

# Nowa koncepcja przyrządu do pomiaru odkształceń ramion wykorbień wałów korbowych metodą symetryczną

A new concept of a device for crankshaft crank shoulder deformations measurements by means of the symmetrical method

KRZYSZTOF NOZDRZYKOWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.194>

English version available on: [www.mechanik.media.pl](http://www.mechanik.media.pl)

Prezentowano zgłoszone do opatentowania rozwiązanie konstrukcyjne przyrządu do pomiaru odkształceń wałów korbowych metodą symetryczną. Eliminuje ono szereg niedoskonałości i niedokładności wynikających ze stosowanej obecnie tradycyjnej wersji przyrządu do pomiaru odkształceń wałów korbowych i umożliwia poprawną ocenę ułożenia wału w łożyskach głównych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** pomiary, odkształcenia sprężyste, wały korbowe, silniki okrętowe

*The patent pending design of the crank shaft deformation measuring device by means of the symmetric method, was presented. The new solution eliminates imperfections and inaccuracies resulting from the method currently used for this purpose, and enables correct assessment of the crankshaft positioning in main bearings.*

**KEYWORDS:** measurements, deflection, crankshafts, marine engines

Eliminacja ugięć sprężystych dużych elementów maszyn, zwłaszcza elementów wiotkich o stosunkowo małych proporcjach wymiarów poprzecznych do długości, takich jak wały korbowe silników okrętowych, wymaga ich wielomiejscowego podparcia. Utrzymanie w granicach dopuszczalnych odchyłek wzajemnej współosiowości łożysk głównych, stanowiących miejsca podparcia wałów, warunkuje poprawne funkcjonowanie układu korbowo-łtokowego, a w rezultacie – całego silnika okrętowego. Cechą charakterystyczną wiotkich wielkogabarytowych wałów korbowych jest zmienna sztywność i wynikające stąd odkształcenia sprężyste zależne dodatkowo od warunków podparcia [1–3]. To znacznie utrudnia pomiary wałów korbowych i ich interpretację, ponieważ wyniki pomiarów są zaburzone odkształceniami sprężystymi mierzonego obiektu. W odniesieniu do wielkogabarytowych wałów korbowych właściwość ta jest jednak powszechnie wykorzystywana jako kryterium oceny stanu geometrycznego na etapie ich wytwarzania, jak również do oceny stanu łożyskowania wałów w korpusie dokonywanej okresowo w trakcie eksploatacji silnika [4, 5].

## Odształcenia sprężyste jako kryterium oceny stanu łożyskowania wałów korbowych

Najbardziej rozpowszechnionym sposobem pomiaru odkształceń sprężystych wału jest pomiar tzw. sprężynowania ramion wykorbień [4–8]. Pomiary sprężynowa-

nia są realizowane za pomocą czujnika przemieszczeń montowanego pomiędzy poszczególnymi wykorbieniami wału. Czujnik przemieszczeń w oprawce jest osadzony za pośrednictwem kłków w nawierceniach, wykonanych wcześniej w tym celu przez producentów wałów korbowych, na wewnętrznych powierzchniach czołowych ramion wykorbień. Jako miarę sprężynowania określanego w płaszczyźnie pionowej i poziomej przyjmuje się różnicę wskazań czujnika w dwóch wzajemnie skrajnych, przeciwnych położeniach wykorbień wału podczas jego obrotu (rys. 1).

