

Odprężanie wibracyjne – sposób na redukcję naprężeń resztkowych i stabilizację elementów metalowych

dr inż. Marek Majewski *

Streszczenie

Procesy produkcyjne takie jak spawanie, odlewanie, obróbka skrawaniem czy obróbka cieplna, wprowadzają do elementów obrabianych naprężenia resztkowe. Naprężenia te muszą być usuwane, gdyż powodują utratę wymiarów lub pękanie się konstrukcji oraz podatność elementów maszyn na pękanie, przyspieszoną korozję naprężeniową i niższą wytrzymałość zmęczeniową. Zastosowanie odprężania wibracyjnego redukuje naprężenia resztkowe do poziomu, przy którym konstrukcje metalowe są stabilne. Przedstawiono zasady prowadzenia procedury odprężania, przykład zabiegu w przemyśle pojazdów szynowych oraz dyskusję uzyskanych wyników. Wynika z nich celowość szerokiego wdrażania metody.

Wprowadzenie

Naprężenia resztkowe w metalach powstają w prawie każdym procesie technologicznym. Są nieodłącznie związane z przemianami fazowymi w procesach spawania i odlewania, ale występują także przy obróbce cieplnej i mechanicznej. Ich występowanie wpływa negatywnie na stabilność wymiarową konstrukcji, powodując w długim czasie jej odkształcenia (odkształcenia zwłoczne) a także zwiększając podatność na pękanie i korozję naprężeniową. Miejsca koncentracji tych naprężeń stanowią karby zmniejszające wytrzymałość zmęczeniową.

Od wielu lat klasycznym sposobem redukcji naprężeń resztkowych jest wyżarzanie odprężające. Mimo wyraźnych pozytywnych jego efektów istnieją pewne wady technologiczne związane z tym procesem. Należą do nich:

- Paczenie się konstrukcji podczas żarzenia, ponieważ likwidowane są wszystkie naprężenia (zarówno w zakresie mikro- jak i makroskopowym) oraz możliwe jest odkształcanie się konstrukcji pod własnym ciężarem.
- Naprężenia po prostowaniu, w przypadku, gdy występujące po żarzeniu odkształcenie likwidowane jest przez prostowanie na zimno.
- Naprężenia od nierównomiernego nagrzewania/stygnięcia – w przypadku, gdy wyżarza się ze zbyt krótkimi czasami nagrzewania, wytrzymywania lub studzenia.
- Utlenianie powierzchni, powstawanie zgorzeli w przypadku, gdy nie wyżarza się w atmosferze ochronnej lub w próżni i związana z tym konieczność dodatkowej obróbki polegającej na usuwaniu zgorzeli.
- Odwęglanie powierzchni, w przypadku niestosowania odpowiedniej atmosfery ochronnej.
- Efekt odpuszczania w przypadku stali ulepszanych z niską temperaturą odpuszczania.
- Kruchość w wyniku powstawania wytrąceń, które zmieniają własności mechaniczne i powodują powstawanie braków w wyniku pęknięcia konstrukcji.
- Pękanie podczas wyżarzania.

Nie bez znaczenia jest też aspekt ekonomiczny wyżarzania odprężającego. Wymaga ono doprowadzenia do wysokiej temperatury dużych mas metalu i wydatkowania znacznej ilości energii. Mówi się, że wszystkie żaraki w USA zużywają energię potrzebną do zasilania 8 mln. gospodarstw domowych.

Obok obróbki cieplnej przez lata rozwijały się inne metody stabilizacji.

Najstarsze i powszechnie znane jest sezonowanie. Polega ono na umieszczeniu elementu (zwykle odlewu) na odkrytej przestrzeni i poddaniu go działaniu czasu i zmiennych warunków pogodowych (głównie wahań temperatury). Procesy samoczynnej relaksacji naprężeń resztkowych przebiegają nieliniowo – szybciej na początku – i trwają nawet kilka lat. Przebieg tych zmian ciekawie ilustruje wykres

* Dr inż. Marek Majewski prowadzi Zakład Usług Technologicznych „WIBROPOL”, który od 1998 r. świadczy usługi odprężania wibracyjnego w przemyśle metalowym

na fig.1. Przedstawia on wynik badań odkształceń zwałoczných spawanych płyt poddanych sezonowaniu przez 800 dni. Potwierdza się tu, że najistotniejsze zmiany zachodzą w ciągu pierwszych dni po obróbce. Warsztatowa zasada mówi, że 80% odkształceń zachodzi podczas pierwszych 2 miesięcy sezonowania.

