



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**  
**Факултет по транспорта**  
**Катедра „Механика“**

**маг. инж. Никола Иванов Кузманов**

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕХАНИЧНИТЕ**  
**ХАРАКТЕРИСТИКИ НА НИШКА ОТ INCONEL 600**  
**В УСЛОВИЯТА НА ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен  
**"ДОКТОР"**

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство

Научна специалност: Строителна механика и съпротивление на материалите

**Научен ръководител: доц. д-р Веселин Цонев**

СОФИЯ, 2022 г.

Дисертационният труд е в обем от 108 страници, като включва актуалност на темата, 4 глави, основни резултати от дисертационния труд, използвана литература, списък на научните публикации по дисертацията, декларация за оригиналност и благодарности. Цитирани са общо 76 литературни източници. Работата включва общо 73 фигури и 21 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд. Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 4 броя научни статии.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Механика“ към Факултет по транспорта на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 21.03.2022 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 14.06.2022 г. от 13,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на ТУ-София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.1-23/31.03.2022 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. дн Иван Кралов – председател
2. доц. д-р Красимир Неделчев – научен секретар
3. проф. дн Петър Колев
4. проф. д-р Красимир Кръстанов
5. доц. д-р Владимир Котев

Рецензенти:

1. доц. д-р Красимир Неделчев
2. доц. д-р Владимир Котев

Заповед № ОЖ-5.1-27/12.04.2022 г. на Ректора на ТУ-София видоизменя заповед № ОЖ-5.1-23/31.03.2022 г., както следва: дата, час и място на публичната защита – 16.06.2022 г. от 13,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на ТУ-София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по транспорта на ТУ-София, блок № 9, кабинет № 9310.

Дисертантът е докторант в самостоятелна форма на обучение към катедра „Механика“ на Факултет по транспорта. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Никола Иванов Кузманов

Заглавие: Изследване на механичните характеристики на нишка от Inconel 600 в условията на високи температури

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

## КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

---

### АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТА

Семейството аустенитни сплави, базирани на никел и хром, наречени Inconel (Inconel е запазена търговска марка на Special Metals Corporation - САЩ), запазва якостта си в широк температурен диапазон, което го прави привлекателен материал за високотемпературни приложения. Нишки от Inconel се влагат в отговорни агрегати в авиационната, автомобилната, железопътната и други промишлености.

Изследването на поведението на материалите при температури, надвишаващи 600 °C, е свързано с преодоляването на значителни трудности, определени от надеждността на използваните средства и поддържането на постоянни условия по време на изпитването. Поради тези причини в литературата се срещат относително малко данни за поведението на материалите при високи температури.

Инженерният подход за определяне на механични характеристики на нишки в условията на високи температури се основава на стандартни механични изпитвания. Пробно тяло се нагрива до зададена температура и се натоварва най-често със сила на опън. При статично натоварване се определят механични характеристики на материала като: граница на провлачане, якост на опън, модул на еластичност и др. При поддържане на постоянна сила на опън се определя границата на пълзене и/или границата на продължителна якост на материала. При циклично натоварване се определя границата на умора на материала.

Разработването на стендове за изпитване на нишки при високи температури и методики за определяне и оценка на механичните им характеристики е актуална задача, изискваща значителна предварителна научноизследователска дейност, съчетаваща знания от различни области – материалознание, механика, електротехника, електроника, мехатроника, компютърна техника и технологии.

## ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

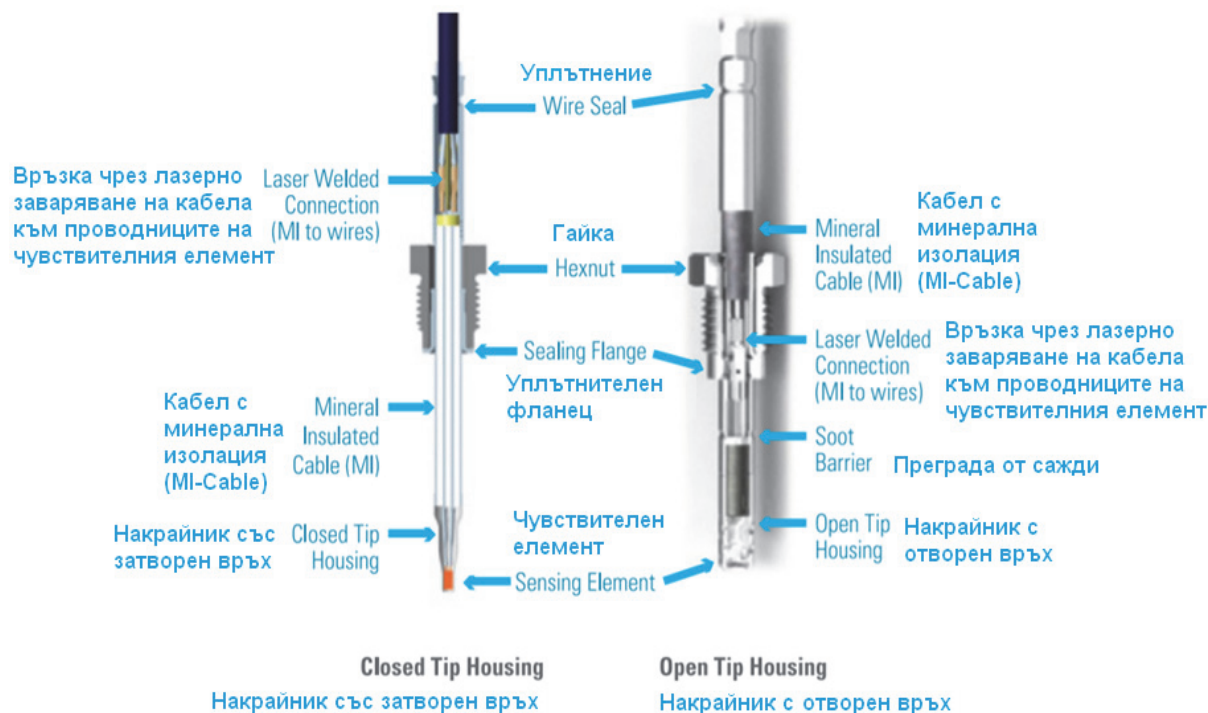
### 1. Приложения на нишки от Inconel

#### 1.1. Сензори за температура

На фигура 1 е показан сензор за измерване на високи температури, какъвто се използва в изпускателния тракт на моторните превозни средства. Температурата на отработените газове може да достигне 900°C.

Сензорът се състои от корпус на термодвойката (Closed tip housing), кабел с минерална изолация (Mineral insulated cable – MI-кабел, устойчив на температури до 900 °C), присъединителен фланец и свързващи проводници (устойчиви на температури до 100-150 °C).

При работа MI-кабелът, в който често за електрически проводник се използва нишка от Inconel, преминава през термични цикли, които го натоварват и механично.



Фигура 1. Устройство на сензор за високи температури.

## 1.2. Осигурителна нишка

Осигурителните нишки предотвратяват саморазвиването и изпадането на крепежни елементи (болтове, гайки) в следствие на вибрации и други въздействия.

Осигурителните нишки са подложени на опън и на срязване. Често те са изложени и на променливи температури, които могат да варират в много широк диапазон, например в авиационните двигатели. В този случай се появява и циклично натоварване заради температурните деформации.

## 1.3. Композитни материали

Композитите са познати още като „подсилени материали“, тъй като често представляват усилващи влакна (нишки) в полимерна, дървена, керамична, метална и др. основи. Композитите са материали, които позволяват да бъдат произведени леки детайли със сложна форма, които същевременно да притежават и висока якост.

Усилващи влакна от Inconel се използват за повишаване на якостта и гъвкавостта при повишени температури.

Якостно-деформационният анализ на детайли, изработени от композитни материали, се извършва с помощта на числени методи. Тези методи изискват да бъдат въведени механичните характеристики на материалите, от които са изработени матрицата и усилващите влакна при работните условия на съответния детайл.

## 2. Поведение на материалите в условията на кратковременно въздействие на високи температури и статично натоварване

Както се вижда от таблица 3, механичните характеристики на Inconel 600 при стайна температура варират в широки граници в зависимост от технологията на производство и термичната обработка [3]. В таблицата са дадени механични характеристики на нишки от Inconel 600 с диаметър от 1,6 mm до 6,4 mm.

*Таблица 3. Механични характеристики на Inconel 600 при стайна температура.*

| Form and Condition | Tensile Strength |           | Yield Strength (0.2% Offset) |           | Elongation, % | Hardness, Rockwell |
|--------------------|------------------|-----------|------------------------------|-----------|---------------|--------------------|
|                    | ksi              | MPa       | ksi                          | MPa       |               |                    |
| Rod and Bar        |                  |           |                              |           |               |                    |
| Cold-Drawn         |                  |           |                              |           |               |                    |
| Annealed           | 80-100           | 550-690   | 25-50                        | 170-345   | 55-35         | 65-85B             |
| As-Drawn           | 105-150          | 725-1035  | 80-125                       | 550-860   | 30-10         | 90B-30C            |
| Hot-Finished       |                  |           |                              |           |               |                    |
| Annealed           | 80-100           | 550-690   | 30-50                        | 205-345   | 55-35         | 65-85B             |
| Hot-Finished       | 85-120           | 585-830   | 35-90                        | 240-620   | 50-30         | 75-95B             |
| Plate              |                  |           |                              |           |               |                    |
| Hot-Rolled         |                  |           |                              |           |               |                    |
| Annealed           | 80-105           | 550-725   | 30-50                        | 205-345   | 55-35         | 65-85B             |
| As-Rolled          | 85-110           | 580-760   | 35-65                        | 240-450   | 50-30         | 80-95B             |
| Sheet              |                  |           |                              |           |               |                    |
| Cold-Rolled        |                  |           |                              |           |               |                    |
| Annealed           | 80-100           | 550-690   | 30-45                        | 205-310   | 55-35         | 88B max.           |
| Hard               | 120-150          | 830-1035  | 90-125                       | 620-860   | 15-2          | 24C min.           |
| Strip              |                  |           |                              |           |               |                    |
| Cold-Rolled        |                  |           |                              |           |               |                    |
| Annealed           | 80-100           | 550-690   | 30-45                        | 205-310   | 55-35         | 84B max.           |
| Spring Temper      | 145-170          | 1000-1170 | 120-160                      | 830-1100  | 10-2          | 30C min.           |
| Tube and Pipe      |                  |           |                              |           |               |                    |
| Hot-Finished       |                  |           |                              |           |               |                    |
| Hot-Finished       | 75-100           | 520-690   | 25-50                        | 170-345   | 55-35         | -                  |
| Annealed           | 75-100           | 520-690   | 25-50                        | 170-345   | 55-35         | -                  |
| Cold-Drawn         |                  |           |                              |           |               |                    |
| Annealed           | 80-100           | 550-690   | 25-50                        | 170-345   | 55-35         | 88B max.           |
| Wire <sup>b</sup>  |                  |           |                              |           |               |                    |
| Cold-Drawn         |                  |           |                              |           |               |                    |
| Annealed           | 80-120           | 550-830   | 35-75                        | 240-520   | 45-20         | -                  |
| No. 1 Temper       | 105-135          | 725-930   | 70-105                       | 480-725   | 35-15         | -                  |
| Spring Temper      | 170-220          | 1170-1520 | 150-210                      | 1035-1450 | 5-2           | -                  |

В литературата не се откриват данни за механичните характеристики на нишки от Inconel при високи температури.