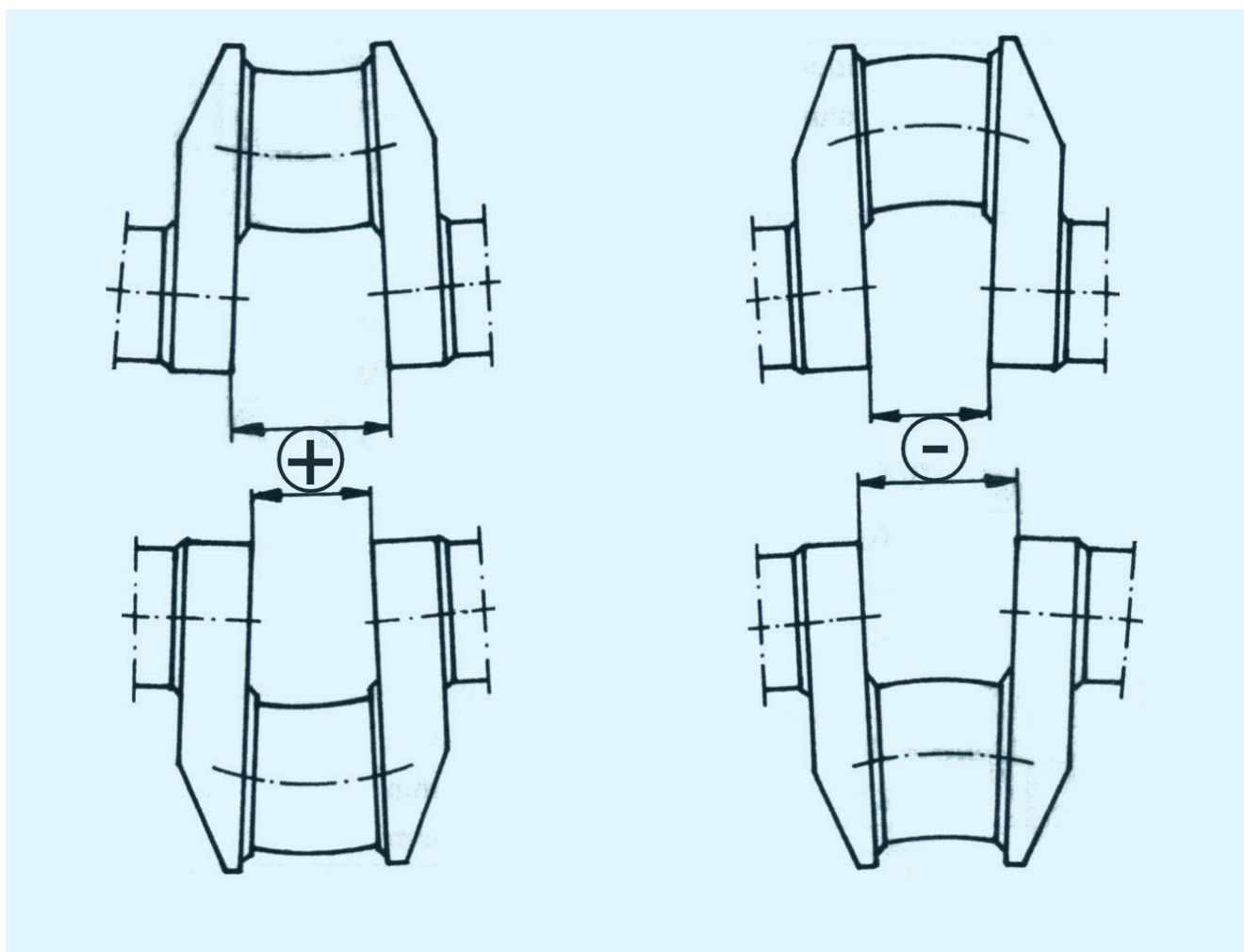
Zgodnie z podstawowym założeniem tego typu pomiaru (wynikającym ze sposobu i warunków jego realizacji) odkształcenia ramion wykorbień są symetryczne względem osi symetrii wykorbienia. Przyjmuje się też, że odkształcenia sprężyste wału są wynikiem wzajemnego przesunięcia osi czopów głównych wykorbienia i w przypadku przekroczenia dopuszczalnej wartości sprężynowania zaleca się podniesienie lub opuszczenie osi łożysk głównych sąsiadujących z danym wykorbieniem o połowę wyliczonej wartości sprężynowania.

