

Identification and analysis of causes of paint mixer shaft failure

Paweł Szlauer ^{1*}, Wojciech Skotnicki ²

¹ *University of Bielsko-Biala, Willowa 2, Bielsko-Biala, Polska, @ubb.edu.pl*

² *University of Bielsko-Biala, Willowa 2, Bielsko-Biala, Polska, wskotnicki@ubb.edu.pl*

* *Corresponding author, wskotnicki@ubb.edu.pl*

Abstract: The article presents an analysis of the causes of shaft damage, which began with macroscopic examinations of the fracture. Observations were made with the naked eye and with a magnification of 10×. The next step involved preparing a metallographic cross-section of the shaft sample. After preparing the sample, microscopic examinations of the material structure were conducted, analyzing characteristic areas within the damaged zone. Additionally, hardness measurements were made using the Vickers method (HV0.1). The results of the experimental tests served as the basis for conducting a finite element analysis (FEA). The FEA simulations allowed for the identification of areas most susceptible to damage and the assessment of the stress distribution in the shaft's structure. Based on these results, changes in the shaft geometry were proposed, along with the use of steel with a higher carbon content to improve material strength. The conducted research allowed for a comprehensive evaluation of the causes of shaft damage and the proposal of corrective actions that could improve its strength and durability. The application of approaches such as metallographic analysis, hardness measurements, and FEA represents a comprehensive method in the diagnostics of material and mechanical structure failures.

Keywords: mixer shaft, overlay welding, metallographic examination, FEA;

Identyfikacja i analiza przyczyn awarii wału mieszalnika farby

Paweł Szlauer ^{1*}, Wojciech Skotnicki ²

¹ *Uniwersytet Bielsko-Bialski, Willowa 2, Bielsko-Biała, Polska, @ubb.edu.pl*

² *Uniwersytet Bielsko-Bialski, Willowa 2, Bielsko-Biała, Polska, wskotnicki@ubb.edu.pl*

* *Corresponding author, wskotnicki@ubb.edu.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę przyczyn uszkodzenia wału, którą rozpoczęto od badań makroskopowych przelomu. Obserwacje wykonano gołym okiem oraz z powiększeniem 10×. Kolejnym etapem było przygotowanie zglądu metalograficznego próbki wału. Po przygotowaniu próbki przeprowadzono mikroskopowe badania struktury materiału, analizując charakterystyczne miejsca w obrębie uszkodzenia. Dodatkowo, wykonano pomiary twardości metodą Vickersa (HV0,1). Wyniki badań eksperymentalnych posłużyły jako podstawa do przeprowadzenia analizy metodą elementów skończonych (MES). Symulacje MES umożliwiły identyfikację miejsc o największym narażeniu na uszkodzenia oraz ocenę rozkładu naprężeń w konstrukcji wału. Na tej podstawie zaproponowano zmiany w geometrii wału oraz zastosowanie stali o wyższej zawartości węgla, co miało na celu poprawę wytrzymałości materiału. Przeprowadzone badania pozwoliły na kompleksową ocenę przyczyn uszkodzenia wału, a także na zaproponowanie działań naprawczych, które mogą przyczynić się do poprawy jego wytrzymałości i trwałości. Zastosowanie podejść takich jak analiza metalograficzna, pomiary twardości oraz analiza MES stanowi kompleksową metodę w diagnostyce uszkodzeń materiałów i konstrukcji mechanicznych.

Słowa kluczowe: wał mieszalnika, napawanie, badania metalograficzne, MES;

1. Wstęp

Stal, ze względu na swoje właściwości, odgrywa kluczową rolę w różnych dziedzinach przemysłu. Jest to uniwersalny materiał, który znajduje zastosowanie w konstrukcjach maszynowych, narzędziach, pojazdach, budownictwie i wielu innych dziedzinach. Pomimo swojej wytrzymałości i trwałości, maszyny i urządzenia wykonane ze stali mogą ulegać awariom [1].

Eksploatacja urządzeń to specyficzne działanie człowieka, które wymaga pewności, że jest ono realizowane w najlepszy możliwy sposób. Ten proces ma kluczowe znaczenie dla rozwoju produkcji wyrobów oraz samej produkcji urządzeń jako produktów. Aby osiągnąć efektywną eksploatację, istotne są pewne kluczowe elementy, takie jak: dążenie do wyeliminowania uciążliwej pracy fizycznej poprzez zastosowanie odpowiednich technologii, skoncentrowanie się na rozwiązaniach, które nie tylko są skuteczne, ale również ekonomicznie opłacalne oraz stworzenie warunków pracy sprzyjających długotrwałej i efektywnej eksploatacji urządzeń [2].

Przyczyny awarii maszyn mogą być różnorodne i obejmować wiele czynników. Jednym z najważniejszych czynników jest niewłaściwe użytkowanie lub nadmierne obciążenie maszyny, co prowadzi do zbytniego zużycia i uszkodzeń elementów stalowych. Dodatkowo, nieodpowiednia konserwacja, brak regularnej inspekcji i konserwacji technicznej mogą przyczyniać się do powstawania awarii [3].

Innymi potencjalnymi przyczynami awarii są wady materiałowe, takie jak niejednorodności w strukturze stali, obecność zanieczyszczeń lub nieciągłości materiału w skali makro i mikroskopowej. Takie wady mogą prowadzić do zmniejszenia wytrzymałości stali i zwiększenia ryzyka pęknięć. Ponadto, czynniki środowiskowe, takie jak korozja, wysokie temperatury, działanie substancji chemicznych czy działanie czynników atmosferycznych, mogą negatywnie wpływać na wytrzymałość mechaniczną stali, przyczyniając się do obniżenia trwałości, a w konsekwencji do awarii maszyn [4-5].

Aby zminimalizować ryzyko awarii maszyn, niezbędne jest przestrzeganie odpowiednich norm i standardów dotyczących zastosowanego materiału, regularna inspekcja i konserwacja maszyn, oraz stosowanie odpowiednich technik diagnostycznych, takich jak badania nieniszczące, w celu wykrycia potencjalnych wad materiałowych. Awarie urządzeń mogą być wynikiem różnorodnych czynników, a identyfikacja tych przyczyn jest kluczowa dla zapobiegania nieplanowanym przestojom i utrzymania sprzętu w odpowiednim stanie. Najczęstszymi przyczynami awarii są:

- błędy projektowe i wykonawcze,
- niewłaściwy dobór materiałów,
- nieprawidłowy montaż i niewłaściwe użytkowanie,
- zużycie i starzenie,
- nadmierne obciążenie,
- brak kontroli jakości [6-7].

Należy dążyć do tego, aby utrzymanie stanu użyteczności było zachowane po demontażu, tak jak przed rozłączeniem. Prawidłowe rozłożenie, z ograniczeniem uszkodzeń elementów, zmniejsza straty materiałowe już na etapie początkowym procesu naprawczego i wpływa korzystnie na kolejne etapy prac technologicznych. Uszkodzenia podczas demontażu wynikają z trzech głównych przyczyn: wad konstrukcyjnych, nieprawidłowych metod technologicznych oraz złego stanu technicznego maszyn i urządzeń, które są poddawane remontowi. W trakcie demontażu nie należy akceptować powstawania szkód, takich jak zniszczenia powierzchni współpracujących elementów (zatarcie powierzchni roboczych), zerwanie gwintów, uszkodzenie otworów, odłamanie fragmentów odlewów czy zniszczenie łożysk tocznych [8-9].