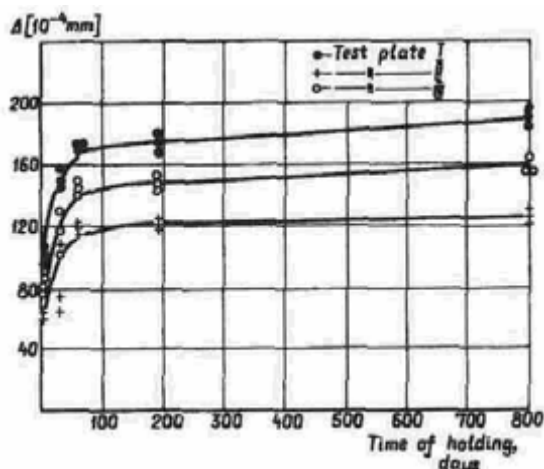


Fig. 1. Krzywa zmian odkształceń zwałoczných podczas naturalnego sezonowania [1].

Procesy samoczynnej relaksacji naprężeń przez sezonowanie są jednak zupełnie niekontrolowane i trwają zbyt długo, stąd mała ich przydatność we współczesnej technologii.

Innym sposobem wpływania na naprężenia resztkowe jest „młotkowanie”, czyli pobudzanie impulsowymi siłami fal naprężeń w masie elementu, lub śrutowanie. Śrutowanie oprócz oddziaływania dynamicznego zmienia stan naprężeń na powierzchni elementu (naprężenia ściskające na powierzchni i rozciągające tuż pod powierzchnią), zmniejszając podatność elementu na powstawanie pęknięć i wydłużając wytrzymałość zmęczeniową.

Także odkształcenie plastyczne na zimno powoduje stabilizację wymiarów. Klasycznym przykładem jest tu stosowanie prostownic rolkowych do prostowania obrabianych cieplnie (hartowanych) elementów liniowych. Po kilkukrotnym przegięciu wszystkie naprężenia resztkowe ulegają likwidacji dzięki odkształceniu plastycznemu.

Metoda wibracyjna

Obserwacja zjawiska stabilizacji elementów metalowych w wyniku poddania ich odkształceniom na zimno doprowadziła w latach 40 do powstania metody odprężania wibracyjnego. Polega ona na przyspieszonym sezonowaniu elementów maszyn i konstrukcji przez poddanie ich drganiom - głównie rezonansowym. Dzięki wymuszaniu różnych postaci drgań rezonansowych w całej objętości wibrowanego elementu zachodzi istotne zmniejszenie szczytowych naprężeń do poziomu, przy którym nie zachodzą już niekorzystne zjawiska.

Metoda ewoluuje przez ostatnie kilkadziesiąt lat i ze słabo znanej sztuki inżynierskiej stała się w niektórych branżach przemysłu metalowego procesem podstawowym. Jest stosowana jako alternatywa obróbki żarzeniem do odlewów i elementów spawanych. Zainteresowanie tą technologią wynika z jej względnej prostoty i taniości. Pewną przeszkodą w rozwoju metody jest brak szerokiego doświadczenia w przewidywaniu efektów odprężania wibracyjnego i brak prostych metod ilościowej oceny efektywności procesu.

Mechanizm relaksacji naprężeń w elementach metalowych poddanych drganiom badany i opisywany jest w literaturze od wielu lat, lecz brak jest jednoznacznej i akceptowanej przez wszystkich teorii zjawiska. Model standardowy – najlepiej tłumaczący zachodzące zjawiska – zakłada, że w wyniku superpozycji naprężeń dynamicznych wprowadzonych przez drgania z naprężeniami resztkowymi, dochodzi w miejscach koncentracji naprężeń resztkowych do lokalnego osiągnięcia granicy plastyczności i lokalnych mikroodkształceń plastycznych powodujących rozładowanie tych naprężeń. Dużą rolę odgrywa tu tzw. efekt Bauschingera. Przejawia się on wyraźnym obniżeniem granicy plastyczności w przypadku następujących po sobie naprężeń o zmiennym znaku. Procesy te w niewielkim stopniu wpływają na zmianę ogólnego kształtu elementu, wprowadzają go jednak w stan stabilny.

Istotą odprężania wibracyjnego jest zatem doprowadzenie obrabianego elementu do odkształceń dynamicznych. Najłatwiej tego dokonać pobudzając element do drgań rezonansowych. Wtedy częstotliwość siły wymuszającej zgodna jest z częstotliwością drgań własnych elementu i mimo ograniczonej mocy źródła wymuszenia możliwe jest doprowadzenie elementu do drgań, w których element wyraźnie się odkształca. Ten sposób zwany jest odprężaniem wibracyjnym rezonansowym.

