

Dr inż. Anna Bień

AUTOREFERAT

NA TEMAT ZAINTERESOWAŃ I OSIĄGNIĘĆ W PRACY NAUKOWO - BADAWCZEJ, DYDAKTYCZNEJ I ORGANIZACYJNEJ

Spis zawartości

- 1. Prezentacja informacji ogólnych dotyczących habilitanta**
(posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania, tytuł rozprawy doktorskiej i nazwiska osób, które pełniły funkcje promotora i recenzentów, informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych)
 - 1.1. Informacja o wykształceniu i zatrudnieniu**
 - 1.2. Ogólna charakterystyka aktywności zawodowej**
 - 1.3. Ogólna charakterystyka osiągnięć, dorobku i zainteresowań naukowych**
- 2. Wskazanie i prezentacja osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, nr 65, poz.595 ze zm.)**
 - A) Tytuł osiągnięcia naukowego**
 - B) Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**
- 3. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych, wnioskodawcy, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta oraz stanowiących wkład w Dzielnicę Nauk Technicznych w ramach dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn.**

1. Prezentacja informacji ogólnych dotyczących habilitanta (posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania, tytuł rozprawy doktorskiej i nazwiska osób, które pełniły funkcje promotora i recenzentów, informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych)

1.1. Informacja o wykształceniu i zatrudnieniu

W roku 1979 r. po odbyciu studiów stacjonarnych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej w Instytucie Mechaniki, obroniłam pracę magisterską pt. *Projekt uniwersalnego znacznika z pneumatycznym cyfrowym układem sterowania*”, której promotorem był dr inż. Franciszek Siemieniako (obecnie prof. dr hab. inż.) i uzyskałam tytuł *magistra inżyniera mechanika* w zakresie specjalności *technologia maszyn*, w Politechnice Białostockiej w Białymstoku.

Następnie we wrześniu 1979 r. zatrudniłam się na stanowisku konstruktora-technologa w biurze projektowo-technologicznym zakładów „UNITRA-UNIMA” w Olsztynie, produkującym obrabiarki (zgrzewarki, frezarki sterowane numerycznie i inne).

W 1981 r. za porozumieniem stron, rozpoczęłam pracę na stanowisku st. asystenta w Instytucie Technologii Maszyn na Wydziale Mechanicznym Akademii Rolniczo -Technicznej w Olsztynie.

W roku 1981 r. rozpoczęłam studia podyplomowe dla nauczycieli akademickich na Akademii Rolniczo -Technicznej w Olsztynie, w kierunku pedagogicznym, które ukończyłam w 1982 r. z wynikiem dobrym.

W latach 1983-89 r., pracując w zespole, w Instytucie Technologii, wykonywałam badania naukowe i ekspertyzy zlecane przez zakłady przemysłowe.

W roku 1984 r. podjęłam roczne studia podyplomowe w kierunku „Materiałoznawstwo”, na Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie, które ukończyłam w 1985 r. z wynikiem bardzo dobrym.

Otrzymałam w 1985 r. tytuł rzeczoznawcy Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP) w zakresie dwóch specjalności „Materiałoznawstwo”, oraz „Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna” .

W czerwcu 1990 r. w oparciu o dysertację doktorską pt. *Badania wpływu nagniatania elektromechanicznego na wybrane właściwości warstwy wierzchniej części maszyn*, którą przedstawiłam i obroniłam na Politechnice Gdańskiej w Gdańsku, został nadany mi uchwałą Rady Wydziału Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji Politechniki Gdańskiej stopień doktora nauk technicznych w zakresie Budowy i Eksploatacji Maszyn.

Pan Prof. Dr inż. Włodzimierz Przybylski był promotorem mojej dysertacji doktorskiej. Recenzentami pracy był Pan prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Zaczek, oraz doc. dr hab. inż. Zbigniew Królikowski.

Z dniem 1 października 1990 r. zostałam mianowana na stanowisko adiunkta w Instytucie Technologii Maszyn na Akademii Rolniczo –Technicznej w Olsztynie.

Po przepracowaniu na stanowisku adiunkta 14 lat (w tym dwa roczne urlopy zdrowotne), zwróciłam się do Pana Rektora o przemianowanie mnie na stanowisko asystenta, na którym pracuję od czerwca 2005 roku, do chwili obecnej.

W ramach restrukturyzacji w okresie mojej pracy na Uczelni, zmieniały się nazwy jednostek, jak również zmieniła się nazwa Uczelni na Uniwersytet Warmińsko – Mazurski w Olsztynie. Aktualnie jestem pracownikiem Katedry Technologii Materiałów i Maszyn, Wydziału Nauk Technicznych, Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie.

1.2. Ogólna charakterystyka aktywności zawodowej

Cała moja dotychczasowa **aktywność naukowo-badawcza** oraz **publikacyjna** wiąże się z problematyką **modyfikacji warstwy wierzchniej materiału przy pomocy różnych technologii – konwencjonalnych i niekonwencjonalnych, w tym technologii laserowych.**

Od 1995 roku, po zakupieniu przez uczelnię lasera molekularnego CO₂, a od 2011 roku po nabyciu lasera Nd: YAG opiekuję się pracownikami laserowymi, wykonując jednocześnie eksperymenty w ramach badań własnych, publikując wyniki badań. Opracowuję technologie dla przemysłu po zdobyciu patentu na laserową blokadę propagacji pęknięć zmęczeniowych, prowadzę prace przejściowe technologiczne, prace dyplomowe oraz Studenckie Koło Naukowe Technik Laserowych, zapoznając młodych ludzi z technikami laserowymi.

Działalność w praktyce gospodarczej – **współpraca z przemysłem w zakresie wykonywania ekspertyz, wdrożeń, patentów, uczestnictwo w praktykach przemysłowych** - koncentruje się w zakresie tej tematyki. Poprzez całą swoją aktywność zawodową **łączę zainteresowania naukowe z praktyką gospodarczą, praktycznym zastosowaniem technologii, najnowszymi trendami jej rozwoju** w aspekcie gospodarki światowej. Taki model aktywności zawodowej był moim świadomym wyborem, a jego konsekwencją jest **wzajemne oddziaływanie, wzajemne inspiracje obu form – nauki i praktyki, uzupełnianie się myśli, idei, trendów naukowych i przemysłowych, uwzględnianie w badaniach naukowych potrzeb rozwiązań problematyki przemysłowej.**

Szczególnością tych dwóch kierunków działań, nauki i praktyki, jest moja działalność dydaktyczna i popularyzatorska, którą prowadzę w ramach wykładów i ćwiczeń na różnych szczeblach studiów, w ramach kół naukowych, prac przejściowych i dyplomowych. **Ważnym elementem** mojej aktywności zawodowej jest **działalność promotorska**, obejmująca wypromowanie ponad 50 prac magisterskich i inżynierskich, eksperymentalnych, ściśle związanych z praktyką przemysłową. Należy podkreślić, że moi dyplomanci w większości zatrudniają się na uczelniach, jako pracownicy naukowcy i robią karierę naukową, lub znajdują pracę w przemyśle jako dobrzy specjaliści; sprawdzają się również na wysokich stanowiskach kierowniczych i też są spoiwem do współpracy pomiędzy Uczelnią a przemysłem. Szczególnie dobrze się sprawdza moja forma aktywności zawodowej jako **Opiekuna naukowego Studenckich kół naukowych**, prowadzonych przez lata; jest szczególnym wyrazem dobrych relacji z młodzieżą – jak i akceptacją formy prowadzonych zajęć w ramach Kół Naukowych (Technologów, Technik laserowych) – zapoznanie z tajnikami technologii, wyjazdy zagraniczne (Niemcy, Belgia, Holandia, Francja), referaty na sympozjach, rywalizacja o najlepsze miejsca - i obopólna satysfakcja.

Moje zaangażowanie na rzecz społeczności akademickiej nie ogranicza się do formy naukowo-badawczej, popularyzatorskiej, promotorskiej, opiekuna naukowego czy opiekuna roku.