Założenie to jednak rzadko znajduje odzwierciedlenie w rzeczywistości i prowadzi do błędnej interpretacji wyników pomiarów. Nie jest brane pod uwagę, że przyczyną odkształceń może być pogarszający się stan tylko jednego łożyska sąsiadującego z danym wykorbieniem. Trudno do zinterpretowania jest też wpływ wzajemnego oddziaływania odkształconych w różnym stopniu wykorbień na wartość sprężynowania. Mierzoną wielkością jest w rzeczywistości miejscowa zmiana odległości pomiędzy ramionami wykorbienia, a nie wielkość odkształceń ramion wykorbień.

Używane obecnie przyrządy pomiarowe, z uwagi na szereg niedoskonałości, mają ograniczone możliwości wykrywania odkształceń wykorbień. Występują takie deformacje wykorbień, przy których pomiary metodą tradycyjną nie wykażą odkształceń sprężystych [9]. Dotyczy to zwłaszcza nietypowych sytuacji, np. gdy osie czopów głównych sąsiadujących z danym wykorbieniem są przesunięte równolegle względem siebie czy też w przypadku symetrycznego lub niesymetrycznego przekoszenia ich osi.

Te spostrzeżenia zostały potwierdzone w badaniach symulacyjnych odkształceń zamodelowanego wału korbowego po wprowadzeniu możliwych do wystąpienia niedokładności w usytuowaniu jego czopów głównych [9, 10]. Analiza ta wykazała ponadto, że z uwagi na zmienną sztywność i nierównomierne rozmieszczenie środków ciężkości mas w kolejnych przekrojach poprzecznych występują nie tylko odkształcenia giętne wału, ale również skręcanie ramion wykorbień. Wyniki te świadczą więc, że mierzonej w danym położeniu kątowym wielkości

\* Dr hab. inż. Krzysztof Nozdrzykowski prof. AM w Szczecinie (k.nozdrzykowski@am.szczecin.pl) – Wydział Mechaniczny Akademii Morskiej w Szczecinie



Rys. 1. Przykłady różnych stanów odkształceń sprężystych wykorbienia wału

rozchylenia ramion wykorbień nie można traktować jako wielkości usytuowanej w płaszczyźnie pionowej lub poziomej, lecz należy ją uznać za wielkość usytuowaną przestrzennie.

### Konstrukcja przyrządu do pomiaru odkształceń ramion wykorbień wału korbowego

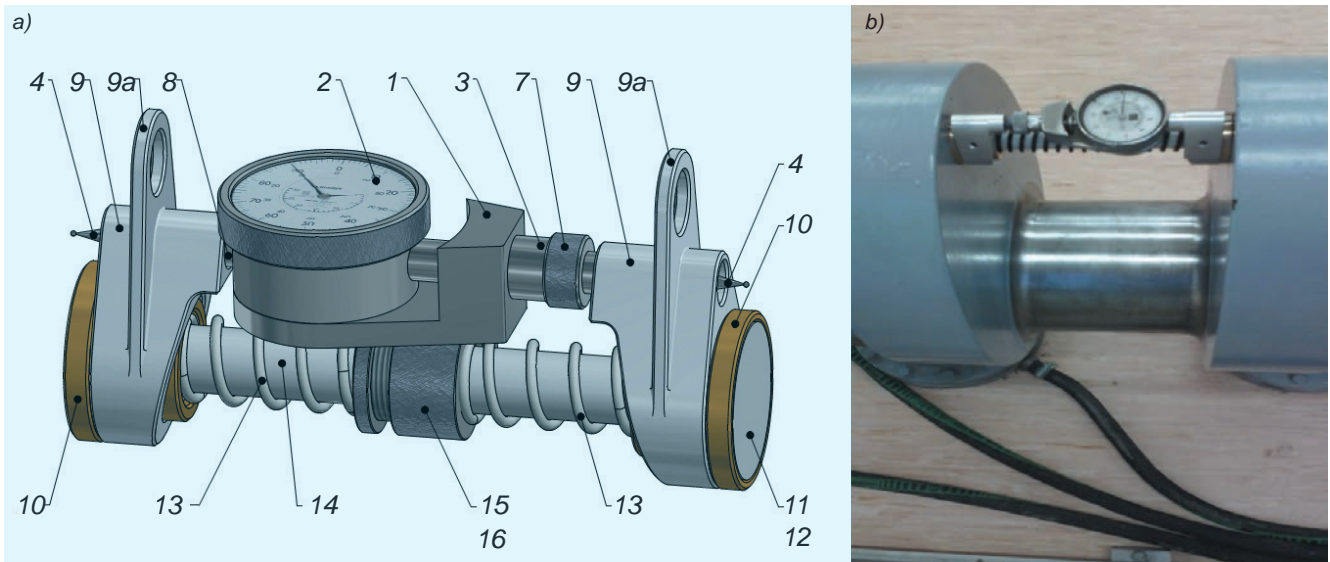
Przyjmując, że podstawą oceny wykonania i ułożenia wału w łożyskach głównych będą pomiary jego odkształceń, wykorzystano specjalnie opracowany przyrząd pomiarowy, stanowiący udoskonaloną wersję tradycyjnego przyrządu do pomiaru sprężynowania. Przyrząd ten (opis w zgłoszeniu patentowym [11]) umożliwia indywidualną ocenę odkształceń ramion wykorbień.

