

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY



POLITECHNIKA
OPOLSKA

**Trwałość zmęczeniowa stalowych elementów
poddanych śrutowaniu strumieniowemu**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Opracował: mgr inż. Sebastian Kamiński
Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda

Opole 2017

Składam serdeczne podziękowania mojemu promotorowi
prof. dr hab. inż. Tadeuszowi Łagodzie
za cenne uwagi, opiekę naukową oraz pomoc w trakcie realizacji pracy doktorskiej.
Dziękuję Mamie i Rodzinie za wiarę i wsparcie w dążeniu do celu.
Recenzentom za poświęcony czas oraz wszystkie konstruktywne
uwagi, które wpłynęły na jakość powyższej rozprawy.
Serdeczne podziękowania składam także Annie Kulesie, i Mateuszowi
Kowalskiemu za wszystkie uwagi redaktorskie i każde słowo wsparcia w
trakcie redagowania powyższej rozprawy.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	5
1. WPROWADZENIE.....	6
2. TECHNOLOGIA ŚRUTOWANIA ROZPROSZONYM ŚRUTEM TWARDYM.....	8
2.1. Zarys historyczny.....	8
2.2. Charakterystyka procesu śrutowania.....	10
3. PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH ZAGADNIEŃ ZWIĄZANYCH ZE ZMĘCZENIEM MATERIAŁÓWKONSTRUKCYJNYCH...17	
3.1. Rys historyczny badań poświęconych zjawisku zmęczenia materiałów.....	17
3.2. Powstanie pęknięć zmęczeniowych.....	18
3.3. Wpływ naprężeń własnych na zjawisko zmęczenia materiałów.....	24
3.4. Podstawowe rodzaje charakterystyk zmęczeniowych.....	26
3.4.1. Wykresy naprężeniowe.....	26
3.4.2. Wykresy odkształceniowe.....	27
4. PRZEGLĄD BADAŃ MATERIAŁÓW PODDANYCH OBRÓBCE ŚRUTEM TWARDYM ROZPROSZONYM.....	28
4.1. Kierunki badań i rozwoju procesu śrutowania w literaturze.....	28
4.2. Zjawisko zmęczenia materiałów poddanych śrutowaniu rozproszonemu na skutek działania obciążeń cyklicznych.....	30
4.3. Normy i wymogi stawiane materiałom w procesie śrutowania Rozproszonego.....	32
4.4. Podsumowanie przeglądu literatury.....	35

5. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY.....	36
5.1. Cel i zakres.....	36
5.2. Teza pracy.....	36
6. EKSPERYMENTALNA CHARAKTERYSTYKA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ORAZ METROLOGICZNYCH MATERIAŁÓW RODZIMYCH.....	37
6.1. Opis materiałów rodzimych pobranych do badań.....	37
6.2. Podstawowe właściwości mechaniczne.....	41
6.3. Zgłady metalograficzne materiałów wyjściowych.....	43
7. BADANIA EKSPERYMENTALNE.....	48
7.1. Badania zmęczeniowe.....	48
7.1.1. Stanowisko do badań zmęczeniowych.....	48
7.1.2. Badania zmęczeniowe dla materiałów rodzimych.....	50
7.1.3. Pomiar naprężeń własnych.....	54
7.1.4. Metoda trepanacyjna.....	55
7.1.5. Stanowisko pomiarowe.....	58
7.2. Badania metalograficzne po śrutowaniu.....	65
7.2.1. Topografia powierzchni po procesie krycia śrutem.....	75
7.2.2. Badania przelomów zmęczeniowych po procesie kulowania.....	89
7.2.3. Badania zmęczeniowe dla materiałów poddanych obróbce śrutowania.....	92
8. MODELOWANIE PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH PROCESU.....	101
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	106
10. LITERATURA.....	109
STRESZCZENIE.....	117

Wykaz ważniejszych oznaczeń

N_f – liczba cykli do zniszczenia,

σ_a – amplituda naprężenia,

$\varepsilon_{a,e}$ – amplituda odkształcenia sprężystego,

$\varepsilon_{a,p}$ – amplituda odkształcenia plastycznego,

$\varepsilon_{a,t}$ – amplituda odkształcenia całkowitego,

t – czas,

σ – naprężenie,

σ_1, σ_2 – naprężenia główne,

R_e – granica plastyczności,

R_m – granica wytrzymałości,

$2N_f$ – liczba nawrotów obciążenia (półcykli),

E – moduł Younga,

ν – współczynnik Poissona,

ε'_f, c – współczynnik i wykładnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego,

σ'_f, b – współczynnik i wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,

K' – współczynnik cyklicznego umocnienia,

n' – wykładnik cyklicznego umocnienia.

1. Wprowadzenie

Problematyka zmęczenia materiałów jest obiektem zainteresowania naukowców od ponad 150 lat. W tym czasie badania prowadzone przez naukowców ewaluowały, stając się narzędziem, które znalazło powszechne zastosowanie przy produkcji maszyn oraz urządzeń wykorzystywanych w wielu gałęziach przemysłu. Zagadnienie zmęczenia materiałów jest zagadnieniem prężnie rozwijającym się, a powyższa problematyka jest poruszana w wielu publikacjach naukowych. Zrozumienie mechanizmów nim rządzących oraz co najważniejsze jednoznaczne określenie trwałości zmęczeniowej przysparza uczonym i inżynierom wiele kłopotów [49-59, 61, 62, 81, 105, 106]. Dlatego też poznanie właściwości zmęczeniowych nowych materiałów oraz ich obróbek powierzchniowych jest istotne z punktu widzenia wydajności oraz bezpieczeństwa pracy. Kierunki rozwoju obecnie produkowanych urządzeń przemysłowych dążą głównie do podwyższenia bezpieczeństwa ich pracy, a także do minimalizowania występowania przestojów produkcyjnych. Obecnie istotnym kryterium wytwarzania obecnie elementów jest redukcja ich masy przy zachowaniu trwałości zmęczeniowej. Coraz wyższe normy wydajności narzucają również bardziej rygorystyczne standardy bezpieczeństwa układów maszynowych. Fakt ten prowadzi do konieczności poszukiwania nowego rodzaju materiałów lub wykorzystania obróbek materiałowych do podniesienia wytrzymałości materiałów już istniejących [23-33, 47, 48, 64, 79, 115, 118, 113]. Obróbkami powszechnie wykorzystywanymi w przemyśle są obróbki powierzchniowe materiałów. Główną zaletą obróbki kulowaniem jest możliwość wprowadzania do materiału naprężeń ściskających użytecznych z punktu widzenia zmęczenia materiału [1-5, 64]. Innym korzystnym aspektem obróbki śrutowaniem jest nadawanie powierzchni materiałowej odpowiedniej faktury (chropowatości), pożądanej z punktu widzenia powłok antykorozyjnych. Alternatywą dla powyższego procesu jest nagniatanie, walcowanie lub młoteczkowanie, jednakże urządzenia do tych procesów posiadają znaczne ograniczenia co do geometrii i gabarytów elementów [43-49, 64-66, 73, 74]. Materiały konstrukcyjne używane w przemyśle są często poddawane obróbce mechanicznej, chemicznej, ultradźwiękowej, celem poprawienia ich właściwości oraz dostosowania ich do zadań, jakie mają spełniać elementy konstrukcyjne. Głównym celem takiej obróbki jest

wzmocnienie warstwy wierzchniej elementów narażonych na działanie obciążeń zmiennych oraz na ścieranie (wały, korbowody, osie, koła zębate). W dzisiejszych czasach proces kulowania ma ugruntowaną pozycję na rynku ze względu na łatwość oraz stosunkowo niskie koszty jego prowadzenia [14, 22, 37-40].

Pomimo bardzo rozbudowanej tematyki badań prezentowanych w literaturze materiały po przeprowadzaniu obróbki śrutowania rozproszonym śrutem twardym nie zostały dotąd dostatecznie przebadane pod kątem zjawisk zmęczeniowych zależnych od parametrów przeprowadzania procesu. W pracy przeprowadzono analizę trzech gatunków stali. Badaniu został poddany materiał rodzimy oraz materiał po obróbce śrutowaniem oznaczone jako S235 JRG2, S355 J2+N. Są to spawalne stale o strukturze ferrytyczno-perlitycznej. Materiałem wyjściowym do badań były blachy o grubości 12 mm. Celem niniejszej rozprawy jest sprawdzenie jak proces kulowania wpływa na trzy badane materiały. Głównym parametrem jakim kieruje się w trakcie badań jest krotność ponownego procesu. Materiał jest poddawany pojedynczemu, podwójnemu, trzykrotnemu procesowi kulowania powierzchni materiału. Celem pracy jest określenie wpływu prowadzenia procesu śrutowania rozproszonego śrutem twardym oraz wpływ parametrów technologicznych na zmianę właściwości zmęczeniowych stali. Pracę podzielono na dziewięć rozdziałów. W rozdziale drugim przedstawiono historię śrutowania rozproszonego śrutem twardym. Rozdział trzeci poświęcono opisowi podstawowych wiadomości dotyczących zjawiska zmęczenia materiałów. W rozdziale czwartym zamieszczono przegląd literatury, który podzielono na dwie części. Pierwsza z nich opisuje ogólne trendy w badaniu materiałów po obróbce, natomiast druga swoim zakresem obejmuje wyłącznie literaturę, której przedmiotem zainteresowania jest zjawisko zmęczenia materiałów poddanych obróbce śrutowaniem. W rozdziale piątym przedstawiono cel, zakres i tezę badawczą niniejszej pracy. W rozdziałach szóstym i siódmym zaprezentowano przeprowadzone badania eksperymentalne. W pierwszym z nich scharakteryzowano właściwości wytrzymałościowe oraz metalograficzne. Rozdział siódmy zawiera wyniki badań zmęczeniowych oraz pomiar naprężeń własnych metodą trepanacyjną. Pozostałe trzy rozdziały obejmują swoim zakresem podsumowanie, wnioski, streszczenie oraz literaturę.

2. Technologia obróbki śrutowania rozproszonym śrutem twardym

W niniejszym rozdziale zaprezentowane zostaną podstawowe wiadomości z zakresu obróbki śrutowania rozproszonym śrutem twardym. W pierwszym podrozdziale przedstawiono zarys historyczny technologii prowadzenia procesu. Podrozdziały drugi oraz trzeci stanowią zwarty opis prowadzenia procesu, a także zastosowania materiałów po przeprowadzonej obróbce powierzchniowej. Obróbka powierzchniowa dla każdego z materiałów była prowadzona jako pojedyncze, podwójne oraz potrójne powtarzanie procesu krycia śrutem powierzchni materiału. Każda z krotności prowadzenia procesu jest w pracy rozumiana jako pełne krycie powierzchni materiałowej oraz jako wtórne powtórzenie tego procesu w cyklu (krotność).

2.1. Zarys historyczny

Gwałtowny rozwój przemysłu na przestrzeni lat spowodował rozwój metod służących poprawie walorów wytrzymałościowych elementów konstrukcyjnych. Materiały konstrukcyjne używane w przemyśle często poddawane są obróbce mechanicznej, chemicznej, ultradźwiękowej celem poprawienia ich właściwości oraz dostosowania ich do zadań, jakie mają spełniać elementy konstrukcyjne.

Od drugiej połowy XX wieku wiadomo, iż proces chromowania obniża wytrzymałość materiału poddanego obciążeniu zmiennemu od 30 do 70%, a z kolei proces nagniatania podnosi wytrzymałość o 60% [34, 46, 47, 48, 67-69, 86, 85]. Z danych literaturowych wynika, iż proces kulowania rozproszonego stali może być z powodzeniem stosowany do stali o wysokiej twardości [64-66, 73, 74, 75]. Proces ten może być również stosowany do wzmacniania elementów poddawanych chromowaniu w celu przywrócenia im pierwotnej wytrzymałości na działanie obciążeń zmiennych [1-5, 10, 12, 30-35, 38, 63, 64]. Głównym celem takiej obróbki jest wzmocnienie warstwy wierzchniej elementów narażonych na działanie obciążeń zmiennych oraz na zużycie ściernie powłoki (wały, korbowody, osie, koła zębate). Stopniowy rozwój technologii nagniatania materiałów

doprowadził do powszechnego stosowania metod takich jak młoteczkowanie, piaskowanie, nagniatanie czy kulowanie. Technologia śrutowania jest metodą stosunkowo młodą w porównaniu do powszechnie znanych konwencjonalnych metod nagniatania i umacniania warstwy wierzchniej materiału, ponieważ jej początki sięgają pierwszej połowy dwudziestego wieku. Pierwsze próby wykorzystania efektu plastycznego, powierzchniowego odkształcenia podjęto już w 1916 roku (Bonte H.). Metoda ta była wykorzystywana w niemieckich zakładach kolejowych, a sprowadzała się do prób nagniatania prostym jednokrążkowym narzędziem z dużymi siłami nacisku elementu osi wagonów oraz lokomotyw. Lata 1930-1940 to lata, w których obróbka nagniataniem zaczyna być wprowadzana do przemysłu na większą skalę za sprawą badań O. Horgera, Föppla i innych [26-29, 36, 67, 68, 114]. Stosowali oni narzędzia jednokrążkowe oraz dwukrążkowe do utwardzania osi i wałów o dużych wymiarach w celu poprawienia ich trwałości zmęczeniowej, a także podwyższenia ich odporności na ścieranie. Jednak dopiero w latach 1960-65 nastąpił intensywny rozwój różnych sposobów nagniatania i konstrukcji narzędzi nagniatających, które umożliwiły nie tylko obróbkę gładkościową, lecz także dokładną obróbkę wymiarową [68]. Rozpoczęto wówczas produkcję zunifikowanych narzędzi do nagniatania otworów, a w okresie późniejszym także do obróbki wałków. Narzędzia te umożliwiły obróbkę otworów w zakresie średnic od 2 do 400 mm. Przystosowane do uniwersalnych obrabiarek skrawających przyczyniły się one w krajach zachodnich do rozwoju technologii nagniatania [76-79].

Najczęściej wykorzystywanymi narzędziami były rolki oraz kulki, które miały bezpośredni styk z powierzchnią obrabianą materiału [26-29, 36, 39, 40, 67]. Technologia nagniatania może być stosowana we wszystkich zakładach branży metalowej, ponieważ narzędzia nagniatające mogą być używane na obrabiarkach uniwersalnych oraz stanowi szybki rozwój obróbki nagniataniem jako prostej i ekonomicznej metody obróbki wykańczającej. Obróbka nagniataniem może być stosowana także w celu zwiększenia przyczepności i równomierności powłok galwanicznych (jako obróbka poprzedzająca), zmniejszenia naprężeń po obróbce cieplnej lub cieplno-chemicznej, podwyższenia wytrzymałości zmęczeniowej kontaktowej, zmniejszenia zużycia uszczelnień gumowych, zmniejszenia pęknięć cieplnych form do odlewania metali, zwiększenia trwałości warstwowych łożysk ślizgowych, zwiększenia odblaskowości powierzchni, a także, choć w ograniczonym zakresie, w celu zwiększenia odporności na korozję powierzchniową [42, 64, 71, 73, 74, 78, 104, 110-114].

2.2. Charakterystyka procesu śrutowania

Śrutowanie czy też obróbka strumieniowa śrutem twardym jest procesem obróbki powierzchniowej na zimno, podczas którego powierzchnia elementu jest bombardowana małymi kulistymi drobinami metalu potocznie nazywanego śrutem. W procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego elementy robocze (kulki) nie są prowadzone w narzędziu w sposób określony i uporządkowany. W związku z czym ich tory i prędkości są trudne do określenia. Odmianą tego procesu jest kulowanie strumieniowe [42, 67, 68, 75-78, 81], w którym na obrabianą powierzchnię kierowany jest strumień elementu roboczego za pośrednictwem dyszy spustowej. Urządzenie do śrutowania strumieniowego (śrut miękki) w procesie otwartym przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Prace antykorozyjne, krycie śrutem miękkim elementu instalacji odsiarczania spalin na terenie Elektrowni Belchatów.

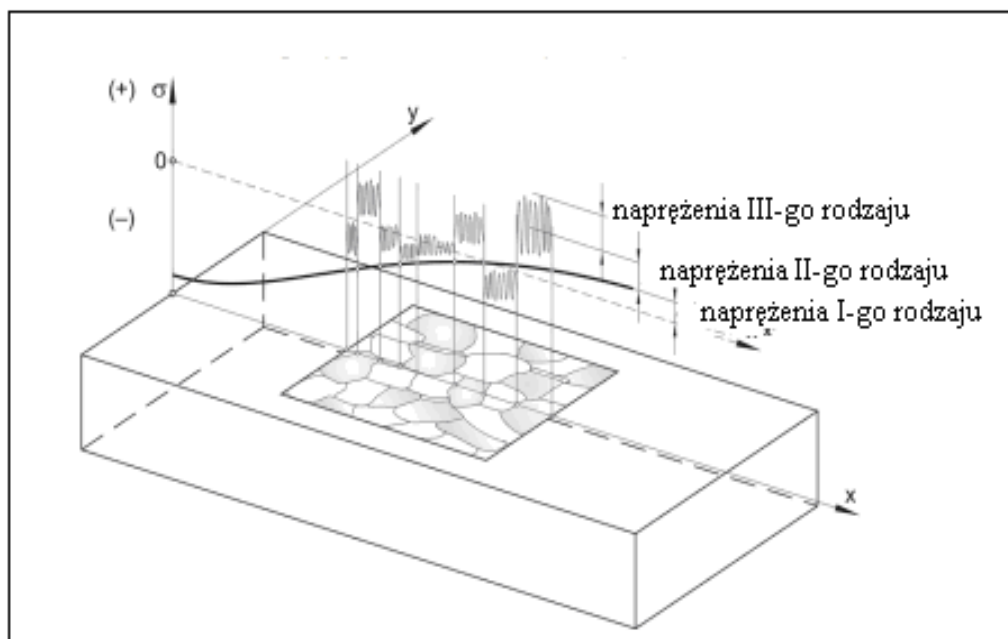
Źródłem energii kinetycznej kulek (śrutu) lub innego czynnika roboczego, w zależności od rodzaju zastosowanego procesu, jest najczęściej powietrze. Powoduje ono wypychanie kulek z komory magazynowej urządzenia do przewodów ciśnieniowych, na końcu których znajduje się dysza wykonana z materiału trudnościeralnego (najczęściej

węglik uranu). Medium umacniające, ściernie (kulka, ścierniwo) zderzając się z powierzchnią obrabianego materiału, przekazuje mu swoją energię kinetyczną, wprowadzając stan naprężeń w warstwie wierzchniej materiału [16-19, 64, 65, 68-75, 78, 80, 112]. W opisie warstwy wierzchniej parametrem odgrywającym najważniejszą rolę jest stan naprężeń własnych, pozostałych po obróbkach wykańczających. Sposób dobieranych obróbek powierzchniowych ma bezpośredni wpływ na wartość oraz kierunek naprężeń własnych znajdujących się pod powierzchnią materiału [6-9, 43-47, 81-85].

Wartość średnia naprężenia jest dodatkową statyczną przyłożoną do cyklicznie lub losowo zmieniającego się obciążenia. Aby wyznaczyć zasięg oddziaływań naprężeń wewnątrz materiału, należy podzielić je na trzy grupy ich występowania [24, 25]:

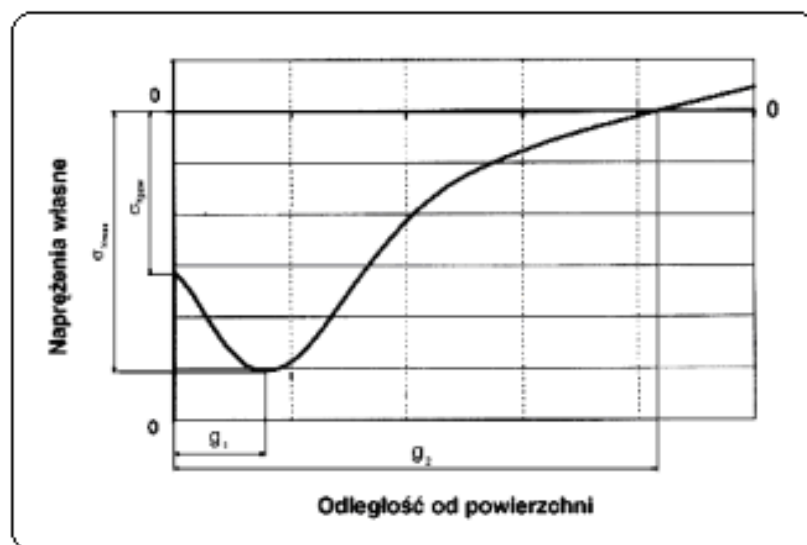
- naprężenia I-go rodzaju występują w całej strefie umocnionej. Ich powstawanie wywołane jest makro-wpływem wielu czynników zewnętrznych, takich jak: zróżnicowanie struktury wewnętrznej wywołane obróbką oraz nierównomierne stygnięcie warstwy wierzchniej na różnych głębokościach.
- naprężenia II-go rodzaju występują w obszarze kilku sąsiednich ziaren oraz ich granic, ich występowanie spowodowane jest zmianą orientacji ziaren wobec siebie, a także różnicami objętości własnych pomiędzy tymi ziarnami,
- naprężenia III-go rodzaju działają w obszarach kilku sąsiadujących ze sobą atomów. Występują w miejscach obciążonych defektami w budowie ich sieci krystalicznych powstałych w wyniku prowadzenia obróbki materiałowej powierzchniowej (np. wakanse, dyslokacje, uskoki sieci, rozwarstwienia) [7, 24-29, 30-35, 68].

Warstwy występowania naprężeń po obróbce powierzchniowej przedstawiono na rysunku 2a. W niniejszej pracy poruszany jest głównie wpływ krotności, prowadzenia procesu kulowania, oraz wpływ powtarzalności tego cyklu na trwałość zmęczeniową.



Rys. 2a. Wielkości naprężeń własnych (σ , σ' , σ'') 1-go, 2-go i 3-go rodzaju [4].

W praktyce zastosowanie procesu śrutowania rozproszonym śrutem twardym ma korzystny wpływ na materiał. Większość uszkodzeń elementów konstrukcyjnych maszyn a także urządzeń wywołana jest zmęczeniem materiału lub korozją, oba te czynniki mają swoje ogniska już na powierzchni materiału. Jak wynika z obserwacji pęknięcia nie powstają oraz nie propagują w głąb materiału w strefie występowania naprężeń ściskających. W procesie obróbki śrutowania na powierzchni materiału występują wgłębienia, w obrębie których pod powierzchnią występują naprężenia ściskające [24-29, 30-35, 48, 49] (odkształcenie plastyczne). Prowadzi to do znacznego podwyższenia wytrzymałości tej warstwy. Powstały stan naprężeń ściskających w materiale jest korzystny, stan taki podnosi wytrzymałość zmęczeniową, odporność na korozję zmęczeniową, pękanie w wyniku korozji naprężeniowej, zwiększa się odporność na korozję wodorową, korozję cierną (fretting). Największe naprężenia ściskające występują tuż pod powierzchnią materiału, a ich wielkość zbliżona jest do połowy wartości granicy plastyczności (R_e) dla danego materiału. Rozkład naprężeń w materiale po procesie śrutowania zobrazowano na rysunku 2b [4].



Rys. 2b. Głębokość zalegania naprężeń własnych w materiale po procesie śrutowania [4].

W pracy Nasiłowskiej i innych maksymalne wartości naprężeń ściskających powstałe po procesie śrutowania występowały na głębokości 0,08 mm pod powierzchnią materiału, w strefie największego umocnienia (punkt Bielajewa). Proces wprowadza zmiany w postaci naprężeń własnych, które nie występują w materiale przed śrutowaniem rozproszonym [4, 78, 79, 80]. Proces obróbki śrutowania śrutem twardym jest procesem dynamicznym, a efektywność procesu jest uzależniona od szeregu parametrów wpływających bezpośrednio na jakość obróbki.

Czynnikiem odgrywającym kluczową rolę w procesie kulowania są naprężenia szczątkowe powstałe w procesie kulowania jedna z metod służącą do ich interpretacji, oraz sprawdzenia poziomu jest metoda płytek Almena. W procesie obmiaru posługujemy się wzorcowymi płytkami przed procesem oraz płytkami po kulowaniu. Aparat Almena składa się z aparatu pomiarowego (miernika) oraz stołu do którego mocowane są płytki.

Rys. 3a.



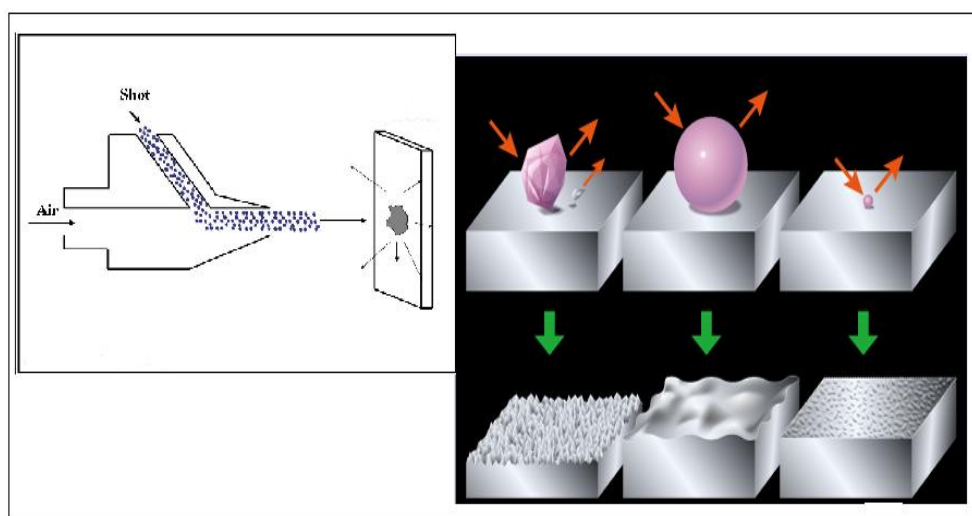
Rys. 3a. Cyfrowy miernik służący do pomiaru ugięcia płytki Almena.



Rys. 3b. stolik z usztywnieniem do pomiaru wybożenia próbek Almena.

Podstawowym parametrem wpływającym na jakość oraz efektywność prowadzenia powyższego procesu jest prędkość materiału umacniającego. W aparatach ciśnieniowych jest ona uzależniona od mocy wyjściowej oraz strat związanych z przesyłem medium umacniającego. Prędkość śrutu w instalacjach waha się od 40 do 90 m/s [23-25, 68, 74, 76, 77,]. Ze względu na fakt, iż obróbka ta wykorzystuje efekt odkształcenia plastycznego na zimno, może ona być stosowana do materiałów, w których możliwe jest ich trwałe odkształcenie plastyczne w temperaturze otoczenia. Bezpośredni wpływ na jakość prowadzenia procesu śrutowania ma wielkość oraz kształt śrutu, a to jest uzależnione od rodzaju prowadzonej obróbki. W przemyśle wykorzystywany jest śrut okrągły (kulisty), wałeczkowy oraz cięty z drutu o ostrych krawędziach. Rodzaj stosowanego śrutu, jego kształt i rozmiar mają bezpośredni wpływ na jakość struktury powierzchni materiału (jej

chropowatość). Wymagania techniczne dotyczące metalowych ścierniw stosowanych w obróbce strumieniowo-ciernej określa Polska Norma PN-EN ISO 11124-1 [128]. Dokonując doboru śrutu należy brać pod uwagę wielkość elementu nagniatanego, jego kształt oraz wielkość deformacji jakim jest poddany materiał. W praktyce w trakcie prowadzenia procesu kulowania należy mieszać ze sobą kilka granulacji śrutu. W trakcie pierwszego napełnienia oczyszczarki należy wsypać śrut w określonej proporcji: 60% śrutu o przyjętej największej granulacji, 20% ma stanowić śrut o granulacji niższej o jeden stopień i 10% śrutu o granulacji niższej o kolejny stopień. Przy pierwszym uzupełnianiu śrutu w obiegu oczyszczarki zaleca się podać mieszankę w następującej proporcji: 70% śrutu o największej przyjętej granulacji i 30% śrutu o granulacji niższej o jeden stopień. W trakcie dalszej eksploatacji odpowiednia mieszanina powstaje w sposób samoczynny i dalsze uzupełnienia powinny polegać na podawaniu do obiegu oczyszczarki, śrutu o najwyższej granulacji. Wzrost średnicy i masy śrutu sprzyja zwiększeniu strefy wpływu naprężeń. Podobną zależność uzyskali w pracy [68, 76, 79, 80, 30-33] autorzy, wykorzystując zwiększenie masy oraz średnicy śrutu umacniającego, co wpływa bezpośrednio na wzrost trwałości zmęczeniowej oraz twardości powierzchni materiału po kulowaniu. W literaturze istnieje wiele publikacji naukowych poświęconych zagadnieniu modelowania samego procesu kulowania śrutem twardym kulistym. Parametry prowadzenia procesu oraz przygotowanie elementu do jego prowadzenia zawarte jest w Branżowej Normie BN- 80/1062-01 [131]. Norma określa także geometrię oraz frakcje używanego śrutu. Wpływ doboru odpowiednich frakcji do jakości powierzchni umocnionej przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Chropowatość powierzchni w zależności od kształtu śrutu [81].

Istotny wpływ na jakość prowadzenia procesu ma także gęstość krycia śrutem powierzchni materiału umacnianego. W swoich pracach Szyca, Kukiełka oraz Bartosiuk [44, 68, 76, 81, 106, 118, 119,] badają wpływ gęstości krycia śrutem kulistym powierzchni materiału do poziomego rozkładu naprężeń ściskających w materiale. Zwiększenie intensywności prowadzenia procesu wpływa nieliniowo na trwałość zmęczeniową materiału. Wraz ze wzrostem pokrywania śrutem powierzchni zwiększa się głębokość zalegania naprężeń własnych [44, 54, 51, 106].

3. Przegląd podstawowych zagadnień związanych ze zmęczeniem materiałów konstrukcyjnych

Rozdział ten zawiera podstawowe informacje dotyczące zjawiska zmęczenia materiałów wykorzystywanych w procesie produkcji elementów maszyn i urządzeń przemysłowych. Badania zmęczeniowe są przedmiotem realizowanych prac badawczych zawartych w niniejszej pracy. W kolejnych podrozdziałach zostały przedstawione: krótki przegląd historyczny wybranych prac istotnych dla rozwoju zmęczenia materiałów, mechanizmy powstawania pęknięć zmęczeniowych, wpływ naprężeń własnych na procesy zmęczeniowe zachodzące w materiale oraz przegląd charakterystyk zmęczeniowych zastosowanych w pracy.

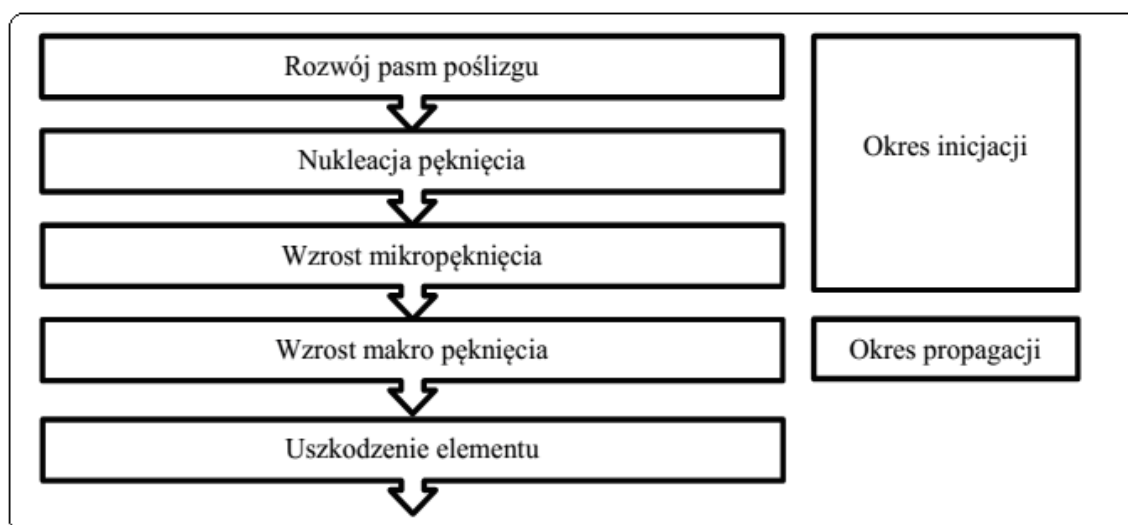
3.1. Rys historyczny badań poświęconych zjawisku zmęczenia materiałów

Jednym z pierwszych badaczy zajmujących się tematyką zmęczenia materiałów był Wöhler. W okresie pomiędzy 1850 a 1875 rokiem przeprowadzał on liczne badania eksperymentalne. Głównym celem przyświecającym badaniom Wöhlera było określenie granicy naprężenia, poniżej której nie zachodzi uszkodzenie materiału spowodowane zjawiskiem zmęczenia. Jego badania miały jasno określić istnienie granicy zmęczenia, badania były przeprowadzane zarówno dla rzeczywistych elementów, jak i dla próbek laboratoryjnych. Do najważniejszych osiągnięć ponad 100 letniej pracy Wöhlera i innych autorów było określenie czynników wpływających na trwałość zmęczeniową. Jako ważne wydarzenie można również wymienić opracowanie przez Bauschingera lustrzanego ekstensometru (1885) pozwalającego uzyskać dokładność na poziomie jednego promila. Uczony przez wiele lat podejmował próby znalezienia zależności pomiędzy niewielkimi odkształceniami plastycznymi a granicą zmęczenia, wierzył w istnienie „naturalnych” granic elastyczności wyrażonych w cyklach, poniżej których zjawisko zmęczenia nie występuje. W dzisiejszych czasach zjawisko to określa się jako różnica pomiędzy statyczną (monotoniczną) a cykliczną granicą plastyczności materiałów. Rok 1903 to rok, w którym w trakcie prowadzenia badań zmęczeniowych zaobserwowano iż intensywność prowadzenia procesu przekłada się bezpośrednio na zmianę struktury materiału w obrębie wpływu oddziaływania procesu. A to z kolei ma bezpośredni wpływ na wzrost trwałości

materiałów kulowanych w stosunku do materiału rodzimego [44, 45]. W roku 1923 opracowano pierwszy prosty model opisujący zachowanie materiału z użyciem zależności pomiędzy odkształceniem i naprężeniem. Był on rezultatem wieloletnich badań nad praktycznymi aspektami zmęczenia materiałów obejmującymi między innymi problemy spotykane w kolejnictwie. Na przełomie lat 1930-40 wieku prace naukowców koncentrowały się na eksperymentalnym ustaleniu czynników wpływających na wytrzymałość zmęczeniową materiałów. W 1950 roku swoje prace rozpoczęli Coffin i Manson, ustalając zależność pomiędzy odkształceniami plastycznymi a trwałością zmęczeniową. Od roku 1970 analiza konstrukcji pod kątem zjawiska zmęczenia materiałów stała się powszechnym narzędziem stosowanym w projektowaniu. Rozwój technologiczny oraz wysoki poziom wiedzy o zjawisku zmęczenia materiałów sprawiają, iż jest ono nadal obiektem zainteresowań wielu badaczy. Rozwój i poszerzanie prowadzonych badań pozwalają na podwyższenie standardów bezpieczeństwa urządzeń oraz ich konstrukcji [6, 48, 49, 53, 58, 59, 62, 65].

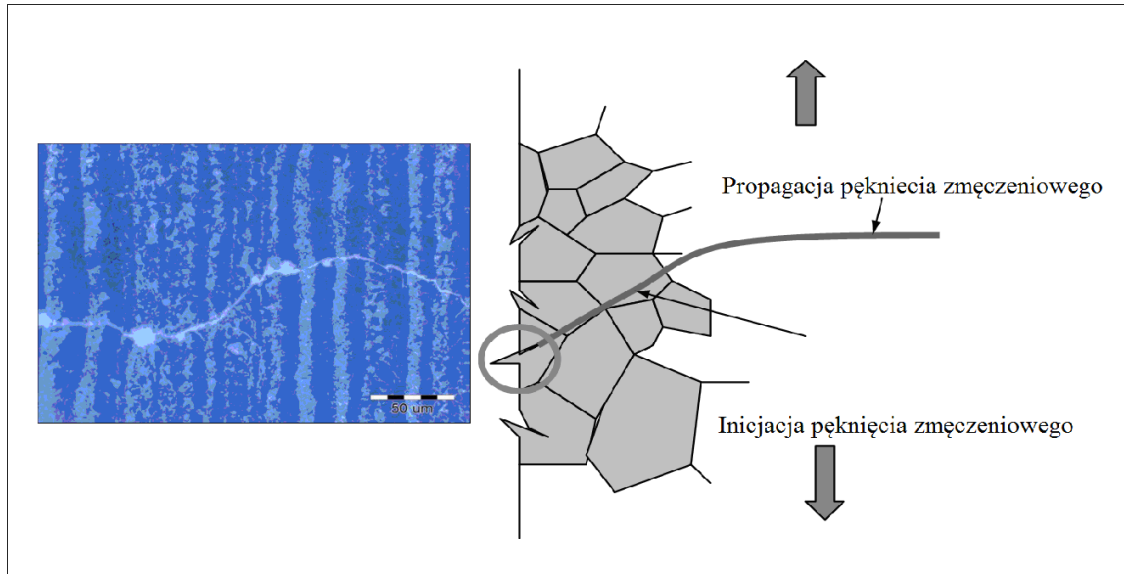
3.2. Powstawanie pęknięć zmęczeniowych

Zmęczenie definiowane jest jako lokalnie zachodzący proces wywołany obciążeniem cyklicznym. Jest ono rezultatem wielu zjawisk zachodzących w materiale takich jak: inicjacja pęknięcia, propagacja, a także całkowite uszkodzenie elementu [11, 13, 3, 54, 57, 61, 66, 68, 81]. Podczas oddziaływania obciążeń o cyklicznym charakterze lokalne odkształcenia plastyczne występują w miejscach o najwyższych naprężeniach. Trwałe odkształcenia plastyczne powodują nieodwracalne uszkodzenie materiału, a w miejscu ich występowania rozwija się pęknięcie zmęczeniowe. Jeśli materiał doznaje coraz wyższej liczby cykli obciążenia, długość pęknięcia wzrasta, prowadząc w rezultacie do całkowitego uszkodzenia elementu. Zmęczeniowy proces uszkodzenia materiału składa się z etapów przedstawionych na rysunku 5.

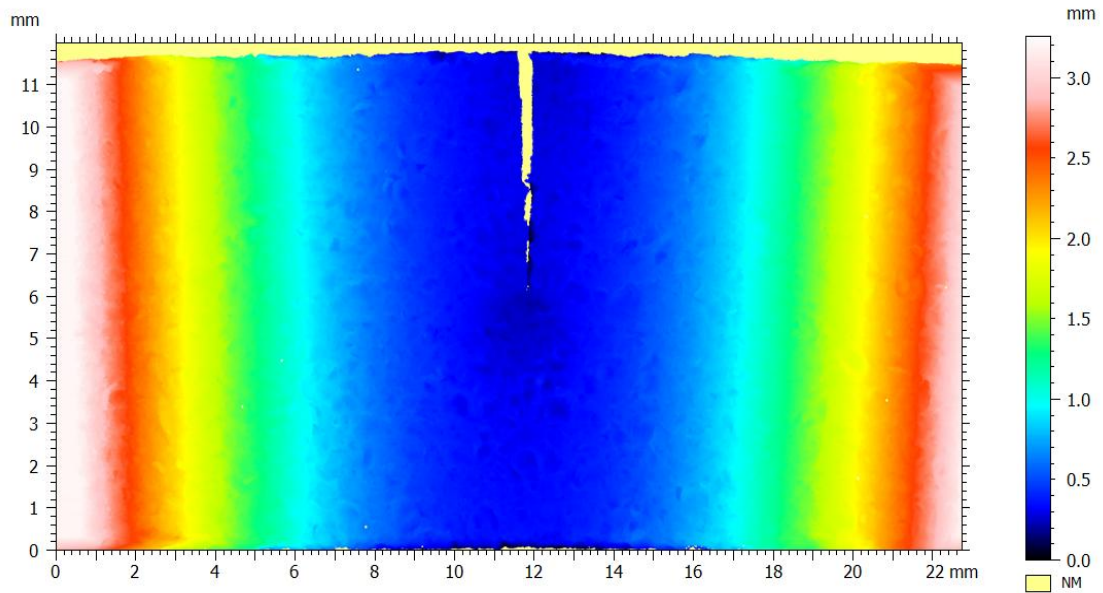


Rys. 5. Etapy rozwoju pęknięcia zmęczeniowego [53, 54, 60].

