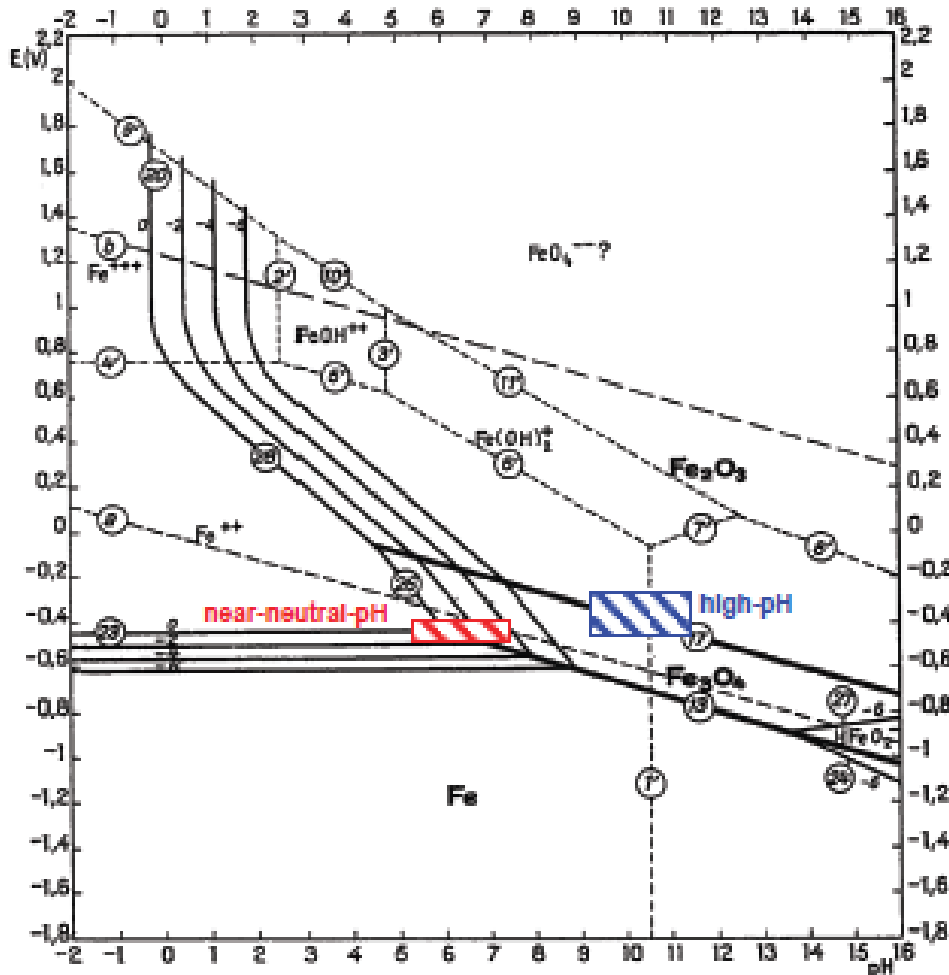


Анализ существующих моделей стресс-коррозии магистральных газопроводов и определение критических условий зарождения и развития стресс-коррозионных трещин

Т.С. Есиев, лаборатория труб ООО «Газпром ВНИИГАЗ»



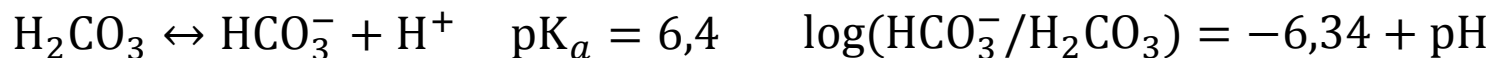
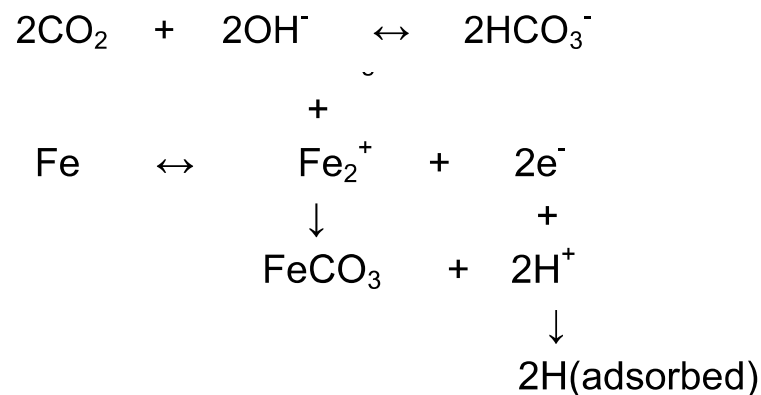
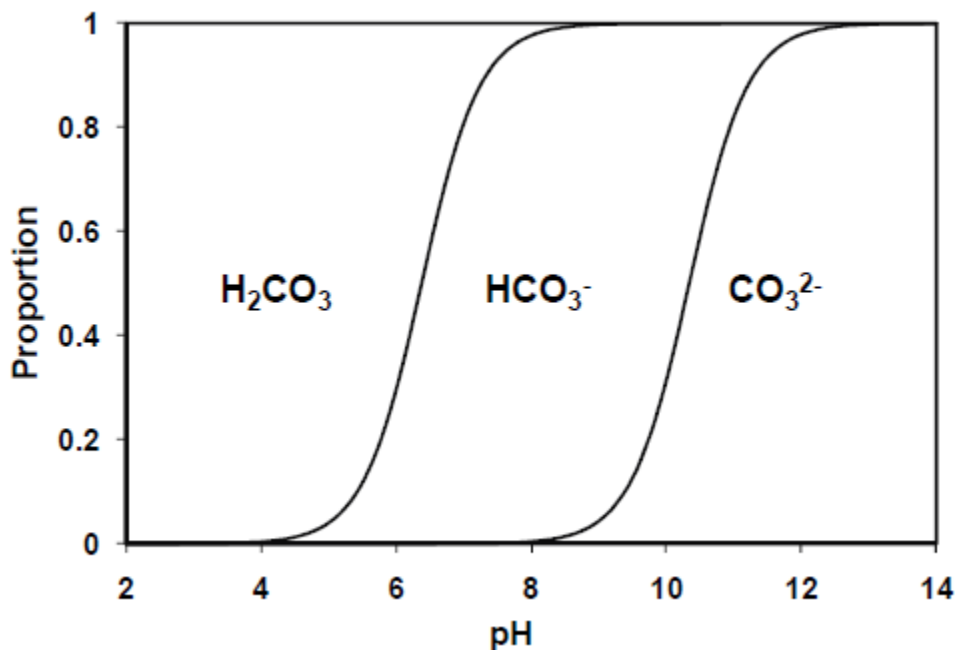
Области существования двух форм стресс-коррозии на диаграммах «Потенциал (E, В) – кислотность среды (pH)

