



ХИМИКО ТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

ДЕПАРТАМЕНТ ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧНИ И ТЕХНИЧЕСКИ НАУКИ

КАТЕДРА „ПРИЛОЖНА МЕХАНИКА“

инж. Гюнай Байрям Халил

**Изследване на вулканизати в условията на механични
натоварвания и флуидни среди**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

научна специалност: „Приложна механика“

професионално направление: 5.1 „Машинно инженерство“

Научен ръководител:

проф. д-р инж. Александър Александров

Научно жури:

1. доц.д-р инж.Борис Стефанов-председател

2.чл.кор.д.т.н.инж.Ангел Балтов.-рецензент

3.проф.д.т.н.инж.Митко Миховски.-рецензент

4.проф.д-р инж.Николай Баровски

5.проф.д-р инж.Александър Александров

София, 2016

Дисертационният труд е написан на 129 страници, съдържа 71 фигури и 5 таблици. Цитирани са 69 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен научен съвет на научното звено на катедра „Приложна механика”, състояло се на 19.05.2016

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 08.07.2016 от 14 часа в зала 424, сграда „А” на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересуващите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

1. ГЛАВА. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Първата глава представлява Литературен обзор, в който са разгледани основните характеристики на вулканизатите.

- **Еласто-вискозност- Линейна и Нелинейна**
- **Големи деформации**
- **Дефектиране на вулканизатите и дълготрайна якост**
- **Дифузия на околната среда**
- **Влияние на температурата**
- **Свързана задача**

Въз основа на направения обзор като цел на дисертацията се поставя следният проблем:

Да се предложи решение на свързаната задача за пълзене и дефектиране на вулканизати при наличие на проникващи околни среди, уточнени изходни уравнения на пълзенето и дефектирането и при отчитане на температурна атака.

Във връзка с така поставената цел се налага решаването на следните задачи:

- Да се намерят подходящи решения на уравнението на Фик и се определи коефициента на дифузия за разглежданите материали и среди
- Да се предложи усъвършенстван модел на теорията на Качанов за дефектиране при наличие на дифундираща среда отчитащ различна скорост на дефектиране в зони с различна концентрация зависещи от температурата
- Да се реши уравнението на Фик при променлива температура разрешимо спрямо координатите
- Да се реши свързаната задача за пълзене и дефектиране при наличие на проникваща среда и променлива температура

2. ГЛАВА. МАТЕРИАЛИ, АПАРАТУРА И МЕТОДИКА НА ЕКСПЕРИМЕНТА

2.1 Материали и среди

В дисертационен труд са изпитвани два еластомерни състава: Бутадиеннитрилов каучук, и Полиизопренов каучук.

Дифундиращите околни среди са вода, бензин, нафта, машинно масло, 20% разтвор на сярна киселина и кислород.

2.2 Измервателна апаратура

За провеждане на експериментите е използвана, както стандартна (Заводски произведена), така и специално конструиран в катедра „Приложна Механика“ апаратура.

Стандартна апаратура

2.2.1 Машина за якостни изпитания *INSTRON mod.1185*

2.2.2 Релаксометър *ZP400*

Апаратура конструирана в катедра, „Приложна Механика“

2.2.3 Експериментална уредба за механични изпитания на материали в условия на променлива температура, натоварване и концентрация на течни и газови среди.

2.2.4 Стенд за изпитване на пълзене

2.3 Методика на експеримента

2.3.1. Сорбционно теглови метод

2.3.2. Метод на краткотрайно пълзене.

2.3.3. Метод на контролните опити.

3. ГЛАВА. ДИФУЗИЯ НА СРЕДИ ПРИ ПРОМЕНЛИВА ТЕМПЕРАТУРА

В тази Глава се изучава кинетиката на дифузия на течни индустриални среди във вулканизати при променлива температура. Изучават се само среди, които не встъпват в химическо взаимодействие с вулканизата и не причиняват дълбоки структурни промени /набъбване/, т.е такива среди в които вулканизата макар и с променени свойства запазва носещите си способности на конструкционен материал.

- **Дифузията при постоянна температура.**

Решенията на уравнението на Фик са разгледани в обзора

3.1 Дифузия при променлива температура

В този случай, както е известно, коефициентът на дифузия не е постоянен. Той съществено зависи от температурата T , която в общия случай е функция на времето. Тази зависимост много често се апроксимира с израза

$$D = D_o \exp \left(-\frac{E_{ac}}{RT(t)} \right) = D_o H(t), \quad (3.1)$$

където E_{ac} е енергията на активация на процеса на дифузия, R е универсалната газова константа, D_o е експериментално определяща се константа. Тук параметърът подлежащ на експериментално определяне е само един- E_{ac} , тъй-като за D_o може да се запиши

$$D(t=0) = D_o \exp \left(-\frac{E_{ac}}{RT(0)} \right) = D_o H(0) \quad \text{и} \quad D_o = D(t=0) / H(0), \quad (3.2)$$

където $D(t=0)$ е началният коефициент на дифузия или този при нормална температура. Решението на уравнението на Фик в този случай може да се намери по аналогичен на гореописаните случаи, като се изпълни трансформацията на времето

$$t_{tr} = \int_0^t H(s) ds, \quad H(t) = \exp \left(-\frac{E_{ac}}{RT(t)} \right). \quad (3.3)$$

Трансформираното време по горното уравнение (3.3) и коефициентът D_o (на мястото на D) се заместват във формулите за решение на уравнението на Фик и се получава решението с отчитане на зависимостта на коефициента на дифузия от времето посредством температурата. Класическото решение се получава като частен случай при $t_{tr} = t$ и $D_o = D(t=0)$.

Тук е прието следното допускане: Температурното поле е постоянно по координатите, т.е. имаме хомогенно температурно поле. Това за разглежданите от нас геометрии и материали е напълно допустимо, тъй като скоростта на дифузия на средите е на няколко порядъка по-малка от тази на разпространение на температурата.

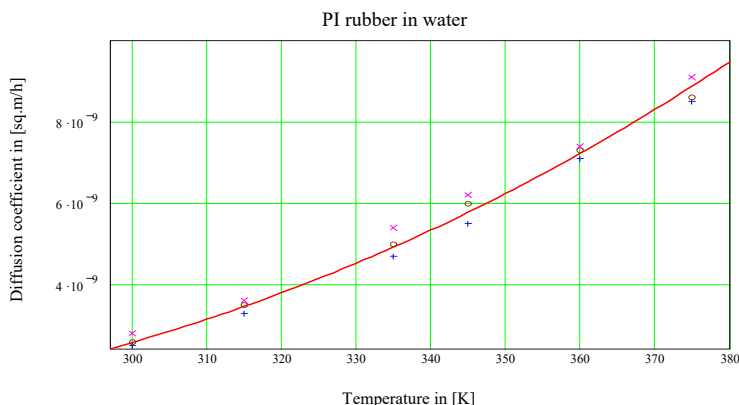
Нарастването на температурата се задава по следния линеен закон

$$T(t) = 293 + 0.3t. \quad (3.4)$$

На фигура (3.3) е показано нарастването на коефициента на дифузия по уравнение (3.1) като функция на температурата. Показани са експерименталните данни за нарастването му с

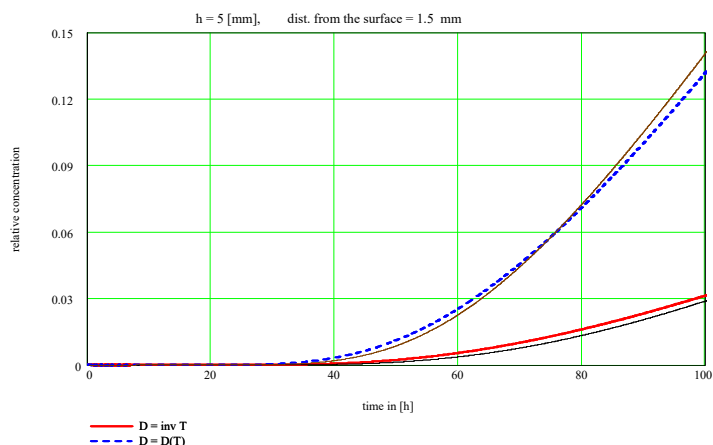
температурата. От тази зависимост е определена енергията на активацията равна на $15400[\text{kJ/mol}]$, както и параметърът $D_o = 1.239 \times 10^{-6} [\text{m}^2 / \text{hour}]$.

Аналогични представяния имаме и за БН вулканизата. За пояснение: тук уравнение (3.1) е представено като $D(T) = D_o \exp(-\frac{E_{ac}}{RT})$. Вижда се, че при нарастване на температурата с 44 градуса коефициентът на дифузия се променя с около 100%.



Фиг.3.3 Нарастване на коефициента на дифузия за ПИ вулканизат във вода при нарастване на температурата според уравнение (3.1). Експерименталните данни са получени за 6 различни времена на експозиция. Измервано е проникването при три образца за всяко време на експозиция.

На фигура 3.7 е показано нарастването на концентрацията във времето на разстояние 1.5 [mm] от повърхността на пластинка с дебелина 5 [mm]. Направени са някои сравнения илюстриращи доброто представяне на предлаганата тук в дисертацията апроксимация според уравнение (1.30) на точното решение на уравнението на Фик.



Фиг. 3.7 Нарастване на концентрацията на разстояние 1.5 [mm] от повърхността в пластинка с дебелина 5 [mm] - с пунктир. Плътна линия – точното решение - без отчитане на температурната зависимост. С тънки линии е показано решението според предлаганата в работата апроксимация – уравнение (1.30) със и без отчитане на температурната зависимост съответно.

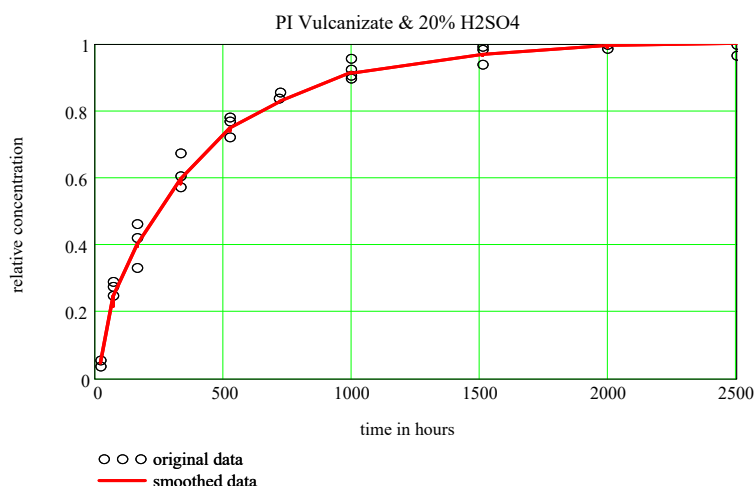
3.2 Намиране на коефициента на дифузия

В наши съвместни разработки и в дисертацията на Миленова са представени фигури даващи зависимост между относителното изменение на теглото на образца в проценти и времето. Те отразяват проникването на вода, машинно масло, 20% р-р на сярна киселина в полиизопренов и бутадиеннитрилен вулканизат. Установено е, че максималното увеличаване на размерите не надвишава 0,2 %. Това дава основание да се направи извода, че не са на лице съществени изменения в структурата на изходния материал.

