

***Обзор по результатам испытаний
металлических материалов
для ползучести
и длительной прочности***

Владлен Назаров

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета

ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Цилиндрические образцы
из титанового сплава ВТ6
с диаметром 5 мм и длиной 25 мм



до испытаний

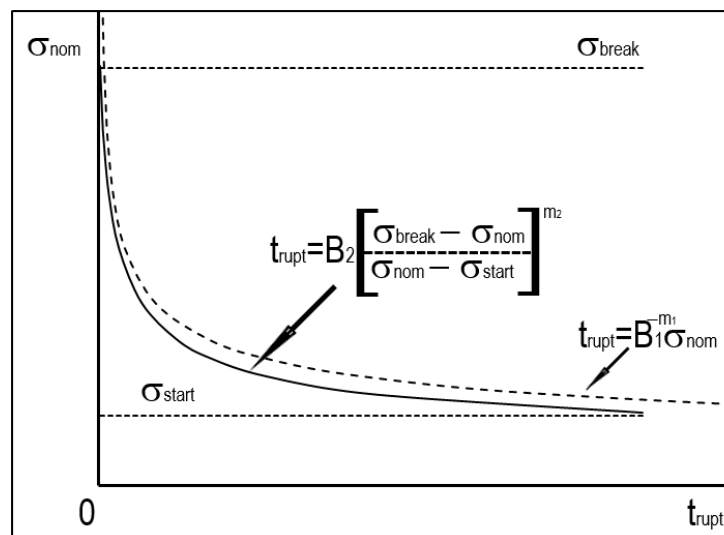


растянутые стационарной осевой
силой до различных деформированных
состояний при 650°C



после разрушения при 650°C
(Назаров В.В., 2015)

Два типа аппроксимаций



Norton F.H., Bailey R.W. (1929)

$$A_1 v_{\text{sec}}^{\text{app}} = \left[\frac{\sigma_{\text{nom}}}{\sigma_{\text{dim}}} \right]^{n_1} \quad A_1 > 0 \quad n_1 > 0$$

$$\frac{t_{\text{rupt}}^{\text{app}}}{B_1} = \left[\frac{\sigma_{\text{nom}}}{\sigma_{\text{dim}}} \right]^{-m_1} \quad B_1 > 0 \quad m_1 > 0$$

Шестериков С.А., Юмашева М.А. (1984)

$$A_2 v_{\text{sec}}^{\text{app}} = \left[\frac{\sigma_{\text{nom}} - \sigma_{\text{start}}}{\sigma_{\text{break}} - \sigma_{\text{nom}}} \right]^{n_2}$$

$$\sigma_{\text{start}} < \sigma_{\text{nom}} < \sigma_{\text{break}} \quad A_2 > 0 \quad n_2 > 0$$

$$\frac{t_{\text{rupt}}^{\text{app}}}{B_2} = \left[\frac{\sigma_{\text{break}} - \sigma_{\text{nom}}}{\sigma_{\text{nom}} - \sigma_{\text{start}}} \right]^{m_2}$$

$$\sigma_{\text{start}} < \sigma_{\text{nom}} < \sigma_{\text{break}} \quad B_2 > 0 \quad m_2 > 0$$

Суммарные погрешности

$$\Delta_v = \min \left(\sum_1^N \left| \lg \frac{v_{\text{sec}}^{\text{app}}}{v_{\text{sec}}^{\text{exp}}} \right| \right)$$

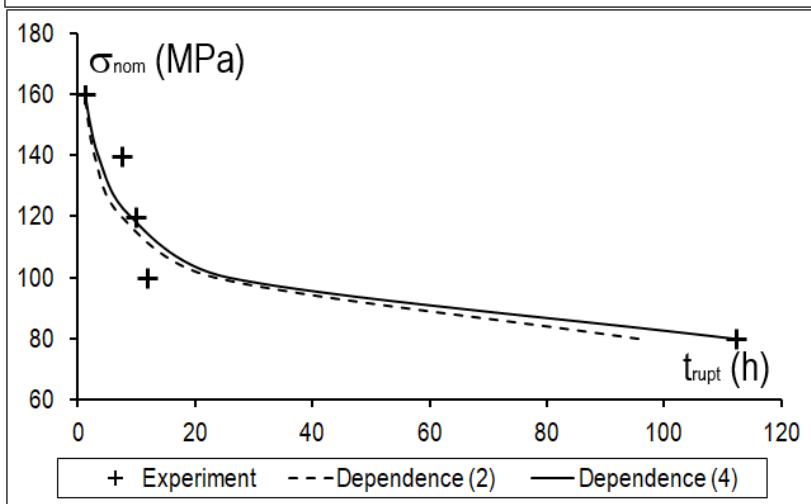
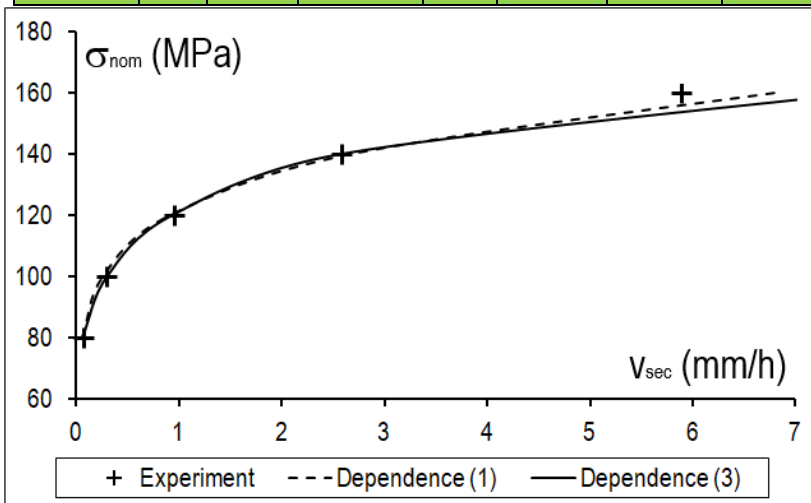
$$\Delta_t = \min \left(\sum_1^N \left| \lg \frac{t_{\text{rupt}}^{\text{app}}}{t_{\text{rupt}}^{\text{exp}}} \right| \right)$$

Установка для механических испытаний цилиндрических образцов под действием осевой силы при высокой температуре позволяет измерить текущее удлинение и зафиксировать момент времени разрушения.



