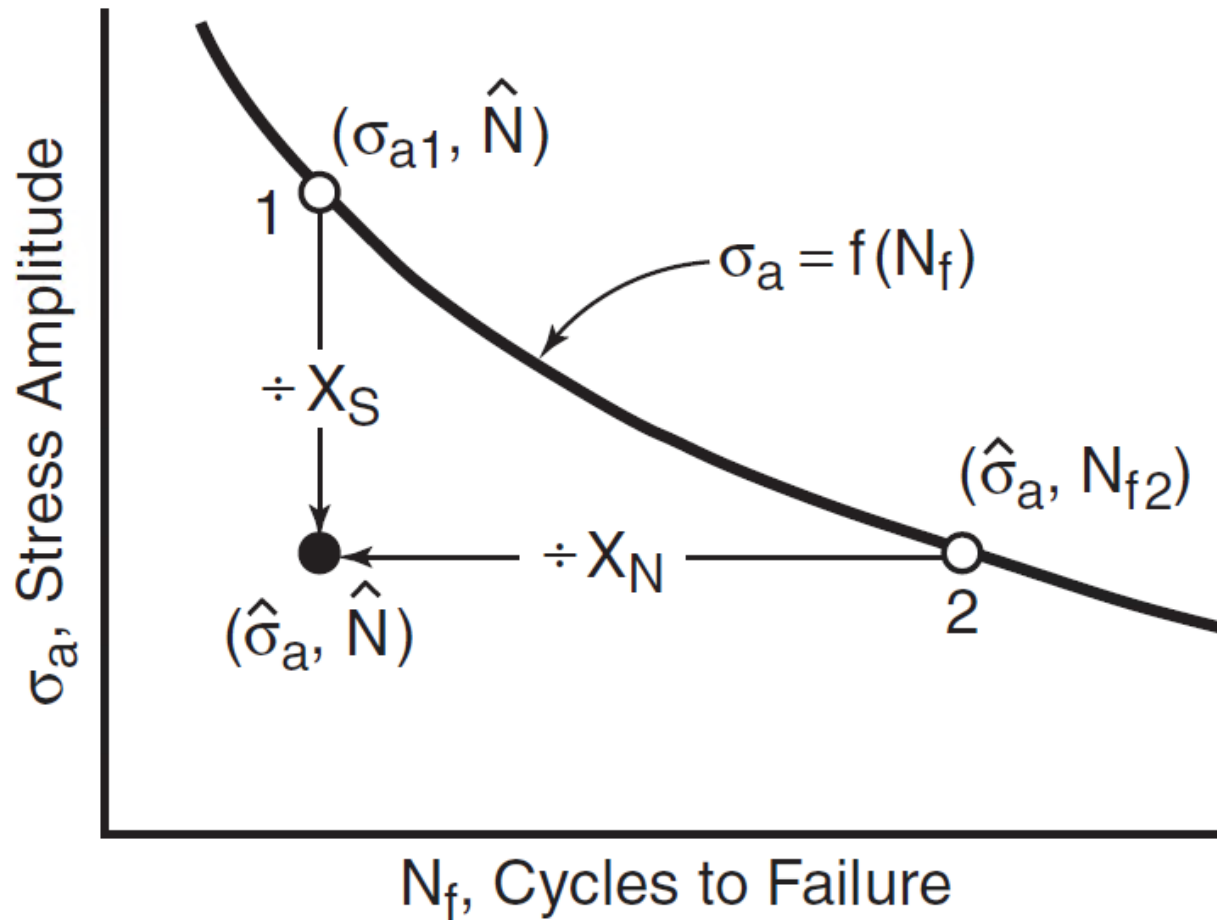
# 3 – Задание усталостных свойств материала: Сравнение точности различных приближений для стали





Синтезированные данные уравнением Walker





Рассчитанные приведённые значения:

$\hat{\sigma}_a$  - Амплитуды напряжения;