При лентови образци дифузията е едномерна, двустранна, проникването се извършва по направление на x . При малки стойности на критерия на Фурие, може да се покаже, че с достатъчна точност решението приема вида

$$D = \frac{\pi b^2}{16 t} \frac{C_m^2}{C_s^2} . \quad (3.12)$$

На следващите фигури са показани резултатите от статистическата обработка на сорбционните криви за двата вулканизата и средите отговарящи на изискването за отсъствие на химическа реакция. По-долу даваме една от тях



Фиг.3.13 Нарастване на относителната средна концентрация на 20% разтвор на сярна киселина в ПИ вулканизат

В таблица 3.1 са обединени резултатите от изчисленията за коефициента на дифузия на вулканизатите.

Таблица 3.1 Коефициенти на дифузия D за изследваните вулканизати в съответната среда

параметър	D
дименсия	$\text{m}^2/\text{h} \times 10^{-9}$
ПИ § вода	2.425
ПИ § маш. м-ло	4.829
ПИ § 20% H ₂ SO ₄	3.871
ПИ § кислород	17.050
БН § вода	2.271
БН § маш. м-ло	1.504
БН § 20% H ₂ SO ₄	3.921
БН § кислород	14.550

3.3 Намиране на средната концентрация при тънки лентови и квадратни образци

Това се налага за идентифициране на параметрите на дефектирането от кривите на Вюлер. В тези образци трябва да се осигури хомогенно поле на концентрация със стойност равна на първата критична концентрация (виж глава 4). От уравнение 3.7 след отчитане на изразите след (3.5) за средната относителна концентрация при тънки лентови образци се получава

$$c_m = \frac{C_m}{C_s} = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{8}{(2i-1)^2 \pi^2} \exp - \frac{(2i-1)^2 \pi^2 D t}{h^2} \quad . \quad (3.13)$$

3.4 Заключение от глава 3

В заключение на тази глава се отбелязва, че като приблизително решение на уравнението на Фик е предложено едно ново уравнение, което дава нарастването на концентрацията на проникваща среда (дифузията) по координатите и по времето. Това уравнение е по-прецизно от познатите ни в литературата приближения и може да бъде разрешено спрямо координатата с цел намиране на нарастването на относителната площ на проникване с времето. Последното е необходимо условие за решаване на свързаната задача – глави 6 и 7. Предложен е подход за отчитане на температурна атака, базиращ се на допускането за несравнимо по-бързото разпространение на температурата в пространството на материала в сравнение с концентрацията на проникващия флуид. Този подход е приложен за решаване на свързаната задача при наличие и на температурна атака – глава 7.

4. ГЛАВА. ДЕФЕКТИРАНЕ И ДЪЛГОТРАЙНОСТ

4.1 Отчитане на началните несъвършенства

Тази глава има за цел да определи дълготрайността на твърдите тела при статични опъновы натоварвания въз основа на натрупването на дефекти с отчитане на две особени зони (фази) на дефектиране. Въз основа на разработката се предлага двуфазен модел на дефектиране с различна структура на зоните. Първата зона е без начални несъвършенства, докато втората зона съдържа началните несъвършенства, които имат различна природа и винаги имат място в реалните материали. При наличие на проникваща среда първата зона може да се възприема като област с малка концентрация при която дефектирането се развива по-бавно, а втората като зона с голяма концентрация на проникващата среда където дефектирането се извършва много бързо в началото. Двете зони (фази) са свързани и работят успоредно. Обемното съдържание на първата зона е f , а на втората $(1-f)$. Материалът на първата зона е подложен на непрекъснато нарастващи ефективни нормални напрежения - $\sigma_{eff,1}$. За тези ефективни напрежения на базата на модела на Качанов [57] може да се напише

$$\sigma_{eff,1} = \frac{\sigma}{1-D} f, \quad (4.1)$$

където D е параметърът на дефектирането, а σ - номиналното напрежение. Тук скоростта на дефектиране непрекъснато нараства до насищането с дефекти.

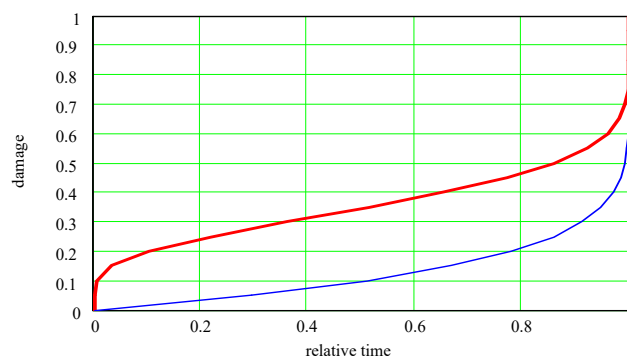
Материалът на втората зона в началото е подложен на големи ефективни напрежения $\sigma_{eff,2}$ поради наличието на началните несъвършенства. Тези ефективни напрежения непрекъснато намаляват поради преразпределянето на напреженията и разрушаването на началните несъвършенства. За тях може да се напише

$$\sigma_{eff,2} = \frac{\sigma}{D} (1-f). \quad (4.2)$$

Тук скоростта на дефектиране непрекъснато намалява до насищането с дефекти. След сумиране на двете ефективни напрежения от (4.1) и (4.2) за резултантното ефективно напрежение получаваме

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma}{1-D} f + \frac{\sigma}{D} (1-f) = \varphi(D) \sigma. \quad (4.3)$$

Функцията $\varphi(D)$ има смисъл на концентрационна функция. Обемното съдържание на идеалната част f представлява структурен параметър.



Фиг.4.2 Натрупване на дефекти във времето с използване на предлагания в дисертацията модел (дебела линия) и този на Качанов (тънка линия)

Кривите на дефектиране според предлагания тук модел имат инфлексна точка, чието положение зависи от структурния параметър f . Равновесието между ускорения и забавения процес на дефектиране в двете зони отговаря на тази инфлексия - Фиг. 4.2. На тази фигура времето е разделено на времето за достигане на критично състояние (относително време за разрушаване). Когато нарастването на дефекти е преди инфлексията, преобладава разрушаване на началните несъвършенства. Дефектирането на идеалната част доминира след тази точка. Критичното състояние (failure) се достига когато D достигне критична стойност $D^* < 1$.

4.2 Закон за скоростта на дефектиране

Моделът се допълва от един нелинеен закон на дефектирането, който може да бъде степенна функция на ефективните напрежения

$$\frac{dD}{dt} = H(\sigma_{eff})^m = H\varphi(D)^m \sigma^m, \quad (4.5)$$

Тук t е времето; H, m са параметри определящи се опитно, а T абсолютната температура. След интегриране на (4.5) стигаме до кривите дефектиране - време - фиг.4.2

$$t = \frac{\int_0^D \varphi^{-m} dD}{H \sigma^m}, \quad (4.7)$$

Критичното състояние ще настъпи когато D достигне една критична стойност $D^* < 1$. Тази критична концентрация на дефектите е намерена в следващия § 4.3.

4.3 Критична концентрация на дефектите и крива на Woehler

Настоящата глава е насочена към определянето на критичната концентрация на дефектите. Тук се предлага прост метод за определяне на критичната концентрация на дефекти (ККД) - величина важна за намиране на живота на конкретни образци. В наша разработка с Миленова се дава подход за намиране на дефектирането във времето, който се състои в следното. Приема се някакъв критерий за гранично дефектиране. При еластомерите като критерий за разрушаване може да се избере началото на промяната на цвета на материала. Вместо класическото уравнение на дефектиране $\dot{D} = \dot{D}(\sigma, D)$ - виж (4.5), се предлага подобно, но вместо напрежението се въвежда скоростта на деформиране $\dot{\epsilon}$, която лесно може да се диктува от експериментатора

$$\dot{D} = \dot{D}(\dot{\epsilon}, D). \quad (4.9)$$

Схемата на експериментите за получаване на кривата на натрупване на дефекти във времето е описана подробно в дисертацията, тя съвпада с тази в работата на М.Миленова.

Сега този подход ще бъде използван за определяне на Вьолеровите криви. Ако в уравнение (4.7) положим $D \rightarrow D^*$ получаваме връзката гранично напрежение – време до достигане. Тази крива се получава от уравнението (4.7) за $D \rightarrow D^*$ и за $t \rightarrow t_f$

$$t_f = \frac{\int_0^{D^*} \varphi^{-m}(D) dD}{H^m (\sigma_f)^m}. \quad (4.10)$$

Кривата по уравнение (4.10) за изследваните материали е показана от фигура 4.4 нататък.

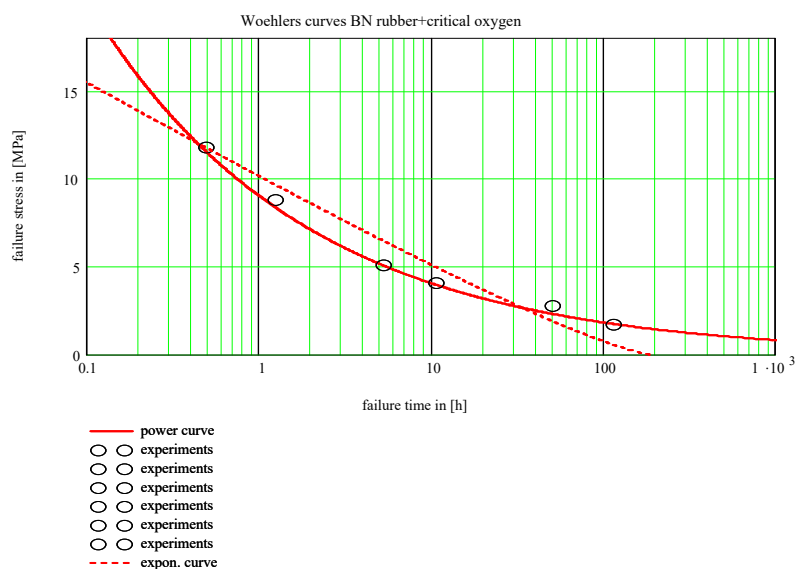
За намиране на параметрите в (4.10) са необходими две ($i = 1, 2$) експериментални точки-разрушаващо напрежение σ_{fi} и време до разрушаване t_{fi} . При това положение от уравнение (4.10) за изчисляване на параметрите H и m има

$$m = \frac{\ln \frac{t_{f2}}{t_{f1}}}{\ln \frac{\sigma_{f1}}{\sigma_{f2}}}, \quad H = \frac{\int_0^{D^*} \varphi^{-m}(D) dD}{t_{fi} (\sigma_{fi})^m}. \quad (4.12)$$

във втората ф-ла на (4.12) i е или 1 или 2.

