



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Катедра „Съпротивление на материалите”

маг. инж. ВЕСЕЛИН ЦВЕТАНОВ ЦОНЕВ

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕХАНИЧНИ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЛЕГИРАНИ СТОМАНИ В
УСЛОВИЯТА НА ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд
за присъждане на образователна и научна степен

„ДОКТОР”

в област на висше образование

5. Технически науки

професионално направление

5.1. Машинно инженерство

научна специалност

Строителна механика и съпротивление на материалите

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Ленин Димитров Лазов

София, 2011 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Съпротивление на материалите” при Технически университет – София, състоял се на 07.10.2011 г.

Авторът работи като главен асистент в катедра „Съпротивление на материалите” при Технически университет – София, където е разработен дисертационният труд.

Експерименталните изследвания са проведени в лабораториите на катедра „Съпротивление на материалите” при Технически университет – София.

Номерата на точките, фигурите, зависимостите, таблиците и цитираната литература в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Дисертационният труд е в обем от 135 страници и съдържа: 4 глави, 102 фигури, 24 таблици и използвана литература от 60 източника.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 23.03.2012 г. от 14:00 часа в зала 1214 на Технически университет – София.

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на Транспортен факултет на Технически университет – София.

Автор: маг. инж. Веселин Цветанов Цонев

Заглавие: Изследване на механични характеристики на легирани стомани в условията на високи температури

Тираж: 50 броя

Печатна база: издаделство на ТУ – София

КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**АКТУАЛНОСТ**

Развитието на съвременните енергетика, химическа промишленост, металургия, авиация, автомобилна индустрия и много други области на техниката е свързано с използването на материали, работещи при високи температури. В тези условия на работа към съответните конструкционни елементи се предявяват редица изисквания. Високите и разнообразни изисквания трябва да съчетават минимален запас на якост на детайлите с необходимата надеждност при осигурена икономичност и конкурентно-способност. В някои случаи разработването на машини и устройства (например съвременните реактивни двигатели), които да работят в екстремни условия на експлоатация, може да се окаже технически неизпълнима задача, ако няма достатъчно данни за поведението на материалите в тези условия.

За работа в условията на повишени температури се използват топлоустойчиви материали, работещи на границата на якостно-деформационните им възможности. Непрекъснатото усъвършенстване на технологиите позволява производството на нови топлоустойчиви материали. Това определя актуалността на изследване на механичните им характеристики в условията на високи температури.

ГЛАВА 1**ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР**

В глава 1 е направен анализ на изследванията в областта на високите температури. Дадени са най-често използваните зависимости за описване на кривите на пълзене в страните от ЕС. Обърнато е внимание на критериите за оценяване на конструкционни елементи, работещи при високи температури. Проучена е апаратурата за изпитване на материалите при високи температури.

V. Изводи

1. Якостно-деформационните изследвания при високи температури могат да се разделят на следните видове:

- 1.1. Изследвания в условията на високи температури при статично натоварване.
- 1.2. Изследвания с подържане на постоянни стойности на температурата и товара.
- 1.3. Изследвания с подържане на постоянна стойност на температурата и различни режими на натоварване.
- 1.4. Изследвания при въздействие на различни комбинации от стойности на температура и напрежение.

2. Подходът при изследване поведението на материалите при високи температури в условията на пълзене е следният: провеждат се експериментални изследвания след което се търсят зависимости, описващи получените резултати.

3. Обикновено експерименталните изследвания се правят за ограничен период от време след което се търсят критерии за прогнозиране поведението на материала за време, надвишаващо времето на експериментите.

4. Техниката за изпитване на материалите при високи температури е сложна, специфична и скъпа. Подържането ѝ по време на експлоатация изисква допълнителни разходи, свързани с калибриране и ремонт, които се извършват от представители на фирмите-производители на съответната техника. Затова закупуването на готови изпитвателни системи е неизгодно. Опитът показва, че в повечето случаи е целе-

съобразно купуването на отделни компоненти и собствено разработване на останалите елементи и софтуерни продукти, според целите на изследването. Така научноизследователският екип има възможност да поддържа и усъвършенства техниката в хода на продължителната работа, наложена от естеството на изпитванията. Освен това, изследователите могат по-добре да оценят въздействието на изпитвателната техника върху експерименталните резултати, което е предпоставка за по-точното им тълкуване.

VI. Цел и задачи

Всяка фирма-производител на конструкционни елементи, предназначени за работа при високи температури, трябва да провежда експериментални изследвания за установяване на поведението на материала, от който те са изработени, при съответните температури, независимо дали при производството са използвани съществуващи или собствено разработени марки стомани.

На тази база е формулирана целта на дисертацията: **ДА СЕ РАЗРАБОТЯТ УСЪВЪРШЕНСТВАНИ МЕТОДИКА И СРЕДСТВА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ И ОЦЕНКА НА МЕХАНИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА БЪЛГАРСКИ ЛЕГИРАНИ СТОМАНИ В УСЛОВИЯТА НА ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ.**

За постигане на поставената цел са формулирани следните задачи:

- 1) Да се разработи усъвършенствана методика за изпитване на опън при високи температури.
- 2) Да се проектират, изработят и изследват усъвършенствани средства за изпитване на материалите при високи температури.
- 3) Да се определят механичните характеристики на легирана стомана в условията на статично натоварване при температури 800, 900 и 1000 °C.
- 4) Да се изследва поведението на легирана стомана в условията на кратковременно пълзене при температура 900 °C и се прогнозира поведението и за време, надвишаващо времето на експериментите чрез границата на пълзене.
- 5) Да се определи границата на продължителна якост на легирана стомана и чрез нея да се прогнозира поведението ѝ за време, надвишаващо времето на експериментите.

ГЛАВА 2

УСЪВЪРШЕНСТВАНА МЕТОДИКА ЗА ИЗПИТВАНЕ НА ОПЪН ПРИ ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ

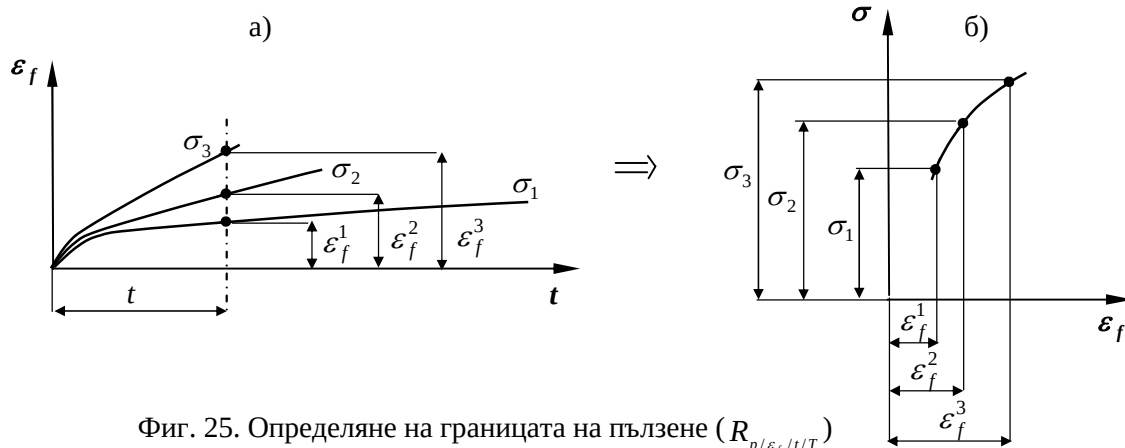
В глава 2 е обобщена информацията от стандартите за изпитване на материалите при високи температури (същност на методиката, деформации, пробни тела, изисквания към средствата за изпитване на материалите при високи температури, условия на изпитване, определяне на механични характеристики при статично натоварване). Допълнително са разработени алгоритми за определяне на границата на пълзене и параметъра на Larson-Miller. Разработена е програма за пресмятане на параметъра на Larson-Miller. Предложени са методики за прогнозиране на поведението на материалите за време, надвишаващо времето на експериментите.

VII. Определяне на границата на пълзене

1. Провежда се експерименталното изследване при желаната температура и различни стойности на напрежението.
2. От получените резултати се изчертава съответното семейство криви на пълзене (фиг. 25a).

3. На чертежа със семейството криви на пълзене при различни напрежения се прекарва вертикална права на разстояние t от ординатната ос (интервалът от време, при който се търси границата на пълзене) – фиг. 25а.

4. Установява се зависимостта на напрежението от деформацията на пълзене в графичен вид (фиг. 25б). По тази графика се намира стойността на границата на пълзене като ордината на точката, чиято абсциса е ε_f .



Фиг. 25. Определяне на границата на пълзене ($R_{p/\varepsilon_f/t/T}$)

VIII. Определяне на границата на продължителна якост чрез параметъра на Larson-Miller

1. Провежда се експериментално изследване при две температури T_1 и T_2 , за три стойности за σ ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). При $T_i = \text{const}$ ($i = 1, 2$) се изпитват 3 пробни тела, за всяка стойност на $\sigma_j = \text{const}$ ($j = 1 \div 3$) и се определят времената до разрушаване t_n ($n = 1 \div 3$).

2. Определят се средните стойности на времето за разрушаване t_{ij} за различните комбинации от $T_i = \text{const}$ и $\sigma_j = \text{const}$:

$$(23) \quad t_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^3 t_n}{3}.$$

3. За напрежение σ_1 съгласно параметъра на Larson-Miller може да се запише:

$$(24) \quad \begin{aligned} P_{\sigma_1} &= T_1(C_{\sigma_1} + \lg t_{11}) \\ P_{\sigma_1} &= T_2(C_{\sigma_1} + \lg t_{12}) \end{aligned}$$

4. От (24) се получава:

$$(25) \quad \begin{aligned} P_{\sigma_1} &= \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \lg \frac{t_{12}}{t_{11}} \\ C_{\sigma_1} &= \frac{1}{T_1 - T_2} (T_2 \lg t_{12} - T_1 \lg t_{11}) \end{aligned}$$

По аналогичен начин се определят $P_{\sigma_2}, C_{\sigma_2}, P_{\sigma_3}, C_{\sigma_3}$ (табл. 8, кол. 5 и 6).

5. Определя се средната стойност на материалната константа C :

$$(26) \quad C = \frac{\sum_{j=1}^3 C_{\sigma_j}}{3} = \frac{C_{\sigma_1} + C_{\sigma_2} + C_{\sigma_3}}{3}.$$

6. С получената стойност на C съгласно параметъра на Larson-Miller се пресмятат P_{ji} (табл. 8, кол. 7):

$$(27) \quad P_{ji} = T_i(C + \lg t_{ji}).$$

7. Определя се средните стойност на P_j (табл. 8, кол. 8):

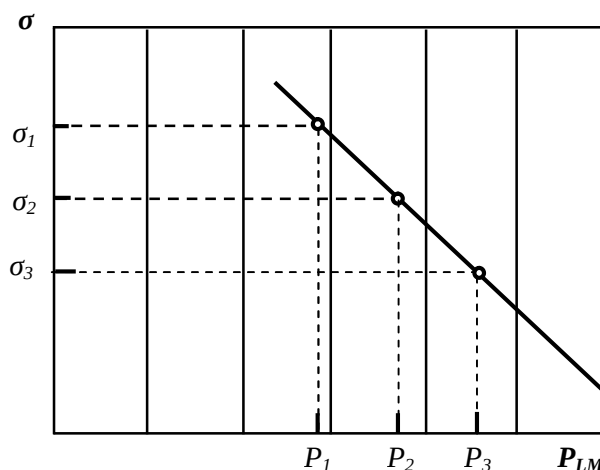
$$(28) \quad P_1 = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{1i}}{2}, \quad P_2 = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{2i}}{2}, \quad P_3 = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{3i}}{2}.$$

8. Изчисляват се грешките между $P_{\sigma j}$ и P_j (табл. 8, кол. 9):

$$(29) \quad \Delta = \frac{P_{\sigma j} - P_j}{P_{\sigma j}} 100, \%$$

9. Изчислените грешки се сравняват с предварително приета допустима стойност $\Delta_{\text{дон}}$.