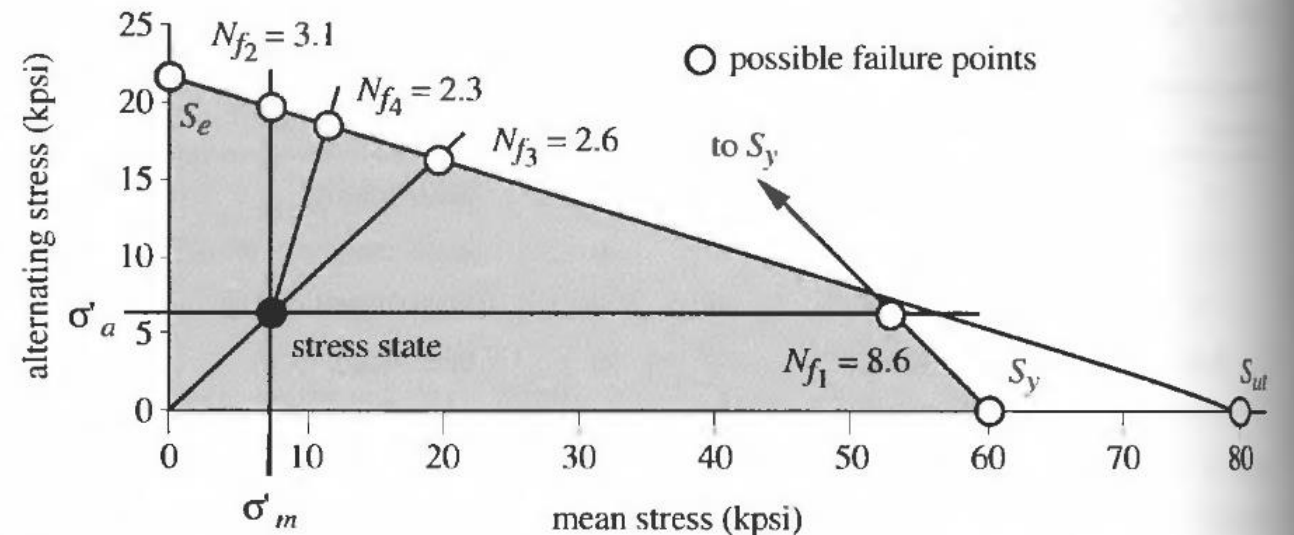
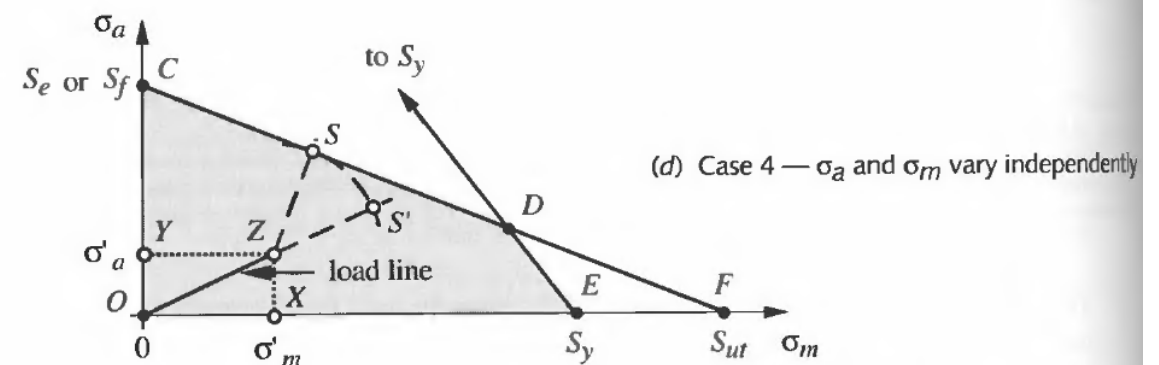
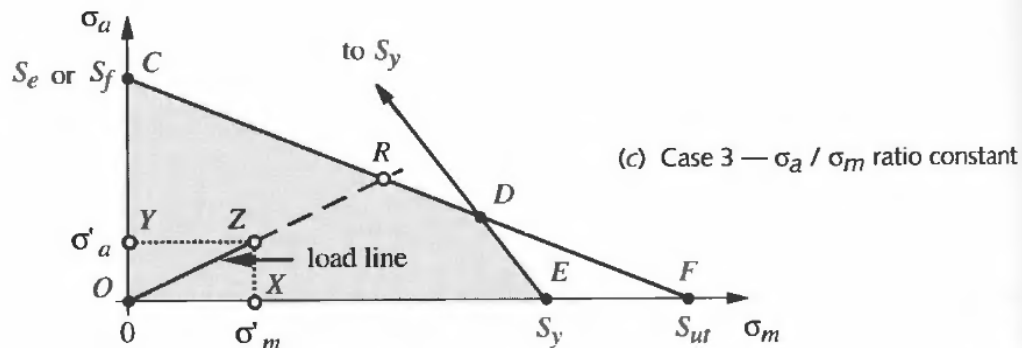