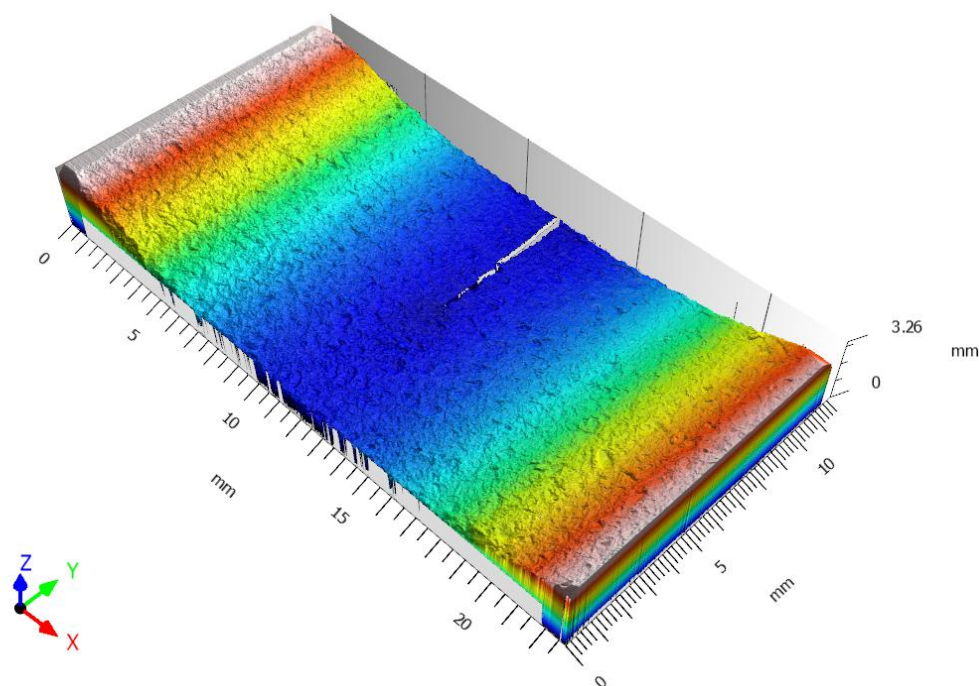
Na przestrzeni lat uważano, że występowanie zjawiska zmęczenia jest bezpośrednio powiązane z granicą zmęczenia. Określona jest ona jako wartość naprężenia, poniżej której nie występuje zmęczeniowe uszkodzenie materiału. Aktualny stan wiedzy pozwala jednak twierdzić, że klasycznie definiowana granica zmęczenia materiałów nie istnieje [51, 53, 57, 72, 73]. Mechanizm inicjacji pęknięcia zmęczeniowego i jego wzrostu jest konsekwencją formowania się nowych pasm poślizgów. Powodują one cykliczną plastyczną deformację mikrostruktury, inne określenie tego zjawiska to aktywowanie dyslokacji. Uszkodzenie materiału zachodzi dla wartości naprężeń lokalnie przekraczających granicę plastyczności. Przy niskim poziomie naprężeń w elemencie, odkształcenia plastyczne są obecne jedynie w objętości kilku ziaren materiału. Zazwyczaj miejscem ich pojawiania się jest powierzchnia materiału. Ponieważ pasma poślizgu nie są „zablokowane” przez otaczającą mikrostrukturę, odkształcenia na powierzchni zewnętrznej pojawiają się na ogół przy niższych poziomach naprężeń [53, 57, 60, 68, 97]. Proces tworzenia się pasm poślizgu jest związany z naprężeniami stycznymi. W skali mikrostruktury naprężenia nie są rozłożone równomiernie w całej objętości materiału (rys. 6 a, b, c).



Rys. 6 a. Propagacja pęknięcia zmęczeniowego stali.



Rys. 6 b. Przełom zmęczeniowy wraz z uwzględnieniem blastycznego odkształcenia próbki w płaszczyźnie pionowej.



Rys .6 c. Przekrój próbki z widocznym przelomem zmęczeniowym w części badawczej próbki.

Nawet po zainicjowaniu pęknięcia zmęczeniowego jego wzrost często pozostaje powolny i nierównomierny. Zjawisko takie często jest spowodowane mikrostrukturą, mogą to być przykładowo granice ziarna. Jeśli w określonej objętości materiału pojawiają się inne mikropęknięcia oddalone od siebie, to proces ich wzrostu może przybierać bardziej regularny charakter i może być on określany jako rzeczywisty moment rozwijania się pęknięcia zmęczeniowego [57, 96, 92, 93, 104, 109, 112].

Na jakość i parametry wytrzymałościowe zadanych stopów metali wpływają również termiczne, mechaniczne oraz powierzchniowe obróbki jakim jest poddawany materiał. Uwzględniając zjawiska fizykochemiczne, które często występują w materiale podczas jego ogrzewania i wyziębiania, można doprowadzić do wytworzenia się w nim najbardziej pożądanym składników strukturalnych. Mają one nadawać materiałowi określone właściwości wytrzymałościowe. W wyniku procesu nagrzewania i wychładzania stali powstaje struktura ferrytyczno-perlityczna, która odznacza się małą twardością i wytrzymałością, jednak materiał taki staje się bardziej ciągliwy. Właściwości takie ułatwiają wykonanie obróbki wiórowej, która odgrywa kluczową rolę w trakcie procesu wytwarzania elementu konstrukcyjnego. Stal obok żelaza i węgla zawiera również inne pierwiastki chemiczne. W skład stopów żelaza wchodzi pierwiastki takie jak: chrom, nikiel, mangan, wolfram, miedź, molibden i tytan. Metale te wpływają korzystnie na

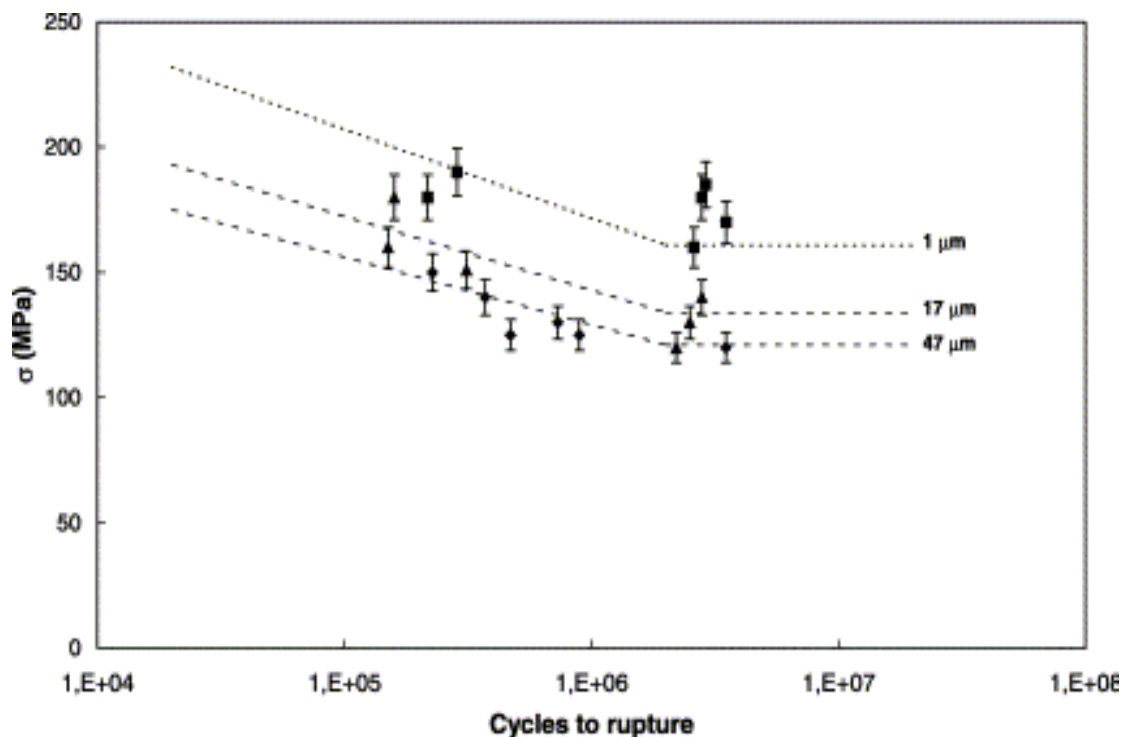
cechy fizyczne stali, natomiast wtrącenia niemetaliczne, głównie pochodne tlenków siarki oraz fosforu, traktowane są jako zanieczyszczenia [9-11, 40-42, 50]. Wieloletnie badania materiałowe prowadzone przez naukowców na całym świecie wykazały, iż liczne właściwości materiałów metalicznych, szczególnie mechaniczne, a także podatność materiału na zabiegi technologiczne zależą od mikrostruktury wewnętrznej materiału. W literaturze można znaleźć prace dotyczące wpływu mikrostruktury materiału na jego trwałość zmęczeniową [3-5, 49, 50, 57, 104]. W pracach [80, 78, 30-34, 57, 104] autorzy głównie opierają się na ocenie jednorodności struktury: jednolitej wielkości ziarna, ewentualnej segregacji faz w strukturach wielofazowych, wreszcie braku lub występowaniu wad materiałowych.

Wielkość ziarna wpływa na właściwości wytrzymałościowe stali. Ruchy dyslokacyjne napotykają znaczną przeszkodę w obrębie granicy ziaren, ponieważ dochodzi tam do koncentracji naprężeń, co ma negatywny wpływ na własności materiału. Wartości te mogą zostać zredukowane poprzez zastosowanie lokalnego poślizgu wielokrotnego, który wpływa na wzrost powierzchni granic ziaren, a to bezpośrednio wpływa na umocnienie materiału [3-7].

Przy założeniu równomiernego rozkładu ziaren obu faz właściwości stopu zależą od wielkości ziarna. Gruboziarnistość często powoduje kruchość i zmniejsza jego wytrzymałość [16, 40-42, 90, 109].

Kształt ziarna oraz jego średnica i rozdrobnienie znacząco wpływają na walory wytrzymałościowe stopów stali, a także na wzajemne oddziaływanie w sieciach międzykrystalicznych. W pracy Di Schino i Kenny'ego [20, 21] opisano wzrost właściwości wytrzymałościowych wraz ze wzrostem rozdrobnienia mikrostruktury

(rys. 7). Na skutek rozdrobnienia struktury następuje umocnienie materiału. Przyjmuje się, że rozdrobnienie struktury poprawia wytrzymałość materiałów w warunkach obciążeń zarówno statycznych, jak i zmęczeniowych.



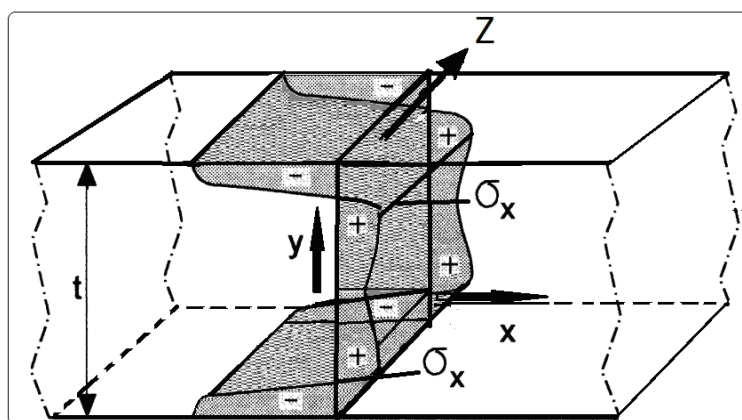
Rys. 7. Wpływ rozdrobnienia ziarna na trwałość zmęczeniową stopu AISI 304 [21].

Badania doświadczalne pokazały, iż w stali nierdzewnej (AISI 304) uzyskano na skutek różnej obróbki termicznej zróżnicowane rozdrobnienie mikrostruktury.

Po przeprowadzeniu badań doświadczalnych udowodniono, iż zdecydowany wpływ na wytrzymałość zmęczeniową odgrywa rozdrobnienie ziaren. Jeśli w ziarnie materiału powstanie pasmo poślizgu, wraz z nim na powierzchni materiału zostaje utworzone obrzeże, które stanowi nowy wysunięty fragment struktury. Na powierzchni zewnętrznej wystawionej na działanie powietrza atmosferycznego lub cieczy osadzają się np. tlenki. Wzrost obciążenia w trakcie poślizgu powoduje częściowe utwardzenie się struktury w rejonie jego występowania. W wyniku tego przy odciążeniu w obrębie pasma poślizgu zostanie wytworzone większe naprężenie styczne, ale tym razem działające w przeciwnym kierunku. Ponieważ tlenki i zanieczyszczenia, które osadziły się na nowopowstałej powierzchni nie mogą być usunięte, proces utwardzenia się struktury w obrębie pasma poślizgu nie jest w pełni odwracalny. W miarę działania obciążenia w kolejnych cyklach tworzone są nowe pasma poślizgu. Ogół tych zjawisk zachodzących w materiale sprzyja gwałtownemu przyrostowi pęknięć zmęczeniowych [60, 97-101].

3.3. Wpływ naprężeń własnych na zjawisko zmęczenia materiałów

W literaturze fachowej definicję naprężeń własnych przyjmuje się jako rozkład naprężeń obecnych w danym elemencie, który nie został wywołany poprzez zewnętrzne obciążenia [133, 52]. Naprężenia własne bywają również błędnie określane jako wewnętrzne. Naprężenia własne o charakterze ściskającym i rozciągającym zawsze występują razem. Przykładem może być fragment płyty widoczny na (rys. 8). Jeśli na dany element nie działa żadna zewnętrzna siła, to naprężenia rozciągające muszą być zrównoważone przez naprężenia ściskające materiał.



Rys. 8. Rozkład naprężeń własnych.

Jeśli nie istnieją żadne siły zewnętrzne, to musi być spełniony warunek opisany następującym równaniem:

$$\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_x dy \cdot h = 0, \quad (1)$$

gdzie: σ_x - naprężenia w kierunku x , t - wymiar charakterystyczny.

Identyczne założenie dotyczy również momentów działających na układ płaski:

$$\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} y \cdot \sigma_x dy \cdot h = 0, \quad (2)$$

Jeśli do elementu, w którym występują naprężenia własne przyłożona zostanie siła zewnętrzna, utworzony zostanie nowy rozkład naprężeń, który w zakresie odkształceń sprężystych będzie sumą rozkładów:

$$\sigma = \sigma_{zew} + \sigma_{res} , \quad (3)$$

gdzie: σ_{zew} - rozkład naprężeń wywołany obciążeniami zewnętrznymi, σ_{res} - rozkład naprężeń własnych (*residuals*).

Obecność naprężeń własnych w materiale może mieć duży wpływ na jego trwałość zmęczeniową. Jeśli do elementu, w którym panują naprężenia własne przyłożone zostanie obciążenie cykliczne o amplitudzie σ_a i wartości średniej σ_m , to amplituda obciążenia pozostaje bez zmian, natomiast wartość średnia zostaje zmieniona przez naprężenia własne według następującego równania:

$$\sigma_m = \sigma_{m,zew} + \sigma_{res} , \quad (4)$$

W przypadku dodatniej wartości naprężeń własnych, powodujących rozciąganie materiału, ich wpływ na trwałość zmęczeniową może być niekorzystny [55, 57]. Ściskające naprężenia własne mogą oczywiście zapobiegać otwieraniu się mikropęknięć. Nie powoduje to jednak całkowitego zatrzymania ich propagacji, obniżone jest jedynie tempo zachodzącego procesu.

Do głównych przyczyn występowania naprężeń własnych można zaliczyć:

- obróbkę cieplną,
- wszelkiego rodzaju procesy produkcyjne,
- odkształcenia plastyczne, w wielu przypadkach występujące w krawędziach geometrycznych,
- połączenia pomiędzy elementami.

Jeśli obecność naprężeń własnych w materiale jest niekorzystna najczęściej, są one usuwane poprzez zabiegi obróbki termicznej. Jeżeli wyżarzanie jest przeprowadzane dla temperatury rekrytalizacji danego materiału, to jego rezultatem jest prawie całkowite usunięcie naprężeń własnych. W trakcie obróbki termicznej rekrytalizacja struktury powoduje usunięcie dyslokacji oraz wszystkich trwałych odkształceń plastycznych, a co za tym idzie eliminowane są naprężenia własne. W przypadku obróbki cieplnej, której parametry nie obejmują temperatury rekrytalizacji, zostaną usunięte tylko niektóre dyslokacje i niedoskonałości mikrostruktury. Tym samym zredukowana zostanie tylko część naprężeń własnych. Wadą obróbki cieplnej może być pogorszenie właściwości materiału poprzez osłabienie efektów hartowania czy spadek właściwości mechanicznych [134]. Problematyka naprężeń własnych oraz ich wpływ na zjawiska zmęczeniowe zachodzące w materiałach poddanych śrutowaniu, wyprodukowanych w technologii

śrutowania dynamicznego przy użyciu śrutu kulistego, w procesie otwartym jest przedmiotem niewielu opracowań branżowych [51-54, 57-62].

3.4. Podstawowe rodzaje charakterystyk zmęczeniowych

Wyniki badań zmęczeniowych są najczęściej prezentowane w postaci charakterystyk zmęczeniowych, które w sposób jasny i czytelny opisują wyniki badań zmęczeniowych materiałów. Zastosowanie opisów zjawisk zmęczeniowych umożliwia nie tylko porównywanie materiałów między sobą, ale również jest pomocne przy ich projektowaniu. W pracy zaprezentowano przykłady najczęściej stosowanych charakterystyk zmęczeniowych mających bezpośrednie zastosowanie w przeprowadzonych badaniach.

3.4.1 Wykresy naprężeniowe

Wykres naprężeniowy był pierwszą próbą ilościowego opisu zjawiska zmęczenia. Jest powszechnie stosowany do dzisiaj między innymi jako narzędzie oceny trwałości przy projektowaniu elementów maszyn. Nie zaleca się stosowania charakterystyki naprężeniowej dla zakresu niskiej liczby cykli, gdzie występują duże odkształcenia plastyczne. Wyniki badań eksperymentalnych opisane są w układzie naprężenie-liczba cykli (σ_a-N_f) [51, 52, 54, 57]. Klasyczny wykres Wöhlera jest podzielony na dwa odcinki. Nachylona część obejmuje obszar ograniczonej trwałości zmęczeniowej, natomiast odcinek równoległy wyznacza wartość hipotetycznego naprężenia, poniżej którego zjawisko zmęczenia nie zachodzi dla danego materiału. Odcinek ograniczonej wytrzymałości jest aproksymowany zależnością Wöhlera:

$$\sigma_a = A + m \log N_f, \quad (5)$$

gdzie N_f – trwałość liczona w cyklach σ_a – amplituda naprężenia A , m – stałe modelu regresji. Często stosowana jest również postać podwójnie logarytmiczna $\log(\sigma_a) - \log(N_f)$ zaproponowana przez Basquina:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b, \quad (6)$$

lub w postaci:

$$\log N_f = A + m \log(\sigma_a), \quad (7)$$

Do głównych zalet podejścia naprężeniowego należy przede wszystkim prostota w stosowaniu i bardzo duża ilość charakterystyk zmęczeniowych materiałów dostępnych w literaturze [51, 57-59].

3.4.2 Wykresy odkształceniowe

Wykresy odkształceniowe opierają się o amplitudę odkształcenia. Najczęściej stosowany model został zaproponowany przez Mansona-Coffina-Basquina i wyrażony jest następującym wzorem:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (8)$$

gdzie: $\varepsilon_{a,t}$ – amplituda odkształcenia całkowitego, $\varepsilon_{a,e}$ – amplituda odkształcenia sprężystego, $\varepsilon_{a,p}$ – amplituda odkształcenia plastycznego, $2N_f$ – liczba nawrotów obciążenia (półcykli), E – moduł Younga, σ'_f , b – współczynnik i wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej, ε'_f , c – współczynnik i wykładnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego [49, 51, 57-59].

Znane są również modele oparte o zależność pomiędzy amplitudą naprężenia σ_a i odkształcenia ε_a . Stosuje się je dla zakresu dużych odkształceń plastycznych. Model opracowany przez Ramberga – Osgooda, nazywany jest inaczej krzywą cyklicznego odkształcenia. Zastosowanie go ułatwia weryfikację zachowania się materiału poddanego działaniu obciążeń cyklicznych. Model jest wyrażony następującym wzorem:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (9)$$

gdzie: σ_a – amplituda naprężenia, K' – współczynnik cyklicznego umocnienia, n' – wykładnik cyklicznego umocnienia [49, 51, 57-59, 105].

4. Przegląd badań materiałów poddanych obróbce śrutowania śrutem twardym rozproszonym

Przeprowadzony przegląd literatury podzielono na dwa obszary. W pierwszej części w skrócie zaprezentowano główne trendy w literaturze światowej i krajowej, dotyczące zagadnienia procesu śrutowania w aspekcie wymogów oraz materiałów wytwarzanych z wykorzystaniem procesu śrutowania. Natomiast w części drugiej skupiono się na zaprezentowaniu stanu wiedzy na temat zjawiska zmęczenia zachodzącego w materiałach po przeprowadzeniu obróbki powierzchniowej poprzez nagniatanie ze szczególnym uwzględnieniem prac poświęconych kulowaniu rozproszonemu śrutem kulistym. Jako uzupełnienie przeglądu w podrozdziale trzecim zaprezentowano procedury i normy europejskie oraz światowe, dotyczące klasyfikacji oraz przeprowadzania procesu śrutowania ciśnieniowego rozproszonym śrutem twardym.

4.1. Kierunki badań i rozwoju procesu śrutowania w literaturze

Literaturę specjalistyczną przedstawioną w niniejszym rozdziale, której przedmiotem jest śrutowanie oraz obróbka strumieniowa umacniająca (kulowanie) podzielono na dwie główne grupy. Do pierwszej z nich zaliczyć można obszerne tematycznie i powszechnie uznane wydania podręcznikowe, które swoim zakresem obejmują technologie przeprowadzania samej obróbki powierzchniowej śrutowania, skupiając się na podstawach technologicznych prowadzenia obróbki. Proces ten jest powszechnie stosowany w przemyśle głównie ze względu na efektywności procesu oraz niskie nakłady finansowe na jego prowadzenie. Na temat powyższej obróbki opublikowano znaczną liczbę rozpraw naukowych. Badaniom podlegały między innymi: efekty obróbki strumieniowo-ściernej, a także wpływ parametrów na jakość obróbki tj. wielkość ziarna, odległość dyszy, gęstość pokrywania powierzchni materiałem umacniającym. Drugą grupę publikacji literaturowych stanowi bardzo szeroki zbiór publikacji podejmujących tematykę materiałów poddanych kulowaniu z perspektywy badań skoncentrowanych na właściwościach strukturalnych oraz parametrach użytkowych

[7, 8, 9, 79, 80, 86-89, 113, 118]. W pracach tych prezentowane są szczegółowe wyniki badań metalograficznych dla prowadzonych różnych procesów krycia śrutem kulistym, metodą ultradźwiękową czy innowacyjną ostatnio metodą nagniatania przez zastosowanie wiązki laserowej [13, 92, 93]. Badany jest również wpływ czynników technologicznych na jakość i cechy właściwości materiałów poddanych powyższej obróbce. Szeroko podjęta tematyka obejmuje swym zakresem analizę stanu warstwy wierzchniej, jej chropowatość, grubość warstwy umocnionej oraz zmiany mikrostrukturalne [51, 57, 83-85, 97-101, 104]. Tematyką szczególnie zasługującą na uwagę jest próba numerycznej symulacji procesu krycia śrutem powierzchni materiałowej [21, 22, 31-39, 42-46]. W literaturze światowej oraz krajowej pojawiają się także publikacje, w których poruszany jest wpływ procesu śrutowania na trwałość zmęczeniową elementów tytanowych oraz aluminiowych [7-9, 47-49, 94-99, 102]. Prace nad zagadnieniami związanymi z wpływem procesu śrutowania na trwałość zmęczeniową materiałów prowadzone są również w polskich ośrodkach naukowych. Do grona ośrodków naukowych zajmujących się powyższą tematyką należą: Politechnika Rzeszowska, Politechnika Krakowska, czy też Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie. Autorem wielu branżowych publikacji z tej dziedziny jest prof. Zielecki z Politechniki Rzeszowskiej. Jest on również promotorem i recenzentem wielu prac naukowych poświęconych tematyce poprawy jakości styku powierzchni klejonych poprzez zastosowanie metody pneumokulowania, a także jej wpływu na trwałość zmęczeniową [117]. Naukowcy również skupiają się na optymalizacji kształtu oraz powierzchni materiałowej. Optymalizacja ma bowiem wpływ na jakość i masę konstrukcji [22, 73, 76, 83, 118]. Poruszają oni tematykę obróbki powierzchniowej łopatek silników odrzutowych, ostrzy kultywatorów oraz wzmacniania kół zębatych w przekładniach [23-31, 41, 42]. Nieodłącznym elementem rozwoju działań badawczych poświęconych obróbce powierzchniowej poprzez nagniatanie, jest współpraca z ośrodkami przemysłowymi typu: Zakłady Produkcyjne Mielec, Ursus, oraz firmy zajmujące się obróbką strumieniową elementów wielkogabarytowych takich jak: Vask, Piomir, Phoca, Veritus czy Rotex S.C., i wiele innych.

Reasumując ogólny przegląd literatury można stwierdzić iż zaznaczono w nim główne kierunki badań prowadzonych przez polskich oraz zagranicznych naukowców poświęconej obróbce powierzchniowej śrutowaniem.

Prace podejmujące tematykę branżową procesu krycia śrutem poruszają głównie tematykę z zakresu:

- wpływu obróbki na trwałość materiału,
- budowania modeli odzwierciedlających sposób jak najbardziej realny proces śrutowania rozproszonego,
- wpływu wielkości granulacji śrutu na chropowatość powierzchni umacnianej,
- identyfikacji zjawisk i procesów związanych z eksploatacją materiałów poddanych śrutowaniu, np. zjawiska zmęczenia lub wykorzystania naprężeń własnych, generowanych w trakcie obróbki strumieniowego śrutowania powierzchni,
- wpływu krotności prowadzenia procesu krycia śrutem na przyrost grubości warstwy umocnionej oraz rozdrobnienia struktury materiału poddanego dynamicznej obróbce strumieniowej ciernej,
- czystości powierzchni oraz jej oceny po procesie dynamicznego nagniatania warstwy wierzchniej [120-135].

4.2. Zjawiska zniszczenia materiałów poddanych śrutowaniu rozproszonemu na skutek działania obciążeń cyklicznych

Zjawisko zmęczenia elementów konstrukcyjnych jest głównie spowodowane efektem oddziaływania na nie wielu czynników, do których zaliczyć można: obciążenie elementów maszyn (cykliczne, losowe, statyczne oraz dynamiczne), wpływ naprężeń własnych, rodzaj struktury oraz skład chemiczny materiału, warunki pracy i inne. Proces ten jest także spowodowany intensywnością oddziaływania powyższych warunków oraz czasem w jakim występują. Końcowym efektem procesów zmęczenia zachodzącym w materiale poddanym obciążeniom cyklicznym lub losowym jest zazwyczaj zniszczenie danego elementu za sprawą pojawienia się rys, pęknięć lub trwałego odkształcenia się elementu [49, 51, 52, 55, 58, 62, 65]. Z tego względu konieczne jest poznanie właściwości zmęczeniowych materiałów poddanych obróbce śrutowania strumieniowego, co ma kluczowe znaczenie dla bezpiecznej i bezawaryjnej pracy urządzeń będących w ciągłej eksploatacji. Jest to też wskazówka dla konstruktorów projektujących nowe konstrukcje i maszyny eksploatacyjne [17, 36-41].

Materiały poddane nagniataniu dynamicznemu znalazły szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Używane są do kształtowania kadłubów w samolotach, poprzez zwiększenie wytrzymałości osi w zestawach kołowych i szynowych, aż do

zabezpieczania warstwy wierzchniej przed korozją wodorową oraz biologiczną. Poznanie wpływu prowadzenia procesui jego intensywności na trwałość materiałów śrutowanych oraz zjawisk silnie związanych z nim w przyszłości częściowo przyczyni się do możliwości zastosowania tych materiałów w nowych grupach urządzeń przemysłowych. Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej widać, iż problematyka procesu śrutowania jest nadal aktualna, a samo zagadnienie ze względu na swoją dynamikę oraz wiele czynników wpływających na jakość samego procesu wciąż jest nie do końca poznana. Większość publikacji w literaturze skupia się na samym procesie, jego wpływie na chropowatość czy trwałość zmęczeniową [17-19, 27-30, 34-41]. Modele numeryczne opisują krotność uderzenia śrutem, gęstość krycia i wpływ tego zjawiska na jakość procesu. Większość przeprowadzonych badań stanowi uzupełnienie innego rodzaju tematów np. związanych z mikrostrukturą. Efektem prowadzonych badań są liczne publikacje traktujące o zjawisku zmęczenia materiałów poddanych obróbce strumieniowej, a także samemu kształtowaniu procesu [67, 73]. Głównymi celami badawczymi przytoczonych prac było wyznaczenie charakterystyk zmęczeniowych materiałów śrutowanych w warunkach cyklicznego zginania oraz odniesienie ich do trwałości zmęczeniowych materiałów które nie zostały poddane temu procesowi.

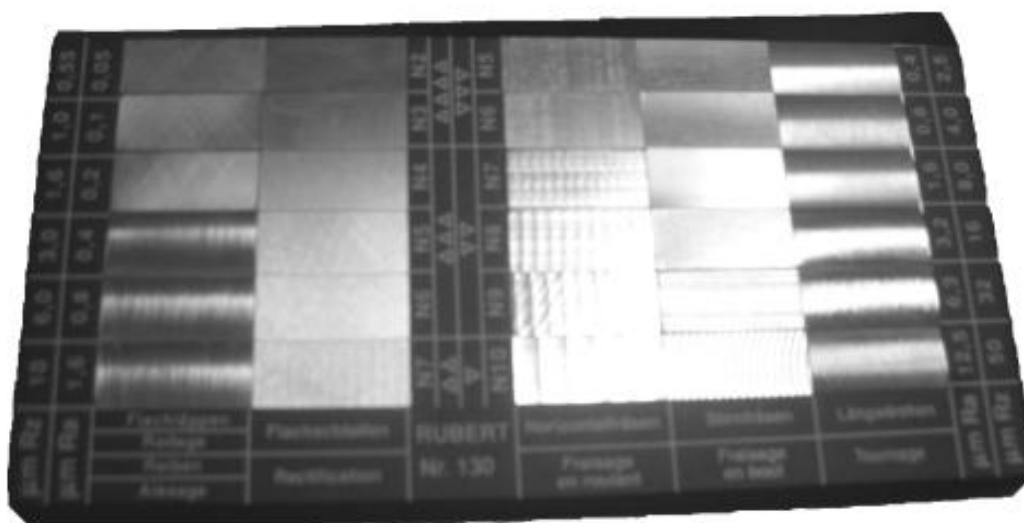
W pracach tych skupiono się wyłącznie na zbudowaniu charakterystyk zmęczeniowych opartych na właściwościach mechanicznych materiałów przed przeprowadzaniem procesu. Przykładowymi pracami z zakresu tematyki śrutowania oraz samego modelowania procesu, uwzględniającymi jak najdokładniejszego odwzorowania jego złożoności, a także wpływu procesu na trwałość są prace autorstwa Barkey, Guo, Harisha i innych [41, 43, 45–49]. W publikacjach literaturowych poświęconych zagadnieniu obróbki ścierniej badacze wykorzystują i opisują różne metody obróbki: kulowanie, nagniatanie, umacnianie ultradźwiękiem czy promieniem lasera. Zaprezentowany przegląd literatury wskazuje na dużą potrzebę rozwoju aktualnego stanu wiedzy na temat zjawiska zmęczenia materiałów poddanych procesowi śrutowania. Koniecznym jest przeprowadzenie badań zmęczeniowych nie tylko dla stopów aluminium czy tytanu, ale także dla materiałów powszechnie stosowanych w przemyśle takich jak stale S235, S355, a także stali P460 wykorzystywanych do produkcji urządzeń ciśnieniowych. Zauważalna jest również bardzo mała liczba publikowanych charakterystyk zmęczeniowych materiałów śrutowanych, uzależnionych od wpływu odkształcania się samego materiału umacniającego oraz mikrostruktury materiału

umacnianego. Badania takie mają bezpośredni wpływ na jakość projektowanych urządzeń oraz zwiększenie bezpieczeństwa w trakcie eksploatacji urządzeń.

4.3. Normy i wymogi stawiane materiałom w procesie śrutowania rozproszonego

Poziom utrzymywanych parametrów oraz weryfikacji wymagań technologicznych w zakresie produkcji materiałów jest zależny od aktualnie obowiązujących normatywów, a także specjalnych wymogów narzucanych przez zleceniodawcę. Możliwym jest wprowadzenie indywidualnych szczegółów ustaleń z podmiotem wykonawczym, jednak powinny one być ustalane już w fazie projektu i w nim zawarte. W przypadku aktualnych norm zalecenia w nich zamieszczone powinny pozwalać na weryfikacje dotyczące jakości materiału oraz możliwości ich użycia w aspekcie konkretnego projektu [116-118, 126]. Przepisy obecnie obowiązujące na terenie Unii Europejskiej ustosunkowują się do materiałów ściernych oraz umacniających. Określają one dokładną zawartość wolnych związków krzemu, określają wielkość śrutu w stosunku do grubości umacnianej powierzchni, odległość dyszy od materiału oraz maksymalne jego wyboczenie w momencie krycia śrutem twardym [119-126]. W trakcie wykonywania obróbki wykończającej (szlifowanie, polerowanie) należy stosować się do norm określających jakość powierzchni po przeprowadzeniu procesu obróbki ścierniej [124]. Wytyczne obejmują swoim zakresem niezbędne próby wytrzymałościowe, w wyniku których otrzymywane są podstawowe stałe materiałowe. Testy nakazywane przez normę to monotoniczne rozciąganie, zginanie, ścinanie lub ścinanie przez rozciąganie w zależności od grubości elementu. Testy te ustalone są zgodnie z obowiązującymi normami ASTM, które określają wymagania stawiane powyższym materiałom: ASTM A263-03 ASTM A264-03 [134, 137]. Normami odnoszącymi się bezpośrednio do jakości powierzchni stalowych są normy PN-ISO 8501 [136] obejmujące: kryteria oceny powierzchni przed obróbką strumieniowo ścierną, ustalenia wymaganego stopnia czystości, a także oceny czystości powierzchni po obróbce. Podstawowymi normami są PN-ISO 8501-1, PN-ISO 8501-1/Ad1, PN-ISO 8501-2 [139-141]. Najszersze jednak zastosowanie mają wzorce według PN-EN ISO 8503-1 [138]. Opis przygotowania powierzchni oraz dobór ścierniwa do procesu, a także krotność przeprowadzania procesu są zawarte w Normie Branżowej

opisanej numerem BN-80/1062-01 [131]. Dodatkowo pomiar chropowatości może odbywać się zautomatyzowanymi profilografami, mikroskopami lub metodą porównawczą, za pomocą określonych wzorców. Metoda według wzorców opisana jest w normie PN-85/M-04254, opisuje ona strukturę geometryczną powierzchni materiałowej [139]. W normie zawarte są pakiety wzorców stalowych próbek reprezentujących różne rodzaje obróbki i typowe dla nich wartości chropowatości (rys. 9). Wymaganą jakość i sposób sprawdzania wzorców opisuje Dziennik Urzędowy Miar i Probiernictwa nr 7/1996.



Rys. 9. Wzorzec pomiaru chropowatości [135].

Jednak ocena chropowatości badanej powierzchni za pomocą wzorców odbywa się poprzez ich przyrównanie i wzrokową ocenę zgodności. Najczęściej żaden z posiadanych wzorców nie pasuje idealnie do badanej powierzchni. Wtedy należy dokonać oceny metodą interpolacji, przyrównując do siebie dwa sąsiednie wzorce spośród najlepiej pasujących. Ocena chropowatości przy pomocy wzorców jest sposobem tanim i szybkim. Jednocześnie po pewnym czasie kontroler nabiera w tym względzie takiej wprawy, że bezbłędnie ocenia chropowatość powierzchni „na oko”.

W normie PN-87/M-04251 zostały opisane sposoby oceny chropowatości powierzchni materiałowej [135] „Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów”. Norma podaje sposoby liczbowej oceny chropowatości. Służą temu parametry podstawowe, do których należą:

- a) średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości R_a ,
- b) wysokość chropowatości według 10 punktów R_z ,
- c) maksymalna wysokość chropowatości R_m ,

- d) średni odstęp chropowatości S_m ,
- e) średni odstęp miejscowych wzniesień profilu chropowatości S ,
- f) współczynnik długości nośnej profilu chropowatości itp.

Parametr R_a w Polsce jest uprzywilejowanym, jednak w innych krajach może być inaczej, np. w Niemczech preferowany jest parametr R_z . Z tego powodu na dokumentacji należy zaznaczać, jakim parametrem się posługujemy. Według normy PN-EN ISO 4287 [132] „Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni” parametr R_a jest definiowany jako „średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości rzędnych $Z(x)$ wewnątrz odcinka elementarnego”. Każdy rodzaj obróbki ma charakterystyczne, możliwe do osiągnięcia klasy chropowatości, podobnie jak i klasy dokładności IT. Na Rysunku 10 yaprezentowano orientacyjne parametry R_a związane z poszczególnymi sposobami obróbki powierzchniowej.

Rodzaj obróbki	Chropowość R_a [μm]													
	80	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,32	0,16	0,08	0,04	0,02	0,01
kucie	x	x	x											
odlewanie	x	x	x	x	x	x								
walcowanie				x	x	x	x							
struganie		x	x	x	x	x								
frezowanie				x	x	x	x							
toczenie				x	x	x	x	x						
wytaczanie				x	x	x	x	x						
rozwiercanie							x	x	x					
szlifowanie							x	x	x	x				
polerowanie								x	x	x	x	x		
docieranie								x	x	x	x	x	x	
dogładzanie										x	x	x	x	x

Rys.10. Wielkość chropowatości uzyskiwana w typowych procesach obróbki powierzchniowej [137].

4.4. Podsumowanie przeglądu literatury

Reasumując na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej wyciągnięto następujące wnioski:

- Materiały poddawane obróbce śrutowaniem są badane pod kątem chropowatości powierzchni, wielkości śrutu, twardości śrutu;
- W literaturze przedmiotu nieliczne są opracowania naukowe dotyczące zjawisk zmęczenia materiałów powszechnie stosowanych w maszynach i urządzeniach przemysłowych po zastosowaniu obróbki powierzchniowej;
- Publikacje dotyczące charakterystyk zmęczeniowych materiałów rodzimych oraz po procesie śrutowania dla stali stopowych powszechnie stosowanych są trudno dostępne. Badania zmęczeniowe ograniczają się do badania wpływu powyższego procesu na stopach aluminiowe oraz tytanowe wykorzystywane przykładowo w lotnictwie;
- W rozważaniach numerycznych opisujących proces śrutowania rozproszonego pomijany jest fakt deformacji nie tylko powierzchni materiału, ale również pomijane są deformacje kształtu śrutu umacniającego, w pracy ujęto to zjawisko przy wykonywaniu modelu MES;
- Nie są określone w literaturze zależności pomiędzy intensywnością prowadzenia procesu śrutowania (prędkość, odległość dyszy, krotność procesu), a poziomem naprężeń własnych w materiale, a także zmiany w mikrostrukturze materiału uwzględniając parametry prowadzenia procesu.

5. Cel, zakres i teza pracy

5.1. Cel i zakres

Głównym celem pracy jest identyfikacja właściwości zmęczeniowych materiału poddanego obróbce śrutowania rozproszonego śrutem twardym. Poddane badaniu są trzy gatunki stali S235, S355, P460. Wszystkie spośród tych gatunków stali są powszechnie stosowanymi materiałami w przemyśle. W pracy zweryfikowano wpływ prowadzenia procesu na trwałość zmęczeniową stopów stali, wpływ krotności prowadzenia powyższego procesu na wzrost trwałości, wpływ procesu na zmianę powierzchni materiału po procesie.

Celami drugoplanowymi powyższej rozprawy są:

- analiza stanu odkształcenia w materiale podczas testów zmęczeniowych (zginanie wahadłowe),
- analiza naprężeń własnych w materiałach w zależności od intensywności prowadzenia procesu tj. krotności powtórzeń prowadzenia procesu kulowania,
- wyznaczenie podstawowych charakterystyk zmęczeniowych dla badanych gatunków stali w zależności od ilości cykli powtarzania procesu krycia śrutem.

5.2. Teza pracy

Technologia strumieniowego obrabiania materiału śrutem twardym ma bezpośredni wpływ na jakość oraz trwałość warstwy wierzchniej materiału, a krotność prowadzenia procesu ma bezpośrednio odzwierciedlenie w poziomie naprężeń własnych w materiale i wzroście trwałości zmęczeniowej.

6. Eksperymentalna charakterystyka właściwości mechanicznych oraz metalograficznych materiałów rodzimych

W niniejszym rozdziale przedstawiono właściwości mechaniczne oraz mikrostrukturalne materiałów ujętych w badaniach stali S235, S355 oraz stali P460. W podrozdziale pierwszym opisano rodzaj pobranego materiału wraz z opisem jego bezpośredniego zastosowania w przemyśle. Podrozdział drugi zawiera wyniki badań metalograficznych.

