

Hybrydowy stabilizator wibracyjny - przełom w systemach technologicznych

Technologia stabilizacji wibracyjnej na trwałe znalazła swoje miejsce w praktyce przemysłowej. Polega na wprowadzeniu w drgania konstrukcji po spawaniu lub odlewaniu w celu ustabilizowania ich wymiarów. Najkorzystniejsze jest prowadzenie zabiegu przy wymuszeniu dynamicznym o częstotliwości rezonansowej. Tam, gdzie zachodzi potrzeba usuwania skutków oddziaływania naprężeń technologicznych (spawalniczych, odlewniczych lub innych), technologia ta doskonale zdaje egzamin, szczególnie w aspekcie stabilności wymiarowej konstrukcji poddawanych dalszej, dokładnej obróbce mechanicznej.

Częstym problemem pojawiającym się po obróbce mechanicznej wykonanej bez żadnych dodatkowych zabiegów są błędy kształtu. Należą do nich błędy liniowości, płaskości prostopadłości, owalizacja itp. Najskuteczniejszym, ale najkosztowniejszym i bardzo energochłonnym zabiegiem powodującym ustabilizowanie się wymiarów jest wyżarzanie odprężające. Na początku lat 60. w krajach wysoko rozwiniętych, takich jak USA, Wielka Brytania, RFN, Rosja itp., rozpoczęto prace w celu wykorzystania drgań mechanicznych w celu stabilizacji wymiarowej, nie tylko w stosunku do konstrukcji odlewanych, ale również spawanych. Przyczyną podjęcia tych prac był kryzys energetyczny i jego konsekwencje w postaci znacznego wzrostu cen nośników energii.

Stabilizacja może być stosowana przy produkcji konstrukcji spawanych i odlewanych oraz w budowie maszyn, gdzie wymagana jest wysoka dokładność po obróbce mechanicznej. Zabieg stabilizacji wibracyjnej nie może natomiast być stosowany w przypadku konstrukcji, w których istnieje konieczność redukcji naprężeń własnych (np. zbiorniki ciśnieniowe, rurociągi, konstrukcje, w których redukcja naprężeń warunkuje podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej lub odporność korozyjną). W efekcie stosowania zabiegów wibracji uzyskuje się stabilność wymiarową zbliżoną do stabilności uzyskanej w rezultacie starzenia naturalnego. Najlepsze wyniki w postaci stabilności wymiarowej można uzyskać w przypadku konstrukcji maszynowych, takich jak korpusy przekładni, podstawy maszyn, podstawy zespołów napędowych, korpusy silników elektrycznych i generatorów, elementy maszyn hutniczych (manipulatory walcownicze, elementy samotoków - ramy oraz belki nośne maszyn do obróbki skrawaniem, wieńce kół zębatach dużych i średnich mocy itp.).

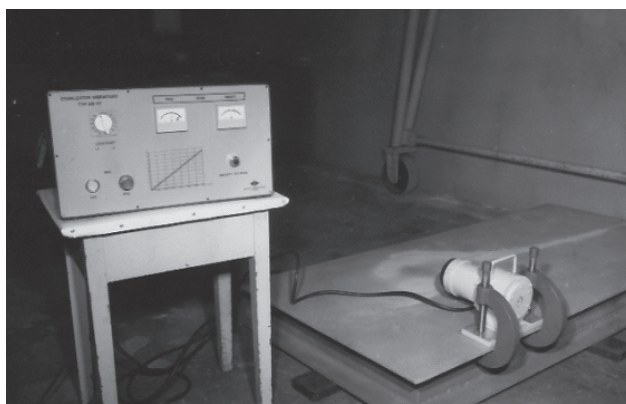
Stabilizacja wibracyjna stosowana jest w celu uniknięcia odkształceń po obróbce skrawaniem, natomiast nie może być użyta przy eliminowaniu odkształceń, które wystąpiły w czasie procesów spawalniczych, tzn. nie likwiduje odkształceń, które w konstrukcji już istnieją. Skuteczność stabilizacji wibracyjnej zależy od gatunku materiału, z jakiego wykonana jest konstrukcja przeznaczona do stabilizacji. Najlepsze efekty uzyskuje się w przypadku następujących materiałów:

- stale niskowęglowe i niskostopowe o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych,

- stale do ulepszenia cieplnego (hartowane i odpuszczane),
- stale stopowe: martenzytyczne, ferrytyczne i austenityczne,
- żeliwa konstrukcyjne.