Technologie napraw wałów mogą obejmować różnorodne metody i techniki, w zależności od rodzaju uszkodzeń, materiałów i wymagań danego zastosowania. Spawanie może być stosowane do naprawy uszkodzeń wałów, zwłaszcza w przypadku łatwo dostępnych miejsc. W wyniku spawania otrzymuje się połączenie spawane, w skład którego wchodzi spoina oraz przyległa strefa materiału podstawowego. Spoina ograniczona jest linią wtopienia w materiał spawany oraz licem i granią [10-12].

Spoina, gdy jest poprawnie wykonana, posiada powierzchnię lekko wypukłą, a wystająca ponad grubość blachy wypukłość nazywana jest nadlewem. Nadlew powinien stopniowo przechodzić w powierzchnie, które są ze sobą łączone. Spoina w stanie surowym, bez obróbki cieplnej, wykazuje charakterystyczną strukturę dendrytyczną. Innym sposobem regeneracji wału może być napawanie. Napawanie jest to nakładanie materiału dodatkowego na powierzchnię roztopionego podłoża. W wyniku tego procesu tworzy się napoina, która składa się z pierwotnego materiału i spoiny. Istnieją dwie metody napawania: gazowa oraz elektryczna. Podczas tego procesu wykorzystuje się także materiał dodatkowy, którym może być taśma, pręt, drut albo proszek. Warstwa napoiny wynosi zazwyczaj od

0,05 mm do 100 mm. Napawanie pozwala na odbudowę uszkodzonej części i przywrócenie jego funkcjonalności [13-14].

W niektórych przypadkach, gdy uszkodzenie wału jest poważne lub niemożliwe do naprawy, konieczne może być dokonanie całkowitej wymiany wału. W takim przypadku wał jest usuwany i zastępowany nowym egzemplarzem. Proces technologiczny wymiany stanowi integralną część procesu naprawy maszyn, obejmującą zbiorową realizację działań mających na celu rozłączenie, zamianę uszkodzonej części oraz ponowne łączenie poszczególnych elementów w całość. Ten kluczowy etap naprawy przyczynia się do przedłużenia żywotności maszyny, przywracając jej pełną sprawność i umożliwiając dalszą efektywną eksploatację. Tworzenie jednostek remontowych przynosi szereg korzyści, z których kluczowe obejmują skrócenie czasu montażu, efektywniejszą organizację pracy, lepsze wykorzystanie powierzchni montażowej oraz lepsze zarządzanie urządzeniami [15-16].

Przyczyną podjęcia badań, było uszkodzenie wału mieszalnika farby, powstałe podczas pracy. Uszkodzenie zlokalizowane było w części połączenia gwintowanego oraz części regenerowanej poprzez napawanie. W celu analizy powstałych uszkodzeń przeprowadzono badania metalograficzne. Na podstawie uzyskanych wyników, zaproponowano rozwiązania konstrukcyjne mające na celu zwiększenie wytrzymałości konstrukcji, przy jednoczesnym obniżeniu masy.

2. Obiekt badań

Przyczyną podjęcia badań, było uszkodzenie wału mieszalnika farby, powstałe podczas pracy. Uszkodzenie zlokalizowane było w części połączenia gwintowanego oraz części regenerowanej poprzez napawanie (rysunek 1). W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny stali C30 z której został wykonany wał.

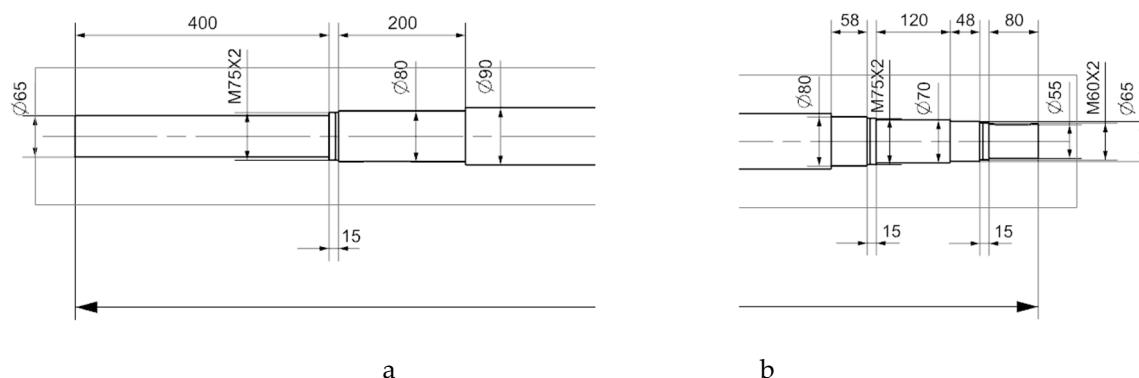


Rysunek 1. Wał, który uległ awarii (u góry) oraz nowy wał (w dolnej części zdjęcia)

Tabela 1. Skład chemiczny stali C30 wg EN 10083-2

Skład chemiczny stali, %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,27-0,34	max 0,4	0,5-0,8	max 0,045	max 0,045	max 0,4	max 0,4	max 0,4

Wał stanowi integralną częścią zespołu napędowego mieszalnika farby. Zespół napędowy składa się z motoreduktora firmy Nord typu SK572 generujący moment 3800Nm połączony za pomocą sprzęgła typu ROTEX 48. Górne łożysko FAG 22313 E1 C3 zostało zabezpieczone nakrętką łożyskową KM12, a dolne łożysko FAG 22316 E1 XL nakrętką KM15. Wał osadzony jest w konsoli łożyskowej w dwóch łożyskach wahliwych, baryłkowych dwurzędowych oraz stabilizowany na dnie zbiornika panewką wykonaną z brązu. Szczegóły wymiarowe zostały przedstawione na rysunku 2.



Rysunek 2. Szczegóły wymiarowe czopów wału w miejscu panewki (a) oraz w miejscu łożyskowania w konsoli (b)

3. Badania własne

Analiza przyczyn uszkodzenia wału została przeprowadzona w kilku etapach, obejmujących zarówno badania makroskopowe, jak i szczegółową analizę metalograficzną oraz pomiary twardości, a także symulacje numeryczne. Pierwszym krokiem w analizie uszkodzenia było przeprowadzenie obserwacji makroskopowych w miejscu przełomu. Obserwacje zostały początkowo przeprowadzone gołym okiem, a następnie z użyciem mikroskopu o powiększeniu 10 \times , w celu uzyskania dokładniejszego obrazu struktury i charakterystyki uszkodzenia. Kolejnym etapem było przygotowanie zglądu metalograficznego próbki pobranej z wału, który pozwolił na dalszą szczegółową analizę struktury materiału. Proces preparatyki próbki obejmował kilka kluczowych operacji:

- Inkludowanie próbki – proces wtopienia próbki w żywicę, co umożliwia jej dalsze szlifowanie i obróbkę,
- Szlifowanie powierzchni – użyto papierów ściernych o różnych gradacjach (180, 600, 2000), szlifując powierzchnię na mokro, co pozwoliło uzyskać gładką powierzchnię gotową do dalszego polerowania,
- Polerowanie powierzchni – w celu uzyskania wysokiej jakości powierzchni, zastosowano pasty diamentowe, które umożliwiły uzyskanie lustrzanego wykończenia próbki,
- Trawienie powierzchni – powierzchnia próbki została trawiona odczynnikami Nital (5% roztwór kwasu azotowego, HNO₃), co pozwoliło uwidocznić strukturę materiału oraz ewentualne wady wewnętrzne.