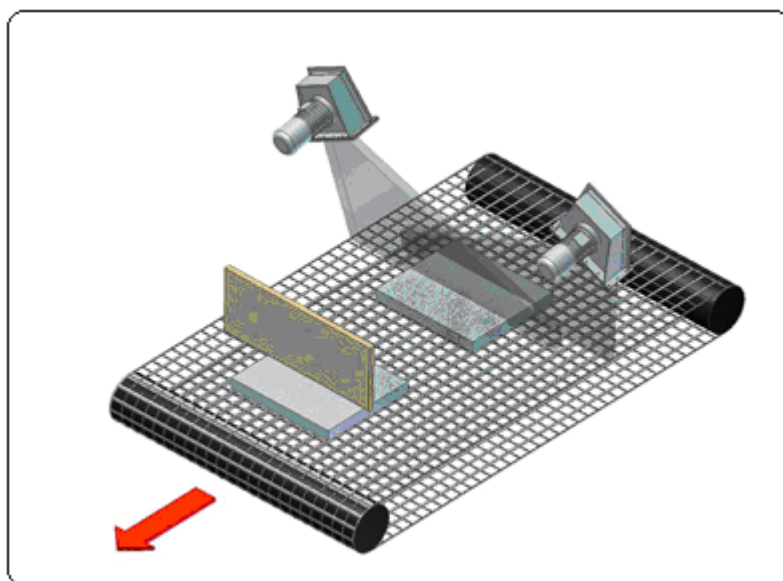
6.1 Wycinanie materiału do badań

Przed przystąpieniem do testów wytrzymałościowych oraz zmęczeniowych pobierany jest wycinek materiału przeznaczonego do badań [131]. Elementy próbne zostały pobrane poprzez wycięcie ich z arkusza blachy piłą taśmową tak, aby nie wprowadzać dodatkowych naprężeń do materiału. Następnie materiał był frezowany oraz szlifowany na swojej górnej i dolnej powierzchni w celu usunięcia naskórka walcowniczego. Dodatkowo krawędzie wzdlużne zostały zaokrąglone przy użyciu ściernicy papierowej w celu usunięcia „zadziorów” powstałych po obróbce skrawaniem, a mogących stanowić inicjatory pęknięć. Wszystkie operacje obróbkowe prowadzone były w kierunku równoległym do osi próbki, a tym samym do kierunku walcowania. Miejsce poboru materiału badawczego z arkusza blachy poddanej obróbce, było miejscem, gdzie płyta nie była odkształcona w wyniku prowadzenia procesu kulowania. W celu lepszej weryfikacji danych materiałowych przeprowadzono statyczną próbę rozciągania dla materiałów poddanych obróbce śrutowania. Próbki do statecznej próby rozciągania były wykonane z pręta, a proces śrutowania był prowadzony dopiero dla gotowego elementu. Wyniki badań nie wykazały zmienności otrzymanych rezultatów w stosunku do materiału rodzimego. Zarówno w przypadku blachy jak i pręta proces był przeprowadzony przy zachowaniu tych samych parametrów procesu obróbki powierzchniowej. W trakcie analiz nie zostały wykonane badania udarnościowe dla materiału poddanego obróbce śrutowaniem.

Na ogół próbki do badań pobierane są z obszaru naddatków technologicznych, a także obejmują one miejsca, które nie były odkształcane w wyniku prowadzenia procesu. Są to miejsca gdzie gęstość krycia śrutu jest zbliżona do siebie w celu lepszej zgodności wyników. Sposób poboru materiału z jego arkusza, przeznaczonego do wykonania próbek dla poszczególnych testów wytrzymałościowych został, zaprezentowany na rys. 11. Procedura postępowania w trakcie wykonywania próbek była określona normami branżowymi [131, 135, 136] (rys.12).



Rys. 11. Sposób wycinania materiału do wykonania próbek z arkusza materiału [146].



Rys. 12. Sposób krycia śrutem w procesie kabinowym, wyciętego materiału przygotowanego do badań zmęczeniowych wycinania [147].

6.2. Opis materiałów rodzimych pobranych do badań

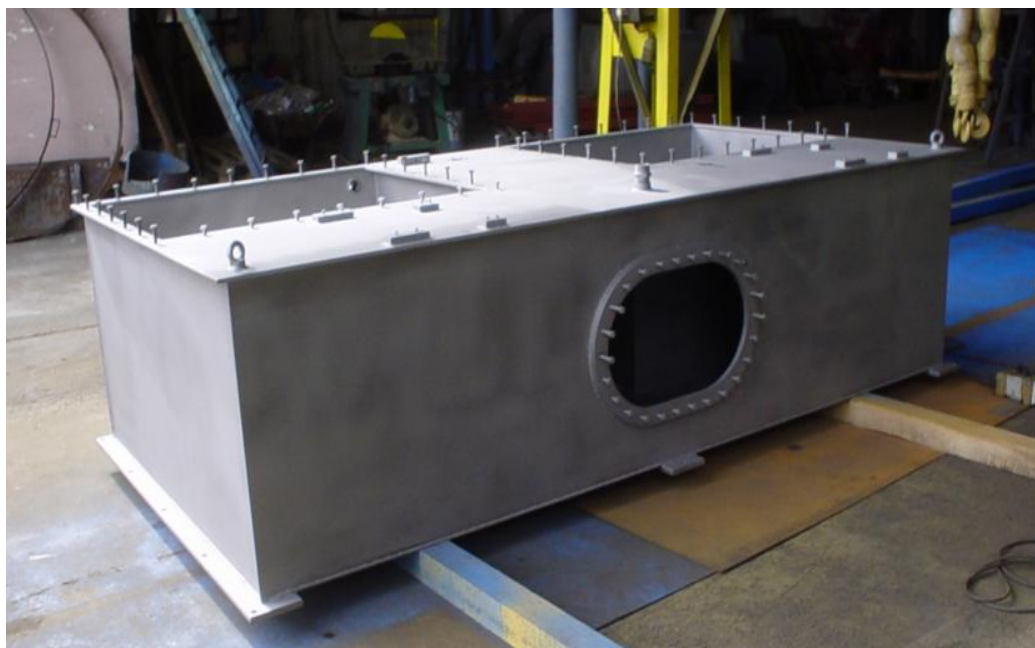
Materiał wyjściowy stanowiły blachy o grubości 12mm wykonane z trzech gatunków stali ujętych w pozycjach literaturowych [19, 20], oznaczonych jako S235JRG2, S355J2+N, P460NH. Są to spawalne stale o strukturze ferrytyczno-perlitycznej odznaczające się wartością wymaganej minimalnej granicy plastyczności R_e na poziomie 235, 355 oraz 460 MPa. Gatunek S235JRG2 to szeroko stosowana niestopowa stal konstrukcyjna, przeznaczona na elementy maszyn i konstrukcji. S355J2+N jest niskostopową stalą konstrukcyjną o podwyższonej wytrzymałości, natomiast P460NH to niskostopowa, drobnoziarnista stal specjalna na urządzenia ciśnieniowe. W dalszej części pracy w celu uproszczenia zapisu przyjęto oznaczenia: S235, S355 oraz P460. Ze względu na swoje właściwości stale te znalazły zastosowanie przy produkcji elementów konstrukcyjnych, nośnych budynków (rys. 13), oraz przy produkcji zbiorników wysokociśnieniowych (rys. 14 a, b).



Rys . 13. Konstrukcja stalowa, kratowa, więzara dachowego pokrywającego halę [144].



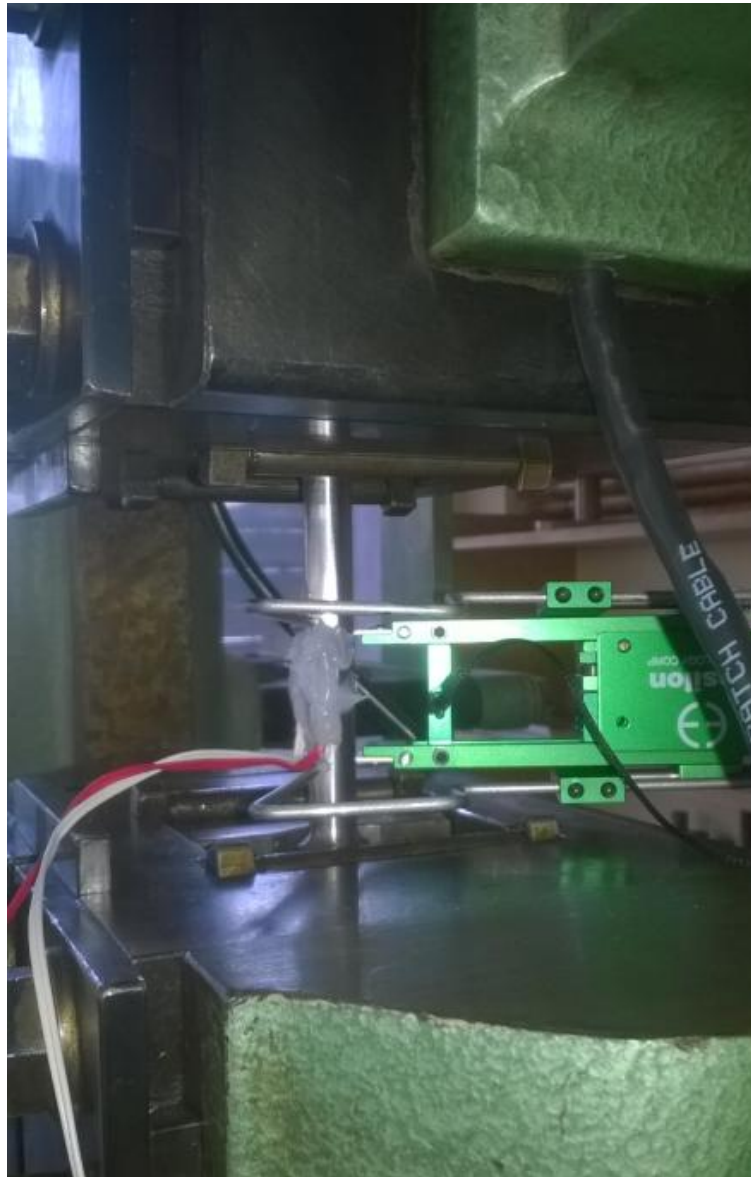
Rys . 14.a. Konstrukcja płaszcza zbiornika ciśnieniowego śrutowana kabinowo [143].



Rys. 14 .b. Zbiornik ciśnieniowy 800l po procesie krycia śrutem [145].

6.3. Podstawowe właściwości mechaniczne

Materiały podstawowe czyli stale S235JRG2, S355J2+N, P460NH zostały scharakteryzowane przez podstawowe parametry wytrzymałościowe takie jak: granica wytrzymałości na rozciąganie, granica plastyczności, moduł sprężystości podłużnej, współczynnik Poissona [26, 49, 50, 102, 131]. Stałe materiałowe wyznaczono w oparciu o próbę statycznego rozciągania i pomiary odkształceń ekstensometrem, a także za pomocą tensometrów naklejonych na próbkę w trakcie trwania innych badań. Badania zostały przeprowadzone w celu lepszej weryfikacji powyższych parametrów posiadanego materiału, w laboratorium Politechniki Opolskiej, zarówno dla materiału w stanie rodzimym, jak i po trzykrotnym kryciu śrutem (rys. 15).



Rys. 15. Próba statycznego rozciągania, próbka stalowa.

Badania przeprowadzono na próbkach o przekroju okrągłym. Dla wszystkich rodzajów próbek wymiary przekroju rozciągane były takie same i były wykonane zgodnie z normą EN ISO 6892-1 2009 [135]. Przebieg próby rozciągania badanych materiałów wyraża zależność pomiędzy obciążeniem, a towarzyszącym mu wydłużeniem próbki [134]. Przykładowy przyrost odkształceń plastycznych w „główce” oraz przyrost długości próbki w trakcie statycznej próby rozciągania zaprezentowano na rys. 16.



Rys.16. Przyrost długości próbki w trakcie statycznej próby rozciągania, wraz z charakterystycznym przewężeniem.

Otrzymane wyniki uzupełniono o dane pochodzące z certyfikatów wystawionych przez producentów materiałów bazowych, uzyskując zakresy zmienności parametrów mechanicznych przedstawionych w tabeli 1. W tabeli zaprezentowano zbiorowe wyniki dla wszystkich materiałów.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne badanych stali w stanie wyjściowym nie poddanym kulowaniu[50].

Stal	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	R_e/R_m	Twardość HV5
S235	291	424,5	30	0,69	132
S355	391	516	33	0,76	160
P460	616,5	717	24,6	0,86	212

gdzie: R_e – granica plastyczności, R_m – granica wytrzymałości, A_5 – wydłużenie względne.

6.4. Badania metalograficzne

Analiza mikrostrukturalna badanych materiałów wnosi wiele cennych informacji na ich temat. Analizę mikrostruktury materiału podzielono na trzy części. Pierwsza i druga zawiera ogólny opis. Trzecia natomiast zawiera wyniki przeprowadzonych badań strukturalnych obejmujących wielkość ziarna oraz udział faz. Były to badania wspólne przeprowadzone z Szymańcem, wykonywane częściowo w laboratorium Politechniki Opolskiej [49, 50, 105], a częściowo jako prace zlecone w Instytucie Metalurgii i Żelaza w Gliwicach [50]. Badania te były częścią wspólnych autorskich publikacji naukowych, a

także częścią badań niniejszej rozpraw doktorskiej. Aby scharakteryzować materiały w formie rodzimej pod względem mikrostruktury posłużono się standardowymi oraz stosowanymi powszechnie rodzajami badań [48, 49, 50, 51, 73, 90, 105]. Zgłady metalograficzne materiałów wyjściowych

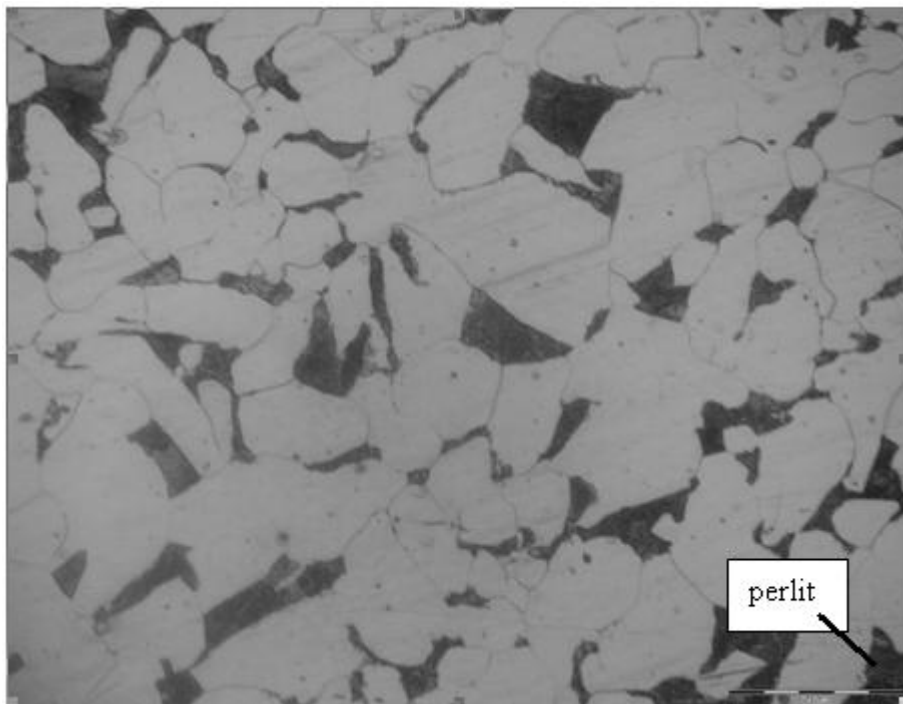
Z analizy mikrostruktury wybranych stopów stali uzyskano dane dotyczące wielkości ziarna oraz udziałów fazowych ferrytu i perlitu. Dane zostały zebrane i zaprezentowane w tabeli 2.

Na rysunkach 17-19 zaprezentowane zostały zgłady metalograficzne trzech rozpatrywanych gatunków stali o budowie ferrytyczno-perlitycznej. Wykonano zgłady w każdym przypadku w kierunku równoległym oraz prostopadłym do kierunku walcowania – po obserwacji zgładów mikrostrukturalnych nie odnotowano różnic w budowie mikrostrukturalnej, zależącej od kierunku prowadzenia obróbki plastycznej. Stal S235JRG2 (rys. 17), w odniesieniu do pozostałych rozpatrywanych stali, cechuje się najmniejszym rozdrobnieniem ziaren ferrytu. Natomiast w budowie stali S355 (rys. 18) oraz stali P460 (rys. 19) można zauważyć zdecydowanie bardziej rozdrobnione ziarna. Zgład stali S355 ponadto cechuje się obszarami, w których faza perlitu tworzy cienkie pasma. W przypadku stali P460 obserwuje się charakterystyczną warstwowość struktury. Widoczne są wyraźne pasma poszczególnych faz w materiale na całej powierzchni zgładu.

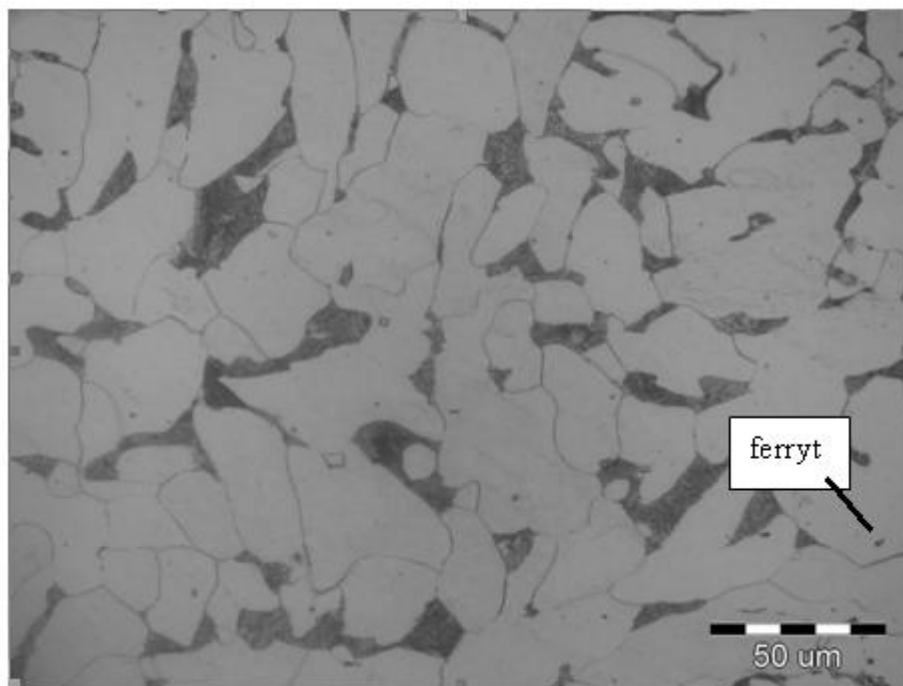
Tabela 2. Udział faz ferrytu i perlitu [50] .

Parametr	Stal S235	Stal S355	Stal P460
Udział ferrytu [%]	84,3	70,4	62,1
Udział perlitu [%]	15,7	29,6	37,9
Średnia wielkość ferrytu [μm]	22,96	6,97	4,54
Maksymalna wielkość ferrytu [μm]	124,83	38,32	21,01
Zawartość chromu [%]	0,02	0,02	0,04

a)

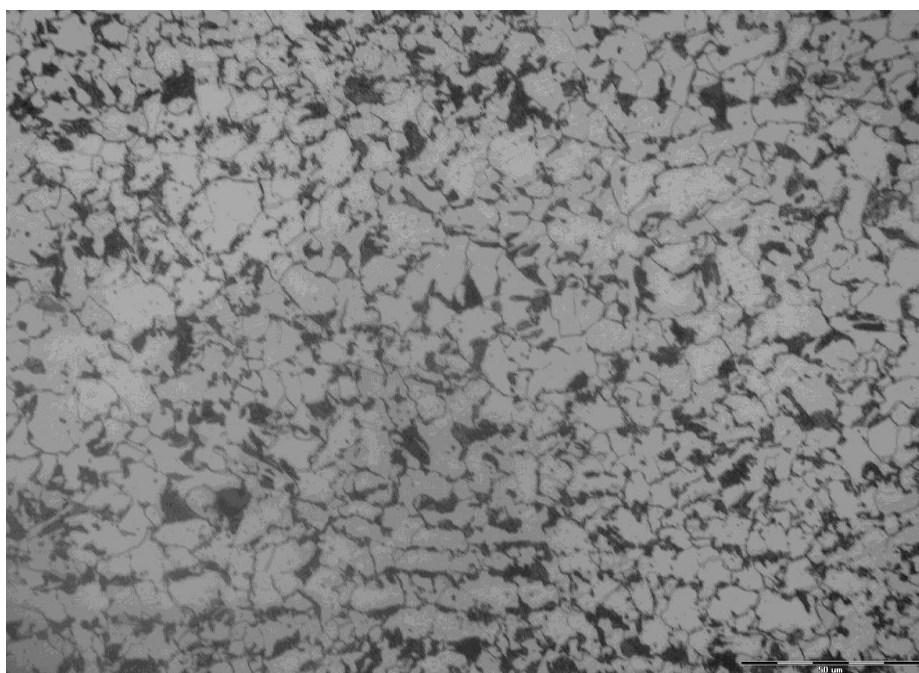


b)

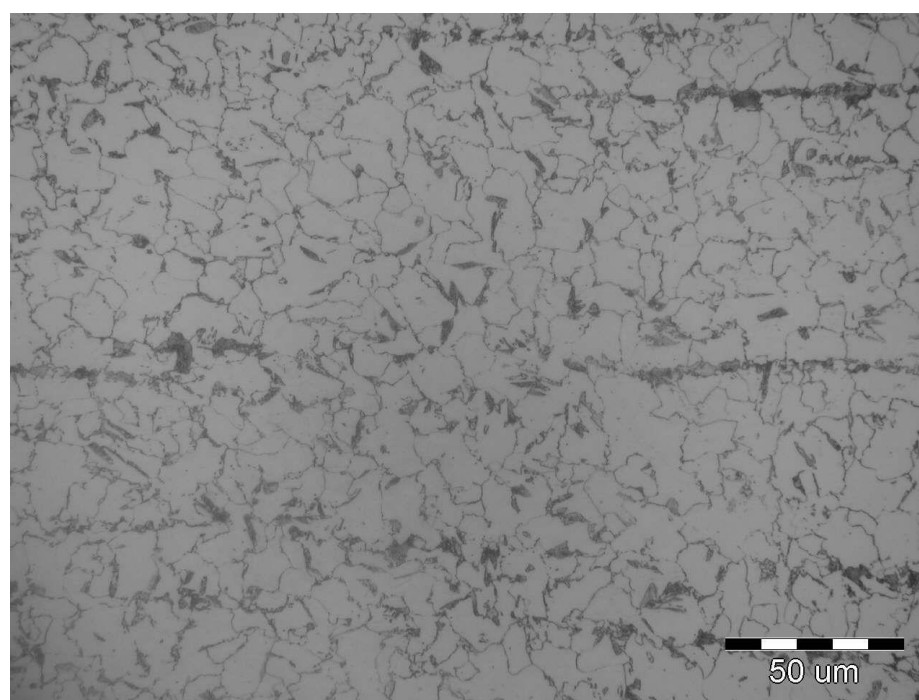


Rys. 17 a, b. Zgłady metalograficzne stopu stali S235 z widoczną udziałem faza a) perlitu, b) ferrytu w strukturze [50].

a)

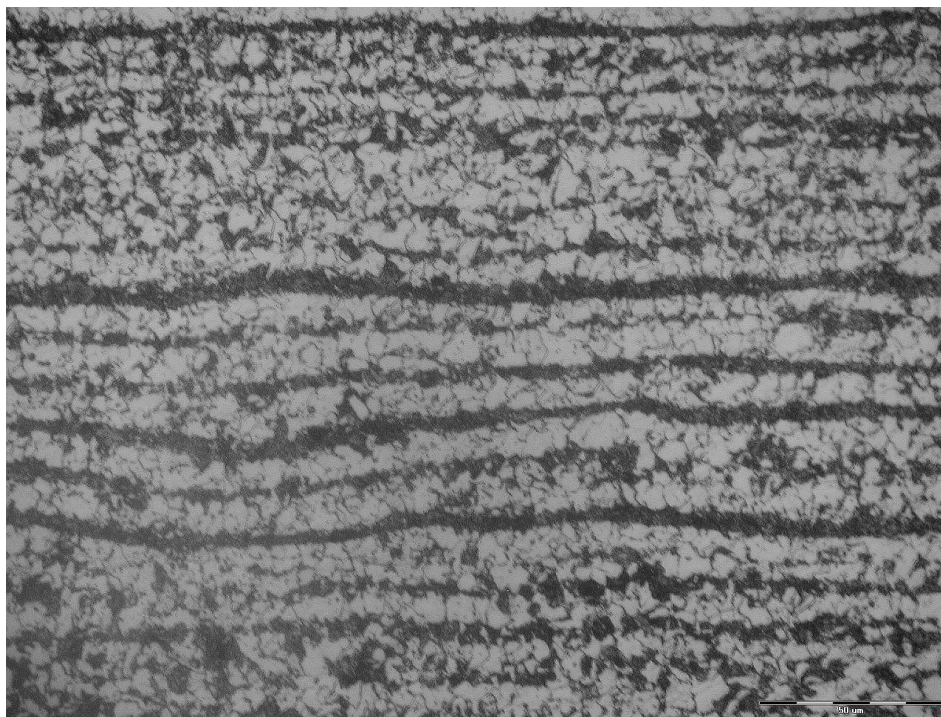


b)

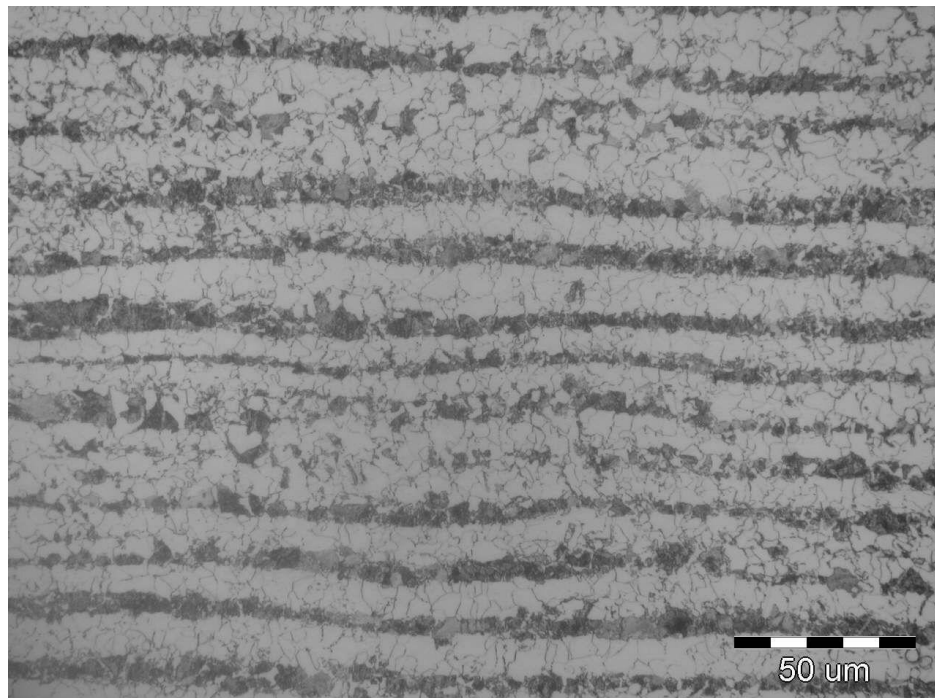


Rys. 18a ,b. Zgłady metalograficzne stopu stali S355 a) prostopadle do kierunku walcowania, b) równolegle [50].

a)



b)



Rys. 19 a, b. Zgłady metalograficzne stopu stali P460 z widoczną pasmowością mikrostruktury a) równoległe do kierunku walcowania, b) prostopadle do kierunku walcowania [50].

7. Badania eksperymentalne

W niniejszym rozdziale zaprezentowano przeprowadzone badania eksperymentalne na materiałach rodzimych oraz poddanych obróbce śrutowaniem, które składały się z testów zmęczeniowych oraz pomiarów naprężeń własnych. W podrozdziałach szczegółowo opisano sposób wykonania testów, stanowiska pomiarowe, a poddano podjęto analizie uzyskane wyniki badań.

7.1. Badania zmęczeniowe

Aby określić wpływ procesu śrutowania na właściwości zmęczeniowe stali w porównaniu do materiałów bazowych, przeprowadzono dwie serie badań zmęczeniowych. Wykonano testy dla próbek pobranych z arkusza blachy opisanego wcześniej. Ponieważ stale S235, S355 oraz P460 są materiałami obszernie opisanymi w literaturze specjalistycznej i jej właściwości cykliczne są znane, w niniejszej pracy przedstawiono badania zmęczeniowych próbek w stanie wyjściowym, a wyniki uzyskane porównano z wynikami z badań na próbkach poddanych obróbce śrutowaniem. Na cele porównawcze wykorzystano informacje zawarte w literaturze, a także wyniki uzyskane z badań własnych przeprowadzonych dla obu grup materiałów.

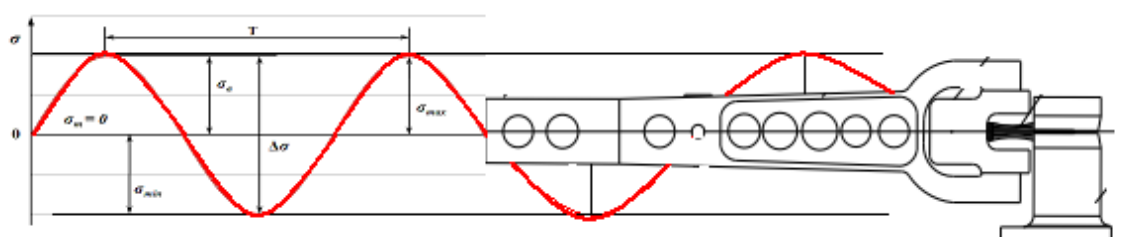
7.1.1 Stanowisko do badań zmęczeniowych

Badania prowadzono w Laboratorium Badań Zmęczeniowych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej na maszynie MZGS-100 (rys. 20). Stanowisko to pozwala na realizację cyklicznie zmiennych obciążeń zginających (rys. 21), skręcających oraz ich kombinacji przy różnych wartościach współczynnika asymetrii cyklu R . Dla celów niniejszej pracy przeprowadzono badania przy obciążeniu wahadłowo-zmiennym momentem zginającym oraz współczynnika $R = -1$. Częstotliwość zmiany kierunku obciążenia wynosiła $f = 28,8 \pm 0,1 \text{ Hz}$. Kryterium zniszczenia bazowało na przekroczeniu przez ramię układu obciążającego krytycznej amplitudy wychylenia dźwigni. Z każdego gatunku stali przygotowano serię 15 próbek (rys. 22), które poddano zginaniu przy różnych wartościach momentu zginającego. W przypadku próbek poddanych obróbce

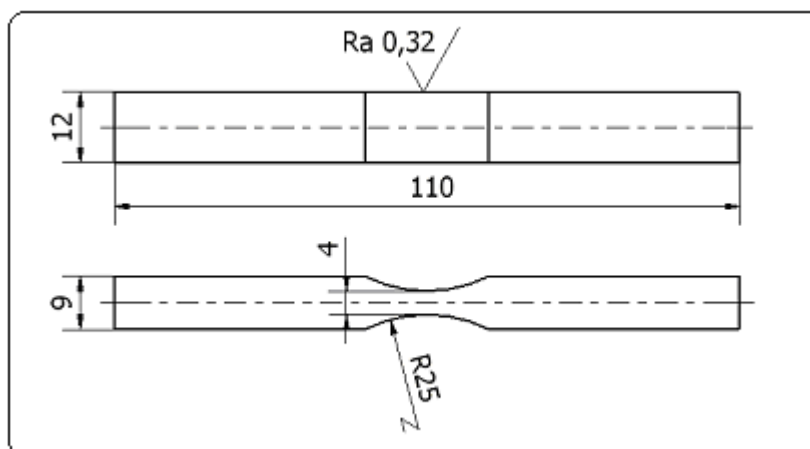
śrutowaniem były one wykonane z tego samego arkusza blachy, w tych samych warunkach oraz posiadały identyczną geometrię. Geometrię próbek zaprezentowano w dalszej części pracy, uzyskane wyniki przedstawiono w układzie podwójnie logarytmicznym S-N (rys. 21).



Rys. 20. Stanowisko do badań zmęczeniowych MZGS100 .



Rys. 21. Schemat obciążenia realizowany przez maszynę zmęczeniową.



Rys. 22. Geometria próbek przyjętych do realizacji badań zmęczeniowych [49,50,105].

7.1.2 Badania zmęczeniowe dla materiałów rodzimych

Korzyści wynikające z zastosowania wysokowytrzymałej stali P460 na elementy obciążone wahadłowo zmiennym momentem zginającym uzależnione są od przewidywanej liczby cykli pracy jakim obarczony jest element. Dla liczby cykli równej ok. $1,2 \cdot 10^6$ zdolność przenoszenia naprężeń przez stal P460 odpowiada stali S355. Charakterystyki zmęczeniowe stali S235 oraz S355 odznaczają się wręcz równoległym przebiegiem w zakresie liczby cykli, co świadczy o podobnej wrażliwości obydwu materiałów na działanie obciążeń zmęczeniowych pomimo zaobserwowanych znacznych różnic w budowie wewnętrznej powyższych stali. Warunkiem zaistnienia procesu zmęczenia jest występowanie odkształceń plastycznych, dlatego dokonano przeliczenia naprężeń dla materiału sprężysto-plastycznego według modelu Mansona-Coffina. Zgodnie z jego założeniami materiał poddany działaniu obciążenia przekraczającego wartość granicy plastyczności, odkształca się zarówno sprężysto, jak i plastycznie. Aby wyznaczyć naprężenia w materiale sprężysto-plastycznym próbki zginanej, konieczne jest spełnienie poniższego układu równań:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_y = \frac{2y}{H} \varepsilon_{\max} \\ \varepsilon_a = \frac{\sigma_a(y)}{E} + \left(\frac{\sigma_a(y)}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \\ M_g = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma dA \cdot (y) \end{array} \right. \quad (9)$$

Implementując powyższy układ równań do środowiska Matlab wyznaczono amplitudy odkształceń sprężystych i plastycznych. Wartości współczynników cyklicznego umocnienia K' oraz wykładników cyklicznego umocnienia n' badanych materiałów są wartościami stałymi dla danego materiału, zostały one zapożyczone ze stałych materiałowych, natomiast współczynnik E we wzorze jest modułem Younga danego materiału. Wartości współczynników przedstawiono w tabeli 3.

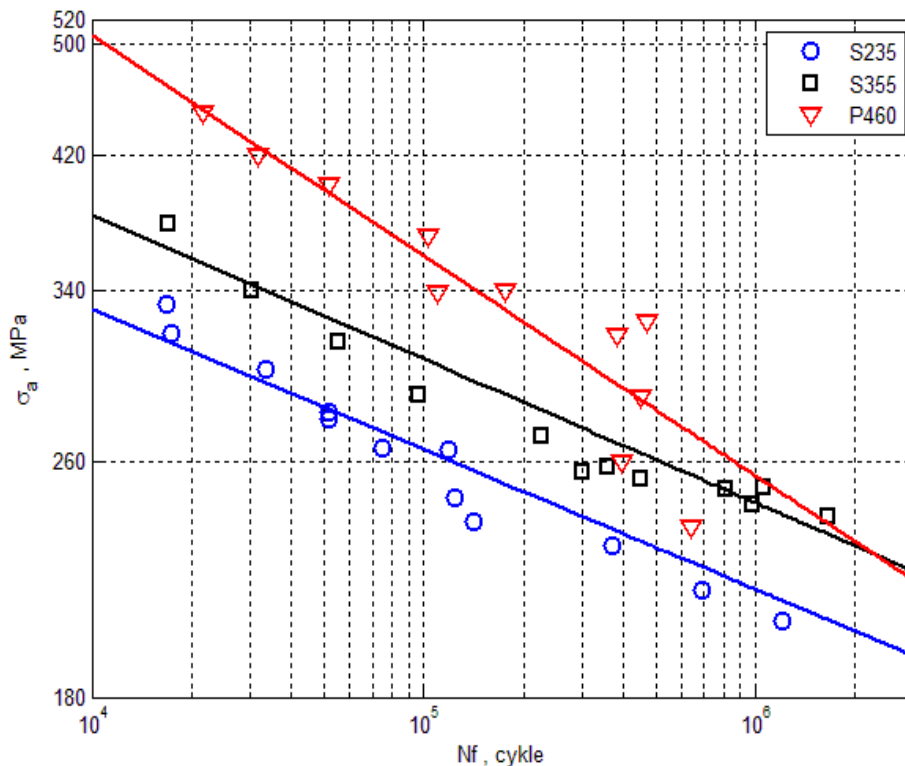
Tabela 3. Wartości stałych materiałowych dla materiałów wyjściowych [50].

Stal	E GPa	K' MPa	n'
S235 JRG2	210	1015	0,170
S355 J2+N	213	1412	0,212
P460 NH	205	1307	0,258

Wyznaczone wartości naprężeń i odkształceń na wybranych poziomach obciążenia dla badanych materiałów przedstawiono w tabeli 4 oraz na rys. 23.

Tabela 4. Wyniki badań zmęczeniowych dla stali S235, S355, P460 [50]

L.p.	S235 JRG2		S355 J2+N		P460 NH	
	σ_a [MPa]	N_f [cykle]	σ_a [MPa]	N_f [cykle]	σ_a [MPa]	N_f [cykle]
1	333	16800	406	9000	449	21500
2	318	17300	378	16900	420	31700
3	301	33600	340	30400	402	51900
4	278	51700	314	55200	371	103300
5	281	52000	289	96300	339	109800
6	266	75400	271	226700	340	175200
7	265	119400	256	302000	317	381800
8	246	124400	258	358100	260	397300
9	237	141500	253	451400	288	448900
10	228	369600	249	811600	324	471200
11	213	690600	243	977800	235	637400
12	203	1208600	250	1056700	-	-
13	192	3368500	239	1654400	-	-
14	212	5657800	247	5193000	-	-

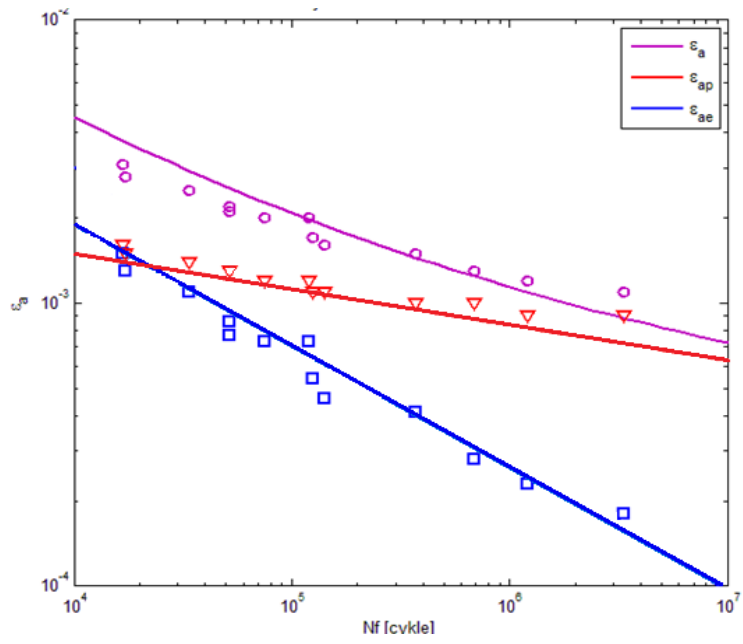


Rys. 23. Charakterystyki zmęczeniowe materiałów bazowych [50].