4.4 Криви на Вьолер за изследваните вулканизати в съответни среди

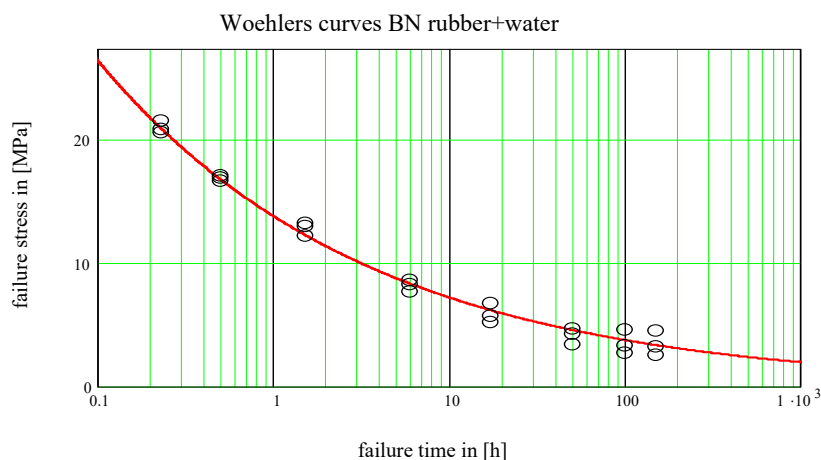
На фигура 4.4 са показани експерименталните точки и кривите на Вьолер по уравнение (4.10) и (4.11) за БН вулканизат при първата критична концентрация на кислород. Вижда се, че експоненциалната крива (4.11) не е в състояние добре да опише експерименталната крива «критично напрежение-време до достигането му».



Фиг.4.4 Криви на Вьолер за БН вулканизат при първата критична концентрация на кислород. С плътна линия – уравнение (4.10), с пунктир – (4.11).

На фигури 4.5-4.7 са показана кривите на Вьолер за БН вулканизат и критичната концентрация на съответните среди. На фигури 4.8-4.11 са показани кривите на Вьолер за ПИ вулканизат и критичната концентрация на същите съответни среди. Параметрите са систематизирани в таблица 6.3 (глава 6). Тук е показана само фиг.4.5.

Идентификацията на параметрите на всички криви от тук нататък може да бъде проследено в приложението с програмите. Таблица с тези параметри е дадена в глава 6.



Фиг.4.5 Крива на Вьолер за БН вулканизат при първата критична концентрация на вода. С плътна линия – уравнение (4.10) , с точки – експериментални данни от три изпитвания за всяко напрежение

Експерименталните константи са следните: За уравнение (4.10) според (4.12) $m = 2.879$, $H = 2.606 \times 10^{-6}$. За уравнение (4.11) $D^* = 0.321$, $k = 1.3806 \times 10^{-23} [\text{J/K}]$, $A_o = 1.917 \times 10^{-8} [\text{1/sec}]$, $U = 0.99 \times 10^{-19} [\text{J}]$, $\gamma = 0.7 \times 10^{-27} [\text{m}^3]$, $T = 297 [\text{K}]$, $f = 0.531$. За параметъра f виж глава 6 ур. (6.13).

4.5 Заключение от глава 4

Тук може да се направят следните заключения. Влиянието на физичните и геометричните параметри описани по-горе е сложно и многопосочно. Изследванията показват, че D^* за много материали е ограничена между 0.2 (материали в сравнително крехко състояние и по-слабо устойчиви на пукнатинно разпространение) и 0.8 (материали с по-изразено пластично поведение и по-устойчиви на пукнатинно разпространение). В настоящата глава е приложена двускоростна методика за определяне на дефектирането във времето и за намиране на критичната концентрация на дефекти преди достигането на критичното състояние.

Предложеният модел на дефектиране успешно описва механичното поведение до разрушаване на различни вулканизати при статично натоварване.

Отчитането на началните несъвършенства има съществено предимство в случаите на материал съдържащ дифундиращ флуид. Относителната зона на проникване е зона на начални несъвършенства, тъй като там дефектирането е ускорено.

5. ГЛАВА. НЕЛИНЕЙНА, ЕЛАСТО-ВИСКОЗНОСТ ПРИ ГОЛЕМИ ДЕФОРМАЦИИ

5.1 Нелинейна еласто-вискозност при малки деформации

Най-лесно линейните наследствени уравнения могат да се обобщят за отчитане на нелинейно механично поведение посредством подхода на Ржаницин. За скоростта на деформацията $\dot{\epsilon}$ в този обобщен случай след диференциране по времето от уравнение (1.7) има

$$\dot{\epsilon}(t) = \epsilon_o (\sigma / \sigma_o)^n K(t), \quad \dot{\epsilon}(t) = \dot{\epsilon}_o \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n, \quad (5.3)$$

където

$$\epsilon_o = \sigma / E \quad \text{и} \quad \dot{\epsilon}_o(t) = \epsilon_o K(t) \quad (5.4)$$

Тук (5.3) е в сила ако $\sigma \geq \sigma_o$. В другия случай поведението е линейно и се полага $\sigma / \sigma_o = 1$, което е все едно да се ползва уравнение (1.7) при $n = 1$.

Такова изразяване на скоростта на нелинейното наследствено деформиране се налага за въвеждането и в основните уравнения описващи свързаната задача (глави 6 и 7). В горните

уравнения σ - осовото напрежение, σ_o - граничното осово напрежение на линейност на пълзенето и $\dot{\varepsilon}_o$ - съответната скорост на деформиране в линейната област.

5.2 Нелинейна еластичност при големи деформации

Еластомерите се деформират много и тяхното еластично поведение не може да се описва от закона на Хук. Тук под еластично поведение имаме предвид мигновенната еластичност от уравнение (1.7) зададена от отношението пред скобите σ/E . Този израз трябва да се промени, за да бъде в състояние да отчита големите еластични деформации на каучукоподобните вулканизати.

Тук ще използваме теорията на големите деформации. Материалите се приемат за изотропни и несвиваеми. При каучукоподобните материали сме ползвали моделите на Муни-Ривлин и нео-Хуков'ия модел. В съответствие с горните модели се въвеждат следните термодинамични потенциали (несвиваемите материали $\lambda_1\lambda_2\lambda_3=1$)

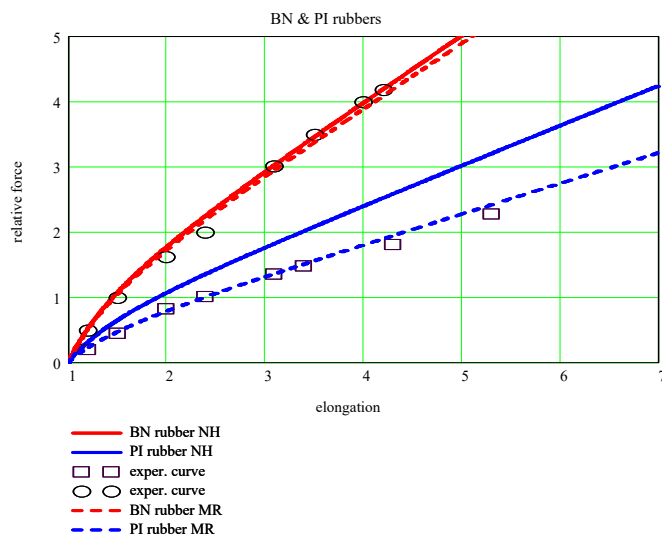
$$W = \frac{G}{2}(\lambda^2 + 2\lambda^{-1/2} - 3) \quad (5.5) \quad W = \frac{1}{2}(\zeta - \chi)(\lambda^2 + 2/\lambda - 3) + \frac{\chi}{4}(1/\lambda^2 + 2\lambda - 3) \quad , \quad (5.6)$$

където ζ и χ са експериментално определящи се параметри на база на мигновенните криви сила-удължение, а λ_i са големите относителни удължения по главните направления определящи се от израза

$$\lambda_i = 1 + \varepsilon_i \quad (5.7)$$

Тук $i=1, 2, 3$, а ε_i са главните деформации по Коши.

В теорията на големите деформации от (5.7 и 5.6) се получава осовата сила при опън. Следващата фигура (5.1) показва мигновенната нелинейност на бутадиеннитриловия и полиизопреновия вулканизати.



Фиг.5.1 Относителна опънова сила относително удължение според за двата вида потенциали и вулканизати.

Осовите сили трябва да се изразят посредством деформациите на Коши и да се заместят в (5.3), за да се отчетат големите деформации. Това става по следния начин. Изведени връзките мигновено напрежение-деформация за двата модела, които дават нелинейността в еластичната част на уравненията на наследствеността (5.3). В теорията на големите деформации, осовата сила при опън $Q(\lambda)$ се дава от следните изрази при двата модела съответно

$$Q(\lambda) = S_o G \frac{\lambda^3 - 1}{\lambda^2} . \quad (5.8a)$$

$$Q(\lambda) = S_o G \frac{\lambda^3 - 1}{\lambda^2} (\zeta - \chi (\frac{1}{2\lambda} - 1)) . \quad (5.8b)$$

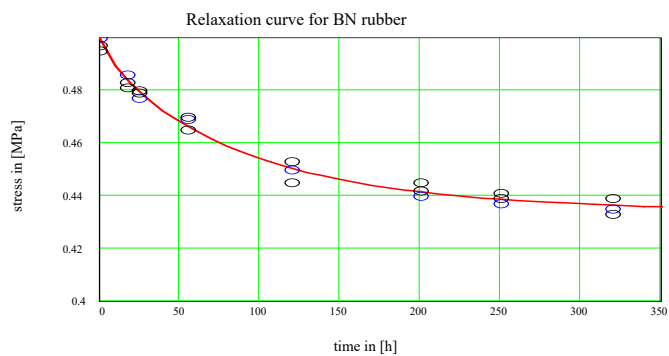
5.3 Нелинейна еласто-вискозност при големи деформации

Връзката на деформациите на Коши чрез напрежението под формата $\varepsilon_o = \varepsilon_o(\sigma)$ (5.9) ще се използва като мигновена нелинейност в наследственото уравнение на връзката за скоростта на деформиране – второто уравнение на (5.3). Уравнение (5.3) въз основа на (5.9) е

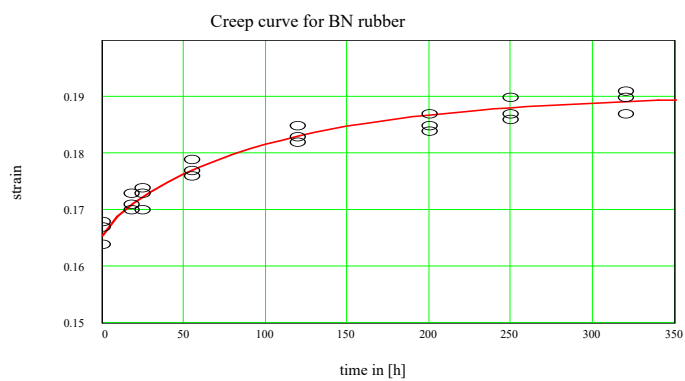
$$\dot{\varepsilon}(t) = \varepsilon_o(\sigma) \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n K(t) . \quad (5.10)$$

Законът на пълзенето (5.10) съдържа параметри, които трябва да се идентифицират от опита.

