

DETERMINAREA EFORTURILOR DIN ELEMENTUL DE ÎNVELIȘ DE BORDAJ PENTRU O NAVĂ CONSTRUITA DIN MATERIALE COMPOZITE

**Conf.univ.dr.ing. MOROIANU
CORNELIU-** Academia Navala

“Mircea cel Batran” Constanta

Conf.univ.dr.ing. ILIE PATRICHI-
Academia Navala “Mircea cel Batran”
Constanta

THE FATIGUE TESTING EQUIPMENT AND THE METHOD USED FOR A SHELL PLATING ELEMENT

**Conf.univ.dr.ing. MOROIANU
CORNELIU-** Academia Navala

“Mircea cel Batran” Constanta

**Conf.univ.dr.ing. ILIE
PATRICHI-** Academia Navala
“Mircea cel Batran” Constanta

Rezumat: În lucrare sunt prezentate metoda și rezultatele cercetărilor efectuate pentru elementul de înveliș de bordaj al unei nave fabricată din material compozit armat cu fibră de sticlă. Stendul de testare la oboseală este prezentat atât din punct de vedere al construcției cât și din punct de vedere al metodelor de determinare al eforturilor din placă. Astfel este prezentată tehnologia de testare, prin indicarea numărului și felului plăcilor utilizate, a tipurilor de teste utilizate pentru determinarea rezistenței la oboseală, precum și modul de trasare al curbelor rezultante.

Key words: composite materials, material fatigue, fatigue testing machine, fatigue life/endurance curves.

Abstract: The researches performed and the lack of the design data for the hulls made of glass fibre reinforced plastics are presented in the first part of this paper. The fatigue testing equipment both from the point of view of construction and practicability is presented in the second part of this paper. The experimental technology by indicating the plate number, the testing types and the plotting way of the fatigue endurance curves are presented in the third part of the paper.

Key words: composite materials, material fatigue, fatigue testing machine, fatigue life/endurance curves.

1. Introducere

Folosirea materialelor plastice armate cu fibră de sticlă (GFRP) pentru construirea ambarcațiunilor rapide a redus atât grosimea învelișului de bordaj cât și greutatea structurală a acestor ambarcațiunilor. Presupunând că puterea de propulsie este constantă, atunci când greutatea ambarcațiunii scade, viteza crește producând o creștere a presiunii loviturii de val ce acționează asupra acestei ambarcațiuni. Din cauza lipsei de informații publicate privind proprietățile mecanice, precum și aprecieri asupra rezistenței la oboseală și încovoiere ale plăcilor laminate GFRP, este necesar un program de testare mecanică pentru determinarea rezistenței acestora. Condițiile utilizate pentru testarea la oboseală și

1. Introduction

As it results from the paper “The strength structure and the stresses of the shell plating made of glass fibre reinforced plastics”, it is necessary to test the GFRP laminated plates forming the shell plating element placed between the structural members. The use of glass fibre reinforced plastics (GFRP) for building the high-speed crafts has reduced both the shell plating thickness and the structural weight of these crafts. Supposing that the installed power is constant when the structural weight of the craft decreases, the speed increases inducing an increase of the slamming pressure acting on this craft. Because of the lack of published data regarding the bending fatigue properties of GFRP laminated plates, it is necessary a

încovoiere a plăcilor laminate trebuie să fie asemănătoare cu condițiile de funcționare reale ale ambarcațiunii. În acest sens, plăcile laminate trebuie testate atât în condiții uscate cât și în condiții umede. Datorită acestui fapt vom ține seama de: - numărul de cicluri ce produc ruperea la un anumit nivel de efort; - efortul la rupere după un anumit număr de cicluri.

Probele au fost testate la încovoiere pe baza teoriei la solicitare mare (teoria membranei) prin următoarele metode:

- metoda celor trei puncte (două legături la capete și o sarcină la mijloc);
- cu o sarcină distribuită în zece puncte (două legături și opt puncte prin care a fost distribuită sarcina calculată la 10% din sarcina totală.)