9.1. Ако изчислената грешка е по-малка от допустимата, се построява графиката на изменение на параметъра P_{LM} в зависимост от границата на продължителна якост – фиг. 27.



Фиг. 27. Връзка между границата на продължителна якост и параметъра на Larson-Miller

9.2. Ако грешката е по-голяма от допустимата стойност, се провеждат допълнителни експерименти за още две стойности на σ (σ_4 и σ_5) и пресмятанията се допълват. За целта се определят стойностите $P_{\sigma 4}$, $C_{\sigma 4}$, $P_{\sigma 5}$, $C_{\sigma 5}$, и се пресмята:

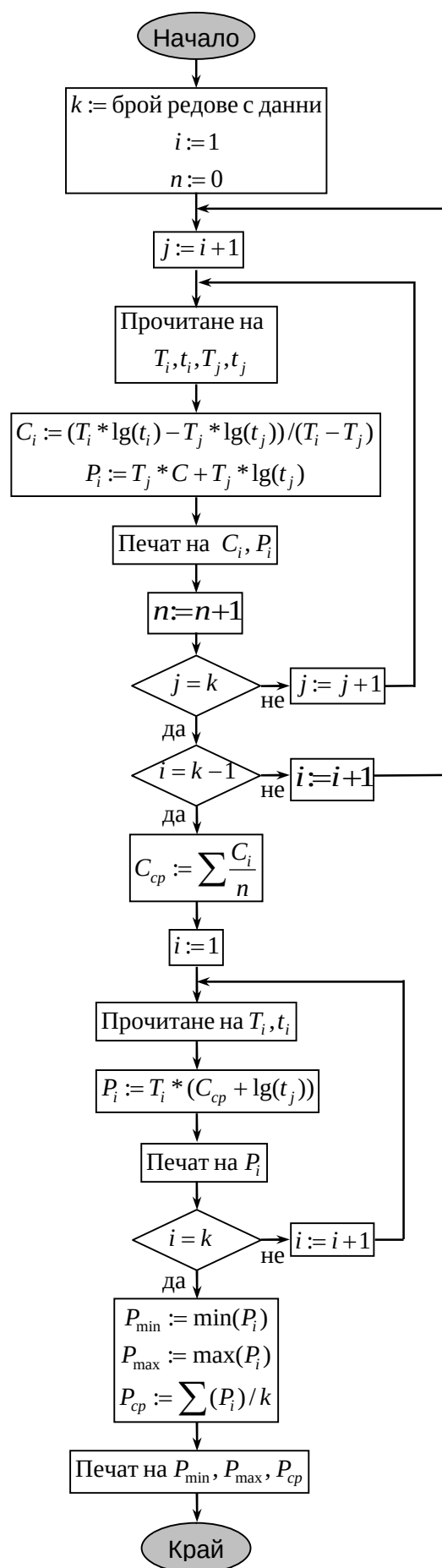
$$(30) \quad C = \frac{\sum_{j=1}^5 C_{\sigma j}}{5}.$$

Замества се новата стойност на C в (27) и се изчисляват стойностите на P_{ji} . Определят се новите стойности на P_j и се пресмятат отново грешките. Ако пак се получи недопустима стойност на грешката, следва да се приложи друг критерий (таблица 4).

В таблица 8 са дадени всички изрази за определяне на P_j и Δ .

Таблица 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ_j, MPa	$T_b, ^\circ C$	t_n, h	$t_{ji} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 t_n, h$	$P_{\sigma j}$	$C_{\sigma j}$	$P_{ji} = T_i(C + \lg t_{ji})$	P_j	$\Delta = \frac{P_{\sigma j} - P_j}{P_{\sigma j}} 100, \%$
$\sigma_1 =$	$T_1 =$	$t_1 =$	$t_{11} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 t_n$	$P_{\sigma 1} = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \lg \frac{t_{12}}{t_{11}}$	$C_{\sigma 1} = \frac{1}{T_1 - T_2} (T_2 \lg t_{12} - T_1 \lg t_{11})$	$P_{11} = T_1(C + \lg t_{11})$	$P_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 P_{1i}$	$\Delta = \frac{P_{\sigma 1} - P_1}{P_{\sigma 1}} 100$
		$t_2 =$				$P_{12} = T_2(C + \lg t_{12})$		
		$t_3 =$						
	$T_2 =$	$t_1 =$	$t_{12} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 t_n$					
		$t_2 =$						
		$t_3 =$						
$\sigma_2 =$	$T_1 =$	$t_1 =$	$t_{21} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 t_n$	$P_{\sigma 2} = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \lg \frac{t_{22}}{t_{21}}$	$C_{\sigma 2} = \frac{1}{T_1 - T_2} (T_2 \lg t_{22} - T_1 \lg t_{21})$	$P_{21} = T_1(C + \lg t_{21})$	$P_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 P_{2i}$	$\Delta = \frac{P_{\sigma 2} - P_2}{P_{\sigma 2}} 100$
		$t_2 =$				$P_{22} = T_2(C + \lg t_{22})$		
		$t_3 =$						
	$T_2 =$	$t_1 =$	$t_{22} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 t_n$					
		$t_2 =$						
		$t_3 =$						
$\sigma_3 =$	$T_1 =$	$t_1 =$	$t_{31} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 t_n$	$P_{\sigma 3} = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \lg \frac{t_{32}}{t_{31}}$	$C_{\sigma 3} = \frac{1}{T_1 - T_2} (T_2 \lg t_{32} - T_1 \lg t_{31})$	$P_{31} = T_1(C + \lg t_{31})$	$P_3 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 P_{3i}$	$\Delta = \frac{P_{\sigma 3} - P_3}{P_{\sigma 3}} 100$
		$t_2 =$				$P_{32} = T_2(C + \lg t_{32})$		
		$t_3 =$						
	$T_2 =$	$t_1 =$	$t_{32} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 t_n$					
		$t_2 =$						
		$t_3 =$						
					$C = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 C_{\sigma j}$			



Фиг. 28. Блокова схема на програма за пресмятане на P_{LM}

IX. Програма за пресмятане на параметъра на Larson-Miller

1. Блокова схема на компютърната програма

Блоковата схема е показана на фиг. 28.

Като входни параметри в програмата се вкарват неограничен брой двойки от експериментално получени стойности на работната температура и времето за разрушаване (T_i и t_i). Всяка двойка стойности се записва на отделен ред.

Програмата включва два цикъла. При първия цикъл се пресмятат параметрите C_i и P_i за всички възможни комбинации от T_i и t_i . След това се пресмята средната стойност на материалната константа $C - C_{cp}$. С тази стойност за всяка двойка данни (T_i , t_i) във втория цикъл отново се пресмята стойността на P_i . Разликите в стойностите на P_i , породени от разсейване на експерименталните резултати, намаляват значително при второто пресмятане, при което се използва генерираната от програмата средна стойност на материалната константа – C_{cp} . Това може да се оцени от пресметнатите накрая максимална, минимална и средна стойност на параметъра P .

2. Интерфейс на компютърната програма

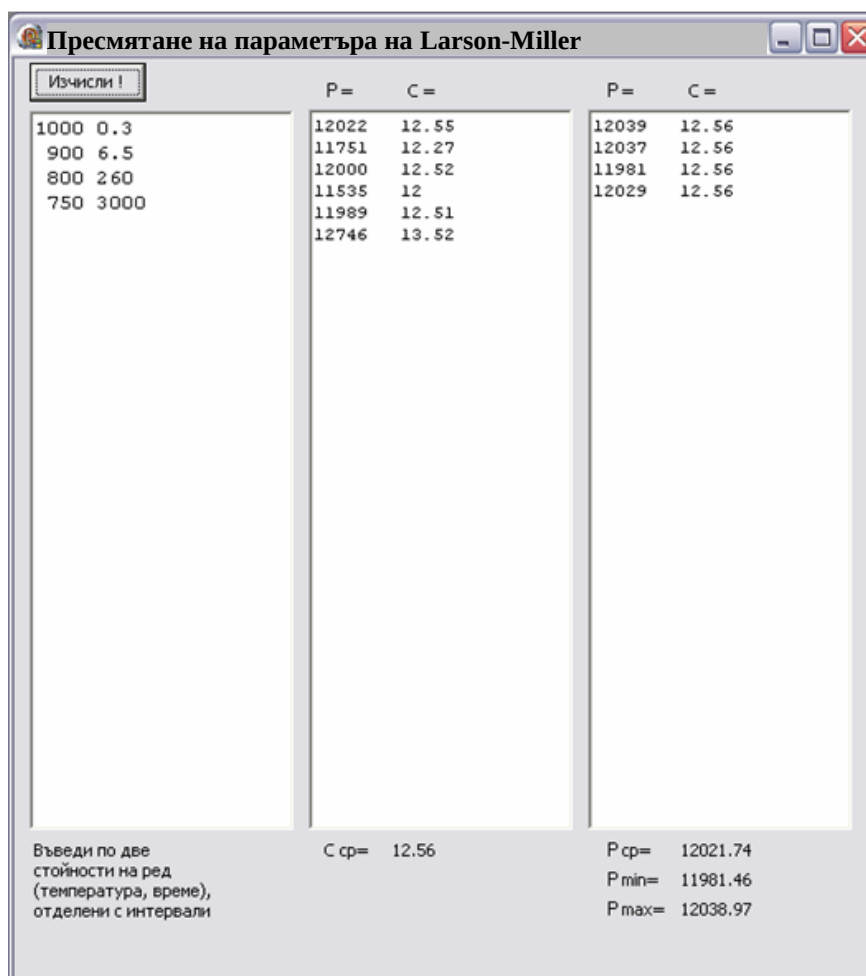
Интерфейсът на програмата след пресмятане е показан на фиг. 29.

В първото текстово поле се въвеждат двойките стойности (T_i и t_i), отделени с интервали, всяка на отделен ред. Могат да се въведат неограничен брой стойности.

След натискане на бутон “Изчисли” програмата попълва второто и третото текстово поле и етикетите под тях.

Във второто текстово поле се изписват стойностите на P_i и C_i , пресметнати от всички възможни комбинации на въведените данни. Под него се изписва пресметнатата средна стойност на материалната константа C .

С тази стойност в третото поле се изписват стойностите на параметъра P , пресметнати за всеки ред от първото текстово поле, но с използване на получената от програмата стойност C_{cp} . Под третото текстово поле се изписват максималната, средната и минималната стойности на последно пресметнатите стойности на P .

