

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **241682**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **436145**

(22) Data zgłoszenia: **27.11.2020**

(51) Int.Cl.

G01L 1/00 (2006.01)

G01B 7/16 (2006.01)

(54) **Sposób i detektor do wykrywania momentu uplastycznienia materiału**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

30.05.2022 BUP 22/22

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

21.11.2022 WUP 47/22

(73) Uprawniony z patentu:

**SHM SYSTEM SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ
ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ
SPÓŁKA KOMANDYTOWA,
Libertów, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**ŁUKASZ BEDNARSKI, Kielce, PL
RAFAŁ MAREK SIENKO, Kraków, PL**

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Andrzej Kacperski

PL 241682 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób i detektor do wykrywania momentu uplastycznienia materiału in situ. Sposób i detektor pozwalają na wykrycie momentu uplastycznienia materiału bez znajomości charakterystyki wytrzymałościowej materiału i wymiarów geometrycznych, stanu technicznego oraz bez znajomości jego początkowego stanu wyężenia.

W znanym stanie techniki nie jest znana żadna metoda wykrywania uplastycznienia materiału za pomocą pomiaru odkształceń in situ, bez znajomości początkowego stanu wyężenia materiału, jego stanu technicznego oraz charakterystyki wytrzymałościowej materiału.

Z opisu patentowego US 8 210 055 znane są rozety przeznaczone do pomiaru naprężeń wewnętrznych w czasie wykonywania badań metodą wiercenia otworów. Opisana rozeta posiada co najmniej trzy pary przeciwstawnych do siebie tensometrycznych czujników odkształceń umieszczonych po przeciwnych stronach miejsca wiercenie otworu odprężającego, wszystkie w równych odstępach promieniowych i równomiernie rozłożone wokół znaku centrującego. Czujniki znajdujące się na przeciwnych stronach znacznika otworu są ze sobą połączone w celu uśredniania pomiaru. Opisane rozwiązanie jest przeznaczone do wyznaczania naprężeń zastanych w materiale wg standardu ASTM E837 za pomocą metody wiercenia otworu. Wg opisu metody naprężenia zastane w materiale mogą być wyznaczone tylko do wartości 0,6 granicy proporcjonalności a dla znanych kierunków głównych do wartości 0,9 granicy proporcjonalności. Tym samym zarówno rozety jak i metoda nie pozwalają na wykrywanie stanu uplastycznienia materiału. Opisane wyżej rozety pomiarowe posiadają więcej niż dwa czujniki leżące na tym samym kierunku, ułożone naprzeciwko siebie a ich wskazania się uśredniają. Analiza czujników musi następować wspólnie, czujniki traktowane są jako jeden układ.

Z opisu patentowego US 10 514 251 znane jest rozwiązanie przeznaczone do monitorowania stanu technicznego konstrukcji składające się z urządzenia elektronicznego oraz czujników światłowodowych ułożonych w kształt rozety pomiarowej z dodatkowym czujnikiem umieszczonym obok rozety pomiarowej do kompensacji temperaturowej pomiarów. Rozwiązanie nie jest przeznaczone do wykrywania stanu uplastycznienia konstrukcji.

W opisie US 2019/0277627 A1 przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne rozet pomiarowych wykonanych za pomocą siatek Bragga. Konstrukcje przeznaczone są do mocowania do stali za pomocą zgrzewania. W opisie przedstawiono rozety trzyczujnikowe oraz czteroczujnikowe. Rozeta czteroczujnikowa ma kształt kwadratu, a czujniki są do siebie parami równoległe. Rozwiązanie to nie pozwala na wykrywanie stanu uplastycznienia materiału.

W opisie EP 1 129 327 B1 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne trzyczujnikowej rozety pomiarowej wykonanej w technologii FBG. Rozwiązanie nie pozwala na wyznaczanie stanu uplastycznienia materiału.

W opisie US 2016/0377528 A1 przedstawiono rozwiązanie przeznaczone do analizy stanu monitorowanej struktury z wielu siatek Bragga łączonych w łańcuchy pomiarowe układane w dowolne kształty na powierzchni monitorowanej konstrukcji. Czujniki światłowodowe dokonują pomiaru drgań wywołanych przez falę akustyczną generowaną przez elementy piezoelektryczne. Rozwiązanie nie pozwala na wykrywanie stanu uplastycznienia materiału.

Znane jest rozwiązanie czteroczujnikowej rozety pomiarowej opisane między innymi w publikacji „Hole-Drilling Strain-Gauge Method: Residual Stress Measurement With Plasticity Effects”; Tellini S., Journal of Engineering Materials and Technology 132(1); DOI: 10.1115/1.3184030. Rozwiązanie przeznaczone jest do wyznaczania naprężeń w materiale za metody wiercenia otworu wg standardu ASTM E837. Dodatkowy czwarty czujnik w rozecie pomiarowej służy do kontroli poprawności prowadzonych obliczeń, kompensacji wpływu temperatury na wynik pomiaru. Przy zastosowaniu czwartego czujnika w rozecie pomiarowej, oraz zaawansowanych modeli MES możliwe jest poszerzenie zakresu stosowalności metody ASTM E837 określania naprężeń w materiale z zakresu do 0,6 granicy proporcjonalności do zakresu 0,9 granicy proporcjonalności. Zarówno metoda badawcza wraz z przypisaną jej rozetą pomiarową nie pozwalają na wyznaczanie stanu uplastycznienia materiału.

Problem techniczny do rozwiązania według wynalazku dotyczy zatem wykrycia momentu uplastycznienia materiału bez znajomości charakterystyki wytrzymałościowej materiału i wymiarów geometrycznych, stanu technicznego oraz bez znajomości jego początkowego stanu wyężenia.

Sposób według wynalazku przeznaczony jest do wykrywania momentu uplastycznienia materiału in situ przy monitorowaniu stanu technicznego obiektu i może być stosowany z wykorzystaniem czujników odkształceń pracujących na zasadzie tensometrii elektrooporowej, pomiarów światłowodowych za

pomocą siatek Bragga, czujników strunowych, czujników światłowodowych ciągłych DFOS, czujników indukcyjnych, pojemnościowych, lub piezorezystancyjnych.

Istota sposobu według wynalazku polega na tym, że na monitorowanym obszarze poddanym dowolnemu stanowi obciążenia, umieszcza się co najmniej cztery czujniki odkształceń stanowiące co najmniej dwie, obrócone względem siebie o dowolny różny od zera kąt dowolnie przesunięte względem siebie o wektor rozety do pomiaru dowolnego płaskiego stanu odkształceń, przy czym kąt obrotu oraz przesunięcie rozet dobiera się tak, aby nie więcej niż dwa czujniki pomiędzy rozetami były do siebie równoległe lub leżały na tej samej prostej.