W latach dziewięćdziesiątych i dwutysięcznych byłam wielokrotnym opiekunem studenckich praktyk krajowych i zagranicznych, obozów zagranicznych kół naukowych.

Sprawowałam społeczną funkcję sekretarza Akademickiej Spółdzielni Mieszkaniowej. Po zawiązaniu produkcyjnej Spółki Akcyjnej na Uczelni pełniłam funkcję sekretarza. Organizowałam od podstaw – począwszy od pomysłu do wykonania - studia podyplomowe na macierzystej Uczelni. Ostatnio, żeby wspomóc szkoły wiejskie, udzielałam się dydaktycznie w „Uniwersytecie Dzieci”. Działam na rzecz promocji Uczelni uczestnicząc w warsztatach i wystawach w ramach stowarzyszenia - Akademicka Rezerwa Twórcza, realizując jednocześnie swoje hobby w zakresie malarstwa.

1.3. Ogólna charakterystyka osiągnięć, dorobku, zainteresowań naukowych oraz wkładu w Dziedzinę Nauk Technicznych w ramach dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn

Mój dotychczasowy dorobek naukowo - badawczy obejmuje łącznie 87 publikacji, w tym 40 opracowań dla przemysłu. Są to prace o charakterze monograficznym, artykuły opublikowane w polskich i zagranicznych czasopismach naukowych, wydawnictwach uczelnianych, materiałach konferencji międzynarodowych i krajowych. Dorobek jest wewnętrznie spójny, obszary zainteresowań oraz dociekań naukowych skupiają się wokół zagadnień inżynierii materiałowej, oraz budowy i eksploatacji maszyn.

Na mój dorobek naukowo – badawczy można spojrzeć z dwóch perspektyw:

a) Przedmiot zainteresowań i dociekań naukowych.

Od początku mojej pracy naukowo-badawczej wyraźnie zostały określone obszary oraz problematyka moich dociekań naukowych w ramach dyscypliny **Budowa i Eksploatacja Maszyn**. Moje zainteresowania naukowe koncentrują się na mikrostrukturze materiałów metalowych i technologiach powodujących jej zmiany, które wpływają na polepszenie własności użytkowych. Moja dwuletnia praca w zakładzie przemysłowym produkującym obrabiarki, na stanowisku konstruktora - technologa, tuż po obronie pracy magisterskiej, była wskaźnikiem do ukierunkowania moich zainteresowań. W ciągu dwuletniego okresu pracy w przemyśle uświadomiłam sobie, jak ważne są własności materiału, z którego wykonuje się części maszyn, jak ważne są obróbki cieplna, cieplno - plastyczna i in., będące technikami polepszającymi własności użytkowe części maszyn, a w szczególności warstwy wierzchniej, z powodu wad i niedoskonałości której szacowanych jest ponad 90% awarii.

Moje dalsze działania, związane z postanowieniem wniesienia „cegielki” w tej dziedzinie, w tym zatrudnienie się na Uczelni w Zakładzie zajmującym się problemami materiałowymi i

ściśle współpracującym z przemysłem, były kolejnym krokiem do realizacji celu naukowo – badawczego.

a) Etapy rozwoju naukowego.

Mój dorobek naukowo – badawczy obejmuje dwa wyodrębnione etapy rozwoju naukowego, w ramach których zmieniał się akcent kładziony na obszar dociekań naukowych: z ogólnego obszaru technologii polepszających własności użytkowe materiałów moje zainteresowania skupiły się na technologiach laserowych, rozpowszechnianych w Polsce w latach dziewięćdziesiątych, wraz ze sprowadzaniem przez zakłady przemysłowe urządzeń laserowych.

Pierwszy etap to lata 1979-90r. - jest on wyznaczony przez kilka istotnych w mojej karierze naukowej wydarzeń, mianowicie:

- uzyskanie w 1979r. tytułu *magistra inżyniera mechanika*;
- zdobycie doświadczenia (1979-1981r.), praca na stanowisku konstruktora-technologa w biurze projektowo-technologicznym zakładów „UNITRA- UNIMA” w Olsztynie;
- zatrudnienie w 1981r. w Akademii rolniczo –technicznej w Olsztynie;
- ukończenie rocznych studiów podyplomowych w 1985r. w kierunku „*Materiałoznawstwo*”, na Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie;
- uzyskanie w 1985 r. tytułu rzeczoznawcy Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP) w zakresie specjalności „*Materiałoznawstwo*”, oraz „*Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna*”.
- praca w zespole latach 1983-89 r. wykonującym badania naukowe i ekspertyzy zlecane przez zakłady przemysłowe.
- nadanie w 1990 r. stopnia doktora nauk technicznych w zakresie Budowy i Eksploatacji Maszyn, w oparciu o dysertację doktorską pt. *Badania wpływu nagniatania elektromechanicznego na wybrane właściwości warstwy wierzchniej części maszyn*, obronioną na Politechnice Gdańskiej w Gdańsku.

Pierwszy etap rozwoju naukowego to poszerzenie wiedzy naukowej w zakresie *Inżynierii Materiałowej, Budowy i Eksploatacji Maszyn*, oraz publikacje w powiązaniu z praktyką przemysłową.

Dругi etap rozwoju naukowego, to okres po uzyskaniu tytułu doktora do dzisiaj

Obszar zainteresowań naukowych w tym okresie, na którym koncentruje się moja uwaga i aktywność naukowa, to technologie laserowe, a w szczególności ich wpływ na *konstituowanie własności warstwy wierzchniej materiału*. W początkowym etapie zainteresowań tą technologią, prowadziłam badania w oparciu o urządzenia laserowe takich ośrodków jak PAN w Gdańsku, Warszawie, oraz Laboratorium laserowe na Politechnice Świętokrzyskiej. Po zakupieniu lasera molekularnego CO₂ WB o mocy 1,75 kW przez moją Uczelnię w 1995 r., urządzeniu laboratorium laserowego i powierzeniu mi opieki nad urządzeniem laserowym i laboratorium, rozpoczęłam badania nad oddziaływaniem wiązki laserowej na materiał (stale, ceramika) w szerokim zakresie: badania statutowe, projekt badawczy, koło naukowe, prace dyplomowe, prace przejściowe były wykonywane w

laboratorium pod moim nadzorem. Poznałam „tajniki” urządzenia laserowego, metody programowania wiązki laserowej i wpływ jej oddziaływania na materiał. W wyniku prowadzonych różnych eksperymentów, pojawiły się publikacje, ekspertyzy naukowe, wdrożenie technologii do przemysłu, patent wskazujący na możliwość wydłużenia okresu trwałości zmęczeniowej stali po obróbce laserowej.

Analizowane zmiany w materiale zachodzące podczas naświetlania laserowego przedstawiłam w licznych publikacjach, poprzedzających napisanie monografii.

Ponieważ oddziaływanie wiązki laserowej na warstwę wierzchnią materiału, niezależnie od rodzaju lasera, trybu jego pracy i mocy, należy traktować jako punktowe źródło energii działające na mikroobszar powierzchni, a oddziaływanie punktowego źródła energii na warstwę wierzchnią było analizowane w procesie nagniatania elektromechanicznego części maszyn, na przykładzie wybranych gatunków stali (Bień, praca doktorska 1990, Politechnika Gdańska) – przeniesienie badań na inne punktowe źródło energii, pozwoliło na wykreowanie pewnych różnic i podobieństw w obu technologiach. Optymalizowano wówczas parametry obróbki elektromechanicznej celem wytworzenia warstw o możliwie dużych twardościach i grubościach, na bazie posiadanego oprzyrządowania oraz badano zmiany mikrostruktury materiału w warstwie wierzchniej. Powstało kilka prac z tego zakresu, dotyczących możliwości sterowania twardością i grubością warstwy wierzchniej różnych gatunków stali (Zimny, Bień, 1989), (Przybylski, Bień 1990), (Bień, Przybylski, 1991), (Bień, Nakonieczny 1994), w tym stali sprężynowych (Bień, Dutka, 1995). Badano też efekty oddziaływania strumienia plazmy na materiał, jako punktowego źródła ciepła lub nośnika roztopionego materiału (Bień, Nakonieczny 1994), (Nakonieczny, Bień, 1994). Prowadzone eksperymenty dotyczące oddziaływań wiązki laserowej na materiał, pozwoliły na pewne spostrzeżenia, dotyczące wspólnych cech obróbki laserowej i elektromechanicznej (Bień, 1994), czyli możliwości uzyskania podobnych rozkładów mikrotwardości i mikrostruktur w pewnym zakresie parametrów.