W przypadku stopów niklu, aluminium i tytanu poddanych procesom umocnienia odkształceniowego lub utwardzenia dyspersyjnego, skutek stabilizacji wibracyjnej jest mniejszy.

W Instytucie Spawalnictwa od lat osiemdziesiątych XX wieku kolejne generacje systemów do stabilizacji wibracyjnej konstrukcji są z powodzeniem opracowywane i wdrażane w przemyśle. Pierwsze systemy oparte na napędzie prądu stałego miały możliwość wzbudzania drgań o częstotliwości do 100 Hz (rys. 1).

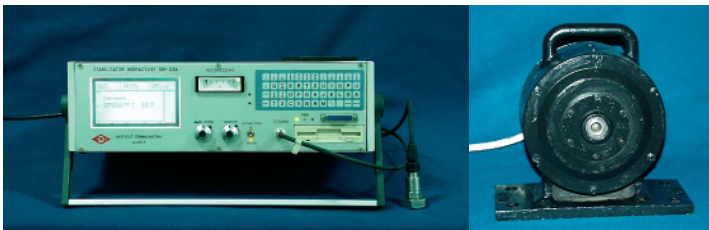


Rys. 1. Stabilizator wibracyjny SW01 (lata 80.)

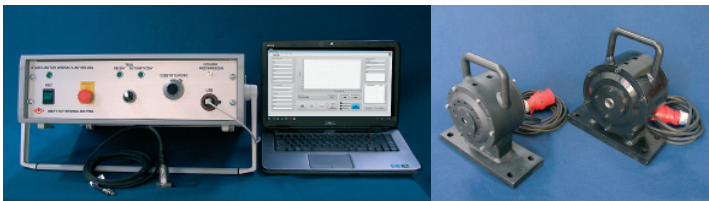
Kolejne urządzenia (typu SW-3A), wyposażone w układy napędowe prądu przemiennego - przekształtniki częstotliwości (falowniki), współpracujące z motowibratorami asynchronicznymi o częstotliwości do 100 Hz, charakteryzowały się znacznie dłuższą żywotnością (rys. 2). Po raz pierwszy wykorzystano pomiar amplitudy przyspieszeń jako sprzężenia zwrotnego do strojenia częstotliwości rezonansowej. Pozwoliło to na stworzenie procedury automatycznego „szukania” częstotliwości rezonansowej. Precyzyjnie regulowany wzrost częstotliwości i elektroniczne rejestrowanie wartości amplitudy przyspieszeń wykorzystano do strojenia częstotliwości rezonansowej stabilizowanego obiektu. Proces stabilizacji przebiega później przy wyznaczonych częstotliwościach. Automatyczna rejestracja i analiza sygnału amplitudy w funkcji częstotliwości daje również możliwość monitorowania stanu stabilizowanego obiektu. Pojawiające się różnice w wartościach amplitud zarejestrowanych podczas skanowania przed procesem stabilizacji i wartości amplitud wyznaczonych po procesie stabilizacji są sygnałem wykonania procesu.

Opracowany system 5. generacji (SW-05A z napędem elektrycznym) rozszerzył możliwości technologiczne urządzenia do częstotliwości 200 Hz, osiągając tym samym kres możliwości wynikających ze specyfiki napędu elektrycznego (rys. 3).

