

NOUVEAU ALGORITHME POUR LA METHODE DE COMPTAGE DE CYCLES MODIFIEE POUR PRENDRE L'EFFET DE SEQUENCE EN CONSIDERATION

A. E. BOUGLOULA, K. REFASSI*

Un algoritm pentru a obține metoda de evaluare a ciclurilor rainflow (metoda picaturii) mai performanta luand în considerare efectul de secvența, într-o încărcare ciclica, a fost prezentata prin un alt autor. S-au efectuat modificari pentru a remedia câteva lipsuri. Astfel, acumularea deteriorarilor prin oboseala poate fi calculata mai corect dacă se folosesc și modele care iau în considerare efectul de secvență. O organigramă modificată care poate fi integrată într-un model de oboseală este prezentată aici.

Un algorithme pour rendre la méthode de comptage de cycles rainflow (comptage des étendues en cascade) plus performante en prenant l'effet de séquence, dans un chargement cyclique, en considération a été présenté un autre auteur. Des modifications pour remédier à quelques manques dans cet algorithme ont été effectuées. Par ceci, l'accumulation d'endommagement par fatigue peut être calculée plus correctement s'il y a utilisation des modèles qui considèrent l'effet de séquence. Un organigramme modifié, qui peut être intégré dans un modèle de fatigue est présenté ici.

Mots clés: Méthode de comptage rainflow, effet de séquences.

Introduction

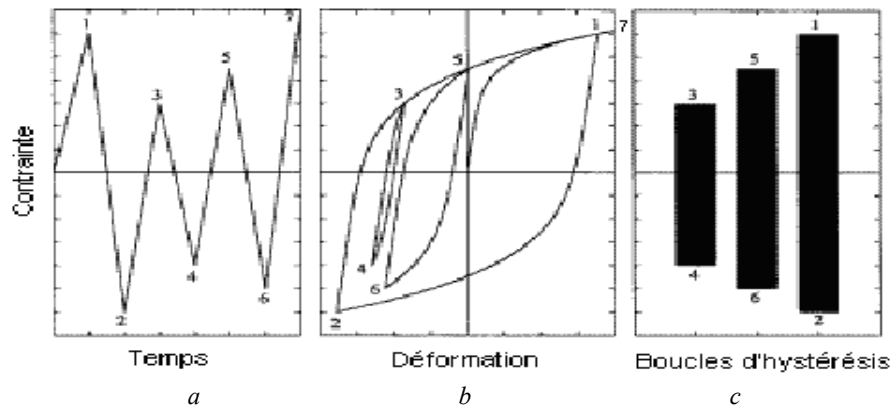
L'identification des évènements endommageant dans un chargement cyclique à amplitudes variables ce fait généralement par la méthode rainflow [1]. Les boucles d'hystérésis qui se forment lors du comptage sont traitées comme des cycles correspondant à un chargement cyclique avec amplitudes constantes. Généralement l'endommagement est quantifié en utilisant des courbes de fatigue pour des chargements cycliques à amplitudes constantes, ce qui fait perdre l'effet induit par l'ordre d'application de chaque cycle. Alors on constate que dans plusieurs cas l'effet de séquence n'est pas pris en considération ou même s'il est pris en considération, il sera pris incorrectement. Dans cet article, un nouveau algorithme est proposé pour remédier à quelques manques présentés par l'ancien algorithme [2] proposé par Anthes.

*Eng., Eng., Dept. of Materials Strength, University POLITEHNICA of Bucharest, Romania

1. La méthode de comptage de cycles rainflow

A présent plusieurs algorithmes ont été proposés pour mettre cette méthode en œuvre. Algorithme de Clormann et Seeger [2], algorithme de Downing et Socie [3] et algorithme de Glinka et Kam [4].

La méthode de comptage rainflow enregistre les boucles d'hystérésis fermées en fin de comptage. Tandis que la plus part des boucles se forment le long du temps du chargement, ce qui ne permet pas de prendre en considération l'effet de chaque boucle déjà fermée sur le reste dans le temps de chargement. L'exemple de la Fig. 1 montre trois schémas qui représentent: l'histoire de chargement contrainte en fonction du temps Fig. 1.a, la courbe contrainte en fonction de la déformation Fig. 1.b et une représentation des boucles d'hystérésis résultantes du comptage de cycles Fig. 1.c.