Metoda folosită a impus compararea rezistenței la oboseală a plăcii laminate, cu efectul la oboseală asupra rezistenței finale a elementelor, eliminând astfel determinarea dificilă a ruperii la oboseală prin observarea vizibilă a fisurilor. Comparând rezultatele celor două metode de testare, rezultă o mare diferență lucru care confirmă îndoielile lui Rymile și Cerise [1] privind validitatea metodei celor trei puncte pentru determinarea proprietăților materialelor compozite folosite la construcția corpurilor de navă prin teoria membranei. Pentru testare, stratul exterior a plăcii laminate au fost construit după două tipuri de metode de impregnare pentru:

1. - placa tradițională la care stratul exterior a fost impregnat cu rășină polistirenică;
2. - placă îmbunătățită la care stratul exterior a fost impregnat cu un amestec de izopolistiren și rășină acrilică.

S-a observat că:

- grosimea plăcii laminate are un rol important asupra rigidității limitând deformările;
- tipul de sarcină aplicat asupra probei de testare precum și valoarea (mărimea) ei trebuie să fie conforme cu tipului de sarcină aplicată asupra învelișului de bordaj (distribuită uniform sau după o anumită lege);
- fixarea probei de testare la capete

mechanical testing program for determining the bending fatigue strength of the laminated plates used for craft building and made of Romanian materials. The conditions used for bending fatigue test of the laminated plates must be like the actual operating conditions of the craft. In this sense, the laminated plates must be tested both in dry and in wet conditions. In this case we shall take into account:

- the number of cycles inducing the breaking at a given stress level;
- the breaking stress after a given cycle number.

The samples were tested at bending based on the high strain theory (the membrane theory) by two methods:

- the three point method (two end links and a middle load);
- with a load distributed on 10 points (two links and 8 points through which the calculated load at 10% of total load was transmitted).

The method used was to compare the fatigue life/endurance of the laminated plate with the fatigue effect on the final strength of the elements eliminating the difficult determination of fatigue failure by visual observation of cracks. Comparing the results of the two testing methods, it results a big difference confirming the doubts of Rymill and Course [1] concerning the validity of the three point method for determining the bending properties of composites used for the hull building by the membrane theory.

For testing, two impregnating types for the outside layer of the laminated plate were used:

1. the traditional plate in which the outside layer/coat was impregnated with polystyrene resin;
2. an improved plate in which the outside layer/coat was impregnated with a mixture of isopolystyrene and flexible urea-acrylic resin.

It was noted that:

- the laminated plate thickness has an important role on the stiffness limiting the strains;

trebuie să fie conform fixării învelișului de bordaj pe structura de rezistență. S-a observat că tensiunea (efortul) la fixarea rigidă este de două ori mai mare decât în centrul probei și de aceea, fisurile apar în zona de fixare a probei pe mașina de testare.

- the load type applied on the test sample and its value should be according to the load type applied on the shell plating (uniformly distributed or according to a certain law);
 - fixing the test sample at ends should be according to the shell plating fixing on the strength structure; it was noted that the stress in the rigid fixing is two times (double) higher than in the centre of the sample, and therefore, the cracks appear in front of the sample fixing on the testing machine.

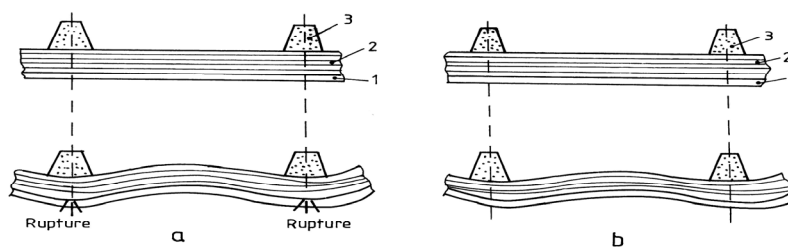


Figura 1. Deformarea plăcii de bordaj:

- a) un element tradițional al învelișului de bordaj format din: 1- un strat de mătuială impermeabil; 2- straturi de mătuială și fibre răsucite rezistente; 3- elemente de rigidizare;
 b) un element îmbunătățit al învelișului de bordaj format din: 1- un minim de straturi de mătuială cu grosime mică impregnate cu o rășină elastică (înveliș gelatinos) formând o barieră impermeabilă; 2- straturi de rezistență kevlar și din fibra de sticlă; 3- structura de rezistență.

Figure 1. The strain of a shell plating element.

- a) a traditional shell plating element formed by: 1- a waterproof mat
 b) layer; 2- strength mat and plied layers;
 c) 3- stiffening elements.
 b) an improved shell plating element formed by: 1- a minimum of mat layers with small thickness impregnated with an elastic resin (gel coat) forming the waterproof barrier; 2- glass fibre and Kevlar strength layers; 3- strength structure.