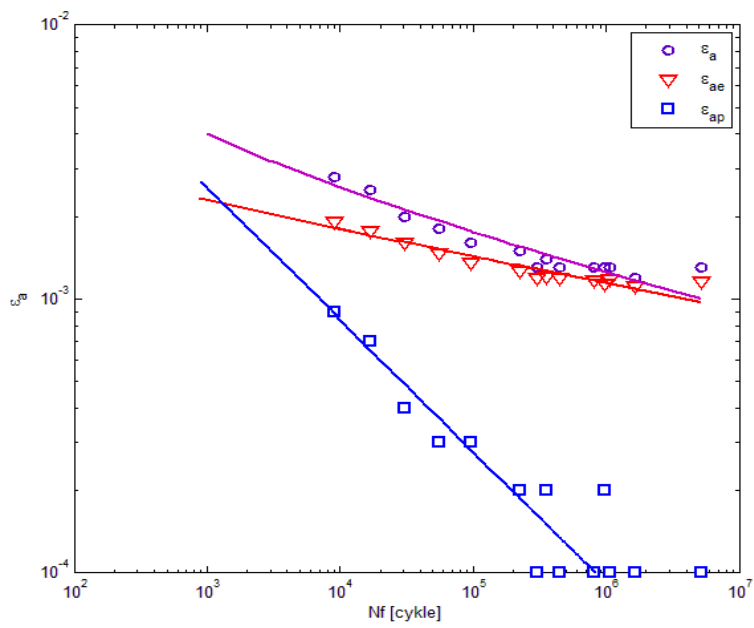
Tabela 5. Równania linii trendu dla Basquina zgodnie z worem (7) [50]

Material	A	m
S235	35,27	12,48
S355	33,34	11,42
P460	20,95	6,25

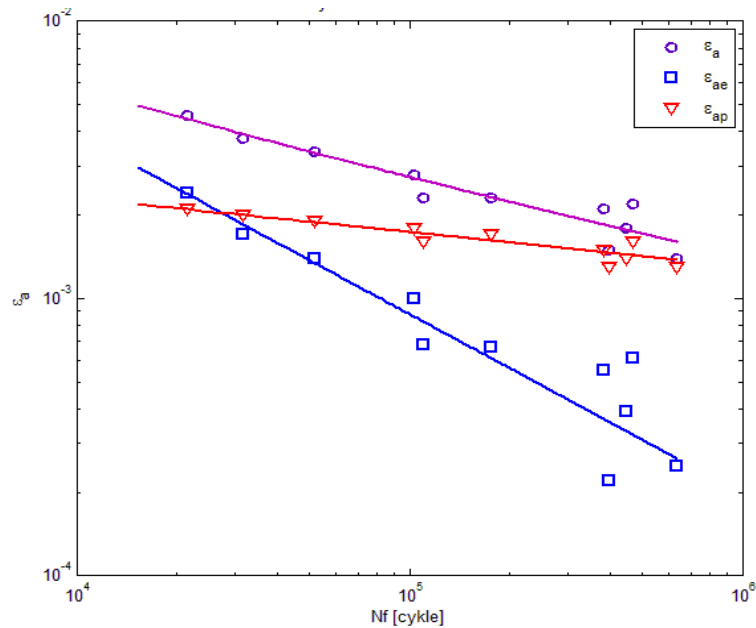
Na rys. 23 zaprezentowano uzyskane wyniki w układzie podwójnie logarytmicznym S-N. Udział odkształceń sprężystych oraz plastycznych dla badanych materiałów nie poddanych śrutowaniu w odniesieniu do liczby cykli do zniszczenia przedstawiono w postaci wykresów. Wykresy sporządzone na bazie obliczeń przeprowadzono zgodnie ze wzorami zawartymi w punkcie 3.4.2. (rys. 24-26).



Rys. 24. Charakterystyki odkształceniowe dla stali S235 [50].



Rys. 25. Charakterystyki odkształceniowe dla stali S355 [50].



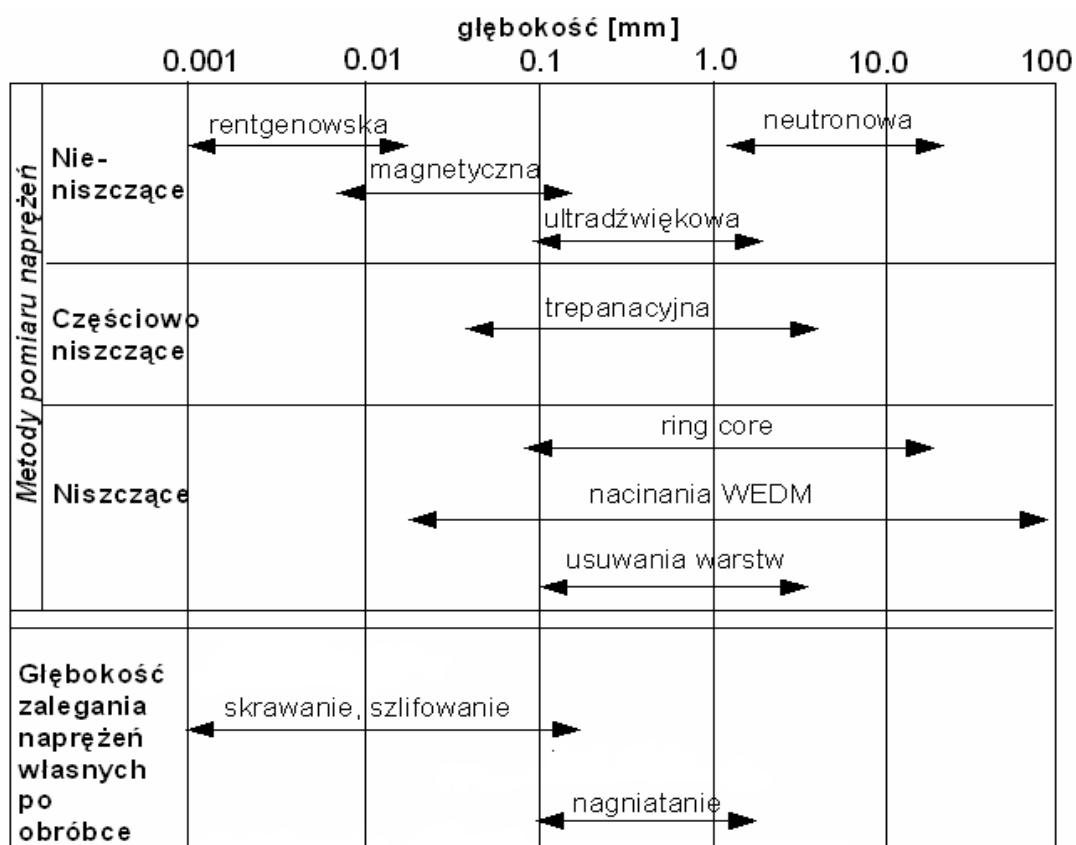
Rys. 26. Charakterystyki odkształceniowe dla stali P460 [50].

Najwyższą trwałość zmęczeniową wykazały próbki wykonane ze stali P460. W przypadku próbek wykonanych ze stali S235 oraz S355 można zaobserwować wyraźną równoległość charakterystyk zmęczeniowych. Oznacza to, iż stale te charakteryzują się podobną wrażliwością na działanie obciążeń zmęczeniowych, pomimo zaobserwowanych znacznych różnic w budowie mikrostrukturalnej poszczególnych materiałów. Na podstawie charakterystyk odkształceniowych możemy zauważyć iż materiałem charakteryzującym się najwyższym współczynnikiem odkształcalności jest stal P460 ma to również odzwierciedlenie w jej budowie mikrostrukturalne. Z uzyskanych charakterystyk zmęczeniowych dla materiałów rodzimych wynika że w przypadku liczby cykli równej ok. $1,2 \cdot 10^6$ zdolność przenoszenia naprężeń przez stal P460 odpowiada stali S355, która jest stalą niższej jakości, o gorszych parametrach, ale także znacznie ekonomiczne.

7.1.3 Pomiar naprężeń własnych

Specyficzny charakter procesu śrutowania rozproszonym śrutem twardym o przekroju kulistym powoduje, że podczas prowadzenia procesu nagniatania działa wiele czynników mechanicznych i cieplnych. Badania metalograficzne wcześniej zaprezentowane w niniejszej pracy wykazują zmianę mikrostruktury na poszczególnych częściach warstwy wierzchniej materiału poddanego procesowi śrutowania. Konsekwencją występowania tych zjawisk są naprężenia własne, mogące mieć istotny

wpływ na właściwości eksploatacyjne materiałów wytworzonych w technologii śrutowania śrutem kulistym rozproszonym. W celu określenia wielkości oraz poziomu naprężeń posługujemy się metodami pomiaru naprężeń własnych. W zależności od sposobu ich prowadzenia oraz od wpływu wybranej metody na stan warstwy wierzchniej możemy podzielić je na trzy grupy: nieniszczące, częściowo niszczące, niszczące. W celu identyfikacji naprężeń własnych można posłużyć się metodami badawczymi: nieniszczącymi - metoda dyfrakcji rentgenowskiej, ultradźwiękowa, prądów wirowych oraz niszczącymi metoda trepanacyjna, usuwania warstwy wierzchniej z uwzględnieniem strzałki ugięcia próbki. Dobór oraz optymalizacja zastosowanej metody są uzależnione od głębokości umocnienia warstwy. Analizę doboru metody z uwzględnieniem wnikania naprężeń do materiału przedstawiono na rys.31.

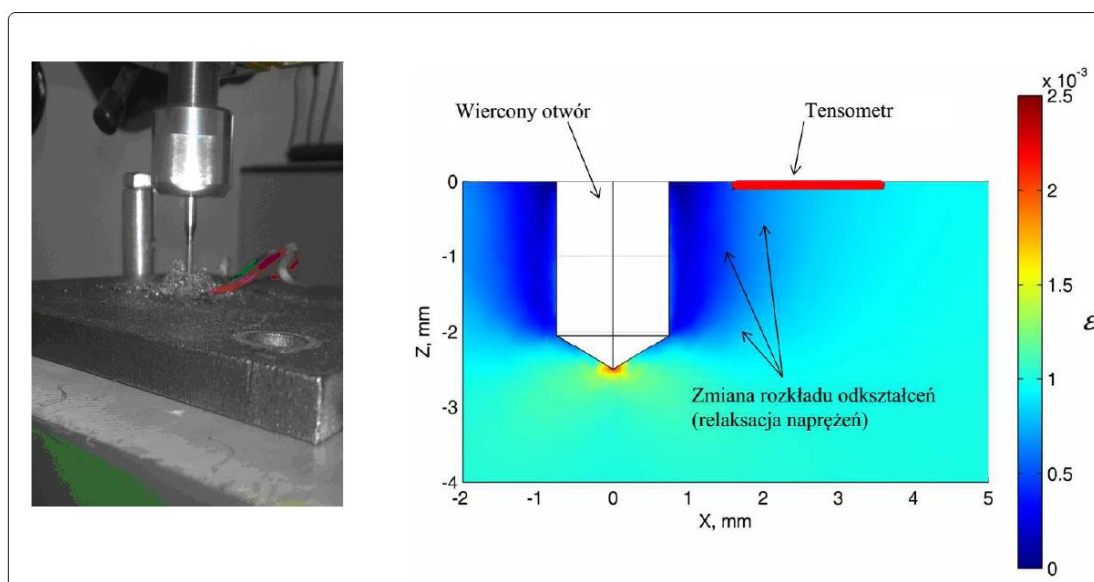


Rys. 31. Metody pomiaru naprężeń własnych w materiale [4].

7.1.4 Metoda trepanacyjna

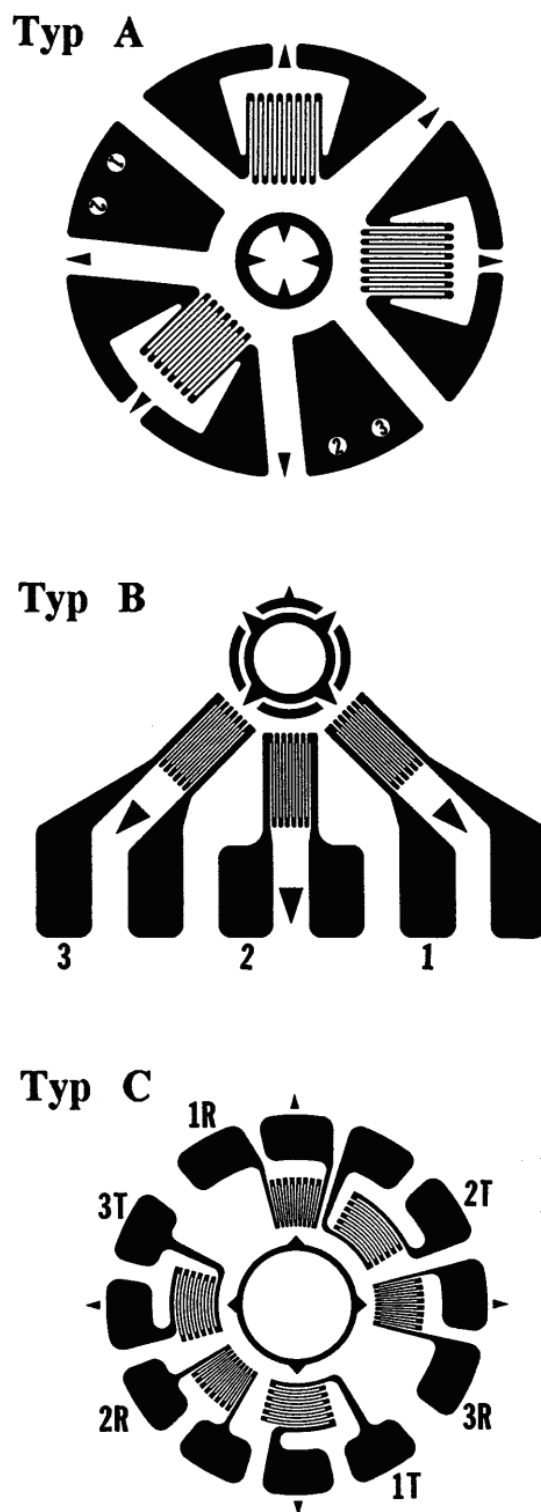
Istnieje wiele metod pomiaru naprężeń własnych. W literaturze specjalistycznej wymienione w poprzednim podrozdziale techniki pomiaru naprężeń różnią się pomiędzy sobą w istotny sposób, głównie możliwościami badawczymi (głębokością pomiarów) oraz

aparaturą niezbędną do przeprowadzenia pomiarów. Wybrana na potrzeby prezentowanych badań metoda trepanacyjna należy do najtańszych i najłatwiejszych w stosowaniu z powyżej opisanych. Jej mechanizm polega na pomiarze odkształceń wokół stopniowo wierconego otworu (rys. 32). Zmiana wartości odkształcenia mierzona wokół otworu przez specjalnie do tego przeznaczoną rozetę tensometryczną (zaznaczano linią na rys. 32) jest miarą naprężeń własnych obecnych w materiale. Metoda bazuje na pomiarze uśrednionych wartości naprężeń na powierzchni materiału, badanie prowadzone jest aż do ustabilizowania się wartości otrzymywanych w trakcie zwiększania się głębokości odwiertu, a otrzymany wynik są wartościami uśrednionymi. Wartości uzyskane w badaniu są wartościami maksymalnymi odkształceniami na powierzchni materiału. W przypadku badanych materiałów proces trepanacji był prowadzony do głębokości 1,8 mm w głąb materiału.



Rys. 32. Symulacja zmiany stanu odkształcenia podczas pomiarów naprężeń własnych metodą trepanacyjną [52, 53].

Zalecenia ASTM dzielą rozety tensometryczne na trzy standaryzowane typy, które mogą być zastosowane podczas pomiarów. Ich cechą charakterystyczną jest precyzyjnie oznaczony środek geometryczny rozety, w którym wiercony jest otwór pomiarowy (rys. 33) [4, 134, 109].



Rys. 33. Typy rozet tensometrycznych przeznaczonych do pomiaru naprężeń własnych [53, 131]

Normy ASTM [134] oraz opracowania specjalistyczne [119-123] zalecają wykonanie pomiarów w sześciu podstawowych krokach:

1. Przyklejenie specjalnej rozety tensometrycznej (3 lub 6 kierunków) w miejscu pomiaru naprężeń własnych;
2. Podłączenie przyklejonych rozet tensometrycznych do mostka tensometrycznego;

3. Ustawienie próbki tak, aby wiertło znalazło się w środku geometrycznym rozety;
4. Ustawienie i wyzerowanie mostka tensometrycznego;
5. Przeprowadzenie pomiarów odkształceń wokół stopniowo wierconego otworu;
6. Obliczenie naprężeń własnych;

Przykładowy pomiar metodą wiercenia ślepego otworu zaprezentowano na rys. 34. Uzyskanie wiarygodnych wyników zależy w dużym stopniu od zastosowanych przyrządów pomiarowych oraz dokładności ustawiania wiertła względem środka otworu oznaczonego w rozecie tensometrycznej.



Rys. 34 . Wiercenie otworu pomiarowego przy zastosowaniu rozet tensometrycznych.

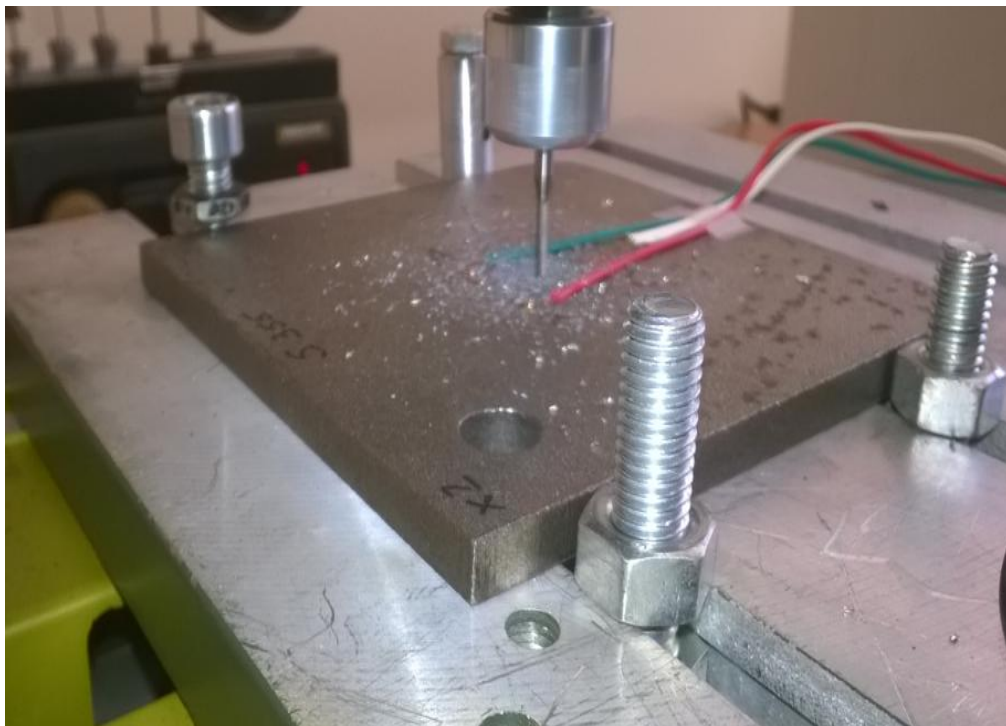
7.1.5 Stanowisko pomiarowe

Główne elementy stanowiska używanego do pomiaru naprężeń własnych wykorzystanego w prezentowanych badaniach to: wiertarka Proxxon BFW 40/E o maksymalnej prędkości obrotowej 6000 obr/min oraz mostek tensometryczny National Instruments Ni SCXI-1314 (rys. 35 a). Ważną cechą wykorzystanej wiertarki jest możliwość bardzo dokładnego ustawienia wiertła oraz uzyskania równych co do wartości posuwów idących w głąb materiału (rys. 35 b).

a)

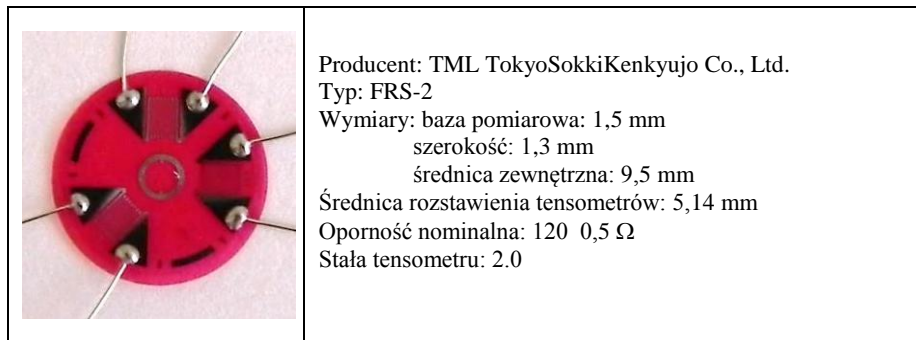


b)



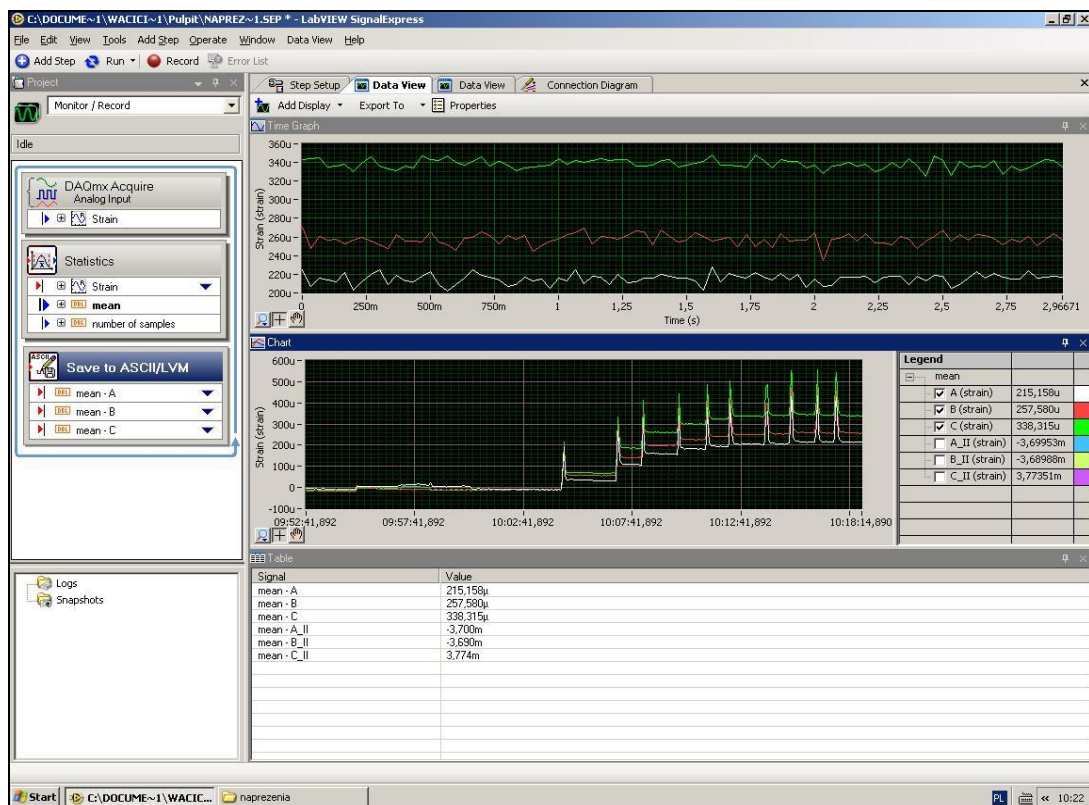
Rys. 35. Stanowisko do pomiaru naprężeń własnych: a) stanowisko pomiarowe, b) wiertło przed wykonaniem otworu.

We wszystkich prezentowanych pomiarach wykorzystano rozety tensometryczne typu A (zgodnie z rys.32) firmy TML Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. których dokładne parametry techniczne przedstawiono na rys. 36.



Rys. 36. Parametry rozet tensometrycznych FRS-2 [53].

Ważnym elementem układu pomiarowego jest program do akwizycji danych, zaprojektowany w systemie LabView Signal Express rys. 37. Pozwala on na zapisywanie przebiegów odkształceń rejestrowanych przez rozety tensometryczne. Podczas wiercenia system obsługuje dwie rozety tensometryczne: kompensacyjną i pomiarową, łącznie sześć tensometrów w układzie półmostkowym. Zaprojektowane narzędzie rejestruje przebiegi w sposób ciągły.



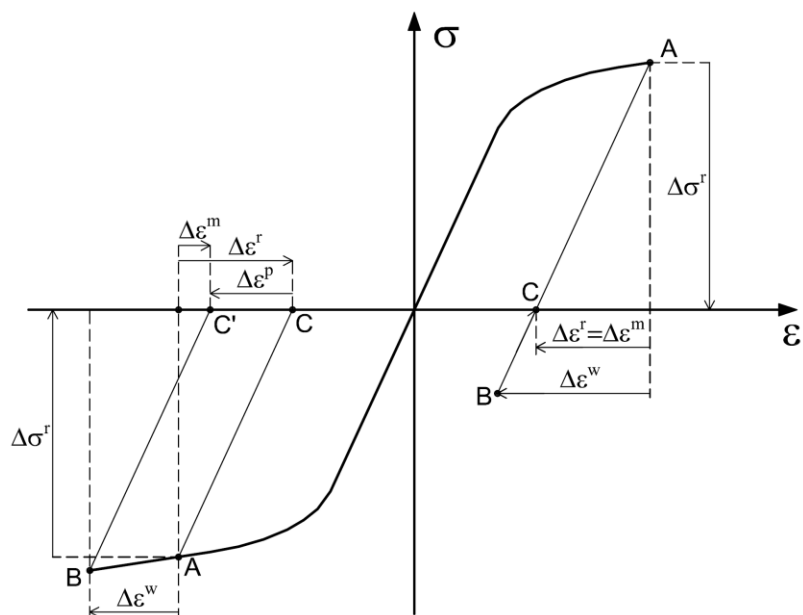
Rys. 37a. Program do akwizycji danych.

Zarejestrowane wartości okazały się być około jednego rzędu mniejsze niż w przypadku odkształceń rejestrowanych podczas pomiarów na próbkach bimetalowych.

Ponieważ żaden kierunek odkształcenia nie jest uprzywilejowany (założenie o zachowanej izotropii materiału w wyniku obróbki cieplnej) dokonano uśrednienia odkształceń bez względu na kierunek i punkt pomiarowy.

Wyniki przedstawiono w funkcji głębokości wierconego otworu. Dodatkowo wokół wartości średnich zaznaczono rozrzut równy odchyleniu standardowemu. Ponieważ w trakcie wiercenia powstają trwałe odkształcenia uwzględniono ten fakt w obliczaniu naprężeń własnych. Wpływ wprowadzonych odkształceń ma odmienny charakter ze względu na panujący stan naprężeń resztkowych. W przypadku naprężeń własnych wywołujących rozciąganie materiału, proces wiercenia wprowadza chwilowe odkształcenia ściskające $\Delta\varepsilon^w$, co sprowadza bieżący stan naprężenia-odkształcenia. Pomiar odkształceń następuje od punktu A (gdzie następuje wyzerowanie mostka tensometrycznego). Przejście stanu naprężenia z punktu A do B następuje w sposób sprężysty, ponieważ w przypadku rozciągających naprężeń własnych jest to odciążenie. Po usunięciu wiertła naprężenia własne zostały zrelaksowane punkt C. Zmierzona wartość odkształcenia $\Delta\varepsilon^w$ jest więc równa odkształceniom $\Delta\varepsilon^f$, z których oblicza się naprężenia resztkowe $\Delta\sigma^f$. Z analizy wynika, że w przypadku rozciągających naprężeń własnych wprowadzenie odkształceń w wyniku procesu wiercenia nie ma wpływu na pomiar naprężeń własnych $\Delta\sigma^f$ [52, 138]. W przypadku ściskających naprężeń własnych, proces wiercenia, czyli w , przesuwa stan naprężenia-odkształcenia do punktu B tym razem w sposób sprężysto-plastyczny. Po usunięciu wiertła i założeniu relaksacji naprężeń bieżący stan naprężenia to punkt C', a zmierzone odkształcenia to m. Stan ten nie odpowiada za istniejące przed wierceniem naprężenia resztkowe. W związku z tym od zmierzonych wartości odkształceń m należy odjąć wprowadzone w wyniku wiercenia trwałe odkształcenia p. Więc do obliczania naprężeń własnych r służą odkształcenia $\Delta\varepsilon^f = \Delta\varepsilon^f - \Delta\varepsilon^p$ (gdzie $p < 0$ to wartości średnie [52, 53, 138]).

Rys.37 b. Przedstawiono na nim wpływ wprowadzonych w trakcie wiercenia odkształceń trwałych na obliczanie naprężeń własnych rozciągających i ściskających [52, 53, 138]



Rys. 37b. Schemat przedstawiający wpływ wprowadzonych w trakcie wiercenia odkształceń trwałych na obliczanie naprężeń własnych rozciągających i ściskających [52, 138]

Producent rozet tensometrycznych (TML) opisanych powyżej i zastosowanych w powyższych badaniach w dokumentacji technicznej zaleca stosowanie przedstawionej poniżej procedury obliczania naprężeń własnych. Głębokość nawierconego otworu, dla której przeprowadza się proces obliczania naprężeń resztkowych wynosi $1,2d$, gdzie d to średnica wierconego otworu. Przy zastosowanej średnicy wiertła $1,5\text{mm}$ obliczenia przeprowadzono dla odkształceń zmierzonych w trzech kierunkach (A, B, C) dla głębokości otworu $h=1,8\text{mm}$. Przy założeniu jednorodnego stanu naprężeń własnych stosuje się następujące kroki obliczeniowe:

$$\theta = \frac{1}{2} a \tan \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c - 2\varepsilon_b}{\varepsilon_c - \varepsilon_a} - \frac{n\pi}{2}, \quad (10)$$

gdzie: θ to kąt określający położenie maksymalnego naprężenia głównego mierzonego zgodnie z ruchem zegara, od kierunku A do σ_1 ; ε_a , ε_b , ε_c to odkształcenia zmierzone odpowiednio w kierunku A, B i C; $n=0$ dla $\varepsilon_a > \varepsilon_c$; $n=1$ dla $\varepsilon_a < \varepsilon_c$.

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{4A} + \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{4B \cos(2\theta)}, \sigma_2 = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{4A} - \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{4B \cos(2\theta)}, \quad (11)$$

gdzie σ_1 , σ_2 to naprężenia główne ($\sigma_1 > \sigma_2$); A i B to współczynniki obliczane z następujących zależności:

$$A = -\frac{(1+\nu)d^2}{8ER^2}, B = -\frac{d^2}{2ER^2} + \frac{3(1+\nu)d^4}{32ER^4}, \quad (12)$$

gdzie: E to moduł sprężystości wzdłużnej; ν to liczba Poissona ($\nu = 0,31$); d to średnica otworu ($d=1,5$ mm); R to promień rozstawienia tensometrów ($R=5,14/2$ mm).

Procedura obliczeniowa naprężeń własnych przedstawiona w normie ASTM E-837-08 [138] uwzględnia odkształcenia zmierzone dla różnych głębokości otworu. W związku z tym jest ona zalecana jako bardziej dokładna, mająca zastosowanie w przypadku jednorodnego stanu naprężenia. W przypadku otworu ślepego procedura obliczeń naprężeń własnych jest następująca:

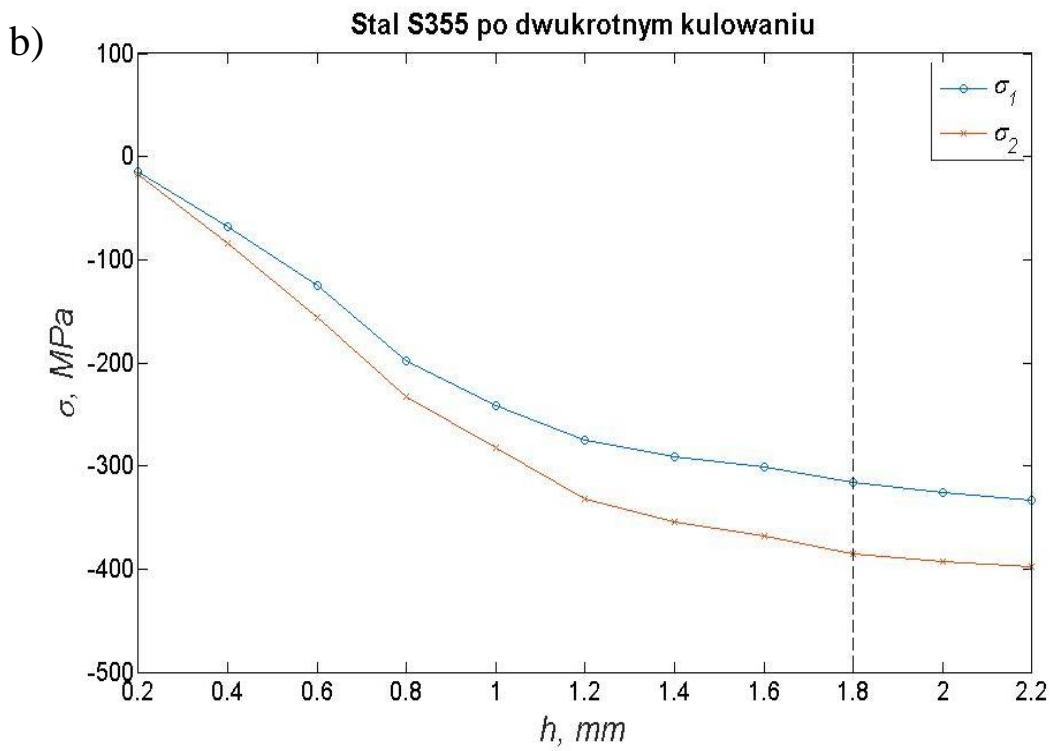
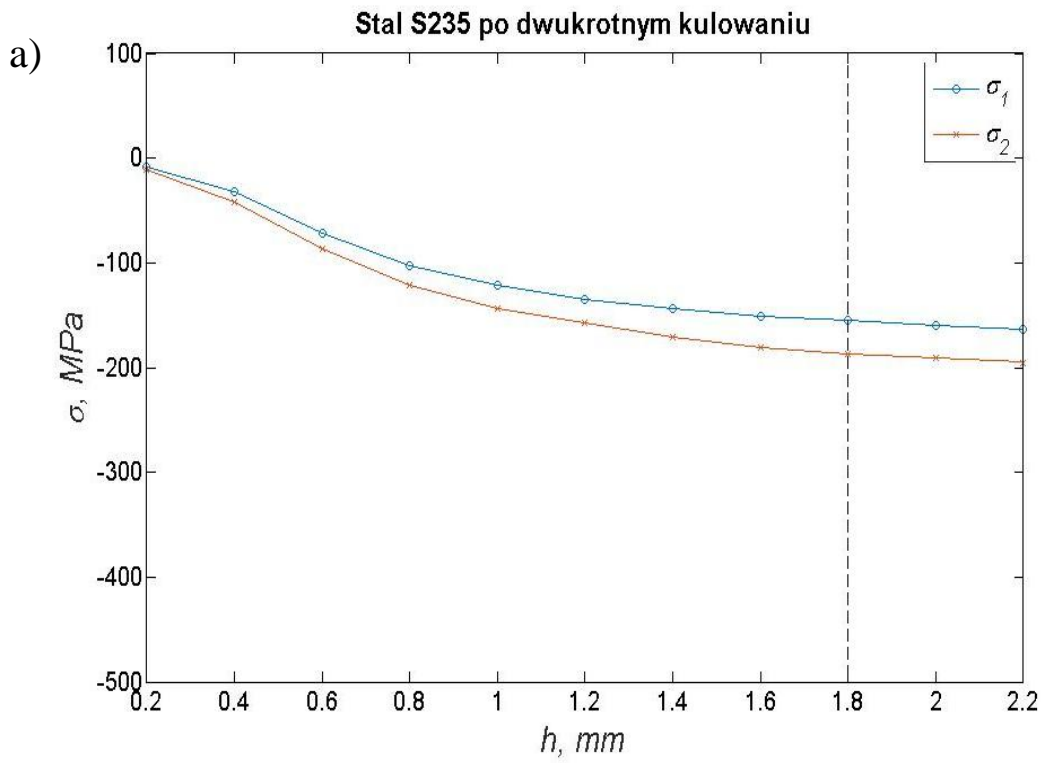
$$p = \frac{(\varepsilon_c + \varepsilon_a)}{2}, q = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_a)}{2}, t = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_a - 2\varepsilon_b)}{2}, \quad (13)$$

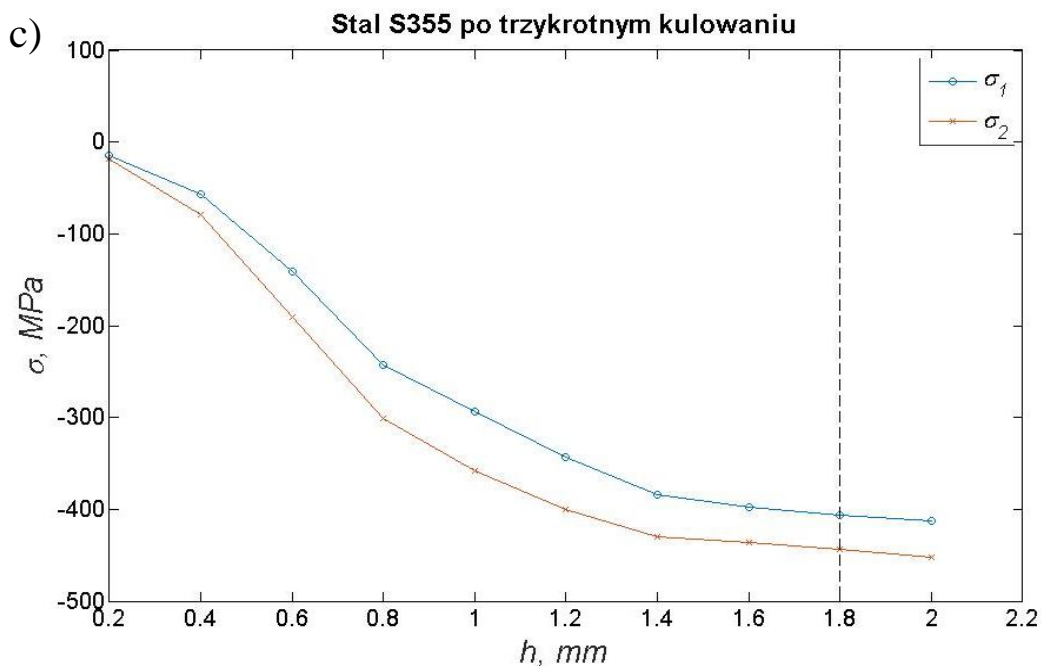
gdzie: parametry p, q i t oblicza się dla każdej głębokości otworu g ; $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ to zmierzone odkształcenia w kierunkach jak w procedurze TML.

$$P = -E \frac{\sum a \cdot p}{(1+\nu) \sum a^2}, Q = -E \frac{\sum b \cdot q}{b^2}, T = -E \frac{\sum b \cdot t}{b^2}, \quad (14)$$

gdzie: a i b to stałe podane w normie zależne od głębokości otworu oraz od stosunku średnicy otworu d do średnicy rozmieszczenia tensometrów $d/(2R)$, E, ν - stałe materiałowe jak dla procedury TML [138].

Pomiar naprężeń własnych wykonano metodą trepanacyjną zgodnie z zaleceniami producenta opisanymi w bieżącym rozdziale powyżej. Pomiar przeprowadzono dla próbek poddanych dwukrotnemu i trzykrotnemu kulowaniu. Głębokość nawierconego otworu, dla której przeprowadza się proces obliczania naprężeń własnych wynosi 1,2 d, gdzie d to średnica wierconego otworu. Przy zastosowanej średnicy wiertła 1,5mm obliczenia przeprowadzono dla odkształceń zmierzonych w trzech kierunkach (A, B, C) dla głębokości otworu $h = 2,2$ mm. Dozwolone jest zastosowanie wiertła o większej średnicy, co poprawiłoby czułość układu, jednak wymaga to również dokładniejszego pozycjonowania wiertła w środku rozety. Ze względu na niewielki postęp (posuw) nie stosowano żadnej formy chłodzenia otworu lub wiertła. Ponieważ wiercenie wywoływało charakterystyczne piki w odczytach, wartości pomiarowe odczytywano po ustabilizowaniu się wartości odkształcenia, czyli po wysunięciu wiertła z otworu pomiarowego. Uzyskane wyniki pomiarów dla przykładowych materiałów zestawiono na rysunkach 38 a, b, c. Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć, że na wielkość naprężeń własnych ma wpływ krotność prowadzenia procesu śrutowania. W przypadku stali S355 wartość naprężeń własnych po trzykrotnej obróbce śrutowaniem wynosiła około 400 MPa, natomiast w przypadku stali S235 320 MPa.



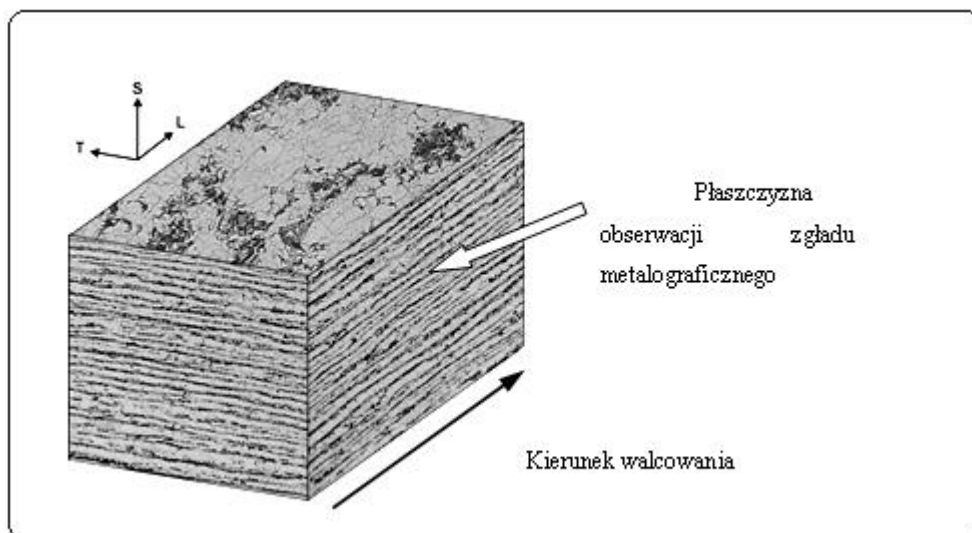


Rys. 38. Zmierzone wartości odkształceń wraz z głębokością wiercenia: *h* a) dla materiału S235 po dwukrotnym kulowaniu, b) dla stali S355 po dwukrotnym kulowaniu, c) dla stali S355 po trzykrotnym kulowaniu, z uwzględnieniem krytycznego punktu do którego prowadzony był pomiar metodą trepanacyjną.