Następnie wyznacza się odpowiednio co najmniej dwa stany odkształceń głównych i naprężeń głównych dla monitorowanego obszaru, monitorując obiekt oblicza się przyrosty wartości odkształceń głównych i/lub przyrosty wartości naprężeń głównych w kolejnych chwilach czasu, dla każdej wydzielonej rozety, które dla danej rozety poniżej granicy plastyczności monitorowanego obszaru są proporcjonalne pomiędzy rozetami, na tej podstawie wyznacza się wskaźniki uplastycznienia i monitorując obszar wykrywa się granicę uplastycznienia w chwili zaniku proporcjonalności przyrostów czyli gwałtownej zmiany wartości wyznaczonych wskaźników uplastycznienia, normalnych dla stanu poniżej granicy uplastycznienia danego obszaru.

Dla większej liczby czujników wyodrębniających więcej rozet tensometrycznych obróconych i przesuniętych względem siebie, wskaźniki uplastycznienia wyznacza się dla dowolnie wybranych kombinacji par rozet lub dla wszystkich rozet jednocześnie.

Detektor według wynalazku do wykrywania momentu uplastycznienia materiału in situ przy monitorowaniu stanu technicznego obiektu może być wykorzystywany przy stosowaniu tensometrii elektrooporowej, pomiarów światłowodowych za pomocą siatek Bragga, czujników strunowych, czujników światłowodowych ciągłych DFOS, czujników indukcyjnych, pojemnościowych, lub piezorezystancyjnych.

Istota rozwiązania detektora według wynalazku polega na tym, że detektor składa się z co najmniej czterech czujników odkształceń położonych wzajemnie tak, aby czujniki odkształceń wyodrębniały co najmniej dwie rozety tensometryczne do wyznaczenia płaskiego stanu odkształceń i/lub naprężeń w miejscu pomiaru, przy czym rozetę tensometryczną stanowią trzy czujniki odkształceń umieszczone na monitorowanym materiale w różnych, lecz znanych kierunkach, jeden czujnik odkształceń może stanowić część jednej lub wielu rozet tensometrycznych ale dwie rozety, wykorzystane do wykrywania stanu uplastycznienia, stworzone z czujników odkształceń, nie mogą mieć więcej niż dwóch wspólnych czujników a ponadto utworzone przez czujniki odkształceń rozety tensometryczne są względem siebie obrócone o dowolny, różny od zera kąt. Rozety tensometryczne są przesunięte względem siebie o dowolny wektor.

Kierunki, na których umieszczone są czujniki przecinają się w jednym lub dowolnych punktach zaś odległość czujników odkształcenia od punktu przecięcia kierunków jest dowolna.

Czujniki odkształceń mogą być umieszczone są na wspólnym nośniku, o dowolnym kształcie i materiale, nośnik może być usuwany lub nie usuwany po instalacji detektora na monitorowanym obiekcie.

Detektor może być dodatkowo wyposażony w jeden lub więcej czujników przeznaczonych do pomiaru zmian temperatury monitorowanego materiału w celu kompensacji wpływu temperatury na wskazania czujników odkształceń.

Zaletą rozwiązania polega na rozwiązaniu problemu wykrycia momentu uplastycznienia materiału bez znajomości charakterystyki wytrzymałościowej materiału i wymiarów geometrycznych, stanu technicznego oraz bez znajomości jego początkowego stanu wyężenia.

Rozwiązanie według wynalazku przedstawione jest w odniesieniu do rysunków, na których poszczególne figury przedstawiają:

fig. 1 – typowy wykres rozciągania materiału z granicą plastyczności, F – siła rozciągająca próbkę, S – pole powierzchni próbki, L – długość początkowa (baza), ΔL – zmiana długości, ε – odkształcenie, σ – naprężenie,

fig. 2 – przykładowe zmiany charakterystyki wytrzymałościowej (linia przerywana, linia kropkowa) względem charakterystyki wzorcowej (linia ciągła),

fig. 3 – dwa różne, rzeczywiste stany wyężenia otrzymane dla tego samego zmierzonego odkształcenia $\varepsilon_1 - \varepsilon_0$; zależnie od początkowych naprężeń σ_0 elementu i rzeczywistej charakterystyki wytrzymałościowej, dla tego samego przyrostu mierzonych odkształceń otrzymuje się różne wartości naprężeń σ_1 3a) wyężenie materiału poniżej granicy plastyczności, 3b) wyężenie materiału przekroczyło granicę plastyczności materiału,

fig. 4 – przykład zastosowania metody dla sześciu czujników odkształceń – czujniki odkształceń ϵ_{s1} do ϵ_{s6} umieszczone na monitorowanym obszarze W , tworzą dwie rozety I i II do wyznaczania dowolnego stanu odkształceń, rozety obrócone są względem siebie o dowolny, różny od zera kąt α i dowolnie przesunięte względem siebie o wektor V ,

fig. 5 – powstałe z czujników odkształceń rozety, pozwalające na wyznaczenie niezależnych stanów odkształcenia i/lub naprężenia dla każdej rozety,

fig. 6 – wykres obrazujący gwałtowną zmianę wartości wskaźnika uplastycznienia w momencie utraty liniowej pracy materiału (uplastycznienia),

fig. 7 – przykład czujnika uplastycznienia składającego się z czterech czujników, w którym M – materiał nośny zapewniający znaną orientację czujników odkształceń względem siebie, 1, 2, 3, 4 – czujniki odkształceń, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – wzajemne usytuowanie kątowe czujników względem siebie, O_1, O_2, O_3 – punkty przecięcia kierunków,

fig. 8 – cztery czujniki odkształceń pozwalają na wyodrębnienie dwóch rozet tensometrycznych; rozeta I – czujniki 1, 2, 3, rozeta II – czujniki 2, 3, 4; wyodrębnione rozety są względem siebie obrócone i przesunięte,

fig. 9 – przykład czujnika uplastycznienia składającego się z pięciu czujników odkształceń o wspólnym punkcie (O_1) przecięcia kierunków,

fig. 10 – przykład czujnika uplastycznienia składającego się z sześciu czujników odkształcenia o dwóch punktach (O_1, O_2) przecięcia kierunków; M – materiał nośny zapewniający znaną orientację czujników odkształceń względem siebie,

fig. 11 – przykłady materiału nośnego (M) prostokątnego,

fig. 12 – przykłady materiału nośnego (M) prostokątnego i dopasowanego do rozmieszczenia czujników,

fig. 13 – przykład czujnika uplastycznienia składającego się z czterech czujników odkształceń (1, 2, 3, 4) oraz jednego czujnika temperatury (T_1); M – materiał nośny,

fig. 14 – trzy rozety tensometryczne I, II oraz III utworzone z wieloczujnikowej rozety pomiarowej, w przykładzie rozeta ma pięć czujników odkształceń 1, 2, 3, 4, 5 umieszczonych na wspólnym podłożu nośnym; czujniki 1, 2, 3 tworzą rozetę nr I, czujniki 3, 4, 5 tworzą rozetę nr II, czujniki 2, 3, 4 tworzą rozetę nr III; możliwe jest wybieranie kolejnych rozet składających się z czujników np. 1, 4, 5 lub 2, 4, 5 czy 1, 3, 5.

Wszystkie znane sposoby monitorowania stanu technicznego elementów konstrukcyjnych (SHM Structural Health Monitoring), których zadaniem jest wskazanie stanu wyężenia monitorowanych elementów, wymagają znajomości geometrii, charakterystyk wytrzymałościowych materiału oraz początkowego stanu wyężenia.