На следващите фигури идентифицирането на горните параметри е илюстрирано за единия вулканизат. На фигура 5.2 е показана кривата на релаксация, а на фиг.5.3 е показана съответната крива на пълзене за БН вулканизат при напрежение на границата на нелинейността. Вижда се, че наследствената теория с ядро на Колтунов добре описва временните ефекти дължащи се на вискозността. За подробности виж приложението с програмите.



Фиг.5.2 Релаксация на напрежението в БН вулканизат



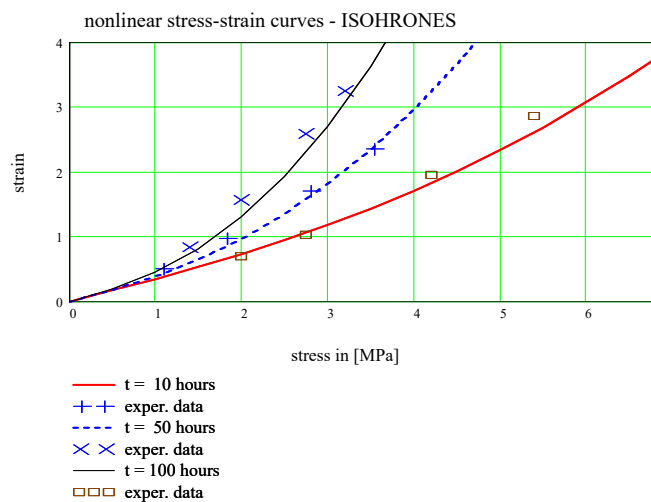
Фиг.5.3 Крива на пълзене за БН вулканизат

В следващата таблица са систематизирани всички резултати получени от експерименталните криви.

Таблица 5.1 Еластовискозни характеристики на изследваните вулканизати

характеристики	еластовискозни					
	мигновенни			наследствени		
параметри	E	σ_o	n	A	α	β
дименсия	МПа	МПа	-	-	-	-
Полиизопрен	1.82	0.75	1.71	0.0032	0.97	0.0140
Бутадиеннитрил	3.02	0.50	1.55	0.0029	0.77	0.0089

На следващата фигура (5.4) е показана нелинейната изохронна крива напрежение – деформация за БН вулканизат при напрежения по-големи от границата на нелинейността:



Фиг.5.4 Нелинейност на БН вулканизат (изохрони при 10, 50 и 100 часа)

5.4 Заключение от глава 5

В тази глава са изведени в краен вид мигновенните връзки напрежение-деформация според нео-Хуковия модел и модела на Муни-Ривлин. Тези връзки са заложили в наследствено уравнение за прогнозиране на пълзенето и релаксацията. Отчита се нелинейност на вискозното

поведение при наличие на подобие в изохронните криви. Експерименталните резултати за ПИ и БН вулканизати показват много добро съвпадение с теоретичните прогнози.

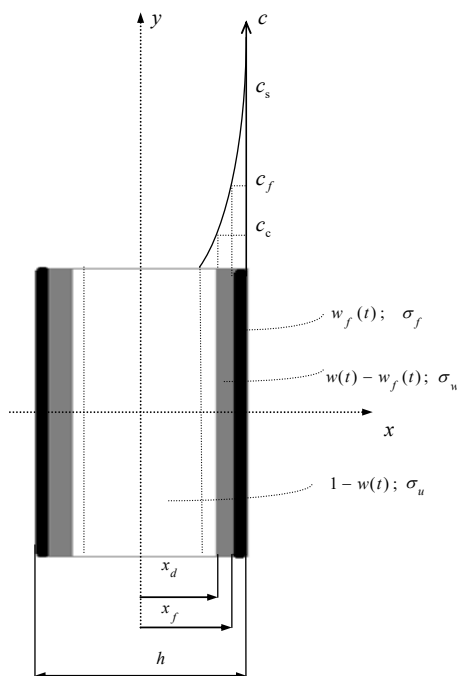
6. ГЛАВА. СВЪРЗАНА ЗАДАЧА ПРИ ПОСТОЯННА ТЕМПЕРАТУРА

6.1 Модел на дефектиране отчитащ влиянието на околна среда

Ефектите на проникване върху пълзенето и дълготрайността на еластомерите са зависими от температурата. Целта на това моделиране е да представи някои данни за кинетиката на провокираното от проникването пълзене при нормални и по-високи температури и да достигне до математическо описване на ефекта на това дефектиране върху съпротивата при пълзене. Разглеждат се лентови и цилиндрични образци. В общия случай решението на уравнението на Фик посредством редове има два варианта, които не могат да се разрешат спрямо координатите. Приблизителното решение при измерване на x от средата се дава с уравнение (1.30). Това уравнение може да се реши спрямо дълбочината на зоната на проникване, след което за относителната площ на проникване се получава

$$w(t) = \frac{2\sqrt{Kt}}{h} \quad (6.39) \quad \text{където} \quad K = \frac{8D}{\pi k} \ln\left(\sec \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{c_c}{c_s}\right)\right).$$

В [61] и в публикация N6 е разгледана разработката за лентови образци



Фиг.6.2 Дълбочина и площи на зоните на проникване и дефектиране при атака отвън на лентов образец. Напрежения действащи в различните зони и съответните концентрации.

Скоростта на нарастване на относителната площ на проникване чрез самата относителна площ е

$$\dot{w} = \frac{2 K}{h^2 w} . \quad (6.40)$$

Горните преобразувания се налагат поради необходимостта да се достигне до свързана задача по отношение на пълзенето, проникването и дефектирането (виж по-долу). По същия начин се стига и до еволюцията на силно дефектиралата относителна площ при положение, че материалът дефектира по-интензивно при достигане на концентрация $c_f > c_c$ - Фиг. 6.1

$$\dot{w} = \frac{2 K_f}{h^2 w} ,$$

където

$$K_f = \frac{8D}{\pi k} \ln\left(\sec \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{c_f}{c_s}\right)\right) .$$

Необходимо е да се намери относителната част с ускорено дефектиране $1-f$, която да се замени в израза за концентрационната функция на напреженията (да не се бърка с концентрацията на средата). Това е необходимо за по-прецизно определяне на параметрите H и m в кривите на Вюлер. Ще намерим f по следния начин. При хомогенизиране на концентрацията на средата в образеца, когато времето клони към това за достигане на критичната концентрация c_c , т.е. $t \rightarrow t_c$, относителната площ на зоната на дефектиране $w(t_c) \rightarrow 1$ и едновременно с това $x_d \rightarrow h/2$. Тогава от (6.39) следва

$$w(t_c) = \frac{2\sqrt{K t_c}}{h} = 1 . \quad (6.42)$$

За $w_f(t_c)$ следва

$$w_f(t_c) = \frac{2\sqrt{K_f t_c}}{h} . \quad (6.43)$$

Отчетено е, че $w(t_c) \rightarrow 1$ и е решено уравнение (6.42) спрямо времето $t_c = \frac{(wh)^2}{4K}$ и се замества в (6.43)

$$w_f = \sqrt{\frac{K_f}{K}} . \quad (6.44)$$

Окончателно от горното уравнение (6.44) и уравнение (6.22) има

$$f = 1 - \sqrt{\frac{K_f}{K}}, \quad (6.45) \quad \text{където} \quad \frac{K_f}{K} = \frac{\ln(\sin \frac{\pi}{2} \frac{c_f}{c_s})}{\ln(\sin \frac{\pi}{2} \frac{c_c}{c_s})}.$$

Тук в случая на несвързана задача (предекспозиция в средата с последващо натоварване) е необходимо да се решат предварително уравнения (6.40) спрямо съответните относителни площи на дефектиране.

По този начин образецът е разделен на две зони на дефектиране. В първата (вътрешната със средна концентрация $c = c_c$) дефектирането се извършва по-бавно, а във втората (външната със средна концентрация $c = c_f$) дефектирането е ускорено. Намирането на двете гранични концентрации става по формулите

$$c_c = \frac{1}{t_g} \int_0^{t_g} c_m(t) dt. \quad (6.12a)$$

$$c_f = \frac{1}{t_1 - t_g} \int_{t_g}^{t_1} c_m(t) dt, \quad (6.12b)$$

където t_g е времето за насищане.

Механичният отговор на тази дифузионна атака може да се моделира при допусканията, че

а). Незасегнатата област се деформира по степенния закон от глава 5

$$\dot{\varepsilon}_u = \dot{\varepsilon}_o \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_o} \right)^n. \quad (6.13)$$

Тук $\dot{\varepsilon}_u$ е скоростта на деформацията на незасегнатата /недефектирала/ област, σ_u - осовото напрежение в тази зона, σ_o - граничното осово напрежение на линейност на пълзенето и $\dot{\varepsilon}_o$ - съответната гранична скорост на деформиране в линейната област, която може да се изрази посредством резолвентата на ядрото на Колтунов

$$\dot{\varepsilon}_o = \varepsilon_o K(t) = \frac{\sigma}{E} \frac{\exp(-\beta t)}{t} \sum_{n=1}^N \frac{(A \Gamma^n(\alpha) t^{\alpha n})}{\Gamma(\alpha n)}. \quad (6.14)$$

където A , β и α са вискозни параметри идентифицируеми от кривите на пълзене (или което при наличие на съответна машина е по-лесно от кривите на релаксация на напреженията) в линейната област. На практика N се взема достатъчно голямо. Всички тези параметри зависят от температурата, но не толкова силно, колкото еластичният модул E .

б). Областта на проникване – w , без бързо дефектиращата част w_f , се подчинява на закона за пълзене (виж глава 1)

$$\dot{\varepsilon}_w = \dot{\varepsilon}_o \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_o} \frac{1}{1 - D(t)} \right)^n . \quad (6.15a)$$

Тук $D(t)$ е параметърът на дефектиране на Качанов, σ_w е напрежението в областта на бавно дефектиране (проникване с концентрация много по-малка от граничната).

с). Областта на бързо дефектиращата част w_f , се подчинява на закона за пълзене (гл.1)

$$\dot{\varepsilon}_f = \dot{\varepsilon}_o \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_o} \frac{1}{1 - D(t)} \right)^n . \quad (6.15b)$$

Тук σ_f е напрежението в областта на ускорено дефектиране (проникване с концентрация близка до граничната).

Равновесието и съвместимостта съответно изискват

$$\sigma = \sigma_f w_f + (w - w_f) \sigma_w + (1 - w) \sigma_u , \quad (6.16)$$

$$\dot{\varepsilon}_f + \dot{\varepsilon}_w = \dot{\varepsilon}_u = \dot{\varepsilon} . \quad (6.17)$$

В (6.16, 6.17) σ е глобалното напрежение, а $\dot{\varepsilon}$ глобалната (ефективна) скорост на пълзене.