Si la séquence présentée ici est utilisée tel qu'elle est Fig. 1.c, l'influence de la boucle (3-4) sur les boucles (5-6) et (1-2) sera pris en considération. Mais cette séquence n'est pas totalement correcte car les pics 1 et 2 sont exécutés avant les autres pics.

2. La méthode de comptage de cycles rainflow modifiée

Anthes [2] propose la méthode de comptage de cycles rainflow avec quelques modifications pour prendre l'effet de séquence en considération et qu'il lui a donné le nom "Méthode de comptage de cycles rainflow modifiée". Les modifications effectuées sont simples mais décisives. Si, un demi-cycle est enregistré, il sera traité comme un événement endommageant, mais si ce demi-

cycle ne ferme pas une boucle d'hystérésis, donc il sera considéré comme s'il constituait une boucle d'hystérésis virtuelle. Trois cas de figure peuvent être distingués :

1. La boucle d'hystérésis virtuelle se fermera un peu plus tard par un autre demi-cycle; la Fig. 2 montre cette situation. Dans ce cas l'incrément d'endommagement sera déterminé et ajouté à l'endommagement total.
2. Le demi-cycle traité comme une boucle virtuelle continuera sa trajectoire un peu plus tard, Fig. 3. Une nouvelle boucle d'hystérésis virtuelle plus large sera formée, et l'incrément d'endommagement sera calculé par la différence d'endommagement causé par la nouvelle boucle virtuelle et celui causé par l'ancienne boucle virtuelle. La Fig. 3 illustre un exemple où l'incrément d'endommagement de b à d est déterminé comme suit :

$$\Delta D_{b-d} = \Delta D_{a-d} - \Delta D_{a-b} \quad (1)$$

Si ce nouveau cycle ne ferme pas une boucle il sera traité une autre fois comme s'il constituait une boucle d'hystérésis virtuelle.

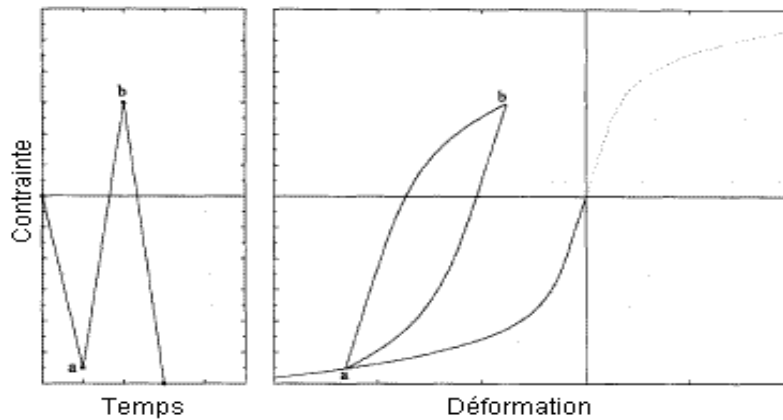
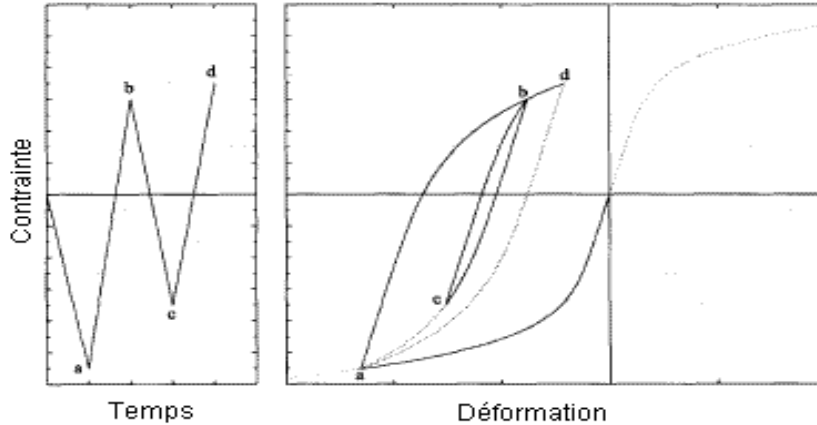


Fig. 2. Boucle d'hystérésis fermée par un demi-cycle [2].

3. La boucle d'hystérésis ne se fermera pas jusqu'à la rupture et l'incrément d'endommagement causé par cette boucle restera valide et pris en compte. Ce qui montre la différence entre les deux méthodes.