7.2 Badania metalograficzne materiału po śrutowaniu

Na podstawie analiz aktualnie prowadzonych badań oraz analizy literaturowej daje się zaobserwować, iż badania naukowe nad trwałością zmęczeniową materiałów poddanych obróbce śrutowania rozproszonym śrutem twardym ograniczają się tylko do badań doświadczalnych. Dla materiałów poddanych obróbce strumieniowej ciernej prowadzone są badania pomiaru naprężeń własnych z wykorzystaniem rozbudowanych i skomplikowanych metod, które są czasochłonne i pochłaniają wysokie koszty realizacji. W publikacjach naukowych pomijany jest wpływ mikrostruktury materiału, stan struktury materiałowej po przeprowadzeniu procesu obróbki strumieniowej na materiale, a także jak zmiany w mikrostrukturze wpływają na trwałość zmęczeniową materiału. W niniejszym podrozdziale badaniom mikrostrukturalnym zostały poddane trzy gatunki stali o zbliżonej do siebie wyjściowej mikrostrukturze opisanej w punkcie 6.3.1. Badania metalograficzne zostały uzależnione od jednego z parametrów prowadzenia obróbki strumieniowej ścierniej. Głównym parametrem przeprowadzania badań był wpływ intensywności prowadzenia procesu. Zadaniem analizy było zaobserwowanie czy krotność prowadzenia procesu obróbki śrutowaniem ma wpływ na mikrostrukturę, a jeśli tak to na jakim poziomie wpływa ona na materiał oraz czy każdy z grupy materiałów zachowuje się podobnie. Materiały zostały poddane obróbce tym samym śrutem kulistym, o tej samej

twardości i z analogiczną siłą. Obróbka strumieniowa została przeprowadzona w trzech etapach, jako pojedynczy, podwójny i potrójny cykl krycia ścierniwem powierzchni materiału. W celu zbadania mikrostruktury materiałowej przeprowadzono analizę mikrostrukturalną badanych materiałów. Płaszczyznę obserwacji zglądu usytuowano równoległe do kierunku walcowania, zgodnie z rys. 39.

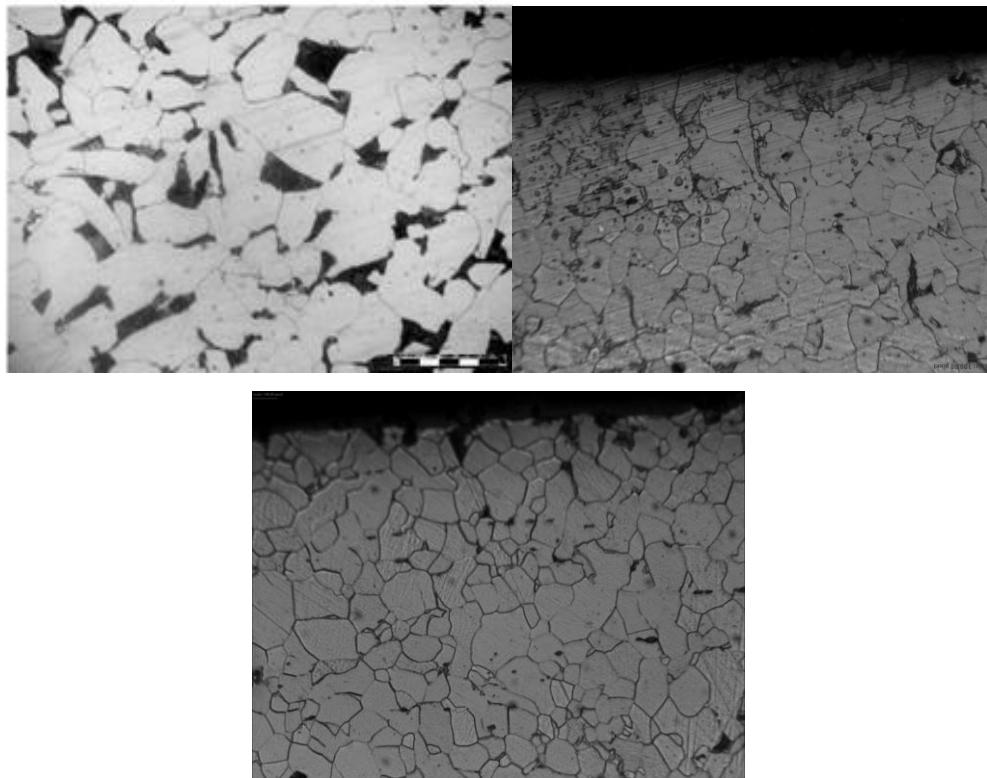


Rys. 39. Schemat obserwacji zglądów metalograficznych w stosunku do kierunku walcowania materiału [50, 105].

Materiał wyjściowy do badań został poddany obróbce śrutowania zgodnie z normami [136-142]. Strumień ścierniwa został wypchnięty pod ciśnieniem 7 atm. Czas trwania procesu to 5 minut, granulacja śrutu 0,75-0,85 mm, powierzchnia krycia wynosiła 100%. Próbkę została kryta z 4 stron w celu weryfikacji zależności wpływu krotności prowadzenia procesu na zmiany w mikrostrukturze materiału. Proces śrutowania powtarzano jednokrotnie, dwukrotnie, trzykrotnie dla każdego z materiałów. Powtarzanie procesu śrutowania śrutem twardym, jak wynikało z pomiaru naprężeń własnych, miało bezpośredni wpływ na przyrost poziomu wielkości odkształceń na głębokość materiału. Badania trepanacyjne były prowadzone do 1,8 mm w głąb powierzchni materiału i była to wartość graniczna dla wszystkich przebadanych materiałów. W trakcie prowadzenia badań do tej głębokości można było odczytywać z aparatów pomiarowych wyraźne różnice w poziomach odkształceń. W celu weryfikacji danych uzyskanych z badania trepanacyjnego posłużono się zglądami metalograficznymi powierzchni materiałów po przeprowadzeniu kolejnych powtórzeń procesu śrutowania. W przypadku materiałów poddanych pojedynczemu śrutowaniu można zauważyć zmiany w mikrostrukturze. W przypadku stali P460 widoczne jest zaburzenie pasmowości oraz rozdrobnienie ziaren ferrytu w obrębie

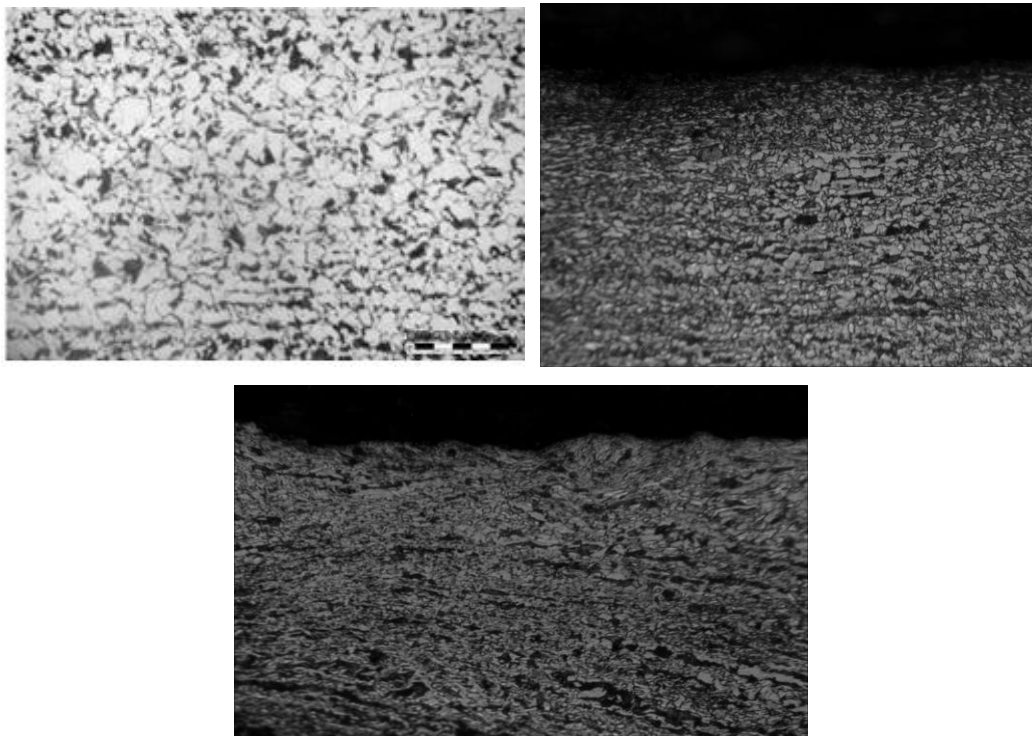
strefy wpływu śrutowania. W przypadku badanych stali S235 oraz S355 zmiany w strukturze spowodowane wpływem pojedynczego procesu śrutowania sięgały głębokości ok. $150\mu\text{m}$ w przypadku P460 głębokość ta sięgała $100\mu\text{m}$ (rys. 40)

a)



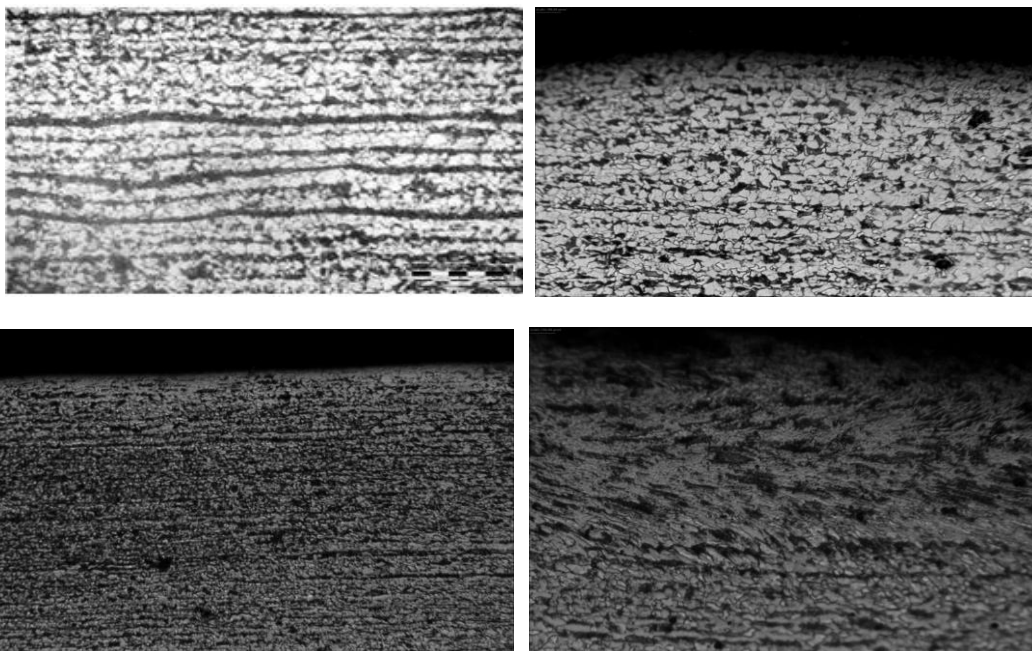
a) Mikrostruktura stali S235JRG2 przed i po obróbce śrutowaniem, w przypadku materiału po śrutowaniu powiększenie 50x

b)



b) Mikrostruktura stali S355J2+N przed i po obróbce śrutowaniem

c)

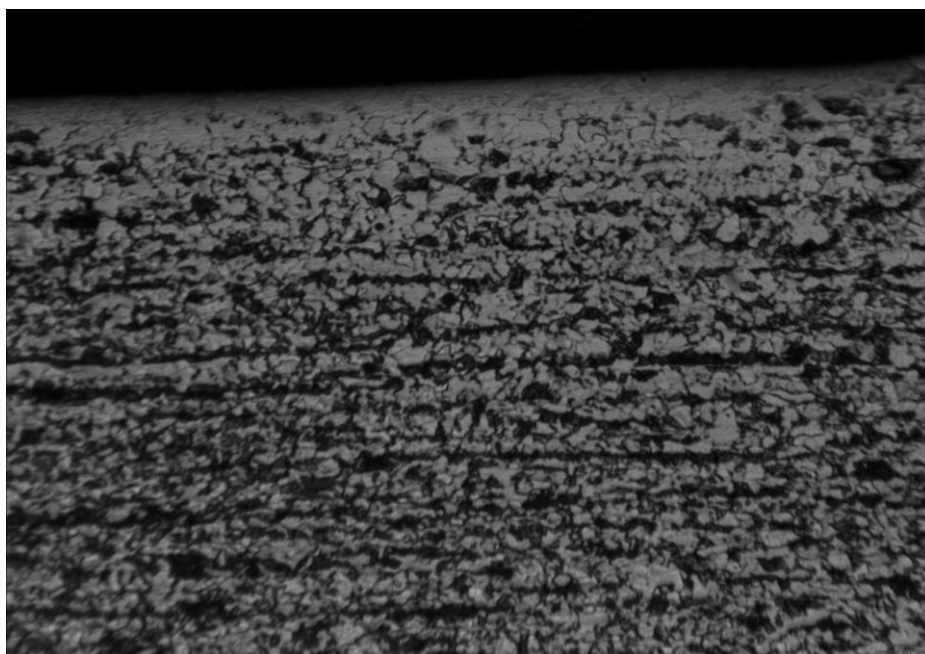


c) Mikrostruktura stali P460NH przed i po obróbce śrutowaniem w osi próbki, oraz przy krawędzi próbki

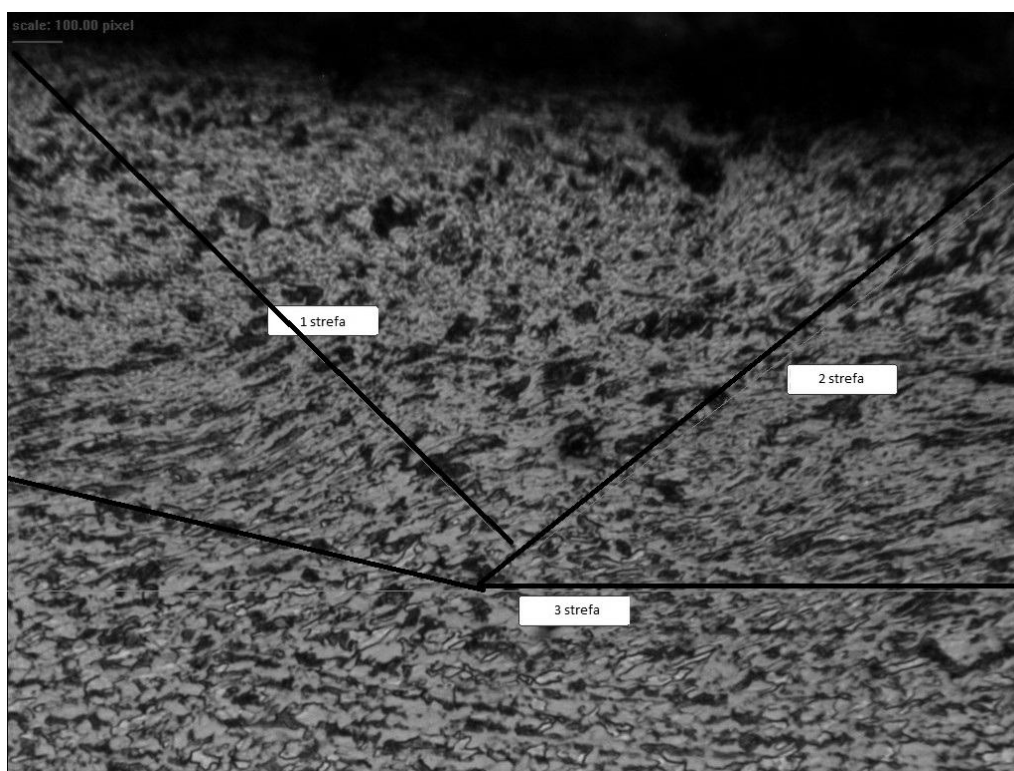
Rys. 40 a, b, c Widoki metalograficzne materiałów przed [50] i po obróbce śrutowania.

W przypadku stali S235 oraz S355 widoczne jest znaczne rozdrobnienie ziaren ferrytu w strefie wpływu procesu śrutowania, a także znaczne upakowanie ziaren w mikrostrukturze materiałów. Charakterystyczne jest pojawienie się ziarnistości w strukturze, co zostało opisane w rozdziale 3.2. Wpływa ono bezpośrednio na podniesienie trwałości zmęczeniowej materiału. W przypadku stali P460, która już w stanie surowym charakteryzowała się znaczną ziarnistością, jednak prowadzenie procesu wpłynęło na dyslokację ziaren oraz na zaburzenia charakterystycznej pasmowości w strefie wpływu procesu, narastała ona wraz z krotnością prowadzenia kulowania zobrazowano to na fotografiach mikrostruktury stali P460 (rys 41 a, b,c).

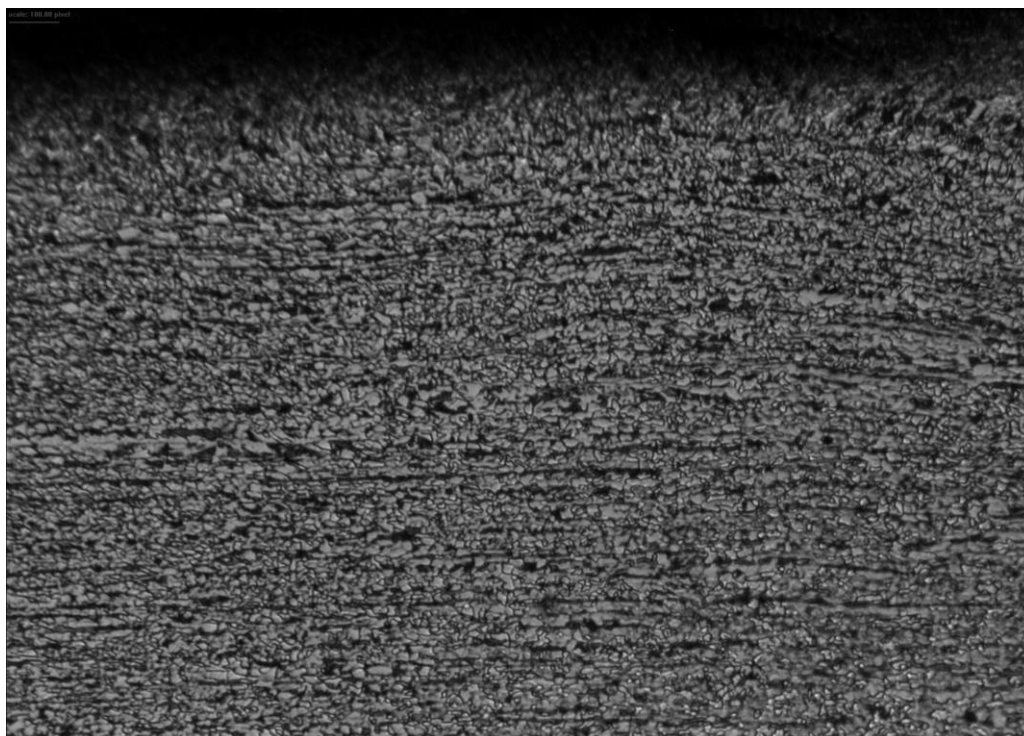
a)



b)



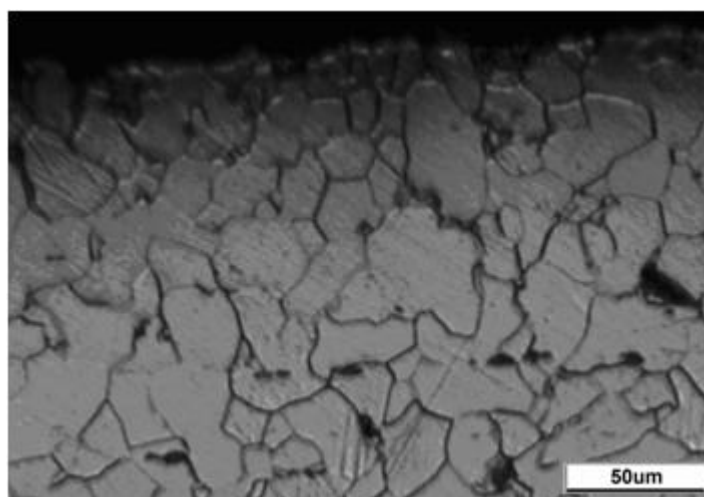
c)



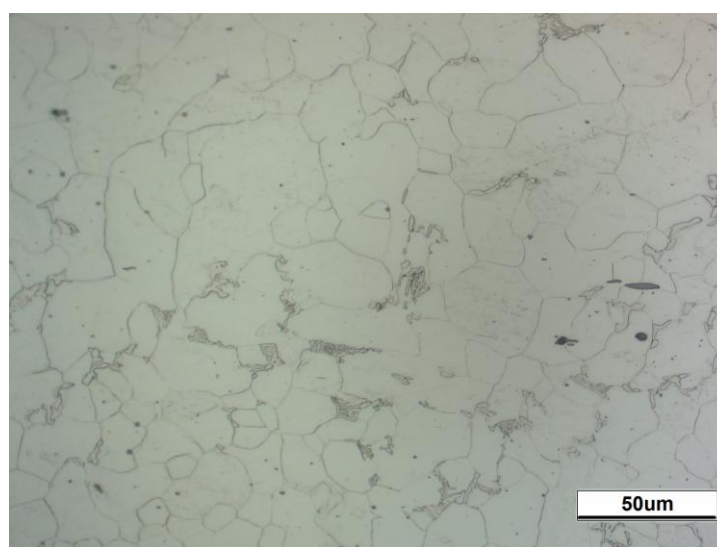
Rys. 41. a) Zaburzenie pasmowości w strukturze stali P460 po dwukrotnym przeprowadzeniu procesu
b) Zaburzenia w pasmowości struktury materiału spowodowane trzykrotnym przeprowadzeniem procesu kulowania widoczny podział na strefy, c) zmiana pasmowości w materiale.

Rozdrobnienie ziaren ferrytu ma bezpośredni wpływ na wzrost wytrzymałości zmęczeniowej stali o strukturze ferrytyczno-perlitycznej. Kolejne powtórzenia procesu krycia śrutem skutkowały pogłębieniem się warstwy wpływu prowadzenia procesu, zmianami w wielkości, a także wpływem na ułożenie ziaren ferrytu (rys. 42). Krotność prowadzenia procesu w przypadku zwykłych stali stopowych powszechnie stosowanych odgrywa zdecydowaną rolę w trwałości. Stale 235 oraz 355 poddane powtórnemu procesowi śrutowania zmieniają swoją mikrostrukturę, a także w przypadku tych stali zmienia się poziom zalegania naprężeń własnych pod powierzchnią materiału. Można zatem stwierdzić, iż proces śrutowania stali 235 i 355 ma znacznie większe znaczenie na jej jakość. Proces ten w znacznym stopniu podnosi ich trwałość zmęczeniową.

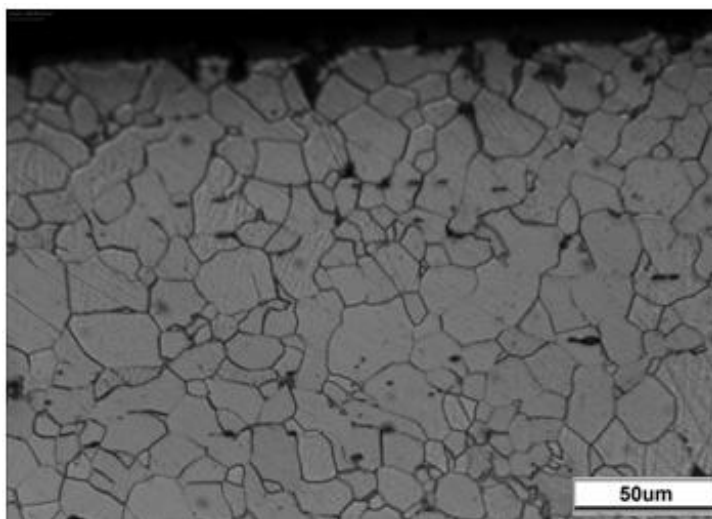
a)



b)

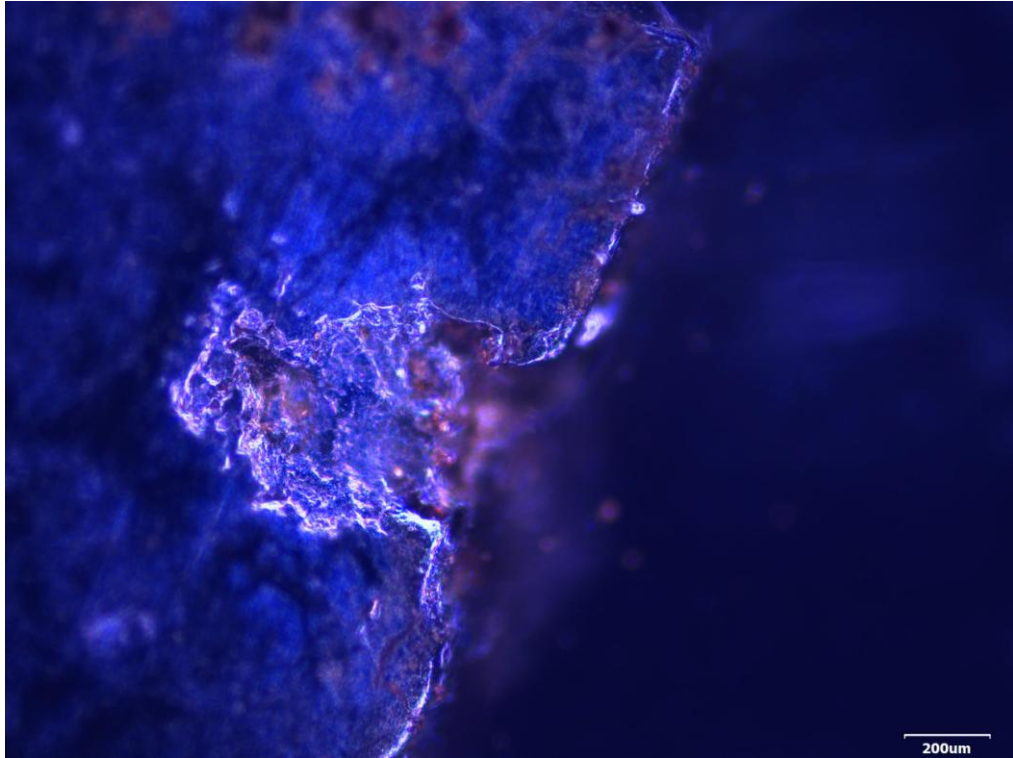


c)



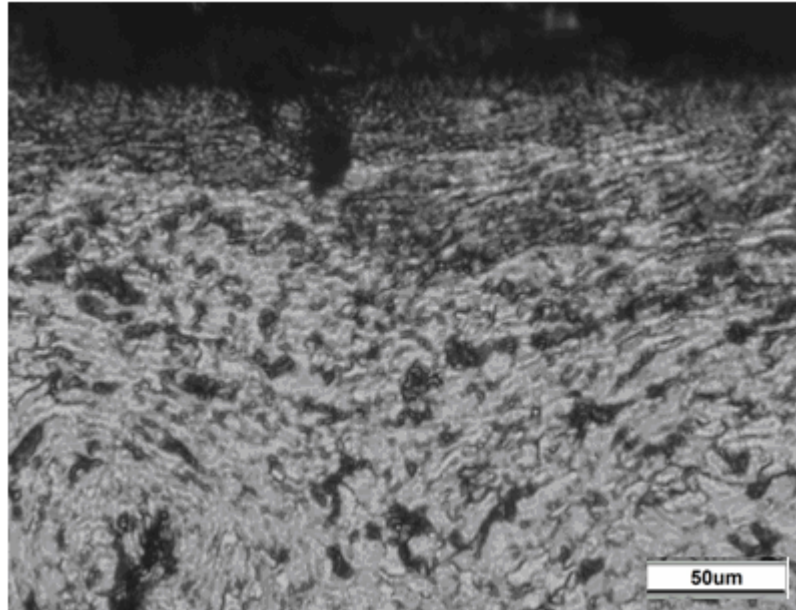
Rys. 42 a, b. Zmiany strukturalne zaobserwowane w stali S235 po a) dwukrotne kulowanie b) rdzeń próbki c) trzykrotnym powtórzeniem procesu śrutowania śrutem kulistym.

W przypadku stali S235 oraz S355 nie zaobserwowano znaczących zmian w strukturze materiału, wraz z kolejnymi powtórzeniami prowadzenia procesu kulowania. W przypadku stali P460 wraz ze kolejnym przeprowadzeniem procesu widoczna była ziarnistość oraz pojawianie się specyficznych zmian w strukturze stali, widoczny był zarys wpływu stref. Jednakże długotrwałe prowadzenie procesu oraz stosowanie śrutu kulistego w niektórych przypadkach spowodowało powstanie mikropęknięć na powierzchni materiału oraz tuż pod jej powierzchnią. Może być to spowodowane złym doborem ścierniwa lub zbyt dużym ciśnieniem pod jakim prowadzony był proces oraz krotnością jego powtarzania w przypadku materiałów o podwyższonej twardości (rys. 43, 44a, b).

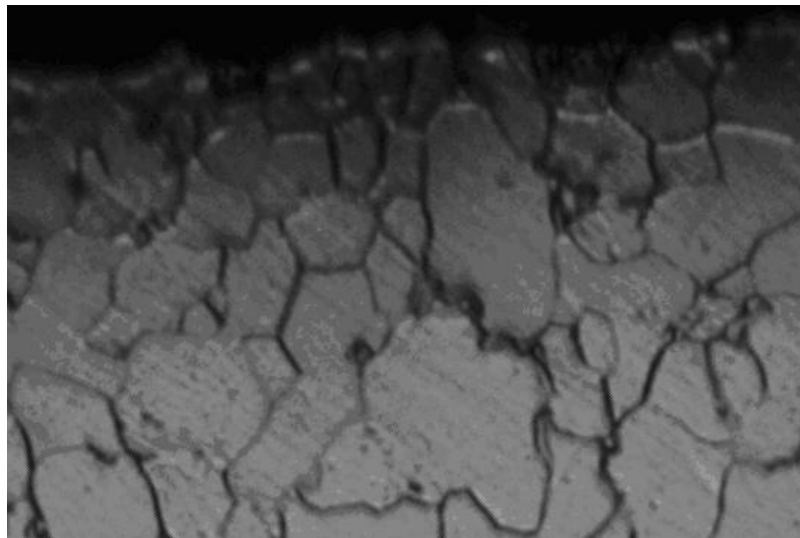


Rys. 43. Skutki doboru zlej twardości ścierniwa, odprysk zgorzeli z materiału S355.

a)



b)



Rys. 44. Efekt zastosowania złego materiału umacniającego w strukturze stali S235 a) widoczny ubytek materiału w części wierzchniej materiału b) widoczne ubytki w strefie wpływu, a także zespół pęknięć podpowierzchniowych, widoczna korozja materiału.

Badane gatunki stali odznaczały się dwufazową strukturą oraz charakterystyczną pasmowością struktury, która była wynikiem wstępnej obróbki poprzez walcowanie. Po procesie śrutowania możemy zaobserwować znaczne rozdrobnienie struktury w paśmie górnym próbki, gdzie powstaje charakterystyczne uziarnienie struktury. Widać również zmiany w pasmowości struktury w stosunku do materiału rodzimego. W największym stopniu uwidoczniła się ona w strukturze stali P460 oraz S355, których proces

technologiczny wymagał wielokrotnego walcowania w celu osiągnięcia większego uziarnienia struktury materiałowej. Rozdrobnienie ziaren ferrytu w strukturach ferrytyczno-perlitycznych odgrywa znaczący wpływ na trwałość materiału oraz odporność na przenoszenie obciążeń zginających działających prostopadle do osi przekroju i prostopadle do pasm powstałych wskutek obróbki wstępnej materiału. Jak pokazały przeprowadzone badania materiały poddane procesowi śrutowania, wykazywały wyższą trwałość zmęczeniową oraz odporność na działanie sił zginających. Największą podatność na działanie procesu śrutowania wykazały stale S235 oraz P460. Stal S325 jest stalą gorszej klasy i jakości a także charakteryzuje się niższą ceną zakupu w odniesieniu do stali P460. Stosowanie procesu śrutowania poprawia walory wytrzymałościowe stali gorszej jakości. Nadmierne prowadzenie procesu śrutowania, oraz zły dobór parametrów prowadzenia procesu tj. dobór wielkości śrutu, ciśnienia roboczego oraz krotności powtórzenia procesu skutkuje zniszczeniem materiału widocznym szczególnie w przypadku stali S355 na skutek powstania mikropęknięć. Fakt powstawania mikropęknięć przypowierzchniowych sprzyja powstawaniu korozji przypowierzchniowej, a odkryta warstwa materiału rodzimego w naturalny sposób ulega zniszczeniu, korozji biologicznej.

7.2.1 Topografia powierzchni po procesie krycia śrutem

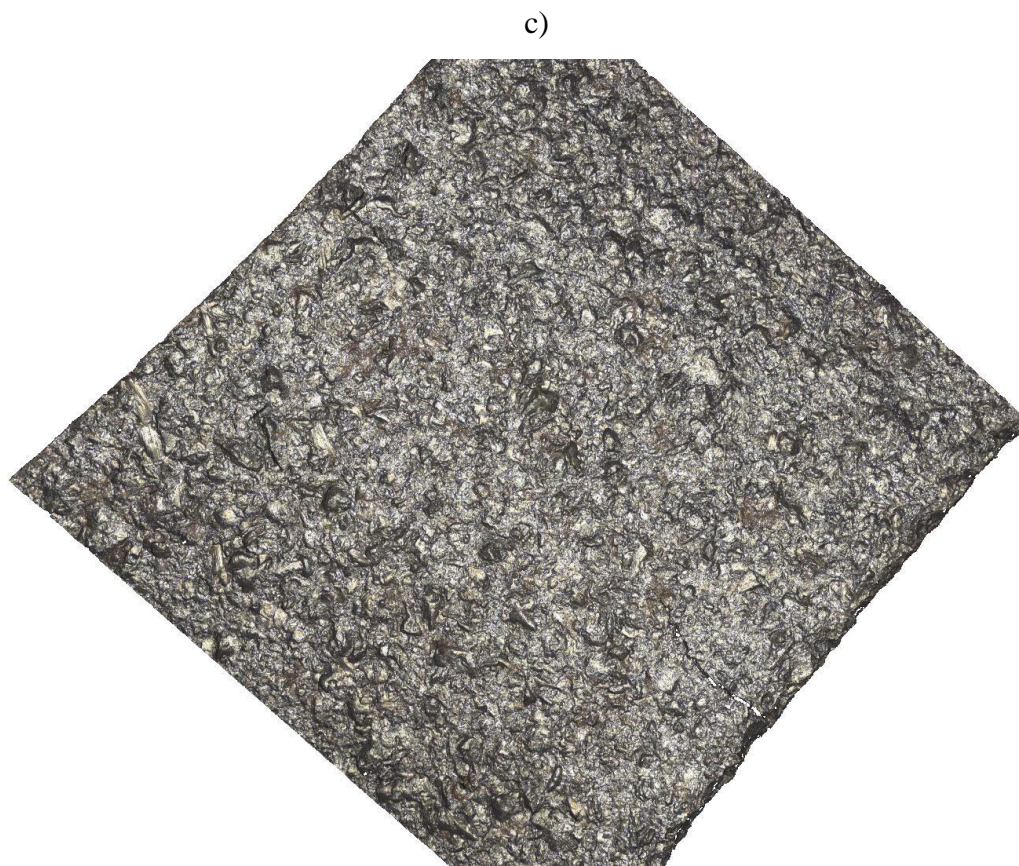
Proces obróbki strumieniowej śrutem twardym kulistym jest procesem dynamicznym, w wyniku którego materiał umacniający ma bezpośredni kontakt z powierzchnią materiałową, a przez to dochodzi do deformacji powierzchni. Po przeprowadzeniu procesu śrutowania powierzchnia materiałowa posiada zdecydowanie większą chropowatość, głębokość zgniotów powstałych wskutek plastycznych deformacji warstwy wierzchniej materiału. Poziom tych deformacji jest uzależniony od twardości materiału umacnianego, w odniesieniu do twardości ścierniwa, a także krotności przeprowadzania procesu krycia śrutem. Poziom deformacji powierzchni wierzchniej materiału jest zależny od intensywności oraz krotności powtórzeń przeprowadzonego procesu śrutowania. Na rysunkach 45, 45b przedstawiono deformację powierzchni po procesie śrutowania śrutem kulistym w dwudziestokrotnym powiększeniu.

a)

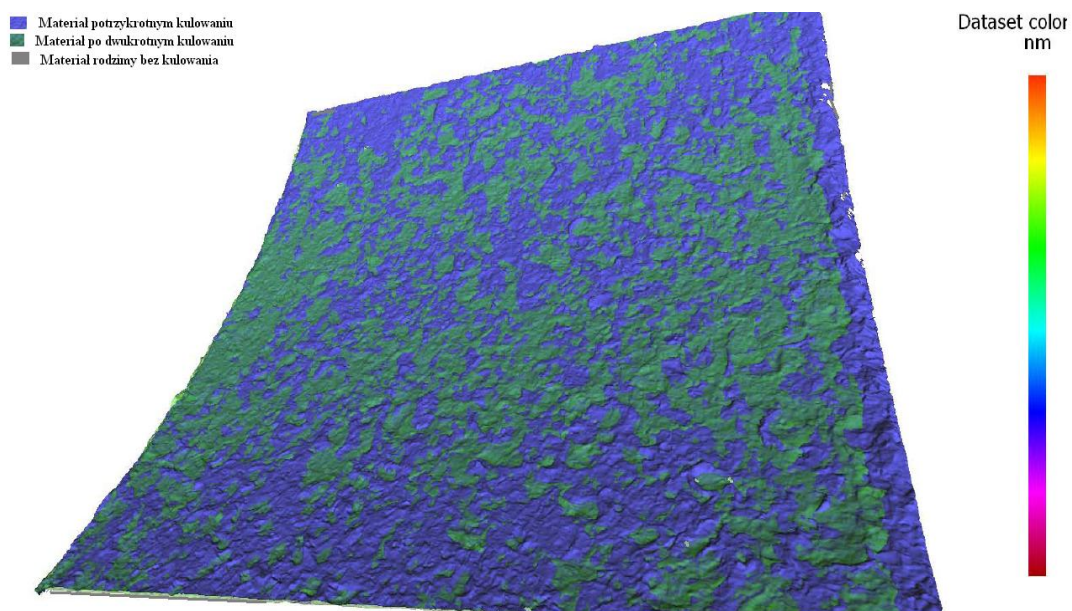


b)





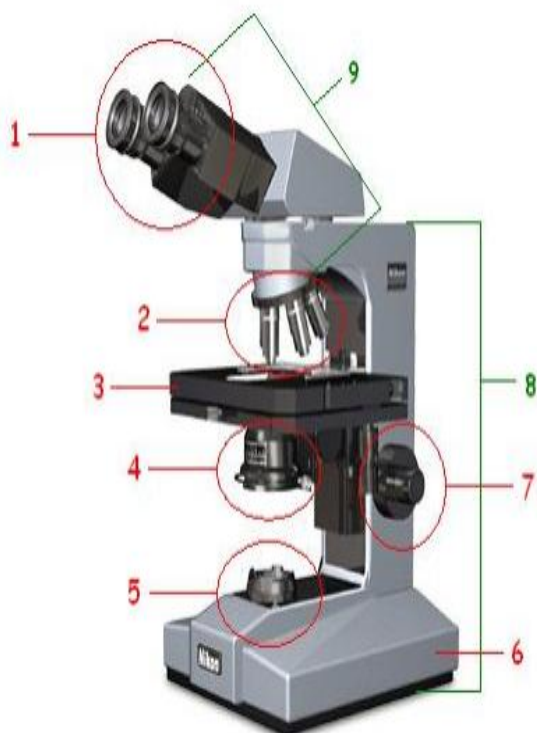
Rys. 45. Poziom plastycznych deformacji powierzchni stali S235 po procesie śrutowania a)1-krotny, b)2-krotny c)3-krotny.



Rys. 45b. Różnica deformacji plastycznych powierzchni w zależności od krotności przeprowadzani procesu kulowania.