Systemy technologiczne przeznaczone do stabilizacji wibracyjnej w miejsce do wyżarzania odprężającego mają



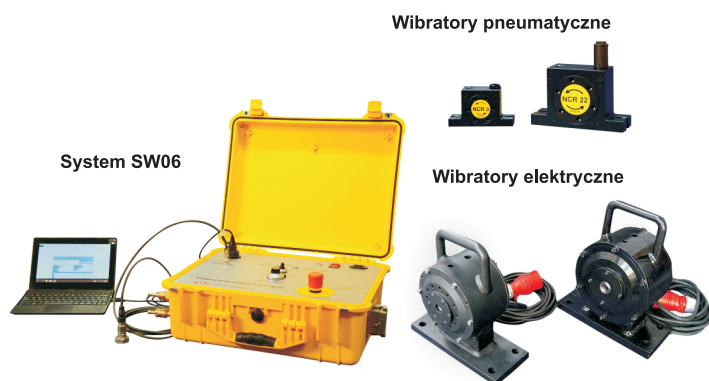
Rys. 2. Stabilizator wibracyjny SW03A produkowany od roku 1995



Rys. 3. Stabilizator wibracyjny SW05A z motowibratorami SW02 i SW03

jeszcze jedną znaczącą przewagą. W odróżnieniu od pieców przemysłowych są mobilne. Proces technologiczny można zrealizować w dowolnym miejscu niekoniecznie w miejscu do tego specjalnie przeznaczonym. Niedogodnością dotychczasowych rozwiązań technologicznych był ograniczony zakres stosowania. Elementy o dużej sztywności i małych gabarytach charakteryzują się wysoką częstotliwością drgań własnych (rezonansową) i przez to stabilizowanie ich przy pomocy wibratorów o częstotliwości nawet do 200 Hz będzie mniej skuteczne. Pojawiła się zatem konieczność opracowania systemu, który zapewniałby wyższą częstotliwość wymuszenia dynamicznego.

Jak już wspomniano, motowibratory elektryczne o częstotliwości powyżej 200 Hz nie mogą być stosowane, zarówno ze względów elektrycznych, jak i mechanicznych. Należy więc wykorzystać inny rodzaj napędu wibratorów, który zapewni wyższą częstotliwość. Takim okazał się napęd pneumatyczny. Wibratory napędzane powietrzem pod ciśnieniem mogą osiągać znacznie wyższą częstotliwość niż motowibratory elektryczne. Mając na uwadze potrzebę zwiększania możliwości stabilizatorów wibracyjnych, w Instytucie Spawalnictwa opracowano i wdrożono do produkcji oryginalny, hybrydowy stabilizator wibracyjny oznaczony jako typ SW06, w którym wykorzystano napęd elektryczny i pneumatyczny. Pozwoliło to na znaczne podniesienie częstotliwości wymuszenia dynamicznego do nawet 700 Hz (rys. 4). Tym samym możliwa stała się stabilizacja wibracyjna elementów zwartych o dużej sztywności. Warto zwrócić uwagę, że na świecie produkowane są systemy, które



Rys. 4. Widok stabilizatora wibracyjnego SW06 w wersji hybrydowej

w większości są wyposażone w wibratory o częstotliwości do 100 Hz i tylko w dwóch przypadkach do 200 Hz. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom klientów, system SW06 może być dostarczany w kilku wersjach konstrukcyjno-technologicznych. Wersja elektryczna, w zależności od potrzeb, może być wyposażona w motowibrator SW02 o częstotliwości do 100 Hz lub motowibrator SW03 o częstotliwości do 200 Hz. Dostawa może być realizowana z jednym lub dwoma wymienionymi motowibratorami.