Metoda wibracyjna ma wiele zalet w porównaniu z wyżarzaniem odprężającym:

- Może być stosowana na dowolnym etapie procesu technologicznego, np. tuż przed obróbką wykańczającą.
- Umożliwia stosowanie mniejszych naddatków technologicznych (brak zgorzeliny!).
- Umożliwia połączenie obróbki zgrubnej i półwykańczającej.
- Czas zabiegu ograniczony jest do kilkudziesięciu minut a nie kilkudziesięciu godzin, jak to jest przy wyżarzaniu.
- Jest niezastąpiona przy stabilizacji wymiarowej elementów regenerowanych np. przez spawanie lub napawanie.
- Nie pojawiają się żadne zmiany własności mechanicznych metali.
- Proces odprężania jest rejestrowany, a charakterystyki rezonansowe mogą służyć jako dokumenty w zakładowym systemie kontroli jakości.
- Wibrowane mogą być elementy o wadze od pojedynczych kilogramów do kilkuset ton - także konstrukcje rozległe.
- Koszt samej procedury odprężania wibracyjnego kształtuje się na poziomie ułamka kosztu wyżarzania.
- Możliwa jest obróbka elementów składających się z różnych metali.

Jak każda technologia odprężania wibracyjne ma też swoje ograniczenia. Należą do nich przypadki, w których:

- Element jest na tyle sztywny, że w zakresie pracy wibratora nie występują częstotliwości własne – wtedy kluczowe zjawisko odkształceń rezonansowych nie wystąpi.
- Element zawiera naprężenia powstałe w wyniku odkształceń na zimno
- Konieczne jest osiągnięcie zmian strukturalnych w materiale.

Obróbce wibracyjnej poddają się praktycznie wszystkie metale konstrukcyjne tzn.: stale węglowe, stale narzędziowe, żeliwo, staliwo, stal nierdzewna, stopy aluminium, metale egzotyczne jak stale duplex, złoto, magnez, sterylity, mosiądz, miedź.

Poddawanie elementów intensywnym drganiom może mieć wpływ na ich wytrzymałość zmęczeniową. Obawa przed ograniczeniem tej wytrzymałości bywa przeszkodą w stosowaniu odprężania wibracyjnego. W pracach na ten temat nie ma żadnych dowodów na to, że odprężanie wibracyjne pogarsza wytrzymałość zmęczeniową. Ciekawe informacje podaje praca [3] w poniżej cytowanych tabelach.

Table 3 - Fatigue lives of the as-welded and annealed samples - batch 1

As-welded sample				Annealed sample				Difference		
Max	Min	Avg	St dev	Max	Min	Avg	St dev	Min	Max	Avg
cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	%	%	%
279,000	233,000	260,800	19,200	212,500	85,170	147,000	52,500	-63	-24	-43

Table 4 - Fatigue lives of the as-welded and VSR treated samples - batch 1

As-welded sample				VSR treated sample				Difference		
Max	Min	Avg	St dev	Max	Min	Avg	St dev	Min	Max	Avg
cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	%	%	%
279,000	233,000	260,800	19,200	412,900	238,500	304,600	69,200	2	48	17

Table 5 - Fatigue lives of the as-welded, and VSR treated samples - batch 2

As-welded sample				VSR treated sample				Difference		
Max	Min	Avg	St dev	Max	Min	Avg	St dev	Min	Max	Avg
cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	%	%	%
282,800	216,200	241,100	27,000	414,000	256,000	314,500	55,800	2	46	30

Jak widać to wyzarczenie odprężające wpływa negatywnie na wytrzymałość zmęczeniową skracając długość życia elementu. Odprężanie wibracyjne wydłuża jego życie.

Oprzyrządowanie

Aby zrealizować zadanie pobudzania do drgań rezonansowych elementów metalowych konieczne jest dysponowanie układem generującym siły okresowe o zmiennej częstotliwości. Ponieważ metale cechuje stosunkowo niewielkie tłumienie materiałowe obszary rezonansów są stosunkowo wąskie. Wymaga to od układu wymuszającego wielkiej precyzji dopasowania częstotliwości siły wymuszającej do częstotliwości rezonansowej elementu. Do kontrolowania tego procesu stosowne muszą być zaawansowane układy sterowania – odpowiednie do rodzaju napędu wibratora.