Bazę pomiarową stanowią kły, za pośrednictwem których przyrząd jest osadzony w nawierceniach, wykonanych przez producentów wałów na wewnętrznych powierzchniach czołowych ramion wykorbień. Ocena odkształceń odbywa się w kierunku prostopadłym do tej bazy. Zapewniają to nasadki będące zakończeniem trzpieni, w które zaopatrzone jest przyrząd pomiarowy. Nasadki są osadzone suwliwie na trzpieniach i dociskane siłą o stałej wartości do wewnętrznych powierzchni czołowych ramion wykorbień. Miarą odkształceń, rejestrowanych w sposób ciągły, są zmiany obwodowych nacisków występujących na powierzchniach czołowych okładzin nasadek. Pomiar odbywa się więc w układzie symetrycznym, w warunkach odpowiadających metodzie tradycyjnej. Okładziny nasadek są wykonane z materiału podatnego na odkształce-

nia sprężyste i zakończone czułą membraną do pomiaru nacisków powierzchniowych. Czujnik przemieszczeń – podobnie jak w metodzie tradycyjnej – pozwala na sumaryczny pomiar odkształceń ramion wykorbień. Analiza zeskanowanego obrazu nacisków powierzchniowych umożliwia z kolei (zgodnie z założeniami koncepcji przyrządu pomiarowego) indywidualną ocenę nieprostotałości wewnętrznych powierzchni czołowych ramion wykorbień względem osi symetrii wykorbienia i odpowiednie rozgraniczenie mierzonej wartości sprężynowania.

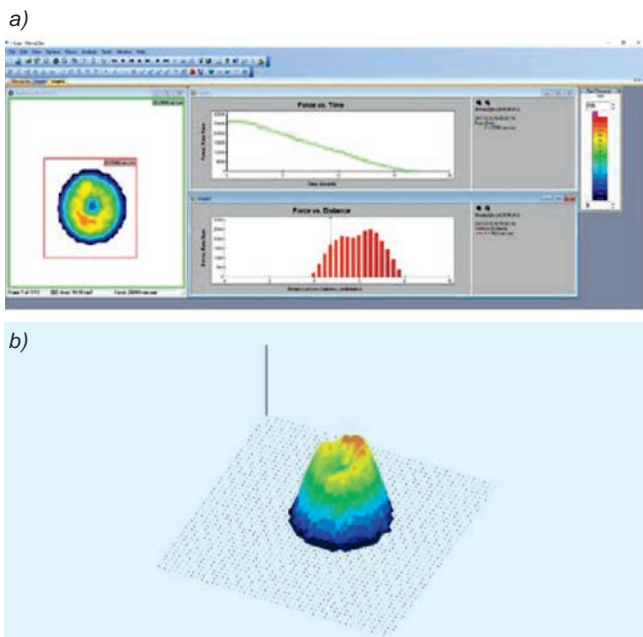
Przyrząd według koncepcji [11] (rys. 2a) ma korpus 1, do którego zamocowana jest obudowa czujnika przemieszczeń 2. Wstępnie przyjęto, że będzie to zegarowy czujnik przemieszczeń z osiowym przesuwem trzpienia pomiarowego (docelowo przewidywane jest zastosowanie małogabarytowego, indukcyjnego czujnika przemieszczeń z osiowym przemieszczeniem trzpienia pomiarowego, współpracującego przewodowo lub bezprzewodowo ze wskaźnikiem cyfrowym).

