



УКРАЇНА

(19) UA (11) 27987 (13) U
(51) МПК (2006)
G01N 3/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВТОМИ МАТЕРІАЛУ ЗА УМОВ АСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

1

(21) u200706275

(22) 06.06.2007

(24) 26.11.2007

(72) ГОЛУБ ВЛАДИСЛАВ ПЕТРОВИЧ, UA,
ПОГРЕБНЯК АНАТОЛІЙ ДМИТРОВИЧ, UA,
ЖЕЛДУБОВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР
ВОЛОДИМИРОВИЧ, UA(73) ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ІМ. С.П. ТИМОШЕНКА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, UA

(56)

(57) Спосіб визначення характеристик втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження, який полягає у тому, що одну групу зразків матеріалу випробовують на втому за фіксованої температури при симетричному циклічному навантаженні, вимірюють число циклів до руйнування для декількох рівнів амплітуди циклічних напружень, будують криву втоми та визначають параметри кривої втоми та межі втоми для довільних довговічностей, а іншу групу зразків

2

матеріалу випробовують на короткочасну міцність, будують діаграму короткочасної міцності та вимірюють межу міцності, який відрізняється тим, що групу зразків матеріалу додатково випробовують на втому за умов віднульового асиметричного навантаження при декількох рівних значеннях циклічної та статичної компонент напружень, вимірюють числа циклів до руйнування, визначають відповідні цим числам циклів до руйнування межі втоми за умов симетричного навантаження, будують єдину для усіх рівнів асиметрії навантаження діаграму граничних напружень, ідентифікують згідно з єдиною діаграмою закон залежності між граничними значеннями компонент напружень асиметричного навантаження, межею втоми за умов симетричного навантаження та межею короткочасної міцності і за ідентифікуючим законом визначають характеристики втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження.

Запропоноване технічне рішення стосується галузі механічних випробувань матеріалів, а безпосередньо способів випробувань зразків матеріалів на втому за умов одновісного асиметричного багаточиклового навантаження.

Характеристики втоми у вигляді діаграм граничних амплітуд напружень та відповідні моделі, що збудовано на підставі запропонованого способу, можуть бути використані у дослідницькій практиці конструкторських бюро та заводських лабораторій підприємств авіаційного, автомобільного та залізничного транспорту, а також під час обґрунтування призначення та прогнозування довговічності матеріалів, що працюють довготривалий час за умов сумісної дії статичних та циклічних навантажень.

Відомим є спосіб визначення характеристик втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження [1], згідно із яким групу зразків матеріалу випробовують на втому за фіксованої температури при всіх заданих рівнях статичних напружень, вимірюють число циклів до руйнування

для декількох рівнів амплітуди циклічних напружень, будують криві втоми для кожного заданого рівня статичних напружень і за цими кривими визначають характеристики втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження.

Однак, цей спосіб має недолік внаслідок його високої трудомісткості, що пов'язана із необхідністю проведення великого обсягу довготривалих випробувань на втому із вимірами числа циклів до руйнування для декількох рівнів амплітуди циклічних напружень. Випробування на втому та виміри мають виповнюватись для кожного рівня статичних напружень, що задає ступінь асиметрії циклу напружень.

Відомий також, обраний як прототип, спосіб визначення характеристик втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження [2], згідно із яким одну групу зразків матеріалу випробовують на втому за фіксованої температури при симетричному циклічному навантаженні, вимірюють число циклів до руйнування для декількох рівнів амплітуди циклічних напружень,

(13) U

(11) 27987

(19) UA

будують криву втоми та визначають межі втоми для довільних довговічностей, а іншу групу зразків матеріалу випробовують на короточасну міцність, будують діаграму короточасної міцності і вимірюють межу міцності, формулюють закон залежності між граничними значеннями компонент напружень асиметричного навантаження, межею втоми за умов симетричного навантаження та межею короточасної міцності і за цим законом визначають характеристики втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження.