Фиг. 29. Интерфейс на програмата за пресмятане на P_{LM}

Х. Прогнозиране на поведението на материалите чрез границата на пълзене за време, надвишаващо времето на експериментите

1. При температура $T = \text{const}$ се построяват кривите на пълзене при високи стойности на напреженията (стойности, изискващи по-малко време до разрушаване на пробното тяло).
2. Търси се модел, който добре описва получените резултати. Ако няма такъв се предлага нов модел.
3. С помощта на избрания или разработения модел се построяват кривите на пълзене при по-ниски стойности на напреженията.
4. Разполагайки със семейство криви на пълзене при определена температура, може да се определи границата на пълзене за съответната температура, както е показано в VII на тази глава.

ХІ. Прогнозиране на поведението на материалите чрез границата на продължителна якост за време, надвишаващо времето на експериментите

В практиката се срещат два вида задачи за прогнозиране на поведението на материалите чрез границата на продължителна якост:

- Да се прогнозира времето до разрушаване на конструкционен елемент, подложен на чист опън, ако е дадено: материалът от който е изработен елементът, работната температура и работното напрежение.
- Да се прогнозира напрежението при което ще се разруши конструкционен елемент, подложен на чист опън, ако е дадено: материалът от който е изработен

елементът, работната температура и времето за разрушаване (експлоатационния срок на елемента).

За решаването на тези задачи се постъпва по следния начин:

1. Провежда се експериментално изследване, при което за различни натоварвания и температури се засича времето за разрушаване. Избират се такива комбинации от температура и напрежение при които времето за разрушаване не е голямо.

2. Установява се кой параметър дава най-добра връзка между величините $R_{u/t/T}$, t_R и T .

3. Построява се графика на функцията $P = f(R_{u/t/T})$.

4. Определя се търсената величина.

4.1. Ако се търси времето до разрушаване, от построената графика в точка 3 се определя стойността на P . От уравнението на съответния параметър се изразява и пресмята t_R .

4.2. Ако се търси напрежението, от уравнението на съответния параметър се пресмята стойността на P . От построената графика в точка 3 се определя стойността на σ .

ГЛАВА 3

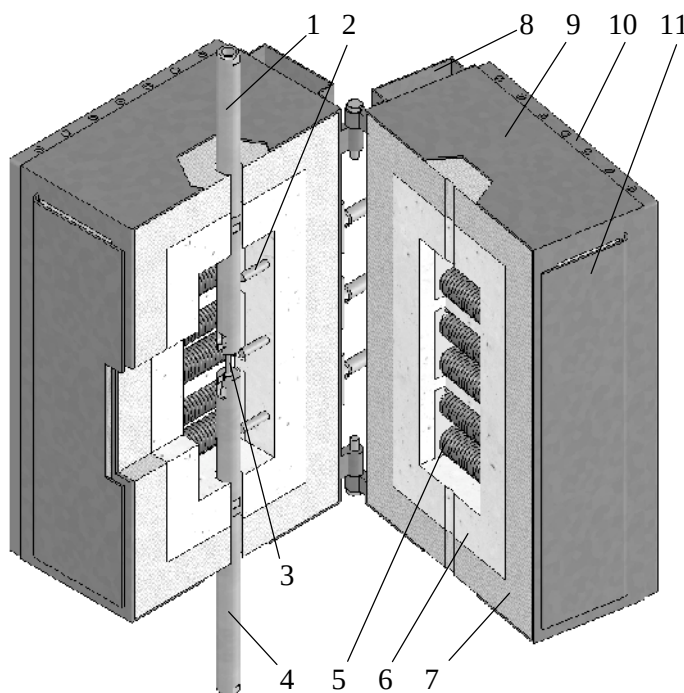
ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗРАБОТВАНЕ НА СТЕНД ЗА ИЗПИТВАНЕ НА МАТЕРИАЛИТЕ ПРИ ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ

1. Нагревателен модул

2. Конструиране на нагревателния модул

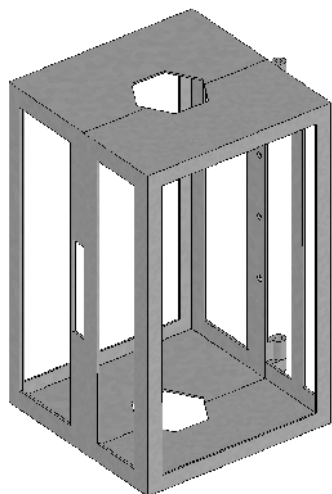
На базата на опита, натрупан в предишни разработки [54] и данни от специализираната литература, е избрана конструкцията, показана на фиг. 30. За нея е характерно следното:

- Форма – правоъгълен паралелепипед;
- Модулът е двуделен. Той може да се разтваря около изпитваното пробно тяло 3, което е захванато вертикално в средата на работното пространство, с помощта на тръбни захвати 1 и 4.
- Двата дяла на модула не са симетрични. По-големият е неподвижен, а по-малкият - подвижен.

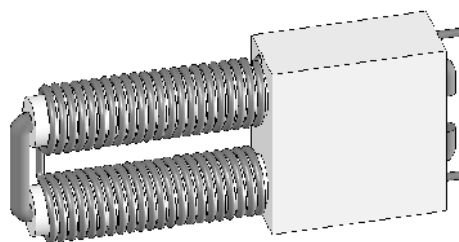


Фиг. 30. Конструкция на нагревателен модул

- Отворът, през който ще минава системата за измерване на деформации и отворите за управляващите термодвойки 2 са разположени в неподвижната част, в средната равнина на модула.
- Външният слой изолация е обхванат от стоманена обшивка 9. Обшивката представлява носещата конструкция на модула (фиг. 31). Към нея са захванати и три вида капаци, с цел намаляване на повърхностната температура – предни капаци 11, странични капаци 10 и задни капаци 8 (фиг. 30). Задните капаци покриват отворите за монтаж на нагревателите. Те са захванати с винтове и могат да се демонтират.
- Стени – съставени са от два слоя изолационен материал: лекотегловни тухли 6 и огнеупорна вата 7. Лекотегловните тухли имат по-голям коефициент на топлопроводност от ватата, но и по-голяма механична здравина и запазват в по-голяма степен свойствата си при температури от порядъка на 1000 °C. За това от тях е изграден вътрешния слой изолация.
- Нагреватели 5, изработени от кантал с диаметър на телта 4 мм. Нагревателите са навити около тръби от силициев карбид (фиг. 32). Полученият блок може лесно да се подмени при прекъсване на нагревателя, като се издърпа от леглото си в задната стена на модула. Мощността на един нагревател е 440 W. Тази мощност е подбрана по технологични съображения и е проверена със симулации, описани по-долу. Захранващото напрежение на нагревателите е ~ 17V.
- За постигане на по-равномерно температурно поле, нагревателите 5 (фиг. 30) са разположени в три секции, всяка от които се управлява от отделна термодвойка 2 и отделен терморегулатор. Всяка секция се състои от два нагревателни блока (единият разположен в лявата стена на модула, а другият – в дясната).



Фиг. 31. Стоманена обшивка
на нагревателен модул



Фиг. 32. Нагревателен блок

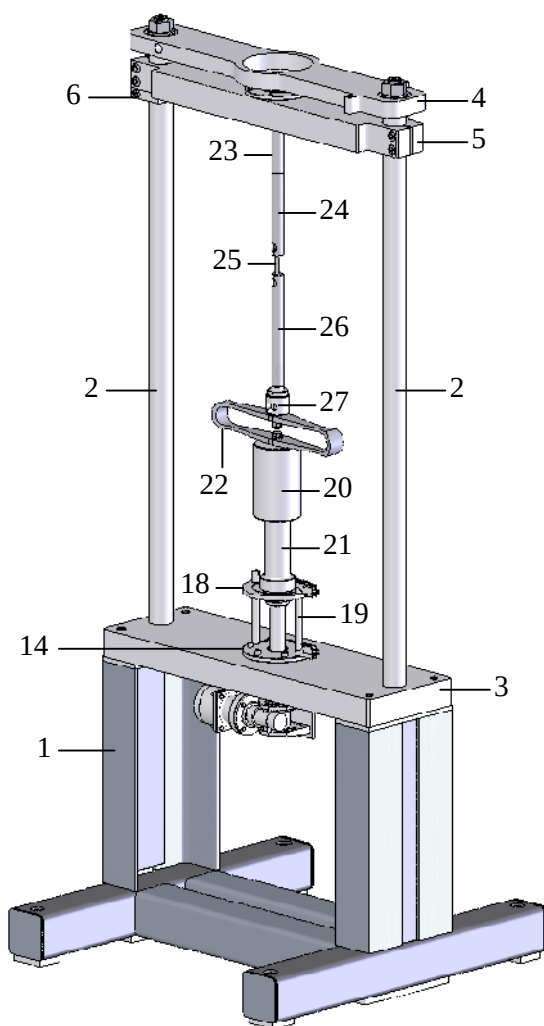
- Термодвойките 2 са тип “S”. Всяка подава сигнал до програмируем контролер RT384, снабден със сериен интерфейс RS485.
- Специална система следи нагревателите за прекъсване. Ако някой нагревател прекъсне, температурата на съответното ниво се поддържа определено време, достатъчно за смяна на повредения, от другия нагревател в двойката.
- Смяната на прекъснал нагревател се извършва в следната последователност:
 - а) Изключва се напрежението към съответния нагревател;
 - б) Сваля се задния капак;
 - в) С подходящи предпазни средства се изважда блокът с повредения нагревател;
 - г) Поставя се нов нагревател, свързва се електрически, затваря се капака.

II. Изпитвателна машина

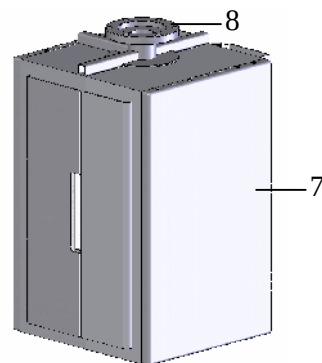
1. Конструирание на изпитвателната машина

На базата на опита на катедра „Съпротивление на материалите” към ТУ-София [58,59] и данни от специализираната литература, е избрана конструкцията, показана на фиг. 46. За нея е характерно следното:

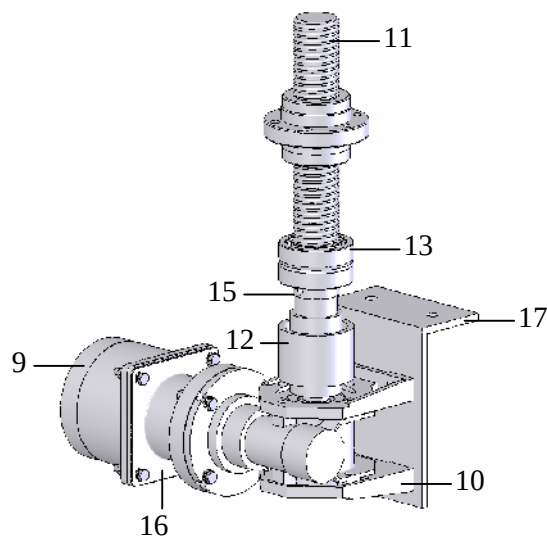
- Рамата на изпитвателната машина се състои от стойка 1, две колони 2 и три траверси 3,4,5. Стойката е от валцовани профили, свързани чрез заварени съединения. Нивелирането става с помощта на специални винтове, разположени в четирите опори. В горната част на стойката с помощта на винтове се присъединява метална плоча – долна траверса 3. Тя служи за захващане на водещите колони на изпитвателната машина. В горния край двете колони се свързват чрез стабилизираща плоча – горна траверса 4. Сглобяването на колоните и плочите става чрез пасващи повърхнини и винтови съединения. Върху колоните се плъзга специална плоча – средна траверса 5. В зависимост от дължината на изпитваното пробно тяло тя се позиционира в определено положение и се законтря със винтове и допълнителна скоба 6, осигуряваща неподвижност на връзката. Разстоянието между колоните е съобразено с габаритите на нагревателния модул 7 – фиг. 47, който се вгражда в изпитвателната машина с помощта на специален фланец 8 заварен от горната му страна. Този фланец с помощта на болтове се захваща към подвижната траверса. Рамата е изработена от стомана Ст. 45.