Monitorowanie zmian stanu technicznego elementów jest możliwe dopiero po zainstalowaniu na tych elementach czujników, czyli od momentu rozpoczęcia obserwacji. Czujniki rejestrują zmiany monitorowanych wielkości, które niosą informacje o zmianie naprężeń występujących w monitorowanym elemencie. Mogą to być np. odkształcenie, histereza magnetyczna, przewodność elektryczna lub inne w zależności od użytej techniki monitorowania. Określenie stanu wyężenia materiału dokonywane jest na podstawie modelu matematycznego i odpowiednich obliczeń. Wyężenia elementu do tej pory nie da się zmierzyć. Bez znajomości rodzaju materiału i jego charakterystyki wytrzymałościowej, geometrii elementu, początkowego stanu wyężenia, oraz jego stanu technicznego (np. stopnia korozji) nie jest możliwe określenie stanu wyężenia monitorowanego elementu. Zagadnienie to zostanie przedstawione poniżej na przykładzie typowego wykresu rozciągania materiału z granicą plastyczności.

Na fig. 1 przedstawiono typowy wykres rozciągania materiału z granicą plastyczności, na którym A – koniec granicy proporcjonalności, B – granica plastyczności, C – granica wytrzymałości, D – zerwanie materiału. Dla materiałów bez widocznej granicy plastyczności punkt B będzie oznaczał umowną granicę plastyczności.

Przedstawiona na rysunku charakterystyka, dla rzeczywistego elementu może znacznie odbiegać od założeń teoretycznych.

Przykładowe zmiany charakterystyki mechanicznej materiału przedstawiono na fig. 2. Zmiany mogą być spowodowane przez szereg czynników np. zmiana przekroju materiału pod wpływem korozji, oddziaływanie wysokiej lub niskiej temperatury, oddziaływanie atmosfery gazowej, błędy w czasie produkcji materiału np. zły skład chemiczny.

Na fig. 3 przedstawiono przykładowe zmiany charakterystyki wytrzymałościowej (linia przerywana, linia kropkowa) względem charakterystyki wzorcowej (linia ciągła). Przedstawiono wpływ stanu

początkowego oraz nieznanymi rzeczywistej charakterystyki wytrzymałościowej elementu, na wartość wyężenia materiału dla tych samych zmierzonych wartości odkształceń ε_1 - ε_0 za pomocą znanych systemów monitorowania. W przypadku fig. 3a napężenia σ_1 w monitorowanym materiale znajdują się w zakresie pracy sprężystej, w przypadku fig. 3b przekroczyły granice plastyczności. Otrzymany wynik zależy od znajomości stanu początkowego materiału w którym rozpoczęto pomiary ε_0 . Dodatkową zmienną wpływającą na wyężenie elementu jest zmiana jego charakterystyki wytrzymałościowej spowodowana np. korozją materiału.

Przedmiotem wynalazku jest sposób i urządzenie w postaci detektora do wyznaczania momentu uplastycznienia materiału in situ, bez znajomości jego charakterystyki wytrzymałościowej, stanu technicznego oraz bez znajomości początkowego wyężenia materiału.

Rozwiązanie wg wynalazku pozwala na jednoznaczne wyznaczenie momentu, w którym materiał kończy pracę w zakresie odkształceń proporcjonalnych (granica proporcjonalności) i rozpoczyna pracę w zakresie odkształceń plastycznych. Metoda nadaje się szczególnie do zastosowania na konstrukcjach już istniejących, dla których wyznaczenie obecnego stanu technicznego oraz poznanie charakterystyk wytrzymałościowych materiału jest utrudnione lub niemożliwe. Możliwie jest również stosowanie tej metody na konstrukcjach nowobudowanych, na elementach jeszcze nie obciążonych.

Rozwiązanie polega na instalacji czujników odkształceń na monitorowanym elemencie i odpowiednio przeprowadzonej analizie uzyskanych danych pomiarowych. Konfiguracja czujników oraz sposób analizy danych pozwala na jednoznaczne wskazanie momentu osiągnięcia granicy plastyczności tylko na podstawie uzyskanych danych pomiarowych, niezależnie do stanu początkowego monitorowanego elementu oraz niezależnie od jego stanu technicznego i charakterystyk wytrzymałościowych, czego znane do tej pory rozwiązania przeznaczone do monitorowania stanu technicznego nie potrafią zrealizować. Osiągnięcie granicy plastyczności jest kluczowym momentem, w którym możliwe jest jeszcze odciążenie konstrukcji i uniknięcie jej katastroficznego zniszczenia.

Rozwiązanie wykorzystuje cechy charakterystycznej materiałów, jaką jest przejście z ich liniowej pracy (proporcjonalnej) do pracy nieliniowej, rozpoczynającej zakres odkształceń plastycznych materiału. Utrata przez monitorowany materiał proporcjonalności odkształceń, w momencie uplastycznienia, może zostać wykryta na podstawie pomiaru jego odkształceń.

W celu wykrycia uplastycznienia się materiału, na monitorowanym obszarze W , który poddany jest dowolnemu stanowi obciążenia, należy umieścić czujniki odkształceń ε_s w taki sposób, aby tworzyły one co najmniej dwie, obrócone względem siebie o dowolny, różny od zera kąt α , i dowolnie przesunięte względem siebie o wektor V rozety I i II do pomiaru dowolnego płaskiego stanu odkształceń (fig. 4). Rozety I i II, powstałe z czujników ε_s , służą do niezależnego wyznaczenia dwóch stanów odkształcenia na obszarze W . Minimalna liczba czujników odkształceń pozwalająca na wyodrębnienie dwóch rozet względem siebie obróconych to cztery.

Fig. 4 przedstawia przykład zastosowania metody dla sześciu czujników odkształceń – czujniki odkształceń ε_{s1} do ε_{s6} umieszczone na monitorowanym obszarze W , tworzą dwie rozety I i II do wyznaczenia dowolnego stanu odkształceń. Rozety obrócone są względem siebie o dowolny, różny od zera kąt α i dowolnie przesunięte względem siebie o wektor V .

Każda z powstałych rozet pozwala na niezależny pomiar stanu odkształcenia i/lub napężenia na monitorowanym obszarze W . Stan odkształcenia i/lub napężenia może zostać opisany np. odkształceniami głównymi ε_{1-I} , ε_{2-I} dla rozety I oraz ε_{1-II} , ε_{2-II} dla rozety II. (fig. 5).

Wyznaczone przez czujniki odkształceń rozety pozwalają na określenie niezależnych stanów odkształcenia i/lub napężenia dla każdej rozety.