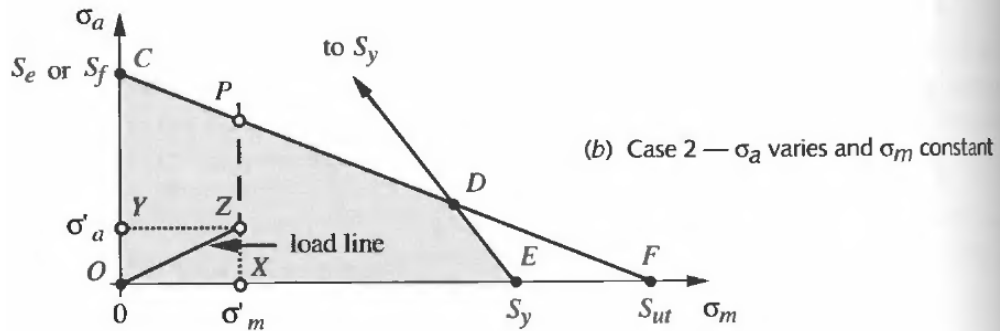
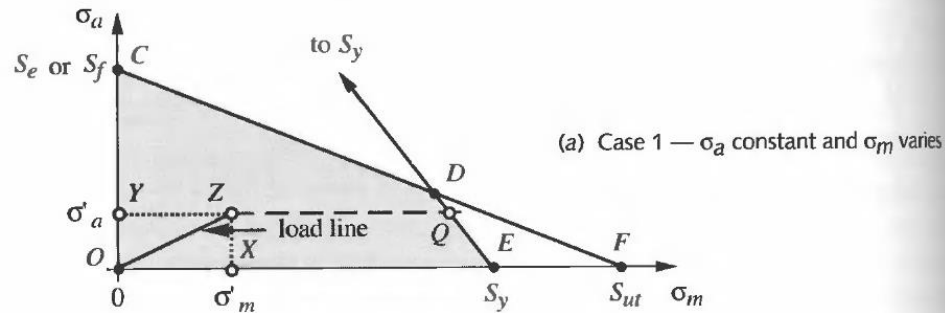
$\hat{N}$  - Числа циклов;