Badania prowadzone w okresie 1995 - 2003, dotyczyły wyłącznie obróbki laserowej i wielu jej aspektów, stosownie do możliwości posiadanego urządzenia laserowego na bazie CO₂, o mocy 1750 W i możliwości wariantów pracy ciągłej i impulsowej. Analizowano warunki obróbki mające na celu ukonstytuowanie warstwy wierzchniej materiału o wysokim stopniu jednorodności (Bień, 1996). Oprócz parametrów wiązki laserowej analizie poddano wpływ charakterystyki trajektorii i kształtu przekroju wiązki (Bień, 1997-1998 projekt badawczy), (Bień, 1998). Optymalizowano jednorodność warstwy wierzchniej pod względem twardości i mikrostruktury, uzyskano zależności matematyczne opisujące powiązania charakterystyki wiązki laserowej oraz parametrów obróbki z wybranymi właściwościami materiału. Warstwę wierzchnią stali w gatunku 21H12NMFA zmodyfikowano w wyniku wielokrotnego przejścia wiązki laserowej. Poddano ocenie jednorodności metodą elektromagnetyczną i wykonano komputerową rekonstrukcję obrazów warstw wierzchnich (Bień, 1997, 1999). Prowadzono również badania nad laserowym utwardzaniem stali metodą stopowania (Bień, 1999, 2000). Uzyskano funkcję opisującą proces optymalizacji stopowania laserowego stali, pokrytych galwanicznie warstwą chromu (Bień, 2000). Poddano analizie zależności pomiędzy warunkami obróbki laserowej a grubością warstwy utwardzonej oraz uzyskaną chropowatością (Bień, 2003).

Otrzymano interesujące wyniki, opisujące chropowatość powierzchni w funkcji parametrów wiązki laserowej. Stwierdzono zwiększenie gładkości powierzchni z jednoczesnym utwardzeniem wraz z przetopieniem, po wielokrotnym nagraniu wiązką laserową powierzchni walcowych stali 34HGS (Bień, 2003). Optymalizowano rozkład mikrostruktury w warstwie wierzchniej stosując wielokrotne przetapianie w ograniczonej objętości materiału (Bień, 2003) - uzyskano strukturę warstwy wierzchniej materiału, składającą się z drobno dyspersyjnych obszarów, amorficznych jak i kryształów słupkowych. Badano naprężenia metodą rentgenowską z wykorzystaniem urządzenia japońskiej firmy RIGAKU w warstwie wierzchniej zmodyfikowanej laserowo.(Bień, 2003). Tworzono modele i przeprowadzano obliczenia pól temperatury i naprężeń, przy różnych wariantach obróbki laserowej w zakresie nie przekraczającym temperatury topnienia materiału, w celu konfrontacji wyników obliczeń z eksperymentalnymi pomiarami właściwości materiału (Bień, 2003, Bień i inni, 2003). Uzyskane wyniki w postaci modeli były bardzo pomocne w interpretacji zjawisk fizycznych zachodzących w materiale, w badanym zakresie temperaturowym. Przeanalizowano możliwość połączenia metod analitycznych i numerycznych z metodami eksperymentalnymi, dla analitycznego opisu grubości warstwy przetopionej, w procesie laserowego hartowania stali. Rozważano wpływ mocy wiązki laserowej o modzie TEM_{10} lasera CO_2 i prędkości jej przesuwu na głębokość przetopienia materiału. Proponowana metoda pozwoliła na ograniczenie liczby doświadczeń do niezbędnego minimum, umożliwiając korektę wyników obliczeń. Konieczność korekty wynikła z trudności dokładnego określenia wprowadzanego do obliczeń współczynnika absorpcji powierzchni, mającego duży wpływ na wartości temperatury w warstwie wierzchniej materiału. Otrzymano dobrą zgodność obliczeń z wynikami doświadczeń, co potwierdza przydatność metody elementów skończonych (MES) do modelowania procesów laserowej obróbki powierzchni (Bień, 2004).

Obliczono rozkłady temperatur w próbce na ścieżce wiązki laserowej oraz przy punktowym jej oddziaływaniu. Uwzględniono różne mody poprzeczne wiązki oraz ciągłą i impulsową pracę lasera. Wykonano obliczenia naprężeń termicznych w materiale (Bień, Osiński, 2004). Badano makro- i mikroskopowo struktury i wykonano pomiary mikrotwardości warstwy wierzchniej próbek ze stali do ulepszania cieplnego 50H, poddane laserowemu utwardzaniu. Na podstawie badań rentgenowskich przeprowadzonych na dyfraktometrach DRON-4 i Seifert XRD 3003 określono parametry sieci krystalograficznej i ilościową zawartość poszczególnych faz, oraz co interesujące, wykazano występowanie chromitu tworzącego się w warstwie przetopionej laserowo (Bień, 2008). Opisano zależność prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych da/dN w funkcji szeregu parametrów materiałowych i obciążeniowych, wykorzystując program NASGRO. W szczególności zobrazowano wpływ poszczególnych parametrów na przebieg i możliwości dopasowania równania do danych doświadczalnych (Kłysz, Bień, 2008). Zastosowane równanie NASGRO posiada dużą elastyczność w opisie złożonych przebiegów doświadczalnych i aktualnie jest uznawane za najlepiej opisujące zależność $da/dN = f(\Delta K)$. (Kłysz, Bień, 2008). Prowadzono próby wykorzystania efektu utwardzenia warstwy wierzchniej próbek stalowych przy pomocy wiązki laserowej do zablokowania rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Stwierdzono, że wiązka

laserowa wywołująca utwardzenie na poziomie 1200÷1400 HV_{0,1} w strefie czoła propagującego pęknięcia może spowodować jego blokadę całkowitą lub przejściową (Bień, Kłysz, 2008).

Prowadzono też badania nad procesem cięcia stali wiązką laserową. Celem pracy było określenie parametrów cięcia laserowego w obszarze małych prędkości, zapewniających możliwie dobrą jakość powierzchni w płaszczyźnie cięcia. Stosowanie małych prędkości cięcia pozwoliło na pokazanie wyraźnych różnic w procesie spalania przy powierzchni i w głębszych warstwach materiału podczas cięcia laserowego stali węglowej z użyciem tlenu. Jakość cięcia oceniano na podstawie liczby powstałych prążków regularnych, jak i chropowatości mierzonej w obszarze prążków regularnych.. Przeprowadzono optymalizację jakości krawędzi cięcia z zastosowaniem rachunku różniczkowego i programów komputerowych (Bień, 2011), (Bień, Żarnowski, 2011), (Bień, Piela, 2010).

W latach 2008÷2012 prowadzono badania nad procesem generacji długich impulsów wiązki lasera CO₂, oraz efektami ich oddziaływań na materiał. Rozważania prowadzono w aspekcie zjawisk towarzyszących oddziaływaniu wiązki laserowej na stal C80U, jak i powstałych w tym procesie zmian materiałowych. Eksperymentalnie potwierdzono cykliczny proces generacji plazmy wywołany długimi impulsami laserowymi, stosując rejestrację zjawisk szybką kamerą oraz spektrometrem. Wykazano, że wielkość generowanego obłoku plazmy wzrasta wraz ze wzrostem długości impulsu laserowego. Zmiany materiałowe w warstwie wierzchniej badanej próbki udokumentowano przy pomocy zdjęć fotograficznych. naświetlanej ścieżki na stali, jak i pomiarów mikrotwardości w wybranych obszarach na przekroju poprzecznym ścieżki. Wykonano też obserwacje mikrostruktur na mikroskopie elektronowym, na bazie cienkich folii pobranych z różnych obszarów przekroju ścieżki laserowej. Stwierdzono występowanie dość nietypowych mikrostruktur, potwierdzających oddziaływanie energii cieplnej i towarzyszących jej sił zewnętrznych. Hipotetycznie stwierdzono, iż proces zapłonu plazmy w tych warunkach może być związany z koncentracją energii laserowej w początkowej fazie generacji długiego impulsu.