## 3. Поведение на материалите в условията на продължително въздействие на високи температури и постоянно натоварване

Ако конструкционен елемент е подложен продължително време на повишена температура и постоянно напрежение, може да се развият значителни пластични деформации и при напрежения, които са по-ниски от границата на пропорционалност. В повечето случаи тези пластични деформации имат локален характер и разрушаването настъпва, без да се проявяват макропластични видими деформации в конструкционния елемент. Описаното явление се нарича *пълзене на материалите* [6].

Якостта на материалите, работещи продължително при високи температури и постоянно натоварване, се оценява по два критерия – граница на пълзене и граница на продължителна якост. *Граница на пълзене*  $R_{p/\varepsilon/t/T}$  се нарича напрежението, при което деформацията на пълзене  $\varepsilon_f$  за даден интервал от време  $t$  при температура  $T$ , достига големина, определена от техническите условия. *Граница на продължителна якост*  $R_{u/t/T}$  се нарича онази стойност на напрежението  $\sigma$ , при която материалът се разрушава за време  $t_R$  при дадена температура  $T$ . За експериментално определяне на границата на пълзене е необходимо да се следи изменението на деформацията на пълзене, което усложнява експеримента. Границата на продължителна якост се установява по-лесно, защото се измерва само времето до разрушаване.

Съществуват различни зависимости, които дават връзка между величините  $R_{u/t/T}$ ,  $t_R$  и  $T$ . Тези зависимости се наричат параметри и носят името на изследователите, които са ги предложили. Те са установени експериментално и са валидни за конкретни материали. За различните материали са подходящи различни параметри. Някои от тях са дадени в таблица 4 [20].

**Таблица 4.** Граница на продължителна якост.

| Параметър на:   | Зависимост                                                   | Материални константи за определяне | Литературен източник |
|-----------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| Larson-Miller   | $P_{LM} = f(\sigma) = T(C + \lg t_R)$                        | $C$                                | [21]                 |
| Manson-Haferd   | $P_{MH} = f(\sigma) = \frac{T - T_a}{\lg t_R - \lg t_a}$     | $T_a, t_a$                         | [22]                 |
| Manson-Brown    | $P_{MB} = f(\sigma) = \frac{\lg t_R - \lg t_a}{(T - T_a)^n}$ | $T_a, t_a, n$                      | [23]                 |
| Manson-Succop   | $P_{MS} = f(\sigma) = \lg t_R + C.T$                         | $C$                                | [24]                 |
| Orr-Sherby-Dorn | $P_{OSD} = f(\sigma) = \lg t_R - \frac{B}{T}$                | $B$                                | [25]                 |

Параметрите, дадени в таблица 4, се установяват при високи температури и напрежения, при които времето до разрушаване е малко. След това те се използват за прогнозиране на времето за разрушаване при по-ниски температури, за които при същите напрежения ще се получат значително по-големи стойности на  $t_R$ .

Най-често използвани в практиката са зависимостите, предложени от Larson-Miller ( $P_{LM}$ ) и Manson-Haferd ( $P_{MH}$ ). Параметърът  $P_{MH}$  е по-точен от  $P_{LM}$ , но съдържа две константи.

В литературата не се откриват изследвания на пълзене на нишки от Inconel.

#### **4. Поведение на материалите в условията на продължително въздействие на високи температури и циклично натоварване**

Цикличното натоварване може да доведе до разрушаване на материалите при стойности на напреженията, по-ниски от опасните напрежения, установени при статично натоварване. Описаното явление е известно в инженерната практика като *умора на материалите* [6].

При продължително въздействие на високи температури и циклично натоварване в материала протичат, както процеси на пълзене, така и процеси на умора, с което ресурсът значително намалява.

Най-често използваният подход за определяне на сумарните повреди в условията на пълзене и умора е линейното сумиране на повредите от умората и пълзенето [20]. Ето защо, трябва да се познават поотделно критериите за оценка на поведението на материалите в условията на пълзене, които разгледахме по-горе, и в условията на умора.

Критериите за разрушаване от умора се установяват чрез обобщаване на експериментални данни или на основата на физически обосновани параметри. Те представляват зависимости между времето до разрушаване (броя цикли) и някои от параметрите на хистерезисната крива, получена при изчертаване амплитудата на цикъла  $\sigma_a$  във функция от деформацията  $\varepsilon_a$  (която е сума от еластична деформация  $\varepsilon_{ae}$  и пластична деформация  $\varepsilon_{ap}$ ). Параметри на хистерезисната крива са  $\sigma_a$ ,  $\varepsilon_{ae}$ ,  $\varepsilon_{ap}$  и специфичната енергия на цикъла  $W$ , която представлява площта на хистерезиса. Следователно критериите за разрушаване биват *силови*, *деформационни* и *енергетични*. В таблица 5 са дадени най-често използваните критерии.

**Таблица 5. Критерии за разрушаване от умора.**

| Вид критерий  | Критерий на:           | Зависимост                                                                                                             | Материални константи |
|---------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Силов         | Basquin                | $\sigma_a = \sigma'_f (N_f)^c$                                                                                         | $\sigma'_f, c$       |
| Деформационен | Menson-Coffin          | $\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$                                                                           | $\varepsilon'_f, c$  |
|               | Menson-Coffin- Basquin | $\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \left( \frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n'}$ | $E, K', n'$          |
| Енергетичен   | Halford                | $W = w'_f (N_f)^c$                                                                                                     | $w'_f, c$            |

При *енергетичните критерии* се предполага, че разсеяната енергия причинява необратими повреди в материала. При тях мярка за повредите е работата, необходима за протичане на деформация в материала. Halford използва нееластичната енергия в качеството на параметър на повредите. При използване на енергетичен критерий е необходимо намирането на специфичната разсеяна енергия за всеки цикъл.

## 5. Апаратура за изпитване в условията на високи температури

За провеждане на механични изпитвания при високи температури в съвременните лаборатории се използват изпитвателни машини със сервоуправляеми натоварващи механизми, които позволяват да се осигурява прецизно натоварване [33, 34].

За постигане на равномерно нагряване на пробното тяло най-често се използват двусекционни и трисекционни нагревателни модули [36, 37]. Всяка секция от електрически нагреватели се управлява от отделна термодвойка и отделен ПИД терморегулатор.

Когато захващането на пробното тяло е в зоната на нагряване, се използват захвати от стомани с висока устойчивост на пълзене при високи температури. Когато захващането на пробното тяло е извън зоната на нагряване, могат да се използват захвати, изработени от обикновени конструкционни стомани.

За регистриране на силата, с която се натоварва пробното тяло, най-често се използват тензометрични силомери, които преобразуват механичната деформация на еластичния им елемент в пропорционален електрически сигнал. Съвременните тензометрични силомери позволяват прецизно измерване на натоварването в най-различни диапазони. В [44] е използван силомер с обхват 20 kN, докато в [45] е използван силомер с обхват 1 kN.

За регистриране на надлъжната деформация на нишката, не могат да бъдат използвани класическите екстензометри за високи температури, защото те не могат да бъдат монтирани върху нишката.

В [48] деформацията по време на изпитване се регистрира с индуктивен възприемател на преместване.

За провеждане на механични изпитвания при високи температури и постоянно натоварване, могат да се използват по-прости конструкции на изпитвателна машина с директно натоварване чрез тежести [50, 51, 52].

В [54] е описана система за изпитване на нишки при високи температури и циклично натоварване. Системата е съставена от модул за статично натоварване, силомер, два оптични енкодера за измерване на деформацията, камера за високи температури и модул за натоварване чрез електродинамичен вибратор.

Техниката за изпитване на материалите при високи температури е сложна, специфична и скъпа. Закупуването на готови изпитателни системи е неизгодно. Опитът показва, че в повечето случаи е целесъобразно купуването на отделни компоненти и собствено разработване на останалите елементи и софтуерни продукти, според целите на изследването.

## **6. Цел и задачи**

Целта на дисертационния труд е **ДА СЕ ИЗСЛЕДВА ВЛИЯНИЕТО НА ТЕМПЕРАТУРАТА ВЪРХУ МЕХАНИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА НИШКА ОТ INCONEL 600.**

За постигане на поставената цел са формулирани следните задачи:

- 1) Да се разработи обобщена методика за определяне и оценка на механичните характеристики на нишки в условията на високи температури;
- 2) Да се проектират и изработят средства за изпитване на нишки при високи температури;
- 3) Да се разработят методики за работа със средствата за изпитване на нишки при високи температури;
- 4) Да се определят механични характеристики на нишка от Inconel 600 в условията на високи температури;
- 5) Да се прогнозира поведението на нишка от Inconel 600 за време, надвишаващо времето на експериментите.

## ГЛАВА 2. ОБОБЩЕНА МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ И ОЦЕНКА НА МЕХАНИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА НИШКИ В УСЛОВИЯТА НА ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ

В глава 2 е обобщена информацията от различни стандарти свързани с изпитване на материалите. Дадени са методики за определяне на границата на пълзене и параметъра на Larson-Miller. Разработени са методика и програма за определяне на параметъра на Manson-Haferd. Дадени са методики за прогнозиране на поведението на материалите в условията на повишени температури.

### 1. Метални материали. Изпитване на опън. Метод за изпитване при повишена температура [56]

#### 1.2. Термини и определения

1.2.1.1. Начална мерна дължина ( $L_o$ ) – мерната дължина преди прилагане на силата.

1.2.1.2. Крайна мерна дължина ( $L_u$ ) – мерната дължина след разрушаване на пробното тяло.

1.2.6. Якост на опън ( $R_m$ ) – напрежение, съответстващо на максималната сила ( $F_m$ ).

#### 1.6. Определяне на условната граница на провлачане за зададено остатъчно удължение

Определя се за материали, които нямат физическа граница на провлачане.

Условната граница на провлачане за зададено остатъчно удължение ( $R_p$ ) се определя от кривата на деформиране на материала „напрежение-относително удължение“ чрез прекарване на линия, успоредна на линейната част на кривата и на разстояние от нея, равно на зададения процент относително удължение, например 0,2 %. Ординатата на точката, в която тази линия пресича кривата, съответства на търсената условна граница на провлачане. Към означението се добавя индекс за зададения процент на удължението, например  $R_{p0,2}$ .

#### 1.7. Определяне на относително удължение след разрушаване

Двете части на разрушеното пробно тяло трябва внимателно да се съединят така, че осите им да лежат на една права линия.

Относителното удължение след разрушаване ( $A$ ) се пресмята от следната зависимост:

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} 100, \% . \quad (2)$$

Към означението  $A$  трябва да се добави индекс, показващ използваната начална мерна дължина, изразена в милиметри, например:  $A_{100\text{ mm}}$  – относително удължение за начална мерна дължина ( $L_o$ ), равна на 100 mm.

## 6. Разработване на методика за определяне на границата на продължителна якост чрез параметъра на Manson-Hafard

6.1. Провежда се експериментално изследване при две температури  $T_1$  и  $T_2$ , за три стойности за  $\sigma$  ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ). 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  $t_n$  ( $n = 1 \div 3$ ).