Korpus 1 jest zaopatrzone w trzpień stały 3. Trzpień pomiarowy czujnika i trzpień stały 3, usytuowane wzajemnie współosiowo, są zaopatrzone w końcówki 4 z kłami kulistymi. Trzpień stały 3 ma mechanizm śrubowy 7 do regulacji jego długości. Mechanizm ten umożliwia uzyskanie wstępnego napięcia czujnika, a jednocześnie gwarantuje pewne osadzenie i ustalenie przyrządu pomiarowego kłami kulistymi w nawierceniach wykonanych (przez producentów wałów korbowych) na wewnętrznych powierzchniach czołowych ramion wykorbień (rys. 2b).



Rys. 2. Nowa konstrukcja przyrządu do pomiaru odkształceń ramion wykorbień metodą symetryczną (a); przyrząd pomiarowy osadzony pomiędzy wykorbieniami wału (b)

Na zewnętrznej powierzchni walcowej trzpienia stałego 3 i części chwytowej 8 czujnika przemieszczeń 2 osadzone są suwliwie nasadki 9 z wkładkami dociskowymi 10. Uchwyty 9a nasadek dociskowych 9 ułatwiają montaż i pozycjonowanie przyrządu pomiarowego pomiędzy ramionami wykorbień wału. Powierzchnie czołowe wkładek dociskowych 10, zaopatrzonych w okładziny 11 wykonane z materiału podatnego na odkształcenia sprężyste, a jednocześnie nieulegającego odkształceniom trwałym, zakończone są czułą membraną 12 przeznaczoną do pomiaru nacisków powierzchniowych. Sprężyny 13 osadzone na przewodnicy 14 zapewniają stały docisk powierzchni czołowych okładzin 11 i membran 12 do pomiaru nacisków powierzchniowych do wewnętrznych powierzchni czołowych ramion wykorbień. Mechanizm śrubowy 15, 16 umożliwia regulację napięcia wstępnego sprężyn 13 i docisku nasadek 9. Docisk kulistych kłów ustalających 4 do nawierceń wykonanych na wewnętrznych powierzchniach czołowych ramion wykorbień i docisk powierzchni czołowych okładzin 11 zakończonych



Rys. 3. Przykład skanu nacisków powierzchniowych dla wybranego położenia kąтового wykorbienia (a); widok 3D rozkładu nacisków powierzchniowych (b)

czułą membraną do pomiaru nacisków powierzchniowych 12 do wewnętrznych powierzchni czołowych ramion wykorbień są realizowane niezależnie.

Wyniki pomiarów obwodowych nacisków powierzchniowych (zależnych od stanu odkształceń sprężystych okładzin 11) na styku membran 12 z wewnętrznymi powierzchniami czołowymi ramion wykorbień są zobrazowane na monitorze komputera w postaci mapy (skanu) nacisków powierzchniowych (rys. 3). Przekazywanie danych pomiarowych do pamięci komputera odbywa się bezprzewodowo.

Pomiary realizowane są podczas obrotu wału, co umożliwia obserwację zmian nacisków powierzchniowych w sposób dynamiczny. Na rys. 4 przedstawiono przykładowy rozkład nacisków powierzchniowych na styku membran z wewnętrznymi powierzchniami czołowymi ramion wybranego wykorbienia dla czterech kolejnych położenia kątowych wału, przy zmianie jego usytuowania co  $90^\circ$ .