Najczęściej używane w praktyce przemysłowej zestawy do odprężania wibracyjnego wykorzystują jako źródło siły elektrowibratory z wirującą masą bezwładną. Są one źródłem wirującej siły dynamicznej, o wartości zależnej od kwadratu prędkości obrotowej. Wykres pokazujący zmienność siły wymuszającej w funkcji obrotów pokazuje fig. 2.

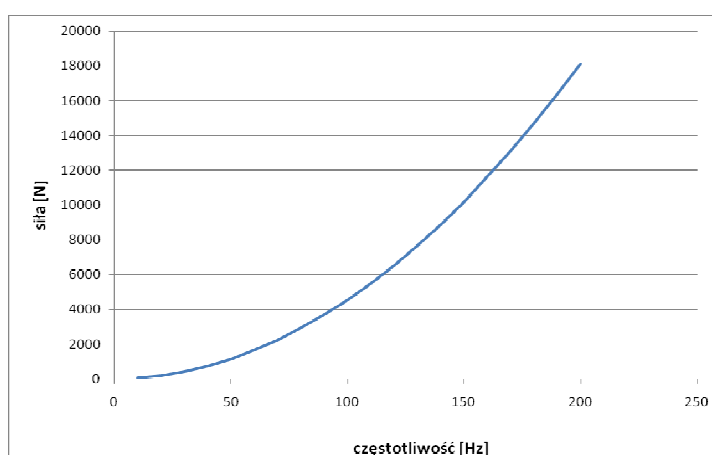


Fig. 2 . Zależność siły wymuszającej od częstotliwości (obrotów) silnika w klasycznym elektrowibratorze przyczepnym

Taki sposób wymuszenia powoduje nieliniowy wzrost sił wymuszających w wyższych częstotliwościach. Stanowi to pewien problem techniczny, gdyż elektrowibratory zazwyczaj przyczepiane są do elementu zworami, które muszą wytrzymać wielkie siły dynamiczne. Od zakresu obrotów wibratora zależy w znacznym stopniu doskonałość zestawu. Im wyższe obroty (częstotliwość) tym lepiej. Spotykane silniki elektrowibratorów zasilane prądem stałym sięgają 150 Hz, silniki na prąd przemienny mogą wirować nawet z częstotliwością 220 Hz.

Osobnym zadaniem procesu jest kontrola drgań elementu poddanego wymuszeniu. Służy do tego zwykle układ pomiaru drgań (przyspieszeń) ograniczający się do jednego kanału. Kanał ten jest reprezentatywny dla drgań całego elementu. Lokalizacja czujnika w pewnym stopniu decyduje o czułości i wrażliwości metody. Poziom drgań rejestrowany jest zwykle w ciągu całego procesu w celu dokumentacji przebiegu procedury. Analiza zarejestrowanych przebiegów pozwala też na ocenę efektywności odprężania.

Jak wynika z powyższego, kompletny zestaw do odprężania wibracyjnego składać się musi z następujących elementów:

- Sterownika zasilającego elektrowibrator
- Elektrowibratora przyczepnego
- Aparatury do pomiaru i rejestracji drgań

Przykładowy profesjonalny zestaw VCM925 na stanowisku odprężania przedstawia fig. 3. Zestaw ten cechuje się wszystkimi parametrami niezbędnymi do wykorzystywania go w różnorodnych zadaniach technologicznych, a więc zakresem częstotliwości 5-220 Hz, siłą odśrodkową do 18 kN i odpornością na drgania przekraczającą 50 g.