Фиг. 46. Изпитвателна машина



Фиг. 47. Нагревателен модул



Фиг. 48. Натоварващ модул

- Натоварващ модул – изграден е на база стъпков електродвигател 9, редуктор 10 и сачмено-винтова двойка 11 – фиг. 48. Избрана е сачмено-винтова двойка със стъпка 5 mm. Нейният ход е съобразен с очакваното линейно удължение на пробното тяло в резултат повишаване на температурата и протичащите деформации от натоварването. За плавно и прецизно прилагане на силата от сачмено-винтовата двойка са избрани червячен редуктор с голямо предавателно отношение ($i = 50$) и стъпков електродвигател с голям брой стъпки (200) за 1 оборот. Необходимия момент за задвижване на сачмено-винтовата двойка, е пресметнат за максимално натоварване 10 KN. Стъпковият електродвигател и редукторът, както и редукторът и сачмено-винтовата двойка са свързани чрез зъбни съединители 12. Сачмено-винтовата двойка се върти в аксиално-радиален лагер 13, който посредством фланец 14 и лагерна капачка се монтира в долната траверса. Осигуряването срещу приплъзване на вътрешната гривна на лагера се осъществява от специалната гайка 15. Конструктивно връзката между стъпковия електродвигател и редуктора се извършва посредством фланец 16, а редукторът се закрепя към долната траверса чрез специална Г-образна планка 17. Осигуряването на линейно движение на винта на сачмено-винтовата двойка се постига с помощта на диск 18, който се плъзга по два водача 19 захванати за долната траверса.
- Силомер 20, чийто електрически сигнал служи за обратна връзка с управлението на стъпковия двигател. Измервателното устройство за сила е изработено на принципа на преобразуване на механичната деформация в пропорционален електрически сигнал – пълномостова тензометрична схема. Връзката между натоварващия модул и силомера се осъществява с помощта на фланец 21, чиято дължина е съобразена с хода на винта на сачмено-винтовата двойка.
- Еластичен елемент 22 – въвежда се с цел да осигури безударно натоварване и да минимизира удара при разрушаване на пробното тяло. Връзката между него и силомера става с помощта на винтово съединение. Еластичният елемент е изработен от стомана Ст. 65 Г (ЗМ-810, ОМ-400).
- Захващащо устройство, състоящо се от горен захват 23, удължен с помощта на стебло 24, пробно тяло 25 и долен захват 26. Захватите и стеблото са изработени от топлоустойчива стомана с висока якост на опън. За да се осигури съосност на горния захват с отвора в средната траверса (към която той се захваща с помощта на гайка), е монтирано сферично носещо съединение. Връзката между захващащото устройство и еластичния елемент става с помощта на самонагаждащата се гайка 27 и сферичен болт.

III. Екстензометри за висока температура

1. Проектиране на екстензометър за измерване на надлъжна деформация

След анализ на екстензометрите, предлагани от реномирани фирми като INSTRON, EPSILON и други, е избрана конструкция със закрепване върху корпуса на нагревателния модул.

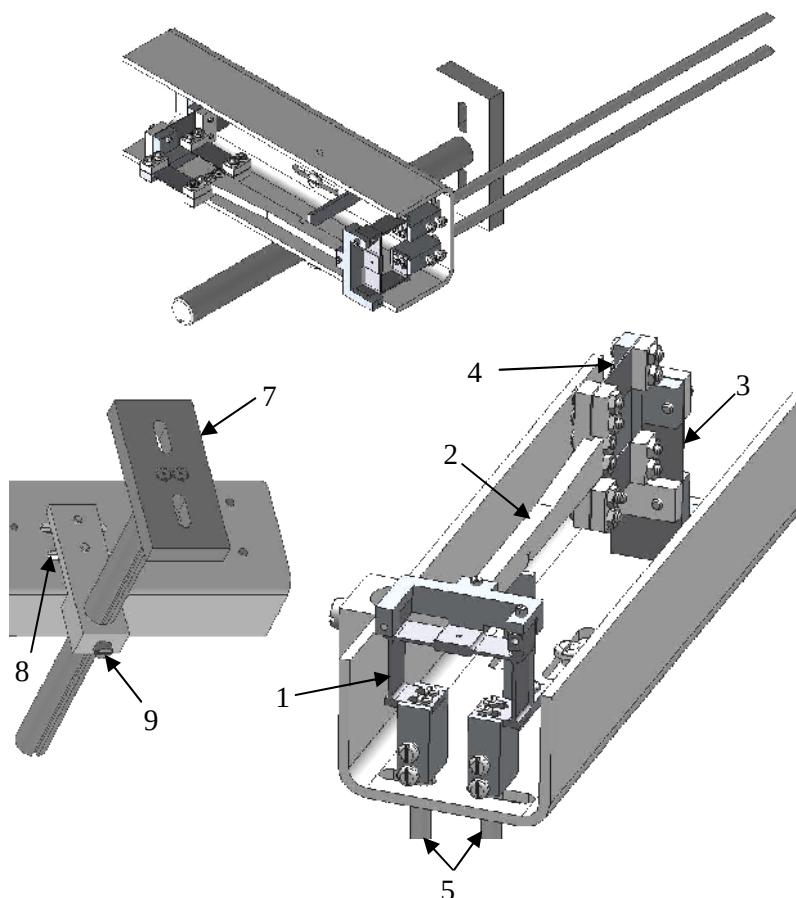
1.1. Конструкция на екстензометъра

На фиг. 57 е показан общ вид на екстензометъра.

Еластичният елемент 1 се закрепва в края на лост 2, с помощта на който керамичните пипалата 5 са притиснати непрекъснато към пробното тяло. Притискането се осъществява от пластинчатата пружина 3, закрепена на корпуса на екстензометъра. При деформирането на пробното тяло се получава разтваряне на пипалата и трансляция на еластичния елемент в осово на пробното тяло направление. Тази трансляция се осигурява благодарение на пластинчати пружини 4. За закрепване на тялото на

екстензометъра към корпуса на нагревателния модул се използва плоча 6. Връзки 7 и 8 позволяват премествания в две взаимноперпендикулярни направления.

Еластичният елемент е изработен от закалена стомана СТ40Х на електроерозийна машина.



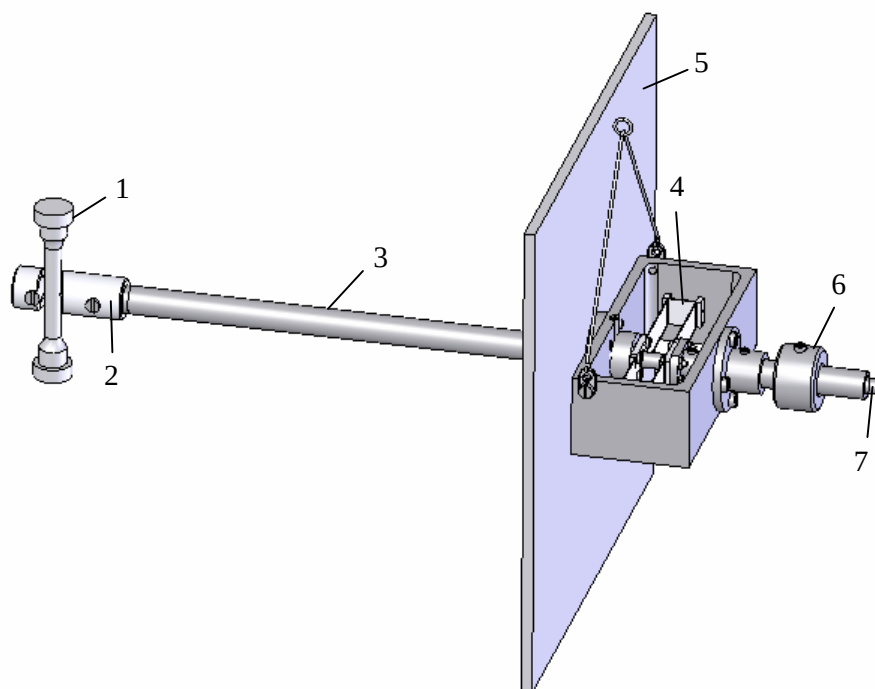
Фиг. 57. Общ вид на екстензометъра за измерване на надлъжна деформация

2. Проектиране на екстензометър за измерване на напречна деформация

2.1. Конструкция на екстензометъра

На фиг. 60 е показан общ вид на екстензометъра. Цилиндърът 3, главата 2 за захващане на пробното тяло и прътът 7 са изработени от керамика, издържаща до 1700 °С. Керамичният прът контактува с пробното тяло 1. При монтирането на екстензометъра той се издърпва, за да се осигури необходимата хлабина в главата за захващане на пробното тяло. В резултат на това еластичният елемент 4 се деформира и при намаляване на напречното сечение на пробното тяло се стреми да възстанови първоначалната си форма. Измервателното устройство за деформация е изработено на принципа на преобразуване на механичната деформация в пропорционален електрически сигнал – пълномостова тензометрична схема. Екстензометърът се балансира с помощта на противотежест 6. При провеждането на експериментални изследвания с голяма продължителност е предвиден топлоизолационен щит 5, който предпазва еластичния елемент от топлинното излъчване на нагревателния модул.

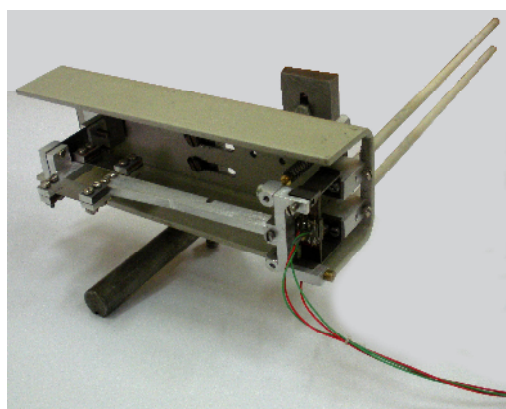
Еластичният елемент е изработен от закалена стомана СТ40Х на електроерозийна машина. Проектиран е и е оразмерен за деформации от порядъка на 4 mm.



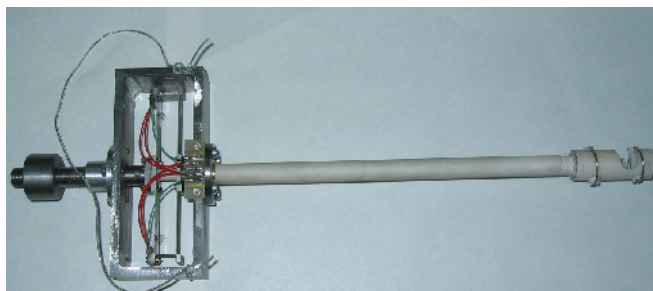
Фиг. 60. Екстензометър за напречна деформация

3. Изработване на екстензометрите

На фиг. 64 и 65 са показани снимки на изработените екстензометри за измерване на деформации в условията на високи температури.