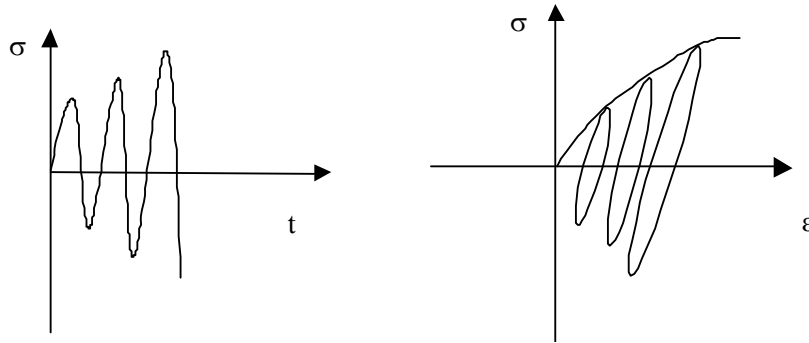
Les modifications portées sur la méthode de comptage de cycles rainflow, proposée par Anthes, donnent une nouvelle définition des cycles et des demi-cycles sous formes de boucles d'hystérésis fermées et virtuelles, les boucles d'hystérésis virtuelles servent à déterminer les incréments d'endommagement entre un pic et une vallée, un pic et un pic ou une vallée et une vallée de l'histoire de chargement. Ces modifications n'influent pas sur les principes d'identification des cycles de la méthode rainflow. Mais la différence réside dans le traitement des résultats d'identification et leurs influences sur l'estimation d'endommagement, car le but est de prendre en considération l'effet d'ordre d'application des cycles dans l'estimation d'endommagement et des durées de vie à la fatigue. Dans ce cas le calcul de l'endommagement se fait au fur et à mesure que le comptage de cycles et n'en pas comme la procédure classique de comptage où on compte tous les cycles jusqu'à la fin et puis on fait le calcul à partir du nombre de cycles à chaque niveau de contrainte. Ce qui permet d'effectuer le calcul en respectant l'ordre des cycles dans l'histoire de chargement.

3. Les remarques et les modifications portées à cette démarche

L'auteur dans son article a tracé un organigramme qui explique la parcours nécessaire pour appliquer cette démarche. L'application de cet organigramme conduit à faire les remarques suivantes :

1-Dans le cas d'un chargement croissant comme illustré sur la Fig. 4, il n'y aura jamais d'endommagement car tous ces cycles se concordent avec la première règle mémoire, 'memory rules', (si la boucle d'hystérésis se ferme à la courbe contrainte-déformation cyclique et après le chargement suit la même trajectoire que cette courbe).

2- Si on prend l'exemple de la Fig. 1, l'effet du demi-cycle qui part du point 1 jusqu'au point 2 n'est pas pris en considération et il cause peut être la majorité d'endommagement.



Pour remédier à ces manques présentés par cet organigramme on doit procéder à des modifications qui prennent en compte les remarques déjà citées au-dessus. La Fig. 6 montre cet organigramme qui est écrit de façon à utiliser des séquences déformation-temps comme données d'entrée. Deux variables sont utilisées et qui contiennent les points de départ des demi-cycles qui ne servent pas à fermer des boucles ; ER pour les valeurs de déformation et SR pour les valeurs de contrainte. Deux compteurs sont définis pour organiser le contenu des deux variables. Le premier IZ, qui représente les points à la position où le dernier point du commencement d'un demi-cycle est localisé. Le deuxième IR, qui représente les points à la position où le premier point du commencement d'un demi-cycle qui peut former une boucle d'hystérésis fermée est localisé. Les valeurs de contrainte sont déterminées en utilisant l'équation de la courbe contrainte-déformation cyclique (FC) et une autre équation pour les demi-cycles (FH) Fig. 5. Pour FC, l'équation utilisée est

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n} \quad (2)$$

et pour FH, l'équation utilisée est :

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n}. \quad (3)$$

Cet organigramme inclus aussi une référence pour calculer l'incrément actuel d'endommagement ΔD et la somme actuelle d'endommagement.

Tel qu'on peut voir cet algorithme est basé essentiellement sur la comparaison des deux compteurs.