Комбинирайки (6.13, 6.15, 6.16, 6.17), след трансформиране, за напрежението в бавно дефектиращата област (областта на проникване с концентрация $c = c_c$) и за глобалната скорост на деформиране получаваме

$$\sigma_w = \frac{\sigma(1 - D(t))}{1 - D(t)w(t)} , \quad (6.18)$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_o \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n \left(\frac{1}{1 - D(t)w(t)} \right)^n . \quad (6.19)$$

Ако сега приемем, че дефектира само частта от материала с проникнала среда, то законът за дефектиране може да се напише като

$$\frac{dD}{dt} = H \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_o} \right)^m \phi_d(D, t)^m . \quad (6.20)$$

където H и m се определят от кривите на Вюлер за материал с проникване равно на началното при което се забелязва промяна на свойствата (концентрация $c = c_c$), докато концентрационната функция има вида

$$\phi_d(D, t) = \frac{\sigma}{1 - D} f(t) + \frac{\sigma}{D} (1 - f(t)) . \quad (6.21)$$

Тук в уравнение (6.21) трябва да се има пред вид, че параметърът f обозначаващ относителната част от материала със сравнително слабо проникване и дефектиране и подчиняващ се на закона на Качанов, може да се изрази като (виж глава 5 и Фиг.6.1.)

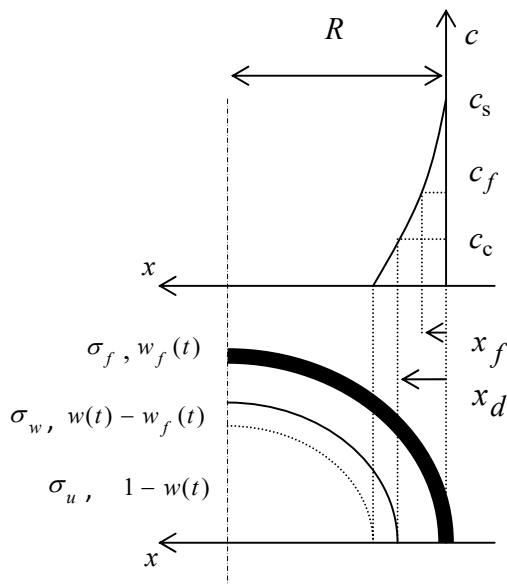
$$f(t) = 1 - \frac{w_f(t)}{w(t)}. \quad (6.22)$$

Окончателно от (6.18, 6.20) за натрупването на дефекти имаме

$$\frac{dD}{dt} = H \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^m \left(\frac{1 - \frac{w_f(t)}{w(t)} \left(2 - \frac{1}{D(t)} \right)}{1 - D(t) w(t)} \right)^m. \quad (6.23)$$

Четири уравнения (6.19, 6.11a, 6.11b и 6.23) представляват система от четири диференциални уравнения управляващи еволюцията на деформиране, проникване и дефектиране при опън на образци подложени на заобикаляща дифузионна атака. Тя съдържа необходимата информация за описване на деформационното поведение на материала при различни натоварвания и температури и може да предсказва и дълготрайността при свързаната задача, ако се предвиди критерий за преминаване в гранично състояние (разрушаване).

При образци с кръгло сечение – фиг.6.1 достигаме до:



Фиг.6.1 Дълбочина и площи на зоните на проникване, дефектиране и разрушаване при атака отвън, както и напреженията действащи в различните зони

$$\dot{w} = \frac{K}{R^2} \left(\frac{1}{1 - \sqrt{1 - w(t)}} - 1 \right), \quad \dot{w}_f = \frac{K_f}{R^2} \left(\frac{1}{1 - \sqrt{1 - w_f(t)}} - 1 \right), \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_o \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n \left(\frac{1}{1 - D(t) w(t)} \right)^n,$$

$$\frac{dD}{dt} = H \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^m \left(\frac{1 - \frac{w_f(t)}{w(t)} \left(2 - \frac{1}{D(t)} \right)}{1 - D(t) w(t)} \right)^m, \quad (6.24)$$

Четири уравнения (6.24) представляват система от четири диференциални уравнения управляващи еволюцията на деформиране, проникване и дефектиране при опън на образци с кръгло или пръстеновидно сечение подложени на заобикаляща дифузионна атака.

6.3 Експериментални сравнения

Ефектът на предварителна експозиция в кислород, вода, машинно масло и сярна киселина, както и ефектът на свързаната задача (натоварване в условията на съответна заобикаляща среда) върху пълзенето е изследван върху образци от бутадиеннитрилов и полиизопренов вулканизат. Заобикалящата среда дифундира във вулканизата, за да обособи зони на по-слабо (първа критична концентрация c_c) и по-силно (втора критична концентрация c_f) дефектирани междумолекулни граници, които намаляват съпротивата на пълзене. Експерименти на пълзене при наличие на заобикаляща среда при постоянно опъново напрежение $\sigma = 3$ [МПа] и нормално налягане бяха проведени при 20°C . Необходимите данни за двата вида вулканизати са систематизирани в таблици 6.1, 6.2 и 6.3. На следващите фигури са илюстрирани някои от теоретичните и експериментални резултати.

Таблица 6.1 Еластовискозни характеристики на изследваните вулканизати

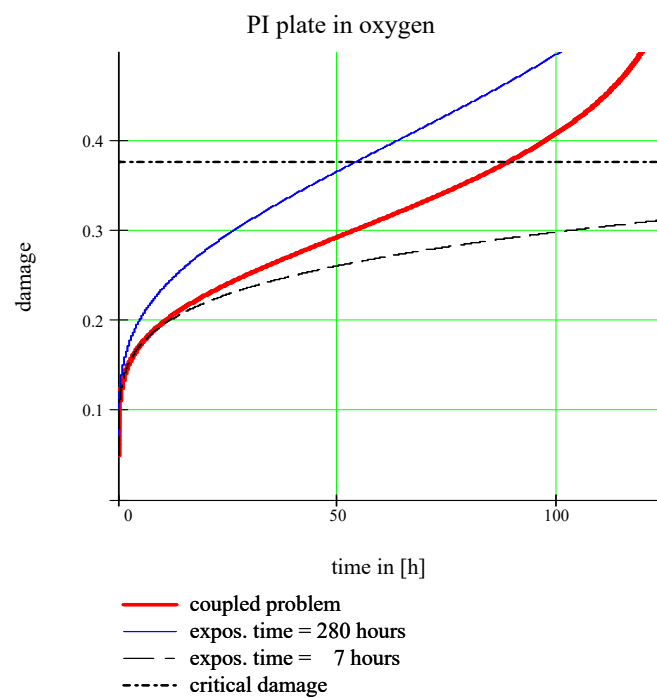
характеристики	еластовискозни					
	мигновенни			наследствени		
параметри	E	σ_o	n	A	α	β
дименсия	МПа	МПа	-	-	-	-
Полиизопрен	1.420	0.75	1.71	0.0032	0.97	0.0140
Бутадиеннитрил	3.025	0.50	1.55	0.0029	0.77	0.0089

Таблица 6.3 Якостни и дифузионни характеристики на изследваните вулканизати в среди

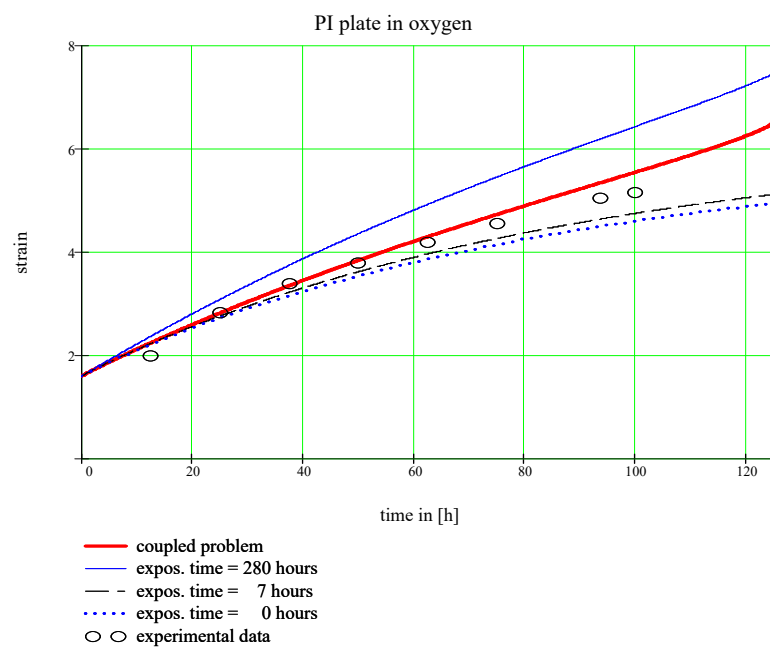
характеристики	якостни				дифузионни	
	дефект.	дълготр. якост		мигнов.	1 крит.	2 крит.
параметри	D^*	$H \times 10^{-6}$	m	σ_f	c_c / c_s	c_f / c_s
дименсия	-	-	-	МПа	-	-
ПИ § вода	0.74	0.2218	5.172	10.45	0.596	0.953
ПИ § маш. м-ло	0.43	0.3551	4.911	10.00	0.579	0.863
ПИ § 20% H ₂ SO ₄	0.42	0.4102	5.520	8.45	0.455	0.937
ПИ § кислород	0.38	0.0066	6.686	7.15	0.477	0.870
БН § вода	0.69	3.6840	3.548	27.45	0.374	0.814
БН § маш. м-ло	0.58	2.2580	3.809	29.95	0.420	0.950
БН § 20% H ₂ SO ₄	0.43	21.450	3.128	18.20	0.365	0.932
БН § кислород	0.34	0.8500	3.319	18.05	0.332	0.797

Таблица 6.2 Коефициенти на дифузия на изследваните вулканизати в среди

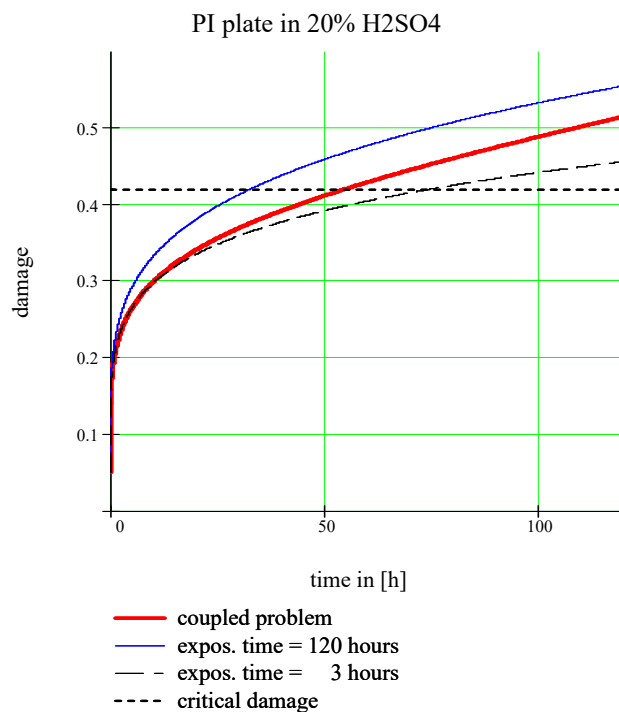
параметър	D
дименсия	$m^2/h \times 10^{-9}$
ПИ § вода	2.425
ПИ § маш. м-ло	4.829
ПИ § 20% H ₂ SO ₄	3.871
ПИ § кислород	17.050
БН § вода	2.271
БН § маш. м-ло	1.504
БН § 20% H ₂ SO ₄	3.921
БН § кислород	14.555