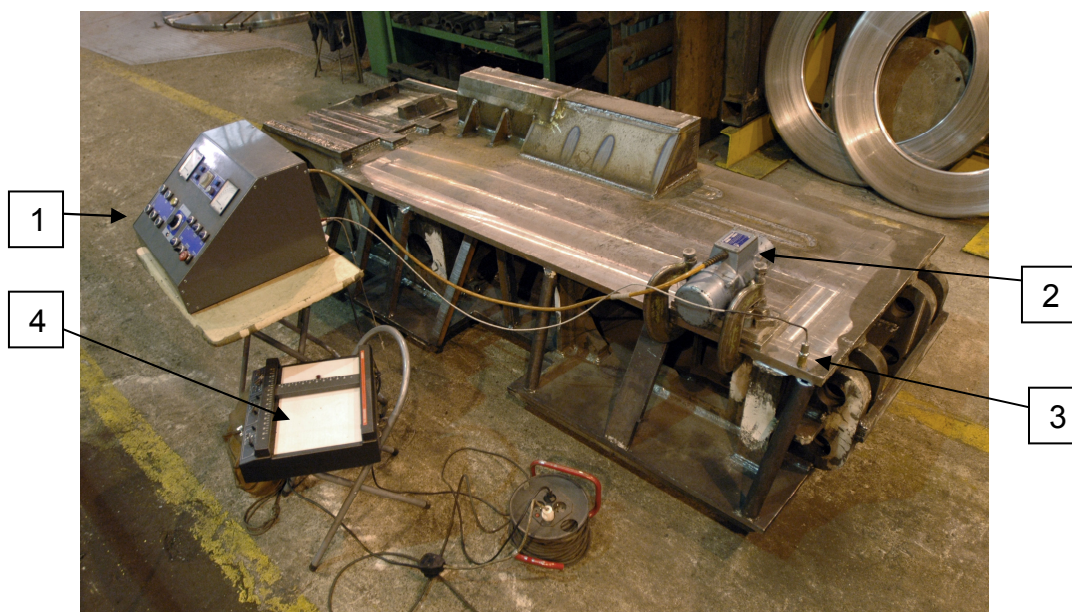


Fig.3. Zestaw VCM925 (pulpit sterujący(1), wibrator(2), czujnik drgań(3), rejestrator(4))

Metodyka

Procedura odprężania składa się z kilku kroków. Ich właściwe przeprowadzenie warunkuje osiągnięcie stanu stabilnego konstrukcji. Kolejne etapy polegają na:

- Przeprowadzeniu testu harmonicznego wibrowanego elementu w celu wyznaczenia jego charakterystyk rezonansowych. Polega on na poddaniu konstrukcji drganiom o zmiennej częstotliwości i rejestrowaniu odpowiedzi, tzn. przyspieszeń drgań.
- Określenia postaci drgań własnych i rozkładu linii węzłowych.
- Wyznaczeniu optymalnych punktów zamocowania wibratora i punktów podparcia wibrowanego elementu.
- Wibrowaniu elementu na wybranych częstościach rezonansowych z obserwacją zachowania się elementu.
- Przeprowadzeniu – jeśli to konieczne - ponownego testu harmonicznego dla określenia istotności zmian w rozkładzie częstości własnych spowodowanych redystrybucją naprężeń wewnętrznych.

Bardzo istotnym elementem metody jest ocena efektywności przeprowadzonej procedury. Ten aspekt zwykle jest podnoszony na pierwszym miejscu przy podejmowaniu decyzji dotyczących stosowania odprężania wibracyjnego. Bardzo trudne jest bezpośrednie udokumentowanie uzyskanych wyników. Jedyną znaną metodą warsztatową nieniszczącego badania poziomu naprężeń resztkowych Jest Metoda Magnetycznej Pamięci Metali, brak jest jednak opracowań na ten temat. W tej sytuacji stosuje się do oceny efektywności wibrowania metody pośrednie. Opierają się one na obserwacji zjawisk zachodzących podczas wibrowania. Związane są one ze zmniejszeniem sztywności i tłumienia materiałowego elementu w miarę usuwania naprężeń resztkowych. Zjawiska te zachodzą więc w dwóch obszarach – zmiany (zmniejszenia) częstości własnych w wyniku zmiany sztywności, oraz zmiany (zmniejszenia) współczynnika tłumienia.

Najlepiej podsumowuje zasady kontroli efektywności odprężania jedyna znana norma na odprężanie wibracyjne – chińska norma JB/T5926-91 "The Selection of Technological Parameters and Requirement for Vibration Stress Relief Process" (Wybór parametrów technologicznych i wymagania dla procesu odprężania wibracyjnego). Zgodnie z tą normą odprężanie wibracyjne można uznać za efektywne, jeśli w czasie odprężania zajdzie przynajmniej jedno z poniższych zjawisk:

- Krzywa przyspieszeń drgań w funkcji czasu wznosi się a następnie pozostaje niezmienna

- Krzywa przyspieszeń drgań w funkcji czasu wznosi się a następnie opada i na końcu pozostaje niezmienna
- Przyspieszenie drgań na częstotliwości rezonansowej jest większe po przeprowadzeniu odprężania wibracyjnego niż było przed wibrowaniem
- Częstotliwości rezonansowe są niższe po wibrowaniu (szczyty rezonansowe przesunięte są w lewo na skali częstotliwości)
- Szerokość półwkowa rezonansu po wibrowaniu jest mniejsza.

Procesy te trwają zależnie od amplitudy drgań od kilku do kilkunastu tysięcy cykli. Istnieje tu podobna jak przy sezonowaniu naturalnym zależność poziomu naprężeń resztkowych w funkcji ilości cykli obciążenia przedstawiona za [2] na fig. 4. Jak widać najistotniejsze zmiany zachodzą już po tysiącu cykli. Dalszy proces ma charakter asymptotyczny.