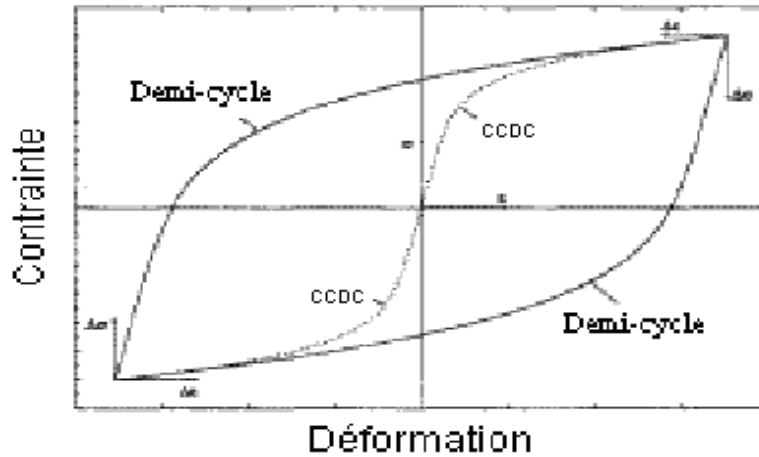
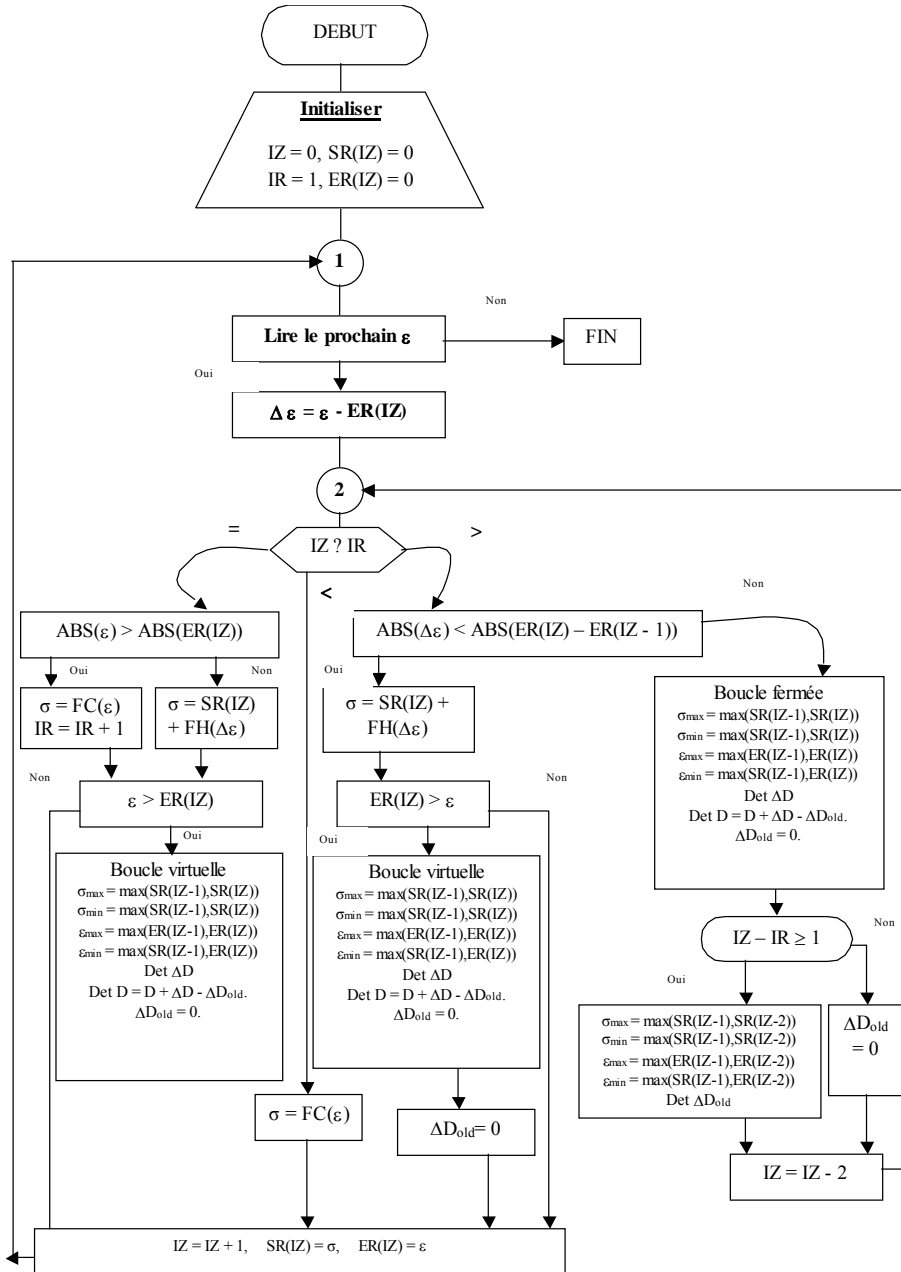