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

$$t_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^3 t_n}{3}. \quad (11)$$

6.3. Пресмята се  $\lg t_{ij}$  за различните комбинации от  $T_i = \text{const}$  и  $\sigma_j = \text{const}$ .

6.4. В координатна система  $T$ ,  $\lg t$  се построяват линейните графики и се определят уравненията, които ги описват за всяка стойност на  $\sigma_j$ .

6.5. Десните страни на уравненията за напрежения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  се приравняват. Получената стойност за  $T$  е  $T_{a,12}$ . Получената стойност за  $T_{a,12}$  се замества в едно от двете уравнения и се получава  $\lg t_{a,12}$ . Получените стойности за  $T_{a,12}$  и  $\lg t_{a,12}$  се заместват в параметъра на Manson-Hafard и се получава  $P_{\sigma 1,12}$  и  $P_{\sigma 2,12}$ :

$$\begin{aligned} P_{\sigma 1,12} &= \frac{T_1 - T_{a,12}}{\lg t_{11} - \lg t_{a,12}} = \frac{T_2 - T_{a,12}}{\lg t_{12} - \lg t_{a,12}} \\ P_{\sigma 2,12} &= \frac{T_1 - T_{a,12}}{\lg t_{21} - \lg t_{a,12}} = \frac{T_2 - T_{a,12}}{\lg t_{22} - \lg t_{a,12}} \end{aligned} \quad (12)$$

По аналогичен начин се определят  $T_{a,13}$ ,  $\lg t_{a,13}$ ,  $P_{\sigma 1,13}$ ,  $P_{\sigma 3,13}$ ,  $T_{a,23}$ ,  $\lg t_{a,23}$ ,  $P_{\sigma 2,23}$ ,  $P_{\sigma 3,23}$ .

6.6. Определят се средните стойности на  $T_a$  и  $\lg t_a$ :

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{T_{a,12} + T_{a,13} + T_{a,23}}{3} \\ \lg t_a &= \frac{\lg t_{a,12} + \lg t_{a,13} + \lg t_{a,23}}{3} \end{aligned} \quad (13)$$

6.7. С получените стойности на  $T_a$  и  $\lg t_a$  съгласно параметъра на Manson-Hafard се пресмятат  $P_{ji}$ :

$$P_{ji} = \frac{T_i - T_a}{\lg t_{ji} - \lg t_a}. \quad (14)$$

6.8. Определят се средните стойност на  $P_j$ :

$$P_1 = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{1i}}{2}, \quad P_2 = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{2i}}{2}, \quad P_3 = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{3i}}{2}. \quad (15)$$

6.9. Изчисляват се грешките между  $P_{\sigma j}$  и  $P_j$ :

$$\Delta = \frac{P_{\sigma j} - P_j}{P_{\sigma j}} 100, \% \quad (16)$$

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

6.10.1. Ако изчислената грешка е по-малка от допустимата, се построява графиката на изменение на параметъра  $P_{MH}$  в зависимост от границата на продължителна якост.

6.10.2. Ако грешката е по-голяма от допустимата стойност, се провеждат допълнителни експерименти за още две стойности на  $\sigma$  ( $\sigma_4$  и  $\sigma_5$ ) и пресмятанията се допълват. Заместват се новите стойности на  $T_a$  и  $\lg t_a$  в (14) 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).

## 7. Разработване на програма за пресмятане на параметъра на Manson-Haferd

На базата на разработената методика в предходната точка е създаден специализиран програмен продукт за пресмятане на параметъра на Manson-Haferd. За разработването на този продукт е използвана средата за програмиране Processing, версия 3.5.4. Processing е програмен продукт с отворен код и интегрирана среда за разработка (IDE), създаден за електронни изкуства, нови медийни изкуства и визуален дизайн. Processing използва езика Java с допълнителни опростявания като допълнителни класове и математически функции и операции. Той също така предоставя графичен потребителски интерфейс за опростяване на етапа на компилиране и изпълнение. Processing е създаден с цел лесна употреба и осигуряване на основа за изучаването на компютърното програмиране. Използвана е библиотека за създаване на графичен потребителски интерфейс G4P.

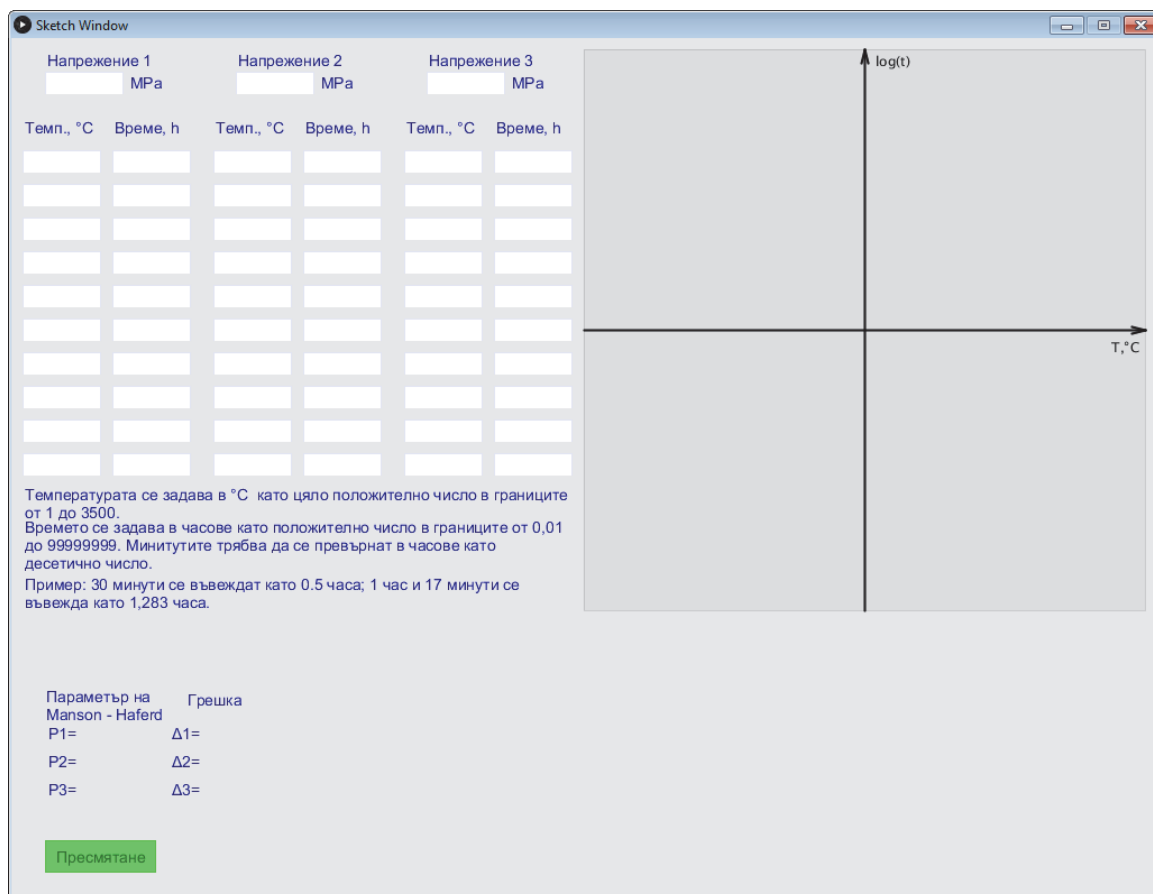
### 7.1. Интерфейс на компютърната програма

Интерфейсът на програмата след стартиране е показан на фигура 40.

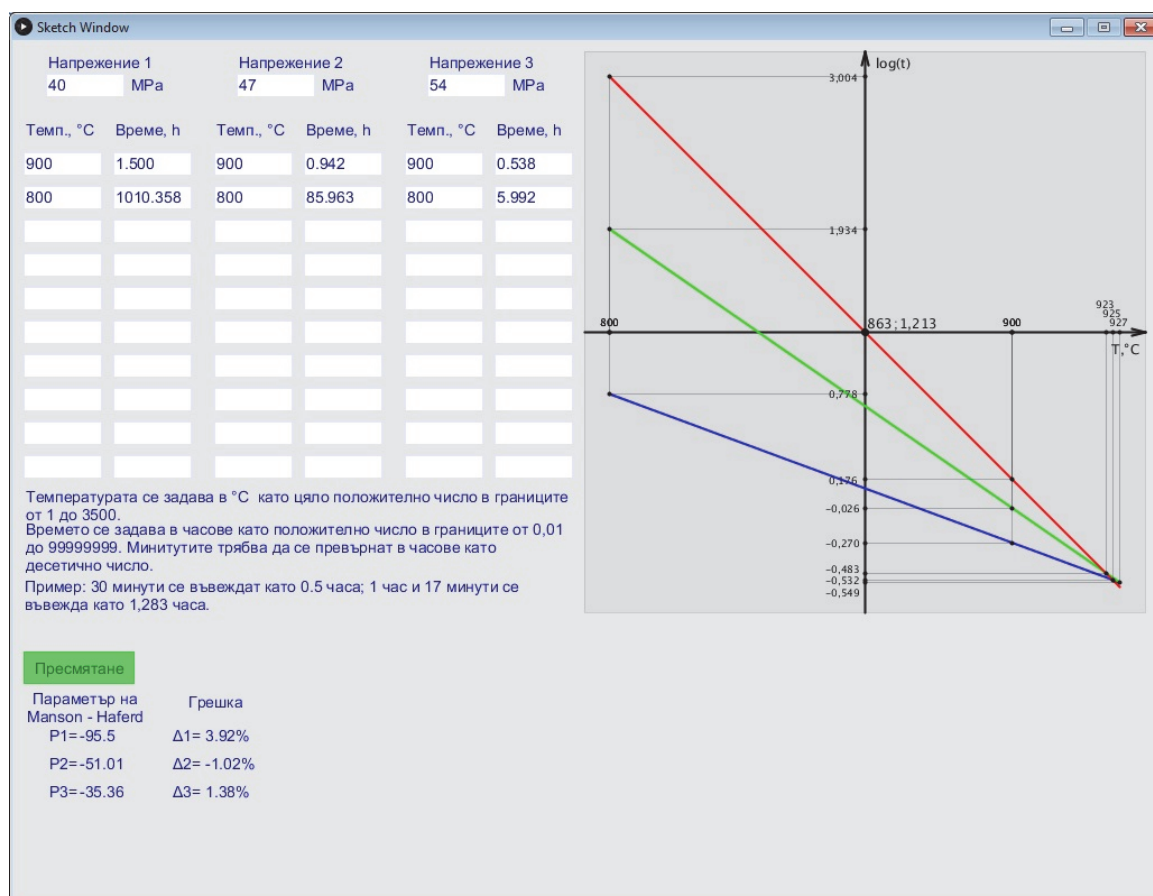
Потребителят:

- Въвежда три стойности за началното напрежение  $\sigma$  ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ );
- За всяко напрежение въвежда двойките стойности за температурата и средните стойности на времето за разрушаване ( $T_i$  и  $t_{ij}$ );
- Натиска бутона „Пресметни“.

Интерфейсът на програмата след натискане на бутона „Пресметни“ е показан на фигура 41. В дясно от въведените стойности, софтуерът изчертава линейните графики за всяко напрежение в координатна система  $T$ ,  $\lg(t)$  и изписва координатите на пресечните точки на всеки две прави. Под въведените стойности, софтуерът пресмята и изписва средните стойности на параметъра на Manson-Haferd за всяко напрежение и стойностите на грешките.