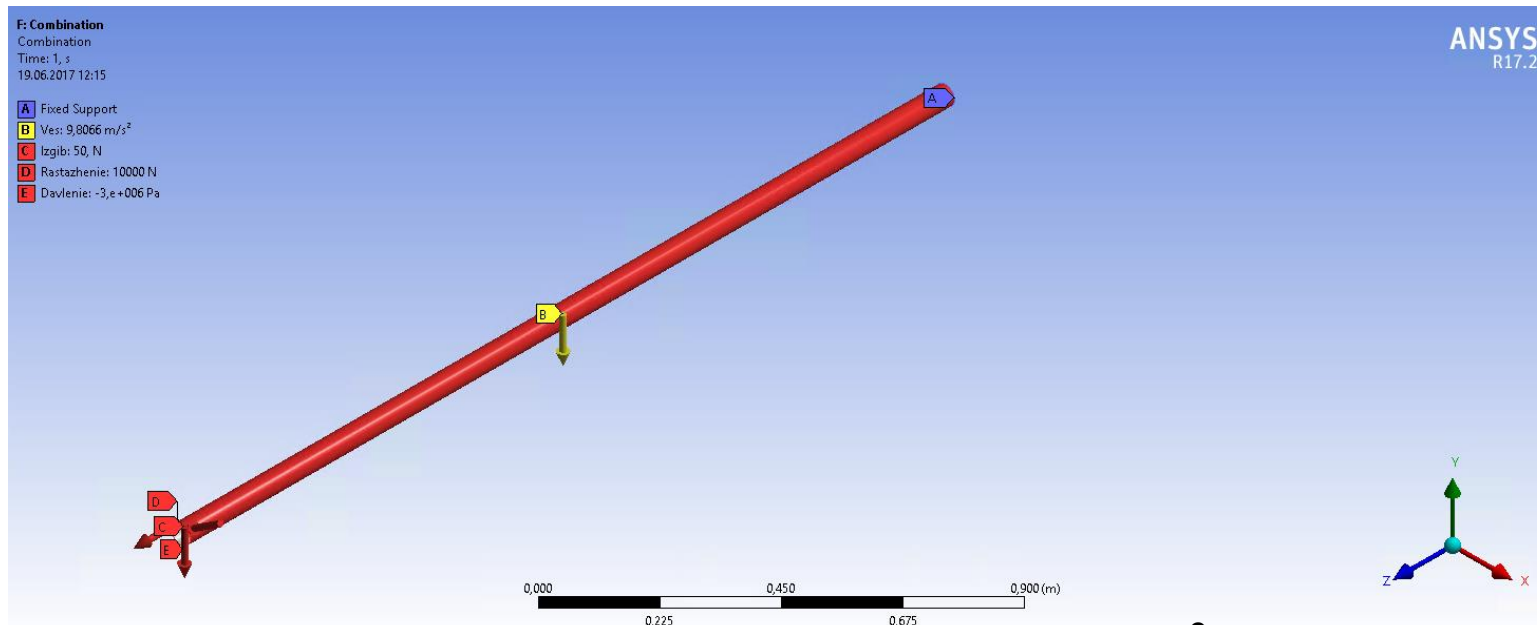
$X_S$  - Запаса по усталостной прочности;