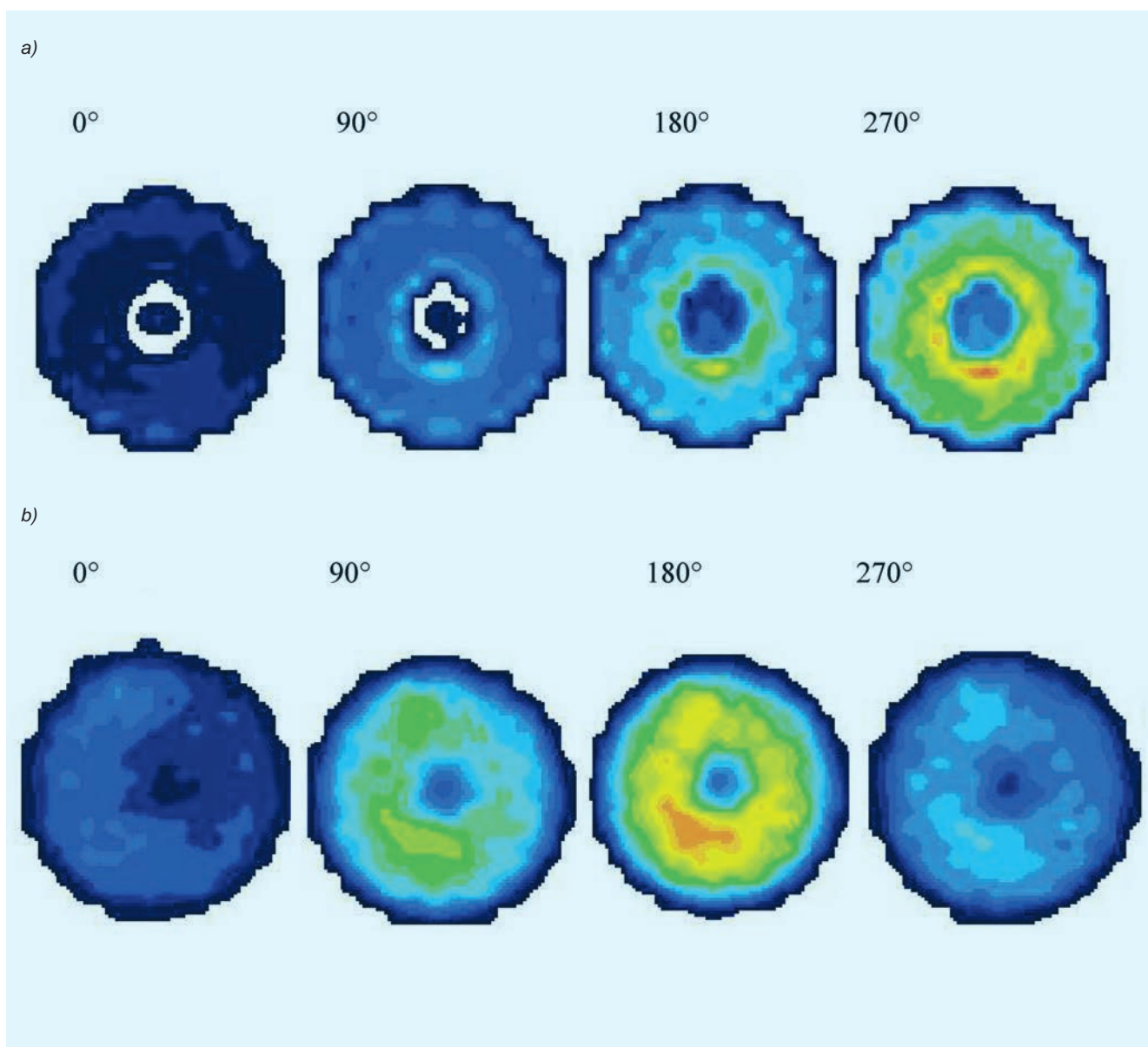
Sposób pomiaru jest zbliżony do pomiarów tradycyjnych, ale rejestracja danych odbywa się w sposób ciągły w zakresie kąta obrotu wału, przy którym pomiar jest możliwy:

- w przypadku zdemontowanego układu korbowo-łokowego – w pełnym zakresie kąta  $360^\circ$ ,
- w przypadku niezdemontowanego układu korbowo-łokowego – w zakresie kąta odpowiadającego dwóm skrajnym położeniom przyrządu pomiarowego bliskim trzonu korbowodu.