**Фигура 40.** Интерфейсът на програмата след стартиране.



**Фигура 41.** Интерфейсът на програмата след пресмятане.

## **9. Методика за 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 поведението на материалите чрез границата на продължителна якост [19]:

- 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 (експлоатационният срок на елемента).

За решаването на тези задачи се постъпва по следния начин:

9.1. 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.

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

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

9.4. Определя се търсената величина.

9.4.1. Ако се търси времето до разрушаване, от построената графика в точка 9.3 се определя стойността на  $P$ . От уравнението на съответния параметър се изразява и пресмята  $t_R$ .

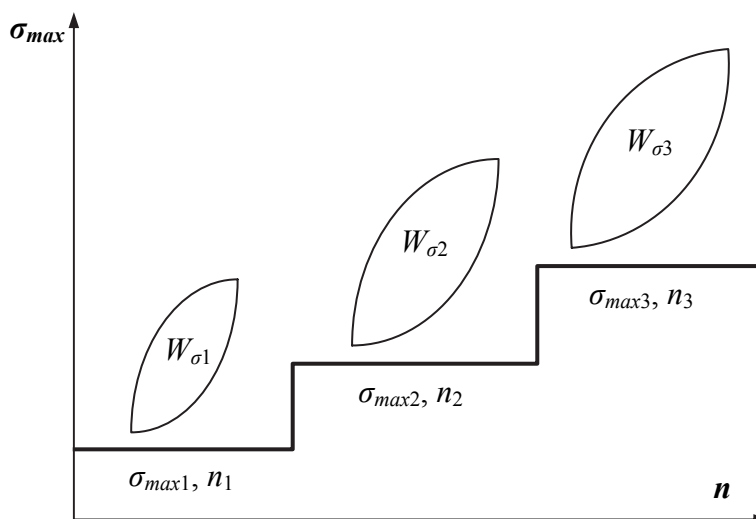
9.4.2. Ако се търси напрежението, от уравнението на съответния параметър се пресмята стойността на  $P$ . От построената графика в точка 9.3 се определя стойността на  $\sigma$ .

## **10. Разработване на методика за прогнозиране на броя цикли до разрушаване при зададена температура и коефициент на асиметрия на цикъла на натоварване**

Методиката е разработена по аналогия на методиката за прогнозиране на броя цикли до разрушаване при зададена температура и средно напрежение на цикъла на натоварване в [20].

10.1. Провежда се експеримент при зададените температура  $T$  и коефициент на асиметрия  $R$  и стъпално натоварване (използва се методът на динамичната хистерезисна крива). Всяко стъпало се характеризира с максимално напрежение  $\sigma_{max}$  и брой цикли  $n_i$  (фигура 42). Честотата на натоварване и формата на цикъла са дадени по условие. Регистрират се параметрите: амплитуда на напрежението  $\sigma_{ai}$  и амплитуда на деформацията  $\varepsilon_{ai}$ . Построяват се хистерезисните криви за всяко стъпало.

10.2. Определя се специфичната разсеяна енергия  $W_{\sigma i}$ , равна на площта на хистерезисната крива за всяко стъпало.



Фигура 42. Стъпаловидно циклично натоварване.

10.3. Определя се сумарната разсеяна енергия до отказ:

$$W_{\Sigma} = \sum n_i W_{\sigma_i} . \quad (17)$$

10.4. Приема се  $W_{\Sigma} = const$  и се определя броят цикли до разрушаване за всяко стъпало чрез хипотезата за линейно натрупване на повредите:

$$N_{fi} = \frac{W_{\Sigma}}{W_{\sigma_i}} . \quad (18)$$

10.5. Построява се кривата на умора, определена чрез разсеяната енергия.

10.6. От кривата на умора, построена в предходната стъпка, за дадената стойност на  $\sigma_{max}$ , може да се прогнозира броя цикли до разрушаване  $N_f$  без отчитане на явлението пълзене на материала.

## 11. Методика за оценка на ресурса на материалите в условията на повишени температури и променливо натоварване

Методиката позволява да се направи оценка на ресурса, ако са дадени: вид на материала; работна температура  $T$ ; параметри на цикличното натоварване – средно напрежение  $\sigma_m$ , коефициент на асиметрия  $R$ , честота на изменение на натоварването  $f$ , брой цикли  $N$ , форма на цикъла. Следва се следната последователност [20]:

11.1. Изработват се пробни тела от изследвания материал.

11.2. Провежда се изследване на пълзене, с цел да се прогнозира времето до разрушаване  $t_R$  при зададената температура  $T$  и напрежение  $\sigma_m$ .

11.3. Определят се повредите  $D_f$  от пълзене на материала:

$$D_f = \frac{t}{t_R} , \quad (19)$$

където  $t = t_c \cdot N$ , а  $t_c$  – времето за 1 цикъл.

11.4. Провежда се изследване на умора, за да се прогнозира броят цикли до разрушаване  $N_f$  при зададените температура  $T$ , коефициент на асиметрия  $R$  и стъпално натоварване.

11.5. Определят се повредите, в резултат от умора на материала:

$$D_c = \frac{N}{N_f}. \quad (20)$$

11.6. Определят се сумарните повреди:

$$D = D_c + D_f = \frac{N}{N_f} + \frac{t}{t_R}. \quad (21)$$

10.7. Прави се проверка на ресурса. Ако е изпълнено условието  $D < 1$ , се прави извод, че ресурсът е достатъчен, т.е., че даденият материал ще издържи на зададеното натоварване.

### ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРАНЕ И РЕАЛИЗИРАНЕ НА СТЕНДОВЕ ЗА ИЗПИТВАНЕ НА НИШКИ В УСЛОВИЯТА НА ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ

**1. Доокомплектоване и калибриране на стенд за изпитване на нишки в условията на високи температури и статично натоварване**

#### 1.1. Наличен стенд

В катедра „Механика” при ТУ-София е наличен стенд за изпитване на материалите при високи температури – фигура 43.



*Фигура 43. Наличен стенд за изпитване на материалите при високи температури.*

## 1.2. Доокомплектоване и калибриране на стенда

За да се реализира изпитване на опън на нишки при високи температури с наличния стенд е необходимо:

- Да се проектира, изработи и калибрира нов силомер, който да позволява точно измерване на натоварване до 0,1 kN;
- Да се проектира и изработи захващащо устройство за изпитване на опън на нишки при високи температури;
- Да се проектират нови захвати на изпитвателната машина, подходящи за захващащото устройство за изпитване на опън на нишки;
- Наличните екстензометри не могат да се закрепят върху изпитваната нишка. Планирано е надлъжната деформация да се регистрира с помощта на стъпковия електродвигател. За целта еластичният елемент на изпитвателната машина трябва да бъде демонтиран и долният захват на машината да бъде удължен с помощта на стебло, което да бъде свързано директно със силомера, посредством адаптор;
- Необходимо е калибриране на стъпковия електродвигател на изпитвателната машина.

### 1.2.1. Проектиране, изработване и калибриране на нов тензометричен силомер

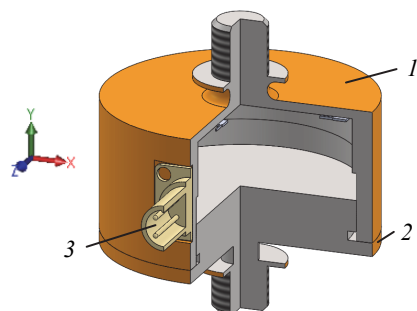
#### 1.2.1.3. Проектиране на силомера

На фигура 49 е показан 3D модел на проектирания тензометричен силомер.

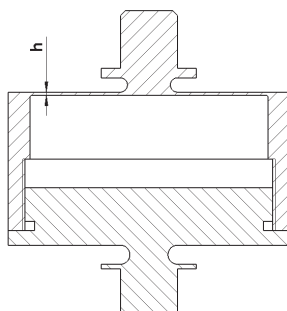
Той се състои от мембранен тип еластичен елемент 1, капачка 2 и куплунг 3 за отвеждане на сигнала към изпитвателната машина. Силомерът се монтира в изпитвателната машина посредством стеблата с резба на еластичния елемент и капачката.

Размерите на силомера с изключение на дебелината на мембраната са избрани по конструктивни съображения. Търси се дебелината на мембраната  $h$  (фигура 50), при която да се получи чувствителност на еластичния елемент в диапазона 1.5 – 2.0 mV/V.

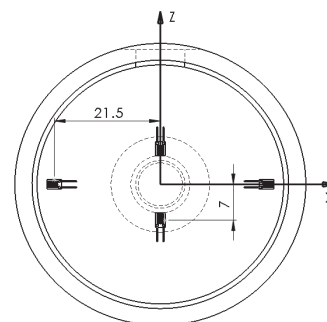
Еластичният елемент ще бъде изработен от легирана стомана 40X с граница на провлачане 700 – 900 MPa, в зависимост от термообработката на материала (еквивалент на тази стомана е AISI 4140). Върху него ще бъдат залепени фолиеви тензопреобразователи с  $k \approx 2$ , свързани в пълен мост (фигура 51).



Фигура 49. 3D модел на силомера.



Фигура 50. Чертеж на силомера.



Фигура 51. Схема на залепване на тензопреобразователите.

При проектирането на силомера е използван модулът Simulation, част от софтуерния продукт SolidWorks. Чрез числени симулации на напреженията и деформациите е оптимизирана дебелината на мембраната. Разгледан е само еластичният елемент на силомера.

#### **1.2.1.4. Изработване на силомера**

Еластичният елемент и капачката на силомера са изработени от легирана стомана 40X.

Първоначално мембраната на еластичния елемент е изработена с по-голяма дебелина, за да се избегне нежелано деформиране по време на термичната обработка.

С цел подобряване на механичните свойства и структура на материала, еластичният елемент е подложен на следната термична обработка:

- Закаляване – еластичният елемент е поставен в загрята до 860 °C пещ, задържан е в нея 40 min и рязко е охладен в масло с температура 20 °C (задържане в маслото 3 min). Вследствие на закаляването, материалът придобива мартензитна структура, която се характеризира с по-висока твърдост, изнosoустойчивост и граница на провлачане, но също така и с крехкост;
- Отвъръщане – еластичният елемент е поставен в загрята до 365 °C пещ, задържан е в нея 60 min и е оставен да се охлади бавно на въздух. Вследствие на отвъръщането се премахват вътрешните напрежения в материала и се намалява крехкостта, въпреки че твърдостта и границата на провлачане леко се понижават.

След термообработката, еластичният елемент е подложен на допълнителна механична обработка – струговане на челата на мембраната с цел премахване на окисните слоеве и получаване на повърхност, подходяща за залепване на тензопреобразувателите. Дебелината на мембраната е оставена малко по-голяма от теоретично пресметнатата. При необходимост тя ще бъде намалена за получаване на по-голяма чувствителност на еластичния елемент.

Върху мембраната на еластичния елемент са залепени фолиеви тензопреобразуватели с коефициент на тензочувствителност  $\kappa = 2.07$  и база 3 mm, свързани в пълен мост, съгласно схемата показана на фигура 51.