Відомий спосіб має недолік внаслідок його низької точності, оскільки закон залежності між компонентами циклу напружень, межею втоми і межею короточасної міцності формулюється тільки на підставі даних, що отримані за умов симетричного навантаження та короточасних випробувань і не враховують особливості реакції матеріалу на асиметричне навантаження.

До основи корисної моделі покладено задачу: у способі визначення характеристик втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження шляхом виміру числа циклів до руйнування для декількох рівних значень циклічної та статичної компонент напружень у випробуваннях на втому за умов віднульового асиметричного навантаження, визначення рівня амплітуд циклічних напружень симетричного навантаження, що відповідають цим числам циклів до руйнування, побудови на цій підставі єдиної для усіх рівнів асиметрії навантаження діаграми граничних напружень, ідентифікувати за єдиною діаграмою закон залежності між граничними значеннями компонент напружень асиметричного навантаження, межею втоми за умов симетричного навантаження та межею короточасної міцності, врахувати вплив асиметрії циклу напружень і підвищити точність способу визначення характеристик втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження.

Поставлена задача розв'язується за рахунок того, що у способі визначення характеристик втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження, що містить випробування групи зразків матеріалу на втому за фіксованої температури при симетричному циклічному навантаженні, вимірювання числа циклів до руйнування для декількох рівнів амплітуди циклічних напружень, побудову кривої втоми, визначення меж параметрів кривої втоми та втоми для довільних довговічностей, випробування іншої групи зразків матеріалу на короточасну міцність, побудови діаграми короточасної міцності і вимірювання межі міцності, згідно із запропонованим способом групу зразків матеріалу випробовують на втому за умов віднульового асиметричного навантаження при декількох рівних значеннях циклічної та статичної компонент напружень, вимірюють числа циклів до руйнування, визначають рівні амплітуд циклічних напружень симетричного навантаження, що відповідають цим числам циклів до руйнування, будують єдину для усіх рівнів асиметрії навантаження діаграму граничних напружень, ідентифікують згідно єдиної діаграми закон

залежності між граничними значеннями компонент напружень асиметричного навантаження межею втоми за умов симетричного навантаження та межею короточасної міцності і за ідентифікуючим законом визначають характеристики втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження та підвищують точність способу за рахунок узгодження структури ідентифікуючого закону втоми матеріалу із особливостями реакції матеріалу на асиметричне навантаження.

Тут і подалі згідно терміну "симетричне навантаження" маєтсья на увазі циклічне навантаження, що відбувається за умов, коли статична компонента напружень дорівнює нулеві, згідно терміну "асиметричне навантаження" - циклічне навантаження за умов комбінації різних значень циклічної та статичної компонент напружень, згідно терміну "віднульове асиметричне навантаження" - циклічне навантаження за умов комбінації рівних значень циклічної та статичної компонент напружень, згідно терміну "єдина діаграма граничних напружень" - діаграма, що встановлює зв'язок проміж циклічною та статичною компонентами напружень для усіх можливих комбінацій цих компонент, згідно терміну "ідентифікуючий закон" - аналітичне співвідношення, що пов'язує циклічну і статичну компоненти напружень асиметричного навантаження із межею втоми за умов симетричного навантаження та межею короточасної міцності.

Здійснення випробувань на втому зразків матеріалу за умов віднульового асиметричного навантаження дозволяє побудувати єдину для усіх комбінацій статичних та циклічних компонент напружень асиметричного навантаження діаграму граничних напружень, ідентифікувати відповідний закон втоми і за його допомогою визначити із більшою точністю характеристики втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження. Випробування на втому за умов віднульового асиметричного навантаження можуть бути виповнені для двох-трьох рівнів напружень та обмеженої довговічності, що практично не збільшує трудомісткість способу.

Спосіб, що заявлений, здійснюється наступним чином.

Дві групи зразків із матеріалу, що досліджується, випробовують на втому та короточасну міцність за фіксованої температури в. Методику випробувань та обладнання для випробувань детально описано у [3].