Сопоставление основных условий протекания стресс-коррозии при высоком pH и околонейтральном pH

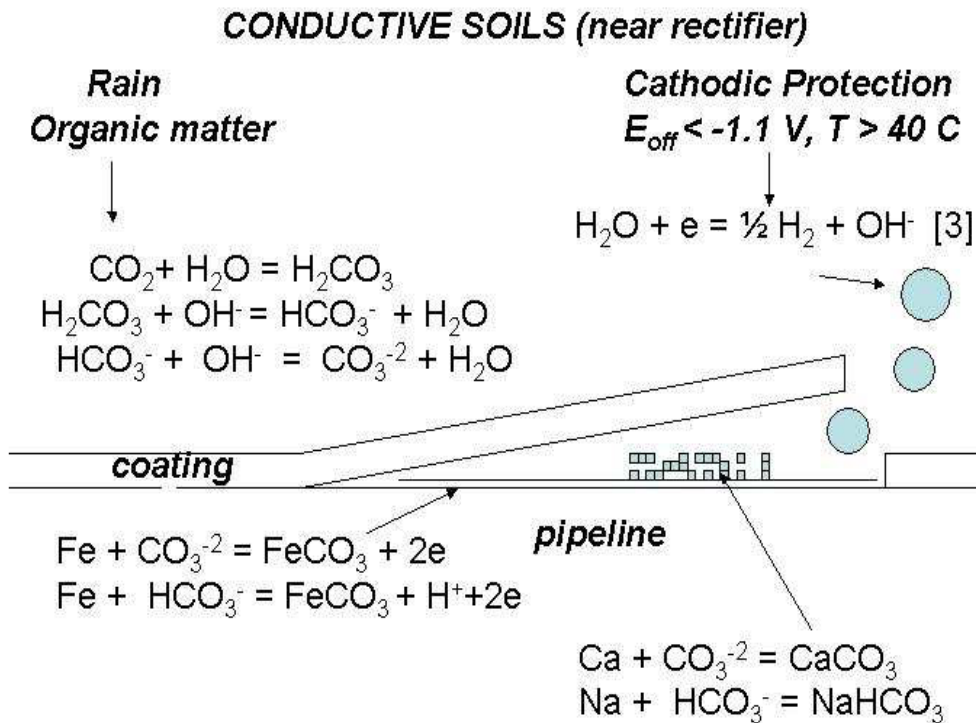
Characteristic	Near-neutral pH SCC	High-pH SCC
Crack path and morphology	Transgranular (possible intergranular initiation), with evidence for extensive corrosion of the crack walls	Intergranular, with tight, narrow cracks
Electrolyte	Dilute HCO_3^- solution (of the order of a 1-10 mM), with a pH in the range 5.5 to 7.5	Concentrated $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ solution (0.1 to $>1.0 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$), with a pH > 9.3
Potential	Potentials corresponding to E_{CORR} in anaerobic environments (-0.685 to -0.715 V_{SCE})	Occurs in a specific range of potentials which is temperature dependent (-0.525 to -0.675 V_{SCE} at room temperature)
Temperature	No apparent effect of temperature	Crack growth rate increases exponentially with temperature with an activation energy of $\sim 40 \text{ kJ/mol}$
Loading conditions	Requires cyclic loading, crack growth rate is a function of maximum stress, range of stress during cyclic loading, and loading frequency	Cyclic loading promotes film rupture, cracking dependent on crack-tip strain exceeding critical strain for slip/film rupture
Mechanism	Corrosion fatigue, but nature of corrosion component uncertain	Slip dissolution

КРН при высоком pH требует формирования FeCO_3 на поверхности стали, и поэтому связано с образованием концентрированных растворов $\text{CO}_3^{2-} / \text{HCO}_3^-$ ($> 1 \text{ Н}$, 58 г/л в Na_2CO_3) и $\text{pH} > 9,0$. FeCO_3 образуется в узком диапазоне потенциалов от $-0,75 \text{ В} < E_{\text{off}} < -0,60 \text{ В}$, где она сосуществует с Fe_3O_4

КРН при нейтральном pH происходит, как правило, в сильно разбавленных электролитах, содержащих $1 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³ HCO_3^- на поверхности стали и при наличии растворенного CO_2 . Эти растворы характеризуются значениями pH в диапазоне 5,5...7,5.