Na podstawie analizy wyników z zastosowaniem komputerowych technik opracowania danych można określić wzajemne usytuowanie osi poszczególnych czopów głównych sąsiadujących z danym wykorbieniem. Dla zaproponowanej koncepcji pomiarów opracowana została też procedura interpretacji wyników, w myśl której, tworząc w dalszej kolejności łańcuch powiązanych ze sobą odkształconych wykorbień, można wyznaczyć linię ugięcia wału, a następnie w oparciu o te pomiary skorygować ustawienie łożysk w celu wyeliminowania jego deformacji.

## Podsumowanie

Badania przeprowadzone na obiekcie rzeczywistym wykazały, że połączenie proponowanego układu pomiarowego z pomiarem tradycyjnym umożliwia poprawną ocenę



Rys. 4. Rozkład nacisków powierzchniowych przy zmianie położenia kąтового wału co 90°: a) lewa strona wykorbienia, b) prawa strona wykorbienia

stanu łożyskowania wałów korbowych. Czujnik przemieszczeń mierzy sumaryczną wartość odkształceń ramion wykorbień, natomiast współpracujący z nim układ pomiaru obwodowych nacisków powierzchniowych umożliwia (zgodnie z zasadą proporcjonalności odkształceń sprężystych do przyłożonego obciążenia) indywidualne, ilościowe rozgraniczenie mierzonej wartości sprężynowania, proporcjonalnie na sąsiadujące ze sobą ramiona wykorbień. Przedstawiona koncepcja przyrządu i procedura pomiarowa mogą być stosowane do oceny stanu geometrycznego wielkogabarytowych wałów korbowych na etapie ich wykonania, jak również do okresowej oceny stanu łożyskowania wałów korbowych w trakcie eksploatacji silnika.

#### LITERATURA

- Jěrábek K., Vondráčková T., Voštová V. "Increase of the effective production of crankshafts for ship engines". *Naše More*. 63, 4 (2016): s. 283–288.
- Dubina S. "Design of control system and power levelling rest for the elastic deformation of the crankshaft in the establishment of a working". *Vědecké spisy Fakulty strojí, Edice: Autoreferáty disertačních prací*. 254 (2014). Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojí.
- Vondráčková T., Voštová V. "Methodical Procedure of Fleet Renewal". *Production. Management and Engineering Sciences*. Leiden: CRC Press. (2016): s. 571–576.
- Łukomski Z. „Technologia spalinowych silników kolejowych i okrętowych”. Warszawa: WKiŁ, 1972.
- Piaseczny L. „Technologia naprawy okrętowych silników spalinowych”. Gdańsk: WM, 1992.
- [www.iims.org.uk/engine-crankshaft-deflection-measurement-news-hound](http://www.iims.org.uk/engine-crankshaft-deflection-measurement-news-hound).
- [www.linkedin.com/diesel-engine-crankshaft-deflection-measurement-mahmoud-moghtaderi/](http://www.linkedin.com/diesel-engine-crankshaft-deflection-measurement-mahmoud-moghtaderi/).
- Nozdrzykowski K. "Prevention of elastic strains in flexible large size machine parts with the use of elastic support". *Machine Dynamics Research*. 39, 2 (2015): s. 11–122.
- Nozdrzykowski K. „Metodyka pomiarów geometrycznych odchyłek powierzchni walcowych wielkogabarytowych elementów maszyn na przykładzie wałów korbowych silników okrętowych”. Szczecin: Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2013.
- Nozdrzykowski K., Grządziel Z. "Simulation test and measurements of crankshaft deformation by the symmetric method". *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 42, 114 (2015): s. 33–37.
- Nozdrzykowski K. "Przyrząd do pomiarów odkształceń, zwłaszcza wałów korbowych, oraz sposób pomiaru odkształceń wałów korbowych". Numer zgłoszenia patentowego P.419988, zgłoszono 12/2016.