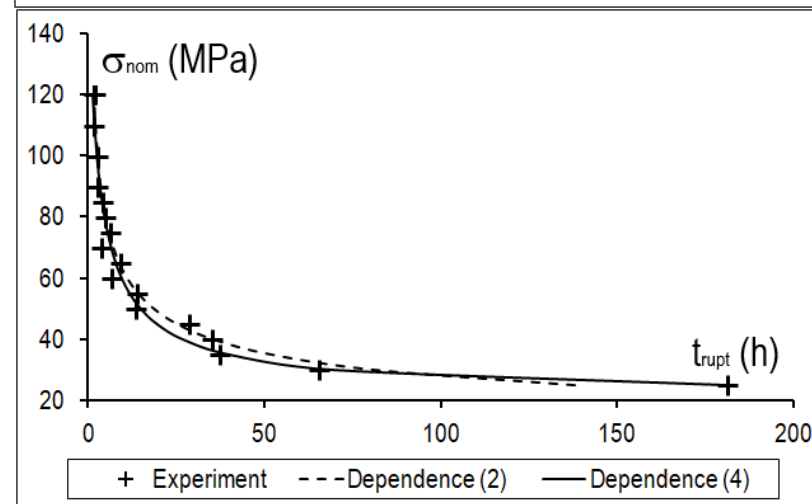
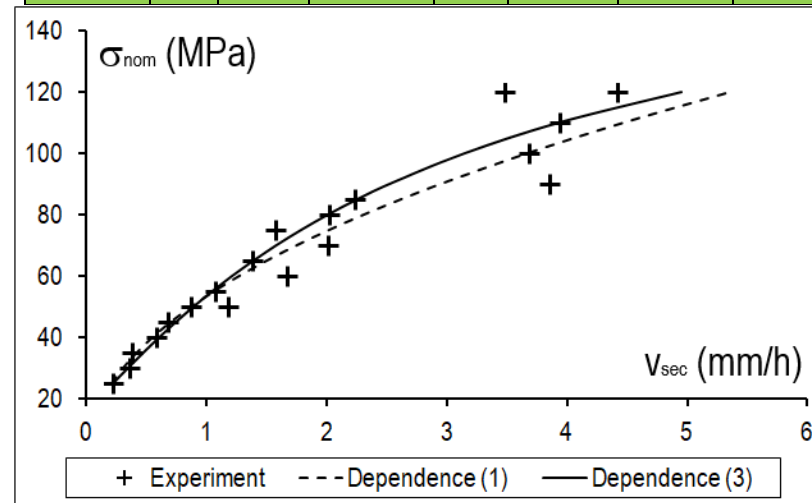
Пример применения аппроксимаций Norton F.H., Bailey R.W. и Шестериков С.А., Юмашева М.А.
 Титановый сплав ВТ5 при 650°C

$\lg A_1$ (h/mm)	n_1	$\Delta_{(1)}$	A_2 (h/mm)	n_2	σ_{start} (MPa)	σ_{break} (MPa)	$\Delta_{(3)}$
14.6	7.0	0.2	0.56	1.7	64	202	0.1
$\lg B_1$ (h)	m_1	$\Delta_{(2)}$	B_2 (h)	m_2	σ_{start} (MPa)	σ_{break} (MPa)	$\Delta_{(4)}$
14.0	6.3	0.9	5.51	1.7	60	200	0.7



Титановый сплав ВТ6 при 650°C

$\lg A_1$ (h/mm)	n_1	$\Delta_{(1)}$	A_2 (h/mm)	n_2	σ_{start} (MPa)	σ_{break} (MPa)	$\Delta_{(3)}$
3.6	2.1	1.2	0.33	0.9	17	180	1.1
$\lg B_1$ (h)	m_1	$\Delta_{(2)}$	B_2 (h)	m_2	σ_{start} (MPa)	σ_{break} (MPa)	$\Delta_{(4)}$
6.2	2.9	1.5	2.54	1.2	21	180	1.4



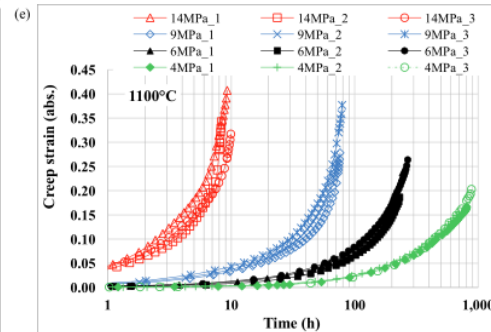
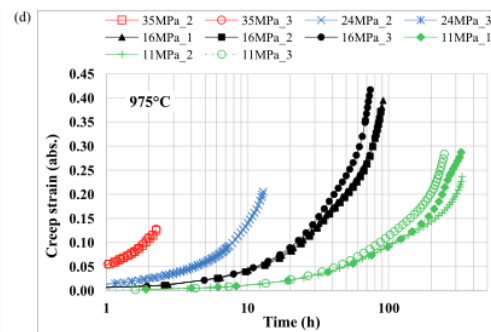
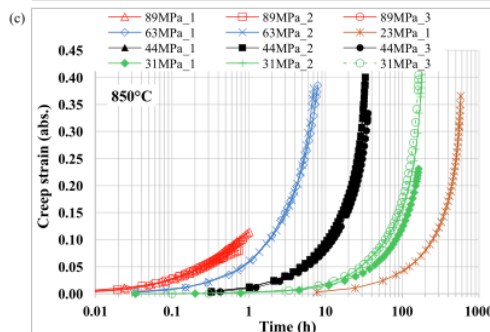
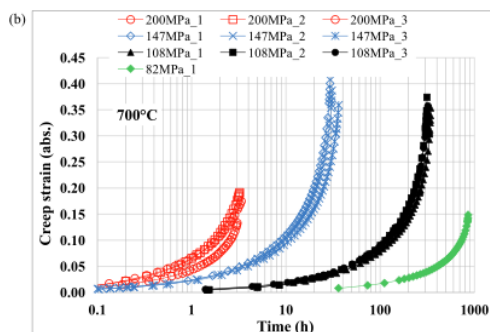
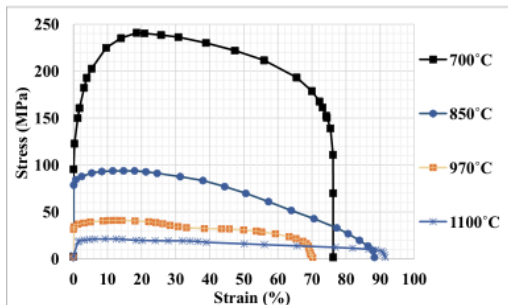
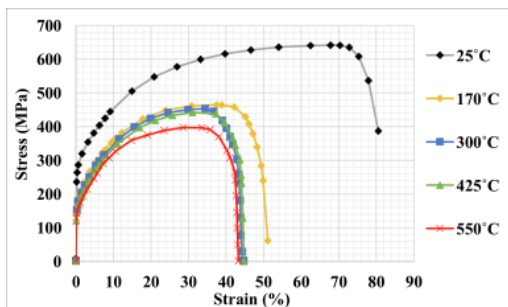
Влияние температуры на механические свойства нержавеющей стали SS304L



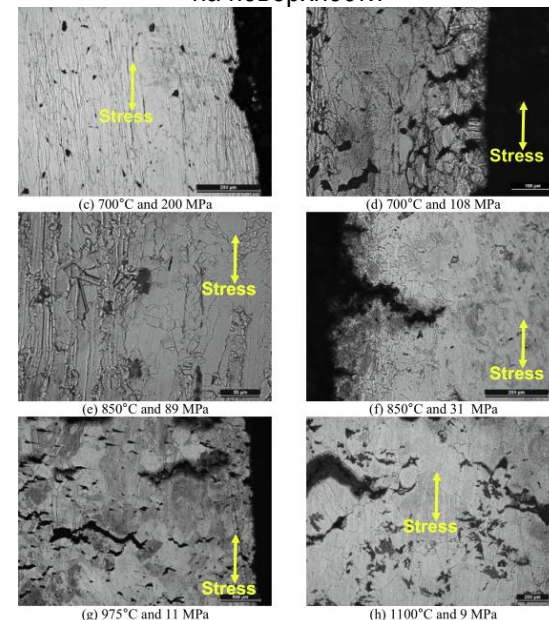
Tensile properties of SS 304L.