Uwieńczeniem wyników eksperymentów nad wpływem technologii laserowej w kształtowaniu warstwy wierzchniej części maszyn, było:

- **pozyskanie w 2012 roku patentu** (nr 212181), opisującego metodykę obróbki laserowej powodującej „blokadę propagacji pęknięć zmęczeniowych”;

- **wydanie w 2013 roku monografii** pt.: Laserowa modyfikacja warstwy wierzchniej materiału i jej wpływ na propagację pęknięć zmęczeniowych w aspekcie mikrostrukturalnym, analizującej wpływ obróbki laserowej na wybrane właściwości warstwy wierzchniej części maszyn, a w szczególności wpływ zmian mikrostrukturalnych powodujących występowanie zjawiska „blokadę propagacji pęknięć zmęczeniowych” (Recenzenci: Prof. dr hab. inż. Robert Sobiecki, Politechnika Warszawska, Inżynieria Materiałowa; Prof. dr hab. inż. Zdzisław Bogdanowicz, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny)

- **opublikowanie w 2016 roku artykułu:** Influence of laser processing of the low alloy medium carbon structural steel on the development of the fatigue crack w czasopiśmie

Surface and Coatings Technology, opisującego specyfikę blokady propagacji pęknięć zmęczeniowych w aspekcie naprężeń wywołanych obróbką laserową.

Wyniki eksperymentu, przeprowadzonego na próbkach znormalizowanych, opisane w monografii, zostały potwierdzone poprzez opracowanie technologii blokującej powstawanie pęknięć zmęczeniowych dla części maszyny lotniczej, w wyniku której uzyskano wzrost wytrzymałości zmęczeniowej tej części (ciągło) o tysiąc lądowań ponad ustalony resurs (2014-2016). Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej ciągła, spowodowanej wprowadzeniem naprężeń poprzez obróbkę laserową – jak wykazały badania – są w trakcie opisywania w artykule pt: „Analysis of the causes of increasing the fatigue strength of the chassis plane as a result of laser processing, przygotowywanym do druku. Drugi aspekt badań nad obróbką laserową stali, wyszczególniony w monografii (s. 35), dotyczący generacji plazmy laserowej, został przedstawiony w artykule „Surface treatment of C80U steel by long CO 2 laser pulses” na łamach czasopisma Journal of Materials Processing Technology (2014).

Szczegółowa charakterystyka rozwoju naukowego, wskazanie osiągnięcia naukowego, celu prowadzonych badań, osiągniętych wyników i możliwości ich ewentualnego zastosowania - na podstawie dorobku naukowego została zaprezentowana w kolejnej części autoreferatu.

2. Wskazanie i prezentacja osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, nr 65, poz.595 ze zm.)

A) Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięcie naukowe, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, nr 65, poz.595 ze zm.) zatytułowane: „*Badania wpływu obróbki laserowej na wybrane właściwości warstwy wierzchniej części maszyn*”: stanowi:

1. Dzieło opublikowane w całości:

Monografia (rozprawa habilitacyjna – dzieło, zasadnicza część osiągnięcia naukowego)
Bień A., 2013, Laserowa modyfikacja warstwy wierzchniej materiału i jej wpływ na propagację pęknięć zmęczeniowych w aspekcie mikrostrukturalnym, Olsztyn,
Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, s. 160 s., praca rec., Seria: Rozprawy i Monografie - Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, 1509-3018 ; nr 189, p-ISBN: 978-83-7299-829-3. *(praca stanowi analizę wpływu obróbki laserowej na wybrane właściwości warstwy wierzchniej, a w szczególności wyjaśnia w aspekcie analizy mikrostrukturalnej wpływ obróbki laserowej na blokadę rozprzestrzeniania się pęknięć zmęczeniowych, wykazanej w wyniku badań zmęczeniowych w patencie nr 212181),*

2. Oryginalne osiągnięcie technologiczne w formie patentu (w trakcie procedury wdrożeniowej)

Bień A., Kłysz S., 2012, Metoda blokady propagacji pęknięć zmęczeniowych. Numer patentu/prawa ochronnego: 212181, Kod kraju: PL, data ogłoszenia udzielenia patentu: 2012.08.31 WUP 08/12, Uprawniony z patentu: Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie., Pierwszy autor, udział autora: 50% , *(praca wykonana na podstawie wyników badań zmęczeniowych próbek obrobionych laserowo, wykazuje występowanie blokady generacji pęknięć zmęczeniowych)*.

3. Oryginalne osiągnięcie w formie publikacji: Marek Szkodo, Anna Bień, 2016, Influence of laser processing of the low alloy medium carbon structural steel on the development of the fatigue crack – (*opracowanie wykazuje możliwość zatrzymania pęknięć zmęczeniowych, opisanych w patencie (2) jak i monografii (1) na podstawie przeprowadzonych badań stanu naprężeń własnych wywołanych obróbką laserową*). Surface and Coatings Technology, s. 117-123 ; p-ISSN: 0257-8972, Czasopismo umieszczone na Liście Filadelfijskiej, wskaźnik Impact Factor ISI: 2.139, **Udział autora: 50%, *(opracowanie wykazuje możliwość zatrzymania pęknięć zmęczeniowych, opisanych w patencie (2) jak i monografii (1) na podstawie przeprowadzonych badań stanu naprężeń własnych wywołanych obróbką laserową)*.**

Najważniejszą częścią osiągnięcia naukowego jest monografia habilitacyjna, która wraz z wymienionym patentem i artykułem stanowi poszerzoną analizę problematyki.

B) Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Cel naukowy osiągnięcia naukowego „*Badania wpływu obróbki laserowej na wybrane właściwości warstwy wierzchniej części maszyn*”:

- a) analiza możliwości obróbki laserowej na kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej, oraz badanie ukonstytuowanych właściwości warstwy wierzchniej;**
- b) wyselekcjonowanie parametrów obróbki laserowej kształtującą warstwę wierzchnią blokującą pęknięcia zmęczeniowe;**
- c) analiza mikrostruktur i stanu wygenerowanych naprężeń szczątkowych mających wpływ na blokadę propagacji pęknięć zmęczeniowych.**

Istotność celu: kształtowanie warstwy wierzchniej części maszyn jest istotne, ponieważ ponad 90% uszkodzeń części maszyn generuje się na powierzchni i w warstwie wierzchniej, ponadto obróbka laserowa może znacząco wpłynąć na polepszenie właściwości warstwy wierzchniej.

Cel badań osiągnięto poprzez analizę problematyki opartą na wynikach badań doświadczalnych, w monografii habilitacyjnej i publikacjach wchodzących w skład osiągnięcia naukowego, co niniejszym zostało przedstawione .

1. **Monografia habilitacyjna** pod tytułem: ” *Laserowa modyfikacja warstwy wierzchniej materiału i jej wpływ na propagację pęknięć zmęczeniowych w aspekcie mikrostrukturalnym*” , (praca recenzowana: Prof. dr hab. Inż. Robert Sobiecki PW, IM; Prof. dr hab. Inż. Zdzisław Bogdanowicz, WAT, WM)

stanowi analizę wpływu obróbki laserowej na wybrane właściwości warstwy wierzchniej , a w szczególności wyjaśnia w aspekcie analizy mikrostrukturalnej wpływ obróbki laserowej na blokadę rozprzestrzeniania się pęknięć zmęczeniowych, wykazanej w wyniku badań zmęczeniowych i opisaną w patencie nr 212181),

Cel naukowy i zakres pracy

Celem pracy było zbadanie znaczenia ilości energii wiązki laserowej, i jej rozkładu przestrzenno - czasowego w impulsie, na kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej materiału, a następnie określenie w aspekcie mikrostrukturalnym wpływu ukonstytuowanych właściwości na rozprzestrzenianie się pęknięć zmęczeniowych w wybranym gatunku stali do ulepszania cieplnego.