2. Metoda folosită și descrierea echipamentului de testare la oboseală

Procedul de calcul al rezistenței la oboseală propus prezintă moduri diferite de rezolvare a problemei:

- a) - pornind de la eforturile/solicitările nominale și folosind factorii de concentrație oboseală-efort;
 b) - pornind de la deformările specifice locale;
 c) - aplicând procesele mecanicii la rupere.

Alegerea metodei corecte depinde de informațiile pe care le deține proiectantul, de

2. The principle of the used method and description of the fatigue testing machine

The fatigue calculation procedure proposed presents different ways of solving the problem:

- (a) starting from the rated stresses and using the fatigue-stress concentration factors;
 (b) starting from the local specific strains;
 (c) applying the breaking mechanics processes.

The choice of the proper method depends on the information available to the designer, on the stage of the studied element (project, prototype, in operation), on the specific

etapa elementului studiat (proiect, prototip în funcțiune), de caracteristicile specifice elementului și în special, de consecințele fluajului (cedării lente) în timpul funcționării.

Echipamentele necesare conectate la aparatul de testare la oboseală sunt:

- un sistem de control al forței, săgeții de încovoiere (deflecție) sau deformărilor specifice;
- un contor de cicluri;
- un sistem de înregistrare cu două coordonate, opțional, pentru înregistrarea buclei de histerezis, dacă există;
- un sistem integrat de control al sarcinii dacă este necesar, asigurând o amplitudine constantă a deformării probei de testare.

Diagrama schematică a aparatului de testare este prezentată în figura 2 și este formată din:

A. Un excitator format dintr-un dispozitiv în care lichidul pulsează în rezonator.

B. Un rezonator format dintr-un dispozitiv de prindere al panoului (plăcii) și un sistem de măsurare a deflecției (săgeți de încovoiere) tensiunilor (eforturilor) etc.

Excitatorul este un compresor frigorific transformat într-o pompă de ulei prin eliminarea supapele de admisie și evacuare. Parcurgând cursa "S" pistonul generează un volum V , al uleiului evacuat și admis în rezonator, care produce o tensiunea variabilă în plăcă. Volumul de ulei circulat de pompă în rezonator va depinde de:

- raportul laturilor elementului de placă;
- deflecția plăcii variabilă cu tipurile de legături de pe linia de contur;
- grosimea plăcii.

Volumul maxim necesar de ulei, V , rezultat din calculul dimensiunilor laturilor plăcii și deflecția ei sunt prezentate în tabelul 1:

features of the element and particularly, on the consequences of creeping during operation. The necessary equipments connected to the fatigue testing machines are:

- a control system of force, deflection or specific strains;
- a cycle counter;
- a two-coordinate recording system, optional, for recording the hysteresis loop, if any;
- an integrated load control system, if required, providing a constant amplitude of the test sample strain.

The schematic diagram of the testing machine is shown in Figure 2 and it is composed of:

A. a driver (an exciting unit) formed by a device in which the fluid pulsates in resonator;

B. a resonator formed by a fastening device of panel and a measuring system of deflection, stresses, etc.

Driver (exciting unit). The driver is a refrigerating compressor changed into an oil pump, removing its suction and discharge valves. By travelling the piston stroke in "S" it is determined a volume, V , of oil discharged and sucked in resonator inducing the variable stress of plate. The oil volume circulated by the pump into the resonator depends on :

- the ratio of the plate element sides;
 - the deflection of variable plate with the binding types on the contour line;
- the plate's thickness

The necessary maximum oil volume, V , resulted from the calculation of the plate side dimensions and its deflection are given in table 1:

Tabelul 1
Table 1

Type of plate side links	V [dm ³] necessary for a 400x400 plate	V [dm ³] necessary for a 400x800 plate
Rigid fixing	1.6	3.2
Supporting, jointing	5.33	10.67