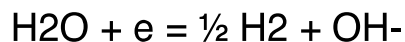


Характеристика	КРН в средах с нейтральным pH	КРН в средах с высоким pH
Водородный показатель pH	6,5...7,5	9...10
Характер растрескивания	транскристаллитный	межкристаллитный
Наличие колоний трещин	да	да
Коррозия на поверхности трубы	иногда	как правило, отсутствует
Наличие карбоната железа и магнетитовой пленки	да	да
Потенциал	потенциал свободной коррозии	-720 мВ
Диапазон потенциалов	вероятно более 100 мВ	узкий (менее 100 мВ)
Влияние температуры	не установлено	рост с повышением температуры



В условиях неполной катодной защиты (E_{off} между $-0,75 \text{ V}$ / $-0,60 \text{ V}$) бикарбонаты/карбонаты, возникающие в результате реакций, могут привести к образованию FeCO_3 . Реагенты в этих реакциях, угольная кислота и бикарбонаты, получают путем реакции между CO_2 , содержащейся в дождевой воде и карбонатов в почве или при распаде органического вещества и почвы, богатой карбонатами. Производство HCO_3^- объясняет появление растворимых бикарбонатов, таких как натрий и калий бикарбонатов, которые были найдены на трубопроводах в зонах КРН. Они часто считаются индикаторами возможного КРН

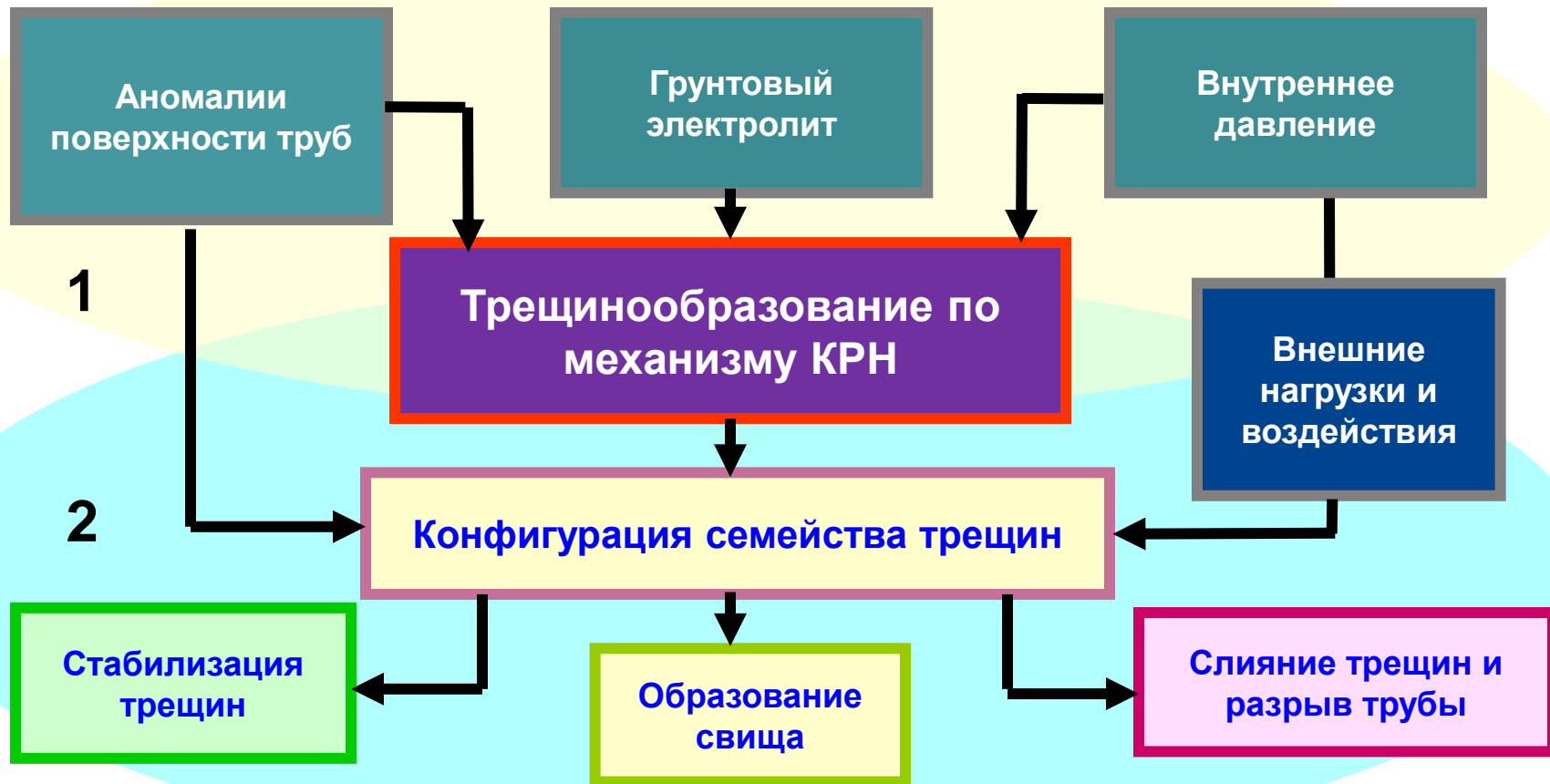
Реакции, которые происходят на поверхности Fe при температурах свыше $40 \text{ }^\circ \text{C}$ и (E_{off}) потенциале ниже -1.1 V :