SN	Temp. (°C)	No. of tests	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	Uniform elongation (%)	Strain at fracture (%)
1	25	1	258.0	642.3	67.8	80.5
2	170	3	179.3 ± 7.0	473.1 ± 7.8	35.9 ± 1.8	50.4 ± 2.9
3	300	2	156.0 ± 4.2	449.7 ± 5.2	33.7 ± 1.0	44.7 ± 0.4
4	425	3	139.8 ± 5.3	436.2 ± 8.5	35.1 ± 1.3	45.1 ± 2.2
5	550	7	130.1 ± 5.3	395.9 ± 6.0	32.0 ± 3.2	43.8 ± 2.6
6	700	3	115.0 ± 3.6	226.0 ± 13.6	22.3 ± 2.3	69.7 ± 5.9
7	850	6	75.1 ± 3.7	91.9 ± 3.7	14.4 ± 2.2	86.2 ± 9.1
8	970	5	32.2 ± 3.4	40.4 ± 0.7	14.0 ± 1.7	81.6 ± 12.2
9	1100	5	17.9 ± 0.9	21.6 ± 0.4	10.6 ± 1.0	86.7 ± 6.2

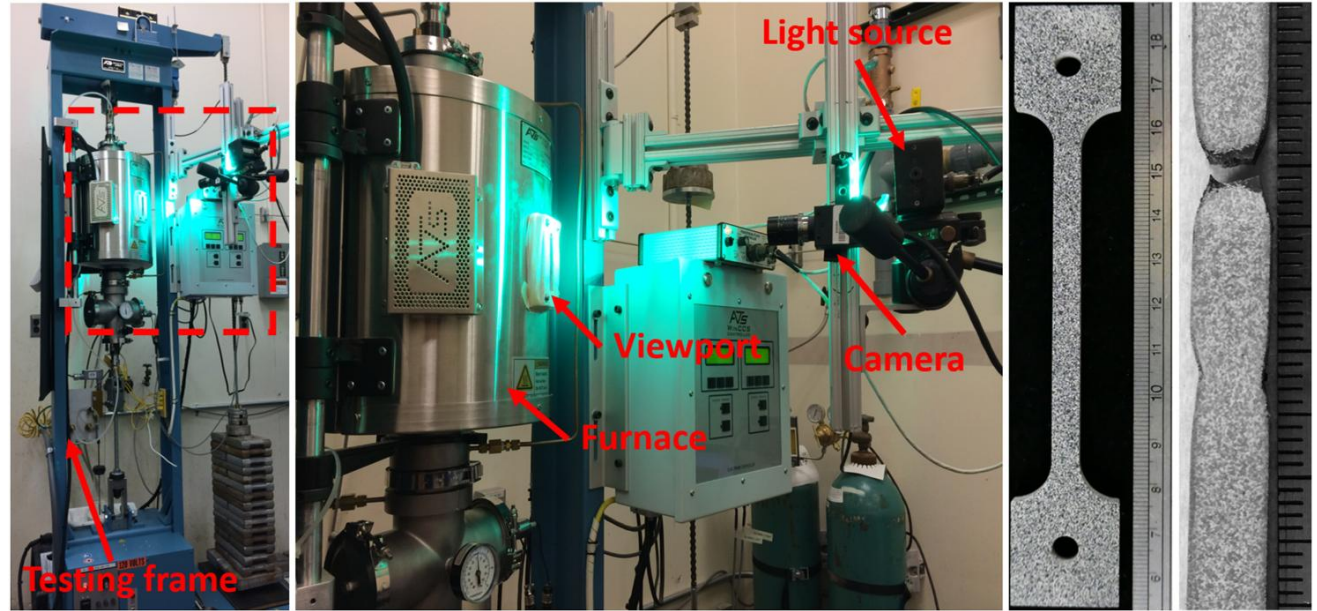
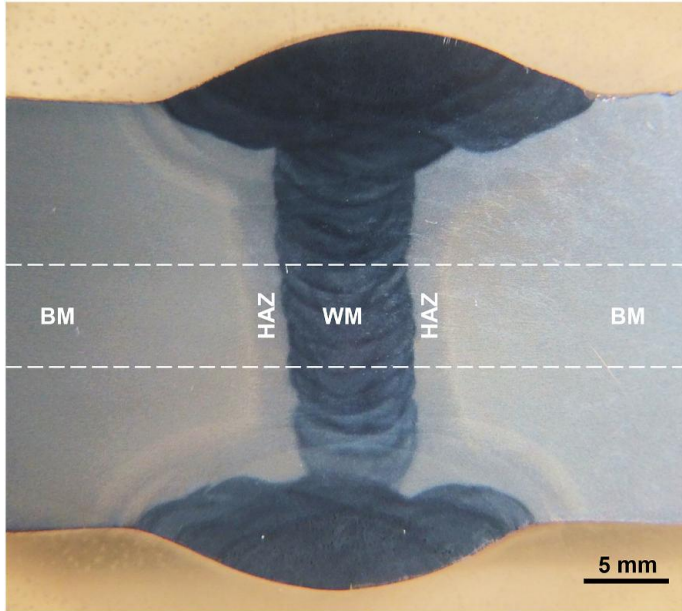
Mohta K. (2020)



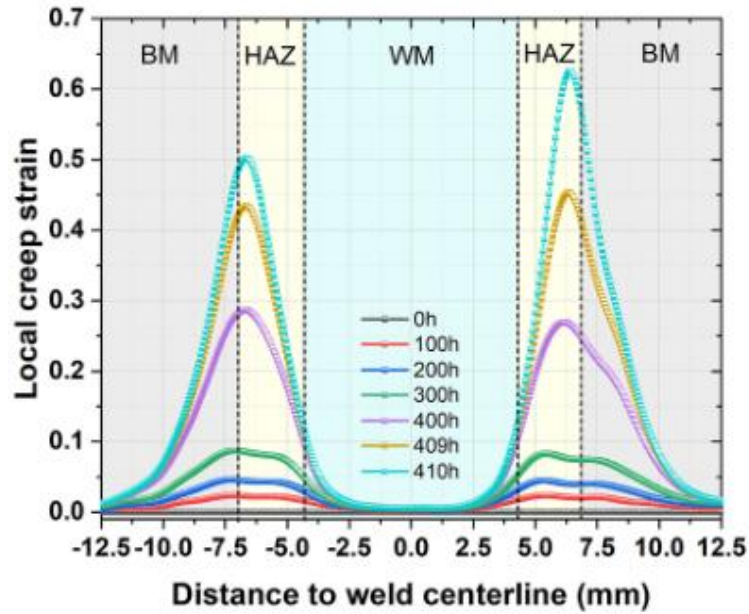
Образование коррозионных микротрещин на поверхности