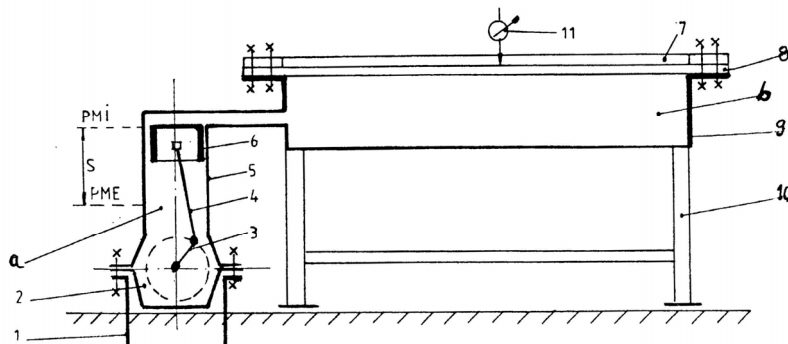


Figura 2. Schema mașinii de testare la oboseală.

a - excitator, b - rezonator;

1 - postament; 2 - carter; 3 - arbore cotit; 4 - bielă; 5 - cilindru; 6 - piston; 7 - ramă de fixare a plăcii studiate; 8 - placă testată; 9 - rezervor; 10 - suportul rezervorului; 11 - comparator de control a deflecției în diferite puncte pre-stabilite.

Figure 2. Schematic diagram of the fatigue testing machine.

a – driver; b – resonator;

1. - bed plate; 2. – crankcase; 3.- crankshaft; 4. - connecting rod; 5.- cylinder; 6. - piston; 7.- fixing frame of studied plate; 8.- tested plate; 9.- tank; 10.- tank holder; 11. - controlling comparator of deflection in different pre-established points.

Modificările făcute la aceste compresoare sunt:

- scoaterea supapelor de admisie și evacuare (dacă sunt în chiulasă) sau blocarea lor dacă sunt în corpul pistonului;
- mărirea secțiunilor de trecere a uleiului dintre excitator și rezonator;
- modificarea arborelui cotit astfel încât toți cilindrii compresorului să funcționeze în fază urmate de echilibrarea mecanismului bielă-manivelă cu contragreutăți pe brațele de manivelă ale arborelui cotit;
- modificarea brațului de manivelă al arborelui cotit (cursei pistonului) astfel încât cantitățile dorite de ulei să poată circula pentru o anumită tensiune a plăcii.

Arborele cotit al compresorului 3AV-20 este susținut de patru lagăre și poate funcționa independent cu fiecare piston, respectiv cilindru. Motorul de acționare al excitatorului compresorului este un motor asincron cu viteze de rotație de 500, 600, 750, 1000 rot/min.

Rezonatorul. Diagrama schematică de construcție a rezonatorului este prezentată în figura 3 și trebuie să permită fixarea elementului de placă testat la oboseală, cât se poate de aproape de condițiile de montare ale panoului pe învelișului de bordaj. Rezonatorul

The changes made to these compressors are:

- removing the suction and discharge valves if they are in the cylinder cover and their locking if they are in the piston barrel;
- increasing the oil passing sections between the driver and the resonator;
- changing of crankshaft so that all the compressor cylinders should phased run followed by the balancing of crank and connecting-rod assembly with counterweights on the crankshaft webs;
- changing of crankshaft web (of piston stroke) so that the desired oil quantities can circulate for a certain deflection (a certain stress) of the plate; there are necessary as many crankshafts as the oil volumes for the plate stress or a subassembly allowing the change of crankthrow.

We can note that the crankshaft of 3AV-20 compressor is supported on four base bearings and it can run independently with each cylinder suspending the other cylinders. The driving motor of compressor pump must be an asynchronous triangle-radial starting alternomotor. The synchronism speeds of electric motors are: 500,600.750,1000 rot/min.

Resonator. The schematic diagram of building and running the resonator (the

este format dintr-un rezervor de ulei (1) și o flanșe de oțel cu grosimea de 8 mm prinsă pe tanc prin console (suportți). În flanșe se taie un canal trapezoidal în care se așează o garnitură pentru reținerea uleiului. Proba de testare (6) este fixată cu o altă ramă metalică fixată cu șuruburi M12 x 80 la distanță dublă.

fatigue testing machine) is shown in Figure 3 and it must allow fixing the non-stiffened plate element which is fatigue tested as near as possible the binding way of shell plating panel. The resonator is formed by a tank (1) of metal sheet of 8mm thickness, fastened on the tank by brackets. In the flange it is cut a trapezoidal slot in which a frame is placed for fixing the oil sealing membrane to the test sample. The test sample (6) is fixed with a thick upper frame (3) by M 12 x 80 screws arranged in double spacing.