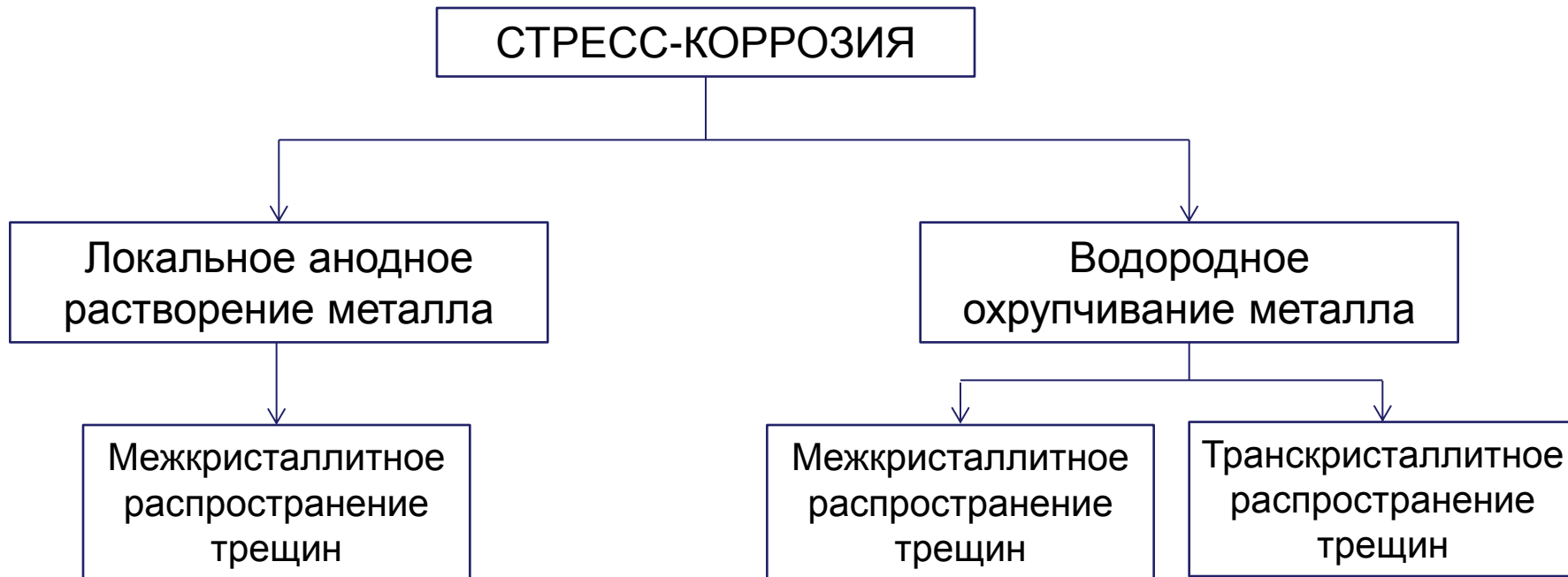


OH^- получают путем реакции [3] приводит к образованию частично растворимых бикарбонатов и карбонатов, нерастворимых в трещинах, в соответствии со следующими реакциями

1. Инкубационный период зарождения рассеянных на поверхности трубы микротрещин
2. Медленное подрастание микротрещин и их слияние в макротрещины
3. Ускоренное развитие трещин с постоянной скоростью в течение длительного времени
4. Нестабильный рост образовавшейся магистральной трещины с последующим разрывом трубы

Факторы системы «Металл-Среда-Напряженное состояние»