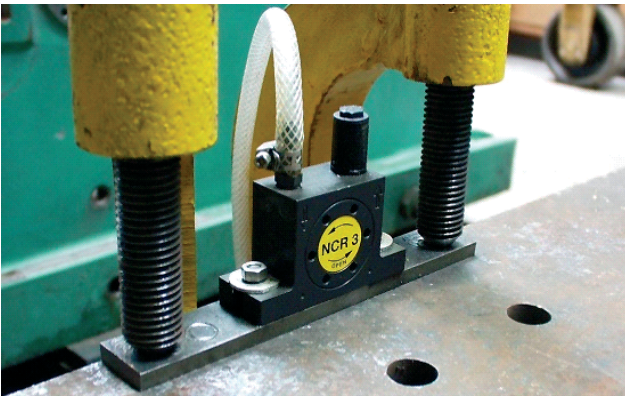
Wersja pneumatyczna standardowo wyposażona jest w wibrator turbinowy firmy Netter o częstotliwości do 200 Hz i wibrator wałeczkowy o częstotliwości do 700 Hz. Można zastosować inne typy wibratorów, niekoniecznie tej samej firmy, pod warunkiem spełnienia wymagań dotyczących wydatku i ciśnienia zasilania powietrznego. Wersja hybrydowa wyposażona jest w system elektryczny i pneumatyczny, oba umieszczone w jednej obudowie, sterowane wspólnym układem (rys. 4). W części elektrycznej do napędu motowibratora wykorzystano znaną już z poprzednich typów regulację częstotliwości przez zastosowanie przekształtnika częstotliwości (falownika). W części pneumatycznej zespół napędowy stanowi zawór proporcjonalny, który umożliwia precyzyjne sterowanie przepływem i ciśnieniem powietrza zasilającego wibratory pneumatyczne. W podstawowej wersji zastosowano dwa wibratory: wibrator firmy Netter typu NCT 108 napędzany jest turbiną powietrzną o maksymalnej częstotliwości 200 Hz przy zasilaniu ciśnieniem 6 barów (rys. 5). Przy takich parametrach napędowych maksymalna siła dynamiczna osiąga wartość ok. 8500 N. Wibra-



Rys. 5. Wibrator pneumatyczny turbinowy typu NCT 108

tor ten nie ma możliwości regulacji środka ciężkości masy obrotowej. Z kolei wibrator typu NCR 3 (tego samego producenta), również nieposiadający możliwości regulacji środka ciężkości, jest wibratorem rolkowym osiągającym maksymalną częstotliwość 700 Hz przy zasilaniu ciśnieniem 6 barów. Maksymalna siła dynamiczna, przy wspomnianych parametrach, wynosi ok. 2800 N (rys. 6).

Stabilizatory wibracyjne w kolejnych wersjach konstrukcyjnych znalazły swoje zastosowanie w przemyśle przy produkcji wielu wyrobów. Instytut Spawalnictwa nie tylko produkuje, ale i wdraża w przemyśle systemy do stabilizacji wibracyjnej.



Rys. 6. Wibrator pneumatyczny rolkowy typu NCR 3



Rys. 8. Podstawa hutniczego urządzenia ładunkowego

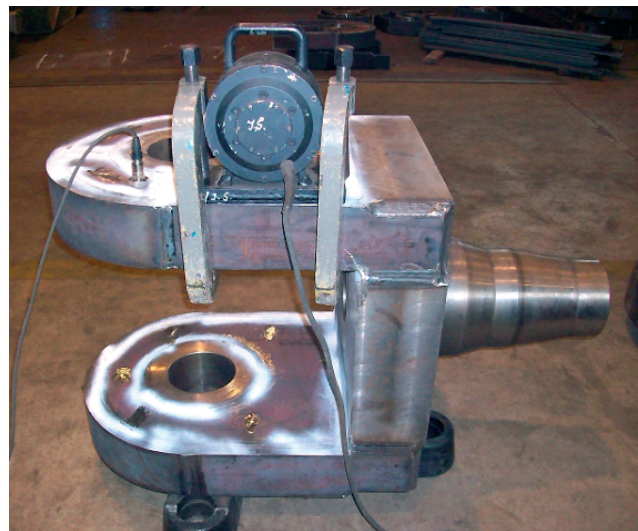
Ponadto znaczącym obszarem w dziedzinie stabilizacji wi-
bracyjnej jest świadczenie usług dla przemysłu. Daje to
możliwość nabywania doświadczeń praktycznych wykorzy-
stywanych później w rozwoju poszczególnych systemów.