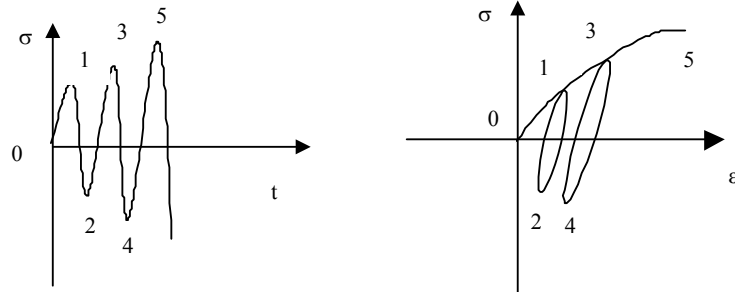
Fig. 5. Diagramme contrainte-déformation cyclique.

Les données d'entrées nécessaires pour effectuer un calcul à l'aide de cet algorithme sont: histoire de chargement (déformation-temps) ou un fichier qui contient des valeurs de déformations correspondantes aux pics et vallées de l'histoire de chargement, les données concernant le matériau utilisé (module d'élasticité (E), coefficient de contrainte cyclique (K'), exposant de la loi de consolidation cyclique (n'), coefficient de résistance à la fatigue (σ'_f), exposant de contrainte de fatigue (b), coefficient de ductilité en fatigue (ε'_f), exposant de ductilité en fatigue (c)) et le coefficient de concentration de contrainte (K_t) si c'est nécessaire.

L'incrément d'endommagement est calculé par une relation de cumul du dommage par fatigue et la durée de vie est déterminée par l'endommagement total causé par cette histoire de chargement. La durée de vie est donnée par le nombre de blocs, si cette histoire se constitue d'un bloc de référence qui se répète jusqu'à la rupture, ou du nombre de cycles à la rupture.



Le déroulement de l'estimation d'endommagement, en prenant l'effet d'ordre d'application de chaque cycle en considération, avec l'utilisation de cet algorithme va être illustré par l'exemple de la Fig. 4 redessiné ci-dessous.



Les valeurs initiales des compteurs sont $IZ=0$ et $IR=1$, aussi $SR(0)=0$ et $ER(0)=0$.

Les étapes sont les suivantes :

- Lire la valeur suivante $\varepsilon(0)$.
- Déterminer la variation de déformation $\Delta\varepsilon=\varepsilon(0)-ER(0)$.
- Comparaison $IZ=0<IR=1$.
- Déterminer la contrainte $\sigma(0)=FC(\varepsilon(0))$.
- $IZ=IZ+1=1$, $SR(1)=\sigma(0)$, $ER(1)=\varepsilon(0)$. Retour à 1.
- Lire la valeur suivante $\varepsilon(1)$.
- Déterminer la variation de déformation $\Delta\varepsilon=\varepsilon(1)-ER(1)$.
- Comparaison $IZ=1=IR=1$.
- Vérifier si $ABS(\varepsilon(1))>ABS(ER(1))$. Oui.
- Déterminer la contrainte $\sigma(1)=FC(\varepsilon(1))$. Et $IR=IR+1=2$.
- Vérifier si $\varepsilon(1) > ER(1)$. Oui.
- Déterminer $\Delta D = 0$ et $D = 0$.
- $IZ=IZ+1=2$, $SR(2)=\sigma(1)$, $ER(2)=\varepsilon(1)$. Retour à 1.
- Lire la valeur suivante $\varepsilon(2)$.
- Déterminer la déformation $\Delta\varepsilon=\varepsilon(2)-ER(2)$.
- Comparaison $IZ=2=IR=2$.
- Vérifier si $ABS(\varepsilon(2))>ABS(ER(2))$. Non.
- Déterminer la contrainte $\sigma(2)=SR(2)+FH(\varepsilon(2))$.
- Vérifier si $\varepsilon(2) > ER(2)$. Non.
- $IZ=IZ+1=3$, $SR(3)=\sigma(2)$, $ER(3)=\varepsilon(2)$. Retour à 1.
- Lire la valeur suivante $\varepsilon(3)$.
- Déterminer la déformation $\Delta\varepsilon=\varepsilon(3)-ER(3)$.
- Comparaison $IZ=3>IR=2$.
- Vérifier si $ABS(\Delta\varepsilon)<ABS(ER(3)-ER(2))$. Non.
- Boucle fermée.
- Déterminer ΔD_{1-2} et $D=D+\Delta D_{1-2}-\Delta D_{old}$.