Po przygotowaniu zglądu metalograficznego, przeprowadzono mikroskopowe badania w polu jasnym. Umożliwiły one szczegółową obserwację struktury materiału oraz identyfikację wad. Dodatkowo, przeprowadzono pomiary charakterystycznych miejsc w obrębie uszkodzenia, aby ocenić zmiany w mikrostrukturze materiału wału. Uzupełnieniem badań metalograficznych były pomiary twardości wykonane metodą Vickersa (HV0,1), które umożliwiły określenie twardości materiału w różnych miejscach próbki. Twardość stanowi istotny parametr w ocenie właściwości materiałowych wału, zwłaszcza w kontekście jego wytrzymałości na uszkodzenia mechaniczne.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych, przystąpiono do analizy przyczyn uszkodzenia przy użyciu metody elementów skończonych (MES). Symulacja MES pozwoliła na dokładne modelowanie i ocenę rozkładu naprężeń w konstrukcji wału, co umożliwiło zidentyfikowanie potencjalnych miejsc najbardziej narażonych na uszkodzenia. Na podstawie przeprowadzonej analizy MES, zaproponowano kilka wariantów poprawy konstrukcji wału. Pierwszą propozycją była zmiana geometrii wału, co miało na celu optymalizację rozkładu naprężeń i zwiększenie jego wytrzymałości. Drugą propozycją było zastosowanie stali o wyższej zawartości węgla, co miało na celu zwiększenie twardości i wytrzymałości materiału wału, zmniejszając tym samym ryzyko jego uszkodzeń w wyniku nadmiernego obciążenia..

3.1. Badania metalograficzne i pomiary twardości

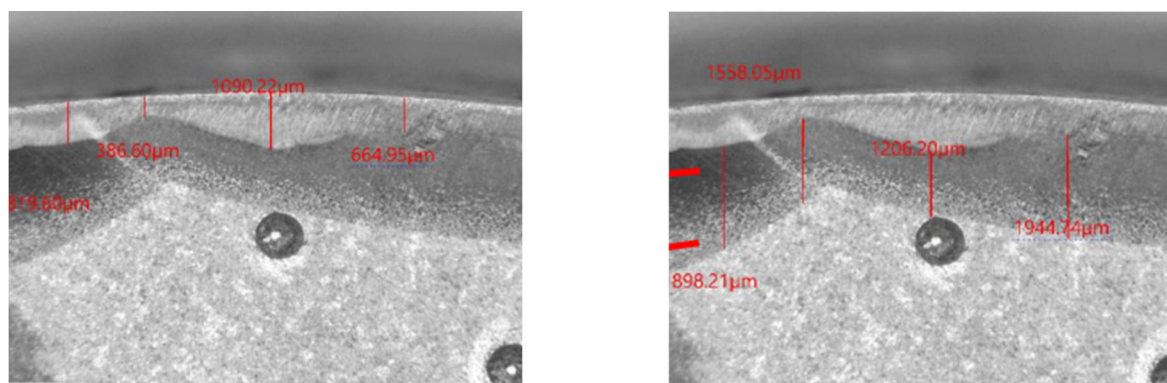
Obserwacje makroskopowe okiem nieuzbrojonym były prowadzone na powierzchni przełomu wału. Widoczne na rysunku 3 uszkodzenie w formie przełomu powstało podczas pracy wału na skutek obrotowego gięcia z wieloma ogniskami. Szczegółowa analiza makroskopową powierzchni została oznaczona na rysunku 3.



Rysunek 3. Obserwowany przełom - część próbki po regeneracji.

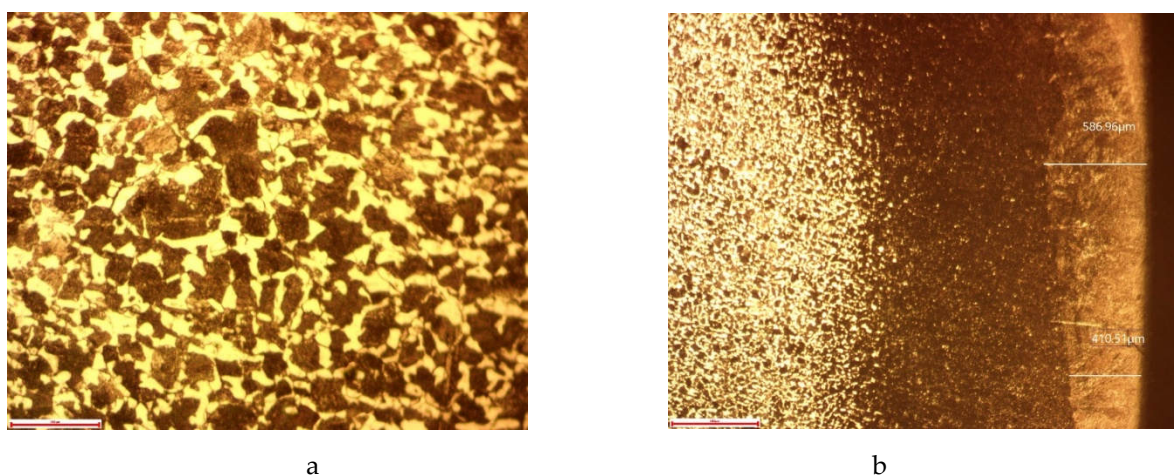
Miejsce inicjacji było zlokalizowane na powierzchni zewnętrznej gdzie, są widoczne ogniska pęknięć. W przypadku materiałów poddanych zmiennym obciążeniom, pęknięcia często inicjują się na powierzchniach zewnętrznych, gdzie mogą znajdować się różne wady, takie jak rysy, mikrouszkodzenia czy niejednorodności materiałowe. Wady te mogą działać jako miejsca koncentracji naprężeń, co przyczynia się do rozwoju mikropęknięć. Te mikropęknięcia rozwijają się i łączą ze sobą, tworząc większe pęknięcia, które mogą prowadzić do awarii konstrukcji. Tam też znajdują się liczne miejsca zapadkowe (1), o zmiennej wielkości, gdzie materiał może być osłabiony przez lokalne uszkodzenia, często wynikające z obciążeń zmiennych lub niewłaściwych warunków eksploatacyjnych. W trakcie procesu pęknięcia te obszary mogą wpływać na ścieżkę rozwoju pęknięcia. Zmienne wielkości miejsc zapadkowych mogą świadczyć o nieregularności materiału lub procesie obciążenia. Często te obszary są związane z efektem zmęczenia materiału, który powstaje w wyniku cyklicznego obciążenia. Na zdjęciu makroskopowym widoczny jest mały obszar strefy dołamania (2). Widoczna, ograniczona strefa dołamania oznacza, że do pęknięcia mogło dojść w wyniku małej siły, ale za to przy dużej koncentracji naprężeń w tym konkretnym obszarze. Małe strefy dołamania sugerują nagle, dynamiczne pęknięcie, co może być spowodowane istnieniem dużego skupienia naprężeń lub wewnętrznych wad materiałowych, które dodatkowo osłabiają strukturę materiału. Numerem 3 oznaczono wygładzenie powstałe na skutek tarcia obu płaszczyzn. Wygładzenie świadczy o tym, że wystąpiły ruchy wzajemne obu fragmentów materiału, które tarły o siebie, co może wynikać np. z wibracji lub działania sił zewnętrznych.