Na rysunku 45b widać jak zmienia się deformacja powierzchni wraz ze wzrostem krotności krycia śrutem. Oprogramowanie komputerowe umożliwiło nałożenie na siebie map powierzchni przed i po trzykrotnym kulowaniu, a także umożliwia zobrazowanie jak

kolejne powtarzanie procesu kulowania zmienia powierzchnie w stosunku do materiału nie poddanego kulowaniu. W celu weryfikacji poziomu deformacji powierzchni materiału w zależności od krotności przeprowadzenia procesu wykonano pomiar profilu powierzchni dla materiału. Pomiar wykonano przy pomocy mikroskopu optycznego Huvitz wyposażonego w oprogramowanie 3D z rozszerzeniem topograficznym, realizuje on powiększenie zakresu 10 x 500 razy (rys. 46).

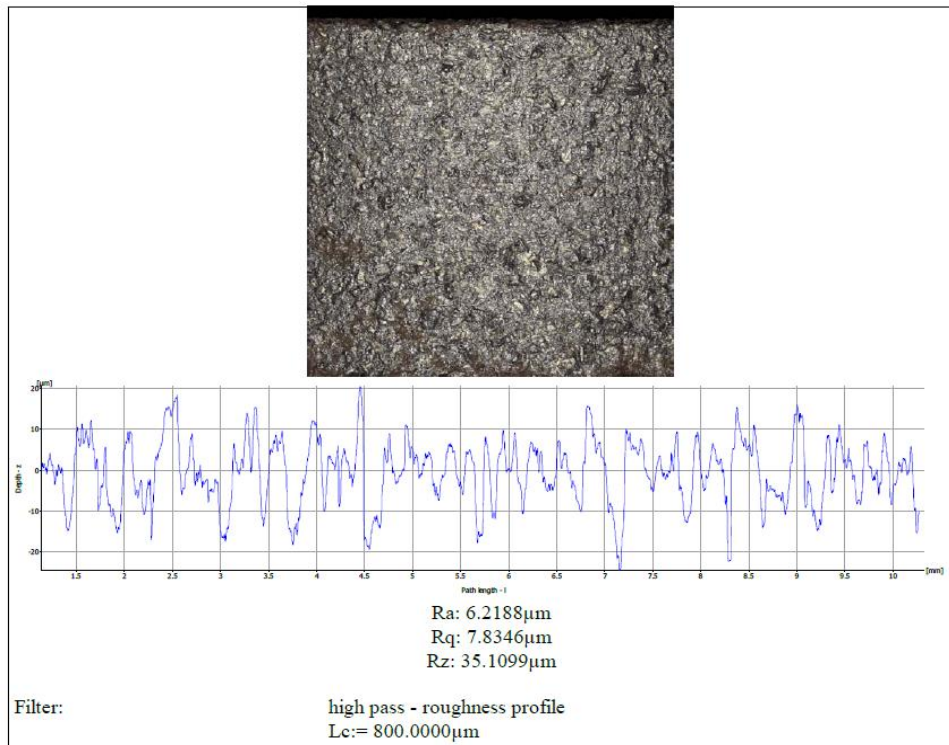


1 – Okular; 2 – Rewolwer – obrotowa tarcza zawierająca zestaw obiektywów o różnym rodzaju powiększenia i aparaturze numerycznej; 3 – Stolik; 4 – Kondensator – koncentruje wiązkę promieni świetlnych o dużej intensywności formując z nich stożek wystarczający do oświetlenia pola przedmiotowego; 5 – Przesłona / źródło światła – przesłony głównie mają za zadanie zmniejszenie ilości padającego światła, (w zależności od miejsca umieszczenia mogą np. zwiększać głębię ostrości lub zmniejszać wady optyczne); 6 – Podstawa; 7 – Śruba regulacyjna – umożliwia ułożenie próbki znajdującej się na stoliku na odpowiednią odległość tzw. odległość roboczą od obiektywu; 8 – Statyw; 9 - Tubus – jest to przestrzeń pomiędzy obiektywem a okulem, w której tworzy się obraz.

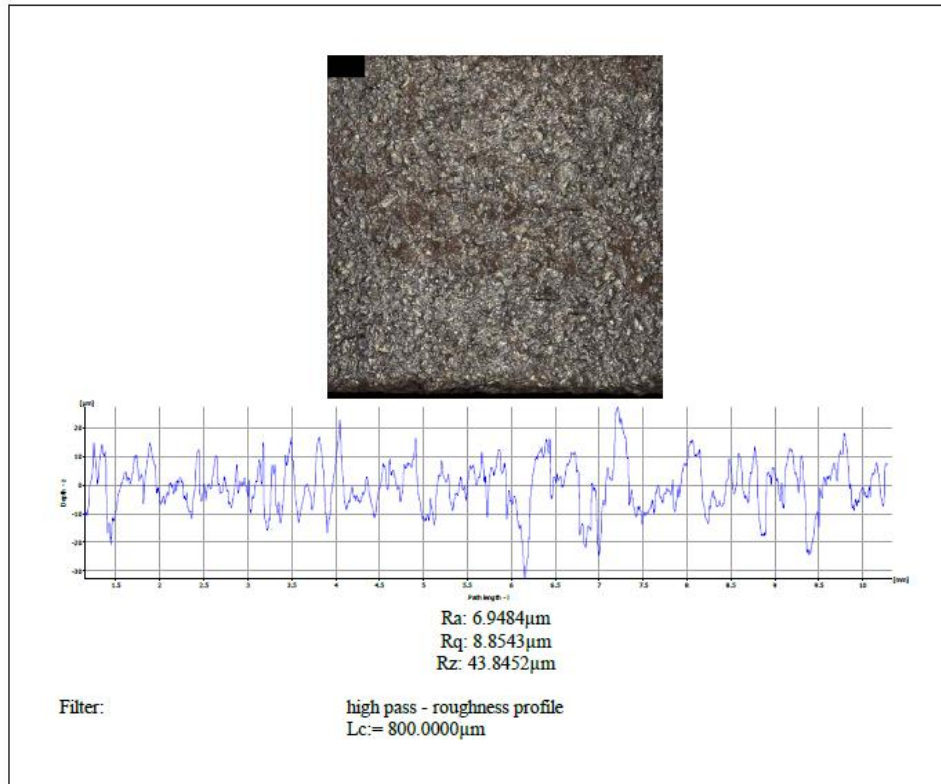
Rys. 46. Schemat oraz elementy składowe mikroskopu Huvitz [148].

Jak wspomniano wcześniej, każdy rodzaj obróbki powierzchniowej poprzez śrutowanie, szlifowanie czy skrawanie pozostawia charakterystyczne ślady na obrabianej powierzchni. Ślady te, związane najbardziej z rodzajem obrabiarki, narzędziami oraz obrotami, kształtem oraz granulacją ścierniwa, a także ciśnieniem roboczym w układzie, to chropowatość powierzchni. W przeciwieństwie do błędów kształtu powierzchni obrabianych, chropowatość jest parametrem z góry zadany i przewidywalnym. Dobór odpowiednich parametrów bezpośrednio na otrzymane oczekiwane poziomy chropowatości. Porównanie powierzchni przed i po procesie śrutowania przedstawiono na rys. 47 a, b, c.

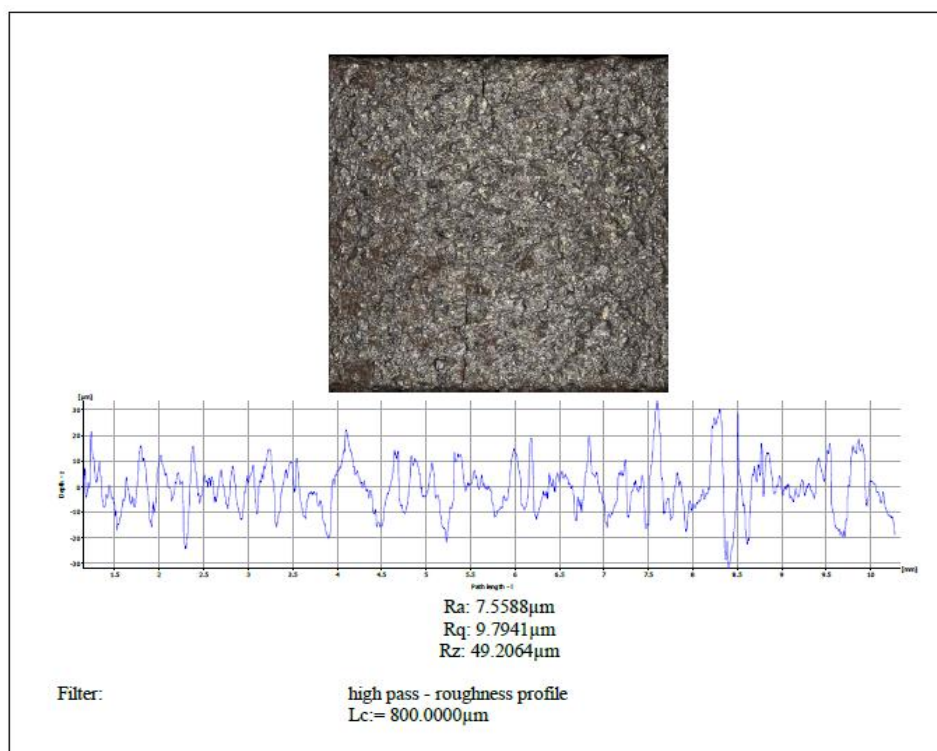
a)



b)

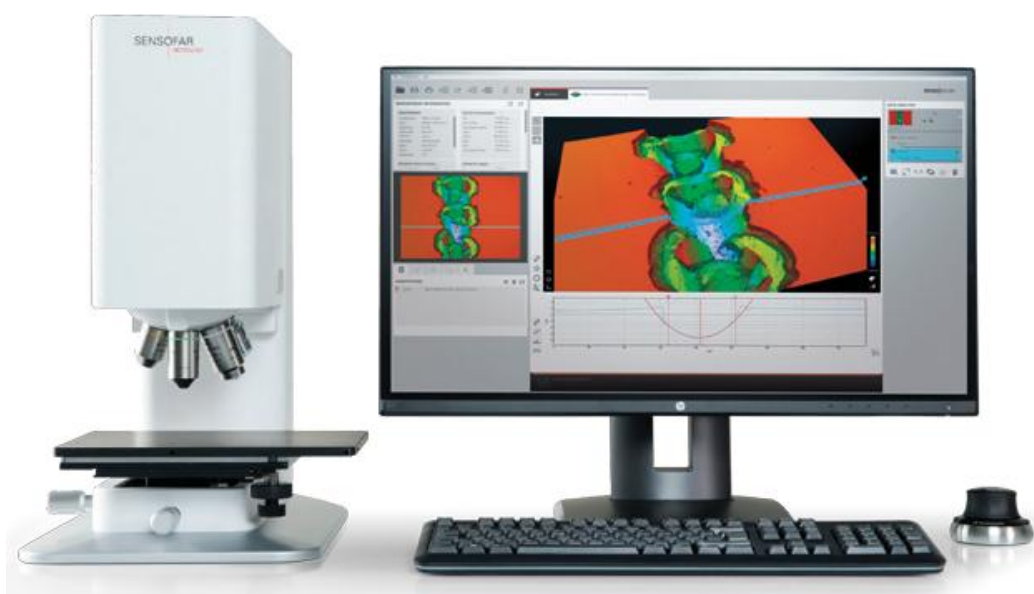


c)



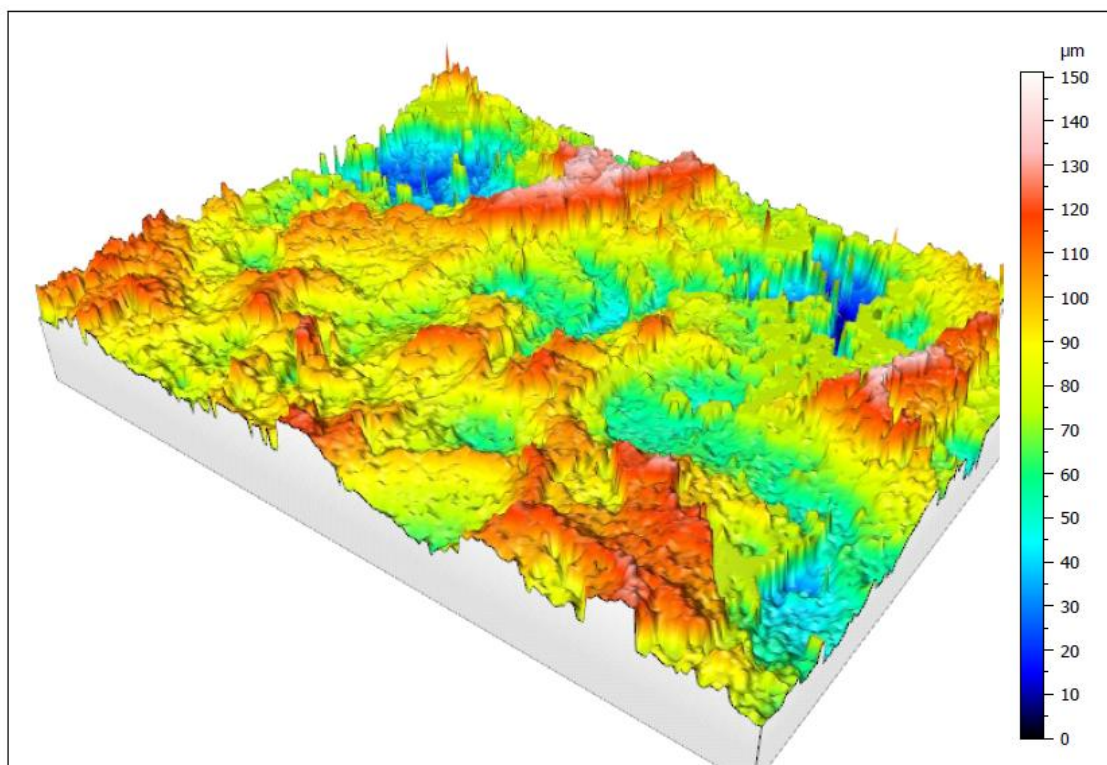
Rys. 47. Przyrost chropowatości stali S235 po przyroście krotności procesu śrutowania, a) materiał wyjściowy, b) pojedyncze krycie śrutem, c) po dwukrotnym kryciu śrutem kulistym.

W celu zweryfikowania poprawności pomiaru dostępnym urządzeniem marki Huvitz powtórzono pomiary profilu powierzchni po procesie śrutowania na profilometrze marki SENSOFAR Compact 3D Profiler (rys. 48).

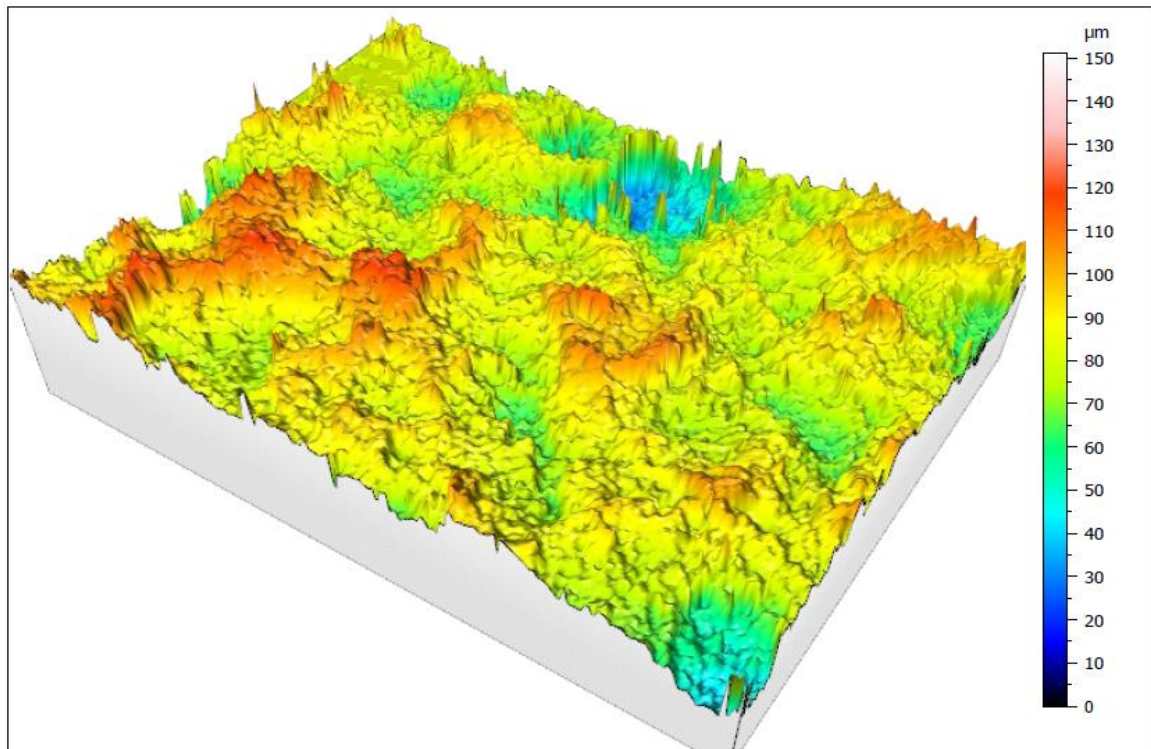


Rys. 48. Profilometr marki SENSOFAR.

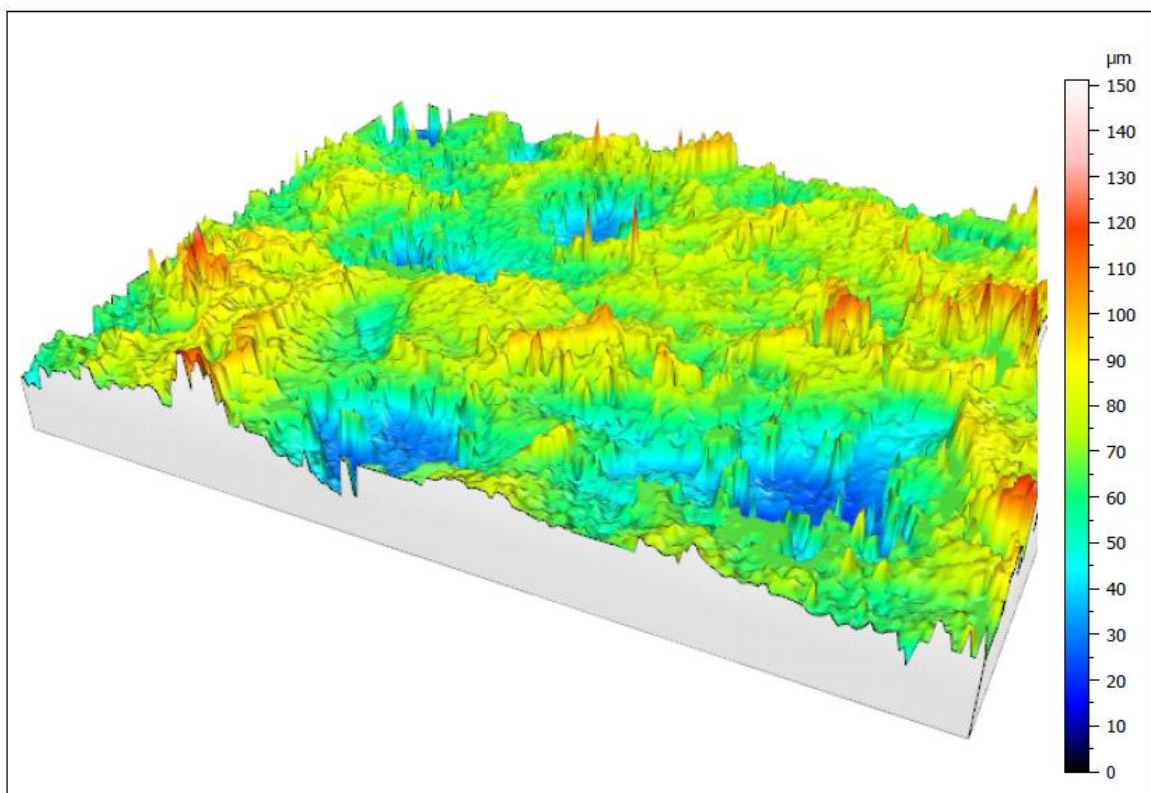
Sensofar 3D to bezkontaktowy profilometr optyczny wraz z mikroskopem, służący do pomiarów charakterystyki 3D oraz topografii powierzchni o szerokim spektrum chropowatości. Podstawą systemu jest opatentowana technologia skanowania za pomocą mikro-wyświetlacza cyfrowego. Urządzenie jest wyposażone wyłącznie w stałe (nieruchome) elementy, które w trakcie skanowania redukują poziom wibracji oraz szумы w celu osiągnięcia wysokiej jakości obrazu. Urządzenie realizuje pomiary trzema metodami pomiarowymi: konfokalna, interferometryczna oraz zmienna ogniskowa (Focus Variation). Efektem badań jest sporządzenie profilu powierzchni materiałowej po dwukrotnym śrutowaniu dla trzech gatunków badanych stali w celu łatwiejszego zobrazowania krzywizn powierzchni, gdzie obraz przedstawiono w formie różnobarwnych warstw (rys. 49, 50, 51).



Rys. 49. Profil chropowości 3D dla stali S235 wykonany przy pomocy profilometru marki SENSOFAR.



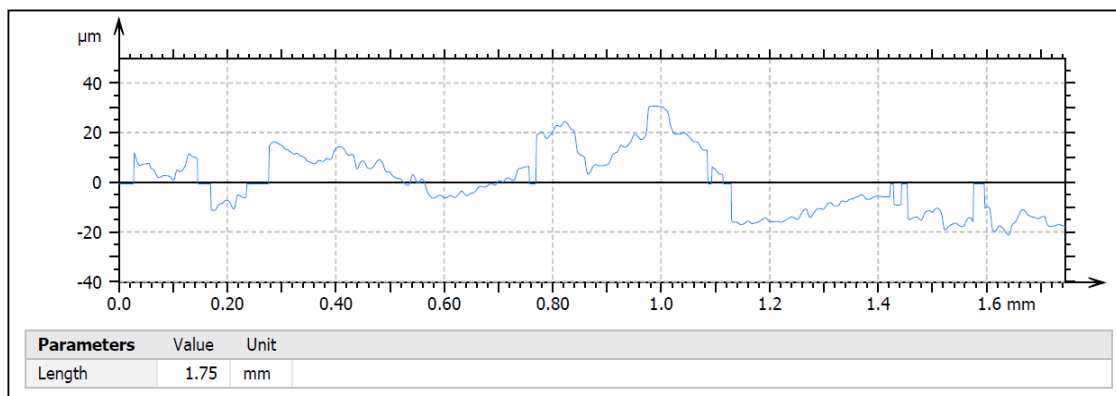
Rys. 50. Profil chropowości 3D dla stali S355 wykonany przy pomocy profilometru marki SENSOFAR.



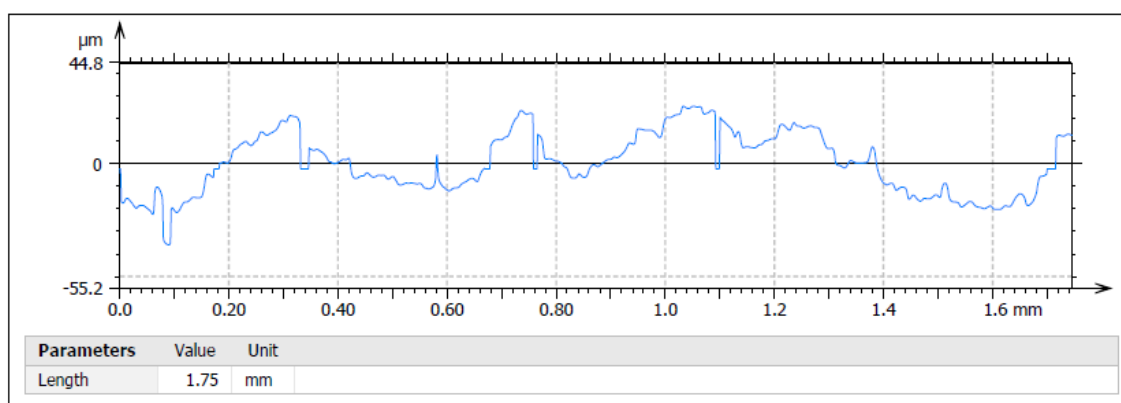
Rys. 51. Profil chropowości 3D dla stali P460 wykonany przy pomocy profilometru marki SENSOFAR.

Wyznaczono także profil chropowości dla każdej ze śrutowanych stali. W pracy zaprezentowano profile dla trzech gatunków badanych stali po trzykrotnym procesie krycia śrutem. Wyselekcjonowanie profile i dla tej samej ilości cykli

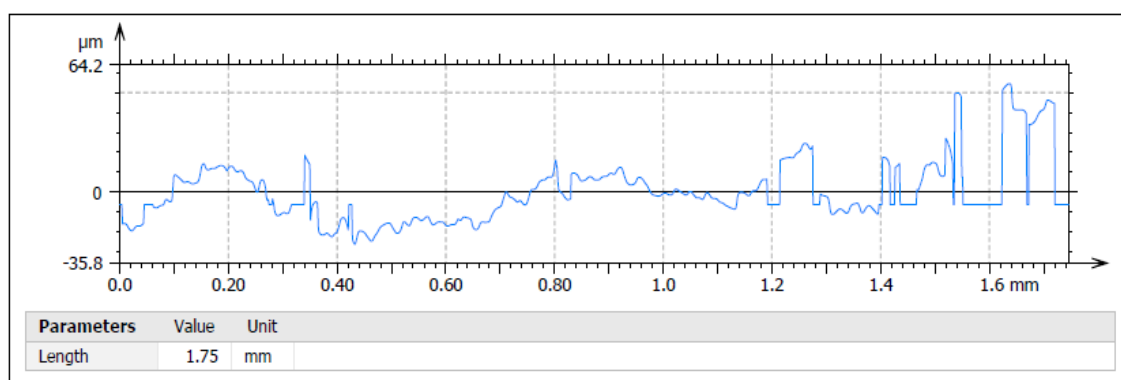
powtórzeń procesu kulowania obrazuje w najdokładniejszy sposób zmiany chropowatości powierzchni po procesie krycia śrutem kulistym twardym. Rezultaty w postaci profili chropowatości każdego z materiałów zestawiono na rys. 52, 53, 54.



Rys. 52. Profil chropowatości dla stali S235 wykonany przy pomocy profilometru marki SENSOFAR..



Rys. 53. Profil chropowatości dla stali S355 wykonany przy pomocy profilometru marki SENSOFAR..

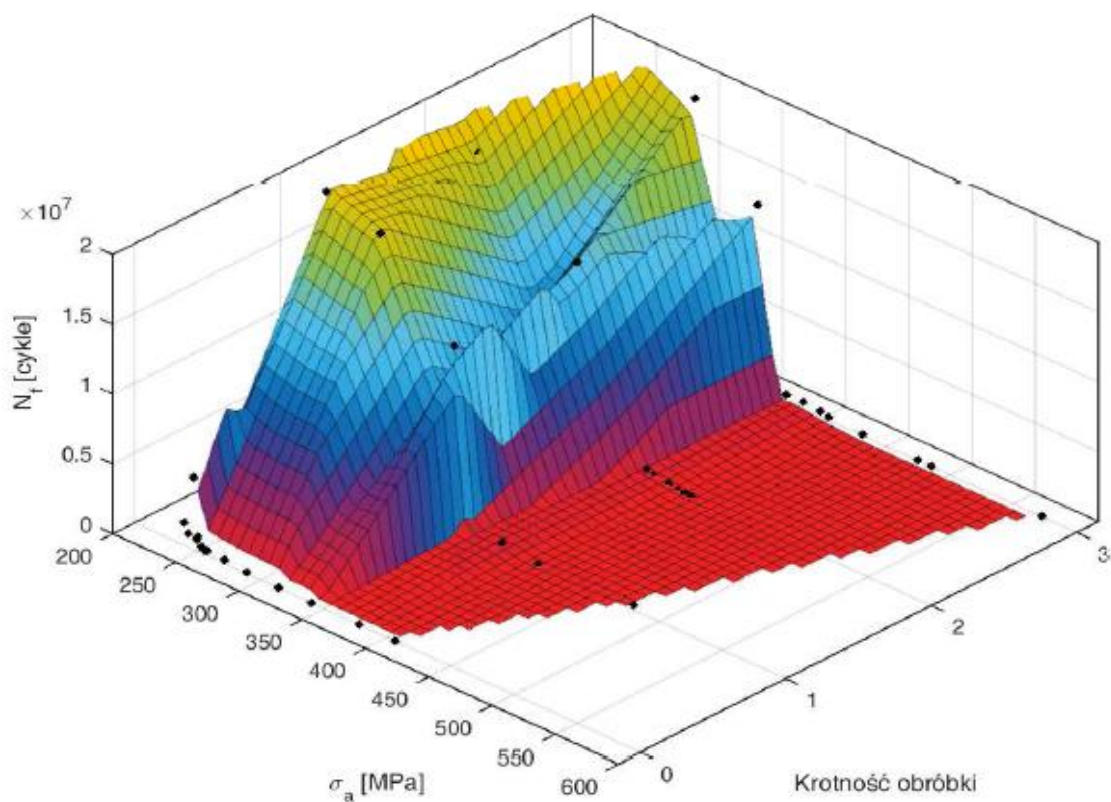


Rys. 54. Profil chropowatości dla stali P460 wykonany przy pomocy profilometru marki SENSOFAR..

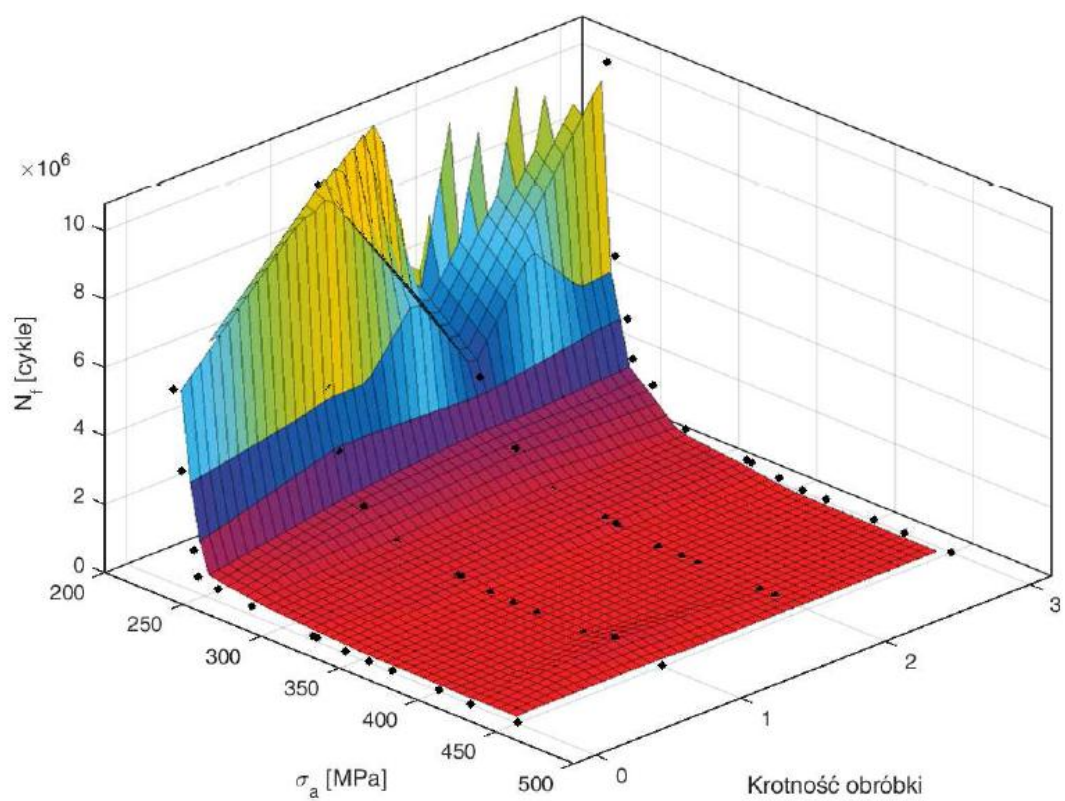
Uśrednione wyniki pomiaru poziomu chropowatości w odniesieniu do przyrostu kolejnych cykli krycia śrutem dla pozostałych materiałów przedstawiono w postaci graficznej, w formie wykresów na (rys. 55, 56, 57). Z przeprowadzonej analizy wynika, iż

w przypadku stali S355 oraz S235 od punktu wyjściowego, czyli blachy dostarczonej w stanie surowym, do stanu trzykrotnego krycia śrutem, którego twardości zgodnie jest o 30% wyższej niż materiał umacniany. Przyrost chropowatości stali niższej jakości był wyższy w stosunku do materiału wyższej klasy, jaką jest stal P460. W przypadku wszystkich stali odnotowano przyrost chropowatości, jednak w przypadku stali P460 przyrost ten był zdecydowanie niższy. Stale niższej klasy wykazywały wyższy współczynnik podatności na obróbkę śrutowaniem, a odkształcenia plastyczne na ich powierzchni były większe w odniesieniu do stali cechującej się wyższą twardością P460.

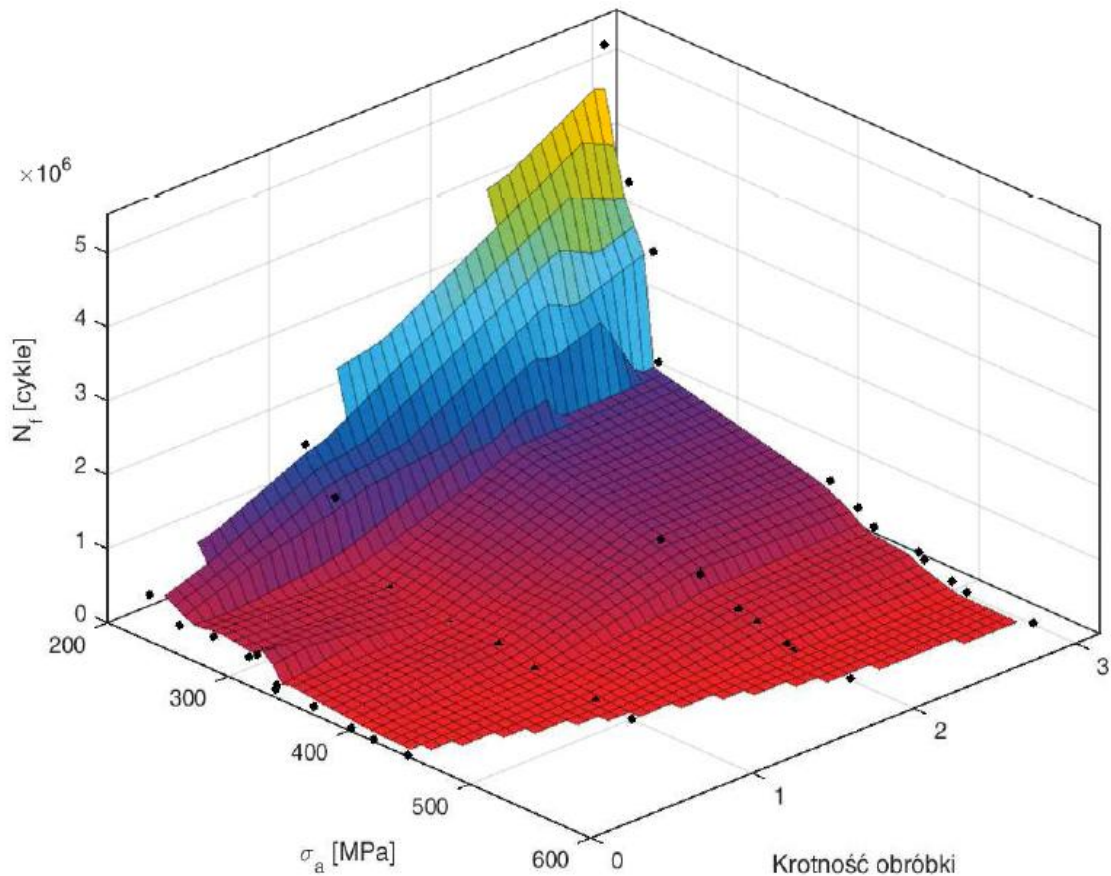
W celu lepszego zobrazowania wpływu intensywności procesu w zależności od krotności jego przeprowadzania na wzrost trwałości zmęczeniowej poszczególnych stali zestawiono trzy składowe i wygenerowano diagramy rys.55-57. Z przeprowadzonych analiz wynika, iż stal S235 oraz P460 były podatne na działanie procesu krycia śrutem. W przypadku stali S235 i P460 wraz ze wzrostem krotności prowadzenia procesu wzrastała trwałość zmęczeniowa. Stal S235 wykazywała podatność na działanie procesu zarówno dla wysokich, jak i średnich amplitud naprężenia. W przypadku stali P460 najwyższa podatność była dla wysokiej amplitudzie. W przypadku stali S355 widać, iż stal jest wrażliwa na działanie śrutu. Dla przebadanej stali, podwójne krycie okazało się być niszczące, a na powierzchni materiału pojawiły się mikropęknięcia i trwałość zdecydowanie spadła. W celu weryfikacji i potwierdzenia tych wniosków należy przeprowadzić badania nakładania śrutu o niższej twardości lub przy niższym ciśnieniu roboczym. Badania te jednak mogą być nieadekwatne w przypadku stosowania ich do stali S235 oraz P460 z racji obniżenia twardości śrutu oraz zmniejszenia energii kinetycznej śrutu. Udział naprężeń własnych może być niższy, a tym samym obniży się sam wpływ przeprowadzenia procesu na trwałość zmęczeniową.



Rys. 55. Wpływ krotności prowadzenia procesu krycia śrutem na wzrost trwałości zmęczeniowej stali S235.



Rys. 56. Wpływ krotności prowadzenia procesu krycia śrutem na wzrost trwałości zmęczeniowej stali S355.

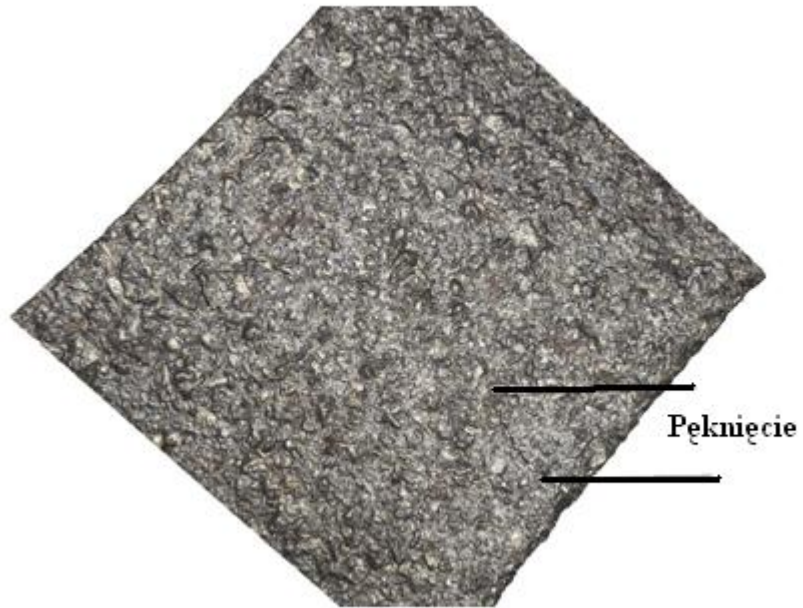


Rys. 67. Wpływ krotności prowadzenia procesu krycia śrutem na wzrost trwałości zmęczeniowej stali P460.