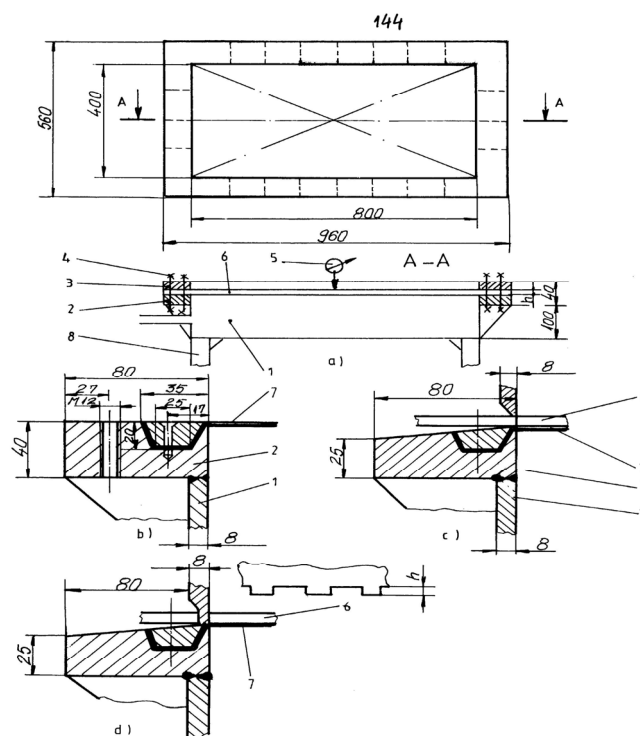


Figura 3. Dispozitivul de prindere al plăcii testate pe rezonator.

- a) vedere de sus în secțiune A-A;
- b) flanșa dispozitivului de fixare rigidă;
- c) flanșa dispozitivului de susținere;
- d) flanșa dispozitivului de îmbinare.

1- țevă; 2- manșon; 3- panou; 4- bolțuri; 5- comparator; 6- placă din material compozit pentru testare; 7- membrană; 8- bară de sprijin tubulară.

Figure 3. The fastening device of the plate (the resonator).

- a) top view and A-A section
- b) flange of the rigid fixing device
- c) flange of the supporting device
- d) flange of the jointing device

1- tub; 2- tub collar; 3- board rand ; 4- bolts; 5- comparator; 6- composite plate for probation; 7- membrane; 8- tub strut.

Forma suprafeței de contact dintre ramă The shape of the contact area between the (cadru) și proba de testare este executată astfel frame and the test sample is performed in

încât să se poate realiza tipul de legătură al laturilor (fixare rigidă, susținere, îmbinare) prin metodele indicate în figura 3 b,c,d. Proba de testare, (panoul de referință) trebuie să aibă formă de pătrat ($a/b = 1$) conform distanței prevăzute de societățile de clasificare în construcțiile navale (300, 400, 450 [mm]).

Datorită modului de montare/aranjare a laturilor probei de testare distanța poate fi modificată. Suprafața de măsurare pentru rezonator a fost stabilită la 400 x 800 [mm].

Sistemul de control al forței, (eforturilor) trebuie să fie adaptat la tipul de testare realizat. În cazul rezonatorului, presiunea distribuită uniform ce acționează asupra panoului trebuie să fie măsurabilă cu ajutorul unui manometru. Datorită impulsurilor de presiune, manometrul se va defecta repede. Din acest motiv, presiunea va fi măsurată la început pentru a determina sarcina și apoi este reținută cu ajutorul unui ventil (robinet).

Pentru a avea sub control tensiunile (eforturile) generate pe partea de întindere (latura de sus a panoului) se vor stabili semene tensometrice. Semnele tensometrice și contorul de cicluri vor fi conectate la un sistem de înregistrare pentru a se putea citi valorile lui $\sigma = f(N)$ sau $\sigma = f(N)$.

such a way that it can achieve the binding type of sides (rigid fixing, supporting, jointing) by the ways shown in Figure 3 b,c,d. The test sample (the reference panel), so the resonator tank area should be of square shape ($a/b = 1$) according to the distance provided by the classification societies (300, 400, 450 mm). Due to the arrangement way of the bottom longitudinals, of the side longitudinals and the craft's shapes, the distance can be changed. Therefore, the measurement area for the resonator was established to be of 400 x 800 mm.