Uzupełnieniem przedstawionych badań były obserwacje z zastosowaniem mikroskopu stereoskopowego Delta Optical SZ-630B. Głównym celem przeprowadzonych obserwacji było dokonanie oceny jakości warstwy napawanej, przedstawionej na rysunku 4a, w tym oceny jej struktury pod kątem jej jednorodności oraz ewentualnych defektów, które mogłyby powstać podczas procesu napawania. Ponadto, szczególna uwaga została zwrócona na określenie grubości strefy wpływu ciepła (rys. 4b), czyli obszaru, w którym występują zmiany strukturalne materiału wynikające z oddziaływania wysokiej temperatury w czasie napawania. Pomiar ten jest istotny, ponieważ strefa ta może mieć wpływ na właściwości mechaniczne i termiczne materiału po obróbce. Badania prowadzono przy powiększeniu 10 \times .



Rysunek 4. Makrostruktura zewnętrznej powierzchni wału z widoczną warstwą napawaną (a) oraz warstwą strefy wpływu ciepła (b)

Kolejnym etapem badań były przeprowadzone szczegółowe obserwacje mikroskopowe na powierzchni próbki pobranej z wału, które miały na celu dokładną ocenę mikrostruktury materiału po procesie napawania. Badania te pozwoliły na uzyskanie informacji o układzie i rozmieszczeniu poszczególnych faz w obrębie napawanej warstwy oraz strefy wpływu ciepła, co jest istotne dla oceny jakości napawania i właściwości mechanicznych materiału. Ocenę mikrostruktury wykonano przy zastosowaniu mikroskopu optycznego Axiovert 100A. Obserwacje prowadzono na zglądach trawionych w polu jasnym. Obraz rejestrowano przy użyciu kamery mikroskopowej Delta Optical DLT-Cam Pro 20MP. Pomiary grubości warstwy napawanej oraz strefy wpływu ciepła wykonano z wykorzystaniem zaawansowanej komputerowej analizy obrazu przy pomocy oprogramowania ImageJ V1.54. Oprogramowanie to umożliwiło precyzyjną ocenę geometrycznych wymiarów warstw napawanych oraz obszarów poddanych wpływowi ciepła, co jest kluczowe do oceny efektywności napawania oraz przewidywania właściwości mechanicznych materiału. Wyniki obserwacji i pomiarów przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Mikrostruktura powierzchni badanego wału (a) oraz warstwa napawana i strefa wpływu ciepła (b)

W trakcie obserwacji makroskopowych stwierdzono, że warstwa napawana jest nierównomierna, a jej grubość mieści się w przedziale od 350 do 1100 μm . Takie różnice mogą wynikać z kilku czynników, w tym z nieodpowiedniej ilości materiału dodatkowego dostarczonego podczas napawania, co może skutkować zbyt cienką warstwą w niektórych miejscach. Dodatkowo, niewłaściwy dobór drutu napawającego, zarówno pod względem rodzaju materiału, jak i średnicy, może również wpłynąć na uzyskaną grubość warstwy. Kolejnym czynnikiem mogącym wpływać na nierównomierność jest zmienna prędkość prowadzenia napoiny. Zbyt szybkie lub zbyt wolne prowadzenie procesu napawania może prowadzić do niejednorodnego rozprowadzenia materiału, a w efekcie nierównomiernej grubości warstwy napawanej.

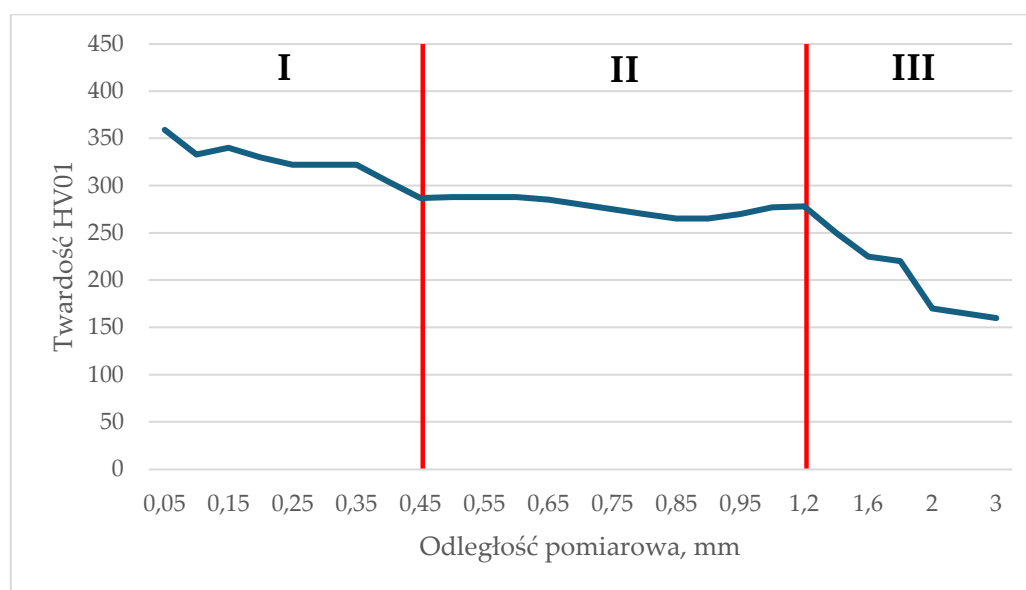
Również strefa wpływu ciepła (SWC) wykazuje duże różnice w grubości, co potwierdza zakres od 800 do 2000 μm . Strefa ta jest obszarem materiału, który ulega modyfikacji termicznej w wyniku działania ciepła dostarczanego podczas procesu napawania. Grubość tej strefy zależy bezpośrednio od parametrów napawania, takich jak intensywność ciepła, prędkość napawania oraz technika napawania. Zbyt duża ilość energii dostarczonej do materiału w krótkim czasie powoduje większą rozległość strefy wpływu ciepła, co może skutkować nadmiernym przekształceniem struktury materiału w tej strefie.