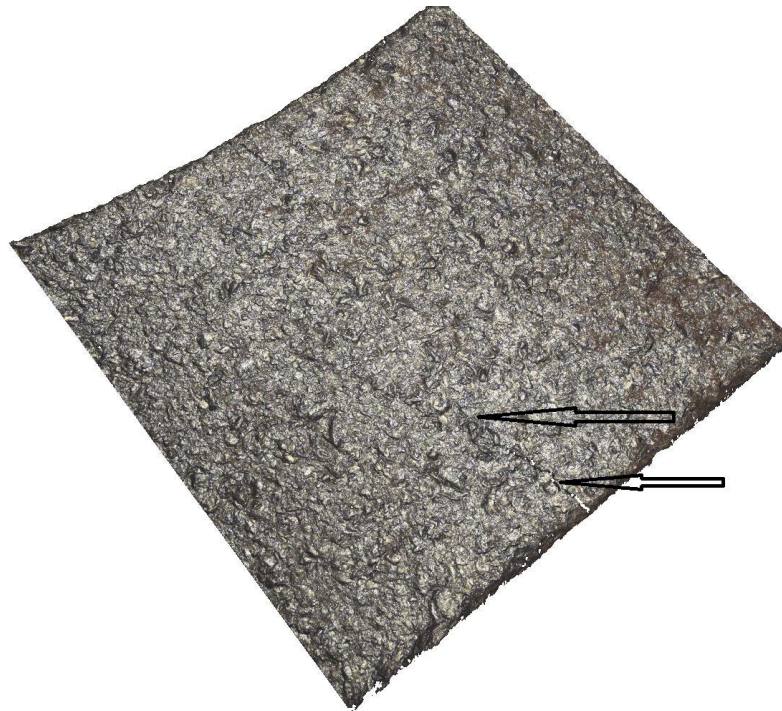
7.2.2 Badanie przelomów zmęczeniowych po procesie kulowania

Po przeprowadzeniu serii badań zmęczeniowych zaobserwowano że proces obróbki strumieniowej kulowania poprawia właściwości zmęczeniowe badanych stali. W trakcie testów zmęczeniowych materiały pękały w miejscach przewężonych co umożliwiała obserwacje pęknięć. Wszystkie materiały zarówno stale 235 i 355 a także P460 po przeprowadzeniu kolejnych prób krycia śrutem pękały w identyczny sposób, tzn. inicjacja pęknięcia zmęczeniowego następowała w górnej lub dolnej części badanego przekroju. (rys 58, 59)

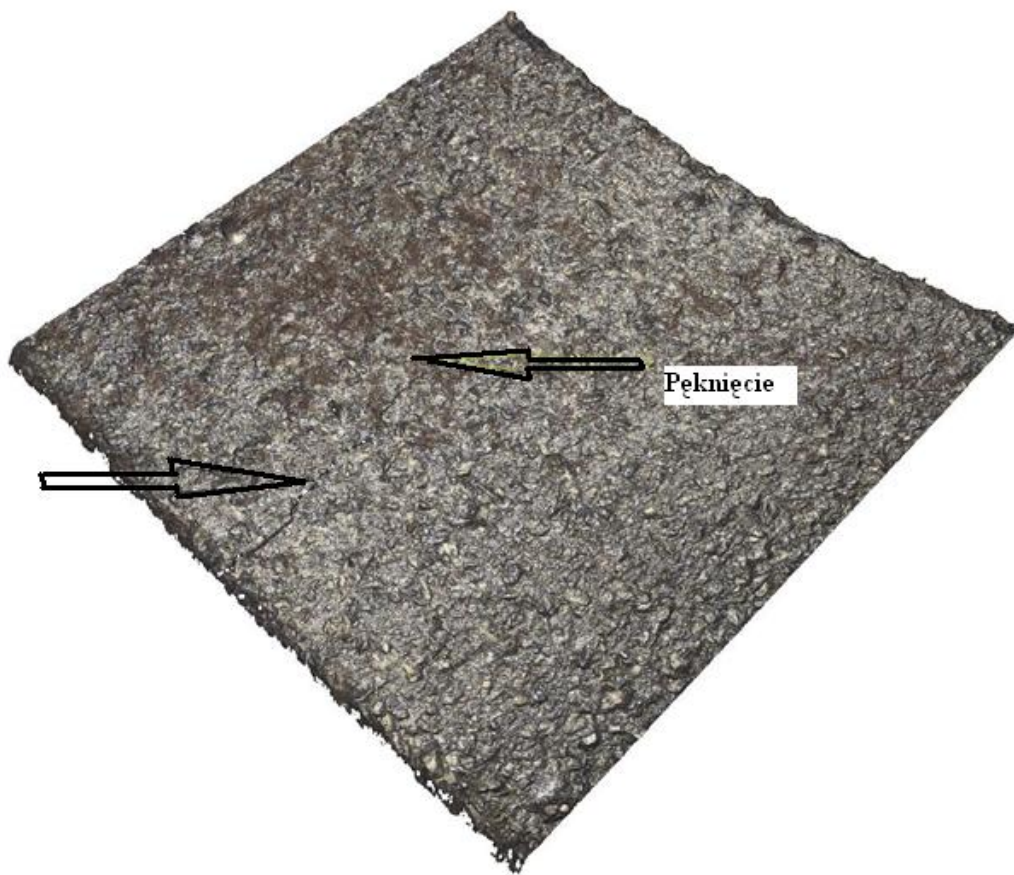
a)



b)

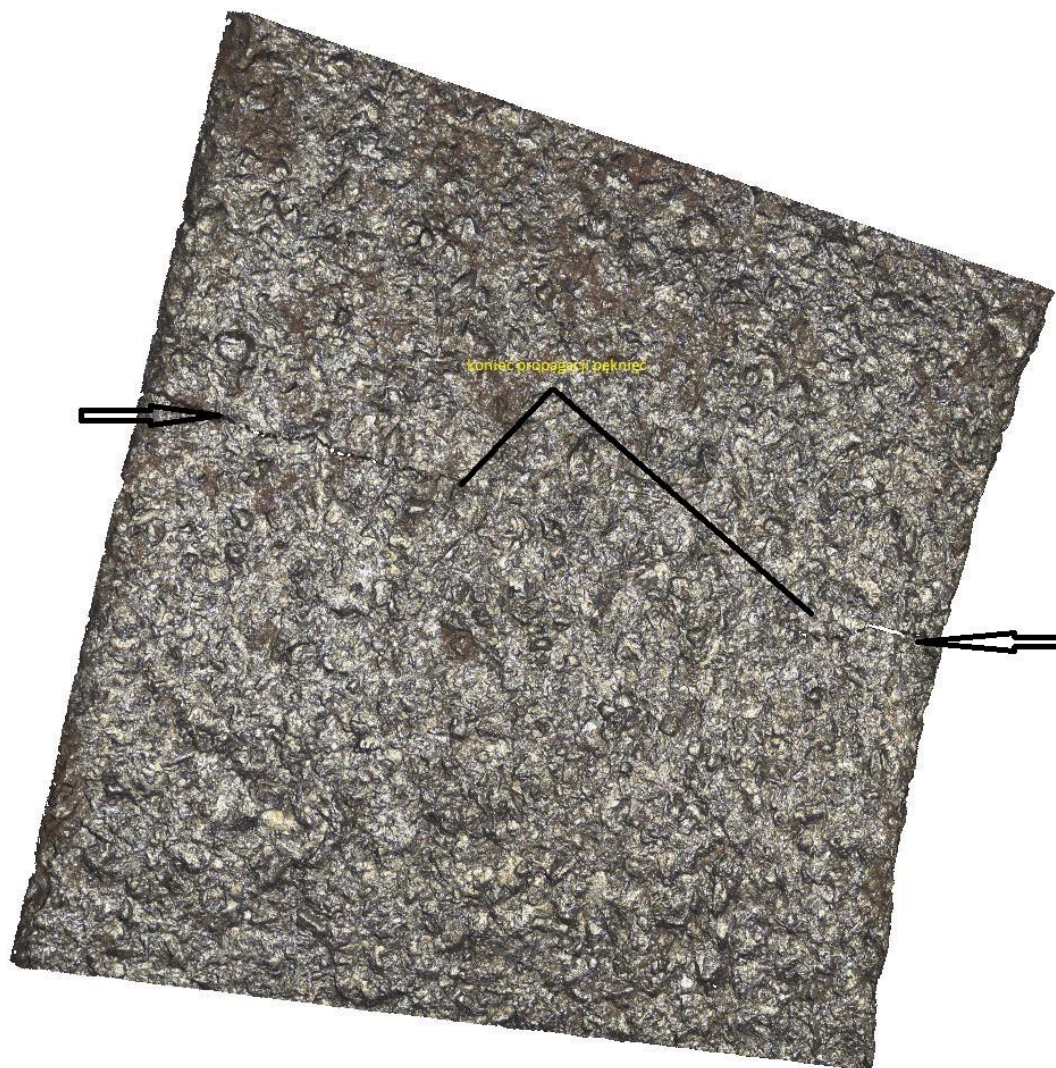


Rys.58. przykładowe pęknięcie zmęczeniowe występujące na powierzchni materiału po przeprowadziu kulowania.



Rys.59. Pęknięcie zmęczeniowe na powierzchni badanego materiału.

Natomiast w przypadku Stali P460 po trzy krotnym procesie kulowania w zakresie małych liczby cykli tj. 60-70 tys próbki pękały analogicznie do wcześniej opisanych. Lecz w przypadku próbek których żywotność przekraczała znacznie milion cykli materiał pękał w górnej i dolnej części powierzchni badanej próbki. Było to cecha charakterystyczna tylko dla tego jednego materiału. (rys.60)



Rys.60. Przebieg pęknięć zmęczeniowych stali P460 po trzykrotnym kulowaniu w zakresie wysokiej liczby cykli

7.2.3 Badania zmęczeniowe dla materiałów poddanych obróbce śrutowaniem

Aby wyniki badań materiału poddanego obróbce śrutowania śrutem twardym mogły być porównywane z materiałem bazowym, próbki zostały wykonane w analogiczny sposób: posiadały identyczną geometrię jak materiał bazowy, próbki z materiału bazowego zostały wykonane zgodnie z normą, a promień przewężenia został wyznaczony tak, by analizowane próbki pękały w strefie o najmniejszym przekroju poprzecznym. Próbki materiałowe były poddane obróbce śrutowaniem po przygotowaniu geometrii elementu, elementy były śrutowane kabinowo w procesie zamkniętym, ze wszystkich stron. Łącznie przebadano ok. 150 próbek śrutowanych, jednak tylko 98 spośród nich mogło być próbkami ujętymi w wynikach badań zmęczeniowych. W wyniku prowadzenia procesu niektóre próbki zostały w znacznym stopniu zdeformowane, a także na ich powierzchni pojawiały się pęknięcia. Było

to spowodowane doбором złej twardości śrutu umacniającego oraz zbyt wysoką energią z jaką śrut uderzał w materiał. Ponadto niektóre z próbek nie pękały wcale lub pękały w miejscu utwierdzenia próbki w maszynie zmęczeniowej, co dyskwalifikowało je z grona miarodajnych wyników badań. Wyniki przeprowadzonych testów zmęczeniowych zaprezentowano w formie tabeli zawierającej parametry obciążenia momentem gnącym elementów oraz trwałości zmęczeniowych (tabelach 6, 7, 8). Na podstawie uzyskanych trwałości zbudowano charakterystyki zmęczeniowe dla materiałów rodzimych oraz dla materiałów poddanych cyklicznemu kryciu śrutem (rys. 61 a, b, c, d). Wyniki dla Trzykrotnego krycia śrutem przedstawiają się następująco:

Tabela 6. Wyniki badań zmęczeniowych dla stali S235 poddanej śrutowaniu strumieniowemu.

M_{ga} , N·m	σ_{an} MPa	N_f cykle
40,5	450	22000
38,5	420	27600
35	400	33450
34	370	55600
32	355	63000
30	340	119000
28	322	256000
25	319	266000
24	280	457000
22	259	1340000
21	246	1870000
19,5	243	2980000
19	235	4674400
18	230	10273000

Tabela 7. Wyniki badań zmęczeniowych dla stali S355 poddanej śrutowaniu strumieniowemu.

M_{ga} , N·m	σ_{an} MPa	N_f cykle
18,1	258	20875000
20,9	298	18843000
22,9	327	8780000
24,4	348	13135000
25,9	370	434000
26,9	384	521000
27,8	397	356000
28,3	404	220000
30,2	431	60000
33,2	474	27000
34	485	41000
40	572	11300

Tabela 8. Wyniki badań zmęczenia dla stali P460 poddanej śrutowaniu strumieniowemu.

M_{ga} , N·m	σ_{an} , MPa	N_f , cykle
45	565	26800
40	510	38430
39,7	498	93100
38	475	215800
34	470	284200
32,4	433	351000
31,7	420	516500
30	397	720200
24,4	255	1288800
23,7	250	2754500
22,1	230	3557200
19	210	5267240

Natomiast wyniki dla dwukrotnego krycia śrutem przedstawiono w tabelach 9,10,11.

Tabela 9. Wyniki badań zmęczenia dla stali S235 poddanej śrutowaniu strumieniowemu.

M_{ga} , N·m	σ_{an} , MPa	N_f , cykle
40,0	430	21080
38,3	420	24300
34,7	380	33320
33	370	54600
32	355	63200
30,4	330	119000
28,3	328	246000
25,4	321	266000
24	287	454000
21,7	264	1240000
21	245	1640000
19,5	241	2900000
19,2	200	4574400
17	190	10260000

Tabela 10. Wyniki badań zmęczenia dla stali S355 poddanej śrutowaniu strumieniowemu.

M_{ga} , N·m	σ_{an} , MPa	N_f , cykle
18,0	222	20455000
21	240	17940000
22,4	290	8700000
24,2	320	13123000
25,7	370	430000
26,5	375	519000
27,6	380	340000
28	392	212000
30,2	400	56000
32,7	405	19000
34,3	407	22000
40,3	410	10200

Tabela 11. Wyniki badań zmęczeniowych dla stali P460 poddanej śrutowaniu strumieniowemu.

M_{ga} , N·m	σ_{an} , MPa	N_f , cykle
44,3	548	22000
40,2	500	38000
40	495	100100
38,4	470	213800
34,7	455	283200
32,2	430	311100
31,7	423	524500
30,3	390	750700
24,5	270	1188800

Wyniki dla pojedynczego kryciu śrutem są zawarte w tabelach 12,13,14.

Tabela 12. Wyniki badań zmęczeniowych dla stali S235 poddanej śrutowaniu strumieniowemu.

M_{ga} , N·m	σ_{an} , MPa	N_f , cykle
40,5	450	19000
38,5	420	276600
35	400	32650
34	370	54400
32	355	62000
30	340	100000
28	322	234000
25	319	222000
24	280	453400
22	259	1110000
21	246	1230000
19,5	243	2450000
19	235	4214400
18	230	10003000

Tabela 13. Wyniki badań zmęczeniowych dla stali S355 poddanej śrutowaniu strumieniowemu.

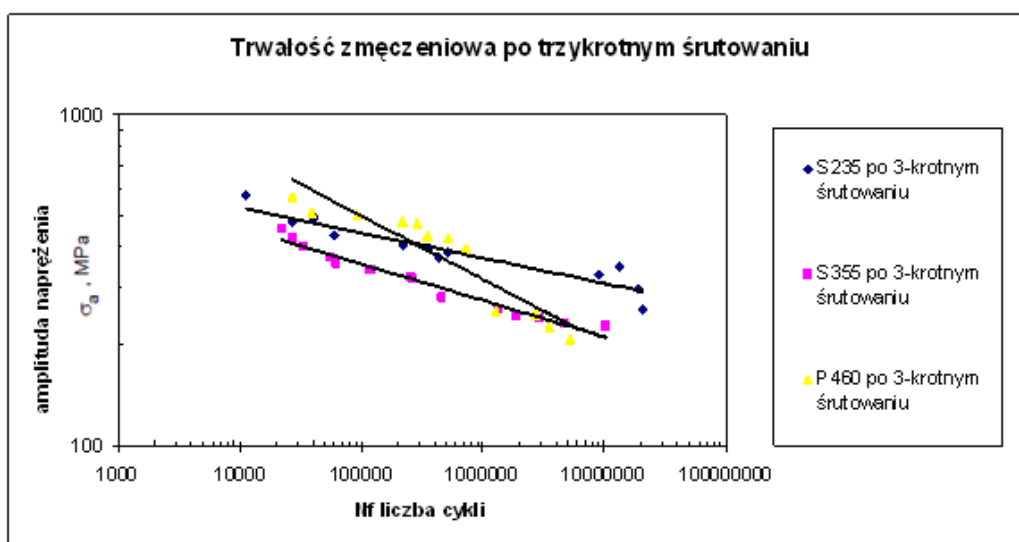
M_{ga} , N·m	σ_{an} , MPa	N_f , cykle
18,1	237	20001000
20,9	279	18722000
22,9	327	8779000
24,4	338	13122000
25,9	350	434000
26,9	376	518000
27,8	480	343000
30,3	404	180000
35,2	404	63000
37,2	403	8600

Tabela 14. Wyniki badań zmęczeniowych dla stali P460 poddanej śrutowaniu strumieniowemu.

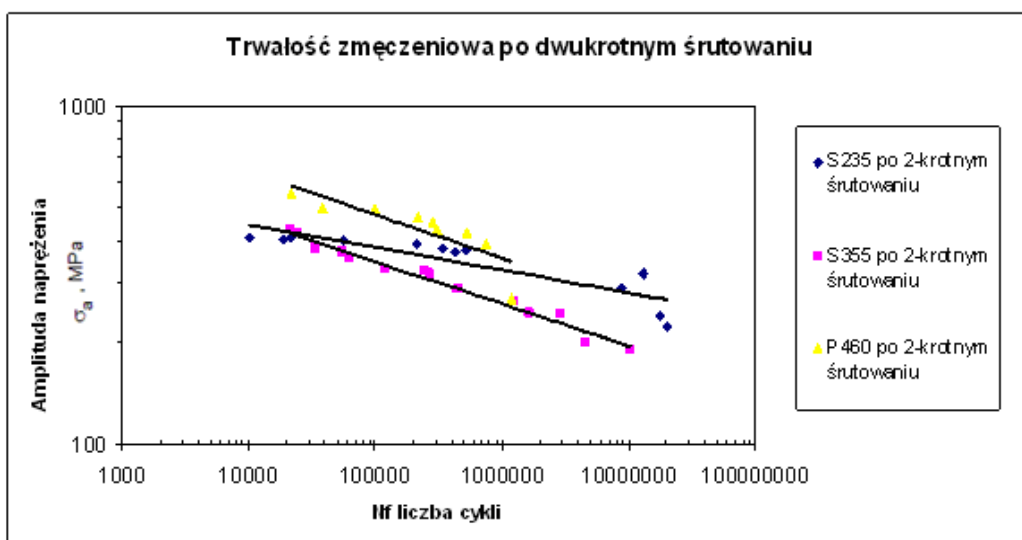
$M_{\text{ga}}, \text{N}\cdot\text{m}$	$\sigma_{\text{an}}, \text{MPa}$	N_f, cykle
44,6	500	11800
40,3	470	24430
39	420	90100
37,7	390	210000
33,5	350	200500
32	300	300000
31,1	280	316500
29,4	267	520200
23	255	1210000
23,2	230	1756000

Wykres przedstawia graficzne zestawienie charakterystyk zmęczeniowych, wykonanych z uwzględnieniem danych prezentowanych w powyższych tabelach.

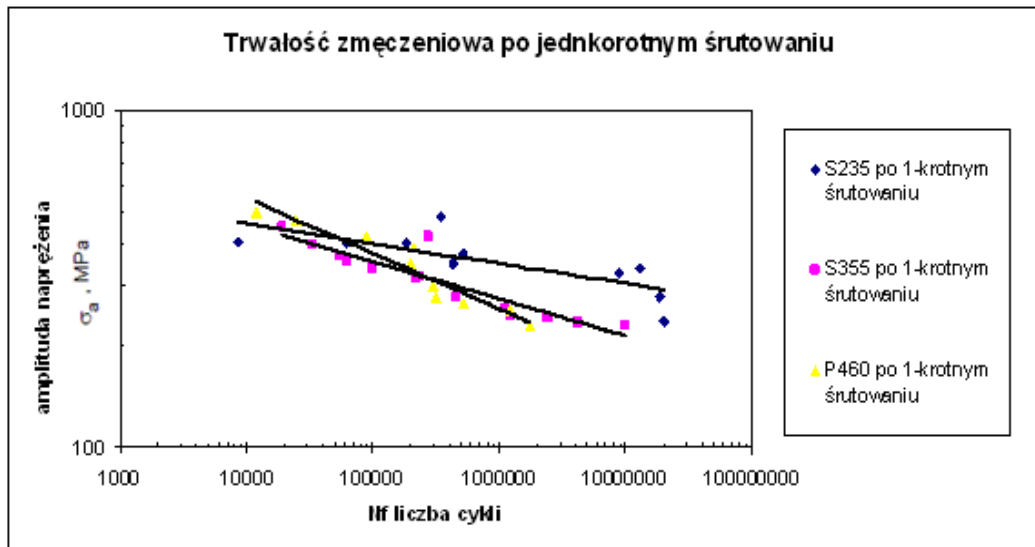
a)



b)



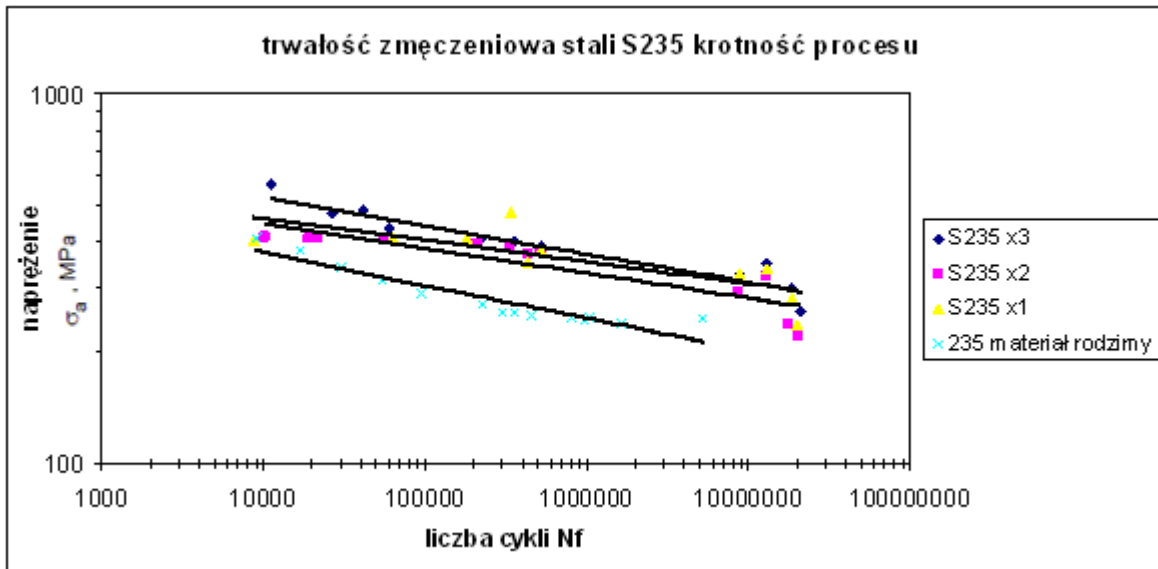
c)



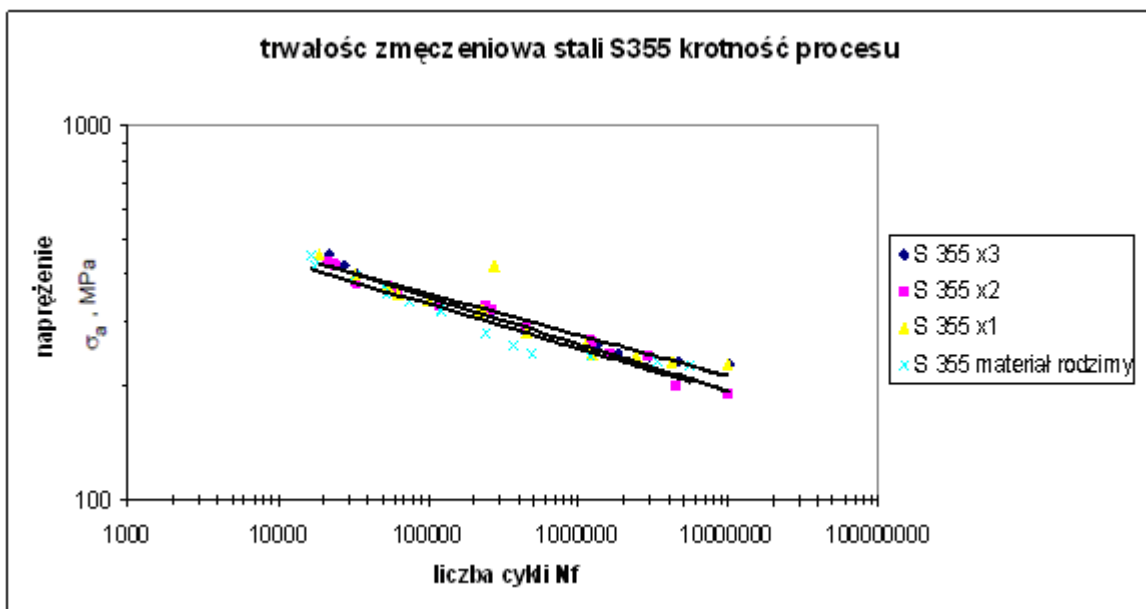
Rys. 61. Charakterystyki zmęczeniowe dla badanych stali poddanemu a) trzykrotnego śrutowania, b) dwukrotnego śrutowania, c) jednokrotnego śrutowania.

Na podstawie przeprowadzonych badań zmęczeniowych materiału poddanego śrutowaniu strumieniowemu możemy zauważyć, iż proces ten podwyższa trwałość zmęczeniową materiałów. W przypadku badanych stali najwyższy przyrost trwałości zmęczeniowej w stosunku do materiału wyjściowego wykazała stal S235, natomiast stalą o najwyższej trwałości jest stal P460. Tak więc proces śrutowania wpływa na trwałość zmęczeniową stali. Jak wynika z badań zmęczeniowych przeprowadzonych dla powyższych materiałów proces śrutowania rozproszonym śrutem kulistym znacznie bardziej poprawia walory wytrzymałościowe stali niższej klasy. Stosowanie procesu śrutowania pozwala na wzmocnienie elementów konstrukcyjnych wykonanych z tańszych materiałów, gorszych gatunkowo stali, co ma bezpośredni wpływ na obniżenie kosztów produkcji elementów, pomimo zastosowania dodatkowego procesu obróbki powierzchniowej. Stosowanie obróbki śrutowaniem jest bezpieczne, tanie w przeprowadzeniu i pozwala zmniejszyć koszty produkcji, transportu i eksploatacji aparatury wykonanej z materiałów poddanych powyższej obróbce. W celu zbadania wpływu jednego z głównych parametrów krycia śrutem twardym przebadane materiały poddano dodatkowej obróbce. Materiał rodzimy poddano jednokrotnego, dwukrotnego oraz trzykrotnemu kryciu śrutem kulistym. Rezultaty powyższego procesu umieszczono na wykresach (rys. 62, 63, 64). Jak wynika z przeprowadzonych badań materiały mają różny poziom tolerancji na powtórne krycie śrutem. W przypadku stali S235 widać zdecydowany wzrost trwałości zmęczeniowej, który zwiększa

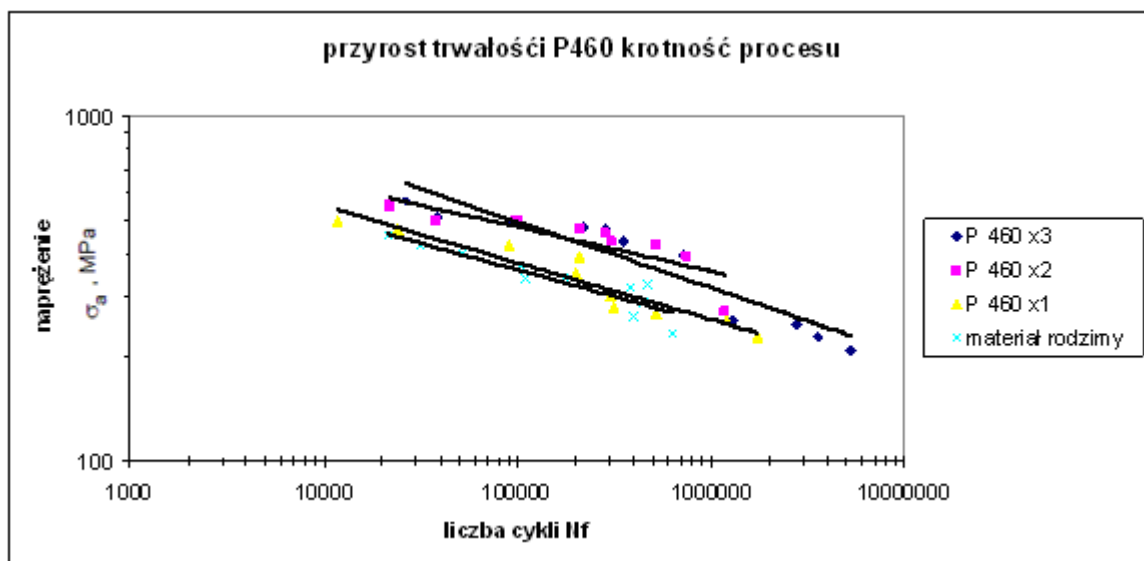
się wraz ze wzrostem powtórzeń krycia śrutem. Podobna sytuacja występuje w przypadku stali P460 która również w przypadku dwukrotnego i trzykrotnego krycia w zdecydowany sposób, w całym przebiegu liczby cykli zwiększyła trwałość zmęczeniową. Natomiast w przypadku stali S355 materiał nie zmieniał trwałości zmęczeniowej. Zarówno dla materiału rodzimego, jak i po kryciu śrutem materiał utrzymywał niemalże stały poziom trwałości.



Rys. 62. Trwałość zmęczeniowa stali S235 w zależności od krotności prowadzenia procesu.



Rys. 63. Trwałość zmęczeniowa stali S355 w zależności od krotności prowadzenia procesu.



Rys. 64. Trwałość zmęczeniowa stali P460 w zależności od krotności prowadzenia procesu.

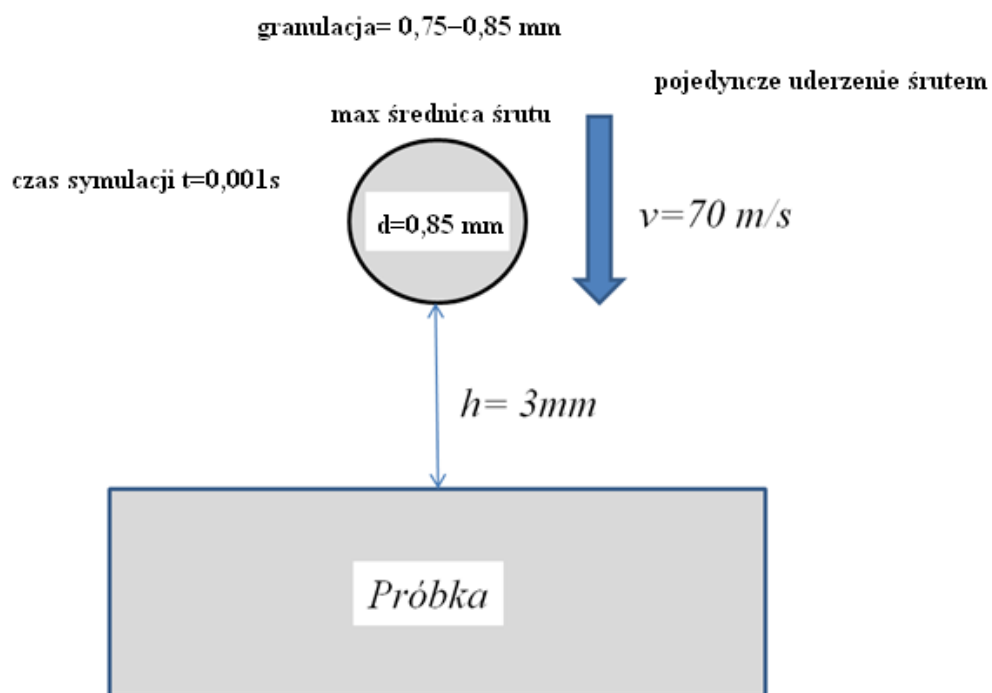
Z przeprowadzonych badań wynika, iż krotność krycia śrutem oraz rodzaj materiału krytego mają zasadniczy wpływ na przyrost trwałości zmęczeniowej. W przypadku stali P460 z przeprowadzonych badań wynika, że stal ta jest podatna na działanie procesu krycia śrutem. W przypadku tej stali widać wzrost trwałości w całym zakresie liczby cykli, już od pierwszego krycia materiałem umacniającym. Natomiast w przypadku stali S355 przyrost trwałości był już nie tak duży i nie zmieniał się wraz z kolejnymi powtórzeniami procesu krycia. Badania wpływu procesu śrutowania rozproszonego na określonych poziomach krotności krycia śrutem dla przeanalizowanych materiałów dowodzą, iż obróbka ta ma wpływ na trwałość zmęczeniową. Dla stali S235 przyrost krotności śrutowania skutkowało przyrostem trwałości zmęczeniowej w całym zakresie prowadzenia procesu zarówno dla niskiej, jak i dla wysokiej liczby cykli. Wraz z krotnością prowadzenia procesu, tj. ilościami pełnego krycia śrutem, odnotowano przyrost trwałości w zakresie ok. 15%. W przypadku materiału P460 dało się zauważyć, że materiał jest podatny na działanie śrutu głównie w zakresie średniej i wysokiej liczby cykli tj. $3,5 \cdot 10^6 \div 7,2 \cdot 10^6$. Dla badanego materiału odnotowano najwyższy wzrost trwałości po trzykrotnym kryciu śrutem twardym kulistym. W przypadku stali S355 nie odnotowano wysokiego zakresu zmian w całym przebiegu trwałości zmęczeniowej. Proces śrutowania rozproszonym śrutem twardym poprawia własności wytrzymałościowe materiałów, jednakże aby jednoznacznie wskazać na przyczynę występowania takiego zjawiska należy przeprowadzić badania metalograficzne materiałów po zastosowaniu procesu, a także pomiar naprężeń własnych w zależności od krotności prowadzenia procesu. Poprzez zastosowanie obróbki powierzchniowej śrutowania jesteśmy w stanie podwyższać trwałość

materiałów niskiego gatunku. Daje to możliwość zmniejszenia grubości elementów, co wpłynie na masę i cenę konstrukcji.

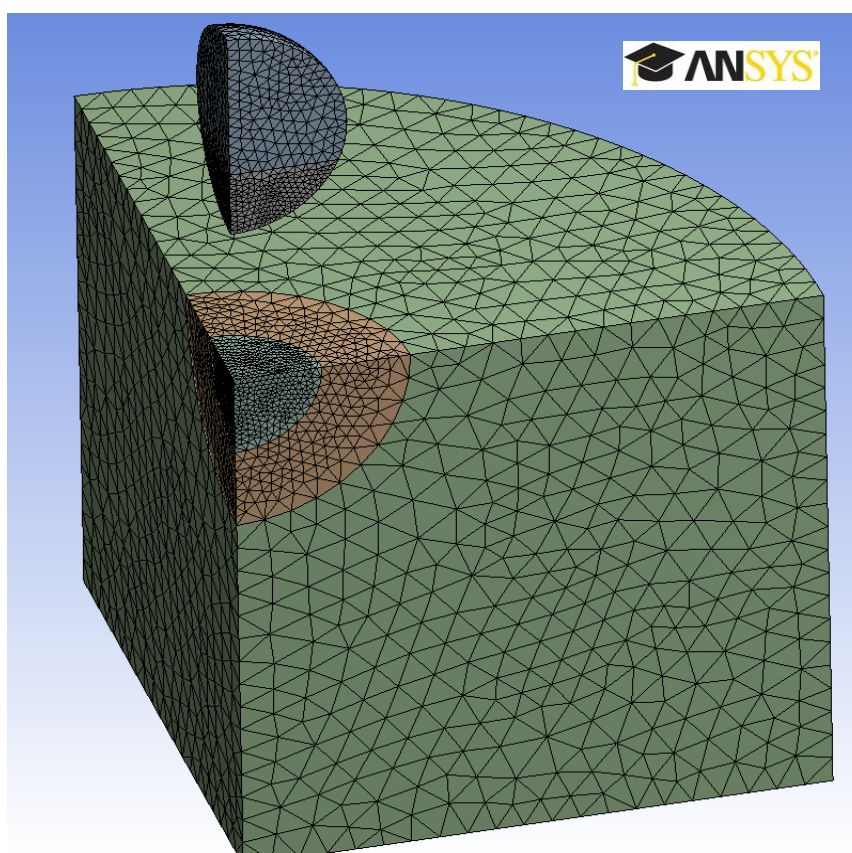
8. Modelowanie parametrów technologicznych procesu

Rezultat przeprowadzonej obróbki zależy od parametrów technologicznych, do których można zaliczyć między innymi: kształt i wymiary stosowanego śrutu oraz intensywność procesu (ciśnienie robocze, czas śrutowania). W pracy zaprezentowano wyniki pomiarów naprężeń własnych wykonanych dla próbek po procesie nagniatania o różnych stopniach intensywności. Wyniki badań eksperymentalnych odniesiono do rezultatów uzyskanych w numerycznej symulacji procesu nagniatania w przypadku pojedynczego uderzenia śrutu na powierzchnie materiałową. Jedną z możliwości analizy rozkładu oraz wartości naprężeń wywołanych odkształceniem są metody numeryczne [83-90]. W swojej pracy Byczkowska, Sawicki i Stegliński [100] poddają wnikliwej analizie rodzaj dobranego śrutu oraz jego wpływ na właściwości technologiczne warstwy wierzchniej materiału. Dobór właściwych parametrów śrutu wymagałby dużej liczby prób badawczych. Wykorzystanie symulacji komputerowych do określenia parametrów procesu obróbki plastycznej przyczynia się do ograniczenia zbędnej liczby eksperymentów. W prezentowanej pracy analizowano numerycznie proces śrutowania próbek ze stopów stali za pomocą śrutu o różnej wielkości, wykonanego z różnych materiałów. Do badań symulacyjnych wykorzystano stałe materiałowe uzyskane z analiz badanych materiałów opisanych w powyższych rozdziałach pracy, wykonanych ze stali S235, S355 oraz P460. Zadaniem modelu obliczeniowego jest symulacja umocnienia powierzchniowego uzyskanego za sprawą odkształcenia plastycznego. Próbkę materiału obrabianego oraz śrut zostały zamodelowane jako materiały o tych samych właściwościach mechanicznych (model sprężysto-plastyczny).

W obliczeniach zostały uwzględnione parametry technologiczne takie, jak średnica śrutu $d = 0,75-0,85$ mm oraz prędkość początkowa v wynoszącą 70 m/s, jest to wartość przybliżona dla układu zasilanego ciśnieniem roboczym 7 atm. Odległość wstępna śrutu i powierzchni obrabianej wynosiła 3 mm. Element poddawany obróbce został zamodelowany jako krążek o średnicy 9 mm (rys.65). Natomiast siatkę elementów skończonych podzielono na strefy o różnych maksymalnych wielkościach elementów skończonych. Do weryfikacji modelu wykorzystano elementy tetraedryczne nieliniowe (rys.66).

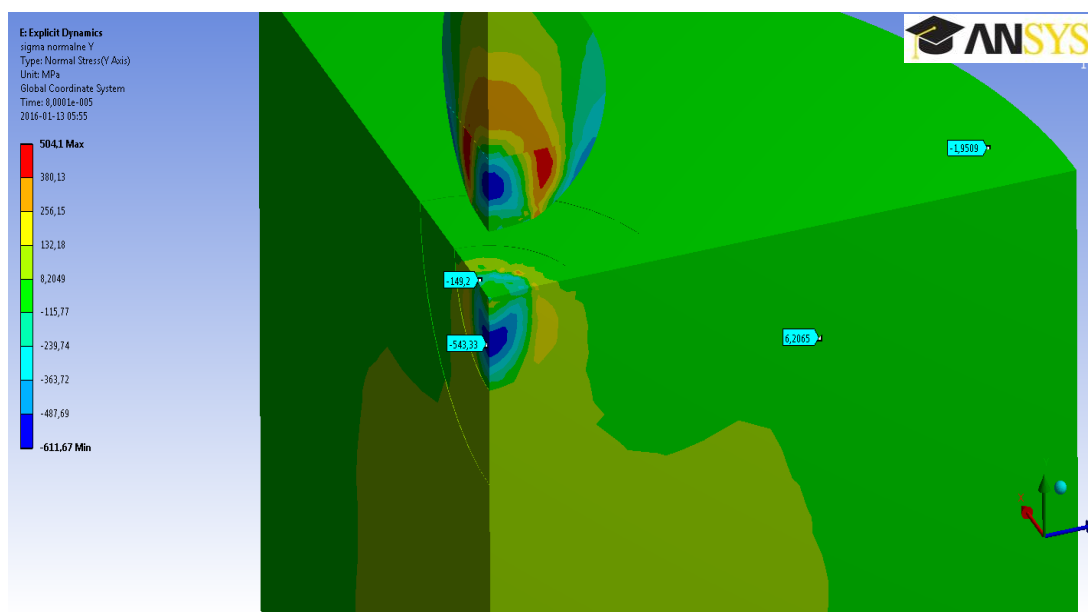


Rys. 65. Schemat rozpatrywanego modelu obliczeniowego kontaktu śrutu z powierzchnią materiałową.



Rys. 66. Przykładowa siatka elementów skończonych dla rozpatrywanego zagadnienia.