Wykorzystując liniowy opis materiału (prawo Hooke'a, współczynnik Poissona) oblicza się np. przyrosty odkształceń głównych Δs_1 , Δs_2 i/lub przyrosty wartości naprężeń głównych $\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma_2$, w kolejnych chwilach czasu, dla wydzielonych rozet I oraz II. W zakresie liniowej, sprężystej pracy materiału, przyrosty odkształceń i naprężeń, wyznaczone w kolejnych chwilach dla każdej rozety, są względem siebie (pomiędzy rozetami) proporcjonalne. W momencie, gdy materiał rozpocznie pracę nieliniową, nieproporcjonalną, plastyczną, proporcjonalność przyrostów pomiędzy rozetami zanika. Wykrywanie uplastycznienia materiału polega na porównywaniu proporcjonalności, pomiędzy rozetami, stanów odkształcenia i/lub napężenia w kolejnych chwilach czasu. Porównanie stanów odkształcenia i/lub napężenia pomiędzy rozetami tworzy wskaźnik uplastycznienia. Cechą charakterystyczną wskaźnika uplastycznienia jest gwałtowna zmiana jego wartości w momencie uplastycznienia materiału w monitorowanym obszarze.

Fig. 6 przedstawia taką gwałtowną zmianę wartości wskaźnika uplastycznienia w momencie utraty liniowej pracy materiału (uplastycznienia).

Jeżeli na monitorowanym obszarze zostanie umieszczonych większa liczba czujników odkształceń tworzących więcej rozet tensometrycznych obróconych i przesuniętych względem siebie, na przykład trzy 3 rozety o oznaczeniach I, II oraz III, to wskaźniki uplastycznienia można wyznaczać dla dowolnie wybranych kombinacji rozet np. I i II, II i III, I i III lub wszystkich jednocześnie (fig. 8).

W takim przypadku detektor uplastycznienia składa się z co najmniej czterech czujników odkształceń położonych wzajemnie w taki sposób, aby czujniki odkształceń utworzyły co najmniej dwie rozety tensometryczne umożliwiające wyznaczenie płaskiego stanu odkształceń i/lub naprężeń w miejscu pomiaru. Przez rozetę tensometryczną należy rozumieć trzy czujniki odkształceń, które umieszczone na monitorowanym materiale w różnych, lecz znanych kierunkach, pozwalają na wyznaczenie płaskiego dowolnego stanu odkształceń i/lub naprężeń w miejscu pomiaru.

Jeden czujnik odkształceń może być częścią jednej lub wielu rozet tensometrycznych, z zastrzeżeniem, że dwie rozety, wykorzystane do wykrywania stanu uplastycznienia, stworzone z czujników odkształceń, nie mogą mieć więcej niż dwóch wspólnych czujników. Utworzone przez czujniki odkształceń rozety tensometryczne muszą być względem siebie obrócone o dowolny, różny od zera kąt. Rozety mogą być również przesunięte względem siebie o dowolny wektor.

Fig. 7 przedstawia przykład detektora uplastycznienia składającego się z czterech czujników. M – materiał nośny zapewniający znaną orientację czujników odkształceń względem siebie, 1, 2, 3, 4 – czujniki odkształceń ϵ_s , α_1 , α_2 , α_3 – wzajemne usytuowanie kątowe czujników względem siebie, O1, O2, O3 – punkty przecięcia kierunków. Cztery czujniki odkształceń pozwalają na wyodrębnienie dwóch rozet tensometrycznych. Rozeta I – czujniki 1, 2, 3. Rozeta II – czujniki 2, 3, 4. Wyodrębnione rozety są względem siebie obrócone i przesunięte.

Detektor uplastycznienia składający się z czterech czujników odkształcenia pokazany jest także na fig. 8. Detektor składa się z czterech czujników odkształceń ϵ_s (1, 2, 3, 4) usytuowanych względem siebie pod dowolnymi kątami, kierunki czujników mogą przecinać się w jednym lub dowolnych punktach (O1, O2, O3). Odległość czujników odkształcenia od punktu przecięcia kierunków jest dowolna. Cztery czujniki odkształcenia pozwalają na wyodrębnienie dwóch rozet tensometrycznych I i II, które są względem siebie obrócone o dowolny, różny od zera kąt.

Fig. 9 przedstawia przykład czujnika uplastycznienia składającego się z pięciu czujników odkształceń ϵ_s (1, 2, 3, 4, 5) o wspólnym punkcie (O1) przecięcia kierunków, Fig. 10 – przykład czujnika uplastycznienia składającego się z sześciu czujników odkształcenia o dwóch punktach (O1, O2) przecięcia kierunków. M – materiał nośny zapewniający znaną orientację czujników odkształceń względem siebie.

Czujniki odkształceń umieszczone są na wspólnym materiale nośnym (M), który pozwala na instalacji czujników odkształceń na badanym materiale w znanym położeniu geometrycznym względem siebie. Znajomość wzajemnego położenia czujników odkształceń względem siebie służy do wyznaczenia odkształceń głównych i/lub kierunków głównych pozwalających na opis stanu odkształcenia w miejscu pomiaru. Kształt oraz rozmiar materiału nośnego nie wpływa na sposób działania czujnika uplastycznienia i może być dowolny np. prostokątny, okrągły, owalny lub w dowolny sposób dopasowany do rozmieszczenia czujników (fig. 9). Materiał nośny czujnika, może być elementem uczestniczącym w przenoszeniu odkształceń z mierzonego materiału na czujniki odkształceń lub może być usuwany po zakończeniu instalacji czujników na badanym materiale, stanowiąc tylko materiał transportowy na czas instalacji.

Czujnik uplastycznienia może być dodatkowo wyposażony w jeden lub więcej czujników przeznaczonych do pomiaru zmian temperatury monitorowanego materiału w celu kompensacji wpływu temperatury na wskazania czujników odkształceń. Położenie czujnika temperatury jest dowolne w stosunku do czujników odkształcenia. Fig. 11 przedstawia przykład czujnika uplastycznienia składającego się z czterech czujników odkształceń ϵ_s (1, 2, 3, 4) oraz jednego czujnika temperatury (T1). M – materiał nośny.

Rozety tensometryczne wyodrębnia się z czujników odkształceń poprzez wybieranie do analizy po trzy czujniki tak, aby dwie wspólnie analizowane rozety miały nie więcej niż dwa czujniki wspólne. Na rysunku fig. 12 pokazano przykładowe wyodrębnianie rozet do analizy. Rozetę I tworzą czujniki 1, 2, 3, rozetę II – czujniki 3, 4, 5, rozetę III – czujniki 2, 3, 4. Możliwe jest również wybranie innych trójek czujników z zachowaniem warunku, aby dwie analizowane rozety miały co najwyżej dwa czujniki wspólne.

Fig. 12 przedstawia trzy rozety tensometryczne I, II oraz III utworzone z wieloczujnikowej rozety pomiarowej, w przykładzie rozeta ma pięć czujników odkształceń ϵ_s (1, 2, 3, 4, 5) umieszczonych na

wspólnym podłożu nośnym. Czujniki 1, 2, 3 tworzą rozetę nr I, czujniki 3, 4, 5 tworzą rozetę nr II, czujniki 2, 3, 4 tworzą rozetę nr III. Możliwe jest wybieranie kolejnych rozet składających się z czujników np. 1, 4, 5 lub 2, 4, 5 czy 1, 3, 5.