Zmiany w parametrach napawania, takich jak prędkość napawania, mogą również prowadzić do nierównomiernego nagrzewania i chłodzenia materiału. Jeżeli napawanie odbywa się w nieregularny sposób, zbyt szybkie nagrzewanie może spowodować miejscowe przegrzanie materiału, a nieregularne chłodzenie może prowadzić do powstania naprężeń wewnętrznych, co w konsekwencji wpływa na równomierność i stabilność warstwy napawanej. Zmiany w mocy źródła ciepła mogą również spowodować lokalne zmiany w intensywności napawania, co z kolei prowadzi do nierównomierności w grubości warstwy napawanej i w samej strefie wpływu ciepła.

Uzupełnieniem badań metalograficznych był pomiar twardości metodą Vickers HV0,1, który pozwolił na szczegółową ocenę rozkładu twardości na powierzchni próbki materiału. Badania te przeprowadzono, zaczynając od krawędzi próbki i kontynuując w kierunku jej rdzenia. Pomiary twardości umożliwiły wyodrębnienie trzech wyraźnych stref, których rozmieszczenie jest zgodne z wynikami przeprowadzonych wcześniej obserwacji makroskopowych i mikroskopowych. Pierwsza strefa, w której zmierzona twardość była najwyższa, znajduje się tuż przy powierzchni próbki i jest to warstwa napawana. W tej strefie, która charakteryzuje się największą twardością, średnia zmierzona wartość twardości wyniosła 325 HV0,1. Wartości te są typowe dla materiałów poddanych procesowi

napawania, w którym dochodzi do wzrostu twardości wskutek wprowadzenia materiałów o wyższej twardości, co zapewnia powierzchniową odporność na ścieranie oraz uszkodzenia mechaniczne. Druga strefa, znajdująca się w odległości od 0,45 mm do 1,2 mm od krawędzi próbki, to strefa wpływu ciepła. W tej strefie zmierzona twardość wyniosła średnio 275 HV0,1, co sugeruje, że proces który zachodzi w wyniku napawania, prowadzi do częściowej modyfikacji struktury materiału. Choć twardość w tej strefie jest niższa niż w warstwie napawanej, nadal pozostaje wyższa w porównaniu do rdzenia próbki.

Trzecia strefa to rdzeń próbki, gdzie zmierzone wartości twardości były najmniejsze, osiągając średnią wartość 220 HV0,1. Ta strefa charakteryzuje się minimalnym wpływem procesów napawania i wpływem ciepła, co skutkuje niższą twardością. Wartości twardości w tej strefie są charakterystyczne dla materiałów, które nie zostały poddane dalszym obróbkom, zachowując więc pierwotną strukturę materiału. Wyniki pomiarów twardości zostały przedstawione na rysunku 6.



Rysunek 6. Wyniki pomiaru twardości metodą Vickersa HV0,1

3.2. Analiza MES wału mieszalnika farby

Celem prezentowanych badań było przeprowadzenie szczegółowej analizy MES wału przy użyciu nowoczesnych narzędzi komputerowych. W szczególności analiza obejmowała:

- Identyfikację obszarów potencjalnego skręcania, które mogą mieć wpływ na integralność strukturalną wału i jego zdolność do przenoszenia momentów obrotowych,
- Ocenę wpływu różnorodnych obciążeń, zarówno statycznych, jak i dynamicznych, na wytrzymałość i trwałość konstrukcji,
- Badanie właściwości mechanicznych materiałów zastosowanych do produkcji wału, w tym wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności oraz modułu sprężystości.

Analiza ta stanowi podstawę do oceny bezpieczeństwa konstrukcji oraz jej optymalizacji w celu zwiększenia niezawodności i wydajności. Analiza została przeprowadzona w programie NX Siemens (dawniej Unigraphics), który jest jednym z wiodących zintegrowanych środowisk CAD/CAE/CAM wykorzystywanych we współczesnym przemyśle inżynierskim. Program ten udostępnia szeroki zestaw nowoczesnych narzędzi inżynierskich, które wspierają rozwój produktu na każdym etapie jego cyklu życia – od fazy koncepcji, poprzez projektowanie techniczne, analizę, cyfrową weryfikację, aż po proces wytwarzania. Program NX Siemens charakteryzuje się dużą elastycznością, umożliwiającą import i pracę z plikami pochodzącymi z większości popularnych systemów CAD. Dzięki zaawansowanej funkcji Synchronous Modeling możliwa jest bezpośrednia edycja modeli CAD, bez konieczności ich wcześniejszego konwertowania, co znacząco skraca czas realizacji projektów i umożliwia bieżącą adaptację modelu do nowych wymagań projektowych. Funkcjonalność tego oprogramowania pozwala także na prowadzenie symulacji MES (Metoda Elementów Skończonych), które dostarczają szczegółowych informacji o rozkładzie naprężeń, odkształceń oraz potencjalnych miejscach koncentracji obciążeń w modelu. Wykorzystanie NX Siemens pozwala tym samym na

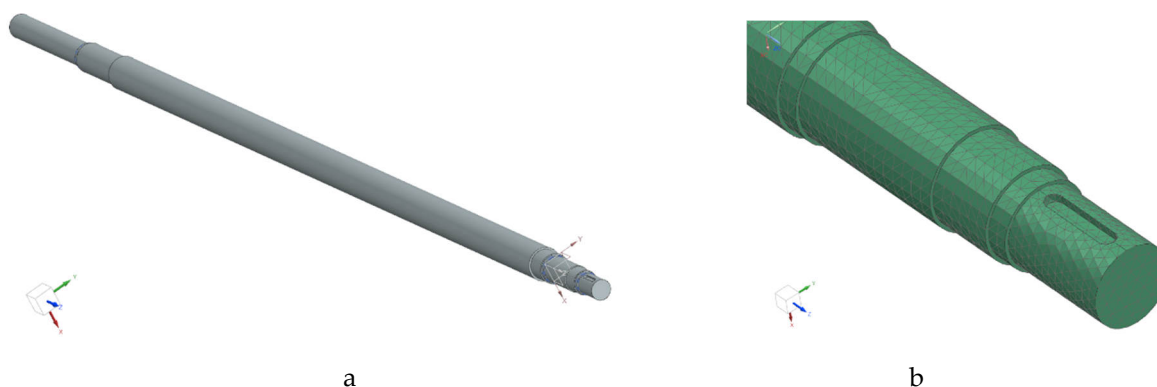
optymalizację konstrukcji wału poprzez identyfikację oraz redukcję obszarów narażonych na niepożądane zjawiska mechaniczne, co jest kluczowe dla zwiększenia trwałości i efektywności pracy urządzenia [17].

Pierwszym etapem analizy MES było przeprowadzenie symulacji dla trzech rodzajów stali niestopowych o zróżnicowanej zawartości węgla. Typy stali uwzględnione w badaniach to:

- Stal niskowęglowa – oznaczenie C30 (1.0528/1030) – zakres zawartości węgla: 0,27–0,35%,
- Stal średniowęglowa – oznaczenie C45 (1.0503/1045) – zakres zawartości węgla: 0,42–0,50%,
- Stal wysokowęglowa – oznaczenie C60 (1.0601/1060) – zakres zawartości węgla: 0,57–0,65%.