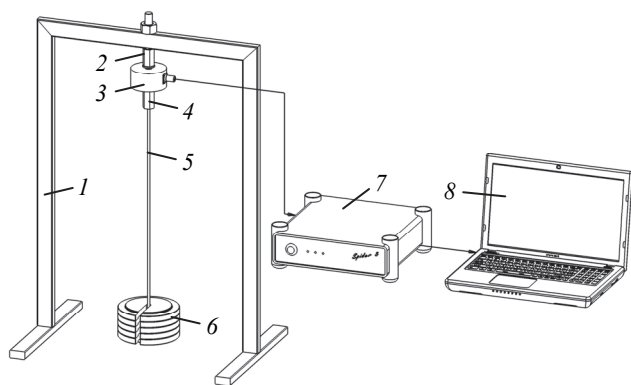
#### **1.2.1.5. Калибриране на силомера**

На фигура 58 е показана схема на опитната постановка за калибриране на силомера. Тя се състои от стойка 1, адаптер 2 за монтиране на силомера 3 към стойката, адаптер 4 за присъединяване на носач 5 към силомера, еталонни тежести 6, тензометричен усилвател 7 и преносим компютър 8.

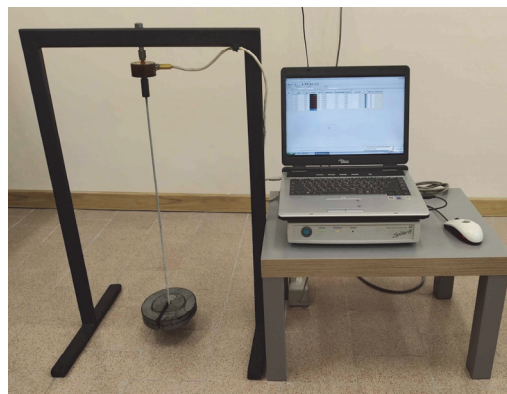
На фигура 59 е показана снимка на реализираната опитна постановка.

За определяне на калибровъчните стойности на силомера са проведени три серии измервания с нарастващи сили. Получените резултати са показани в таблица 9 и на фигура 60.

Чувствителността на силомера е 1.726 mV/V при 10 kgf.



**Фигура 58.** Схема на опитната постановка за калибриране на силомера.



**Фигура 59.** Снимка на опитната постановка за калибриране на силомера.

**Таблица 9.** Резултати от калибрирането на силомера.

| Калибрираща сила, kgf | Измерена стойност, mV/V |         |         |        |
|-----------------------|-------------------------|---------|---------|--------|
|                       | Серия 1                 | Серия 2 | Серия 3 | Средно |
| 0                     | 0.000                   | 0.000   | 0.000   | 0.000  |
| 0.2                   | 0.340                   | 0.340   | 0.341   | 0.034  |
| 0.3                   | 0.051                   | 0.052   | 0.052   | 0.052  |
| 0.5                   | 0.086                   | 0.087   | 0.086   | 0.086  |
| 1                     | 0.173                   | 0.172   | 0.171   | 0.172  |
| 2                     | 0.344                   | 0.345   | 0.345   | 0.345  |
| 4                     | 0.690                   | 0.689   | 0.689   | 0.690  |
| 6                     | 1.034                   | 1.034   | 1.034   | 1.034  |
| 8                     | 1.380                   | 1.382   | 1.381   | 1.381  |
| 10                    | 1.726                   | 1.726   | 1.726   | 1.726  |



**Фигура 60.** Линейна графика на получените резултати.

### 1.2.2. Проектиране и изработване на захващащо устройство за изпитване на опън на нишки при високи температури

На фигура 61 е показан 3D модел на захващащото устройство за изпитване на опън на нишки при високи температури. Устройството се състои от два държача – горен държач 1 и долен държач 2. Всеки държач се състои от две половини, ос 3 и винтове 4. Осите са с диаметър 5 mm и в тях са пробити радиални отвори, през които преминава нишката. В държачите са пробити хоризонтални и вертикални канали – хоризонталните канали са необходим за монтиране на осите, а през вертикалните преминава нишката, без да се опира в държачите. Двете половини на държачите се присъединяват една към друга посредством 4 винта M6x20 изработени от неръждаваща стомана.

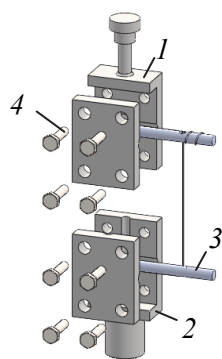
Захващащото устройство е изработено от топлоустойчива стомана с висока якост на опън.

### 1.2.3. Проектиране и изработване на долен захват, стебло и адаптор за изпитвателната машина

Формата и размерите на горния държач на захващащото устройство са съобразени с наличния горен захват на изпитвателната машина. Налага се изработването само на нов долен захват на изпитвателната машина – фигура 62. Горният държач се монтира в горния захват на машината чрез глава, работе-

ща на срязване при натоварване на опън, а долният държач се монтира в долния захват на машината чрез резбово съединение. Долният захват е изработен от топлоустойчива стомана с висока якост на опън.

На фигура 62 е показан 3D модел на стеблото, с което се удължава долният захват на машината. Връзката между силомера и стеблото се осъществява чрез резбови съединения. За целта е необходим адаптор, показан също на фигура 62. Стеблото и адапторът са изработени от обикновена въглеродна стомана S355JR.



**Фигура 61.** 3D модел на захващащото устройство за изпитване на опън на нишки.

Долен захват



Стебло



Адаптор



**Фигура 62.** 3D модели на долен захват, стебло и адаптор.

На фигура 63 е показана снимка на изработените и монтирани доокомплектоващи средства, необходими за изпитване на опън на нишки при високи температури с наличния стенд.

#### 1.2.4. Калибриране на стъпковия електродвигател на изпитвателната машина

За калибриране на стъпковия електродвигател е използван индикаторен часовник Mitutoyo, модел 2046-08 11835 (обхват 10 mm, резолюция 0,01mm) и магнитна стойка за индикаторен часовник – фигура 64. Магнитната стойка е монтирана върху неподвижната долна траверса на изпитвателната машина (позиция 3 на фигура 44). Стеблото на индикаторния часовник опира в подвижния диск на изпитвателната машина.



**Фигура 63.** Снимка на изработените и монтирани доокомплектоващи средства.



**Фигура 64.** Калибриране на стъпковия електродвигател.

### 1.2.4.1. Процедура за калибриране

1.2.4.1.1. Включва се електронният блок на стенда.

1.2.4.1.2. Подвижният диск се позиционира, така че да има достатъчен ход в посоката на натоварване. Това става в режим на ръчно управление. Ходът на сачмено-винтовата двойка (подвижния диск) може да се контролира чрез бутоните със стрелки ▲ и ▼ на клавиатурата на електронния блок.

1.2.4.1.3. Монтира се магнитната стойка.

1.2.4.1.4. Рамото на магнитната стойка, на което е монтиран индикаторният часовник, се позиционира, така че стрелката на индикаторния часовник да показва приблизително 10 mm.

1.2.4.1.5. С помощта на въртящата се скала се нулира индикаторният часовник (часовникът е изработен с 2 скали 0-10mm, и 10-0mm, позволяващи лесно отчитане на преместването).

1.2.4.1.6. Нулира се измервателната апаратура на стенда за изпитване.

1.2.4.1.7. В режим на ръчно управление се задава преместване, равно на завъртане на 10 оборота на вала на стъпковия електродвигател.

1.2.4.1.8. Отчита се показанието на индикаторния часовник.

1.2.4.1.9. Предходните две стъпки се повтарят до достигане на преместване, равно на завъртане на 80 оборота на вала на стъпковия електродвигател.

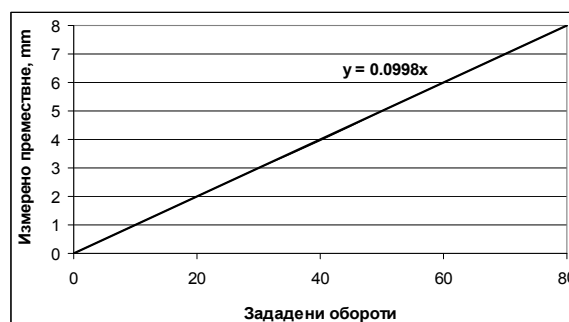
### 1.2.4.2. Резултати

Проведени са три серии измервания, съгласно разработената процедура в предходната точка. Получените резултати са показани в таблица 11 и на фигура 65.

Калибровъчният коефициент на стъпковия електродвигател е 1 оборот = 0,0998 mm.

**Таблица 11.** Резултати от калибрирането на стъпковия електродвигател.

| Зададени обороти | Измерено преместване, mm |         |         |        |
|------------------|--------------------------|---------|---------|--------|
|                  | Серия 1                  | Серия 2 | Серия 3 | Средно |
| 0                | 0                        | 0       | 0       | 0.000  |
| 10               | 1.01                     | 0.99    | 1.02    | 1.007  |
| 20               | 1.99                     | 1.97    | 2.04    | 2.000  |
| 30               | 2.97                     | 2.96    | 3.04    | 2.990  |
| 40               | 3.96                     | 3.95    | 4.02    | 3.977  |
| 50               | 4.97                     | 5.02    | 4.99    | 4.993  |
| 60               | 5.99                     | 6.01    | 5.98    | 5.993  |
| 70               | 7.02                     | 6.97    | 6.99    | 6.993  |
| 80               | 8.01                     | 7.96    | 7.98    | 7.983  |



**Фигура 65.** Линейна графика на получените резултати.

## 1.3. Последователност за изпитване на опън на нишка при висока температура

1.3.1. Нишката се монтира в осите за захващане (фигура 66):

1. Отрязва се нишка с дължина 200 mm;
2. Нишката се прекарва през отвора на едната ос, така че да се подава от едната ѝ страна 45 mm;
3. В отвора на оста се капват няколко капки Руго-Райт, като се внимава нишката да не се опира в ръбовете на отвора (за избягване на допълнител-

ни напрежения в нишката, предизвикани от контакт с ръба на отвора, по време на изпитването). Изчакват се 2 часа за изсъхване на Pyro-Paint;

4. Стъпки 2 и 3 се извършват от другата страна на нишката;

5. Нишката с двете оси се нагрява до  $T = 93\text{ }^{\circ}\text{C}$  и се задържа при тази температура 2 часа (изискване при използването на Pyro-Paint);

6. Частите от нишката с дължина 45 mm се навиват около двете оси;

7. Върху навивките се капват няколко капки тензометрично лепило X60 (това осигурява лесно монтиране на осите в захващащото устройство);

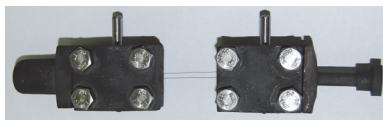
8. Нишката внимателно се изпъва (без да се създават пластични деформации) и се измерва разстоянието между двете оси (начална мерна дължина  $L_o$ , необходима за пресмятане на  $A$ ) –  $L_o = 100\text{ mm}$ .

1.3.2. Монтират се осите с нишката в захващащото устройство и се затягат болтовете (фигура 67).

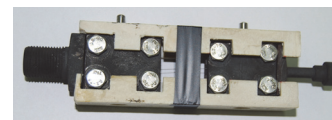
1.3.3. Захващащото устройство се монтира в специални пластмасови скоби за осигуряване на не-деформиране на нишката по време на монтирането ѝ в нагревателния модул (фигура 68).