Czujniki odkształceń tworzące czujnik uplastycznienia mogą dokonywać pomiaru odkształceń materiału na zasadzie tensometrii elektrooporowej, pomiarów światłowodowych za pomocą siatek Bragga, czujników strunowych, czujników światłowodowych ciągłych DFOS, czujników indukcyjnych, pojemnościowych, piezoelektrycznych lub piezorezystancyjnych, magnetostrykcyjnych lub dowolnych innych umożliwiających pomiar odkształceń monitorowanego materiału.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób wykrywania momentu uplastycznienia materiału in situ przy monitorowaniu stanu technicznego obiektu, z wykorzystaniem czujników odkształceń pracujących na zasadzie tensometrii elektrooporowej, pomiarów światłowodowych za pomocą siatek Bragga, czujników strunowych, czujników światłowodowych ciągłych DFOS, czujników indukcyjnych, pojemnościowych, lub piezorezystancyjnych, **znamienny tym**, że
 - i. na monitorowanym obszarze (W) poddanym dowolnemu stanowi obciążenia, umieszcza się co najmniej cztery czujniki odkształceń (ϵ_s) stanowiące co najmniej dwie, obrócone względem siebie o dowolny różny od zera kąt (α) i dowolnie przesunięte względem siebie o wektor (V) rozety (I), (II) do pomiaru dowolnego płaskiego stanu odkształceń,
 - ii. kąt obrotu oraz przesunięcie rozet (I), (II) dobiera się tak, aby nie więcej niż dwa czujniki (ϵ_s) pomiędzy rozetami były do siebie równoległe lub leżały na tej samej prostej,
 - iii. wyznacza się odpowiednio co najmniej dwa stany odkształceń głównych (ϵ_1 , ϵ_2) i naprężeń głównych (σ_1 , σ_2) dla monitorowanego obszaru (A), przy czym
 - iv. monitorując obiekt oblicza się przyrosty wartości odkształceń głównych ($\Delta\epsilon_1$), ($\Delta\epsilon_2$) i/lub przyrosty wartości naprężeń głównych ($\Delta\sigma_1$), ($\Delta\sigma_2$), w kolejnych chwilach czasu, dla każdej wydzielonej rozety, które poniżej granicy plastyczności monitorowanego obszaru są proporcjonalne pomiędzy rozetami,
 - v. na tej podstawie wyznacza się wskaźniki uplastycznienia i monitorując obszar,
 - vi. wykrywa się granicę uplastycznienia w chwili zaniku proporcjonalności przyrostów czyli gwałtownej zmiany wartości wyznaczonych wskaźników uplastycznienia, normalnych dla stanu poniżej granicy uplastycznienia danego obszaru.
2. Sposób według zastrzeż. 1, **znamienny tym**, że dla większej liczby czujników (ϵ_s) wyodrębniających więcej rozet tensometrycznych obróconych i przesuniętych względem siebie, wskaźniki uplastycznienia wyznacza się dla dowolnie wybranych kombinacji par rozet lub dla wszystkich rozet jednocześnie.
3. Detektor wykrywania momentu uplastycznienia materiału in situ przy monitorowaniu stanu technicznego obiektu, pracujący na zasadzie tensometrii elektrooporowej, pomiarów światłowodowych za pomocą siatek Bragga, czujników strunowych, czujników światłowodowych ciągłych DFOS, czujników indukcyjnych, pojemnościowych, lub piezorezystancyjnych, **znamienny tym**, że składa się z co najmniej czterech czujników odkształceń (ϵ_s) położonych wzajemnie tak, aby czujniki odkształceń (ϵ_s) wyodrębniały co najmniej dwie rozety tensometryczne (I), (II) do wyznaczenia płaskiego stanu odkształceń i/lub naprężeń w miejscu pomiaru, przy czym rozetę tensometryczną stanowią trzy czujniki odkształceń (ϵ_s) umieszczone na monitorowanym materiale w różnych, lecz znanych kierunkach, jeden czujnik odkształceń może stanowić część jednej lub wielu rozet tensometrycznych ale dwie rozety, wykorzystane do wykrywania stanu uplastycznienia, stworzone z czujników odkształceń, nie mogą mieć więcej niż dwóch wspólnych czujników a ponadto utworzone przez czujniki odkształceń rozety tensometryczne są względem siebie obrócone o dowolny, różny od zera kąt α .
4. Detektor według zastrzeż. 3, **znamienny tym**, że rozety tensometryczne są przesunięte względem siebie o dowolny wektor (V).
5. Detektor według zastrzeż. 3, **znamienny tym**, że kierunki, na których umieszczone są czujniki odkształceń (ϵ_s) przecinają się w jednym lub dowolnych punktach (O1, O2, O3) zaś odległość czujników odkształcenia od punktu przecięcia kierunków jest dowolna.

6. Detektor według zastrzeż. 3, **znamienny tym**, że czujniki odkształceń (ϵ_s) umieszczone są na wspólnym nośniku (M), o dowolnym kształcie i materiale, usuwalnym lub nie po instalacji detektora na monitorowanym obiekcie.
7. Detektor według zastrzeż. 3, **znamienny tym**, że jest dodatkowo wyposażony w jeden lub więcej czujników (T1) przeznaczonych do pomiaru zmian temperatury monitorowanego materiału w celu kompensacji wpływu temperatury na wskazania czujników odkształceń (ϵ_s).