Powyższe klasyfikacje opierają się na zawartości procentowej węgla w stali, co wpływa na ich właściwości mechaniczne oraz przydatność w różnych zastosowaniach przemysłowych. Symulacje miały na celu analizę wpływu zawartości procentowej węgla na wybrane parametry mechaniczne badanych materiałów wykonanych ze stali [18].

Opracowano model wału, który uległ awarii. Model ten pozwala na szczegółową analizę mechanizmów uszkodzeń, które mogły przyczynić się do awarii, oraz identyfikację potencjalnych czynników konstrukcyjnych i materiałowych wpływających na wytrzymałość wału (rysunek 7a). Następnie na model wału nałożono siatkę elementów skończonych. Siatka ta umożliwia przeprowadzenie analizy metodą elementów skończonych (MES), pozwalając na szczegółowe zbadanie rozkładu naprężeń i odkształceń w różnych obszarach wału (rysunek 7b).



Rysunek 7. Przyjęty model wału do analizy MES (a), wraz z nałożoną siatką (b)

W wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej, zidentyfikowano, że największe naprężenia występują w miejscu montażu górnego łożyska. Miejsca te, poddane dużym obciążeniom, są kluczowe dla dalszej oceny wytrzymałości konstrukcji wału. W kontekście dalszej eksploatacji, problematyczne okazały się ograniczenia wynikające z ograniczonych możliwości zmiany konstrukcji konsoli łożyskowej, co stanowiło przeszkodę w modyfikacji układu obciążeniowego.

Aby poprawić wytrzymałość wału w obrębie najbardziej krytycznego miejsca, podjęto decyzję o doborze stali o wyższej zawartości węgla. Wzrost zawartości węgla w stali wpływa na jej twardość oraz wytrzymałość na rozciąganie, co w przypadku tego wału mogło przyczynić się do zmniejszenia tendencji do skręcania. Zatem, w celu wzmocnienia wału, zaplanowano użycie stali o większej zawartości węgla, co mogłoby zapewnić wyższą odporność na naprężenia i zwiększyć żywotność konstrukcji.

Aby podjąć optymalną decyzję dotyczącą wyboru gatunku stali, przeprowadzono rozeznanie cenowe stali, porównując ceny dla trzech różnych gatunków: C30, C45 oraz C60:

- Stal C30 – cena średnia: 3,50 zł/kg
- Stal C45 – cena średnia: 5,50 zł/kg
- Stal C60 – cena średnia: 7,00 zł/kg

Z uwagi na masę wału, która wynosi 152,1 kg, obliczono łączny koszt materiału dla każdego z gatunków stali:

- Stal C30: $3,50 \text{ zł/kg} \times 152,1 \text{ kg} = 533 \text{ zł}$
- Stal C45: $5,50 \text{ zł/kg} \times 152,1 \text{ kg} = 837 \text{ zł}$
- Stal C60: $7,00 \text{ zł/kg} \times 152,1 \text{ kg} = 1065 \text{ zł}$

Analizując te koszty, zauważono, że stal C30 jest najtańszym materiałem, jednak jej właściwości mechaniczne mogą być niewystarczające w kontekście wzmocnienia wału w miejscach, gdzie występują największe naprężenia. Z kolei stal C60, mimo swoich wyższych właściwości wytrzymałościowych, wiąże się z dwukrotnie wyższym kosztem zakupu materiału, co może stanowić istotne obciążenie dla kosztów produkcji.

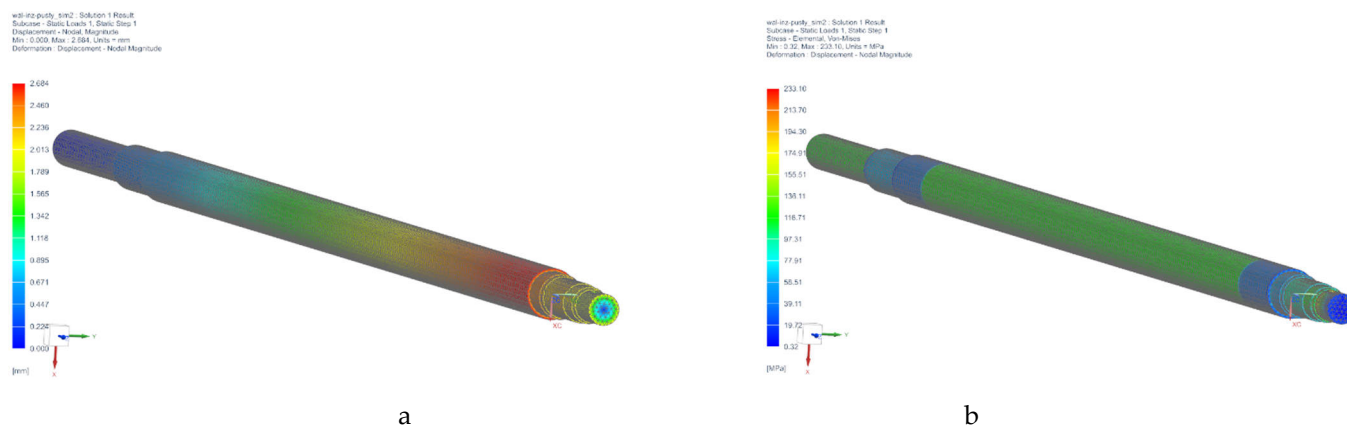
Biorąc pod uwagę dużą masę wału oraz znaczny wzrost kosztów przy wyborze stali C60, podjęto decyzję o rozważeniu alternatywnego podejścia, polegającego na zmianie konstrukcji wału. Celem była optymalizacja kosztów produkcji przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów wytrzymałościowych. Przekonstruowanie wału pozwoliło na znalezienie kompromisu między kosztami materiału a wymaganiami wytrzymałościowymi, umożliwiając dobór odpowiedniej stali przy zachowaniu efektywności ekonomicznej projektu.

3.3. Analiza MES wału drążonego mieszalnika farby

W drugim etapie analizy przy użyciu Metody Elementów Skończonych (MES) skoncentrowano się na opracowaniu różnych wariantów konstrukcyjnych wału drążonego, celem oceny jego zachowania pod obciążeniem oraz opłacalności ekonomicznej. W ramach tego etapu zaprojektowano trzy warianty konstrukcyjne, różniące się grubością ścianki, które wynosiły odpowiednio 5 mm, 10 mm i 15 mm. Każdy z tych wariantów był symulowany dla trzech różnych gatunków stali: C30, C45 i C60, charakteryzujących się odmiennymi właściwościami wytrzymałościowymi.