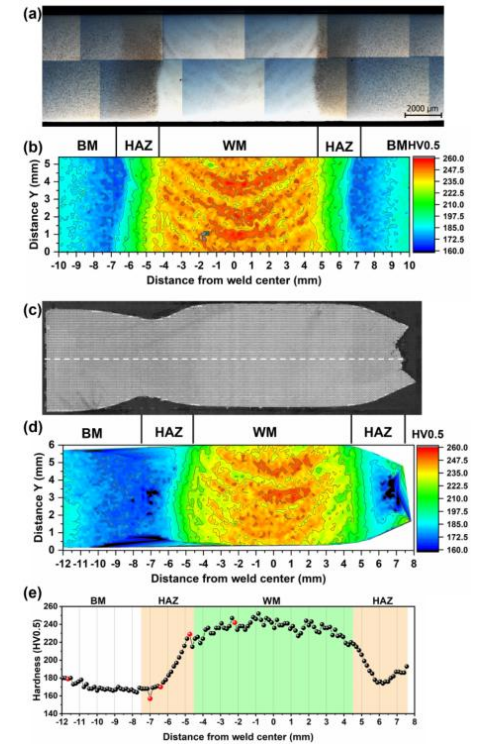
Исследование локализованной деформации ползучести в сварном шве



Пластина со сварным швом:
 BM – основной материал (сталь 9Cr-1Mo)
 HAZ – область нагрева от газовой вольфрамовой дуговой сварки
 WM – материал шва (Wang Y., 2021)



Продольный размер образца: 70 мм
 Условия испытаний: 135 МПа 600°C



ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

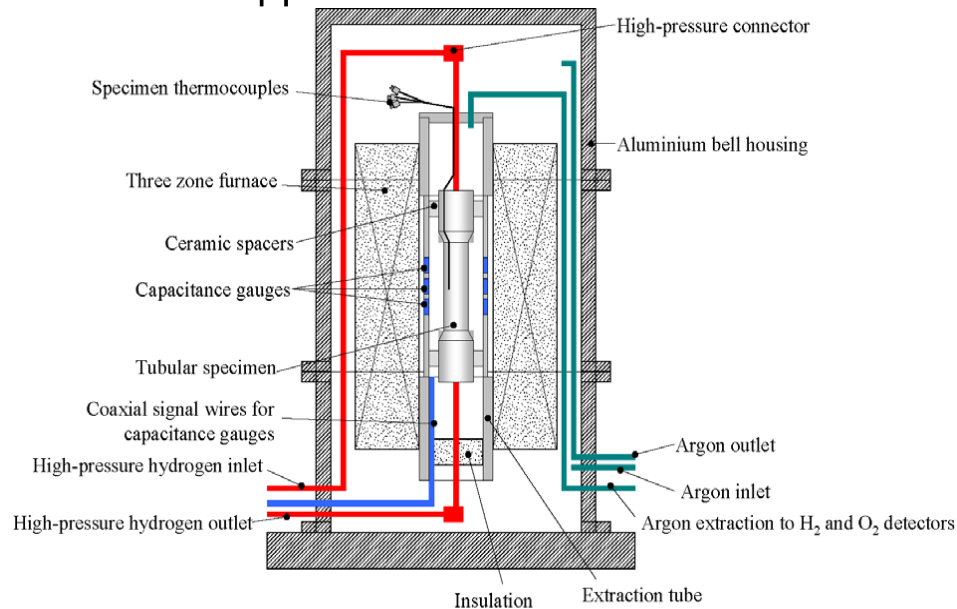


Схема установки для механических испытаний трубчатых образцов под внутренним давлением водорода при высокой температуре (Manna G., 2007)

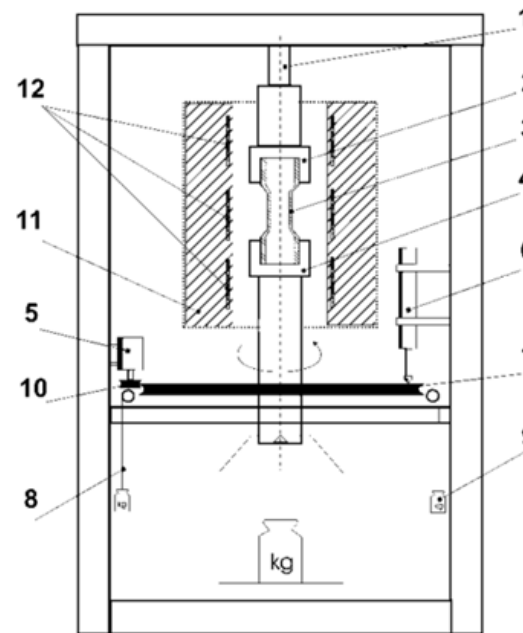
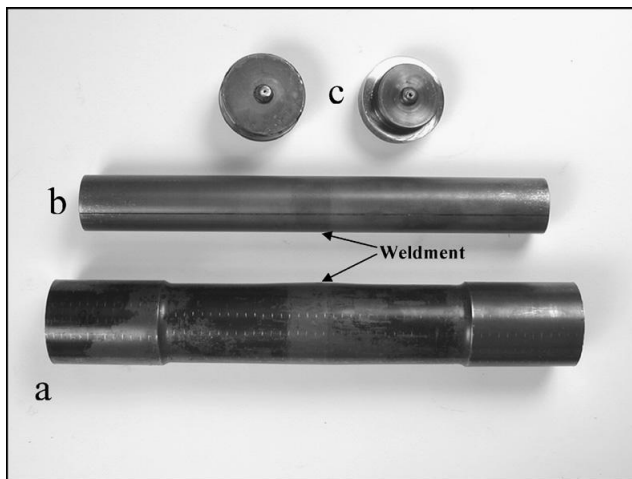


Схема установки для механических испытаний трубчатых образцов под действием осевой силы и крутящего момента при высокой температуре (НИИ механики МГУ)



Трубчатые образцы после испытаний при разных отношениях нормального и касательного напряжений

Особенность титанового сплава VT1-0 при 550°C – большие углы поворота от 80 до 260 град!
(Назаров В.В., 2017)



Элементы трубчатого образца 2.25 Cr-1Mo с кольцевым сварным швом по середине после испытаний под внутренним давлением 18 МПа водорода при 570°C