Частину зразків першої групи випробовують на втому за умов симетричного циклічного навантаження. Вимірюють числа циклів до руйнування $n_{R1}, n_{R2}, \dots, n_{Rk}$ для декількох рівнів амплітуди циклічних напружень $\sigma_{a1}, \sigma_{a2}, \dots, \sigma_{ak}$ відповідно, за результатами випробувань будують криву втоми (мал. 1, тонка суцільна лінія) та визначають межі втоми $\sigma_{n1}, \sigma_{n2}, \dots, \sigma_{nk}$, що відповідає прототипу. З метою врахування статистичних властивостей втоми матеріалу на одному рівні амплітуди напружень σ_a може бути випробовано декілька зразків (мал. 1, світлі точки).

У логарифмічній системі координат крива втоми апроксимується прямою лінією, а залежність числа циклів до руйнування n_R від амплітуди напружень σ_a має відповідно вигляд

$$n_R = \frac{1}{B(\sigma_a)^m} = \frac{1}{B(\sigma_n)^m} \quad (1)$$

де коефіцієнти B , m визначають положення кривої втоми у логарифмічній системі координат. В рівнянні (1) поточні значення амплітуди циклічних напружень σ_a ототожнюються на момент руйнування із значеннями меж втоми σ_n . Значення коефіцієнтів B та m визначаються із системи рівнянь

$$\begin{aligned} \lg n_{Ri} &= \lg B - m \lg \sigma_{ai} \\ \lg n_{Rj} &= \lg B - m \lg \sigma_{aj} \end{aligned} \quad (2)$$

що отримана внаслідок логарифмування рівняння (1) для двох рівнів амплітуд циклічних напружень σ_{ai} , σ_{aj} та відповідних їм значень чисел циклів до руйнування n_{Ri} , n_{Rj} . Значення амплітуд напружень σ_{ai} та σ_{aj} відповідають стандартним характеристикам втоми і в залежності від матеріалу та рівня температури обираються як межі втоми для 10^5 та 10^8 циклів до руйнування. Значення коефіцієнтів B та m визначаються згідно системи рівнянь (2) із використанням методу щонайменших квадратів.

Зразки матеріалу другої групи випробовують на короточасну міцність, будують діаграму короточасної міцності і вимірюють значення короточасної міцності σ_B . З метою врахування статистичних властивостей короточасної міцності матеріалу великість σ_B визначається на підставі випробувань декількох ідентичних зразків матеріалу.

Для залежності між граничними значеннями компонент напружень асиметричного навантаження σ_a^* , σ_m^* , межею втоми за умов симетричного навантаження σ_n та межею короточасної міцності σ_B найчастіше обирається лінійний

$$\frac{\sigma_a^*}{\sigma_n} + \frac{\sigma_m^*}{\sigma_B} = 1 \quad (3)$$

або параболічний

$$\frac{\sigma_a^*}{\sigma_n} + \left(\frac{\sigma_m^*}{\sigma_B} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

закони [1], за якими визначаються характеристики втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження згідно прототипу. Тут і подалі у якості характеристик втоми за умов асиметричного навантаження розглядаються комбінації значень граничних напружень σ_a^* і σ_m^* , що викликають руйнування за теж саме число

циклів що і межа втоми за умов симетричного навантаження σ_n .

Частину зразків першої групи випробовують на втому за умов віднульового асиметричного навантаження при декількох рівних значеннях

циклічної $\sigma_{a1}^0, \sigma_{a2}^0, \dots, \sigma_{ak}^0$ та статичної $\sigma_{m1}^0, \sigma_{m2}^0, \dots, \sigma_{mk}^0$, компонент напружень

($\sigma_{a1}^0 = \sigma_{m1}^0, \sigma_{a2}^0 = \sigma_{m2}^0, \dots, \sigma_{ak}^0 = \sigma_{mk}^0$) і вимірюють відповідні числа циклів до руйнування

$n_{R1}^0, n_{R2}^0, \dots, n_{Rk}^0$. З метою врахування статистичних властивостей втоми матеріалу на одному рівні

значень σ_a^* та σ_m^* може бути випробувано декілька зразків (мал. 1, темні точки).