Rysunki

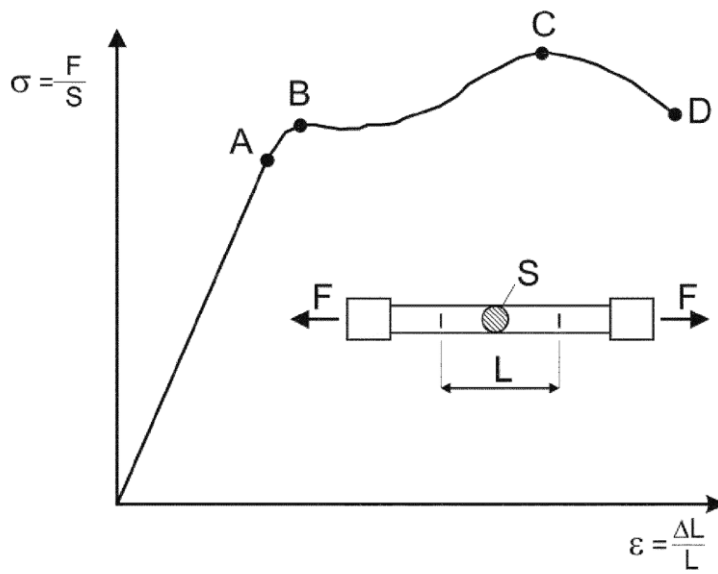


fig. 1

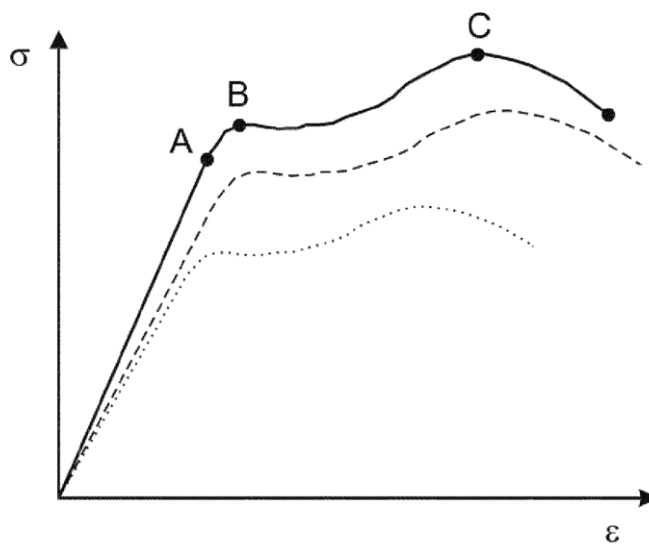


fig. 2

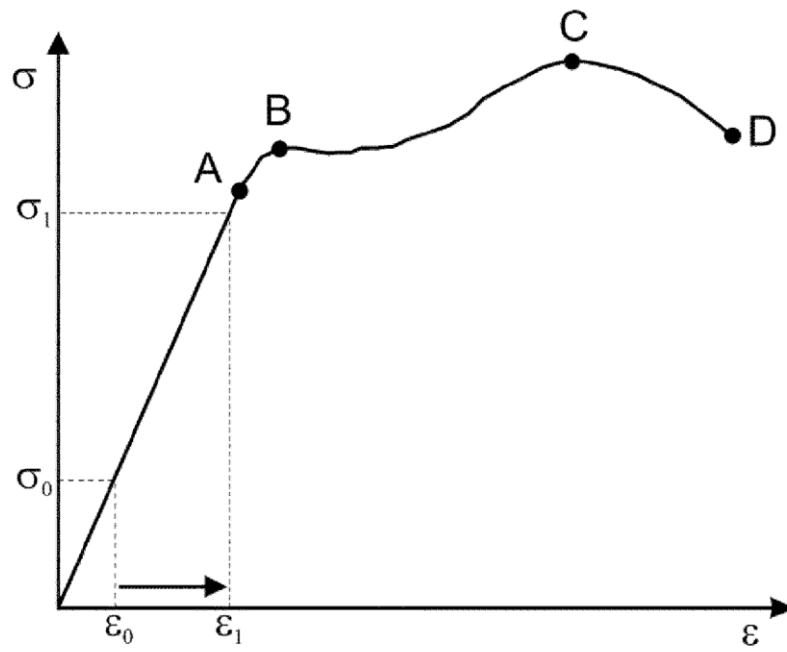


fig. 3a

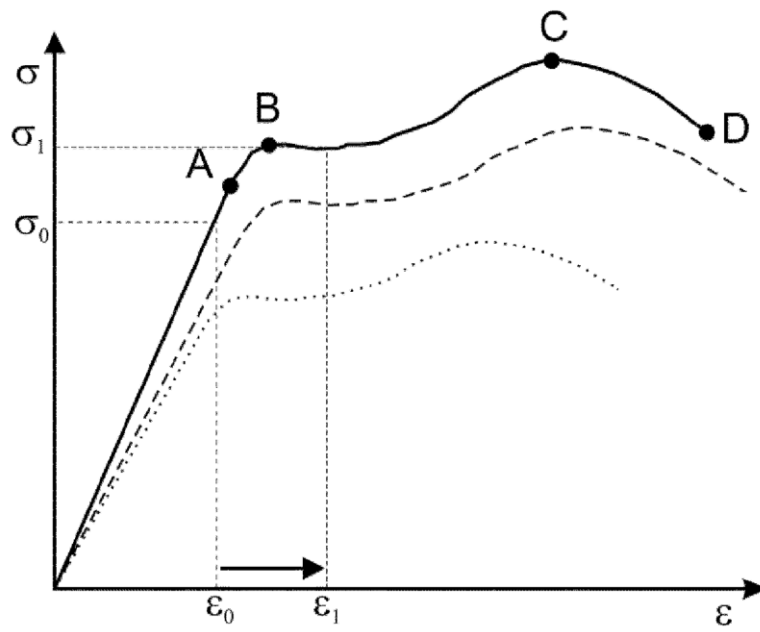


fig. 3b

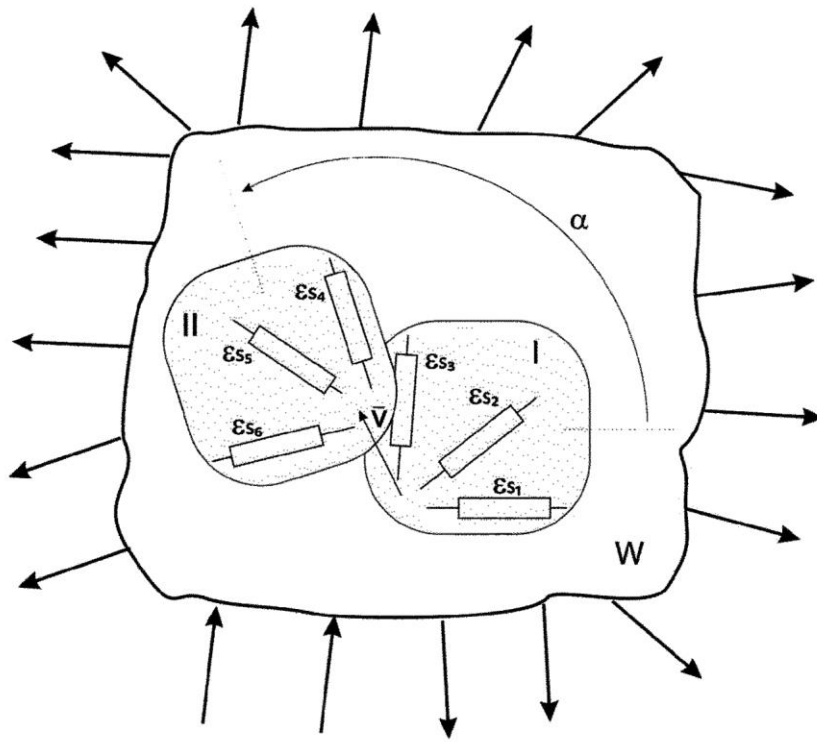