The control system of force, deflection or stresses must be adopted to the testing type performed. In case of the resonator, the uniformly distributed pressure acting on the panel must be measured by a pressure gauge. Due to the pressure pulses, the pressure gauge will be quickly out of order. For this reason, the pressure will be measured in the beginning to determine the load and then it is sealed with a cock. To have under control the stresses generated on the tensile side (the upper side of panel), the tensometric marks will be set. The tensometric marks and the cycle counter will be connected to a recording system to read the values of $\sigma = f(N)$ or $\sigma = f(N)$.

3. Tehnologia de testare și prezentarea datelor

Vom nota pentru o determinare cu tensiune variabilă:

σ_i – este etapa de tensiune (efort);

n_i - numărul de cicluri în etapa de tensiune;

σ_i și N_i - numărul de cicluri la care placa laminată se rupe la efort σ_i , numit distrugere/ deteriorare.

Raportul $\frac{n_i}{N_i}$ indică în ce măsură efortul (tensiunea) aduce elemental la rupere, (când $n_i = N_i$ se produce ruperea la oboseală).

Metoda de cumulare liniară a deformațiilor este dată de relația (1) destinată inițial determinării timpului de efort la care este

3. The testing technology and data presentation

If we note for a variable non-steady stress:

σ_i - the stress stage

n_i - the number of cycles on the stress stage

σ_i and N_i - the number of cycles at which the laminated plate breaks at σ_i stress, named failure/damage.

The ratio n_i / N_i shows to what extent the stress σ_i brings near the fatigue breaking element; when $n_i = N_i$ the fatigue breaking is induced.

The linear cumulation procedure of failures is given by the relation (1) initially intended for determining the time till the cracks have

supusă placa până când apar fisurile la elementele de rigidizare din aluminiu. Apoi, metoda a fost dezvoltată pentru estimarea fluajului (cedării lente) prin răspândirea fisurii până la ruperea elementelor structurale:

appeared on the aluminium alloy elements (Palmgren and Miner). After that, the procedure was developed for estimating the creeping by spreading the crack up to breaking the structural elements:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = a \quad (1)$$

În majoritatea cazurilor, valoarea constantei a este 1. Porțiunea de jos a curbei lui Wohler are ecuația similară cu cea a hiperbolei astfel:

In most cases the value of constant is $a = 1$. The downward portion of Wohler's curve has an equation similar to that of a hyperbola:

$$\sigma_i^m N_i = \sigma_R^m N_B \quad (2)$$

unde:

σ, N - sunt coordonatele unui anumit punct;
 σ_R, N_B - coordonatele punctului în care curba devine orizontală (Fig. 4c).

where:

σ, N = the coordinates of a certain point;
 σ_R, N_B = the coordinates of point in which the curve becomes horizontal (Fig.4c).

Noțiunea de distrugere este asociată cu modificările fizice detectate direct sau cu ajutorul unor metode ce schimbă comportamentul elementului structural. În cazul elementelor de rezistență, deteriorarea sau distrugerea poate fi definită prin reducerea secțiunii sau prin apariția fisurării.

The notion of failure is associated with the physical changes directly detected by senses or by means of some methods altering the behaviour of the structural element. In case of strength elements, failure can be defined by reducing the section or by appearing the crack. If we take as a criterion the crack to define the failure, the detected crack can have a quantitative parameter, for instance: length, the ratio between the crack length and a critical length - which can be considered a measure of failure.

Dacă vom lua ca criteriu fisura pentru a defini deteriorarea, fisura detectată poate avea un parametru cantitativ, de exemplu lungimea, raportul dintre lungimea fisurii și o lungime critică - care poate fi considerată o măsură/valoare a deteriorării, iar în acest caz se admite că o tensiune (un efort) poate produce răspândirea fisurii dar nu va distruge elementul structural.

In this case, it is admitted that a stress which doesn't induce the crack spreading, it doesn't damage the structural element.

Diagramele de rezistență (anduranță) pot avea două forme de prezentare:

The endurance diagrams can have two forms:

- diagrame care prezintă limita inferioară a tensiunii (efortului) la care panoul nu s-a rupt numită limita inferioară la oboseală (σ_R), fig.4b;
- diagrame de reducere continuă, în acest caz, se acceptă o limită convențională la oboseală cu o valoare a gamei de efort conform unei anumite rezistențe (anduranțe) (de exemplu: 10^6 cicluri).