- 1 – ходовой винт для регулирования положения образца в печи
- 3 – трубчатый образец
- 2, 4 – верхняя и нижняя тяги
- 5, 6 – датчики угловых и линейных перемещений
- 7 – крутильный диск
- 8 – трос
- 9 – груз
- 11 – печь
- 12 – нагревательные элементы

Выбор сложного эквивалентного напряжения для двух различных вариантов плоского напряженного состояния

Эквивалентные напряжения с одним параметром

Лебедев А.А. (1965)

$$\sigma_{eq}^1 = [1 - \beta_1] \sigma_{mises} + \beta_1 \sigma_{max} \quad 0 \leq \beta_1 \leq 1$$

Назаров В.В. (2019)

$$\sigma_{eq}^2 = [1 - \beta_2] [2\tau_{max}] + \beta_2 \sigma_{max} \quad 0 \leq \beta_2 \leq 1$$

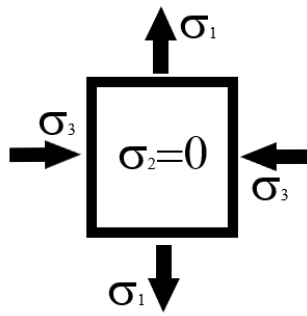
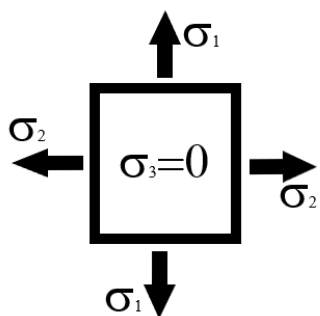
**Влияние максимального нормального и удвоенного
максимального касательного напряжений
на время в момент разрушения**

значение параметра	σ_{max}	$2\tau_{max}$
$0 \leq \beta_2 < 0.5$	слабое влияние	сильное влияние
$0.5 < \beta_2 \leq 1$	сильное влияние	слабое влияние

Вывод

$$\sigma_{eq}^1 = [1 - \beta_1] \sigma_{mises} + \beta_1 \sigma_{max}$$

$$\sigma_{eq}^2 = [1 - \beta_2] 2\tau_{max} + \beta_2 \sigma_{max}$$



Эквивалентные напряжения с одним параметром
для описания процесса длительной прочности
в зависимости от вида плосконапряженного состояния

Опытные данные для анализа

Материал	Температура (°C)	Главные напряжения
9Cr1MoVNB (сталь)	650	$\sigma_1 \geq \sigma_2 > 0$ $\sigma_3 = 0$
304 (сталь)	650	
Nimonic 80A (никелевый сплав)	750	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 = 0$ $\sigma_3 < 0$
2.25Cr1Mo (сталь)	565	
медь после отжига	264	

Суммарные погрешности
и параметры сложных эквивалентных напряжений

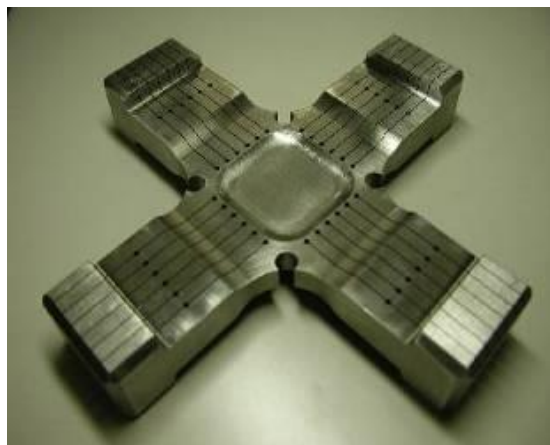
$\Delta \sigma_{max}$	$\Delta \sigma_{mises}$	$\Delta 2\tau_{max}$	$\Delta \sigma_{eq}^1$	$\Delta \sigma_{eq}^2$	β_1	β_2
0.9	0.8	0.9	0.6	0.9	0.3	любое
1.5	1.3	1.5	1.3	1.5	0.0	любое
4.3	4.3	6.6	1.6	1.7	0.5	0.6
1.6	2.5	3.2	0.7	0.7	0.7	0.8
0.6	0.5	0.3	0.5	0.3	0.0	0.0

темно-зеленый фон – наиболее благоприятные
эквивалентные напряжения

Многоосное растяжение

Неоднозначность в различии значений времени в момент разрушения для двух разных сталей

Ссылка на автора	Материал	Температура (°C)	Различие времен в момент разрушения
Sakane (2016)	Mod.9Cr1Mo (сталь)	650	$\frac{t_{rupt}^1}{t_{rupt}^2} = 1.0 \div 1.9$
Sakane (2017)	SUS304 (сталь)	650	$\frac{t_{rupt}^2}{t_{rupt}^1} = 1.8 \div 2.3$

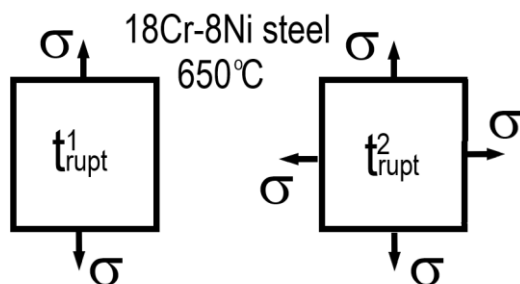


Плоский образец



Кубический образец

Sakane M. (2017)



$$\frac{t_{rupt}^2}{t_{rupt}^1} = 1.8 \div 2.3$$

$$t_{rupt}^2(\sigma_{eq}) = t_{rupt}^1(\sigma_{eq})$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_{max} = \sigma_{mises} = 2\tau_{max} = \sigma$$

Относительные удлинения для стали SUS304 при 700°C

σ_1 (МПа)	σ_2 (МПа)	σ_3 (МПа)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)	ϵ_3 (%)
80	0	0	52	-	-
80	80	0	30	28	-
80	80	80	0	0	0

Эквивалентные напряжения с возможностью описания длительной прочности при многоосном растяжении

Sakane M. (2017)

$$\sigma_{eq}^3 = \sigma_1 \left\{ 1 + \beta_3 \left[\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1} \right]^{\beta_4} \right\} \quad \beta_3 > 0 \quad \beta_4 > 1$$

Голубовский Е.Р. (2008)

$$\sigma_{eq}^4 = [1 - \beta_5] \sigma_{mises} + 3\beta_5 \sigma_h, \quad 2/3 \leq \beta_5 \leq 2$$

$$\sigma_h = [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3] / 3 - \text{гидр. давление}$$