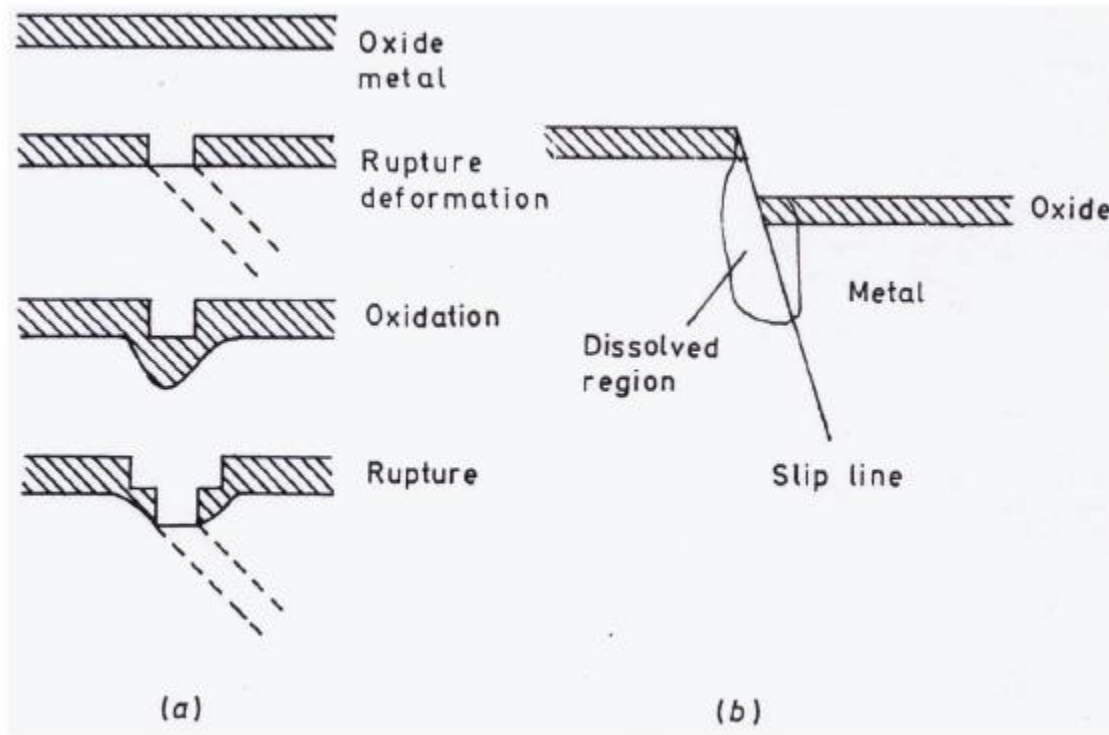
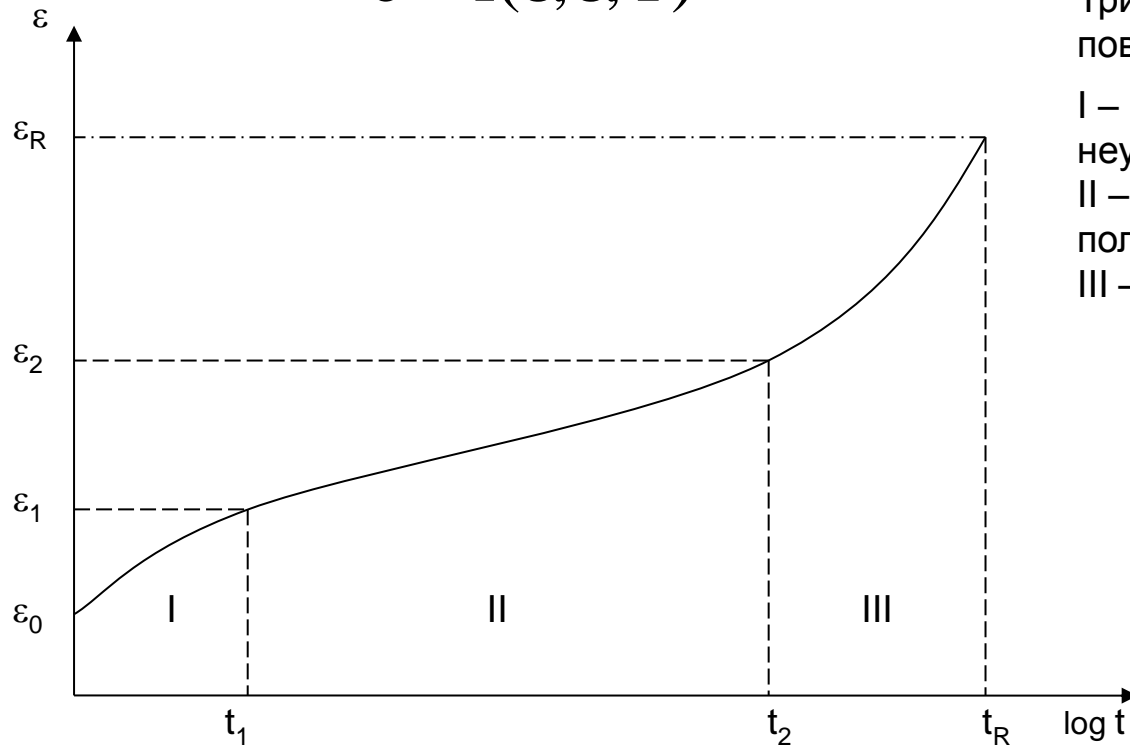


Схема процесса разрушения защитной пленки или модель slip-растворения по Паркинсу (1993)

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$$



Три стадии деформационного поведения материалов:

- I – переходная (или неустановившаяся) стадия;
- II – стадия установившейся ползучести;
- III – заключительная стадия.

Скорость деформации на стадии I

$$\dot{\varepsilon}_n = \alpha \ln(1 + \beta t),$$

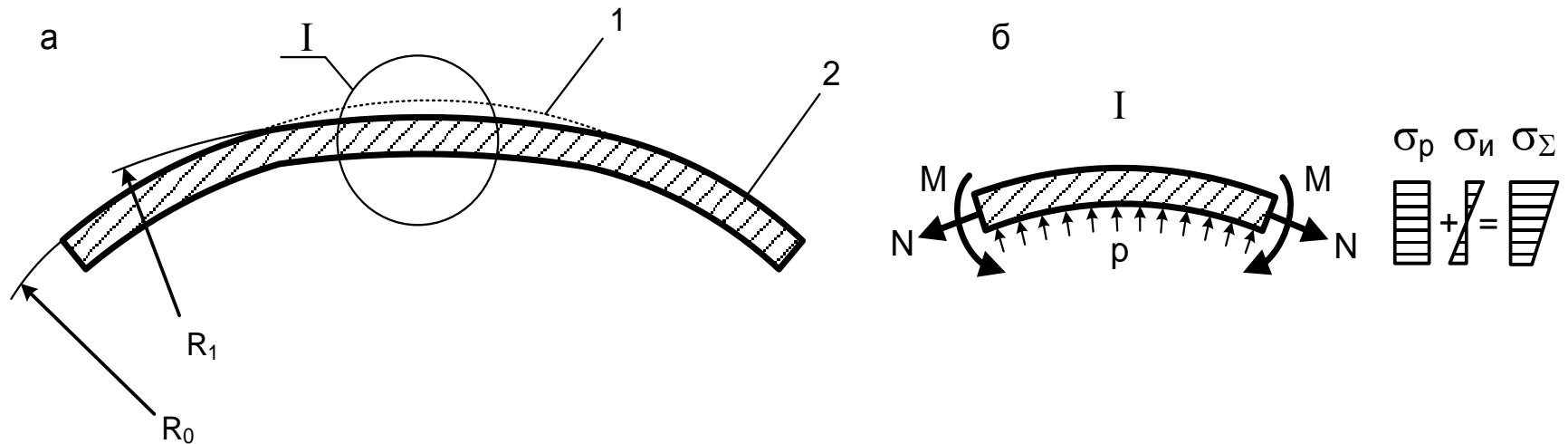
где α и β - постоянные коэффициенты, t – время

Кривая ползучести:

ε_0 – мгновенная деформация; t_R – время до разрушения; $d\varepsilon/dt$ – скорость деформации, которая на установившейся стадии – постоянна

Перечень встречающихся в трубах дефектов формы:

- смещения кромок в сварном шве; - угловатость или вогнутость в зоне сварки; - места овализации сечения и т.п.