- diagrams which present the lower stress limit, for which the panel hasn't broken, also named the lower fatigue limit (σ_R), Figure 4b;
- continuous decreasing diagrams; in this case, it is accepted a conventional fatigue limit with a value of stress range according to a certain endurance (for instance: 10^6 cycles)

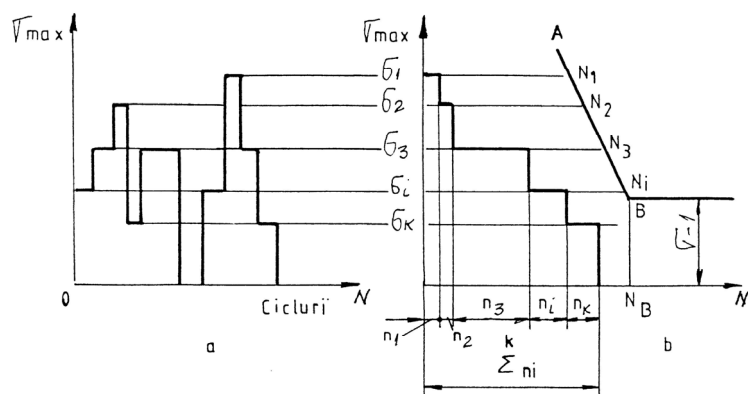


Figura 4. Diagrama (curba) de duranță pentru tensiuni variabile cu etapa de încărcare pentru o perioadă de timp.

a- tensiune variabilă pentru o perioadă de timp; b- spectrul gamei de tensiuni(diagramă combinată) c- curbe de duranță ($\sigma=f(N)$) sau curba Wohler; unde: N_B - este baza de încărcare; σ_r – rezistența la oboseală determinată.

Figure 4. The endurance diagram (curve) for non-steady stresses with loading stages for a period of time: a – non-steady stage stress for a period of time; b – stress range spectrum (combined diagram); c – endurance curve ($\sigma = f(N)$) or Wohler’s curve; N_B – loading base; σ_r – fatigue strength.

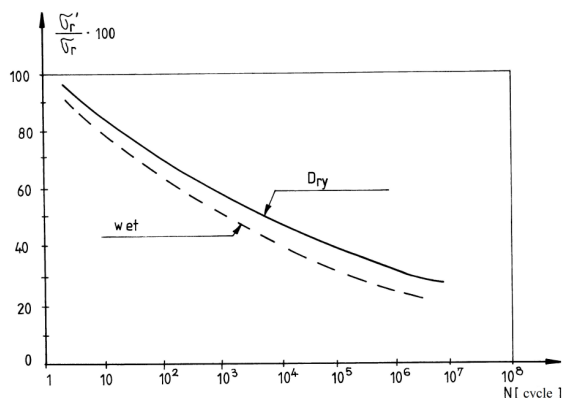


Figura 5. Aliura curbelor de determinare a rezistenței relative prin tensionarea plăcii laminate. _____ diagrama în condiție plăcii laminate uscate; ----- diagrama în condiție de umiditate.

Figure 5. Relative fatigue strength by tensioning the laminated plate. _____ diagram in dry condition; ----- diagram in wet condition.

BIBLIOGRAPHY

1. R.F.Pinzeili, J.C. Howson, R.J. Rymill, Fatigue performance marine laminates reinforced with Kevlar Aramid fibre. Composites, nr.3 May-June, 1992.

2. Gibbs & Cox, Marine Design Manual for fiberglass reinforced plastics. Mc Grow Hill Book Co.Inc., 1960.

3. Lloyd’s, Register of Shipping, 1996,

BIBLIOGRAPHY

1. R.F.Pinzeili, J.C. Howson, R.J. Rymill, Fatigue performance marine laminates reinforced with Kevlar Aramid fibre. Composites, nr.3 May-June 1992.

2. Gibbs & Cox, Marine Design Manual for fiberglass reinforced plastics. Mc Grow Hill Book Co.Inc.1960.

3. Lloyd’s Register of Shipping, 1996,

England, Rules and Regulations for the classification of yachts and small craft, 1998.

4. ISO 178 –(E), Determination of flexural properties of rigid plastics, 1975.

England, Rules and Regulations for the classification of yachts and small craft, 1998.

4. ISO 178 – 1975 (E), Determination of flexural properties of rigid plastics.