Cel badań realizowano dwuetapowo.

Pierwszy etap badań zakładał wyselekcjonowanie obszarów zmienności parametrów obróbki laserowej stali, konstytuujących mikrostrukturę stali o wysokiej mikrotwardości z minimalnym ubytkiem materiału, oraz mikrostrukturę o możliwie wysokiej mikrotwardości - bez względu na ubytek materiału. Wytworzenie twardych struktur zawierających jednorodne stabilne dyslokacje o dużej gęstości, opisanie powiązania zależnością funkcyjną otrzymanych wyników z parametrami obróbki. Wyjaśnienie wpływu energii laserowej dostarczonej do mikroobszaru na zmianę mikrostruktury i niektórych właściwości warstwy wierzchniej materiału, oraz sformułowanie wytycznych do kolejnego etapu badań. Badaniom zostały poddane gatunki stali C80U, C60U, 30HGS.

Do realizacji celu pierwszego etapu badań, badań wstępnych, wykorzystano metodykę badań opartą na planowaniu eksperymentu oraz programy komputerowe do opisu matematycznego otrzymanych efektów. Merytoryczne uzasadnienie otrzymanych wyników wspomagano obliczeniami rozkładu energii w wiązce laserowej, oraz analizą przebiegu procesu nagrzewania laserowego i reakcji materiału na impulsy laserowe, z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Materiałem badawczym w pierwszym etapie była stal narzędziowa węglowa oraz stal niskostopowa do ulepszania cieplnego.

Celem drugiego etapu pracy (badań zasadniczych, aplikacyjnych) było wyjaśnienie, w aspekcie materiałowym, przyczyn spowalniania prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych, stali obrobionej laserowo z zastosowaniem parametrów z obszaru wyselekcjonowanego w pierwszym etapie badań.

Przedmiotem analizy materiałowej w badaniach zasadniczych były próbki RCT- **Rotate Compact Tension** obrobione laserowo po uwzględnieniu parametrów obróbki laserowej, z obszaru wskazanego w badaniach wstępnych, wykonane ze stali 30HGSNA (opisane w patencie: Bień, Kłysz, 2012) zerwane statycznie po wykonaniu ośmiomilionowego cyklu badań zmęczeniowych.

Zakres badań aplikacyjnych obejmował wykonanie pomiarów mikrotwardości, oraz analizy materiałowej poszczególnych obszarów ścieżek laserowych zerwanych próbek, z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej. Przeprowadzenie analizy uzyskanych zmian mikrostrukturalnych w aspekcie hipotetycznego ich wpływu na spowalnianie propagacji pęknięć zmęczeniowych. Sformułowanie wniosków z przeprowadzonej analizy i wskazania do dalszych badań nad wpływem energii laserowej na kształtowanie właściwości materiału.

1.1. Istotne osiągnięcia szczątkowe pierwszego etapu badań

- a) Określono wpływ parametrów impulsowej obróbki laserowej (mocy wiązki laserowej, czasu oddziaływania serii impulsów laserowych oraz odległości powierzchni próbki od ogniska soczewki – tabela 1) na rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej stali C80U (C60 U, 30HGS).

Wyniki przedstawiono graficznie (rys. 1), oraz opisano funkcją w postaci wielomianu drugiego stopnia z interakcjami (1), przy współczynniku korelacji wielokrotnej $R = 0,863$. Wartości współczynników przy poszczególnych członach równania (1), wyrażone wektorem A ($a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$), obliczono przy zastosowaniu programu Math CAD (2). $Y(x)$ -zmienna zależna -

$$Y(x) := a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_1 \cdot x_2 + a_5 \cdot x_1 \cdot x_3 + a_6 \cdot x_2 \cdot x_3 + a_7 \cdot x_1^2 + a_8 \cdot x_2^2 + a_9 \cdot x_3^2$$

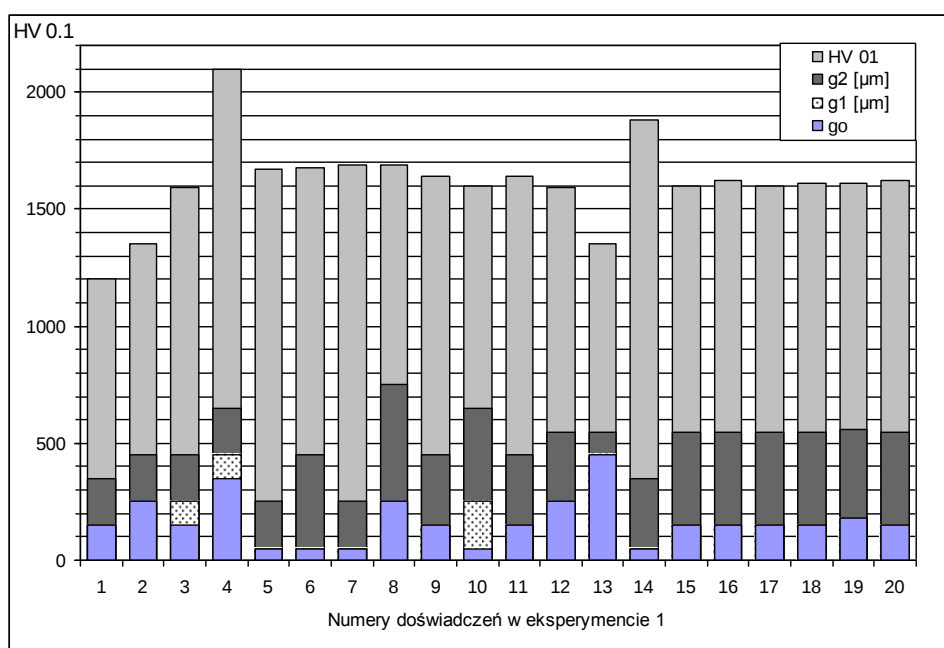
(1)

A ($1,6 \times 10^3$; 38,271; 72,649; 107,302; 51,25; -76,25; -161,25; -0,109; 5,193; -3,644).

Tabela 1. Poziomy zmienności badanych parametrów wejściowych naświetlania laserowego
Table 1. Variations in the analyzed input parameters of laser radiation

Zmienne niezależne Independent variables Poziomy zmienności Level of variation	(X1) t [s]	(X2) P [W]	(X3) L [mm] 7,8"/3,8"
1.682	1.030	1720	65/31
1	0.900	1550	55/26
0	0.700	1300	40/19
-1	0.500	1050	25/12
-1.682	0.370	880	15/7

Największą mikrotwardość 2100 HV_{0,1} (nietypową dla tego gatunku stali) uzyskano dla parametrów obróbki $t = 0,900s$; $P=1550W$ ($P/\pi r^2=387W/mm^2$, $r=1,13mm$), $L=12mm$, natomiast **największy ubytek materiału** od powierzchni dla parametrów obróbki (próbka nr 13) $t = 0,700s$; $P=1300W$ ($P/\pi r^2= 896,5 W/mm^2$, $r=0,68 mm$), $L=7mm$), **najmniejszy ubytek materiału, ok. 50 μm oraz mikrotwardość 1880 HV_{0,1}** uzyskano dla parametrów obróbki $t = 0,700s$; $P=1300W$ ($P/\pi r^2=49 W/mm^2$, $r=2,92mm$), $L=31mm$ (rys.1).



Rys.1. Wyniki pomiarów mikrotwardości na przekroju próbek. Skala na osi pionowej jest odpowiednikiem jednostek HV i wskazuje wartości mikrotwardości w obszarach (pierścieniach) oznaczonych przez g2, jednocześnie skalą w μm , pokazującą ich położenie względem powierzchni i grubość (wg. monografii),
g₀-ubytek materiału, g₁- obszar o mikrotwardości 450 - 600 HV_{0,1}

Dla celów porównawczych identyczny eksperyment przeprowadzono ~~identyczny eksperyment~~ na próbkach ze stali C60U oraz stali 30HGS. Odpowiedniki próbek wykazywały mikrotwardość około 200 HV_{0,1} niższą w przypadku stali C60U, oraz 300 HV_{0,1} niższą w przypadku stali 30HGSN (grant uczelniany, niepublikowany).