Фиг. 64. Снимка на изработения екстензометър за измерване на надлъжна деформация

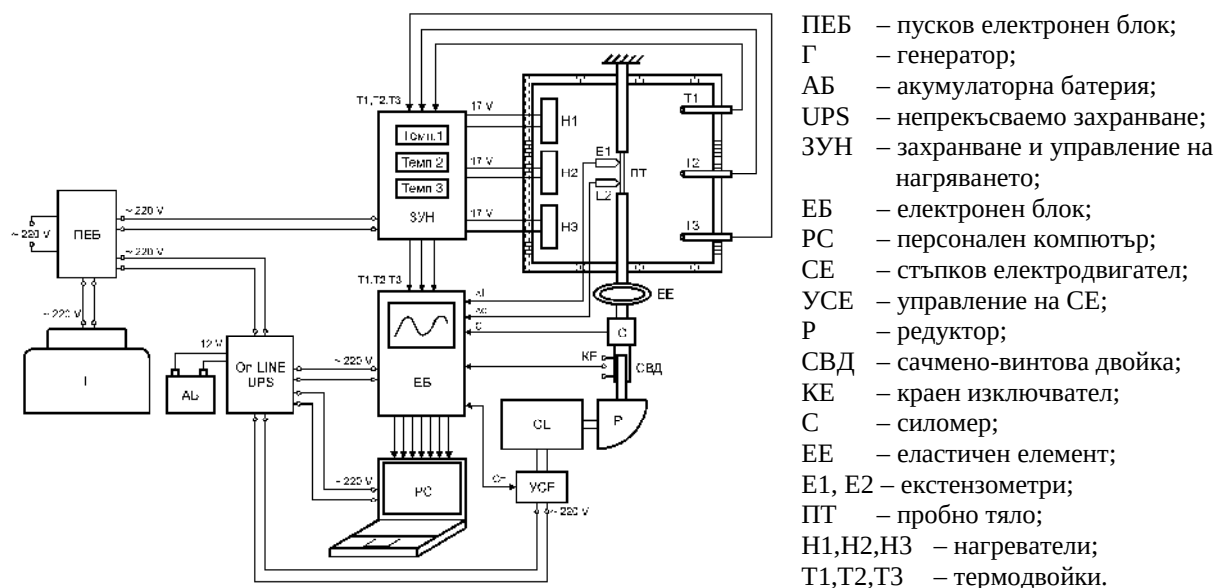


Фиг. 65. Снимка на изработения екстензометър за измерване на напречна деформация

IV. Управление на стенда за изпитване на материалите при високи температури

2. Реализиране на управлението

Принципна схема на реализираното управление, което решава поставените по-горе задачи, е показана на фиг. 69.



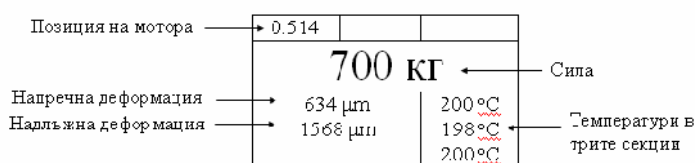
Фиг. 69. Принципна схема на реализираното управление на стенда

Захранването и управлението на нагряването на схемата са означени като един блок – ЗУН. Този блок отчита показанията на трите термодвойки в нагревателния модул и съответно управлява трите нагревателни секции за поддържане на зададената температура. Освен това, визуализира отчетените температури на дисплеите на терморегулаторите и предава тази информация към електронния блок ЕБ. Трите терморегулатора разполагат и с бутони, с помощта на които се задава номиналната работна температура и отклоненията от нея, при които става включването и изключването на нагревателите.

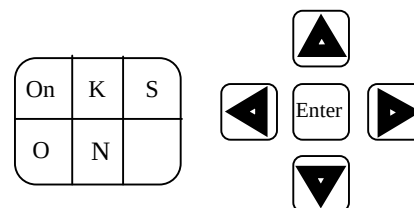
Измервателните устройства за сила (С) и деформации (Е1 и Е2) са изработени на принципа на преобразуване на механичната деформация в пропорционален електрически сигнал – пълномостова тензометрична схема. Това позволява да се обединят измервателните усилватели в един модул (многоканален тензометричен усилвател). Този модул, микропроцесорният контролер и дисплея за управление са обединени в един електронен блок, означен на схемата като ЕБ. Електронният блок ЕБ следи също и показанията на трите термодвойки. В него е вградена специална програма, която може да прекрати експеримента, ако температурите излязат извън зададените граници. ЕБ получава сигнал и от крайните изключватели КЕ на сачмено-винтовата двойка СВД, като прекратява движението на стъпковия електродвигател СЕ при достигане на зададените крайни положения.

За да се избегне влиянието на смущаващи сигнали върху прецизните усилватели за сила и деформации, управлението на стъпковия двигател е реализирано в отделен блок – УСЕ, управляван от ЕБ.

Схема на дисплея на ЕБ и описание на извежданата информация е показана на фиг. 70. Програмирането на ЕБ се извършва чрез специална клавиатура, разположена на лицевия му панел, показана на фиг. 71.



Фиг. 70. Дисплей на ЕБ



Фиг. 71. Клавиатура на ЕБ

От клавиатурата, се задават следните параметри:

- калибровъчни стойности на измервателните канали за сила, надлъжна деформация и напречна деформация;
- диаметър на пробното тяло ПТ;
- режим на работа – изпитване при постоянна сила или при постоянно напрежение;
- профил на натоварване – трапецовиден, синусоидален или триъгълниковиден. За всеки профил могат да се дефинират брой цикли; начална, крайна и максимална стойност на натоварването; времена за натоварване, задържане и разтоварване;
- времеви интервал, през който да се записват измерваните величини.

Електронният блок ЕБ разполага със собствена памет, в която могат да се записват измерените величини. По преценка на изследователите, стендът може да работи без връзка с компютър РС, а данните да се натрупват само в паметта на ЕБ. Тази памет обаче е ограничена като обем – до 1200 записа. Затова, когато изпитването е с голяма продължителност и е необходимо данните да се записват с малка стъпка по време, е препоръчително да се използва компютър, който се свързва с ЕБ. В този случай, електронният блок ЕБ предава в реално време всички измерени сигнали към компютъра. Там информацията се обработва, визуализира и записва с помощта на специално създадена програма. Величините, с които работи програмата са: зададена сила, отработена сила, надлъжна деформация, напречна деформация, температури в трите секции на нагревателния модул, брой стъпки на стъпковия електродвигател.

3. Управление на стенда при аварийни ситуации

3.1. Прекъсване на електрозахранването

При отпадане на напрежението в електрическата мрежа, възникват следните проблеми:

- Спира захранването на нагревателите и започва да намалява температурата в нагревателния модул;
- Спира управлението на натоварването. Понеже положението на стъпковия електродвигател е фиксирано, вследствие свиване на захватите и пробното тяло от намаляване на температурата, силата в пробното тяло започва да нараства, което нарушава условията на провеждания експеримент;
- Спира захранването на персоналния компютър, което означава загуба на данни за следените параметри на експеримента.

При спиране на захранването към нагревателите температурата в нагревателния модул намалява бавно, като остава в зададените граници в рамките на няколко минути. Това позволява модула да остане без захранване за кратко време, без да се нарушат условията на експеримента. Това време е достатъчно, за да стартира аварийно електрозахранване, осигурено с бензинов генератор Г. При спиране на захранването към електронния блок ЕБ и компютъра РС обаче, дори и за части от секундата, те се рестартират и след това не са в състояние да заработят нормално без човешка намеса. Следователно, за осигуряване продължаването на експеримента независимо от спирането на тока в електрическата мрежа, са необходими две системи за аварийно захранване – една маломощна и сработваща мигновено, която да поддържа непрекъснатата работа на ЕБ, СЕ и РС и втора, по-бавно сработваща, но с голяма номинална мощност и възможност за продължително действие, която да захрани ЗУН и да осигури за дълъг период от време електрическа енергия за всички останали елементи на стенда.

За да се гарантира работата на стенда при отпадане на напрежението в електрическата мрежа, са добавени три допълнителни устройства:

- 1) Пусков електронен блок ПЕБ. Този блок следи за наличие на номинално напрежение в електрическата система. Ако регистрира аномалии в захранващото напрежение, по специална програма реализира стартиране на бензиновия

двигател с вътрешно горене (ДВГ) на генератора Г. След заработване на генератора, прехвърля захранването на стенда към него. Този процес отнема 15-30 секунди. Когато ПЕБ регистрира възстановяване на напрежението в електрическата мрежа, той прехвърля захранването обратно към нея и гаси ДВГ на генератора.

- 2) Генератор Г. Използван е генератор LONCIN с номинална мощност 5 kW. Състои се от монофазен генератор на променлив ток (220V/50Hz) и едноцилиндров бензинов ДВГ. Генераторът е съоръжен със стартерна автоматика и контрол, както и с предпазители на електрическите вериги.
- 3) Непрекъсваемо токозахранване On-LINE UPS. Реализира непрекъснато преобразуване на променливия ток в прав (12V), и на правия – обратно в променлив. Работи с външна акумулаторна батерия АБ с голям капацитет – 100 Ah, която постоянно е свързана към веригата. При отпадане на захранващото напрежение захранването на включените консуматори продължава без прекъсване и без да е необходимо време за реакция. Изпълнява функциите на стабилизатор и осигурява правилна синусоида на изходното напрежение, с което се осигурява надеждна и непрекъсната работа на свързаната електроника. Устройството може да осигури аварийно захранване на включените към него устройства (УС, СЕ и РС) за повече от един час.

Ако поради някаква причина (например нестартране или изчерпване на горивото на генератора), ЗУН остане без захранване повече от една минута, се задейства аварийна програма в ЕБ, която разтоварва пробното тяло. Това води до прекъсване на експеримента, но позволява той да бъде продължен впоследствие, след възстановяване на захранването (Стандарт EN 10291:2000 [51] позволява провеждането на изпитвания с прекъсване).

3.2. Прекъсване на нагревател по време на експеримент

При прекъсване на нагревател по време на работа, ЗУН регистрира това и подава светлинен сигнал. Температурата на съответното ниво се поддържа от останалия здрав от двойката нагреватели в съответната секция. Нагревателния модул е специално конструиран така, че нагревателите да могат да се подменят без да се прекъсва експеримента, като за целта за кратко време се изключва само съответната секция. По време на смяната на нагревател електронният блок следи изменението на температурата. Ако отклонението в работната температура стане твърде голямо, експериментът се прекъсва.

3.3. Достигане на крайни положения на сачмено-винтова двойка

Стендът е доокомплектован с крайни изключватели КЕ, регистриращи крайните положения на сачмено-винтова двойка. При сработване на краен долен изключвател пробното тяло, се разтоварва и експериментът се прекратява.

V. Заключение

Проектиран и изработен е стенд за изпитване на материалите при високи температури. Той се състои от:

- изпитвателна машина – предназначена е за изпитване на пробни тела с диаметър на работната част 6 mm, и осигурява максимална сила на опън 10 kN.
- нагревателен модул - осигурява нагряване на пробното тяло до температура 1100 °C.
- устройства за измерване на надлъжната и напречната деформация на пробното тяло (екстензометри).
- електронно управление – управлява параметрите на изпитването: сила и температура;
- компютърна система – служи за регистриране, визуализация и запис на измерваните величини.