За формулою

$$\sigma_{nk} = \left(\frac{1}{B n_{Rk}^0} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (5)$$

що отримана із рівняння (1), із використанням значень коефіцієнтів B , m визначають межі втоми за умов симетричного навантаження

$\sigma_{n1}^0, \sigma_{n2}^0, \dots, \sigma_{nk}^0$, що відповідають числам циклів до

руйнування $n_{R1}^0, n_{R2}^0, \dots, n_{Rk}^0$. Графічно процедуру

визначення меж втоми $\sigma_{n1}^0, \sigma_{n2}^0, \dots, \sigma_{nk}^0$ вказано на мал. 1 стрілками.

Виходячи із експериментальне визначених співвідношень проміж числом циклів до

руйнування σ_{nk}^0 та циклічною σ_{ak}^0 і статичною

σ_{mk}^0 компонентами напружень віднульового асиметричного навантаження, відповідних їм

значень меж втоми σ_{nk}^0 за умов симетричного

навантаження та межі короточасної міцності σ_B ,

будується єдина лінеаризована діаграма граничних напружень (мал. 2) у нормованій системі координат

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} - \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^\lambda. \quad (6)$$

Єдиність та лінеаризація діаграми досягаються за рахунок використання по одній із координат степеневі трансцендентної функції та відповідного значення показника степені.

Згідно єдиної лінеаризованої діаграми граничних напружень закон залежності між граничними значеннями компонент напружень

σ_a^* і σ_m^* асиметричного навантаження, межею

втоми за умов симетричного навантаження σ_n та

межею короточасної міцності σ_B ідентифікується за формулою

$$\left(\frac{\sigma_a^*}{\sigma_n}\right)^{\frac{1}{\lambda}} + \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{\sigma_m^*}{\sigma_B}\right)^2 = 1, \quad (7)$$

за якою визначаємо характеристики втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження згідно винаходу.

Приклад. Розглянемо задачу визначення характеристик втоми матеріалу за умов асиметричного багатоциклового навантаження розтягом-стиском. Багатоциклове навантаження реалізується при частотах навантаження $f \geq 10$ Гц, а руйнування від втоми виникає при числах циклів навантаження $n_R \geq 10^5$. У якості об'єкту дослідження оберемо алюмінієвий сплав Амг6, жароміцний нікельовий сплав EI867 та епоксидний склопластик ЕД, що знаходять широке застосування у разі виготовлення відповідальних деталей авіаційної та космічної техніки. Робоча температура цих матеріалів у процесі експлуатації змінюється від 20 до 600°C, а робоче число циклів навантаження складає 10^5 - 10^6 циклів.

Результати випробувань гладких циліндричних зразків матеріалів на втому за умов симетричного навантаження розтягом-стиском та постійної температури надаються у вигляді стандартних кривих втоми (на кшталт мал.1) і апроксимуються рівняннями (2) згідно прототипу. Для алюмінієвого сплаву Амг6 рівняння відповідної кривої втоми набуває вигляду

$$\lg n_R = -\lg 3,02 \cdot 10^{-16} - 4,88 \lg \sigma_a \quad (8)$$

для жароміцного сплаву EI867 - вигляду

$$\lg n_R = -\lg 6,31 \cdot 10^{-22} - 5,76 \lg \sigma_a \quad (9)$$

і для епоксидного склопластику ЕД - вигляду

$$\lg n_R = -\lg 3,72 \cdot 10^{-30} - 10,23 \lg \sigma_a, \quad (10)$$

значення коефіцієнтів В та m яких наведено у таблиці. У цій таблиці наведено також значення

меж короточасної міцності σ_B , що отримані із випробувань зразків матеріалів на короточасну міцність згідно прототипу.