fig. 4

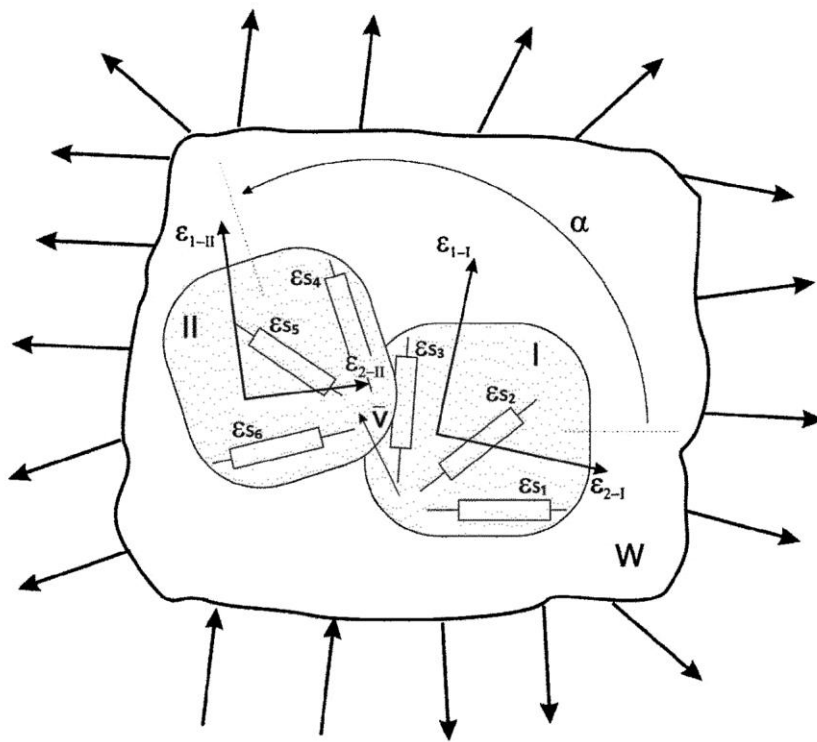


fig. 5

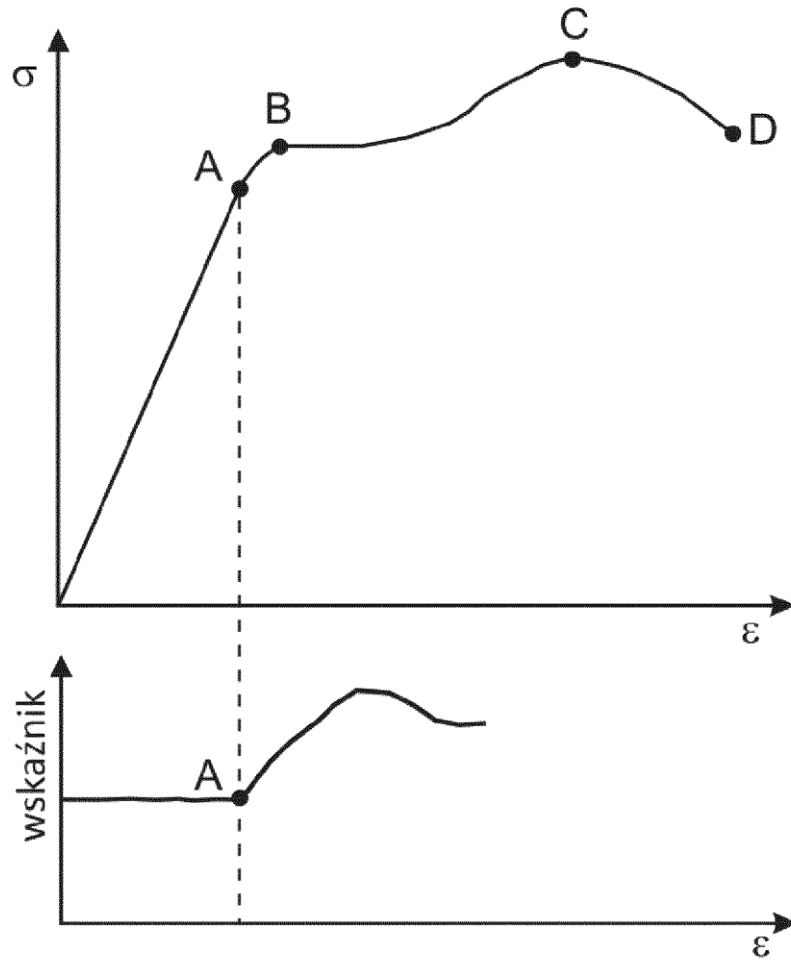


fig. 6

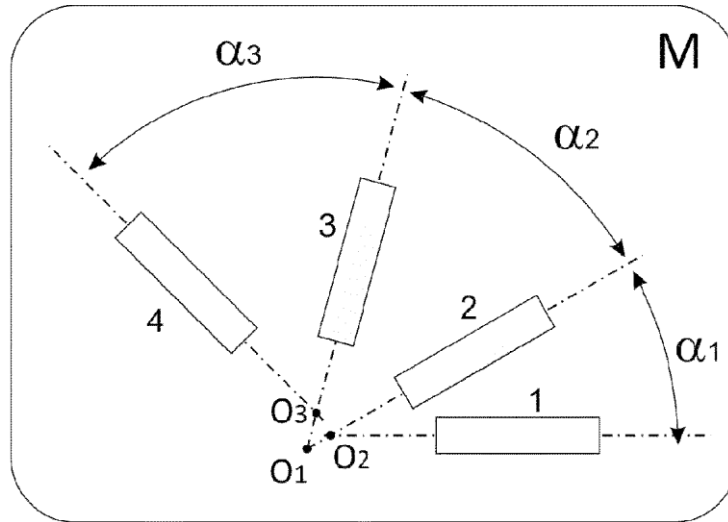


fig. 7

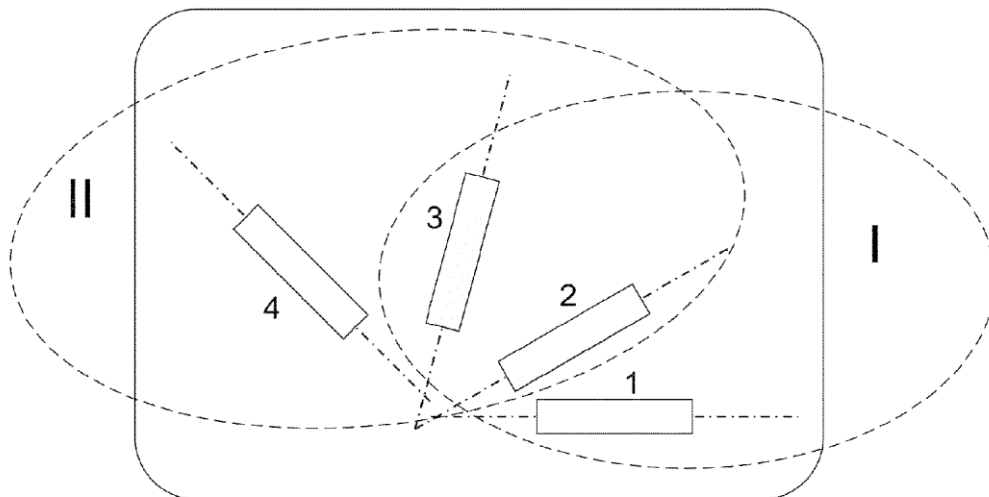


fig. 8

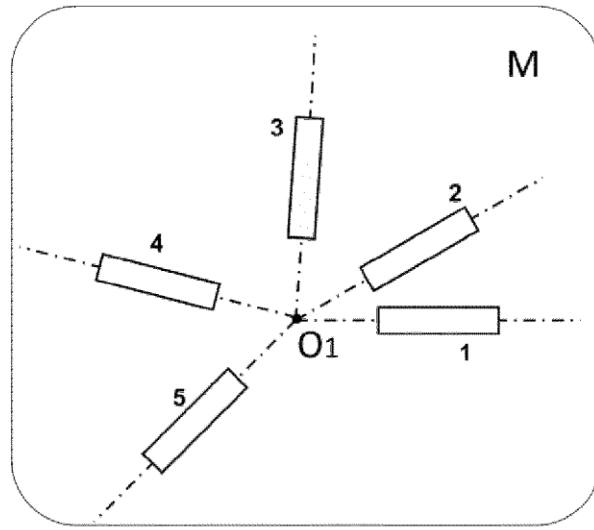


fig. 9