$X_N$  - Запаса по долговечности.

## 4 – Коэффициенты запаса усталостной прочности:

На основе уравнения Гудмана для различных видов нагружений





Нагрузка
B – Вес
C – Изгиб
D – Растяжение
E – Давление
Комбинация нагрузок

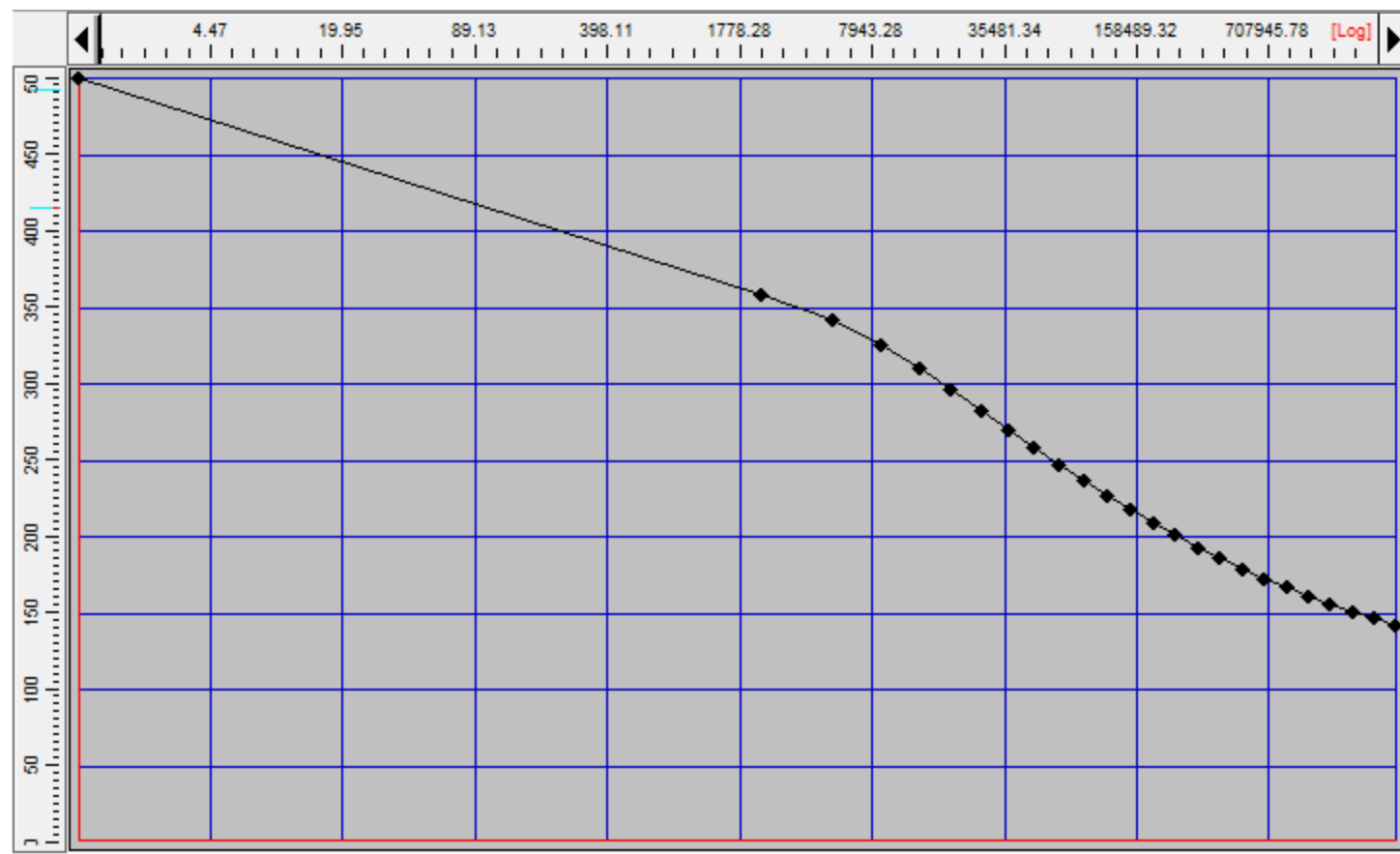
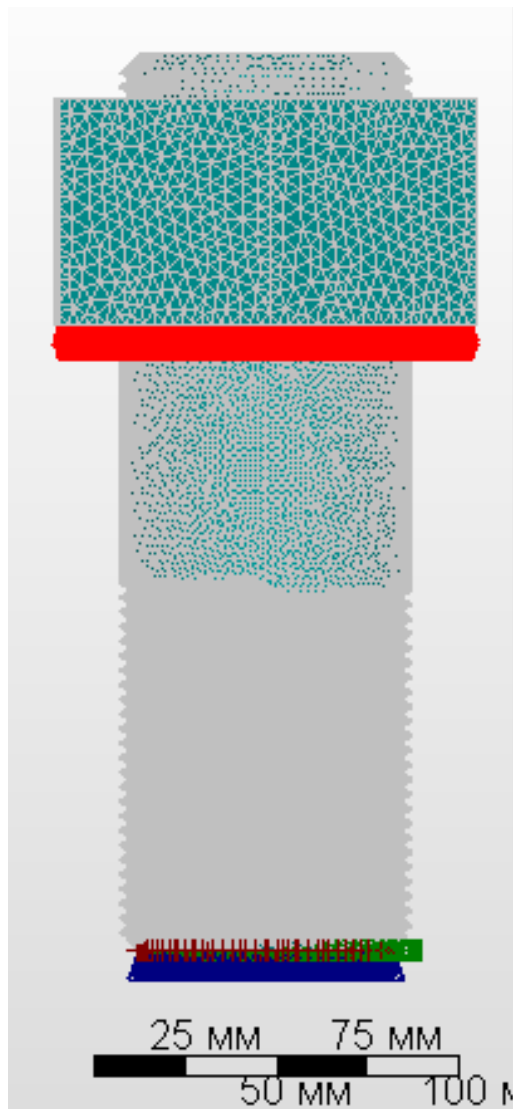
Параметры регулярных усталостных нагрузений