Przedstawione przykłady zastosowania tej technologii
tworzą obraz jej możliwości i efektów. Elementy konstruk-
cji maszyn przemysłu hutniczego charakteryzują się znaczną
masą. Po wykonaniu prac spawalniczych, przed obróbką
mechaniczną, w miejsce wyżarzania odpężającego z po-
wodzeniem wykorzystywana jest stabilizacja wibracyjna,
której celem jest uzyskanie stabilności wymiarowej. Przy-
kładem może być belka nośna maszyny hutniczej o masie
ok. 3 t (rys. 7), która po spawaniu obrabiana jest w obszarze
podstawy (frezowanie i wiercenie otworów na śruby mocu-
jące). Kolejnym elementem maszyny hutniczej jest podsta-
wa urządzenia ładunkowego o masie 6 t, która jest obrabia-
na mechanicznie (płaszczyzny i otwory łożyskowe), a otwory
na łożyska poddawane są obróbce zgrubnej (rys. 8). Ele-
mentem zwartym i grubościennym jest jarzmo obrotowe ma-
szyny hutniczej o masie 2,5 t (rys. 9), które po spawaniu
było poddane zgrubnej obróbce mechanicznej. Zdarza się,
że elementy, w których przewiduje się duże odkształcenia
po obróbce mechanicznej, poddaje się podwójnej stabiliza-
cji wibracyjnej: bezpośrednio po wykonaniu prac spawal-
niczych i po wykonaniu obróbki zgrubnej.

Podstawa elementu taśmociągu w kopalni węgla brunat-
nego o masie 4,5 t jest obrabiana mechanicznie w kilku miej-
scach (obrabianie powierzchni styku z innymi elementami
i wiercenie otworów pod śruby mocujące). Stabilizacja wi-



Rys. 7. Belka nośna maszyny hutniczej



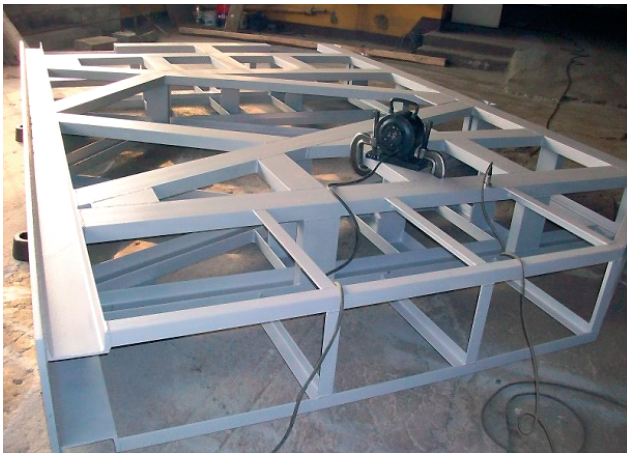
Rys. 9. Jarzmo obrotowe



Rys. 10. Podstawa elementu taśmociągu

bracyjna (rys. 10) pozwoliła uniknąć praco- i czasochł-
nych działań korygujących odkształcenia wtórne pojawia-
jące się po obróbce skrawaniem. Zastosowanie tu wyżarza-
nia wiązałoby się z dużymi trudnościami logistycznymi
i technicznymi.

Lekkie konstrukcje w postaci ram wykonane z elemen-
tów kształtowanych na zimno są podatne na odkształcenia
spawalnicze. Obróbka skrawaniem nawet niewielkich płaszczyzn
może spowodować wtórne odkształcenia w postaci owalizacji i
przesunięć otworów. Stabilizacja wibracyjna skutecznie temu
zapobiega (rys. 11).