Przeprowadzona analiza numeryczna uwzględniała kilka kluczowych parametrów mechanicznych, w tym przemieszczenie i naprężenia zredukowane. Naprężenia zredukowane umożliwiają ocenę wytrzymałości materiału w kontekście obciążeń złożonych, umożliwiając lepsze przewidywanie potencjalnych miejsc inicjacji pęknięć czy odkształceń plastycznych. Analizę parametrów przemieszczenia przeprowadzono w celu zbadania stopnia ugięcia i potencjalnej deformacji wału pod działaniem obciążeń zewnętrznych. Z kolei rozkład naprężeń zredukowanych pozwalał na ocenę równomierności i intensywności naprężeń w całej objętości materiału, co ma kluczowe znaczenie dla trwałości wału i jego zdolności do przenoszenia określonych obciążeń bez utraty integralności strukturalnej. Dodatkowo, każda konfiguracja była oceniana pod względem kosztów materiałowych, co pozwoliło na połączenie analizy wytrzymałościowej z analizą ekonomiczną. Warianty z większą grubością ścianki i stałą o wyższej wytrzymałości cechują się wyższym kosztem, jednak mogą oferować lepszą wytrzymałość na obciążenia dynamiczne i zmęczeniowe.

Przekonstruowanie wału mieszalnika farby poprzez zastosowanie wału drążonego ze ścianką o grubości 5 mm umożliwiło istotną redukcję masy konstrukcji. Zmiana ta przełożyła się na zmniejszenie masy o 53%, co oznaczało redukcję o 70,4 kg w porównaniu do wersji z pełnym wałem. Jednakże zastosowanie wału o zmniejszonej grubości ścianki miało konsekwencje dla jego właściwości mechanicznych. Analiza wykazała, że maksymalne przemieszczenie wału wzrosło z początkowej wartości 1,3 mm do 2,6 mm, co wskazuje na dwukrotne zwiększenie ugięcia pod wpływem obciążeń roboczych (rysunek 8a). Dodatkowo, odnotowano wzrost naprężeń zredukowanych o 10 MPa (rysunek 8b).



Rysunek 8. Analiza MES wału drążonego o grubości ścianki 5 mm (a) przemieszczenie, (b) naprężenia zredukowane.

Zwiększenie naprężeń może wskazywać na wyższe ryzyko zjawisk zmęczeniowych w strukturze wału, szczególnie w miejscach koncentracji naprężeń. W kontekście długoterminowej trwałości wału wzrost naprężeń może wymagać zastosowania materiałów o wyższej wytrzymałości lub wzmocnienia konstrukcji w niewaligicznych miejscach.

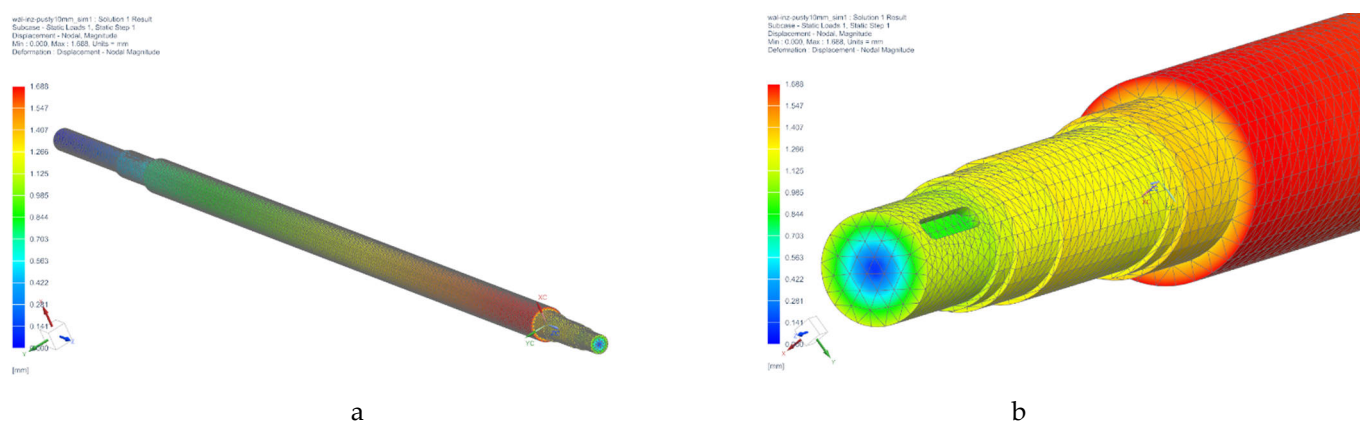
W wyniku analizy MES drugiego wariantu konstrukcyjnego wału drążonego o grubości ścianki 15 mm stwierdzono znaczną poprawę właściwości wytrzymałościowych. Parametry mechaniczne tego wariantu były zbliżone do tych uzyskanych dla wału pełnego, co oznaczało, że wał ten charakteryzował się odpowiednią sztywnością i wytrzymałością przy minimalnym ugięciu i obciążeniu. Wzrost wytrzymałości wiązał się jednak z istotnym wzrostem

masy, która zwiększyła się z 70,4 kg do 116,4 kg, co stanowi wzrost o około 65%. Większa masa przekłada się nie tylko na dodatkowe obciążenie konstrukcji, ale również na wyższe koszty materiałowe.

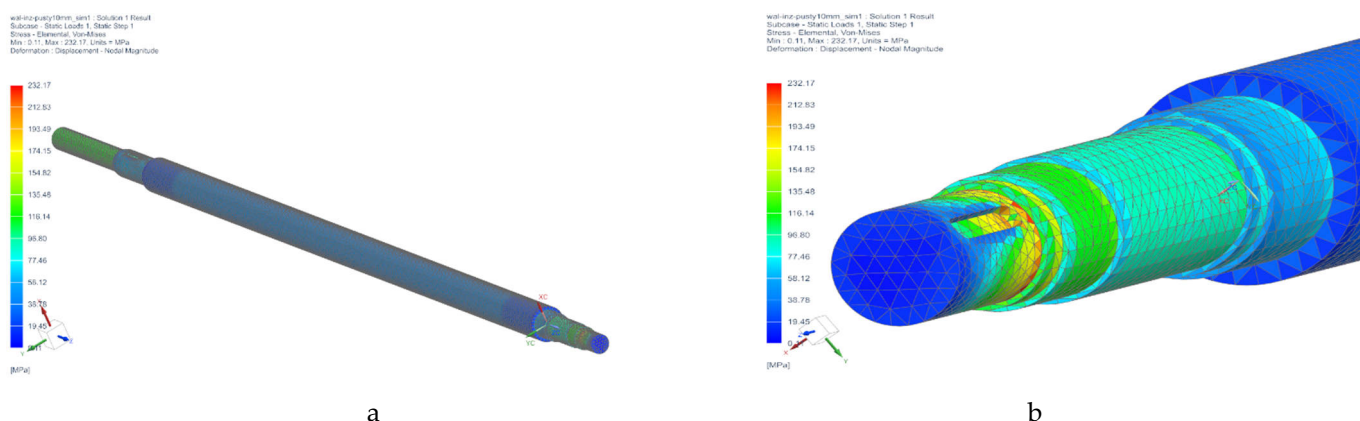
Koszty materiałowe dla poszczególnych gatunków stali w przypadku wału o grubości 15 mm wyniosły:

- Stal C30: 407 zł,
- Stal C45: 640 zł,
- Stal C60: 815 zł.