1 2 3 creep rupture under triaxial tension

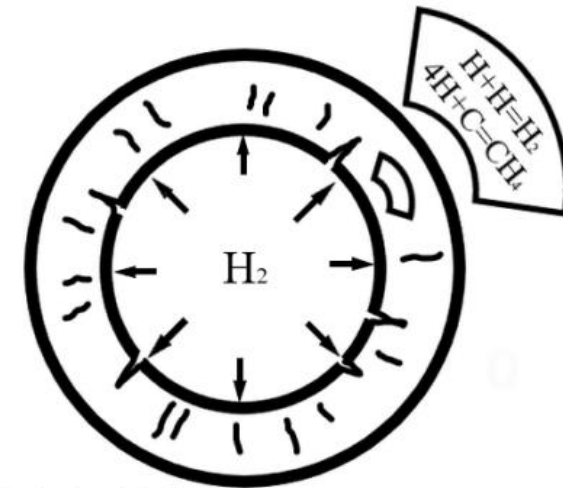
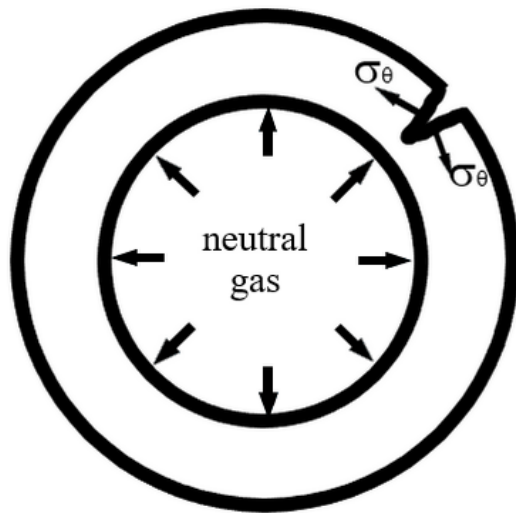
$$t_{rupt} = f(\sigma_{eq})$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \left\{ 1 + \beta_1 \left[\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1} \right]^{\beta_2} \right\}$$

Трехосное растяжение приводит к заметному уменьшению времени в момент разрушения! Процесс образования микропор происходит исключительно по границам зерен!

Различие значений времени в момент разрушения при одноосном и двухосном растяжениях

МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ПОРИСТОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ПОД ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ



heated steel tube

Особенности зарождения магистральных трещин в поперечном сечении цилиндрической трубы под действием внутреннего давления водорода в условиях ползучести при высокой температуре:

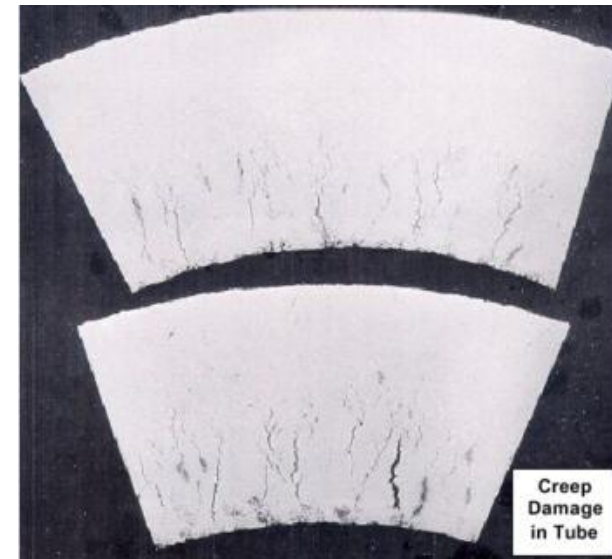
без химического взаимодействия водорода с материалом

при химическом взаимодействии водорода с карбидами стали

Поперечные срезы стальной цилиндрической трубы испытанной на ползучесть под внутренним давлением водорода (B. Shannon, C. Jaske, 2004)

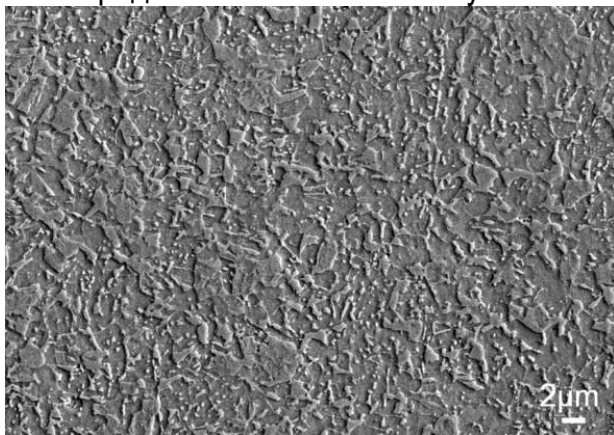
Рост магистральных трещин начинается от внутреннего граничного радиуса

▶ На следующих двух слайдах приведен экспериментальный факт, что процесс образования и роста микропор является предшественником зарождения магистральных трещин!



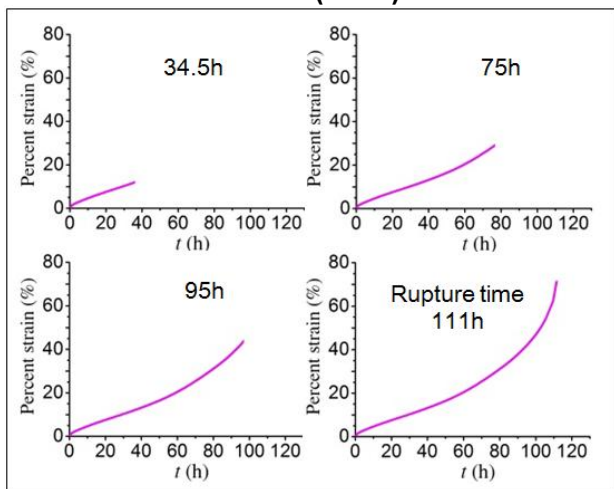
Эволюция микроструктуры стали в процессе ползучести

Микроструктура стали A508
перед испытаниями на ползучесть



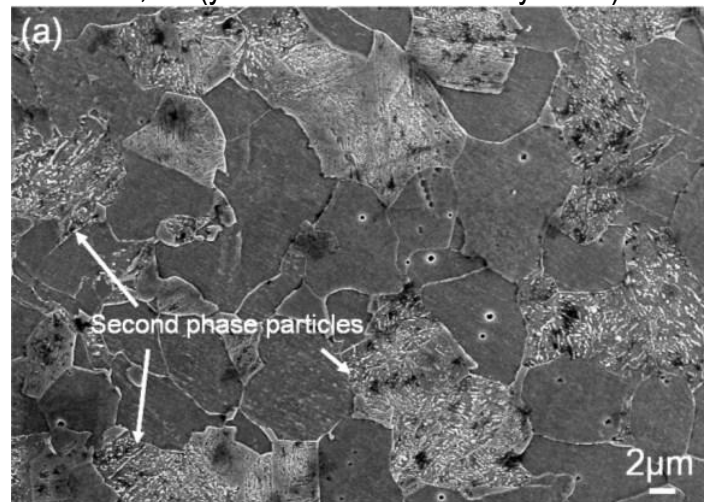
Размер зерна 1–5 мкм

Зависимости деформации удлинения от времени для стали A508 при 800°C
Xie Z. (2017)