**Фигура 66.** Монтиране на нишката в осите за захващане.



**Фигура 67.** Монтиране на осите с нишката в захващащото устройство.



**Фигура 68.** Монтиране на захващащото устройство в специални скоби.

1.3.4. Захващащото устройство заедно с нишката се монтира в захватите на изпитвателната машина и се свалят скобите (фигура 63).

1.3.5. Задава се температурата на изпитване, включва се нагревателният модул и се изчаква достигането на тази температура. След като печта достигне зададената температура се изчаква не по-малко от 10 min.

1.3.6. Нулира се измервателната апаратура.

1.3.7. Нишката се подлага на чист опън до нейното разрушаване. По време на натоварването непрекъснато се записват стойностите на силата и броя на оборотите на вала на стъпковия електродвигател (броят на оборотите се използва за определяне на удължението на мерната дължина).

1.3.8. Построява се кривата на деформиране на материала и се определят търсените механични характеристики.

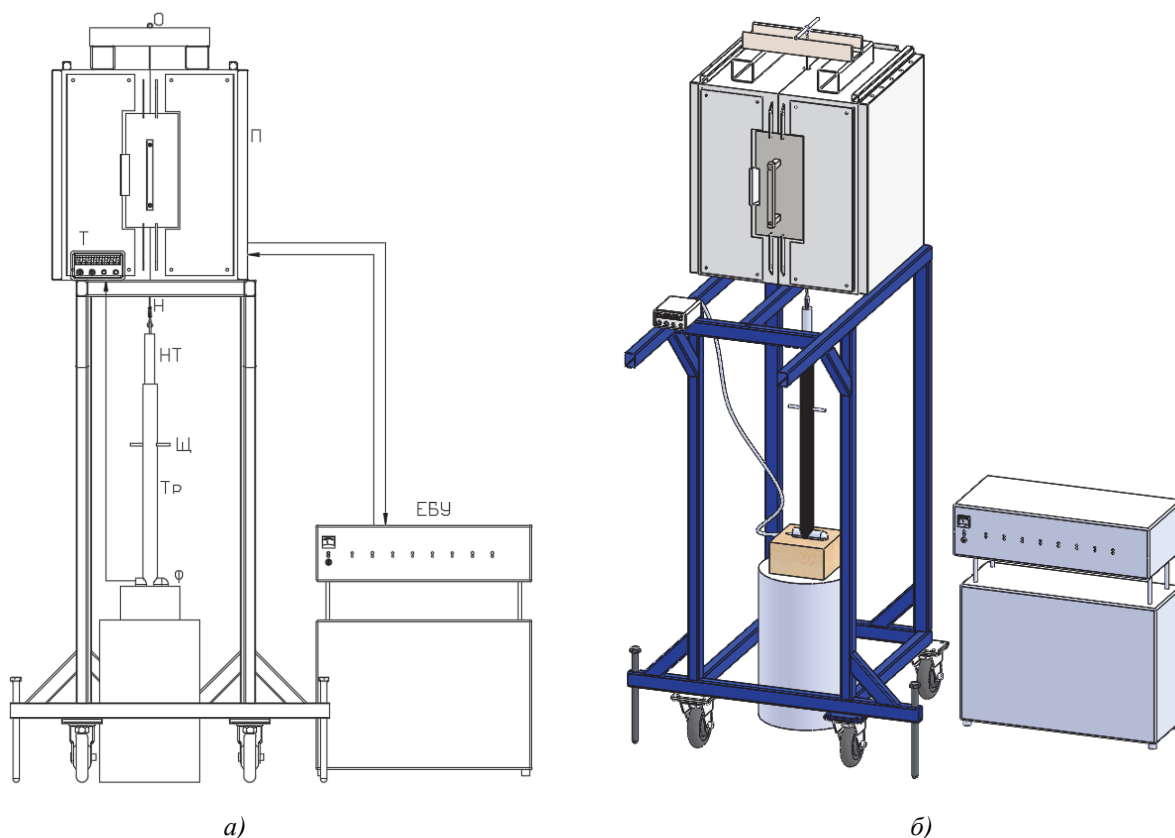
## **2. Проектиране и реализиране на стенд за изпитване на нишки в условията на продължително въздействие на високи температури и постоянно натоварване**

### **2.1. Проектиране на стенда**

На фигура 69 е показан проектираният стенд за изпитване на нишки при високи температури и постоянно натоварване. Схема с означени характерни елементи е показана на фигура 69 (а), а общият вид на стенда е показан на фигура 69 (б).

Основни елементи на стенда:

- Нагревателен модул (пещ) *П*. Наличен е в катедра „Механика” при ТУ-София. Пещта има максимална работна температура  $1100^{\circ}\text{C}$ . По стените ѝ са разположени общо 16 електрически нагреватели, групирани по височината на пещта в две секции, всяка с активна мощност от 1500 W. Всяка секция се управлява независимо от програмируем терморегулатор, който получава информация за температурата в работното пространство на съответната секция от термодвойка тип “К”. Температура на изпитването се задава от електронния блок за управлението на пещта *ЕБУ*. На горната и долната стена на пещта има по един цилиндричен отвор, през който преминава изпитваната нишка *Н*. Нагревателният модул отговаря на изискванията на стандарт БДС EN ISO 6892-2 [76]. Пещта е поставена върху налична в катедрата стойка на колела;
- Натоварваща тежест *НТ*, с която се натоварва нишката;
- Система за отчитане на времето до скъсване на нишката. Състои се от таймер *Т*, тръба *Тр* и фотоклетка *Ф*. Вътрешният диаметър на тръбата е по-голям от диаметъра на натоварващата тежест. Таймерът е разработен с помощта на електронен модул Arduino. На фигура 70 е показана електрическа схема на таймера.



**Фигура 69.** Стенд за изпитване на нишки при високи температури и постоянно натоварване: а) схема; б) общ вид.

## 2.2. Реализиране на стенда

На фигура 71 е показана снимка на реализирания стенд за изпитване на нишки в условията на продължително въздействие на високи температури и постоянно натоварване.



*Фигура 71. Снимка на реализирания стенд.*

### **2.3. Последователност за изпитване на нишка при висока температура и постоянно натоварване**

2.3.1. Натоварващата тежест се монтира в тръбата с помощта на щифт *Щ*.

2.3.2. Монтира се нишката – горният край на нишката се закрепва към ос *О*, лежаща върху стойка извън нагревателния модул, а долният край на нишката се закрепва към натоварващата тежест. Нишката не е натоварена.

2.3.3. Задава се температурата на изпитване, включва се пещта, изчаква се достигането на желаната температура и тази температура се задържа не по-малко от 1 час.

2.3.4. Натоварва се нишката – оста върху която е закрепен горният край на нишката, се повдига внимателно до натоварване на нишката, изважда се щифта и се спуска обратно оста.

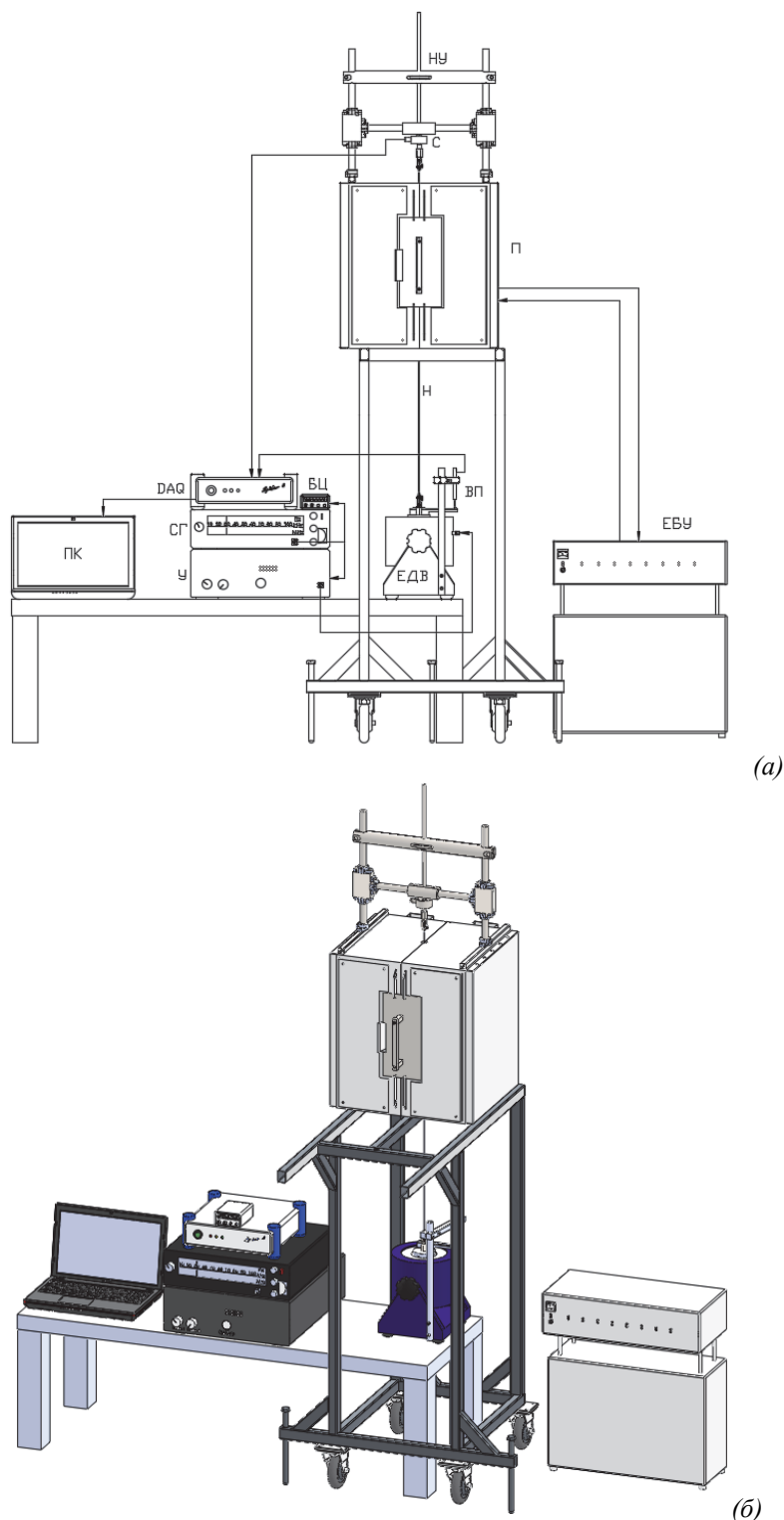
2.3.5. Натиска се бутонът “Start” на таймера и на дисплея му се изпива час и дата на започване на експеримента и започва отчитане на времето от началото на експеримента.

2.3.6. При скъсване на нишката, тежестта пада в тръбата, фотоклетката подава сигнал към микроконтролера на таймера и той изписва изминалото време от началото на експеримента.

## **3. Проектиране и реализиране на стенд за изпитване на нишки в условията на високи температури и циклично натоварване**

### **3.1. Проектиране на стенда**

На фигура 72 е показан проектираният стенд за изпитване на нишки при високи температури и циклично натоварване. Схема с означени характерни елементи е показана на фигура 72 (а), а общият вид на стенда е показан на фигура 72 (б).