1 - контур идеальной оболочки; 2 - фактический профиль сечения трубы; R_0 - номинальный радиус кривизны; R_1 - радиус кривизны в зоне плоской вмятины; I - плоская вмятина

Рисунок 1 - Геометрические параметры сечения (а) и силовые факторы (б) в элементе цилиндрической оболочки с «плоской вмятиной»

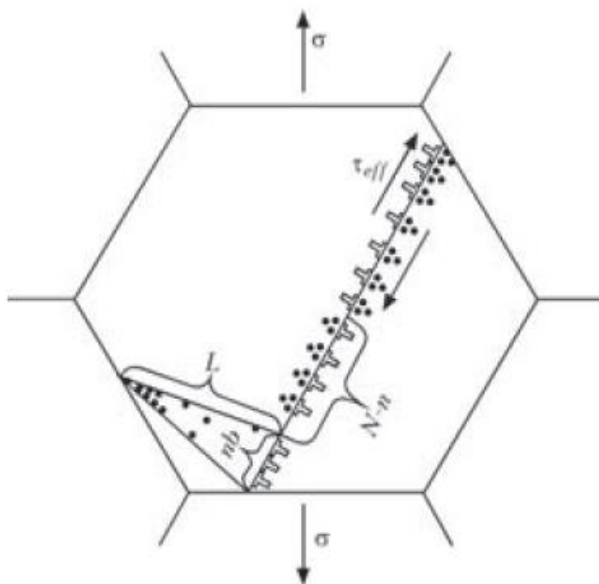
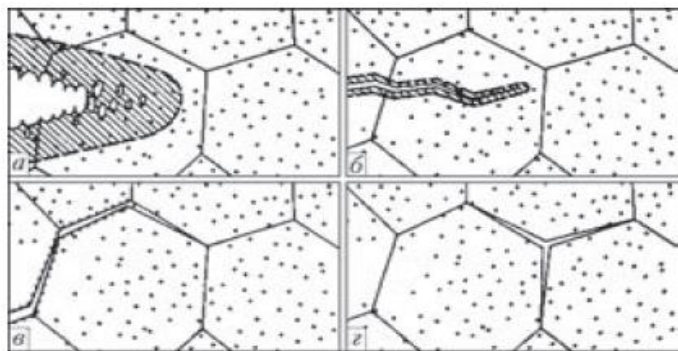


Схема образования микротрещины (модель Зинера-Стро):
 σ - внешние растягивающие напряжения; τ_{eff} - касательные напряжения, которые действуют в плоскости скольжения дислокаций; L - длина субмикротрещины;
 N - общее количество краевых дислокаций в плоском скоплении; n - количество дислокаций, слившихся в субмикротрещину; B - модуль вектора Бюргерса



Механизм роста трещины:

а - вязкий; *б* - квазихрупкий; *в*, *г* - межкристаллитный

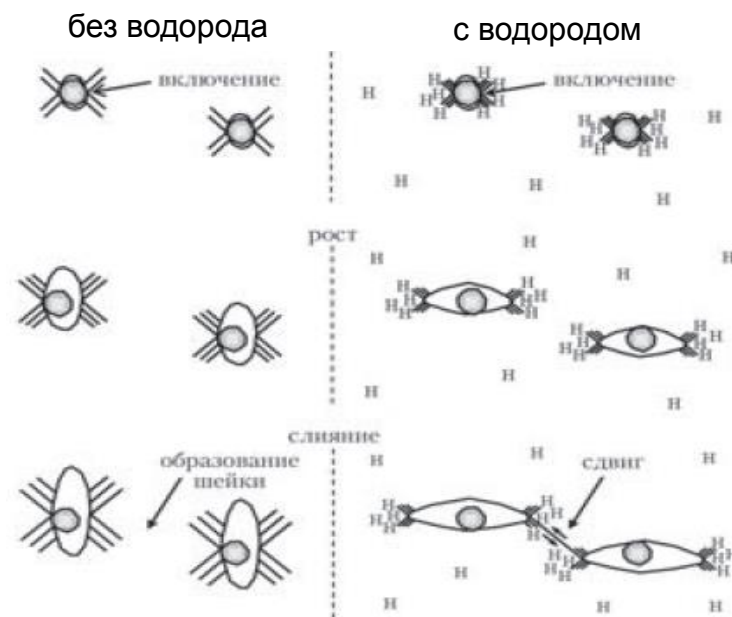
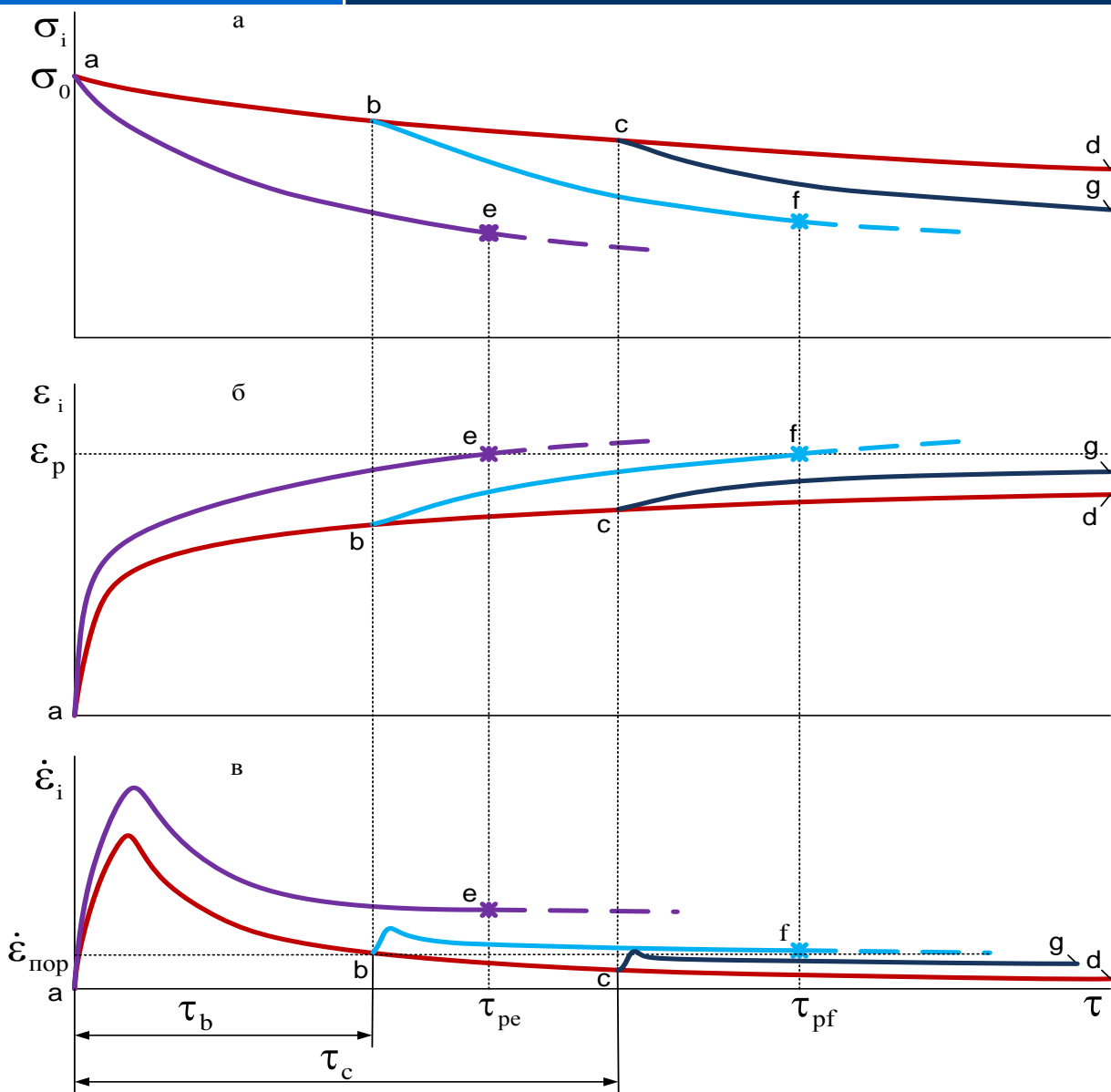


Схема зарождения, роста и слияния микропор при вязком разрушении металла

Изменение во времени напряжений, деформаций и скорости ползучести в зоне дефекта формы трубы при длительной эксплуатации газопровода



σ_i, σ_0 - текущее и начальное напряжение в зоне дефекта формы;

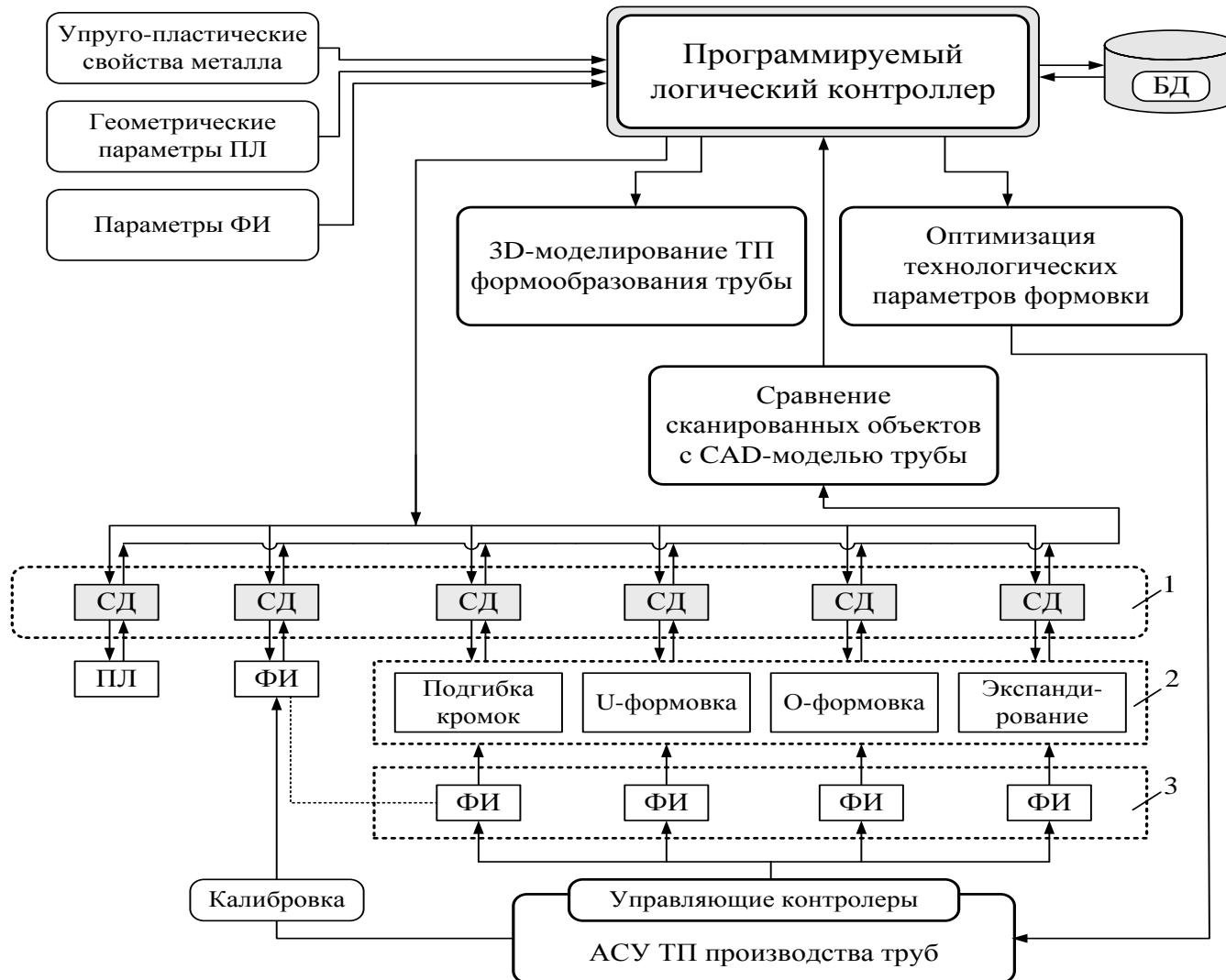
ϵ_i, ϵ_0 - текущее и предельное значение накопленной пластической деформации;