- система за аварийно захранване – осигурява непрекъснатост на изпитването при отпадане на основното електрозахранване.

На фиг. 73 е показана снимка на стенда в окончателния му вид без екстензометрите и системата за аварийно захранване.



Фиг. 73. Стенд – окончателен вид

Възможностите на изпитвателния стенд са:

- Определяне на механични характеристики в условията на високи температури при статично натоварване;
- Определяне на механични характеристики в условията на пълзене (при продължително въздействие на високи температури) при постоянна сила;
- Определяне на механични характеристики в условията на пълзене при постоянно напрежение;
- Определяне на механични характеристики в условията на пълзене при циклично натоварване с ниска честота.

ГЛАВА 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И РЕЗУЛТАТИ

I. Изработка на пробни тела за експериментални изследвания

Експерименталните изследвания ще се проведат с цилиндрични пробни тела с диаметър $d = 6 \text{ mm}$, начална площ на напречното сечение $S_0 = 28,26 \text{ mm}^2$, начална мерна дължина $L_0 = 30 \text{ mm}$, работна дължина $L_C = 35 \text{ mm}$ и обща дължина $L_t = 66 \text{ mm}$.

Изработени са по 20 пробни тела от три вида легирани стомани (1.4837, 1.4859, 1.4852 М). Стоманите са разработени от “Центромет” АД – гр. Враца и са предназначена за

производството на тръби за реформингови инсталации, които работят при повишени температури.

III. Определяне на механични характеристики на стомана 1.4837 при повишени температури и статично натоварване

Поставя се задачата да се определят условната граница на провлачане ($R_{p0,2}$), якостта на опън (R_m) и модулът на еластичност на стомана 1.4837 при температури 800, 900 и 1000 °C.

1. Експериментални изследвания

Експерименталните изследвания са проведени със стенда, който е проектиран и изработен в глава 3. Изпитванията са проведени съгласно стандарт БДС EN10002-5. След достигане на зададената температура пробното тяло се натоварва статично със сила на опън до разрушаването му, с цел получаване кривата на деформиране на материала. Стендът позволява натоварване до 1000 kg.

Изпитани са 11 пробни тела. В таблица 15 са дадени условията, при които е изпитано всяко пробно тяло.

Таблица 15

Пробно тяло №	Температура $T, ^\circ\text{C}$	профил на натоварването	продължителност на натоварването t_i, s
1	800	триъгълниковиден $F_1 = 0 \text{ kg}$ $F_2 = 1000 \text{ kg}$ $t_2 = 120 \text{ s}$	6000
2	800		6500
3	800		6500
4	800		6500
5	900		6750
6	900		7000
7	900		7000
8	900		7000
9	1000		8000
10	1000		8000
11	1000		8000

2. Резултати

Резултатите са обработени по разработената методика в глава 2.

В таблица 16 са дадени изчислените скорости на относителната деформация на работната дължина на всяко пробно тяло от началото на изпитване до границата на провлачане ($\dot{\epsilon}_1$) и от границата на провлачане до якостта на опън ($\dot{\epsilon}_2$).

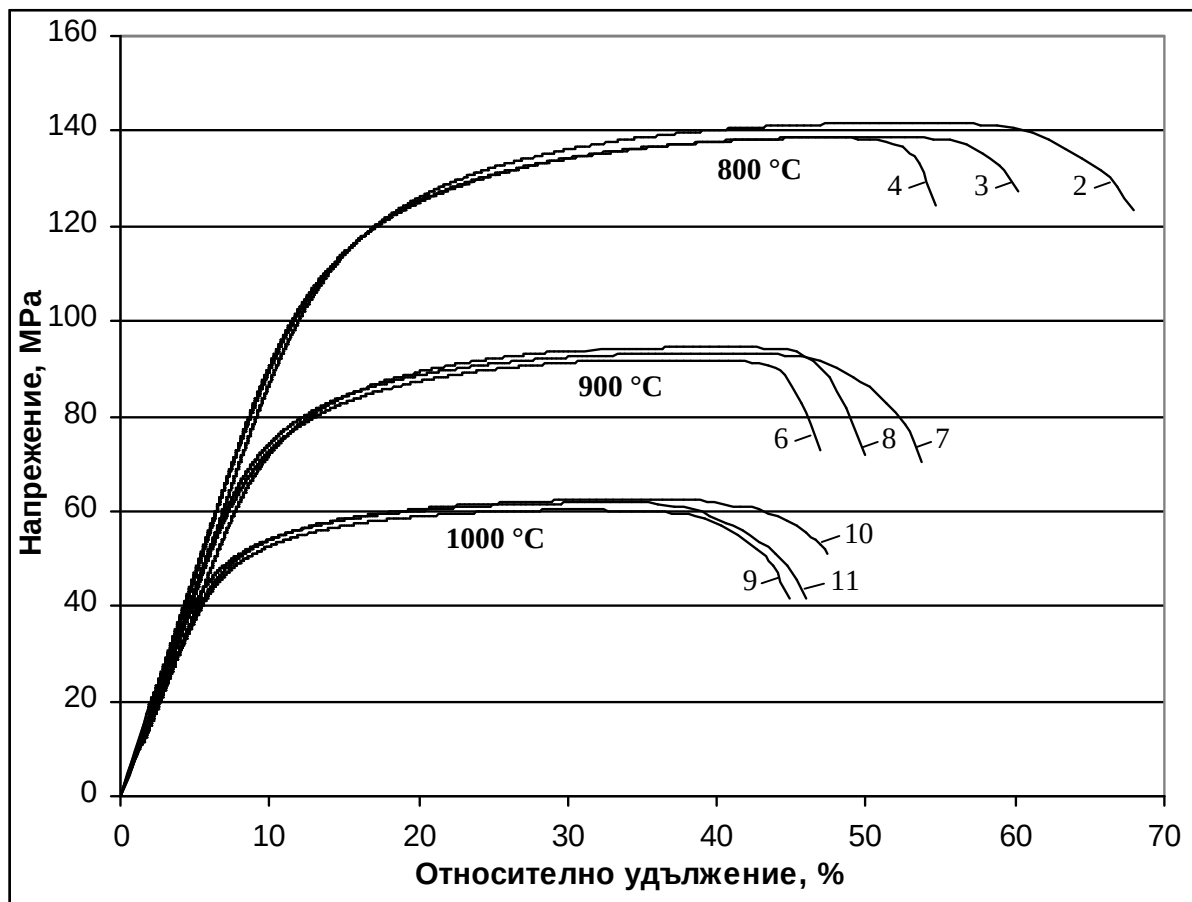
Таблица 16

Пробно тяло №	$\dot{\epsilon}_1, \text{min}^{-1}$	$\dot{\epsilon}_2, \text{min}^{-1}$
1	0,0041÷0,0063	0,0063÷0,29
2	0,0029÷0,0045	0,0045÷0,175
3		
4		
5	0,0035÷0,0057	0,0057÷0,191
6	0,003÷0,0048	0,0048÷0,183
7		
8		
9	0,0023÷0,0039	0,0039÷0,168
10		
11		

От получените резултати се вижда, че скоростта на относителната деформация на работната дължина на пробно тяло 1 и 5 не отговаря на допустимата съгласно БДС EN 10002-5:1991 [52]. Следователно кривите на деформиране на тези пробни тела не могат да бъдат използвани за определяне на механични характеристики.

На фиг. 83 са показани получените резултати.

В таблица 18 са дадени осреднените механични характеристики за всяка температура.



Фиг. 83. Криви на деформиране на материала

Таблица 18 – Осреднени механични характеристики

$T, ^\circ\text{C}$	R_m, MPa	$R_{p0.2}, \text{MPa}$	E, GPa
800 °C	139,66	87,37	0,9283
900 °C	93,25	61,42	0,8340
1000 °C	61,53	40,35	0,7843

IV. Изследване на поведението на стомана 1.4852 М в условията на кратковременно пълзене при температура 900 °C

Поставя се задачата да се прогнозира поведението на стомана 1.4852 М за време, надвишаващо времето на експериментите чрез границата на пълзене.

1. Експериментални изследвания

Експерименталните изследвания са проведени със стенда, който е проектиран и изработен в глава 3. Изпитванията са проведени съгласно стандарт EN 10291:2000. След достигане на зададената температура пробното тяло се натоварва с постоянна сила на опън до разрушаването му, с цел получаване на кривата на пълзене на материала. Задава се малка стойност на времето за прилагане на силата ($t_l = 20$ s). По този начин

отработената сила се опитва да догони зададената сила и се гарантира максималната скорост на прилагане на товара. Задава се голяма стойност на времето за задържане на постоянната сила ($t_2 = 5000$ h). Това време надхвърля многократно предполагаемото време на експериментите.

Изпитани са 8 пробни тела. В таблица 19 са дадени условията, при които е изпитано всяко пробно тяло.

Таблица 19

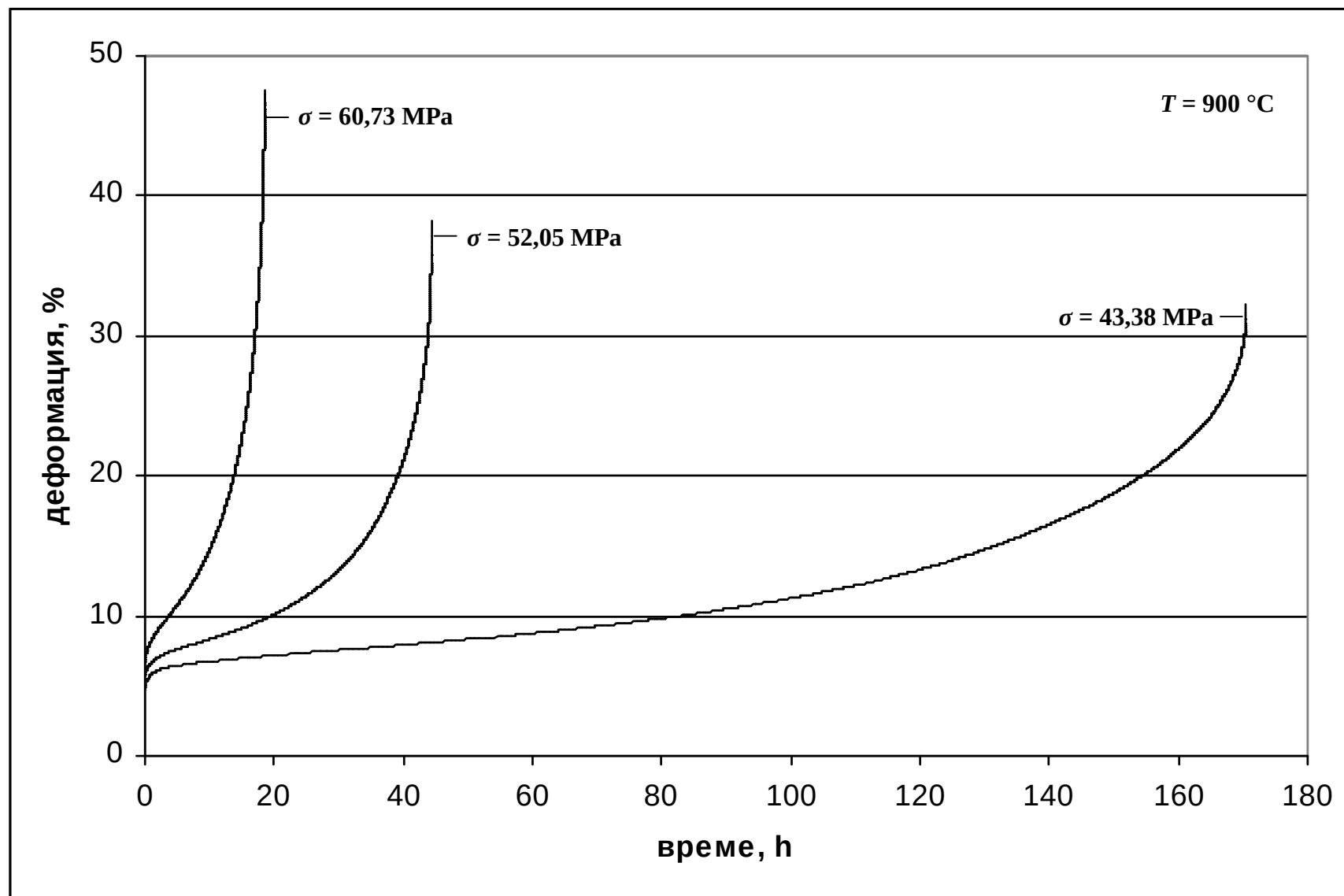
Пробно тяло №	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Вид на изпитването	профил на натоварването	постоянна сила F_2, kg
1	900	непрекъснато	трапецовиден $F_1 = F_3 = 0 \text{ kg}$ $t_1 = 20 \text{ s}$ $t_2 = 5000 \text{ h}$ $t_3 = 120 \text{ s}$	175
2				150
3				
4				
5				
6				125
7				
8				