**Фигура 72.** Стенд за механично изпитване на нишки при високи температури и циклично натоварване: а) схема; б) общ вид.

Основни елементи на стенда:

- *П* – нагревателен модул (пещ), описан по-горе (глава 3, точка 2.1);
- *ЕБУ* – електронен блок за управление на пещта;
- *ЕДВ* – електродинамичен вибратор. Осигурява непрекъсната, циклична промяна на силата на опън, по синусоиден закон. Вибраторът има максимална вибро маса 1,5 kg, импеданс  $2\Omega$ , честотен диапазон 0.5 –

5000 Hz, максимална мощност 300W, максимално реализуемо вибро преместване  $\pm 3\text{mm}$ ;

- *HU* – статично натоварващо устройство. Служи за задаване на средната сила на цикъла;
- *C* – силомер, описан по-горе (глава 3, точка 1.2.1);
- *ВП* – възприемател за преместване. Служи за измерване на удължението на изпитваната нишка *H*. Възприемателят е индуктивен с обхват  $\pm 1,5\text{mm}$ ;
- *H* – изпитвана нишка. Стендът позволява да се изпитват нишки от различни материали, с диаметър до 1,8 mm;
- *У* – усилвател. Усилва сигнала, генериран от сигнал-генератора към *ЕДВ*;
- *СГ* – сигнал-генератор. Генерира електрически сигнал с управляема честота и амплитуда, необходим за управление на *ЕДВ*. Сигнал-генераторът има честотен диапазон 20 Hz – 1 MHz и амплитуда на изходящия сигнал 0 – 10 Vpp;
- *БЦ* – брояч. Регистрира броя на отработените цикли;
- *DAQ* – тензометричен усилвател, модел HBM Spider 8. Подава възбуждащо напрежение на силомера *C* и възприемателя за преместване *ВП*; получава, обработва и преобразува аналоговите сигнали от *C* и *ВП*; подава в цифров вид измерените стойности на силата и удължението към персонален компютър *ПК*.

### 3.2. Реализиране на стенда

На фигура 73 е показана снимка на реализирания стенд за изпитване на нишки в условията на високи температури и циклично натоварване.



Фигура 73. Снимка на реализирания стенд.

### 3.3. Последователност за изпитване на нишка при висока температура и циклично натоварване

3.3.1. Нишката *H* се закрепва чрез специални захвати към силомера *C* и електродинамичния вибратор *ЕДВ*.

3.3.2. Задава се температурата на изпитване, включва се пещта, изчаква се достигането на желаната температура и зададената температура се задържа не по-малко от 1 час.

3.3.3. Чрез статичното натоварващо устройство *HУ*, нишката *H* се натоварва на опън, докато се достигне до желаната средна стойност на цикличното натоварване. Силата в нишката и нейното удължение се измерват със силомера *C* и индуктивния възприемател за преместване *ВП*, с помощта на тензометричния усилвател *DAQ* и персоналния компютър *ПК*.

3.3.4. Включва се сигнал генераторът *СГ*, който генерира синусоидален сигнал със зададена амплитуда и честота. Този сигнал се предава на усилвателя *У*. Усиленият сигнал се подава на електродинамичния вибратор *ЕДВ*, който реализира променливо натоварване на нишката по синусоидален закон. Настройва се честотата и амплитудата на *СГ*, така че да се постигнат желаните параметри на цикъла на натоварване на нишката. Броячът на цикли *БЦ* регистрира броя на отработените цикли.

3.3.5. С помощта на специализиран софтуер, инсталиран на персоналния компютър *ПС* се следи натоварването и удължението на нишката във времето.

Забележка: При стъпаловидно натоварване стъпки 3.3.3, 3.3.4 и 3.3.5 се изпълняват за всяко стъпало.

## ГЛАВА 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И РЕЗУЛТАТИ

Поставя се задачата да се изследва поведението на нишка от Inconel 600 в условията на високи температури. Нишката е студено изтеглена с диаметър 0,25 mm. Химичният ѝ състав е даден в таблица 12.

**Таблица 12.** Химичен състав на изследваната нишка (в %).

| <i>Ni</i> | <i>Cr</i> | <i>Fe</i> | <i>Si</i> | <i>Co</i> | <i>Mn</i> | <i>Cu</i> | <i>C</i> | <i>S</i> |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| ≥ 72.0    | 15.5      | 8         | 0.5       | < 1       | < 1       | < 0.5     | < 0.15   | < 0.015  |

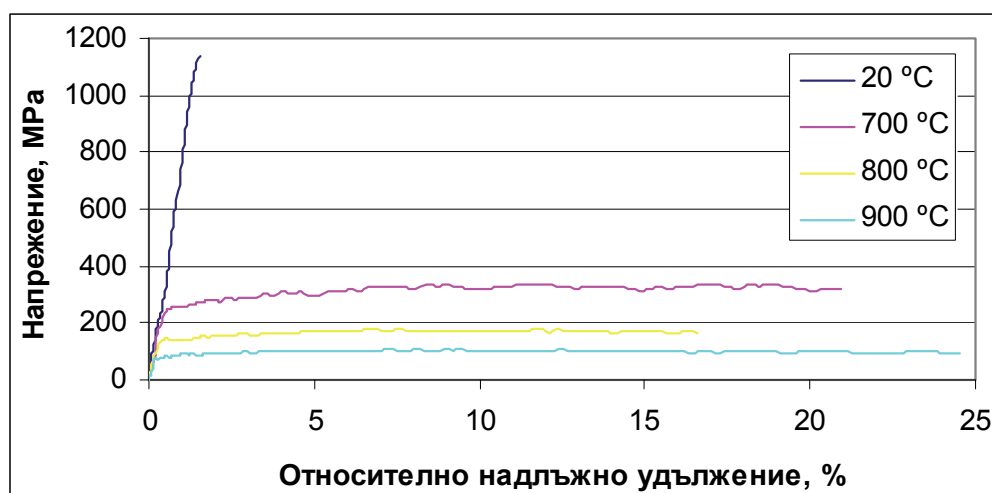
### 1. Изпитвания на опън

Поставя се задачата да се определят границата на провлачане, якостта на опън и относителното удължение на нишка от Inconel 600 при температури 700 °C, 800 °C и 900 °C.

Изпитванията са проведени с помощта на доокомплектования стенд за изпитване на нишки в условията на високи температури и статично натоварване, съгласно разработената последователност, описани в точка 1 на глава 3.

Изпитани са 12 нишки (3 при стайна температура, 3 при 700 °C, 3 при 800 °C и 3 при 900 °C), съгласно метод за изпитване на опън, описан в точка 1 на

глава 2. На фигура 74 са дадени получените криви на деформиране, а в таблица 13 са дадени стойностите на определените механични характеристики.



**Фигура 74.** Криви на деформиране.

**Таблица 13.** Механични характеристики.

| $T, ^\circ\text{C}$ | Нишка № | $R_m, \text{MPa}$ | $R_{p0.2}, \text{MPa}$ | $A_{100\text{mm}}, \%$ |
|---------------------|---------|-------------------|------------------------|------------------------|
| 20 °C               | 1       | 1136              | -                      | 2,2                    |
|                     | 2       | 1118              | -                      | 1,8                    |
|                     | 3       | 1124              | -                      | 2,4                    |
|                     | Средно  | <b>1126</b>       | -                      | <b>2,1</b>             |
| 700 °C              | 1       | 338               | 260                    | 20,4                   |
|                     | 2       | 318               | 256                    | 23,1                   |
|                     | 3       | 324               | 249                    | 21,9                   |
|                     | Средно  | <b>327</b>        | <b>255</b>             | <b>21,8</b>            |
| 800 °C              | 1       | 180               | 142                    | 16,1                   |
|                     | 2       | 190               | 150                    | 14,2                   |
|                     | 3       | 184               | 138                    | 15,5                   |
|                     | Средно  | <b>185</b>        | <b>143</b>             | <b>15,3</b>            |
| 900 °C              | 1       | 102               | 80                     | 27,2                   |
|                     | 2       | 108               | 78                     | 24,3                   |
|                     | 3       | 104               | 74                     | 25,1                   |
|                     | Средно  | <b>105</b>        | <b>77</b>              | <b>25,5</b>            |

При стайна температура нишката от Inconel 600 има поведение на крехък материал, докато при високи температури тя има поведението на жилаво-пластичен материал.

Очаквано якостните характеристики намаляват с повишаване на температурата. Интересно е, че при 800 °C надлъжното удължение е по-малко спрямо това при 700 °C, докато при 900 °C то е най-голямо. Това най-вероятно се дължи на структурни изменения в материала. Такова спадане и след това отново нарастване на надлъжното удължение с повишаване на температурата на студено изтеглен прът от Inconel 600 е получено в [3].

## 2. Изпитвания в условията на пълзене

Поставя се задачата да се определи параметърът на Manson-Haferd  $P_{MH}$  на нишка от Inconel 600.

Изпитванията са проведени с помощта на реализирания стенд за изпитване на нишки в условията на продължително въздействие на високи температури и постоянно натоварване, съгласно разработената последователност, описани в точка 2 на глава 3.

Изпитани са 18 нишки. В таблица 14 е показано при каква температура и натоварване е изпитано всяко пробно тяло. Изпитванията са проведени при шест различни режима, които се получават като комбинации от две температури ( $T_1 = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_2 = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и три натоварвания (0,2 kg, 0,235 kg, 0,27 kg). При всеки режим са изпитани по три пробни тела. В таблица 14 са дадени и измерените времена до разрушаване  $t_R$  на всяко от пробните тела.

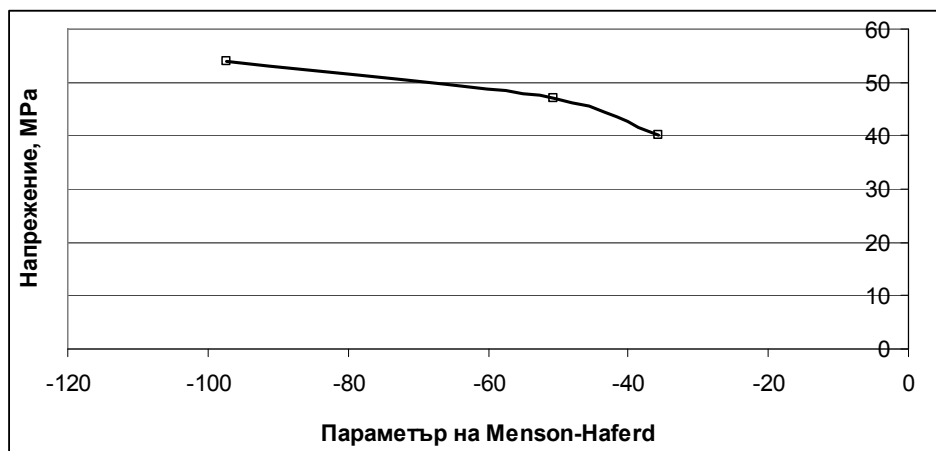
**Таблица 14.** Условия на изпитване и време до разрушаване.

| $T, ^{\circ}\text{C}$ | Натоварване, kg | Пробно тяло № | $t_R, \text{h}$ |
|-----------------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 900                   | 0,2             | 1             | 1,38            |
|                       |                 | 2             | 1,52            |
|                       |                 | 3             | 1,6             |
|                       | 0,235           | 4             | 0,9             |
|                       |                 | 5             | 0,97            |
|                       |                 | 6             | 0,95            |
|                       | 0,27            | 7             | 0,55            |
|                       |                 | 8             | 0,55            |
|                       |                 | 9             | 0,52            |
| 800                   | 0,2             | 10            | 1011,23         |
|                       |                 | 11            | 945,62          |
|                       |                 | 12            | 1074,23         |
|                       | 0,235           | 13            | 87,98           |
|                       |                 | 14            | 87,62           |
|                       |                 | 15            | 82,28           |
|                       | 0,27            | 16            | 6,25            |
|                       |                 | 17            | 5,38            |
|                       |                 | 18            | 6,34            |

Резултати са обработени съгласно разработената методика за определяне на параметъра на Manson-Haferd, описана в точка 6 на глава 2. За улеснение на работата е използвана разработената програма за определяне на параметъра на Manson-Haferd, описана в точка 7 на глава 2.