$\dot{\epsilon}_i, \dot{\epsilon}_{пор}$ - текущее и пороговое значение скорости ползучести;

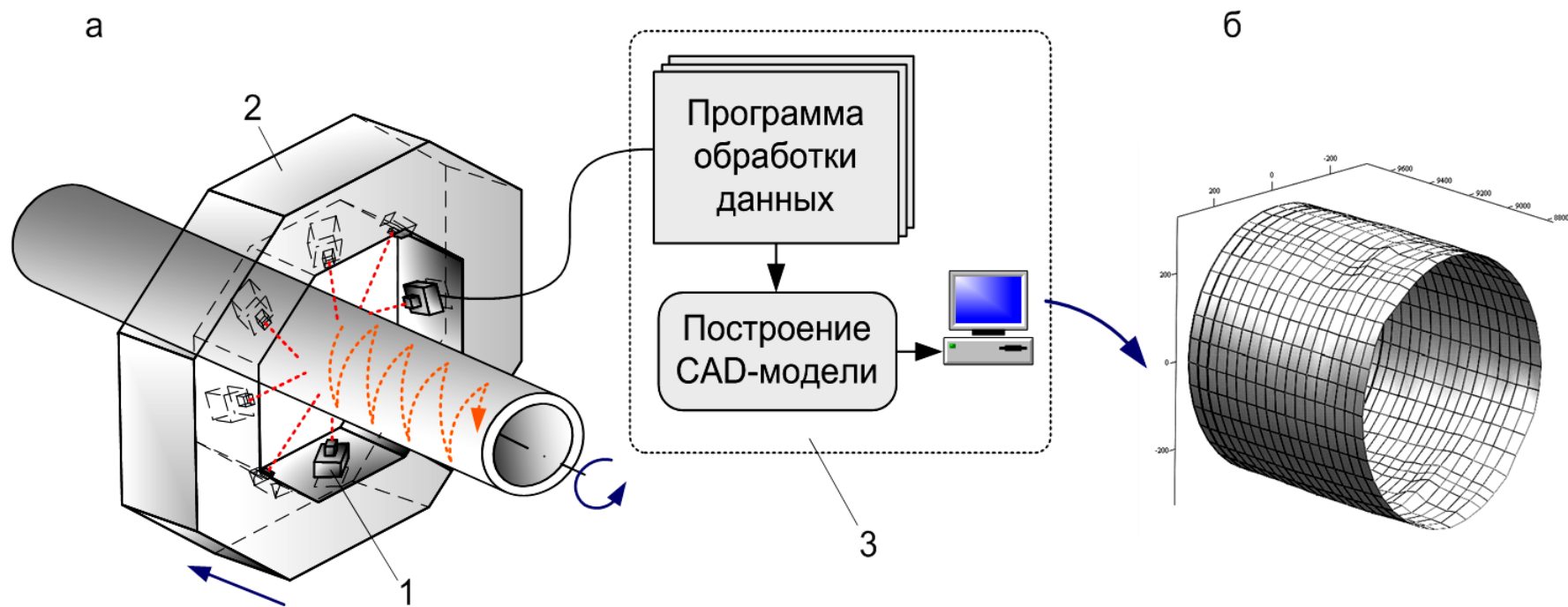
τ_b, τ_c - различное время предварительной наработки газопровода до воздействия коррозионной среды на металл труб;

τ_e, τ_f - время до зарождения трещины при воздействии коррозионной среды на металл с начала эксплуатации газопровода и после предварительной наработки соответственно

Структурная схема оптимизации технологического процесса формовки труб



1 - лазерная сканирующая измерительная система;
 2 - технологические операции формовки;
 3 - технологическое оборудование;
 Обозначения:
 ТП - технологический процесс;
 ПЛ - прокатный лист;
 ФИ - формирующий инструмент;
 СД - триангуляционный сенсорный датчик;
 БД - база данных



1 - триангуляционный сенсорный датчик; 2 - восьмилучевая несущая платформа;
3 - система обработки и визуализации данных

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