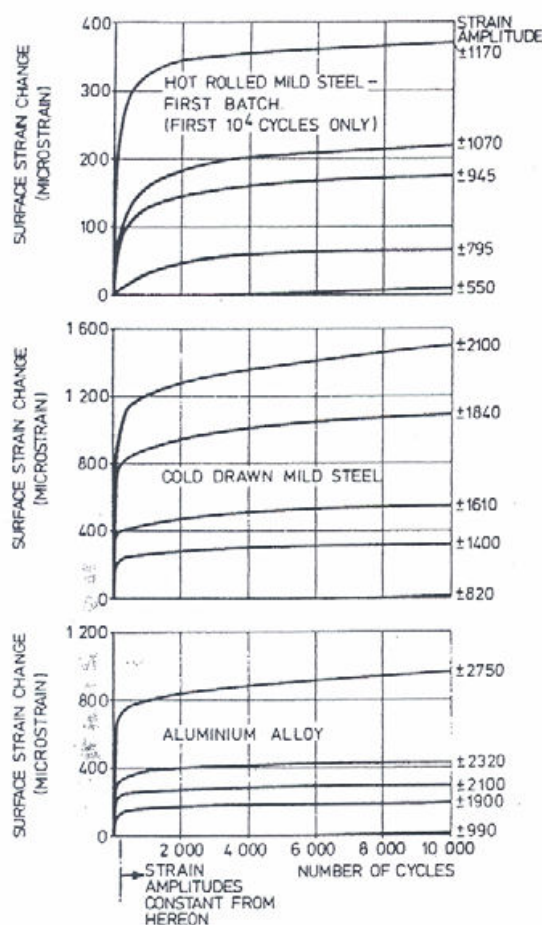


Fig.4. Zmiany odkształceń powierzchniowych w czasie wibrowania

Zadziwiająca jest zbieżność rodzaju zmienności odkształceń zachodzących w czasie naturalnego sezonowania i w czasie odprężania wibracyjnego (por. wykresy fig. 1 i fig. 4). Nie bez powodu rosyjski termin na odprężanie wibracyjne to „vibracionnoje starenie”, a więc sezonowanie wibracyjne.

Przykład

Przeprowadzenie rzeczywistego eksperymentu polegającego na obróbce wibracyjnej rzeczywistego elementu jest najlepszym dowodem na słuszność przedstawionych powyżej zasad.

Przedmiotem odprężanym była czołownica ostoi pojazdu szynowego. Sytuację eksperymentu pokazuje fig. 5. Widać tu miejsce mocowania wibratora i czujnika drgań oraz sposób podparcia elementu na gumowych podporach. Odprężanie prowadzono zgodnie z zasadami w trzech etapach: test wstępny, wibrowanie i test końcowy. Kolejne wykresy zmian drgań przedstawiają fig. 6, 7 i 8. Na początku

wyznaczono częstotliwości rezonansowe elementu. Są one wyraźnie widoczne na wykresie. Następnie rozpoczęto wibrowanie, wybierając te częstotliwości i wytrzymując element poddany drganiom przez czas



Fig.5. Stanowisko do odprężania wibracyjnego czołownicy pojazdu szynowego.

niezbędny do stabilizacji amplitudy drgań. Procedurę powtórzono trzy razy dla trzech częstotliwości rezonansowych. Następnie wykonano ponownie test sprawdzający.