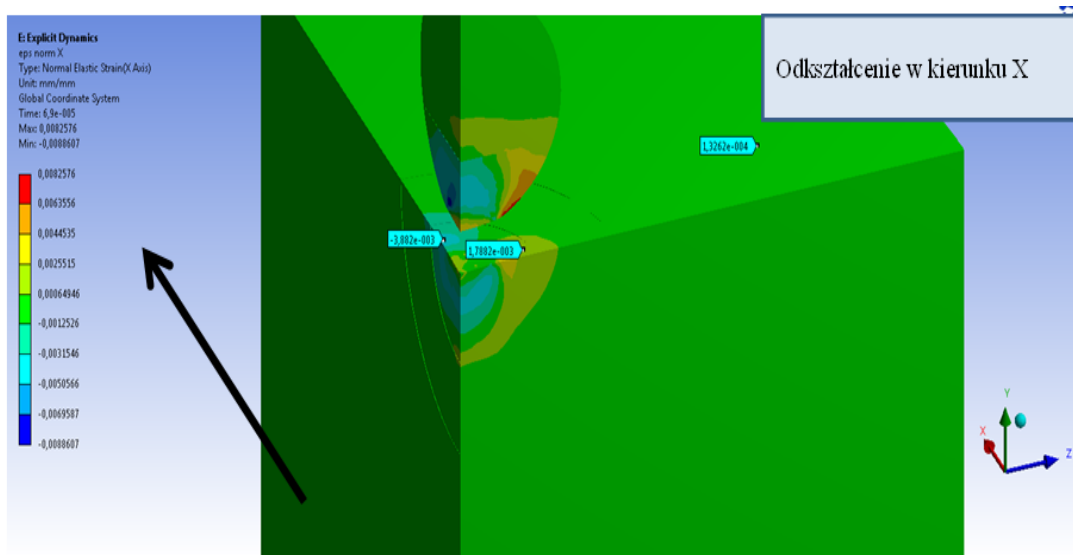
Współczynnik tarcia pomiędzy materiałami wynosił 0,3. Łączny czas symulacji zderzenia wynosił 0,001s. Wyniki uzyskane na drodze obliczeń numerycznych posłużyły do wyznaczenia naprężeń własnych. Wartości naprężeń własnych (w kierunkach głównych) obecne w materiale po zderzeniu śrutu z powierzchnią próbki wynosiły $\sigma_1 = -321$ MPa i $\sigma_2 = -302$ MPa (rys. 67-69). Pomiar naprężeń własnych wykonano metodą trepanacyjną zgodnie z zaleceniami producenta z wykorzystaniem rozet tensometrycznych. Pomiary wykonywano dla próbek poddanych dwu i trzykrotnemu śrutowaniu. Analiza stanu powierzchni po procesie śrutowania może być przeprowadzana zgodnie z rozdziałem 7.1.4 wieloma metodami, tu jednak skupiono się na metodzie trepanacyjnej, a jest ona o wiele tańsza od metody np. ultradźwiękowej czy rentgenowskiej. Badania, w których wykorzystuje się metodę trepanacyjną mogą być przeprowadzane bezpośrednio na przedmiocie, w miejscu jego użytkowania. Wyniki uzyskane z użyciem zaproponowanej metody obciążone są niewielkim współczynnikiem błędów w odniesieniu do pozostałych metod, dużo droższych i trudniejszych w przeprowadzeniu.



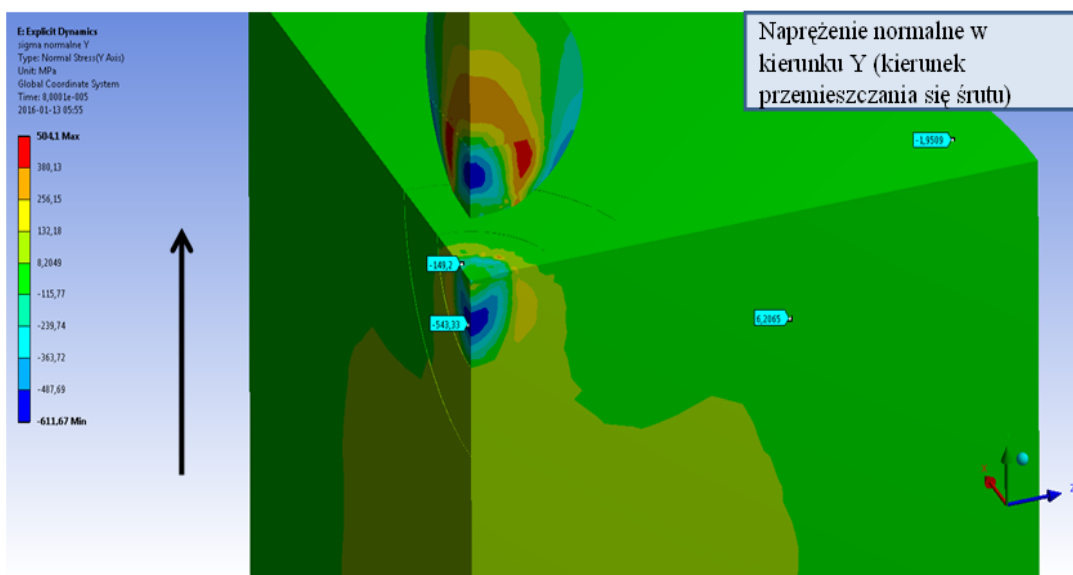
Rys. 67. Przykładowe wyniki analizy obliczeniowej, naprężenie normalne w kierunku Y (kierunek przemieszczania się śrutu) dla pojedynczego uderzenia śrutem.

Zestawienie średnich wartości naprężeń w materiałach zestawiono w postaci tabeli, są to wartości uśrednione dla serii wyników trzech analiz na poszczególnych poziomach powtórzeń krycia śrutem.

	Stal S235	Stal S355	Stal P460
1. uderzenie śrutem	$\sigma_a=150M$ Pa	$\sigma_a=310Mpa$	$\sigma_a=320MPa$
2. uderzenia śrutem	$\sigma_a=195M$ Pa	$\sigma_a=321MPa$	$\sigma_a=350MPa$
3. uderzenia śrutem	$\sigma_a=305M$ Pa	$\sigma_a=455Mpa$	$\sigma_a=460MPa$



Rys. 68. Przykładowe wyniki odkształceń materiału po procesie śrutowania w kierunku X.



Rys. 69. Przykładowe wyniki odkształceń materiału po procesie śrutowania w kierunku Y.

Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano iż proces śrutowania dynamicznego wprowadza do materiału naprężenia ściskające, które bezpośrednio wpływają

np. na trwałość zmęczeniową. Ponadto wielkość naprężeń własnych ma wpływ krotkość prowadzenia procesu śrutowania. W w przypadku stali S355 wartość naprężeń własnych po trzykrotnej obróbce strumieniowej wynosiła około 455 MPa, natomiast w przypadku stali S235 305 MPa. Wartości naprężeń własnych obliczonych na podstawie analizy numerycznej są w porównaniu do wyników eksperymentalnych o około 30% niższe.

9. Podsumowanie i wnioski

W pracy został poruszony problem trwałości zmęczeniowej materiałów poddanych procesowi śrutowania rozproszonego śrutem twardym kulistym. Celem pracy było zbadanie wpływu parametrów śrutowania na zmianę trwałości zmęczeniowej trzech gatunków stali powszechnie stosowanych w przemyśle. Praca została poparta obszernym przeglądem literatury krajowej oraz światowej naukowców poruszających się w obrębie tego zagadnienia. Niniejsze opracowanie zostało wzbogacone badaniami własnymi. Materiał wyjściowy, jak i materiał po obróbce strumieniowego umacniania powierzchniowego został poddany testom zmęczeniowym, a następnie przeprowadzona została analiza metalograficzna przełomów oraz analiza zmian strukturalnych po przeprowadzeniu procesu śrutowania. W badaniach zmęczeniowych przebadano prawie 200 próbek wykonanych zgodnie z obowiązującymi normami, o takich samych geometriach, aby umożliwić tym samym odniesienie do siebie uzyskanych wyników. Próbki zostały wykonane w jednym zakładzie, z jednego elementu blachy, przez tych samych fachowców, co również miało wpływ na jakość wykonanych próbek. W badaniach pomiaru naprężeń własnych wykorzystano metodę trepanacyjną z wykorzystaniem ślepego odwiertu. Jest to metoda precyzyjna, nie wymagająca wysokich nakładów finansowych, która z powodzeniem może być wykonana bezpośrednio w miejscu użytkowania gotowego elementu, nie generująca wysokich kosztów jej przeprowadzania. Na podstawie przeprowadzonych badań zmęczeniowych i metalograficznych uzyskano szereg wniosków, które zostały ujęte i przybliżone w niniejszym rozdziale.

Z przeprowadzonych badań wynika, iż zastosowanie metody krycia śrutem rozproszonym twardym ma korzystny wpływ na zwiększenie wytrzymałości materiału rodzimego.

Kulowanie powoduje zaleganie naprężeń ściskających w materiale, które mogą równoważyć stan naprężeń rozciągających powstałych na skutek np. procesu spawania. Zwiększenie się grubości warstwy wpływu procesu śrutowania pod powierzchnią materiału jest wprost proporcjonalne do intensywności stosowanego procesu oraz do zastosowanej twardości materiału utwardzającego.

Proces dynamicznego krycia śrutem stali S355J2+N może być z powodzeniem stosowany do elementów konstrukcyjnych narażonych na dużą intensywność drgań tj. elementów zawieszonych, osi, wałów.

Proces kulowania wprowadza naprężenia ściskające w obszarze warstwy wierzchniej materiału, powodując znaczne podwyższenie jego własności zmęczeniowej.

Proces krycia śrutem twardym kulistym z powodzeniem może być stosowany do stali niskich klas, prowadzi on do podwyższenia trwałości zmęczeniowej, a także utwardzenia warstwy wierzchniej, zabezpieczając ją przed ścieraniem.

Śrutowanie strumieniowe w przypadku wszystkich przebadanych gatunków stali miało korzystny wpływ w przypadku niskiej liczby cykli oraz dla pojedynczego krycia śrutem. Zarówno dla stali niskich klas S235 oraz S355, a także P460 odnotowano przyrost trwałości zmęczeniowej w odniesieniu do materiału wyjściowego. W przypadku kolejnych cykli krycia śrutem oraz przyrostu trwałości zmęczeniowej dla wysokiej liczby cykli znaczący przyrost trwałości zmęczeniowej odnotowano tylko dla stali S235 oraz P460.

Po przeprowadzeniu testów zmęczeniowych materiałów poddanych jedno, dwu i trzykrotnemu kulowaniu, a także po dokładnej analizie przełomów zauważono iż wszystkie materiały po jedno i dwu cyklach kulowania pękają w identyczny sposób w części przewężonej próbki, jednakże po trzykrotnym kulowaniu w przypadku stali p 460 zaobserwowano iż pęka ona równocześnie zarówno w górnej jak i w dolnej części przewężonej próbki. zjawisko to pojawiało się w materiale po przekroczeniu jednego miliona cykli.

Proces śrutowania rozproszonego śrutem twardym w procesie otwartym może być wykorzystany do krycia elementów wielkogabarytowych o skomplikowanej budowie i geometrii bezpośrednio w miejscu ich użytkowania. Instalacja do krycia śrutem może być wykorzystana do krycia śrutem twardym, jak i miękkim, dogładzającym powierzchnię, co ma wpływ bezpośrednio na obniżenie kosztów procesu oraz wytwarzanie elementów. Wykorzystanie procesu śrutowania nadaje także odpowiednią chropowatość powierzchni materiałowej, a to ma znaczenie w trakcie nakładania powłok antykorozyjnych na materiał.

Na bazie otrzymanych danych materiałowych po przeprowadzeniu testów zmęczeniowych oraz zglądów metalograficznych przystąpiono do zamodelowania samego procesu śrutowania. Model ma jak najdokładniej opisać i odtworzyć proces uderzenia śrutem w powierzchnie materiału. Model w swoim opisie zawiera deformację związaną z odkształceniami plastycznymi zarówno materiału umacnianego jak i samego śrutu kulistego. Z przeprowadzonej analizy modelu można wysnuć następujące wnioski:

- Na wielkość naprężeń własnych ma wpływ krotność prowadzenia procesu kulowania. W przypadku stali S355 wartość naprężeń własnych po trzykrotnej

obróbce kulowania wynosiła około 455 MPa, natomiast w przypadku stali S235 305 MPa.

- Wartości naprężeń własnych obliczonych na podstawie analizy numerycznej są w porównaniu do wyników eksperymentalnych o około 30% niższe.
- Uśrednione wartości testów numerycznych stanowią bazę do dalszych prac mających na celu lepszego dopasowania wyników analiz numerycznych do wyników badań.
- Proces krycia śrutem może powodować wzrost chropowatości. Również poprzez zastosowanie drobnego miękkiego śrutu technologia śrutowania (szkiełkowania) może z powodzeniem mieć zastosowanie przy dogładzaniu czy polerowaniu powierzchni materiałowej. Proces dogładzania w tej technologii nie wpływa na zmniejszenie lub ściągnięcie warstwy materiału z zalegającymi naprężeniami wstępnymi, w odróżnieniu do szlifowania czy dogładzania mechanicznego.

10. Literatura

- [1] Al-Obaid Y.: Shot peening mechanics: Experimental and theoretical analysis, *Mechanics of Materials* 1995.19, ss. 251–260.
- [2] Andziak J.: Strumieniowo-Ścierne przygotowanie podłoży stalowych przed nanoszeniem powłok ochronnych zagadnienia techniczne i normalizacyjne, *Symposium Instytutu Mechaniki Precyzyjnej Hajnówka 2001*
- [3] Andziak J.: Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej metodą kulowania–Prace Instytutu Mechaniki Precyzyjnej Zeszyt 15/88.
- [4] Arasimowicz A., Piekarski R.: Pomiar naprężeń własnych metodą usuwania warstw w technologicznych warstwach wierzchnich. *Postęp Nauki i Techniki* nr. 6. 2011.ss. 5-13.
- [5] Aszby M.F., Jones D.R.H.: *Materiały inżynierskie*. WNT, Warszawa 1995.ss. 139-150.
- [6] Bannantine J.A.: *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, 1 edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1989.
- [7] Baragetti S.: Shot peening optimization by means of ‘DOE’: Numerical simulation and choice of treatment parameters, *International Journal of Materials and Product Technology* 1997.12, 2-3, ss. 83–109.
- [8] Baragetti S.: Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction, *International Journal of Computer Applications in Technology* 2001.14, 1-3, ss. 51–63.
- [9] Baragetti S., Guagliano M. and Vergani L.: Numerical procedure for shot peening optimization by means of non-dimensional factors, *International Journal of Materials and Product Technology* 2000.15, 1, ss. 91–103.
- [10] Barrallier I. L. L., Lalanne B. and Castex L.: Cyclic modelling of the mechanical state produced by shot peening, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 2001. 24, 2, ss. 93–104.
- [11] Barsom J.M., Rolfe S.T., *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*, ASTM International, 1999.
- [12] Bąk Ł., Bucior M., Stachowicz F., Zielecki W. : The effect of Shot Peening on the Surface Topography and fatigue Strength of selected Sheets *Material Science Forum* ISSN:1662-9752 Vol. 818.pp.19-22 doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.818.19 2015 Trans Tech Publications Switzerland 15.05.2015.
- [13] Burdek M.: Wpływ rodzaju obróbki strumieniowo-ściernej na topografię powierzchni blach stalowych” *Prace IMŻ* 3 ss. 36-40 2012
- [14] Champagne J.: *Shot Peening Overview* (Metal Improvement Co) 2001.

- [15] Dang Van K., Cailletaud G., Flavenot J.F., Lieurade H.P.: Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading, in *Biaxial and Multiaxial Fatigue EGF 3*, Mechanical Engineering Publications, London, 1989, ss. 459-478.
- [16] Dang Van K., Maitournam M. H., On some recent trends in modelling of contact fatigue and wear in rail, *Wear*, no. 253, ss. 219-227, 2002.
- [17] Dang Van K., Papadopoulos I.V.: *High-cycle metal fatigue. From theory to applications*. Udine: Springer Wien New York, 1999.
- [18] Dattoma V., Giorgi M. D., Nobile, R.: Numerical evaluation of residual stress relaxation by cyclic load, *Journal of Strain Analysis* 2004 39, 6, ss. 663–672.
- [19] Delbos J.B., Kermouche G., Rech J., Hamdi H., Zahouani H.: Numerical modelling of fatigue crack's initiation in rolling contact of sintered steels, *Journal of Materials Processing Technology*, no. 164-165, ss. 1185-1191, 2005.
- [20] DeLitizia, A. T.: Influence of shot peening on residual stresses in spring steel plate, in *ICSP-2 (Chicago 1984)*, ss. 237–240.
- [21] Di Schino A., Kenny J. M.: Grain size dependence of the fatigue behaviour of a ultrafine-grained AISI 304 stainless steel, *Materials Letters* Jul, 2003, vol. 57, no. 21, ss. 3182–3185.
- [22] Dobrzański L.A., Hajduczek E., Marciniak J., Nowosielski R.: *Metaloznawstwo i obróbka cieplna materiałów narzędziowych*, WNT, Warszawa, 1990. ss.190-250.
- [23] Dobrzański L.A., Nowosielski R.: *Badania własności fizycznych materiałów* Warszawa: WNT 1987. ss.90-120.
- [24] Dobrzański L.A.: *Metalowe materiały inżynierskie. Wydanie I*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2004
- [25] Dorr T., Hilpert M., Beckmerhagen P., Kiefer A., Wagner, L.: Influence of shot peening on fatigue performance of high-strength aluminium and magnesium alloys, in *ICSP-7 (Warsaw, Poland 1999)*, ss. 153–160.
- [26] Dyląg Z., Orłóś Z.: *Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów*, Warszawa, WNT 1969
- [27] Dzierwa A.: *Wpływ nagniatania dynamicznego na wybrane właściwości elementów z powłokami chromowymi*, Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska 2007
- [28] Dzierwa A.: *Wpływ pneumokulowania na wytrzymałość zmęczeniową elementów z powłokami chromowanymi* Rzeszów 2004, no. 209, *Mechanics* 62, ss. 69-72
- [29] Eibella A., Rami V., Hogirala J.: *A sensitivity analysis of shot peening parameters*, Roma 2006 ss.130-136. .
- [30] Ekberg A., Sotkovszki P.: Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels, *International Journal of Fatigue* 2001, no. 23, ss. 29-43.
- [31] Ekberg A., Kabo E.: Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview, *Wear* 2001, no. 258, ss. 1288-1300.
- [32] Eltobgy M. S., Ng, E., Elbestawi M. A.: Three-dimensional elastoplastic finite element model for residual stresses in the shot peening process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 218, 2004. 11, ss. 1471–1481.
- [33] Fathallah R., Inglebert G., Castex, L.: Modelling of shot peening residual stresses and plastic deformation induced in metallic parts, in *ICSP-6 (San Francisco, USA1996)*, ss. 464–480.
- [34] Fathallah, R., Inglebert, G. and Castex, L. (1998). Prediction of plastic deformation and residual stresses induced in metallic parts by shot peening, *Materials Science and Technology* 14, 7, pp. 631–639.
- [35] Fedoryszyn A., Piosik T., Staszczak L., Zyzak P.: *Efekty obróbki powierzchniowej strumieniem śrutu*, XII Konferencja Odlewnicza Technical 2010, s.19-31

- [36] Ferjutz K., Davis J.R., ASM Handbook: Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering, 10th ed., ASM International, 1993
- [37] Fillargi G., Murphy T., Gabriely I.: Effect of Case Carburizing on Mechanical Properties And Fatigue Endurance Limits of P/M Steels 1999 ss.130-140
- [38] Gulejew A.P.: Metaloznawstwo. Katowice: WŚ. 1979.
- [39] Gulejew A.P.: Wprowadzenie do metaloznawstwa. Katowice: WŚ. 1988.
- [40] Guo Y.B., Barkey M.E.: FE-simulation of the effects of machining-induced residual stress profile on rolling contact of hard machined components, International Journal of Mechanical Sciences, 2004 no. 46, ss. 371-388.
- [41] Haimann R.: Metaloznawstwo. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1980.
- [42] Harish K., Sehjpal S., Perdee K.: Modified shot peening processes- a review International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, Volume 5, 2013 Apr, Issue 1: ss: 12-19 IJESSET ISSN: 2231- 6604
- [43] Hussian K., DE Los Rios R.R.: Microstructural effect on tensile and fatigue behaviour of C-Mn steel. Journal of Materials Science 32, 1997. ss. 3565-3569.
- [44] Jarvenpaa A., Karlainan L. P., Jaskari M., Effect of grain size on fatigue behavior of Type 301LN stainless steel, International Journal of Fatigue 2014 Aug. vol. 65, ss. 93–98.
- [45] Kabo E.: "Material defects In rolling contact fatigue – influence of overloads and defects clusters," International Journal of Fatigue, 2002 no. 24, ss. 887-894.
- [46] Kabo E., Ekberg A., "Fatigue initiation in railway wheels – a numerical study of the influence of defects," Wear, no. 253, ss. 26-34, 2002.
- [47] Kamiński S., Łagoda T., : Wpływ kulowania rozproszonego na trwałość zmęczeniową elementów konstrukcyjnych pojazdów Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Gliwice 2015 vol.88. ss.61-69
- [48] Kamiński S., Szymaniec M., Łagoda T., : The influence of the ferrite and pearlite grain size on the S-N fatigue characteristics of steel Solid State Phenomena Vol. 224. 2015. ss. 2-8.
- [49] Kamiński S., Szymaniec M., Łagoda T.,: Wpływ mikrostruktury na właściwości zmęczeniowe stali węglowych. Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno- Przyrodniczego 2014. maj ss. 38-41.
- [50] Owiński R., Kamiński S., Szymaniec M., Niesłony A., Łagoda T.: „Evaluation of fatigue life of steel Rusing steel grain size” Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik 10 (46) 2015. ss 1059-1067
- [51] Karolczuk A., Kluger K., Kowalski M., Żok F., Robak G.: Residual Stresses in Steel-Titanium Composite Manufactured by Explosive Welding, Materials Science Forum. 726 (2012) 125–132.
- [52] Karolczuk A., Kowalski M., Residual stress determination based on the hole drilling method in explosively welded bimetallic composite, materiały konferencyjne: Third International Conference on Material Modelling, Warszawa, 2013, 140.
- [53] Karolczuk A., Modelowanie mikrostruktury i jej wpływu na zmęczeniowe właściwości metali, materiały konferencyjne: XXIII Sympozjum Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji Bydgoszcz - Pieczyńska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Pieczyńska, 2010, 189–198.
- [54] Kirby R.S., Engineering in History, Reprint edition, Dover Publications, New York, 1990.
- [55] Klesnil M., Lukác P., Fatigue of Metallic Materials, Volume 71, Second Edition, 2 edition, Elsevier Science, Amsterdam; New York, 1992.

- [56] Kluger K, Łagoda T.: "Wpływ wartości średniej obciążenia na trwałość zmęczeniową w opisie energetycznym" *Wieloosiowe Zmęczenie Losowe elementów Maszyn i Konstrukcji- część XI Studia i Monografie z.203 Politechnika Opolska* 2007.
- [57] Kluger K., Łagoda T., Fatigue life of metallic material estimated according to selected models and load conditions, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 51 (2013) ss. 581–592.
- [58] Kluger K., Łagoda T., New energy model for fatigue life determination under multiaxial loading with different mean values, *International Journal of Fatigue*. 66 (2014) ss. 229–245.
- [59] Kocańda S., Kocańda D., "Faktografia. Badania mikrobudowy przełomów zmęczeniowych 128 w latach 1954-2004," *Przegląd Mechaniczny*, no. nr 1/2005, ss. 27-37.
- [60] Kocańda S., Szala J., *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*. Warszawa: PWN Warszawa, 1985.
- [61] Kocańda S., *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, 1997.
- [62] Korzekwa D.A., Lawson R.D., Matloch D.K., Krauss G.: *Scripta Met.*, vol. 14, 1980, ss.1023
- [63] Korzyński J.: Nakładanie powłok chromowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 1994, nr 124, *Mechanika*, z.41
- [64] Kurek M., Lagoda T., Katzy D., "Comparison of Fatigue Characteristics of some Selected Materials," *MP*, 2014 vol. 56, no. 2, ss. 92–95, Feb.
- [65] Lee Y.-L., Pan J., Hathaway R., Barkey M., *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*, 1 edition, Butterworth-Heinemann, Amsterdam; Boston, 2004.
- [66] Leghorn J. : The story of shot peening *A.S.N.E Journal* November 1957 pp.653-666.
- [67] Manson S.S., Halford G.R., *Fatigue and durability of structural materials*, ASM International, 2006.
- [68] Meguid S. A., Shagal G., Stranart J. C.: 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model, *International Journal of Impact Engineering* 2003. 27, ss. 119–134.
- [69] Meguid S. A., Shagal G., Stranart J. C., Daly, J.: Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot peening induced residual stresses, *Finite Elements in Analysis and Design* 1999. 31, 3, ss. 179–191.
- [70] *Metals Handbook.: Metallography, structures and phase diagrams*. ASM 1973.
- [71] Miller K.J., Some Recent Advances in Metal Fatigue: Understanding the Two Thresholds of Fatigue Behaviour, *Advances in Fracture Resistance and Structural Integrity*, Oxford, (1994) ss. 321–331.
- [72] Molenda R., Kuziak R.: metaloznawcze podstawy kształtowania struktury i właściwości blach ze stali DP w procesie ciągłego wyżarzania. część 2 *IMŻ* 2011
- [73] Mrzygłód M., Zieliński A.P.: Parametric structural optimization with respect to the multiaxial high-cycle fatigue criterion, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, no. 33, ss. 161-171, 2007.
- [74] Murakami Y., Miller K.J.: What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process, *International Journal of Fatigue*. 27 (2005) ss.991–1005.
- [75] Nakonieczny A.: *Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna - kulowanie*, Warszawa, Wydawnictwo IMP 2002
- [76] Nakonieczny, A. and Mońka, G.: Effect of shot peening on the fatigue strength of spring steel after exposure to corrosion, in *ICSP-9 (Paris, France 2005)*, ss. 448–453.
- [77] Nascimento M. P., Torres M.A.S., Voorwald H.J.C.: Effect of a shot peening pretreatment on the fatigue behaviour of hard chromium on electroless nickel

- interlayer coated AISI 4340 aeronautical steel, *Materials Research*, 2002, vol. 5, no.2, ss. 95-100
- [78] Nasiłowska B., Bogdanowicz Z., Józwiak P., Zasada D.: „Struktura, mikrotwardość i właściwości użytkowe połączeń spawanych wykonanych ze stali austenitycznej 1.4539 metodą TIG i wiązką lasera. XXV symposium Zmęczenie i Mechanika Pękania, 20-23 maja 2014, ss.25-29
- [79] Nasiłowska B., Bogdanowicz Z., Brzeziński M., Mońka G., Zasada D.: Wpływ kulowania na strukturę, mikrotwardość i naprężenia własne stali austenitycznej 1.4539 *Biuletyn VAT*. Vol. LXIV, Nr 2, 2015 ss. 103-110.
- [80] Nasiłowska B., Bogdanowicz Z., Brzeziński M., Mońka G., Zasada D.: Wpływ kulowania na strukturę, mikrotwardość i naprężenia własne stali austenitycznej 1.4539. *Biuletyn WaT* nr 2 2015 ss.103-110.
- [81] Niesłony A., Wachowski A., Niesłony A., Płociński T., Kurzydłowski K.J.: Testy zmęczeniowe i badania metalograficzne platerów stal-tytan, *Zeszyty Naukowe. Mechanika / Politechnika Opolska*. z. 101 (2013) ss.65–66.
- [82] Niku-Lari, A.: Shot peening, in *ICSP-1* (Paris 1981), ss. 1–21.
- [83] Ofsthun M.: When fatigue quality enhancers do not enhance fatigue quality, *International Journal of Fatigue* 2003. 25, ss. 1223–1228.
- [84] Oshwa M., Yonemura T.: Improvement of hardened surface by shot peening, in: *Conf. Proc. ICSP-4*, Tokyo, 1990, ss. 147-158
- [85] Owen D. and Feng Y: Parallelised finite/discrete element simulation of multi-fracturing solids and discrete systems, *Engineering Computations* 2004. 18, 3/4, ss. 557–576.
- [86] Peige S., Wang R., Jilai R., Li, X., Mei, Y.: Qualitative analysis about effect of shot peening on fatigue limit of 300M steel under the rotating bending condition, in *ICSP-6* (San Francisco, USA 1996), ss. 290–295.
- [87] Peric D., Han, K.: Multiscale modelling of complex particulate systems with applications, in *Multiscale Computational Mechanics for Material and Structures* (Cachan2002).ss. 998-1027.
- [88] Petit-Renaud F.: Optimization of the shot peening parameters, in *ICSP-8* (Garmisch-Partenkirchen, Germany 2002), ss. 119–129.
- [89] Pfeiffer W., Frey T.: Advances in shot peening of silicon nitride ceramics, in *ICSP-9* (Paris, France 2005), ss. 326–331.
- [90] Prowans ST.: *Materiałoznawstwo*, PWN, Warszawa, 1997
- [91] Ramnath V., Wiggs G.: Dace based probabilistic optimization of mechanical components, in *ASME Turbo Expo* (Barcelona, Spain 2005). ss.760 -789.
- [92] Ringsberg J. W., Skyttebol A., Josefson L.: Investigation of the rolling contact fatigue resistance of laser clad twin-disc specimens: FE simulation of laser cladding, grinding and a twin-disc test. *International Journal of Fatigue*, no. 27, ss. 702-714, 2005.
- [93] Ringsberg J.W., Loo-Morrey M., Josefson B.L., Kapoor A., Benon J.H.: Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue, *International Journal of Fatigue* 2000, no. 22, ss. 205-215.
- [94] Rios E. R. D. L., Trull M., Levers, A.: Modelling fatigue crack growth in shot-peened components of Al 2024-T351, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures* 2000. 23, 8, ss. 709–716.

- [95] Romanowicz P., Zieliński A. P., "Wieloosiowe zmęczenie elementów pracujących w warunkach kontaktu tocznego," *Acta Mechanica et Automatica*, 2009. no. vol.3 no.2, ss. 86-89.
- [96] Sanecki H., *Numeryczna analiza problemów kontaktu*. Kraków, 2009.
- [97] Schijve J., *Fatigue of Structures and Materials*, 2nd edition, Springer, New York, 2008. ss.1000-1024.
- [98] Schutz W.: Fatigue life improvement of high-strength materials by shot peening, in: *Conf. Proc. ICSP-1, Paris 1981*, ss. 423-434
- [99] Sedighi M., Honarposheh M.: Experimental study of through-depth residual stress in explosive welded Al-Cu-Al multilayer, *Materials & Design*. 37 (2012) ss. 577-581.
- [100] Sedighi M., Honarposheh M., Experimental study of through-depth residual stress in explosive welded Al-Cu-Al multilayer, *Materials & Design*. 37 (2012) ss. 577-581.
- [101] Semiatin S.L., *ASM Handbook: Volume 14B: Metal Working: Sheet Forming*, ASM International, 2006.
- [102] Skorupa M., *Empirical Trends and Prediction Models for Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading*. Petten: Netherlands Energy Research Foundation (ECN), 1996.
- [103] Skotnicova I., Razac M., Ozanova E., Hudecek L. : *Soundproofing of Track wick cover: Final Reports HS 229/702 Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava Faculty of Civil Engineering 2008*. ss. 180-190.
- [104] Steglinski M., Byczkowska P., Sawicki J., "Analiza numeryczna stanu naprężeń własnych stopu Al-Mg-Mn-Sc-Zr poddanego umocnieniu powierzchniowemu poprzez kulowanie „*Biuletyn WAT Vol.LXIV, nr 1, 2015*
- [105] Szymaniec M., Kamiński S., Łagoda T.: Trwałość zmęczeniowa wybranych stali konstrukcyjnych, *Mechanika 2014 z. 103, 351/2014*, ss. 183-184.
- [106] Szyk M., Bartosik P., Kukielka L.: Analiza możliwości sterowania rozkładem naprężeń wykonanych w warstwie wierzchniej zęba kultywatora po kulowaniu w aspekcie wytrzymałości zmęczeniowej *Inżynieria Rolnicza 9(118)/2009* ss.7-14.
- [107] TENSI H.M., HOGERL J.: *Metallographische Gefügeuntersuchungen zur Qualitätssicherung von AlSi- Gusbauteilen*. *Metallwissenschaft und Technik*, 1994, nr 10, ss.776-781.
- [108] Totten G.E., Funatani K., Xie L.: *Handbook of Metallurgical Process Design*, CRC Press, 2004.
- [109] Totten G.E., Howes M.A.H., Inoue T., *Handbook of residual stress and deformation of steel*, ASM International, Materials Park, OH, 2002
- [110] Totten G.E., Howes M.A.H., Inoue T., *Handbook of residual stress and deformation of steel*, ASM International, Materials Park, OH, 2002.
- [111] Walczak J.: *Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności Tom I*. Warszawa: PWN, 1977.
- [112] Walczak J., *Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości I plastyczności. Tom II*. Kraków, 1978.
- [113] Wójcik A.: *Badania porównawcze trwałości zmęczeniowej chromowanych powłok po nagniataniu dynamicznym*, II Konferencja Naukowo-Techniczna Warszawa 2001, ss. 231-237
- [114] Wyrzykowski J.W., Pleszkowe E., Sieniawski J.: *Odkształcenie i pękanie metali*. WNT Warszawa 1999.
- [115] Xu J., Zhang G. P.: Effects of grain size and initial immobile dislocation density on fatigue behavior of polycrystalline metals, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 590, Jan. 2014. ss. 194-198.

- [116] Zaskórski J.: Przyspieszone badania zmęczeniowe ładowarek kołowych, Przegląd Mechaniczny, no. nr 9/1974, ss. 297-302.
- [117] Zielecki W., Korzyńska K.: Pneumokulowanie jako metoda umacniania zakładkowych połączeń klejonych. Problemy Nauk Stosowanych, 2016, Tom 4, ss. 079 – 084
- [118] Zima R., Karwala K.: Kształtowanie jakości technologicznej elementów zestawów kołowych za pomocą kulowania. Problemy Eksploatacji 2-2007 s.43-54.
- [119] Zyzak P.: Analiza wpływu parametrów strumienia śrutu na jakość powierzchni oczyszczonych odlewów. Praca doktorska. Wydział Odlewnictwa AGH. Kraków, 2010.

Normy:

- [120] PN-EN 10028-3: 2005 Wyroby płaskie na urządzenia ciśnieniowe. Część 3: Stale spawalne drobnoziarniste normalizowane
- [121] PN-EN 10025-1: 2005 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.
- [122] PN-EN 10028-3: 2005 Wyroby płaskie na urządzenia ciśnieniowe. Część 3: Stale spawalne drobnoziarniste normalizowane
- [123] SAE (2006a). Peening media general Requirements-AMS 2431, .
- [124] SAE (2006b). Peening media general Requirements-AMS 2432, .
- [125] SAE (2009). Peening media general Requirements-AMS 2430, .
- [126] ASBY M.F.: Phil. Mag., Vol. 21 1970, 399
- [127] ASM INTERNATIONAL, Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, Chapter 14 Fatigue, Material Park, Ohio, USA 2008
- [128] PN-EN ISO 11124-3:2000 Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów-Wymagania techniczne dotyczące metalowych ścierniw stosowanych w obróbce strumieniowo-ściernej Kulisty i ostrokątny śrut z wysokowęglowego staliwa
- [129] PN-EN 10025-1: 2005 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.
- [130] PN-EN 10028-3: 2005 Wyroby płaskie na urządzenia ciśnieniowe. Część 3: Stale spawalne drobnoziarniste normalizowane.
- [131] BN- 80/1062-01- Kulowanie. Wytyczne obróbki.
- [132] PN-EN ISO 4287- Opisano terminy, definicje i parametry służące do określania struktury geometrycznej powierzchni (chropowatości, falistości i profilu pierwotnego) metodą profilową
- [133] PN-EN 10002-1:2004 Metale - Próba rozciągania Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia, Polski Komitet Normalizacyjny, 2004.
- [134] ASTM A264-03- nakładanie powłok niklowych na materiały stalowe
- [135] EN ISO 6892-1 2009- Określono sposób badania wytrzymałości na rozciąganie metali i zdefiniowano własności wyznaczane w temperaturze pokojowej. Podano kształt i wymiary próbek do badań. Określono zasadę metody, dokładność aparatury badawczej, warunki badania, określanie podstawowych własności oraz raport z badań.
- [136] PN-ISO 8501- Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów
- [137] ASTM A263-03- Standard specification for stainless chromium steel

- [138] ASTM E-837-08 - Standard test method for determining residual stresses by the hole drilling strain gauge method, (2008).
- [139] PN-EN ISO 8503-1- Określenie i Podanie definicje wzorców ISO profilu powierzchni dla oceny powierzchni po obróbce strumieniowo-ścierniej.
- [140] PN-ISO 8501-1 - Prace przygotowawcze podłoża stalowego przed dalszym zabezpieczeniem decydują o trwałości metalu.
- [141] PN-ISO 8501-1/Ad1- Prace przygotowawcze podłoża stalowego przed dalszym zabezpieczeniem decydują o trwałości metalu, obróbka strumieniowa
- [142] PN-ISO 8501-2- Przygotowanie podłoża do procesów antykorozyjnych, obróbka mechaniczna, strumieniowa.
- [143] PN-85/M-04254 Struktura geometryczna powierzchni po procesie krycia śrutem

Strony WWW :

- [144] <http://unitexprodukcja.com.pl/p,44,uslugi/p,229,srutowanie-powierzchni-stalowych.html>
- [145] <http://www.konstrukcjestalowe.info/wymiary-geometryczne-hali-stalowej-zelbetowej.php>
- [146] <http://www.zampap.pl/galeria-wyrobow.html>
- [147] http://www.mazurmaszyny.pl/maszyny_do_obrob
- [148] <http://ervinamasteel.eu/pol/shipyards/>
- [149] <http://microscope.huvitz.com/>

Streszczenie

Praca swoją tematyką obejmuje zjawiska dynamicznego nagniatania warstwy wierzchniej materiału w celu zmiany jej własności wytrzymałościowych pod wpływem obciążenia momentem zginającym. Głównym celem pracy była identyfikacja właściwości zmęczeniowych materiałów gładkich i po poddaniu kolejnym cyklom krycia śrutem. Materiałami poddanymi badaniom były powszechnie stosowane w przemyśle stale S235, S355 oraz P460. Uzyskane trwałości zmęczeniowe wykorzystano do zbudowania charakterystyk zmęczeniowych materiałów gładkich oraz po przeprowadzeniu kolejnych faz procesu.

W części teoretycznej zaprezentowano przegląd literatury, dotyczący zjawiska zmęczenia materiałów śrutowanych z podziałem na zarys historyczny technologii, opis mechanizmu krycia śrutem i zastosowanie materiałów po przeprowadzeniu powyższej obróbki w przemyśle. Przybliżano również podstawowe pojęcia związane ze zmęczeniem materiałów konstrukcyjnych. Przegląd literaturowy zaprezentowany w pracy podzielono na dwa obszary: ogólny – kierunki rozwoju technologicznego i badań materiałów po obróbkach ściernych oraz szczegółowy – ograniczony do publikacji podejmujących tematykę zmęczenia materiałów kulowanych.

W części badawczej zaprezentowano eksperymentalną charakterystykę właściwości mechanicznych i metalograficznych materiałów obrabianych śrutem rozproszonym z uwzględnieniem właściwości materiałów bazowych przed kryciem śrutem twardym rozproszonym. Badania eksperymentalne podzielono na dwa podrozdziały. W pierwszym z nich zaprezentowano wyniki prób działania momentem zginającym, które pokazały wpływ prowadzenia kolejnych powtórzeń krycia śrutem. Wyniki testów zmęczeniowych uzupełniono o obserwacje mikrostruktury uzyskanych przełomów, okolic warstwy umocnionej i powierzchni próbek. W drugim podrozdziale przedstawiono pomiar naprężeń własnych metodą trepanacyjną według zaleceń TML i ASTM. Wyniki obliczeń wykazały

niejednorodny stan naprężeń własnych oraz pozwoliły na określenie wpływu parametrów procesu krycia śrutem twardym na kierunek działania naprężeń własnych w materiałach poddanych kulowaniu rozproszonym śrutem twardym. Podsumowanie przeprowadzonych badań i obserwacji zaprezentowano w ostatnim rozdziale, gdzie wskazano możliwe przyczyny występowania pęknięć materiałów, a także cykliczne osłabienie materiału po procesie krycia śrutem.

Summary

This work on the subject includes the phenomenon of dynamic burnishing of the surface layer of the material to change its strength properties under the influence of bending moment load. The main purpose of the work was to identify the fatigue properties of smooth materials and after subsequent shear coating cycles. The materials under test were commonly used in the S235, S355 and P460 steady industries. The fatigue life obtained was used to build the fatigue characteristics of smooth materials and after the subsequent phases of the process.

In the theoretical part, a review of the literature on fatigue of shot blasted materials with a breakdown of the history of technology, a description of the shot blasting mechanism and the use of materials after the above treatment in industry were presented. The basic concepts related to fatigue of construction materials were also discussed. Literature review presented in the paper is divided into two areas: general - directions of technological development and research of abrasive materials and detailed - limited to publications dealing with the subject of fatigue of spherical materials.

The experimental part presents the characteristics of mechanical properties and metallographic materials treated with diffusible shot blasting, taking into account the properties of the base materials before coating the hard-spun spread. Experimental research is divided into two subsections. In the first one, the results of the bending moment test were presented, which showed the effect of the subsequent mating operations. The results of the fatigue tests were supplemented by observations of the microstructure of the breakthroughs obtained, the vicinity of the reinforced layer and the surface of the samples. In the second section, the measurement of stresses according to the trepanation method according to TML and ASTM recommendations is presented. The results of the calculations showed a non-homogeneous state of the internal stress and allowed to determine the influence of the hard shell mating process parameters on the direction of the stresses in the materials subjected to the scattered hard shot. A summary of the studies and observations is presented in the last

chapter, which outlines the possible causes of material cracks, as well as the cyclical weakening of the material after the pelleting process.