Матеріал	$\theta, ^\circ\text{C}$	$5, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-m} \cdot \text{цикл}^{-1}$	розрахунків наведено на мал. 4, а для $n_R = 5 \cdot 10^5$ циклів, для жароміцного нікельового сплаву EI867 - на мал. 4, а для $n_R = 10^5$ циклів і для епоксидного склопластику ЕД - на мал. 5, а для $n_R = 10^5$ циклів.
Сплав Амг6	20	$3,02 \cdot 10^{-16}$	на мал. 4, а для $n_R = 5 \cdot 10^5$ циклів, для жароміцного нікельового сплаву EI867 - на мал. 4, а для $n_R = 10^5$ циклів і для епоксидного склопластику ЕД - на мал. 5, а для $n_R = 10^5$ циклів.
Сплав EI867	20	$6,31 \cdot 10^{-22}$	на мал. 4, а для $n_R = 10^5$ циклів, для жароміцного нікельового сплаву EI867 - на мал. 4, а для $n_R = 10^5$ циклів і для епоксидного склопластику ЕД - на мал. 5, а для $n_R = 10^5$ циклів.
Склопластик ЕД	20	$3,72 \cdot 10^{-30}$	на мал. 5, а для $n_R = 10^5$ циклів.

Випробування зразків на втому за умов віднульового асиметричного навантаження для алюмінієвого сплаву Амг6 вивчено при напруженнях $\sigma_{a1} = \sigma_{m1} = 115 \text{ МПа}$, $\sigma_{a2} = \sigma_{m2} = 82 \text{ МПа}$ та $\sigma_{a3} = \sigma_{m3} = 50 \text{ МПа}$, для жароміцного сплаву EI867 - при напруженнях $\sigma_{a1} = \sigma_{m1} = 392 \text{ МПа}$ і для епоксифенольного склопластику ЕД - при напруженнях $\sigma_{a1} = \sigma_{m1} = 228 \text{ МПа}$, $\sigma_{a2} = \sigma_{m2} = 184 \text{ МПа}$ та $\sigma_{a3} = \sigma_{m3} = 151 \text{ МПа}$. Внаслідок випробувань отримано відповідно зазначених матеріалів наступні значення чисел циклів до руйнування: $n_{R1} = 10^5$ цикл, $n_{R2} = 10^6$ цикл та $n_{R3} =$

10^7 цикл; $n_R = 10^7$ цикл, $n_{R1} = 10^4$ цикл, $n_{R2} = 10^5$ цикл та $n_{R3} = 10^6$ цикл. Із використанням значень коефіцієнтів В та m, що наведені у таблиці, за формулою (5) розраховано відповідні цим значенням чисел циклів до руйнування значення меж втоми σ_n за умов симетричного навантаження, які склали $\sigma_{n1} = 168 \text{ МПа}$, $\sigma_{n2} = 112 \text{ МПа}$ та $\sigma_{n3} = 58 \text{ МПа}$; $\sigma_n = 292 \text{ МПа}$, $\sigma_{n1} = 77 \text{ МПа}$, $\sigma_{n2} = 66 \text{ МПа}$ та $\sigma_{n3} = 55 \text{ МПа}$.

За результатами випробувань та розрахунків складаються співвідношення

$$\frac{\sigma_{ak}}{\sigma_{nk}} \text{ та } \frac{\sigma_{mk}}{\sigma_B} \quad (11)$$

для фіксованих значень чисел циклів до руйнування n_R і будується єдина лінеаризована діаграма граничних напружень (мал. 3). Для алюмінієвого сплаву Амг6-T6 відповідні співвідношення позначено (o), для жароміцного нікельового сплаву EI867 - (e) і для епоксифенольного склопластику ЕД - (e).

Значення коефіцієнтів λ , що дозволяють лінеаризувати співвідношення (11) для усіх рівнів чисел циклів до руйнування, наведено у таблиці.

Результати розрахунків характеристик втоми матеріалів за умов асиметричного навантаження згідно винаходу за формулою (7) із використанням даних таблиці наведено на мал. 4 суцільними лініями.