Испытания на одноосное растяжение при 20 МПа остановлены в разные моменты времени процесса ползучести

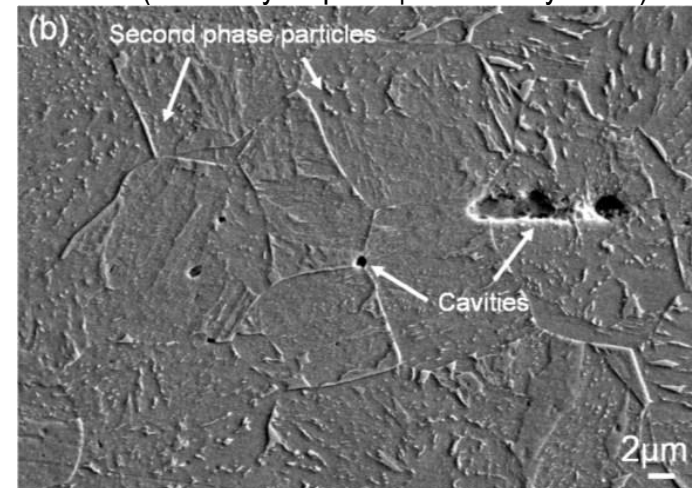
34,5 ч (установившаяся ползучесть)



Размер зерна 8 мкм

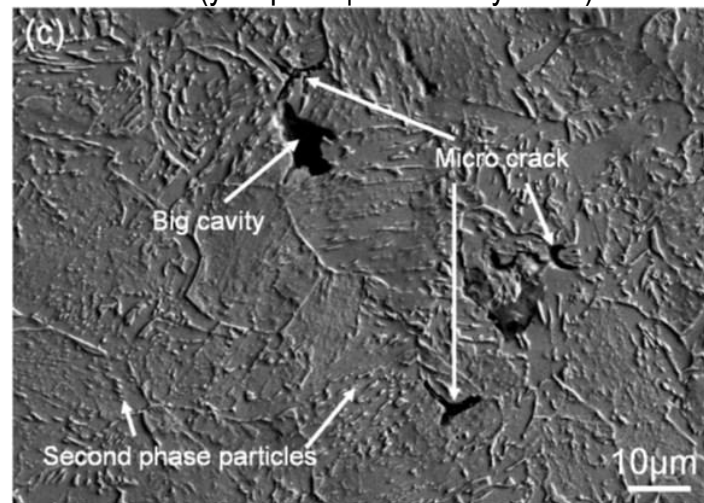
Растворение частиц вторичной фазы внутри границ зерен

75 ч (начало ускоряющейся ползучести)



Выделение карбидных частиц вторичной фазы и образование микропор вокруг крупных карбидных частиц

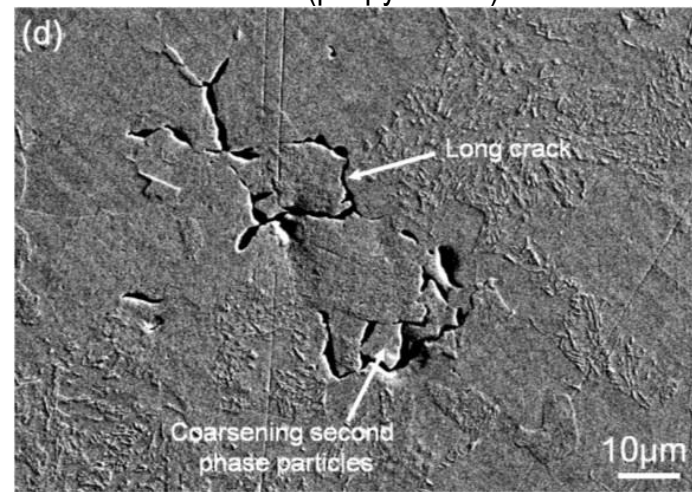
95 ч (ускоряющаяся ползучесть)



Размер зерна 20 мкм

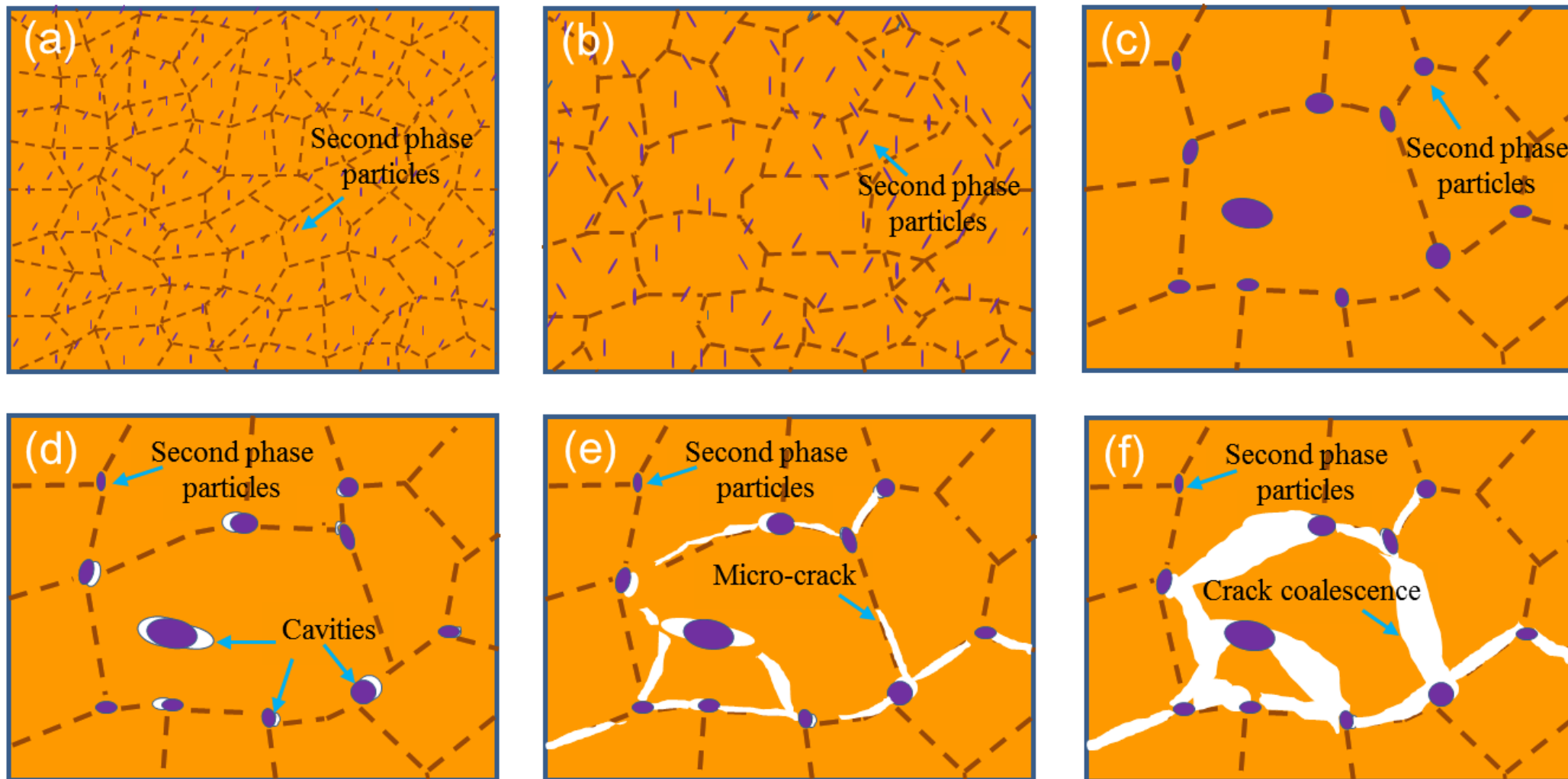
Образование больших микропор и микротрещин между микропорами