Разсейването на опитните резултати е слабо. Максималната грешка е в рамките на -2%. Тази точност е напълно достатъчна и дава основание да се заключи, че параметърът на Manson-Haferd е подходящ за определяне на границата на продължителна якост на нишка от Inconel 600.

На фигура 75 е дадена графиката на изменение на параметъра  $P_{MH}$  в зависимост от границата на продължителната якост на нишка от Inconel 600, установена опитно при високи температури. Тази графика може да се използва за прогнозиране на  $t_R$  при по-ниски температури.



**Фигура 75.** Графика  $P_{MH}$  ( $\sigma$ ) за нишка от Inconel 600.

### 3. Изпитвания в условията на умора

Поставя се задачата да се прогнозира кривата на умора на нишка от Inconel 600 при температура 700 °C.

Изпитванията са проведени с помощта на реализирания стенд за изпитване на нишки в условията на високи температури и циклично натоварване, съгласно разработената последователност, описани в точка 3 на глава 3.

Изпитванията на умора са проведени при синусоиден цикъл на натоварване, с честота на натоварването  $f = 30$  Hz и коефициент на асиметрия  $R = 0.5$ .

Нишките се натоварват стъпално до тяхното разрушаване. В таблица 16 са дадени параметрите за всяко стъпало от натоварването.

**Таблица 16.** Параметри на стъпалното натоварване.

| Стъпало<br>№ | Минимална стойност<br>на натоварването<br>$F_{\min}$ , kgf | Максимална стойност<br>на натоварването<br>$F_{\max}$ , kgf | Амплитуда<br>на натоварването<br>$F_a$ , kgf |
|--------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1            | 0.2                                                        | 0.4                                                         | 0.10                                         |
| 2            | 0.3                                                        | 0.6                                                         | 0.15                                         |
| 3            | 0.4                                                        | 0.8                                                         | 0.20                                         |
| 4            | 0.5                                                        | 1.0                                                         | 0.25                                         |
| 5            | 0.6                                                        | 1.2                                                         | 0.30                                         |
| 6            | 0.7                                                        | 1.4                                                         | 0.35                                         |

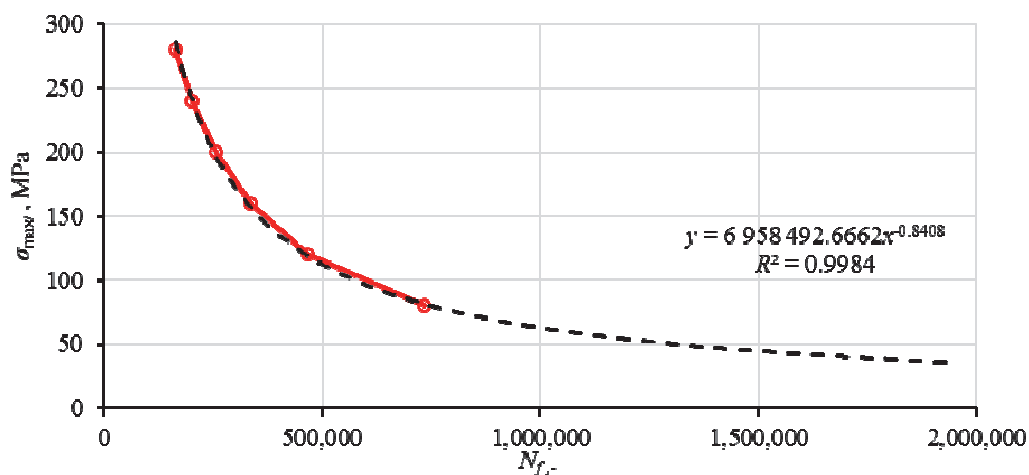
Изпитани са 4 нишки. Получените резултати са обработени съгласно разработената методиката за прогнозиране на броя цикли до разрушаване, описана в точка 10 на глава 2.

В таблица 21 са дадени осреднените резултати за прогнозния брой цикли до разрушаване за всяко стъпало.

**Таблица 21.** Осреднени резултати.

| Стъпало<br>№ | $\sigma_{max}$<br>МПа | $N_{fi}$ |
|--------------|-----------------------|----------|
| 1            | 79.9                  | 734951   |
| 2            | 119.9                 | 467433   |
| 3            | 159.9                 | 335896   |
| 4            | 199.8                 | 256930   |
| 5            | 239.8                 | 203085   |
| 6            | 279.8                 | 164792   |

На фигура 76 е показана прогнозираната крива на умора на нишка от Inconel 600 при температура 700 °C и коефициент на асиметрия 0.5. Тя представлява степенна функция, която за интервала 164000÷735000 броя цикли на практика съвпада с експерименталните резултати. Получените резултати могат да бъдат използвани за прогнозиране на ресурса на нишката при продължително въздействие на високи температури и циклично натоварване, с отчитане на явлението пълзене на материала.

**Фигура 76.** Прогнозна крива на умора на нишка от Inconel 600 при 700 °C и  $R = 0.5$ .

#### 4. Прогнозиране на ресурса на нишка от Inconel 600 при продължително въздействие на високи температури и циклично натоварване

Поставя се задачата да се направи оценка на ресурса на нишка от Inconel 600, ако е дадено:

- температура –  $T = 700$  °C;
- синусоиден закон на натоварване –  $\sigma_{max} = 55$  МПа,  $\sigma_{min} = 27.5$  МПа,  $\sigma_m = 41.25$  МПа,  $R = 0.5$  и  $T = 15$  min;
- време на експлоатация –  $t = 100000$  h (400000 цикъла).

При решаването на задачата е използвана разработената методиката за оценка на ресурса, описана в точка 11 на глава 2:

- 1) От фигура 75 за  $\sigma_m = 41.25$  МПа се отчита, че  $P_{MH} = -38.1$ . Тогава:  
 $P_{MH}(\lg t_R - \lg t_a) = T - T_a \Rightarrow -38.1(\lg t_R + 0.521) = 700 - 924.994 \Rightarrow t_R = 242298$  h.
- 2) От фигура 76 за  $\sigma_{max} = 55$  МПа се отчита, че  $N_f = 1170070$  цикъла.

3) Сумарни повреди в нишката:

$$D = D_c + D_f = \frac{N}{N_f} + \frac{t}{t_R} = \frac{400000}{1170070} + \frac{100000}{242298} = 0,34 + 0,41 = 0,75.$$

Последното изчисление показва, че нишката ще има остатъчен ресурс 25%.

## ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Настоящият дисертационен труд е посветен на изследване на механичните характеристики на нишка от Inconel 600 в условията на високи температури. Резултатите, получени в него имат научно-приложен характер и могат да бъдат обобщени както следва:

1. Разработена е обобщена методика за определяне и оценка на механични характеристики на нишки в условията на високи температури;
2. Доокомплектован е стенд за изпитване на нишки в условията на високи температури и статично натоварване. Разработена е последователност за изпитване на опън с доокомплектования стенд;
3. Проектиран и реализиран е стенд за изпитване на нишки в условията на продължително въздействие на високи температури и постоянно натоварване. Разработена е последователност за изпитване в условията на пълзене с реализирания стенд;
4. Проектиран и реализиран е стенд за изпитване на нишки в условията на високи температури и циклично натоварване. Разработена е последователност за изпитване в условията на умора с реализирания стенд.
5. Определени са механични характеристики на нишка от Inconel 600 в условията на високи температури;
6. Прогнозиран е ресурсът на нишка от Inconel 600 при продължително въздействие на високи температури и циклично натоварване.

## СПИСЪК НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. В. Цонев, Б. Борисов, И. Мухтаров, **Н. Кузманов**, *Изпитвателна машина за експериментални изследвания в условията на високи температури*, "БулТранс-2017", Созопол, България, 11-13 септември 2017, Сборник с доклади, стр. 64-68.
2. **N. Kuzmanov**, B. Borisov, I. Muhtarov, *Tensile testing of Inconel 600 wire at high temperatures*, "TechSys 2020", Plovdiv, Bulgaria, 14-16 May 2020, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Volume 878, article 012057, Indexed in Scopus.
3. V. Tsonev, **N. Kuzmanov**, *Design, Machining and Calibration of a Strain Gauge Loadcell*, "TechSys 2021", Plovdiv, Bulgaria, 27-29 May 2021, AIP Conference Proceedings, Indexed in Scopus, in print.
4. **N. Kuzmanov**, V. Tsonev, N. Nikolov, *Predictive Fatigue Curve of Inconel 600 Wire at 700 °C*, "BulTrans-2021", Sozopol, Bulgaria, 10-13 September 2021, AIP Conference Proceedings, Indexed in Scopus, in print.

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF INCONEL 600 WIRE AT HIGH TEMPERATURE

**Nikola Ivanov Kuzmanov**

Technical University of Sofia, Faculty of Transport, Department of Mechanics

The family of austenitic alloys based on nickel and chromium, called Inconel, retains its strength over a wide temperature range, making it an attractive material for high temperature applications. Inconel wires are used in key assemblies in the aviation, automotive, railway and other industries.

The goal of the dissertation is to study the influence of temperature on the mechanical properties of Inconel 600 wire.

In Chapter 1 „Literature review”, an analysis of the research in the field of high temperatures is done. The equipment for performing tests in the conditions of high temperatures is considered. Objectives and tasks are formulated.

Chapter 2 „Generalized methodology for determining and evaluating the mechanical properties of wires at high temperatures” summarizes the information from various standards related to the testing of materials. Methods for determining the creep limit and the Larson-Miller parameter are given. A methodology and a program for determining the Manson-Haferd parameter are developed. Methods for predicting the behaviour of materials at high temperatures are given.

Chapter 3 „Design and implementation of machines for wire testing at high-temperatures” describes the steps for designing additional equipment for a machine for static load tests at high-temperatures, as well as the process of design and implementation of 2 machines for testing wires at high temperatures and constant loading and at high temperatures and cyclic loading. Procedures for working with the machines are developed.

Chapter 4 „Experimental Research and Results” presents a summary of a large volume of experimental work related to the testing of 34 test specimens (Inconel 600 wires). These tests were performed with the implemented machines and had different duration, up to 1000 hours per test specimen. Based on the obtained results, the remaining life of a wire from Inconel 600 is predicted under prolonged exposure to high temperatures and cyclic loading.

The dissertation ends with a brief description of the main results, a list of references and a list of related scientific publications. On the topic of the dissertation the doctoral student is a co-author in four scientific publications.