Розраховувалися значення циклічної компоненти σ_a^* для заданих значень статичної компоненти σ_m^* та числа циклів до руйнування n_R . Для величини σ_a^* із формули (7) із урахуванням формули (5) отримано рівняння

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{B n_R}\right)^{\frac{1}{m}} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{\sigma_m^*}{\sigma_B}\right)^2\right]^{\lambda}, \quad (12)$$

яке дозволяє побудувати діаграму залежності σ_a^* від σ_m^* для будь якого рівня числа циклів до руйнування n_R .

Для алюмінієвого сплаву Амг6 результати розрахунків наведено на мал. 4, а для $n_R = 5 \cdot 10^5$ циклів, для жароміцного нікельового сплаву EI867 - на мал. 4, а для $n_R = 10^5$ циклів і для епоксидного склопластику ЕД - на мал. 5, а для $n_R = 10^5$ циклів. Кружками нанесено результати експериментальних досліджень. Із метою порівняння, штриховими лініями з точками наведено результати розрахунків згідно прототипу, а саме - штриховою лінією з однією точкою за рівнянням (3), а штриховою лінією з двома точками за рівнянням (4).

Внаслідок порівняння результатів розрахунків із експериментом встановлено, що максимальна відносна похибка між характеристиками втоми за умов асиметричного навантаження та експериментальними даними для алюмінієвого сплаву Амг6 складає 54% у разі визначення характеристик за прототипом і 13% у разі їх

визначення за способом, що запропоновано. Відповідні оцінки для жароміцного нікельового сплаву EI867 складають 42% та 14%, а для епоксидного склопластику ЕД - 74% та 22%.

Використання запропонованого способу дозволяє підвищити точність способів визначення характеристик втоми матеріалу за умов асиметричного навантаження практично без збільшення трудомісткості, і як наслідок, визначати вплив статичної компоненти циклу змінних напружень на опір матеріалу втоми. Наведений приклад підтверджує отримання технічного результату під час реалізації способу.

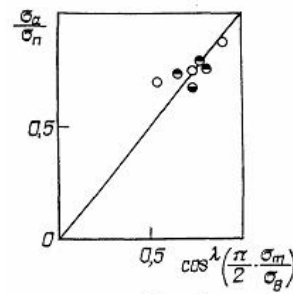
Джерела інформації:

1. Форрест П. Усталость металлов // Пер. с англ. под ред. С.В.Серенсена, - Москва : Машиностроение, 1968, - 352с.

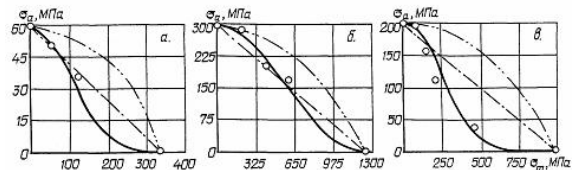
2. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости // Пер. с англ. под ред. чл.-кор. АН СССР И.Ф.Образцова.- Москва: Машиностроение, 1969.- 504с.

3. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: Справочное пособие // Под общ. ред. А.Т.Туманова / Т.2. Методы исследования механических свойств металлов. - Москва: Машиностроение, 1974.- 320с.

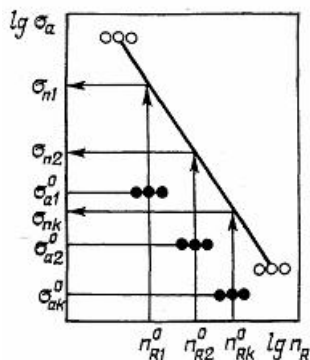
4. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. - Москва: Машиностроение, 1985.- 232с.



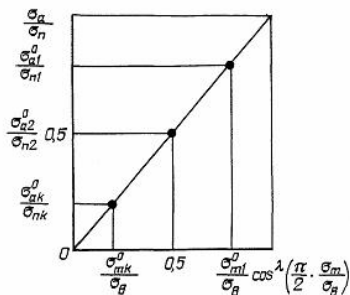
Мал. 3



Мал. 4



Мал. 1



Мал. 2