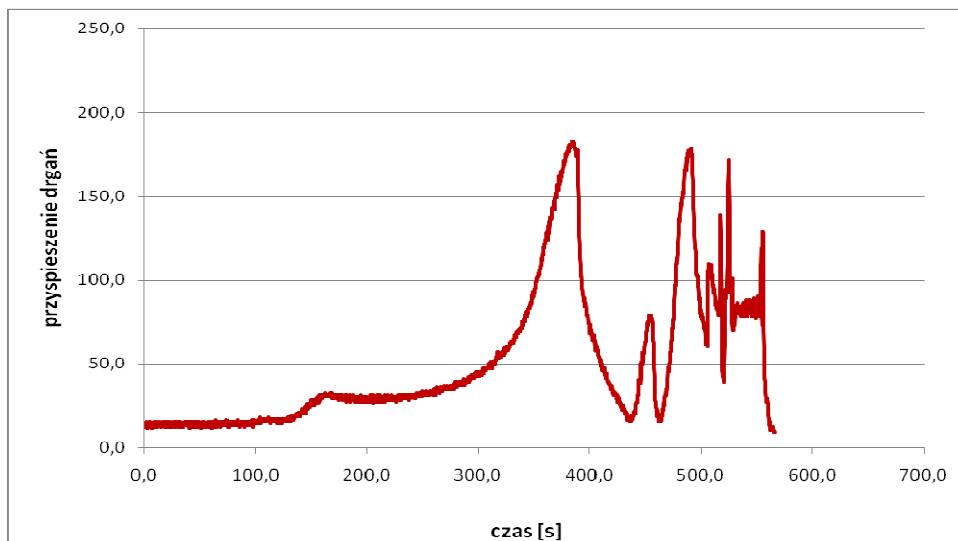


Fig. 6. Wykres zmian przyspieszenia drgań podczas testu wstępnego.

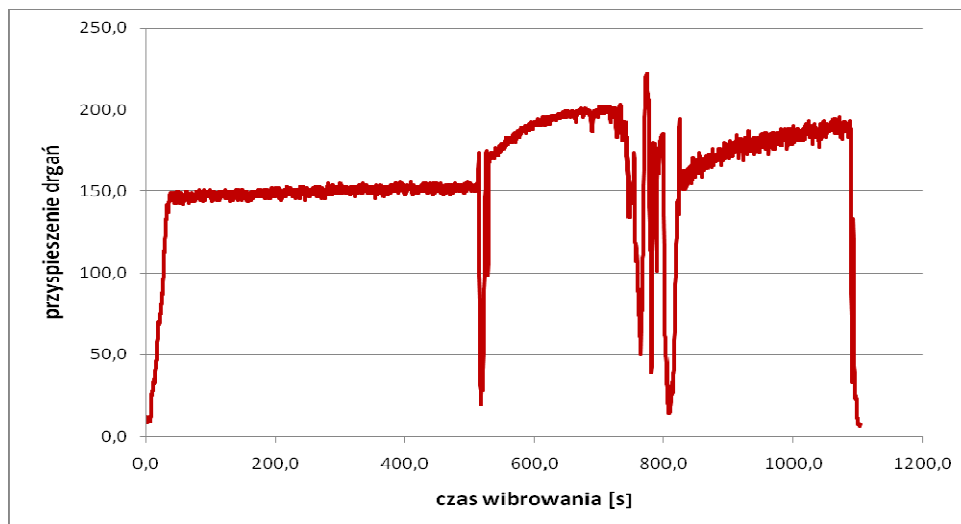


Fig. 7. Przyspieszenia drgań podczas wibrowania

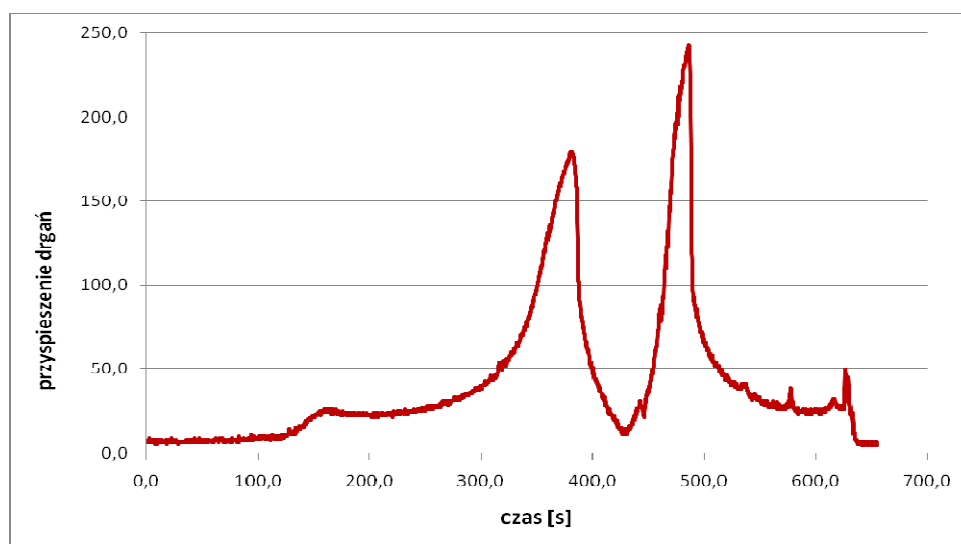


Fig. 8. Wykres zmian przyspieszenia drgań podczas testu końcowego.