Ze względu na wzrost kosztów i masy, postanowiono rozważyć jeszcze jeden wariant konstrukcyjny wału drążonego, tym razem o grubości ścianki 10 mm. W przypadku zastosowania wału drążonego o grubości ścianki 10 mm, parametry wytrzymałościowe okazały się jedynie nieznacznie gorsze od uzyskanych w wariacie z 15-milimetrową ścianką. Oznacza to, że wał o grubości 10 mm wciąż zapewnia odpowiednią sztywność i wytrzymałość do zastosowań w mieszalniku farby, wykazując jedynie minimalne różnice w parametrach takich jak przemieszczenie i naprężenia zredukowane w porównaniu z wariantem 15 mm. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono analizowane parametry przemieszczenia i naprężeń zredukowanych.



Rysunek 9. Analiza MES wału drążonego o grubości ścianki 10 mm (a) przemieszczenie, (b) miejsce z największym przemieszczeniem



Rysunek 10. Analiza MES wału drążonego o grubości ścianki 10 mm (a) naprężenia zredukowane, (b) miejsce z największymi naprężeniami

Dzięki redukcji grubości ścianki do 10 mm, masa wału zmniejszyła się o 14%, co pozwoliło na obniżenie jej z 116,4 kg do 99,7 kg. Zmniejszenie masy ma pozytywny wpływ na dynamikę pracy mieszalnika, prowadzi do zmniejszenia obciążeń dynamicznych oraz potencjalnie wydłuża żywotność układu napędowego, minimalizując również zapotrzebowanie na energię potrzebną do pracy.

Dodatkową korzyścią jest redukcja kosztów materiałowych dla trzech analizowanych gatunków stali:

- Stal C30: 349 zł,
- Stal C45: 548 zł,
- Stal C60: 698 zł.

Dzięki takiemu kompromisowi udało się uzyskać konstrukcję o właściwościach mechanicznych zbliżonych do wariantu z 15 mm ścianką, przy jednoczesnej oszczędności masy oraz kosztów materiałowych. Wariant 10 mm stanowi więc optymalne rozwiązanie, łącząc wystarczającą wytrzymałość konstrukcyjną z niższą masą i mniejszym kosztem, co wpływa na całkowitą efektywność ekonomiczną projektu wału mieszalnika.

3. Wnioski

Na podstawie literatury oraz przeprowadzonych badań, można sformułować następujące wnioski:

1. Uszkodzenie wału jest wynikiem wielu czynników, które wspólnie przyczyniły się do awarii. Źle wykonane napawanie, brak osiowości podczas obróbki, różnice w twardości materiału oraz nieprawidłowy montaż mogły prowadzić do lokalnych naprężeń i osłabienia struktury wału, co w efekcie doprowadziło do skrzywienia.
2. Zmiana konstrukcji wału na wał drażony pozwala na znaczną redukcję masy wału, co jest korzystne z punktu widzenia zużycia łożysk oraz poprawy ogólnej wydajności urządzenia. Warianty o mniejszej masie zmniejszają obciążenie łożysk, co może przekładać się na ich dłuższą żywotność, jednak wymaga to równocześnie kompromisu w zakresie parametrów wytrzymałościowych.
3. Wariant z wałem drażonym o ściance grubości 10 mm stanowi optymalne rozwiązanie pod względem wytrzymałościowym i kosztowym. Pomimo niewielkiego pogorszenia parametrów wytrzymałościowych w porównaniu do wału pełnego, nadal utrzymuje się wysoka wytrzymałość na skrzywienie, a koszt materiału jest o 34% niższy. Dzięki zastosowaniu stali wysokowęglowej, wał w ekstremalnych warunkach nie osiągnie swojej granicy wytrzymałości, co zapewnia odpowiednią trwałość i bezpieczeństwo operacyjne.
4. Zmniejszenie masy wału przy zachowaniu zbliżonych właściwości wytrzymałościowych, a także obniżenie kosztów materiału, stanowi najlepszą decyzję ekonomiczną. Wał drażony o ściance 10 mm jest korzystniejszy od wału pełnego pod względem kosztów (mniejszy koszt stali), a jednocześnie nie powoduje znacznych strat w wydajności, co czyni to rozwiązanie bardziej efektywnym zarówno technicznie, jak i ekonomicznie.

Literatura

1. Dobrzański, L. A. „Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne (2002)
2. Legutko, Stanisław. „Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń”. WSiP, 2010.
3. Mieczysław Feld, Technologia budowy maszyn. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2000.
4. Gronostajski, Zbigniew, Roman Kuziak. "Metalurgiczne, technologiczne i funkcjonalne podstawy zaawansowanych wysokowytrzymałych stali dla przemysłu motoryzacyjnego." Prace IMŻ 1 (2010)
5. Poloszyk, Stanisław, L. Różański. „Termowizyjna diagnostyka maszyn technologicznych”. Pomiar Automatyka Kontrola, 2000
6. Marek Fidali. „Metody diagnozowania obiektów technicznych i procesów przemysłowych”. Politechnika Śląska, (2015).
7. Marek Fidali, Metody diagnostyki maszyn i urządzeń w predykcyjnym utrzymaniu ruchu, Bielsko-Biała, Katowice: Wydawnictwo Elamed, 2020.
8. A. Górecki, Z. Grzegórski, „Technologia. Montaż, naprawa i eksploatacja maszyn i urządzeń przemysłowych”. WSiP, Warszawa 1998.
9. Józef Bartosiewicz: Obróbka i montaż części maszyn. Warszawa: Wydawnictwo szkolne i pedagogiczne, 1985.
10. Jastrzębski, R., A. Jastrzębski. "Technika i technologia spawania elektrodą otuloną." Dozór Techniczny, 2013
11. Turyk E., Czwońóg B. „Spawanie metodą MIG/MAG. Poradnik inżyniera. Spawalnictwo.” Warszawa WNT, 2005
12. E. Dobaj, „Maszyny i urządzenia spawalnicze.” Warszawa: WNT, 2005.
13. Klimpel A. „Kontrola i zapewnienie jakości w spawalnictwie”. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 1998.
14. Dziubiński J., Klimpel A. „Napawanie i natryskiwanie cieplne.” WNT, Warszawa 1985.
15. Legutko, Stanisław. „Trendy rozwoju utrzymania ruchu urządzeń i maszyn.” Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne. Poznań 2009
16. Żółtowski, Bogdan. „Doskonalenie systemów eksploatacji maszyn”. Wydział Inżynierii Mechanicznej UTP, Bydgoszcz 2012

17. Płuciennik, Paweł, Andrzej Maciejczyk. "Wykorzystanie systemów CAD w procesie konstruowania maszyn i urządzeń." *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 17.6 2016
18. Dobrzański, L. A. „Współczesne tendencje rozwojowe nauki o materiałach i inżynierii materiałowej." *Inżynieria Materiałowa* 24.6 (2003)