- b) Określono wpływ ilości energii laserowej dostarczonej do mikroobszaru na zmianę mikrostruktury i niektórych właściwości warstwy wierzchniej materiału.**

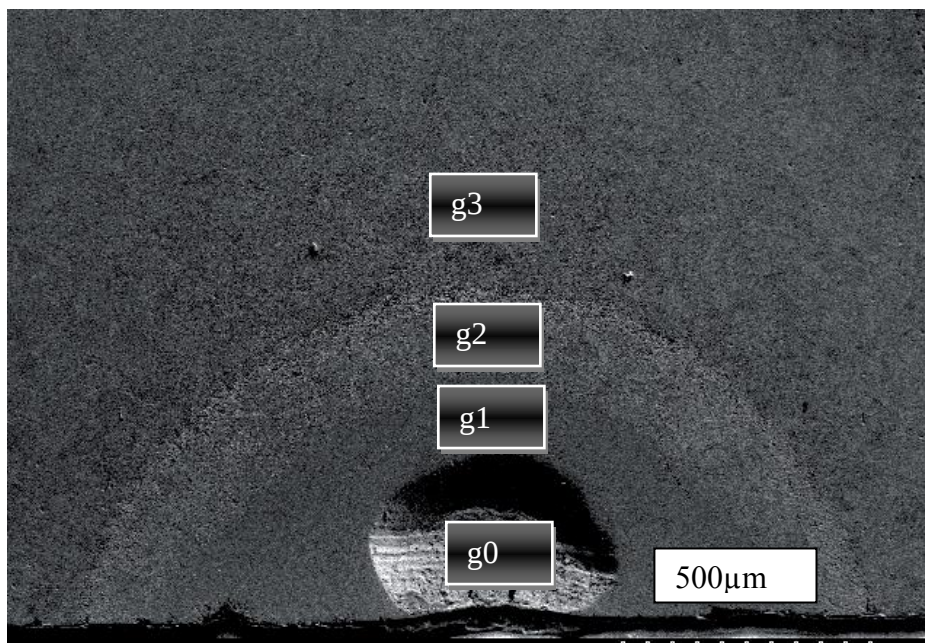
Mikrostrukturę na przekroju wybranych próbek przedstawiono na rysunkach. Kulisty kształt krateru (rys.2) mógł być wynikiem oddziaływania rozprężających się par materiału, które mogły powstać przy gęstości mocy rzędu $(0,45 \div 0,9) \times 10^6 \text{ W/cm}^2$. Utwardzony pierścień graniczący z kraterem powstał w procesie przemian w stanie stałym oraz od ciśnienia wywołanego rozprężającymi się parami w obrębie powstałego krateru.

Zdjęcia z mikroskopu TEM mikrostruktur próbki z obszaru o największej mikrotwardości i strefy przejściowej na rys.3 i 4, przedstawiające płytki martenzytu całkowicie wewnętrznie zbliźnionego, fragmenty nie całkowicie rozpuszczonych płytek cementytu oraz pola gęsto ułożonych dyslokacji wyjaśniają przyczyny uzyskanych wysokich mikrotwardości.

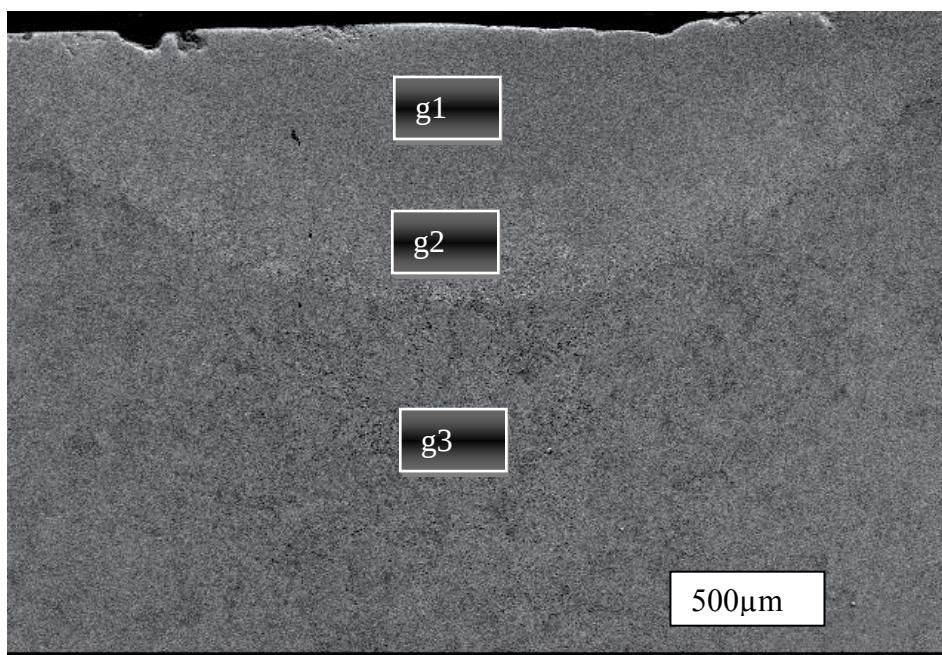
Analizując przyczyny występowania wysokich mikrotwardości w stali C80U, której mikrotwardość po konwencjonalnej obróbce cieplnej na ogół nie przekracza wartości 1000 HV_{0,1}, należy sądzić, że mikrotwardość 2100 HV_{0,1} pewnych fragmentów obszaru, na który oddziaływała impulsowa wiązka laserowa uzyskuje się dzięki złożonej „mikrokompozytowej” strukturze, w skład której wchodzi częściowo rozpuszczone płytki cementytu - które stanowią dodatkową blokadę poślizgu w procesie odkształcania oraz silnie rozdrobniony, wewnętrznie zbliźniony martenzyt płytkowy.

Powstawaniu takiej struktury może sprzyjać bardzo duża szybkość nagrzewania, powodująca powstawanie wielkiej liczby zarodków i z tym związane duże rozdrobnienie ziarna, oraz krótki czas trwania impulsu cieplnego powtarzającego się cyklicznie, który nie zdąży całkowicie rozpuścić płytek martenzytu.