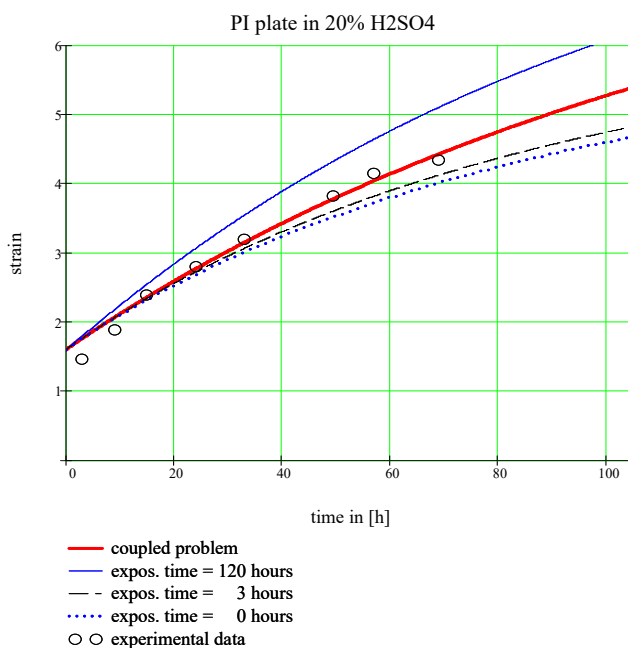
Фиг.6.7. Дефектиране във времето за ПИ вулканизат в кислород. Дебела линия-свързана задача. Тънка линия-голямо време на предекспониране, с прекъсната линия - малко време на предекспониране. Показано е и критичното дефектиране при което в зоната на критично проникване материалът е променил цвета си.



Фиг. 6.8 Криви на пълзене за ПИ вулканизат в кислородна среда. Свързана задача – удебелено. Несвързана задача - тънка и прекъсната линии: времена на предварително експониране 280 и 7 [часа] съответно. С точки – неатакуван образец (време за предварително експониране = 0).



Фиг. 6.9 Дефектиране във времето за ПИ вулканизат в 20% р-р на сярна киселина. Дебела линия-свързана задача. Тънка линия - голямо време на предварително задържане = 120 часа, с прекъсната линия – по-малко време на предварително задържане (предекспониране) = 3 часа.



Фиг. 6.10 Криви на пълзене за ПИ вулканизат в 20% р-р на сярна киселина. Свързана задача – удебелено. Несвързана задача – тънка и прекъсната линии: времена на предварително експониране 120 и 3 [часа] съответно. С точки – неатакуван образец (време за предварително експониране = 0).

На горните фигури пълзенето и натрупването на дефектите във времето са получени по модела за свързаната задача и за две времена на предварително експониране на ПИ лентови вулканизати (образци с дебелина $h = 3 \text{ mm}$, ширина $b = 15 \text{ mm}$ и дължина $l = 150 \text{ mm}$ - фигура 5.1) съответно във кислород и 20% разтвор на сярна киселина. Тук са показани само някои от резултатите. Както добре се забелязва нарастването на дефектите при свързаната задача се намира между линията на малкото предварително експониране в агресивната среда и тази на по-голямото предварително задържане. От фигурите става ясно, че аналогично заключение може да се направи и за кривите на пълзенето.

6.4 Заключение от глава 6

Предлаганите модели и методът базиран на тях са в състояние добре да опишат няколко едновременно протичащи процеса (дифузия на заобикаляща среда, дефектиране, реология), при което да предскажат механичното поведение до разрушаване на разглежданите материали. От представените фигури по-долу се вижда, че при по агресивните среди (кислород, киселина) нарастването на дефектите при свързаната задача има силно изразен S образен характер. В началото дефектирането е с голяма скорост, но има тенденция към затихване, след което процесът силно се ускорява до настъпване на критично (гранично) състояние, което е близко до разрушаването. Подобно поведение се наблюдава дори и в условията на предварително експониране, но е по-слабо изразено. При свързаната задача дефектирането във времето се намира между кривите при малка и голяма предекспозиция. Подобно е и положението при кривите на пълзене. Дефектирането влияе върху пълзенето на материала, което при свързаната задача се намира между кривите при малка и голяма предекспозиция

7. ГЛАВА. СВЪРЗАНА ЗАДАЧА. ВЛИЯНИЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА

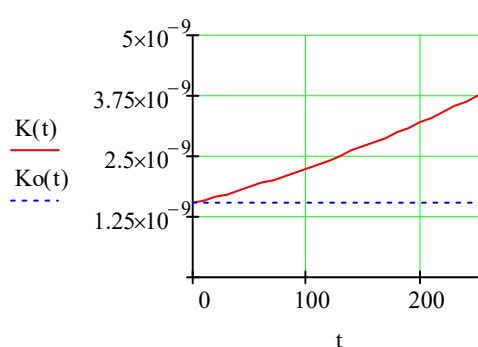
7.1 Отчитане на променлива температура при дифузия

За определяне на параметрите K (виж глава 6 уравнения 6.36) двете зони на проникване – по-слабо и ускорено се обособяват и две зони на дефектиране – по-слабо и ускорено дефектиране. Коефициентът на дифузия влиза в уравненията характеризиращи тези две зони и неговата зависимост от температурата ще бъде отчетена за съответните зони. Стига се до следните уравнения

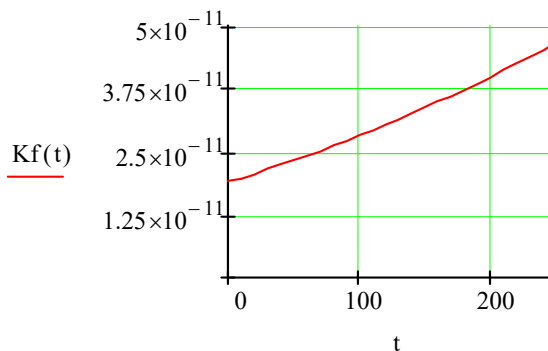
$$K(t) = \frac{8D(t)}{\pi k} \ln(\sec) \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{c_c}{c_s}\right), \quad K_f(t) = \frac{8D(t)}{\pi k} \ln(\sec) \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{c_f}{c_s}\right). \quad (7.1)$$

Смисълът на параметрите е както в уравнение (6.36)

Промяната на параметрите от уравнения (7.1) за полиизопрен (ПИ) във вода са илюстрирани на фигури 7.1 и 7.2.



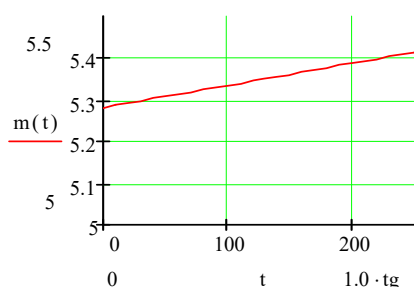
Фиг.7.1 Нарастване на параметъра $K(t)$ с времето (за сравнение с син пунктир е показан параметърът при постоянна температура равна на началната)



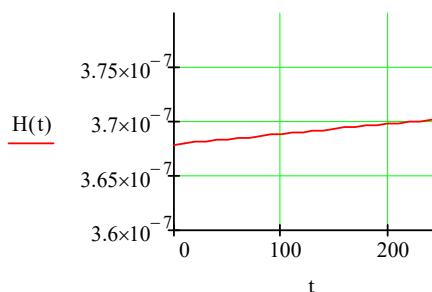
Фиг.7.2 Нарастване на параметъра $Kf(t)$ с времето

7.2 Отчитане на променлива температура при дефектиране

Влиянието на температурата върху кривите на Вьолер от които се идентифицират параметрите на дефектиране изисква допълнителни експерименти за определяне на зависимостите на параметрите на дефектиране от температурата и след това от времето. Необходимо е за няколко температури да се идентифицират параметрите от кривите на Вьолер и да се апроксимират с подходящи изрази. Това е направено и илюстрирано по-долу за ПИ вулканизат.



Фиг.7.3 Нарастване на параметъра на дефектиране $m(t)$ с времето



Фиг.7.4 Нарастване на параметъра на дефектиране $H(t)$ с времето

7.3 Влияние на температурата върху механичното поведение

За тази цел се използва температурно времева аналогия (ТВА). ТВА както е известно [16,50,51,] при големи деформации и при вискоеластично състояние не винаги е в сила.

За предлаганите в дисертацията граници на температурно-времените интервали, а именно $20^{\circ}C \leq T \leq 60^{\circ}C$ и $0 \leq t \leq 300$ часа, се допуска термореологично просто поведение на материалите (еластомерните вулканизати ПИ и БН). Това е състояние при което дълготрайният еластичен модул не зависи от температурата [16,50,51]. При използваната от нас наследствена теория този модул е пропорционален на интеграла $\int_0^{\infty} K(t-\tau) d\tau$. С други думи

приемаме, че $\int_0^{\infty} K(t-\tau) d\tau = \text{inv}T$. Това лесно може да се провери. В [69] е показано, че за много материали ТВА е в сила и за нелинейната област на поведение. Използваме уравнението на Уилям-Ландау-Фери [50,16]

$$a_T(s) = 10^{\frac{-C_1(\theta(s)-T_{ref})}{C_2+(\theta(s)-T_{ref})}}, \quad (7.2)$$

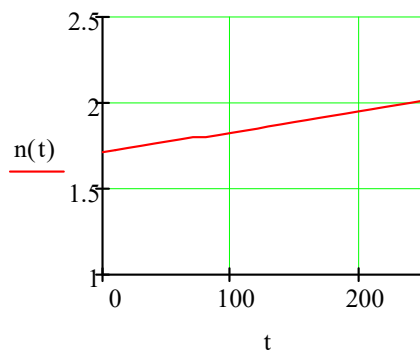
както и интегралната трансформация касаеща променливата във времето температура (като външна атака)

$$t_{tr}(t) = \int_0^t \frac{s}{a_T(s)} ds. \quad (7.3)$$

В уравнение (7.2) с $\theta(s)$ е отбелязана текущата температура, T_{ref} е температура за сравнение (обикновено стайната или тази на остъкляването, при което в някои случаи константите C_1 и C_2 имат универсален характер). В общия случай тези константи се определят експериментално от опити на пълзене или релаксация при различни температури. В последващите уравнения времето се взема според уравнение (7.3) като по този начин се отчита влиянието на температурата върху механичното поведение при термо-реологично простите материали.

Влияние на температурата върху физическата нелинейност

Това се отчита посредством параметъра на нелинейност n , който сега е функция на температурата, а оттам и на времето. Тази промяна е илюстрирана на фиг. 7.8.