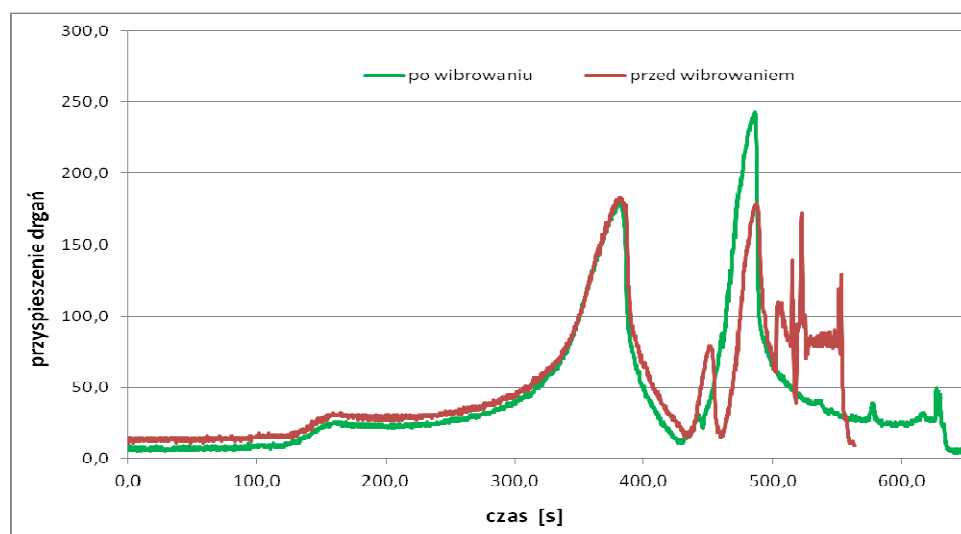


Fig.9. Porównanie testu początkowego i końcowego.

Jak wspomniano, o pozytywnym zakończeniu procedury decyduje n.in. wynik porównania charakterystyki dynamicznej elementu przed i po wibrowaniu. Porównanie takie w jednakowej skali przedstawia fig. 9. Na wykresie widać wyraźnie zmiany powstałe w wyniku wibrowania. Są to:

- zmniejszenie poziomu drgań wymuszonych w obszarach pozarezonansowych
- zmniejszenie szerokości pierwszego rezonansu z lekkim przesunięciem szczytu na lewo
- wyraźne zwiększenie poziomu drgań w drugiej częstotliwości rezonansowej z wyraźnym przesunięciem w lewo
- zanik środkowego rezonansu
- stabilizację charakterystyki w zakresie wyższych częstotliwości

Zmiany te wyraźnie wskazują na poważne zmiany własności dynamicznych elementu w wyniku wibrowania. Wyraźnie można je odnieść do zmian tłumienia materiałowego i sztywności elementu. Ponieważ wibrowanie prowadzono do ustabilizowania się zmian, można stwierdzić, że element został pomyślnie odprężony i osiągnął stan stabilny.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono szeroko zasady, właściwości i metodykę odprężania wibracyjnego. Zamieszczony przykład odprężania elementu spawanego pojazdu szynowego pokazuje, że zasady te znajdują potwierdzenie w praktyce warsztatowej. Na przeszkodzie szerokiego rozpowszechnienia się tak jednoznacznie pozytywnej technologii stoi konieczność głębokiego rozumienia przez operatora dynamiki elementów ciągłych i aktywnego, prowadzonego w czasie wibrowania analizowania zachodzących zjawisk. Taka analiza daje możliwość adaptacyjnego dochodzenia do właściwych rozwiązań. Rozpoczynając procedurę odprężania wibracyjnego nie wiemy, jak ona będzie przebiegać. Tą podstawową cechą różni się odprężanie wibracyjne od wyżarzania odprężającego. Operatorem żarzaka nie musi być ekspert.

Cytowana literatura

1. P. Sędek: „VIBRATION TREATMENT — EFFECTIVE METHOD OF IMPROVING THE DIMENSIONAL STABILITY OF WELDED STRUCTURES: INVESTIGATION AND PRACTICE”, *Welding and Surfacing Rev.*, 1997, Vol. 8, pp.221-228 © 1997 OPA
2. R. Dawson, D. G. Moffat : „VIBRATORY STRESS RELIEF: A FUNDAMENTAL STUDY OF ITS EFFECTIVENESS”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, April, 1980
3. A.S.M.Y. Munsif, A.J. Wandell, C.A. Walker ; „THE INFLUENCE OF VIBRATORY TREATMENT ON THE FATIGUE LIFE OF WELDS: A COMPARISON WITH THERMAL STRESS RELIEF” , *Strain*, 2001, Vol.37, No.4.