Rys. 11. Wirnik wentylatora przemysłowego w wersji masywnej

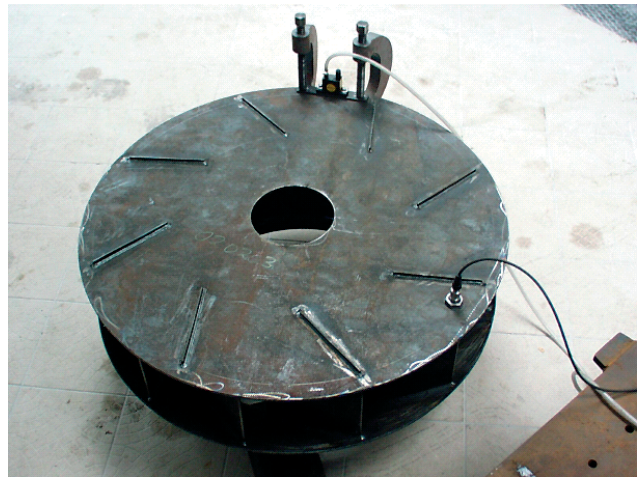
Wentylatory przemysłowe posiadają wirniki spawane. Konstrukcje wirników nie są konstrukcjami sztywnymi i w rezultacie są podatne na odkształcenia spawalnicze. Odkształcenia pojawiające się po spawaniu lub w czasie eksploatacji powodują błędy wyważenia i dodatkowe siły dynamiczne, co wpływa na przedwczesne zużycie łożysk i konieczność przedwczesnych remontów. Zastosowanie wyżarzania odprężającego do tak wiotkich konstrukcji może powodować wtórne odkształcenia i zwiększenie błędów wyważenia. Natomiast zastosowanie stabilizacji po spawaniu jest zabiegiem niezwykle skutecznym i stosowanym w wytwórniach wentylatorów. Mają tu zastosowanie procesy elektryczne i pneumatyczne (rys. 12 i 13).

Urządzenia próżniowe wytwarzane są ze stali austenitycznych. Bardzo ważną cechą jest szczelność instalacji. W przypadku pokryw, włazów i króćców stabilność wymiarowa, jako czynnik szczelności, jest ważnym parametrem eksploatacyjnym. Zastosowanie stabilizacji wibracyjnej w tego typu konstrukcjach daje pożądane rezultaty. Lekkie wibratory pneumatyczne znajdują tutaj szerokie zastosowanie (rys. 14).

Bębny wirówek dla przemysłu cukrowniczego, pracujące przy dużej prędkości obrotowej, wymagają wysokiej stabilności wymiarowej. Składają się one z dwóch zasadniczych elementów: płaszcza i piasty. Stabilizacja wymiarowa bębna została wykonana przy pomocy motowibratora elektrycznego (rys. 15a), a stabilizację piasty wykonano przy pomocy wysokoobrotowego wibratora pneumatycznego (rys. 15b).



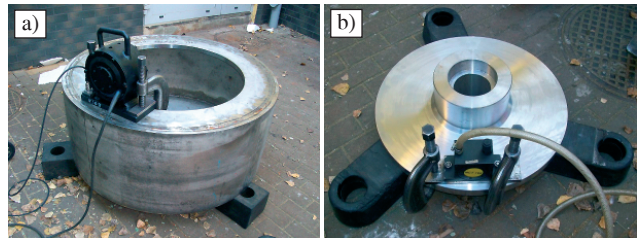
Rys. 12. Wirnik wentylatora przemysłowego w wersji masywnej (stabilizacja przy pomocy motowibratora elektrycznego)



Rys. 13. Wirnik typu lekkiego (stabilizacja przy pomocy wibratora pneumatycznego)



Rys. 14. Komora próżniowa (stabilizacja przy pomocy wibratora pneumatycznego)



Rys. 15. Bęben wirówki cukrowniczej
a) płaszcz bębna (stabilizacja przy pomocy motowibratora elektrycznego)
b) piasta bębna (stabilizacja przy pomocy wibratora pneumatycznego)

Przedstawione przykłady zastosowań stabilizacji wibracyjnej są dowodem dużych możliwości zastosowania tej technologii. Nowo opracowany system hybrydowy umożliwia wykorzystywanie procesów wibracyjnych w dużo większym zakresie. W przypadku zróżnicowanej asortymentowo produkcji jest to uzasadnione.

Hybrydowy system wysokiej częstotliwości do stabilizacji wibracyjnej został wyróżniony medalem Targów Kielce 2019 oraz złotym medalem 118. Międzynarodowych Targów Wynalazczości CONCOURS LÉPINE 2019 w Paryżu.

**Dr inż. Piotr Sędek, prof. IS,
mgr inż. Mariusz Welcel,
mgr inż. Krzysztof Kwieciński
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Spawalnictwa**