№ нагружения	Коэф. асимметрии $R$	Скалярный фактор	Максимум	Минимум
1	-1	11.8	11.8	-11.8
2	0	8	8	0
3	$\infty$	-13	0	-13
4	-1/2	12	12	-6

Сравнение эквивалентных по Мизесу напряжений в МПа регулярных усталостных нагружений для различных методов приведения к симметричной нагрузке

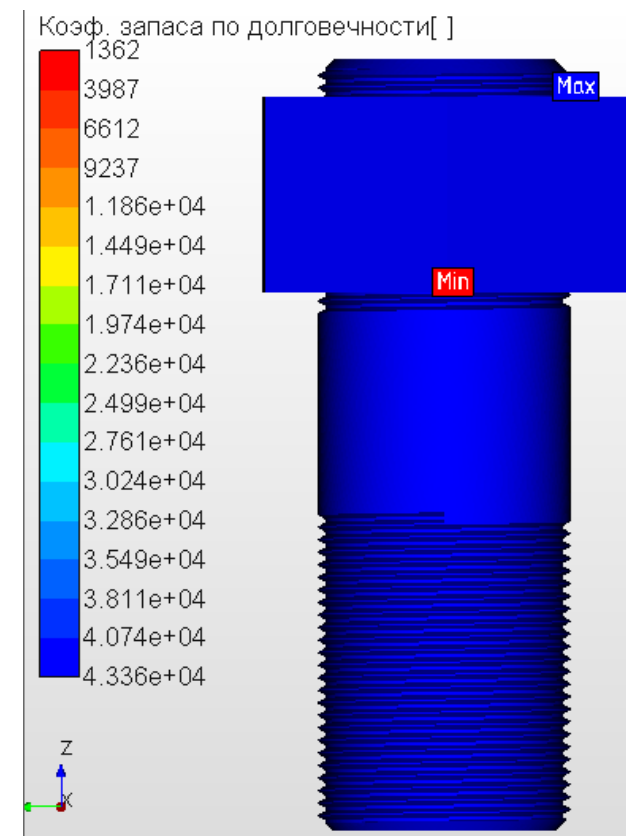
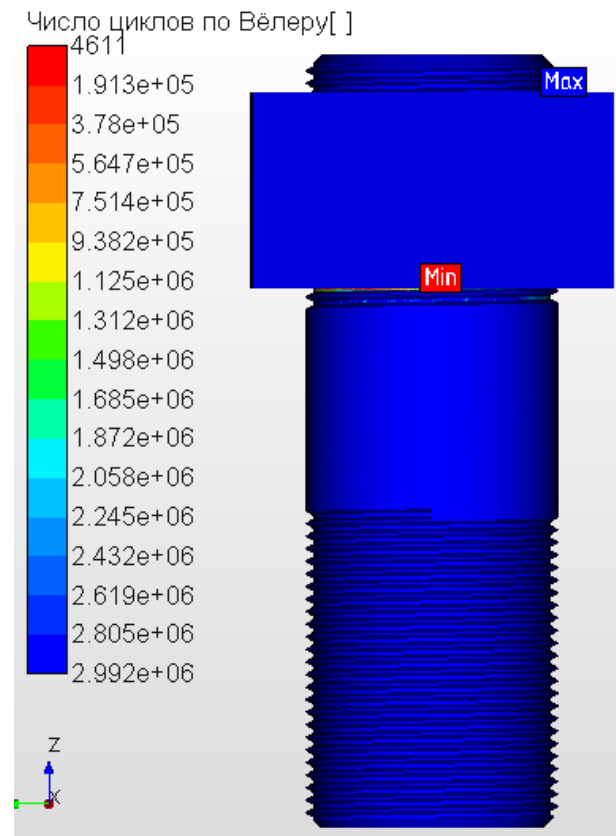
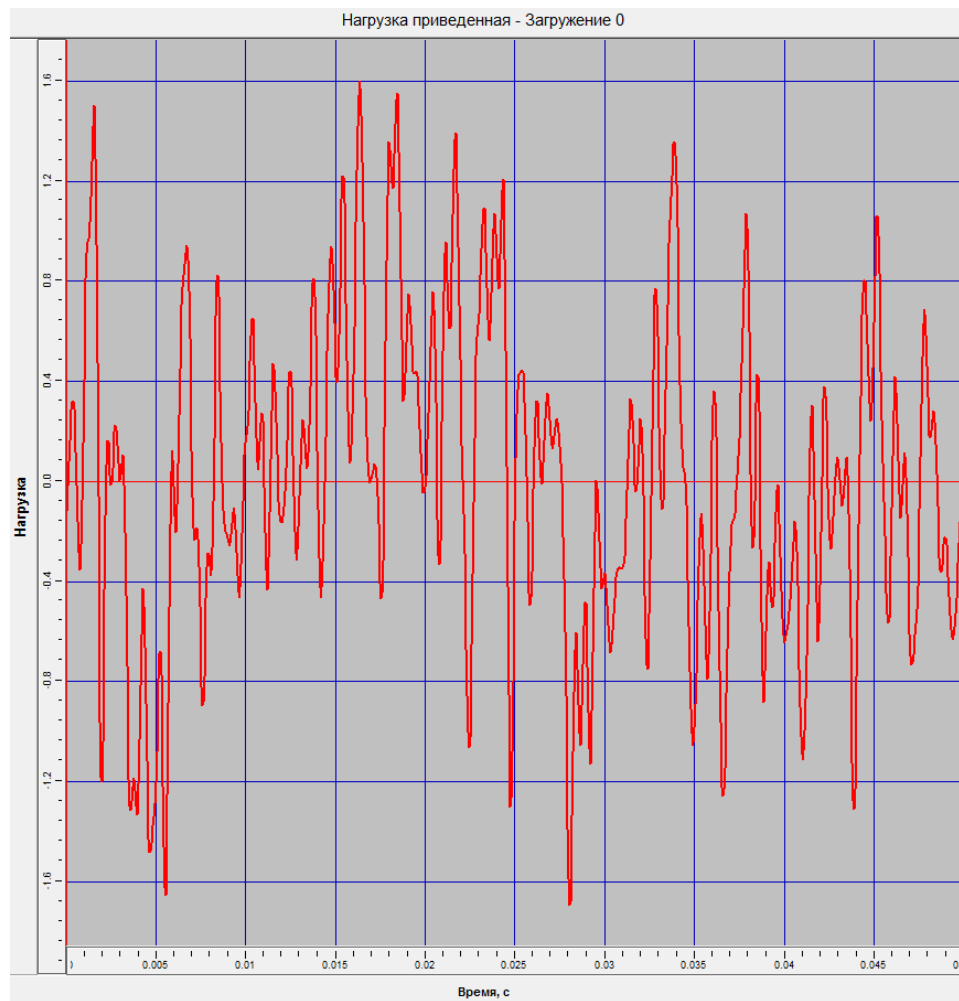
№ нагружения	R	Метод	ANSYS	Structure3D	Расхождение
1	-1	-	425,40	421,30	-0,96%
2	0	SN-none	144,20	144,40	0,14%
		Зодерберг	373,23	375,00	0,47%
		Гудман	222,44	231,10	3,89%
		Гербер	164,56	165,00	0,27%
3	$\infty$	SN-none	234,33	234,80	0,20%
		Зодерберг			
		Гудман	348,01	349,30	0,37%
		Гербер			
4	-1/2	SN-none	324,46	325,00	0,17%
		Зодерберг	601,10	603,20	0,35%
		Гудман	440,71	441,90	0,27%
		Гербер	348,72	349,40	0,19%

Кривая Вёлера





## Стохастическая нагрузка



# Спасибо за внимание!

**Компания НТЦ «АПМ»  
(научно-технический центр)  
Московская область, г. Королев  
Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6  
Тел.: (498) 600-25-10, (495) 514-84-19  
Internet: [www.apm.ru](http://www.apm.ru), [www.cae.apm.ru](http://www.cae.apm.ru)  
E-mail: [com@apm.ru](mailto:com@apm.ru)**