2. Резултати

На фиг. 87 е показано полученото семейство криви на пълзене. За всяка крива на пълзене са определени продължителността на I и II стадий на пълзене на материала (t^I и t^{II}) и минималната скорост на пълзене ($\dot{\epsilon}_{f,\min}$). Резултатите са дадени в таблица 20.

Таблица 20

постоянна сила F, kg	постоянно напрежение σ, MPa	продължителност I стадий на пълзене t^I, h	продължителност II стадий на пълзене t^{II}, h	минимална скорост на пълзене $\dot{\epsilon}_{f,\min}, \text{min}^{-1}$
175	60,73	0,71	6,79	0,000120
150	52,05	2,11	19,99	0,000031
125	43,38	7,89	71,41	0,0000075

Фиг. 87. Семейство криви на пълзене при $T = 900\text{ °C}$

4. Създаване на нов модел за описване на получените резултати

Предлагат се следните зависимости, от които могат да бъдат определени продължителността на I и II стадий на пълзене:

$$(31) \quad \begin{cases} \sigma = a_1 \cdot (t^I)^{a_2} \\ \sigma = a_3 \cdot (t^{II})^{a_4} \end{cases},$$

където $a_1 = 57,85$; $a_2 = -0,1397$; $a_3 = 79,868$; $a_4 = -0,143$ са материални константи, зависещи от температурата.

Предлага се следната зависимост за определяне на скоростта на пълзене през първия стадий:

$$(33) \quad \dot{\varepsilon}_f^I = e^{\frac{\sigma - b_1}{b_2}} \cdot t^{-\left(e^{\frac{b_3 - \sigma}{b_4}}\right)},$$

където $b_1 = 260,24$; $b_2 = 21,849$; $b_3 = 42,653$; $b_4 = 39,281$ са материални константи, зависещи от температурата.

Скоростта на пълзене през втория стадий може се определя от зависимост (33), като в нея се замести $t = t^I$.

6. Прогнозиране на поведението на материал 1.4852 М за време, надвишаващо времето на експериментите

Поставя се следната задача: Да се прогнозира границата на пълзене на конструкционен елемент от стомана 1.4852 М, подложен на чист опън, при работната температура $T = 900$ °С, експлоатационен срок 1000 h и относителна деформация на пълзене 3 %.

За решаване на поставената задача е използвана разработената методика в глава 2, точка Х. Решението се извършва на следните стъпки:

6.1. С помощта на разработения модел са прогнозирани кривите на пълзене през първия и втория стадий при температура 900 °С и напрежения 30, 25 и 20 МПа. Резултатите са показани на фиг. 100.

6.2. На чертежа с полученото семейството криви на пълзене прекарваме вертикална права на разстояние $t = 1000$ h (фиг. 100). Тази права пресича кривите на пълзене в три точки, за които определяме стойността на относителната деформация на пълзене – таблица 22.

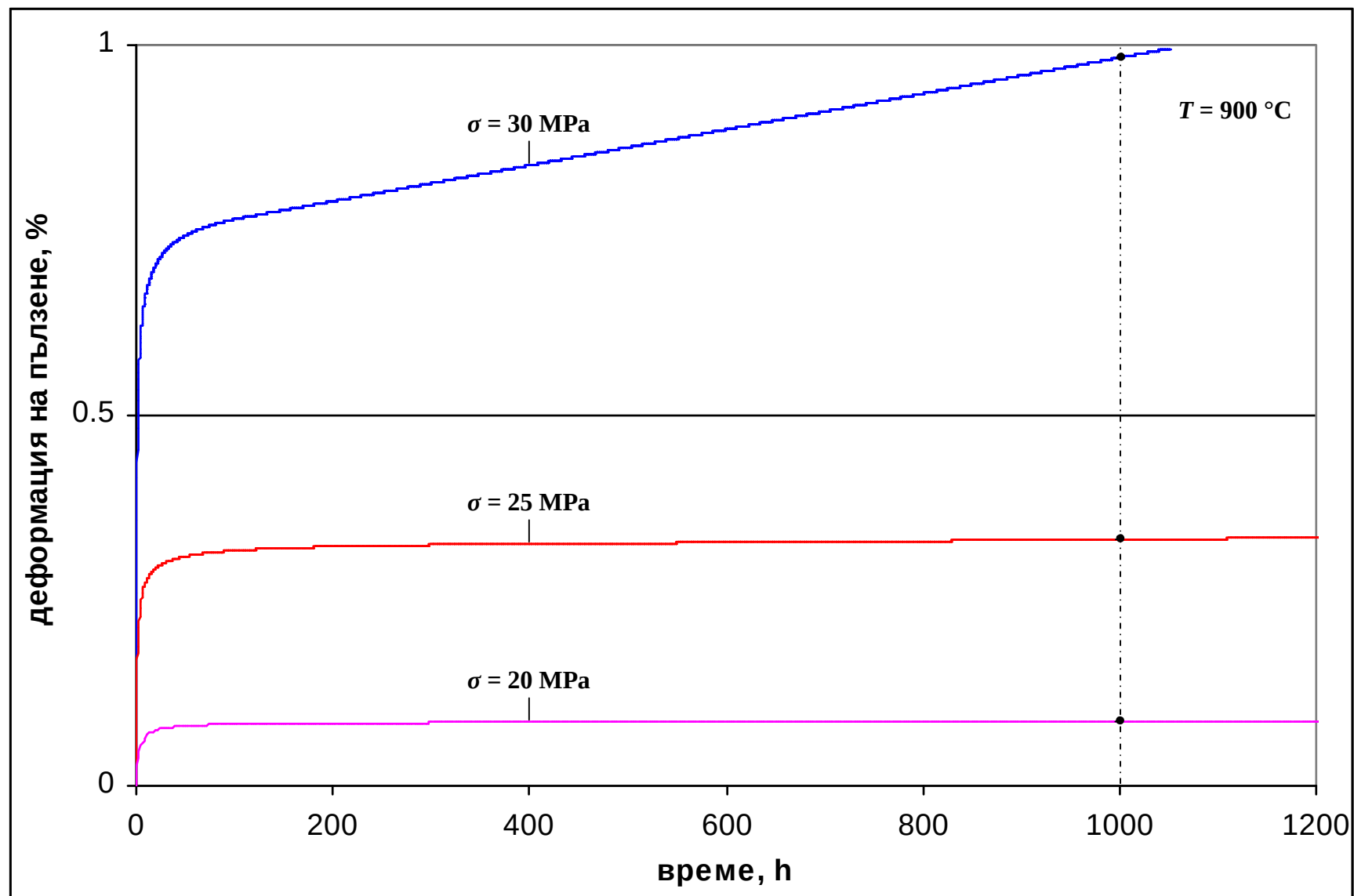
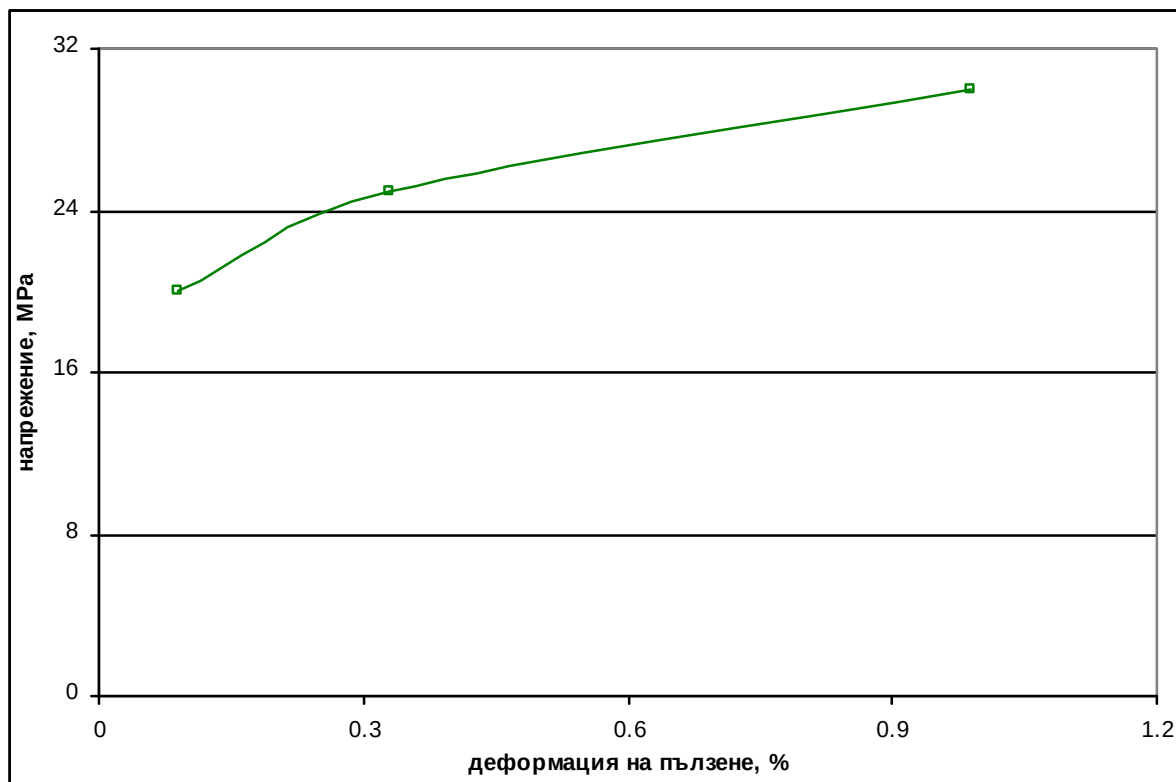
Фиг. 100. Прогнозирани криви на пълзене при $\sigma = 30, 25$, и 20 MPa

Таблица 22

σ , МПа	ε_f , %
30	0,99
25	0,33
20	0,09

6.3. По таблица 22 установяваме зависимостта на напрежение от деформацията на пълзене в графичен вид (фиг. 101).