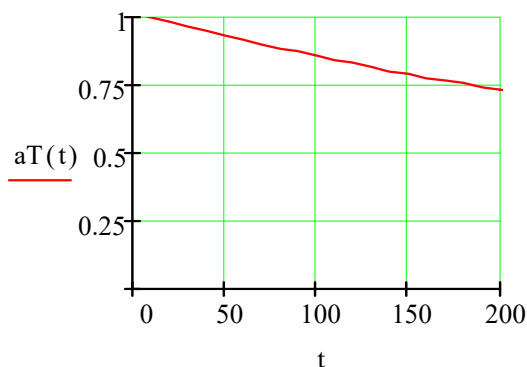
Фиг.7.8 Нарастване на параметъра на нелинейност $n(t)$ с времето

Ядрото на пълзене при отчитане на променлива температура добива вида:

$$K(t) = \frac{\exp(-bt_{tr}(t))}{t_{tr}(t)} \sum_{i=1}^M \frac{(A\Gamma(\alpha))^i (t_{tr}(t))^{\alpha i}}{\Gamma(\alpha i)} . \quad (7.5)$$

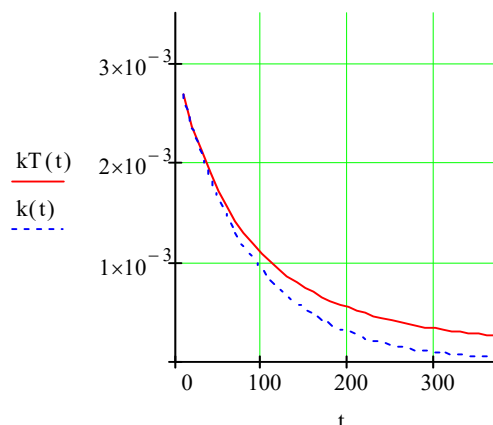
На следващата по-долу фигура е илюстрирана промяната на фактора на пълзгане с времето според уравнението на Уилям-Ландал-Фери (WLF).

Да не се бъркат ядрото на пълзене $K(t)$ и параметъра $K(t)$ от уравнение (7.1).



Фиг.7.9 Промяна на фактора на пълзгане с времето според уравнението на WLF

На следващата фигура (7.10) са показани ядрата на пълзене в наследственото уравнение при постоянна и променлива (според фактора на пълзгане от горната фигура) температура.



Фиг. 7.10 Ядра на пълзене при постоянна и променлива температура за ПИ.

7.4 Отчитане на променлива температура при свързаната задача

Въпросът за променлива температурна атака по отношение на дифузията, дефектирането и механичното поведение (пълзенето) беше изяснен по-горе. Сега трябва да се въведат тези разсъждения и резултати успоредно с предишните точки от 6-та глава (да се състави на ново системата диференциални уравнения за свързаната задача).

Така се стига до заключението, че за да се отчете един зададен закон за промяна на температурата (примерно линейно нарастване както в глава 3) е необходимо в първите две формули на (6.41) – за свързаната задача, да се отчете промяната на параметрите K и K_f с времето. Това е, за да се отчете промяната на дифузионния процес. Въз основа на ТВА ще се отчете и промяната на реологията с времето (пълзенето). Влиянието на температурата върху дефектирането би могло да се отчете, ползвайки уравнението на Журков или да се направят допълнителни експерименти за отчитане промяната на параметрите на дефектирането с температурата. Физическата нелинейност също се променя с температурата. Въз основа на няколко допълнителни експеримента са получени следните резултати касаещи промяната на съответните параметри с температурата.

Тук трябва да се напомни за изискването (ограничението) скоростта на разпространение на температурата значително (най-малко на порядък) да превишава скоростта на дифузията. Това изискване ще бъде изпълнено, тъй като в този случай скоростта на дифузия ще нарастне около два до три пъти, докато разпространението на температурата остава на два порядъка по-високо.

За зададения в точка 1 закон за промяна на температурата – уравнение (3.4), от което следват съответни нараствания на коефициента на дифузията (виж фигури 3.6 до 3.8), системата диференциални уравнения (6.41) описваща пълзенето, проникването и дефектирането вече изглежда така:

$$\dot{w} = \frac{2K(t)}{h^2 w}, \quad \dot{w}_f = \frac{2K_f(t)}{h^2 w}, \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n(t)} \left(\frac{1}{1-D(t)w(t)} \right)^{n(t)},$$

$$\frac{dD}{dt} = H(t) (\sigma)^{m(t)} \left(\frac{1 - \frac{w_f(t)}{w(t)} \left(2 - \frac{1}{D(t)} \right)}{1 - D(t)w(t)} \right)^{m(t)} \quad (7.6)$$

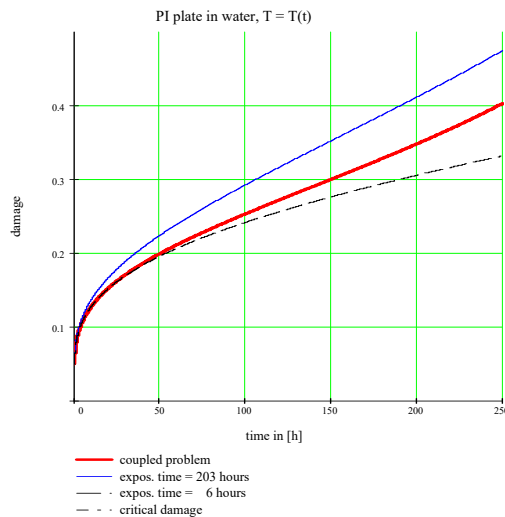
В системата (7.6)

$$K(t) = \frac{8D(t)}{\pi k} \ln(\sec) \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{c_c}{c_s} \right), \quad K_f(t) = \frac{8D(t)}{\pi k} \ln(\sec) \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{c_f}{c_s} \right). \quad (7.7)$$

Освен това според (7.1)

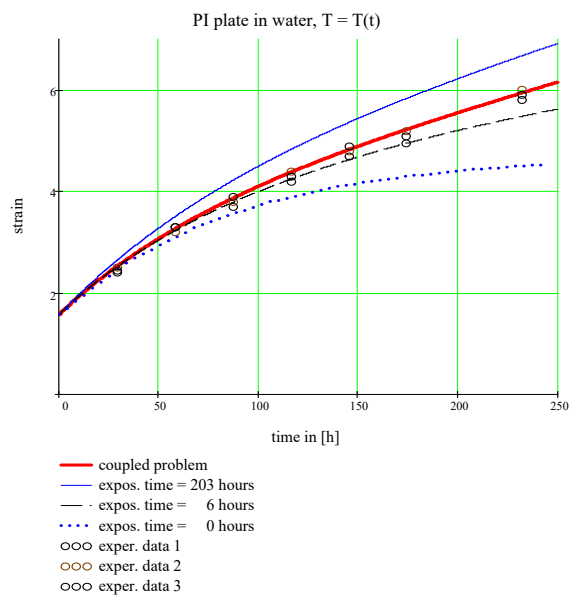
$$D(t) = D_o \exp\left(-\frac{E_{ac}}{RT(t)}\right) = D_o H(t). \quad (7.8)$$

На следващите фигури 7.11, 7.12 е показано нарастването на дефектите при нарастваща по линеен закон температура (7.4), както и нарастването на деформацията при опън на лентови обпаци от ПИ вулканизат. Решението е получено на база на численно решаване на системата (7.6). По-нататък са илюстрирани и резултатите от решението на свързаната задача – системата диференциални уравнения (7.6) по отношение на бутадиен-нитриловия вулканизат (БН) във вода при нарастваща по същия линеен закон температура – уравнение (3.4).



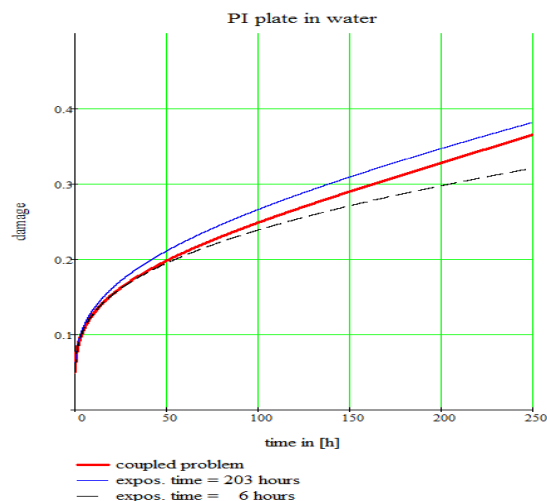
Фиг. 7.11 Дефектиране във времето за ПИ вулканизат във вода при нарастваща температура.

Дебела линия-свързана задача. Тънка линия - голямо време на предварително задържане = 203 часа , с прекъсната линия – по-малко време на предварително задържане (предекспониране) = 6 часа.

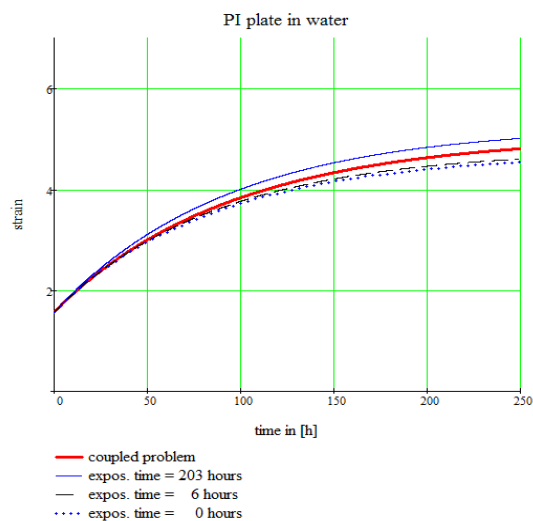


Фиг. 7.12 Криви на пълзене за ПИ вулканизат във вода при нарастваща температура.
 Свързана задача – удебелено. Несвързана задача – тънка и прекъсната линии:
 времена на предварително експониране 203 и 6 [часа] съответно.
 С точки – неатакуван образец (време за предварително експониране = 0).
 С кръгчета експериментални данни от три изпитвания за всяка точка.

За сравнение по-долу показваме и съответните криви при постоянна температура.

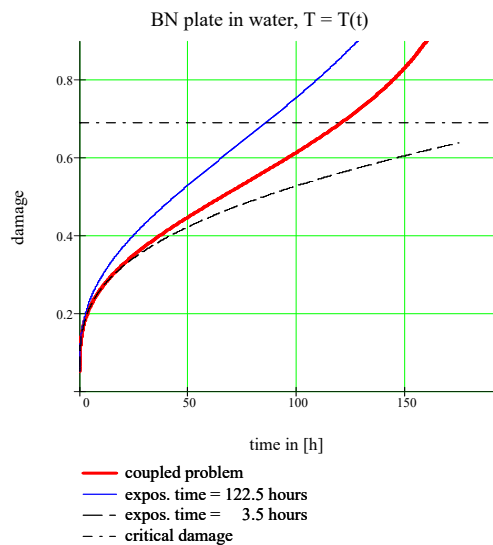


Фиг. 7.13 Дефектиране във времето за ПИ вулканизат във вода при постоянна температура 20 оС.
 Дебела линия-свързана задача. Тънка линия - голямо време на предварително задържане = 203 часа , с прекъсната линия – по-малко време на предварително задържане (предекспониране) = 6 часа.