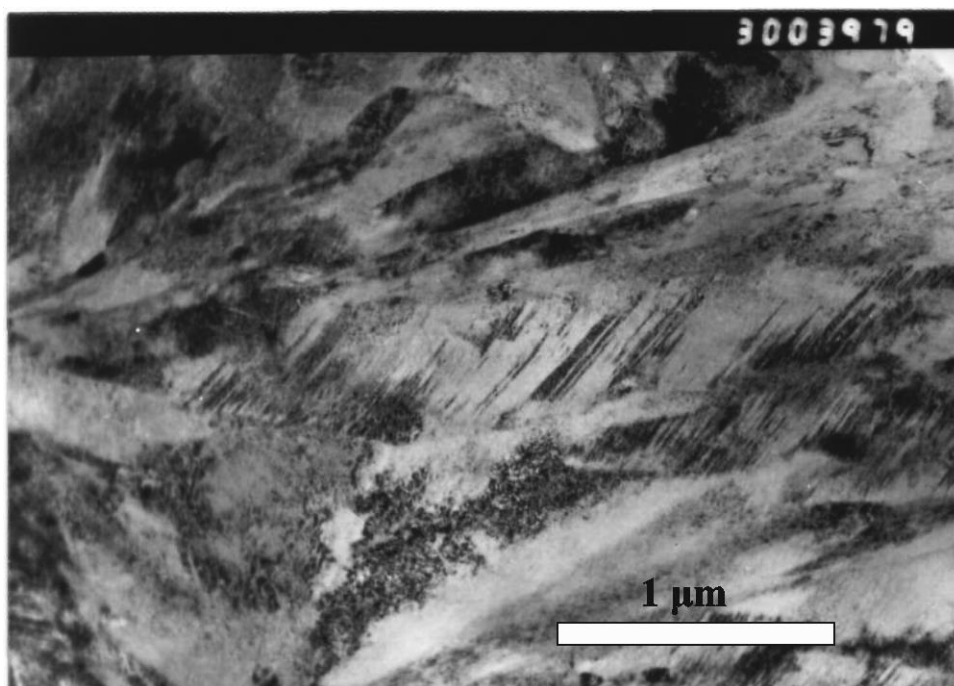
Omawiana mikrostruktura pierścienia utwardzonego, jak i warstwy przejściowej, powstawała w wyniku cyklicznych oddziaływań impulsów laserowych. Impulsy te przy odpowiednich parametrach mogły powodować gwałtowne odparowanie materiału. Rozprężająca się para generowała falę ciśnień wywołaną energią odrzutu, która z kolei przechodząc przez materiał traciła swoją energię wywołując powstawanie i wędrówkę dyslokacji. Należy też wziąć pod uwagę fakt, że przemiana martenzytyczna, zachodząca w mikroobszarze, napotyka opór w postaci materiału rodzimego, nienagrzanego do temperatury austenitzowania, który stanowił barierę podczas wzrostu objętości przy tworzeniu się martenzytu, i był kolejnym czynnikiem, powodującym powstawanie bardzo mocno zbliźnionego martenzytu i dyslokacji w obszarze utwardzonego pierścienia.



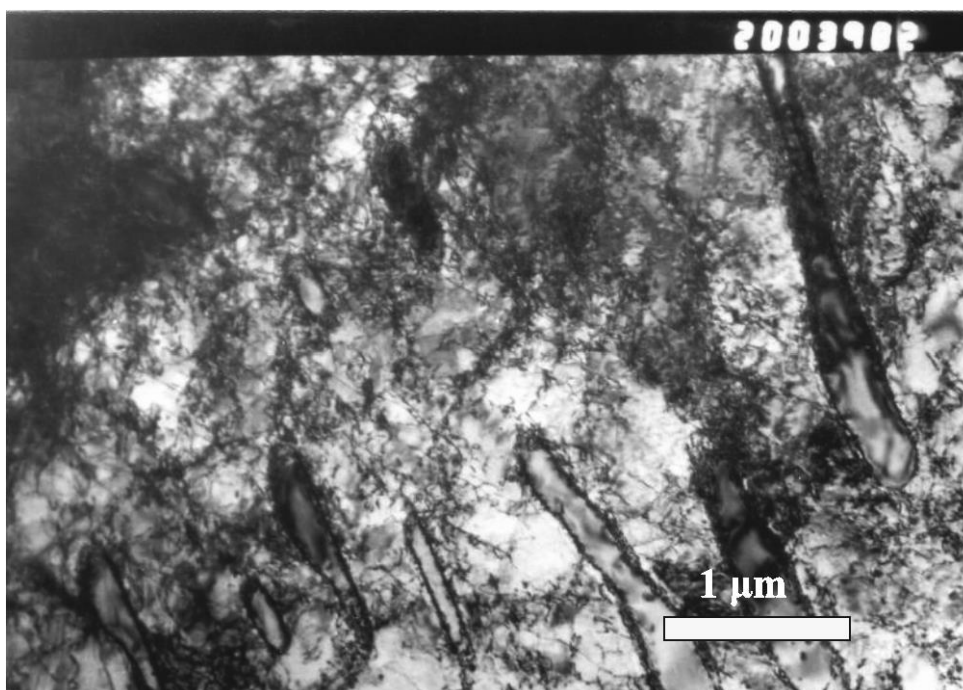
Rys. 2. Mikrostruktura próbki z doświadczenia 13. Oznaczenia: *g0* – ubytek materiału, krater, *g1* – strefa w otoczeniu krateru, *g2* – pierścień utwardzonego materiału, *g3* – materiał rodzimy próbki



Rys. 3. Mikrostruktura obszaru o zmienionej mikrotwardości próbki 4:
g1 – obszar przypowierzchniowy w kształcie fragmentu koła, *g2* – obszar w kształcie pierścienia,
g3 – obszar rdzenia



Rys.4. Mikrostruktura z obszaru (g_2) próbki nr 4, powiększenie 30 000 x
 Fig. 4. Microstructure of area (g_2) in specimen No. 4, 30 000x magnification

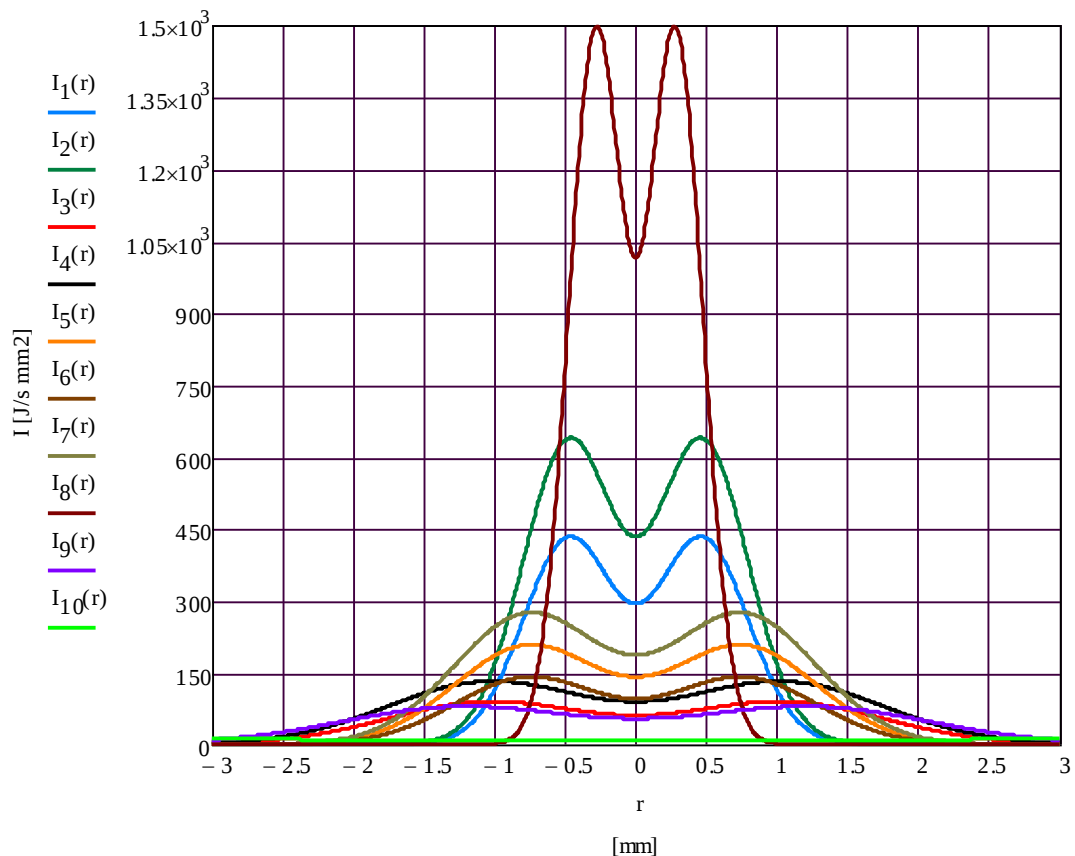


Rys. 5. Mikrostruktura strefy przejściowej z obszaru utwardzonego (g_2) w kierunku obszaru rdzenia (3) próbki nr 4.