Фиг. 101. Графика $\varepsilon_f(\sigma)$ за стомана 1.4852 М

6.4. От фиг. 101 за $\varepsilon_f = 0,3\%$, се отчита $\sigma = R_{p/0,3\%/1000\text{ h}/900^\circ\text{C}} = 24,6\text{ МПа}$.

V. Определяне на параметъра на Larson-Miller за стомана 1.4859

Поставя се задачата да се прогнозира поведението на стомана 1.4859 за време, надвишаващо времето на експериментите чрез границата на продължителна якост (параметъра на Larson-Miller).

1. Експериментални изследвания

Експерименталните изследвания са проведени със стенда, който е проектиран и изработен в глава 3. Изпитванията са проведени съгласно стандарт EN 10291:2000. След достигане на зададената температура, пробното тяло се натоварва с постоянна сила на опън и се засича времето до разрушаването му.

Изпитани са 18 пробни тела. В таблица 23 са дадени условията при които е изпитано всяко пробно тяло.

Таблица 23

Пробно тяло №	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Вид на изпитването	профил на натоварването	постоянна сила F_2, kg
1	1000	непрекъснато	трапецовиден $F_1 = F_3 = 0 \text{ kg}$ $t_1 = 20 \text{ s}$ $t_2 = 5000 \text{ h}$ $t_3 = 120 \text{ s}$	150
2				
3				
4				
5				125
6				
7				
8				
9				100
10				
11				
12				
13	900			150
14				
15				
16				
17				125
18				

2. Резултати

Резултатите са обработени по разработената методика в глава 2, точки VIII и IX (таблица 24).

Както се вижда от таблицата, разсейването на опитните резултати е слабо. Изчислената грешка е в рамките на $\pm 2\%$. Тази точност е напълно достатъчно и дава основание резултатите да се приемат за достоверни. Средната стойност на константата C за разглеждания материал е 11,09.

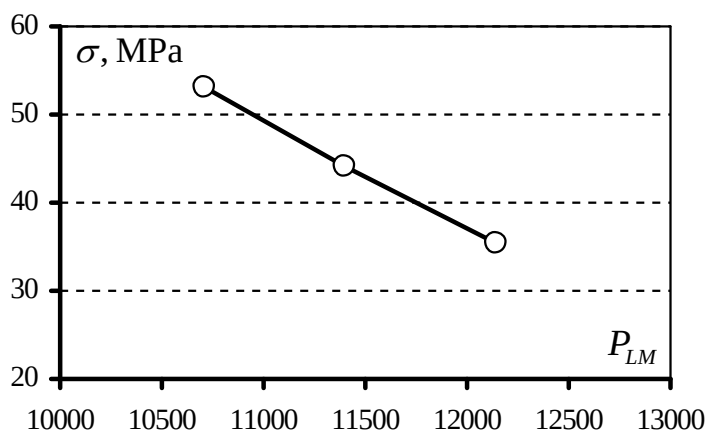
Таблица 24

1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ_j, MPa	$T_i, ^\circ C$	t_n, h	$t_{ji} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 t_n, h$	$P_{\sigma j}$	$C_{\sigma j}$	$P_{ji} = T_i (C + \lg t_{ji})$	P_j	$\Delta = \frac{P_{\sigma j} - P_j}{P_{\sigma j}} 100, \%$
$\sigma_1=53,08$	$T_1=1000$	$t_1=0,41$	$t_{11} = 0,41$	$P_{\sigma_1} = 10890$	$C_{\sigma_1} = 11,28$	$P_{11} = 10703$	$P_1 = 10713$	$\Delta = 1,63$
		$t_2=0,39$						
		$t_3=0,42$						
	$T_2=900$	$t_1=6,42$	$t_{12} = 6,65$			$P_{12} = 10722$		
		$t_2=6,83$						
		$t_3=6,71$						
$\sigma_2=44,23$	$T_1=1000$	$t_1=2,01$	$t_{21} = 2,05$	$P_{\sigma_2} = 11461$	$C_{\sigma_2} = 11,15$	$P_{21} = 11402$	$P_2 = 11405$	$\Delta = 0,49$
		$t_2=2,16$						
		$t_3=1.99$						
	$T_2=900$	$t_1=38,65$	$t_{22} = 38,48$			$P_{22} = 11408$		
		$t_2=39,20$						
		$t_3=37,60$						
$\sigma_3=35,39$	$T_1=1000$	$t_1=11,97$	$t_{31} = 11,65$	$P_{\sigma_3} = 11915$	$C_{\sigma_3} = 10,85$	$P_{31} = 12156$	$P_3 = 12144$	$\Delta = -1,92$
		$t_2=10,91$						
		$t_3=12,06$						
	$T_2=900$	$t_1=240,21$	$t_{32} = 245,58$			$P_{32} = 12132$		
		$t_2=249,35$						
		$t_3=247,19$						
					$C = 11,09$			

3. Прогнозиране на поведението на материал 1.4859 за време, надвишаващо времето на експериментите

Използвана е разработената методика в глава 2, точка XI.

На фиг. 102 е дадена графиката на изменение на параметъра P_{LM} в зависимост от продължителната якост за материал 1.4859, установена опитно при високи температури.



Фиг. 102. Графика $P_{LM}(\sigma)$ за стомана 1.4859

Тази графика може да се използва за прогнозиране на t_R или $R_{u/t/T}$ при по-ниски температури.

Пример 1: Да се прогнозира времето до разрушаване на конструкционен елемент от стомана 1.4859, подложен на чист опън, ако работната температура е $T = 750$ °C, а работното напрежение е $\sigma = 50$ МПа.

Решение: От фиг. 102 за $\sigma = 50$ МПа се определя $P_{LM} = 10900$. Тогава:

$$P_{LM} = T(C + \lg t_R) \Rightarrow 10900 = 750(11,09 + \lg t_R) \Rightarrow t_R = 2775,45 \text{ h} = 115,64 \text{ дни.}$$

Пример 2: Даден е конструкционен елемент от стомана 1.4859, подложен на чист опън, при работна температура от 750 °C. Да се прогнозира напрежението, при което времето за разрушаване на елемента ще бъде $t_R = 365$ дни (8760 h).

Решение: Пресмята се параметърът на Larson-Miller:

$$P_{LM} = T(C + \lg t_R) = 750(11,09 + \lg(365 \cdot 24)) = 11274.$$

От фиг. 102 за $P_{LM} = 11274$ се отчита $\sigma = R_{u/8760 \text{ h}/750 \text{ °C}} = 44,5$ МПа.

ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Настоящият дисертационен труд е посветен на изследване поведението на български легирани стомани в условията на високи температури. Резултатите получени в него имат научен, научно-приложен и приложен характер и могат да бъдат обобщени както следва:

I. Научни приноси

1. Предложен е нов модел за описване поведението на материалите в условията на пълзене.

II. Научно-приложни приноси

1. Разработена е усъвършенствана методика за изпитване на опън при високи температури.

2. Проектиран и изработен е усъвършенстван стенд за изпитване на материалите в условията на високи температури.

3. Разработена е методика за провеждане на експериментални изследвания.

III. Приложни приноси

1. Определени са механични характеристики на стомана Wt. № 1.4837 при температури 800, 900, 1000 °C и статично натоварване.

2. Изследвано е поведението на нова марка стомана (Wt. №1.4852 М) в условията на кратковременно пълзене при температура 900 °C.

3. Определен е параметърът на Larson-Miller за стомана Wt. №1.4859.

4. Прогнозирано е поведението на стомани Wt. №1.4852 М и Wt. №1.4859 за време, надвишаващо времето на експериментите изследвания.

Разработените стенд и методики за изследване на поведението на материалите при повишени температури са внедрени в “Центромет” АД – гр. Враца.

СПИСЪК НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Николов Н., **Цонев В.**, Лазов Л., Георгиев В., *Проектиране на нагревателен модул за изпитване на материалите при продължително въздействие на високи температури*, Конференция на ЕМФ, 2009, Созопол, България, Том 1, стр.187.
2. **Цонев В.**, Николов Н., *Defining the Larson-Miller parameter for a new alloy steel*, RECENT, Vol. 11, №1 (28), March 2010, p.50-53, Brasov, Romania.
3. Николов Н., **Цонев В.**, Лазов Л., *Управление на стенд за изпитване на материалите при високи температури*, X Международна научно-техническа конференция по авангардни материали и обработки „АМО 2010”, 27-29 юни 2010, Сборник с доклади, стр.315-319.
4. **Цонев В.**, *Определяне на механични характеристики на нова марка легирана стомана при повишени температури и статично натоварване*, Научна конференция с международно участие, VulTrans-2010, Созопол, България, Сборник с доклади, стр. 209.

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕХАНИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЛЕГИРАНИ
СТОМАНИ В УСЛОВИЯТА НА ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ**

Veselin TSONEV

Department “Strength of Materials”, Technical University – Sofia, Bulgaria

ABSTRACT

Materials, working for a long time at increased temperature and at great load are widely used nowadays in the energetic, in the chemical industry, in the aviation, in the automotive industry and in many other technical domains. These exploitation conditions put forward a number of requirements towards the details used. Quite often these high and various requirements should be combined with a minimum strength reserve. Otherwise the development of some machines and equipment (for example jet engines) would turn up to be a technically impossible task. That's why when designing construction elements, intended for a long work at increased temperature and at great load, it is extremely important to have a good knowledge of the behaviour of the material used at such exploitation conditions. The presence of experimental data allows the constructor to work with minimum strength reserve and to create a light, cheap and reliable construction.

The dissertation is dedicated to investigation of the behaviour of Bulgaria produced alloy steels at high temperature conditions.

Chapter 1 „Literature review” – regards high temperatures investigations. Information about the EU most commonly used relations which describe creep curves are given. Accent is put on the assessment criteria for construction elements which are subjected to high temperatures. Investigation of the contemporary equipment for high temperature measurements is done.

Chapter 2 „Enhanced methodology for tension testing at high temperatures” – summarizes the information from standards about testing of materials at high temperatures. Additionally algorithms for determination of creep strength and Larson-Miller parameter are developed. Methodologies for prediction of material behavior for longer periods, which exceed the experimental time are proposed.

Chapter 3 „Design and production of equipment for testing of materials at high temperatures” – is related to description of the design and production of a heating device, testing machine, extensometers for deformation measurement at high temperatures and equipment for control and recording of experimental data.

Chapter 4 „Experimental research and results” – describes the testing of three types alloy steels. The material properties of 1.4837 alloy steel at temperatures of 800, 900 and 1000 °C and at static loading are determined. The behavior of new type of steel (1.4852 M) at short-time creep for temperature of 900 °C is investigated. A new model for description of the received creep curves is proposed. The Larson-Miller parameter for 1.4859 steel is determined. A prediction of the behavior of 1.4852 M and 1.4859 steels is done for period, which exceeds the experimental time.

The main results of the dissertation are summarized in the conclusions. They are of scientific and applied type.