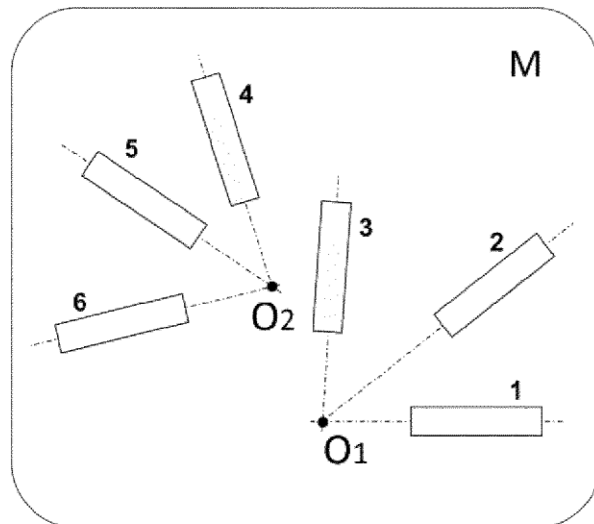


fig. 10

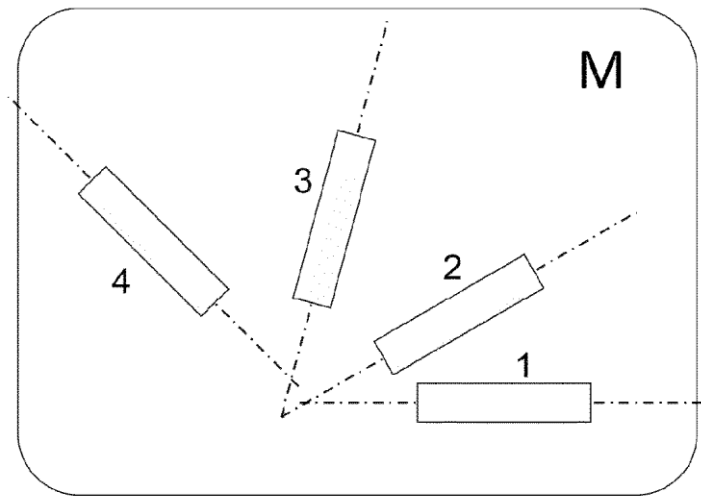


fig. 11

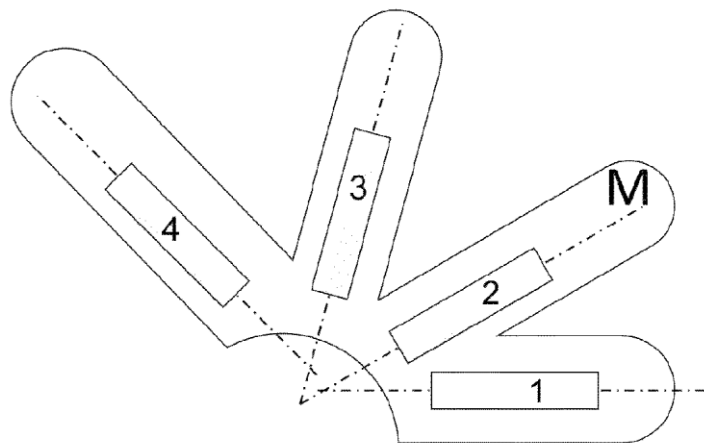


fig. 12

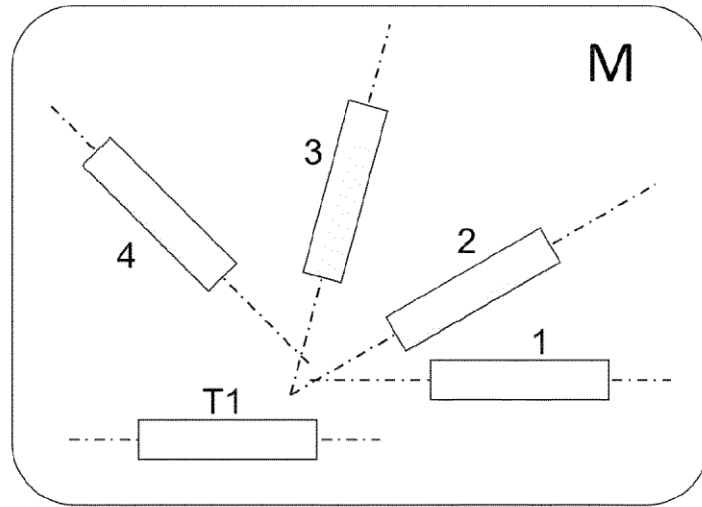


fig. 13

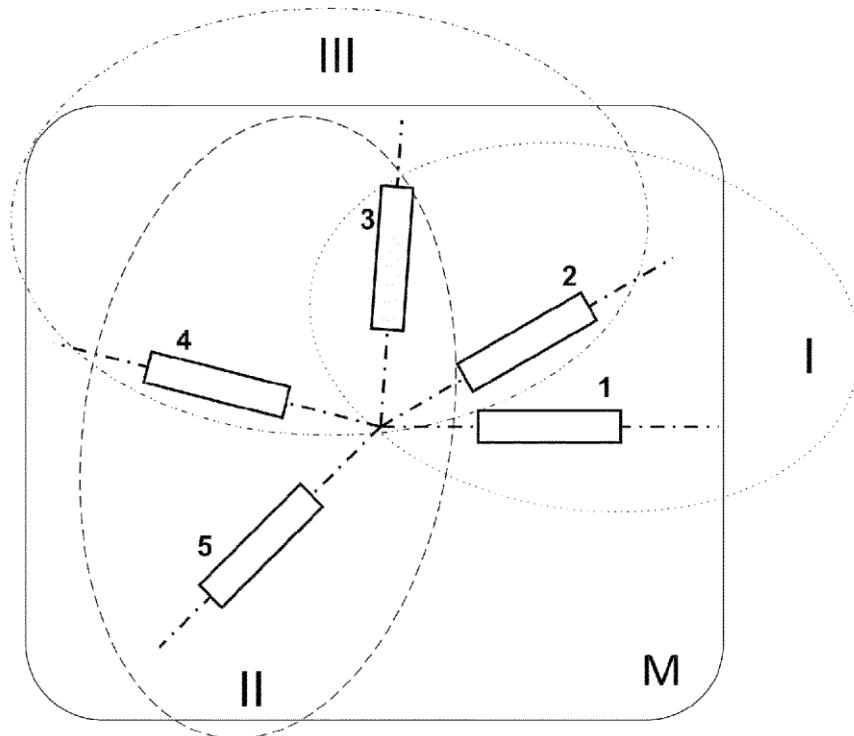


fig. 14