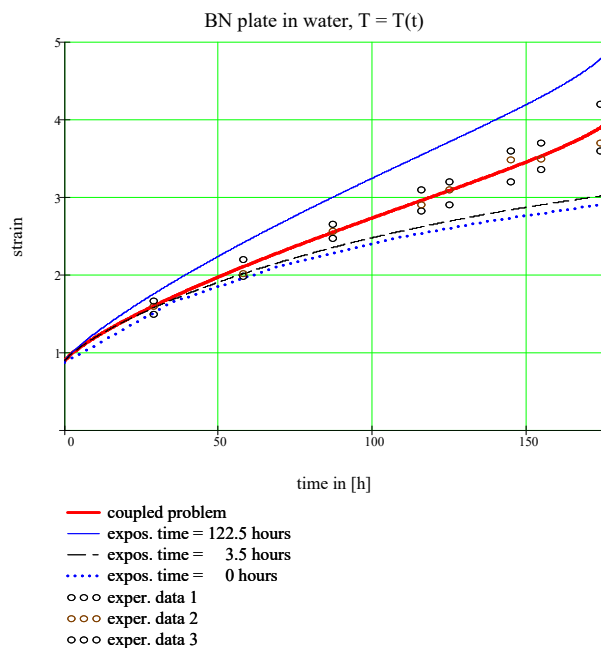


Фиг. 7.14 Пълзене във времето за ПИ вулканизат във вода при постоянна температура.
Дебела линия-свързана задача. Тънка линия - голямо време на предварително задържане = 203 часа , с прекъсната линия – по-малко време на предварително задържане (предекспониране) = 6 часа.

На следващите фигури 7.15 и 7.16 е показано нарастването на дефектите и пълзенето при натоварване от 3 [МПа] на БН вулканизат във вода при нарастваща според (3.4) температура.

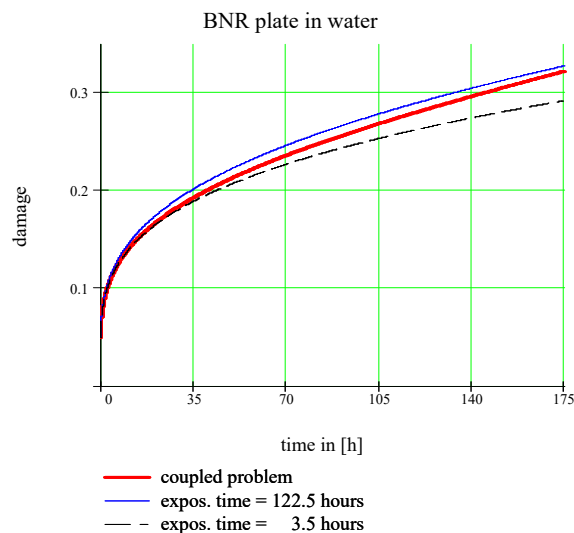


Фиг.7.15 Дефектиране във времето за БН вулканизат във вода при нарастваща температура.
Дебела линия-свързана задача. Тънка линия - голямо време на предварително задържане = 122.5 часа , с прекъсната линия – по-малко време на предварително задържане (предекспониране) = 3.5 часа. С осова линия – критичното дефектиране.

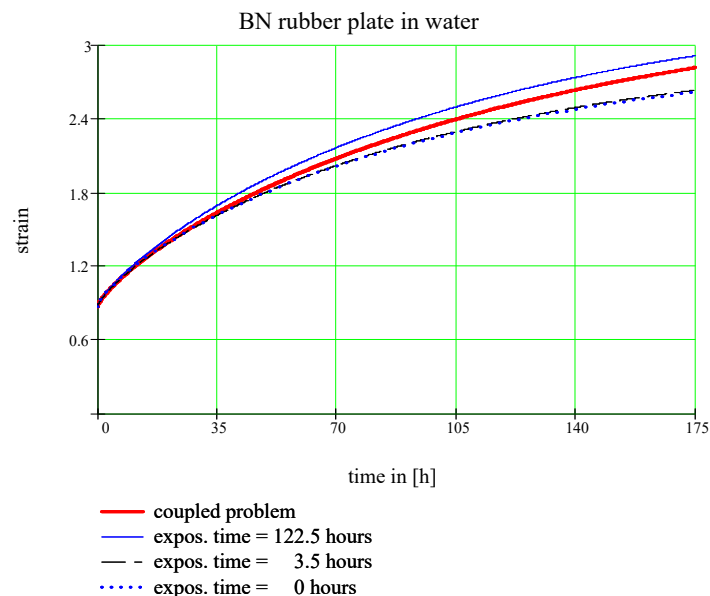


Фиг. 7.16 Криви на пълзене за БН вулканизат във вода при нарастваща температура.
Свързана задача – удебелено. Несвързана задача – тънка и прекъсната линии:
времена на предварително експониране 122.5 и 3.5 [часа] съответно.
С точки – неатакуван образец (време за предварително експониране = 0).
С кръгчета експериментални данни от три изпитвания за всяка точка

За сравнение по долу са показани и съответните криви (фиг.7.17 и 7.18) при постоянна
стайна температура.



Фиг. 7.17 Дефектиране във времето за БН вулканизат във вода при стайна температура.
Дебела линия-свързана задача. Тънка линия - голямо време на предварително
задържане = 122.5 часа , с прекъсната линия – по-малко време на предварително
задържане (предекспониране) = 3.5 часа.



Фиг. 7.18 Криви на пълзене за БН вулканизат във вода при постоянна температура.
 Свързана задача – удебелено. Несвързана задача – тънка и прекъсната линии:
 времена на предварително експониране 122.5 и 3.5 [часа] съответно.
 С точки – неатакуван образец (време за предварително експониране = 0).

От сравнението се вижда добре, че влиянието на нарастващата температура е значително, както при кривите на деформиране така и при тези на пълзенето.

7.5 Заключение от глава 7

При наличие на променлива температура (едновременна дифузионна и термична атака) с помощта на една интегрална трансформация на времето водеща до съответна промяна на коефициента на дифузия, след идентификация на параметрите на деформиране при различни температури (в определен температурен интервал без екстраполация) и след прилагане на фактора на плъзгане според температуро-времевата аналогия (тук се налага още една интегрална трансформация) се стига до система нелинейни диференциални уравнения подобни на тези при постоянна температура, но усложнени с променливи във времето параметри и най-вече с две интегрални трансформации във времето. Получените резултати показват значително нарастване на деформирането и пълзенето в случая на относително неголямо линейно нарастване на температурата.

Моделът позволява да се въведе и по-сложна функция на промяна на температурата, но без рязка промяна на температурната атака (например силно циклираща по отношение на честотата и амплитудата промяна на температурата), за да не се наруши основополагащото допускане за хомогенност на температурното поле по координатите на материала.

ПРИНОСИ

Приносите в работата имат научно-приложен и приложен характер и могат да се характеризират както следва:

По отношение на научно-приложните приноси:

1. Предложен е модел на дефектиране съдържащ зона на слабо и силно дефектиране отчитащ влиянието на по-ниска и по-висока концентрация на дифундирала в материала среда заедно с отчитане на променлива температура.
2. Предложено е приблизително решение на уравнението на Фик при променлива температура, разрешимо по отношение на координатата на проникването
3. Решена е свързаната задача за определяне на пълзенето и дефектирането в условията на дифундиращ флуид при наличие на променлива температура и големи деформации

По отношение на приложните приноси:

4. Получени са коефициентите на дифузия за два еластомера и четири среди както и промяната им с температурата
5. Подробно е изследвано поведението на два вида прилагани в практиката вулканизати в условия на четири често срещани в практиката заобикалящи среди
6. Получените данни за разглежданите видове вулканизати (2) и среди (4) могат да бъдат използвани в практиката при решаване на якостни задачи и могат да допълнят библиотеките от данни за различни видове програми.
7. Изследвано е поведението на два вида вулканизати при наличие на проникваща вода и температурна атака
8. Разработени са съответни програми в средата на MathCad за решаване на горните задачи.

Публикации и договори на инж. Гюнай Халил свързани с дисертацията

1. Alexandrov A., Hallil G., Kolev M., Milenova M., Diffusion of liquid media in vulkanizats, International Electronic of Pure and Applied Mathematics, volume 3, Nr 1, 2011, 91-100.
2. Александров А., Халил Г., Хаджов Кл. Изследване на вулканизати в условия на механични натоварвания и агресивни среди, Science Inv. LTD,Bulgaria, ISBN 978-954-9368-24-6, 2007, 135-147, www.eJournalNet.com.
3. Hallil G., Hadjov K.,Aleksandrov A., Milenova M. Sur une approximation de la solution de l'équation de Fick concernant les élastomères, Revue de Génie industriel, 2010, 62-67.
4. Hadjov Kl., Alexandrov A.,Milenova M., Hallil G. Nonlinear elasto-viscosity of rubbers at large deformations, Journal of the UCTM, 2011.
5. Hadjov K., Hallil G.,Aleksandrov A.,Milenova M. Endommagement des élastomères dans des milieux pénétrants. Revue de Génie industriel, 2010, 53-61.
6. Hadjov K., Alexandrov A., Hallil G., Milenova M., Marin M. Creep and Damage of Rubbers Surrounded by Aggressive Media. ICOME Congress, Craiova, Romania, 2010.
7. Pavlitov C., Alexandrov A., Russinov R., Hallil G.B. Monte Carlo Error Analysis of a Strain Gauge Monitoring Device.Journal of the UCTM, 40,2 2005, 145-152.
8. Hadjov K., Hallil G., Milenova M. Behavior of Rubbers in the Case of Diffusion and variable Temperature, Journal of the UCTM, 48,6, 2013, 611-613.
9. Hadjov K., Hallil G., Alexandrov A., Milenova M., Delmas Y. Damage of rubbers in Aggressive Media, ATC, Buletin of Engineering, ISSN 2067-3809, fascicule 3, Tome 3, 2010
10. Хаджов К.,Александров А.,Халил Г.,Александрова В.,Влияние на температурата върху пълзенето на вулканизати в среди,Издателство на ТУ-Варна,Механика на машините,ISSN 0861-9727,Година XXIV,Книга 1, 2016.

Участие в договори

1. Александров А., Д.Дончев, Ц.Цолов, Халил Г. Изследване на вулканизати в условията на механично натоварване и агресивни среди, договор №10080, НИС-ХТМУ, 2004.
2. Александров А., Халил Г.,Пешева В., Миленова М, Термични ефекти в гумено-метални технически изделия, НН 5/85/21.12.2006.

ПРОГРАМИ В СОФТУЕРНАТА СРЕДА “MATHCAD 15 PROFESSIONAL”

Тук са дадени разпечатки само на някои програми. Останалите случай се конструират аналогично.

- Програма 1. Решаване на задачата за намиране параметрите на дефектиране
- Програма 2. Решаване на свързаната задача при променлива температура за ПИ и вода