- $IZ-IR \geq 1$. Oui. Déterminer $\Delta D_{old} = D_{1-0}$. $IZ = IZ - 2 = 1$. Retour à 2.
- Comparaison $IZ = 1 < IR = 2$.
- Déterminer la contrainte $\sigma(3) = FC(\varepsilon(3))$.
- $IZ = IZ + 1 = 2$, $SR(2) = \sigma(3)$, $ER(2) = \varepsilon(3)$, $\max \varepsilon = \varepsilon(3)$. Retour à 1.
- Lire la valeur suivante $\varepsilon(4)$.
- Déterminer la déformation $\Delta \varepsilon = \varepsilon(4) - ER(2)$.
- Comparaison $IZ = 2 = IR = 2$.
- Vérifier si $ABS(\varepsilon(4)) > ABS(ER(2))$. Non.
- Déterminer la contrainte $\sigma(4) = SR(2) + FH(\varepsilon(4))$.
- Vérifier si $\varepsilon(4) > ER(2)$. Non.
- $IZ = IZ + 1 = 3$, $SR(3) = \sigma(4)$, $ER(3) = \varepsilon(4)$. Retour à 1.

Le calcul continue de cette façon jusqu'au dernier cycle. L'endommagement total causé par l'histoire de chargement sera déterminé et la durée de vie à la fatigue sera estimée en fonction de cet endommagement.

Conclusion

Les effets de séquences sont connus être un facteur important dans l'accumulation d'endommagement par fatigue. Ils sont induits par la quantité des irrégularités dans l'histoire de chargement qui sont généralement augmentées par les surcharges et les sous-charges.

Un algorithme qui a été mis en place pour rendre la méthode de comptage de cycles rainflow plus performante en prenant l'effet de séquence en considération. Il a été modifié pour remédier à quelques manques. Celui ci a tendance à fournir des données correctes pour des modèles d'accumulation d'endommagement. Avec celui ci on peut s'attendre à une amélioration de la prédiction de la durée de vie à la fatigue en comparaison avec celle déterminée par la méthode classique.

Il faut mentionner que dans la littérature de spécialité il y a peu de données sûr relatives à cette procédure et au cumul de dommage en fatigue.

Les résultats des simulations numériques effectuées lors d'implantation de cet algorithme dans un programme de calcul à la fatigue montre une amélioration de la prédiction de la durée de vie par fatigue.

REFERENCES

1. *R.C. Rice*, Fatigue Design Handbook. SAE Standard, Society of Automotive Engineering, 3rd edition, AE-22, 1997.
2. *R.J. Anthes*, Modified Rainflow Counting Keeping The Load Sequence. International Journal of Fatigue, No 7, **Vol 19**, 1997, pp 529-535.
3. *S.D. Downing* and *D.F. Socie*, Simple Rainflow Counting Algorithms. International Journal of Fatigue, **Vol 4**, 1982, pp 31-40.
4. *G. Glinka* and *J.C.P. Kam*, Rainflow Counting Algorithm For Very Long Stress Histories. International Journal of Fatigue, **Vol 9**, 1987, pp 223-228.
5. *N.E. Dowling*, Fatigue Failure Predictions For Complicated Stress-Strain Histories. Journal of Materials, No 1, **Vol 7**, Copyright ASTM, 1972.
6. *N.E. Dowling*, Estimation And Correlation Of Fatigue Lives For Random Loading. International Journal of Fatigue, No 3, **Vol 10**, 1988, pp 179-185.
7. *F. Richards*, *N. LaPointe* and *R. Wetzel*, A Cycle Counting Algorithm For Fatigue Damage Analysis. Paper N° 740278 presented at: SAE Automotive Engineering Congress, Detroit, Michigan, 1974.