111 ч (разрушение)



Образование магистральной трещины

Схема эволюции микроструктуры стали А508 в процессе ползучести



(a) – микроструктура перед испытаниями на ползучесть

(b) – рост зерен с растворением частиц вторичной фазы внутри границ зерен

(c) – выделение карбидных частиц вторичной фазы по границам зерен и в крупных включениях

(d) – образование микропор вокруг крупных карбидных частиц вторичной фазы

(e) – образование микротрещин между микропорами

(f) – образование магистральной трещины

Уравнение для описания процесса водородной коррозии стали как один из возможных примеров, в котором используется пористость

$$p = \frac{mcT}{\omega^n} \quad c|_{t=0} = 0 \quad c|_{r=a} = \begin{cases} c_{\max} \frac{t}{t_h}, & t < t_h \\ c_{\max}, & t \geq t_h \end{cases} \quad \left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r=b} = 0$$

Уравнение
физического состояния
метана в микропорах при
обезуглероживании стали

Условия для концентрации метана

$$c_{\max} = \frac{4}{3} c_{\text{carbon}}$$

Равновесная концентрация метана

Радиальные перемещения (несжимаемый материал)

$$u_r = \sqrt{r^2 + u_b^2 + 2bu_b} - r$$

Гипотеза

$$\omega \varepsilon_{\theta} = WE$$

(пористость) × (тангенциальная деформация) =

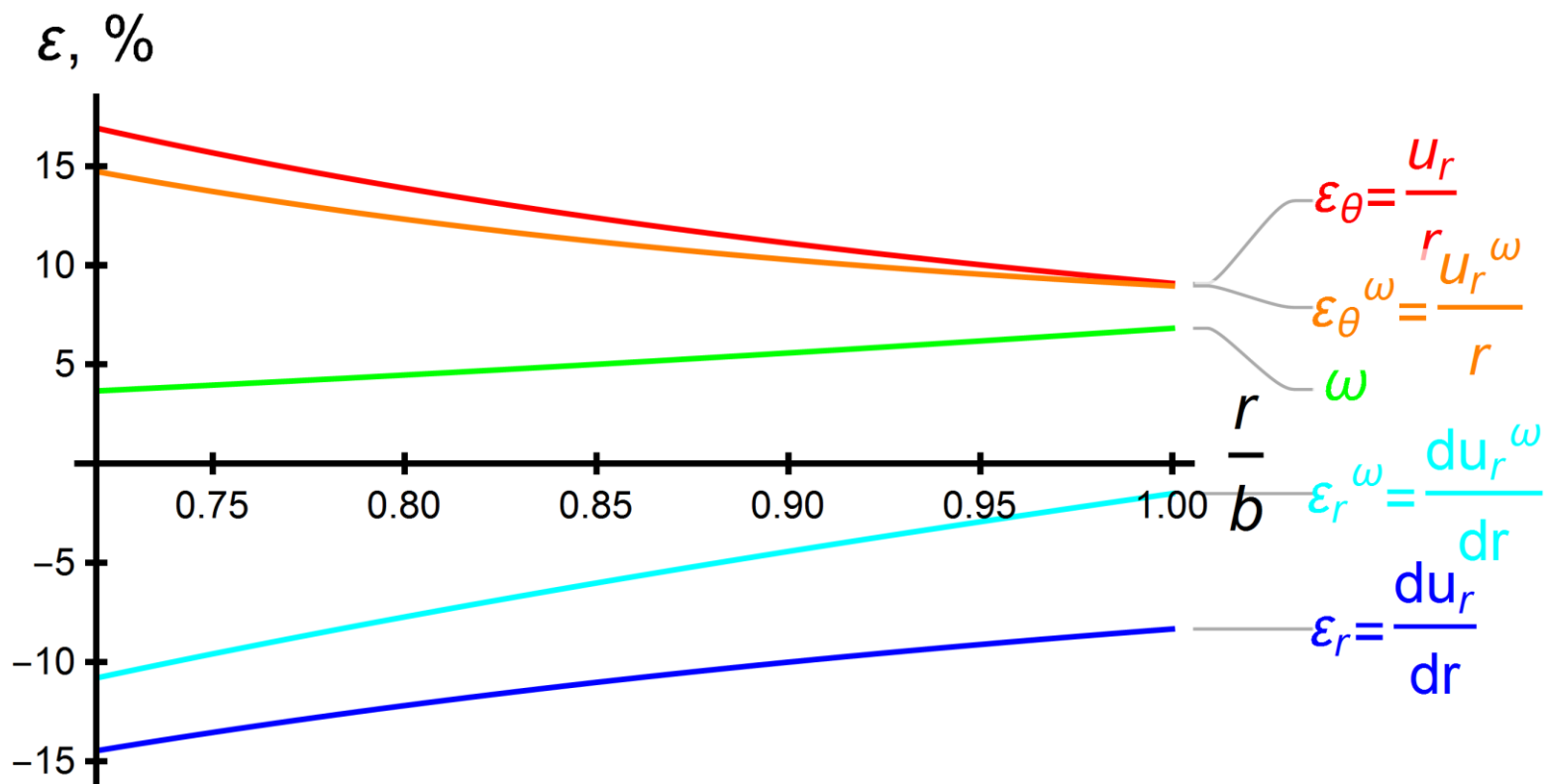
(относительное изменение площади поперечного сечения всей цилиндрической трубы) × (изменение интегрально-среднего радиуса)

Пористость

$$\omega = \frac{W}{b-a} \frac{r}{u_r} \int_a^b \frac{u_r}{R} dR$$

Разница между радиальными перемещениями
 в материале с микропорами и несжимаемом материале, где пористость
 рассматривается как относительное изменение площади элементарного кольца
 между двумя последовательными деформационными состояниями

$$u_r^\omega - u_r = \int_a^r \omega dR + u_a^\omega - u_a$$



Пористость и деформации Коши для несжимаемого материала и материала с микропорами