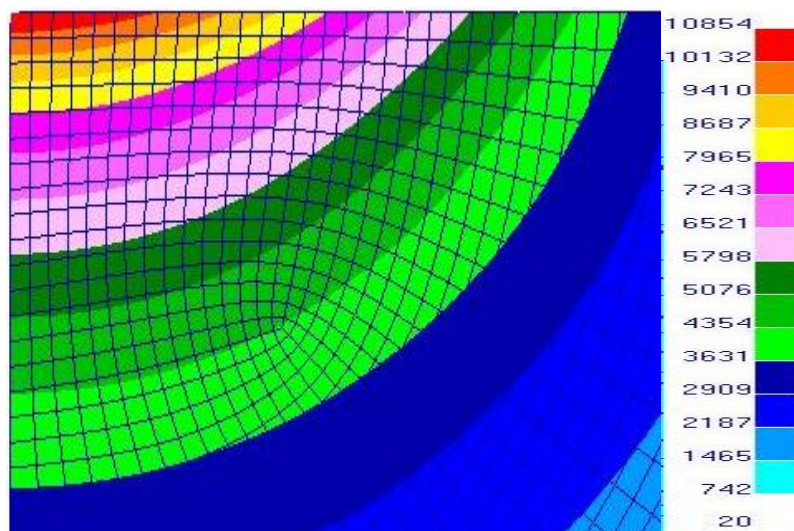
- c) **Obliczono metodą elementów skończonych (MES)** (na podstawie rozkładu energii w wiązce laserowej (rys. 38, MathCAD)) **i przedstawiono przebieg procesu nagrzewania laserowego i reakcji materiału na impulsy laserowe; określono grubość warstwy materiału w której zmienia się temperatura wraz z pulsacją energii laserowej.**

Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono wykreślnie na rys. 6 - 7.

Analizie metodą MES poddano próbki o największej mikrotwardości bez względu na ubytek materiału, poddane oddziaływaniu energii $I_2(r)$, (próbka nr 4), oraz z grupy próbek o wysokiej mikrotwardości i niewielkim ubytku materiału: $I_5(r)$, (próbka nr 9), ze względu na najkrótszy (ekonomiczny) czas oddziaływania energii laserowej (rys.7).

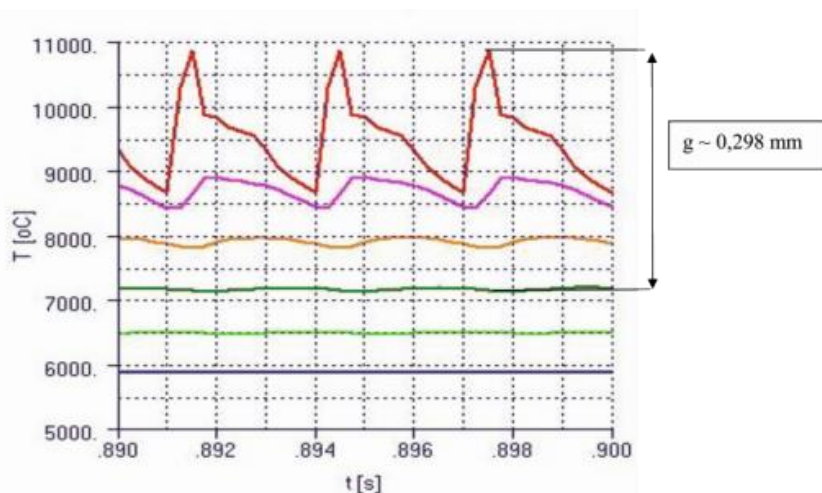


Rys. 6. Rozkład energii wiązki laserowej na przekroju wiązki w poszczególnych doświadczeniach eksperymentu



a)

1 kratka = 0,0373mm; rozkład temperatury w próbce w chwili czasowej $t = 0,8975$ [s],



b)

Rys.7. Rozkłady temperatur w próbce w poszczególnych chwilach w stanie równowagi procesu

Na rys. 6 i 7 przedstawiono przebieg zmian temperatury w warstwie wierzchniej materiału próbki grzanej energią o średniej mocy $387 \text{ [W/mm}^2\text{]}$ (nr 4) w procesie grzania do 0,9 s i chłodzenia, odpowiedź materiału w okresie stabilizacji procesu grzania w zakresie czasowym $0,246 \div 0,255$ s oraz rozkład temperatury sporządzony na podstawie temperatur w poszczególnych chwilach czasowych w okresie stabilizacji temperatury, w obszarze czasowym 0,890 – 0,900 s, czyli w czasie 0,010s. W tym czasie były generowane 3 impulsy trwające 0,002 s z przerwą 0,001 s, oraz fragment czwartego impulsu.

Na podstawie przedstawionych wykresów na rys. 48 a i b wyliczono grubość warstwy wynoszącej 0,298 mm, w której występowała pulsacja temperatury.

Podsumowując, w wyniku obliczeń MES uzyskano informację o rozkładzie temperatury w warstwie wierzchniej (próbka nr 4) w okresie nagrzewania wynoszącym 0,9 [s], oraz informację, na jakiej głębokości występowała pulsacja temperatury.

Odnosząc te informacje do rzeczywistego ubytku materiału próbki (nr 4) na powierzchni (rys. 10 i 17), grzanej w czasie 0,9[s], energią o gęstości 387[W/mm²] do temperatury max 11000 [°C] można wnioskować, że ubytek warstwy materiału na głębokość ok. 0,350 [mm], w przybliżeniu odpowiada obliczonej głębokości fluktuacji temperatury w warstwie wierzchniej materiału, wynoszącej 0,298 [mm]. W głębszych warstwach temperatura stabilizowała się i nie reagowała na impulsy laserowe.

W przypadku próbki (nr 9), grzanej w czasie 0,38[s] mocą o gęstości 128 [W/mm²], w wyniku obliczeń MES ogrzanej do temperatury 4400 °C, uzyskano w próbce podobny efekt, jak w przypadku w/w próbki (nr 4), tylko w innym, zdecydowanie niższym zakresie temperatur. Stabilizacja temperatury w zakresie 2000 °C występowała w głębszych warstwach materiału. Fluktuacje temperatury na powierzchni, jak i grubość g materiału im podlegająca, wynosiła 0,597 mm. Natomiast temperatura była zbyt niska, żeby spowodować ablację materiału w zakresie głębokości objętych fluktuacją, więc ubytek wynosił ok. 0,15mm. W głębszych strefach, o temperaturze poniżej 2000 °C, temperatury były stałe w czasie.

Z analizy metodą MES tych dwóch przypadków wynika, że przy niższej energii wiązki laserowej, fluktuacje temperatury wywołane pulsującym oddziaływaniem wiązki laserowej sięgają większej głębokości, lecz nie powodują ubytków materiału, natomiast mogą powodować przetopienie i hartowanie , lub hartowanie bez przetopienia, ze stanu stałego.

Dalsze badania w tej pracy były prowadzone w zakresie oddziaływania wiązki laserowej o parametrach nie powodujących odparowania materiału, z minimalnym przetopieniem warstwy przypowierzchniowej, tworzących warstwę wierzchnią o mikrotwardościach rzędu 1200 ÷ 1400 HV_{0,1}, ekonomicznych i zapewniających odpowiednie właściwości mechaniczne materiału.

1.2. Istotne osiągnięcia szczątkowe w wyniku drugiego etapu badań

Badania zasadnicze zapoczątkowano dostosowaniem parametrów obróbki laserowej do stali 30HGSNA, z której podczas obróbki cieplnej może się wydzielać więcej niż w stali węglowej drobnych faz polepszających właściwości.

- a) Eksperymentalnie wyselekcjonowano do obróbki stali 30HGSNA energię laserową ($I_0 = 167,147$ [J/s mm²], $I_0/e^2=22,621$ [J/s mm²]) oddziaływującą na próbkę, która powodowała niewielkie przetopienie oraz łagodny gradient rozkładu mikrotwardości.

Przykładowy opis teoretyczny rozkładu energii $P = 1100$ [W] na powierzchni koła o $r = 1,023$ [mm], stosowanej (o zbliżonych wartościach) w dalszych badaniach, przedstawiono wzorami :

$$P_7 := 1100 \quad r_{w7} := 1.77$$

$$r_{07} := r_{w7} - \frac{r_{w7}}{1 + \frac{5.2}{3.8}} \quad r_{c7} := r_{w7} - r_{07} \quad r_{c7} = 0.747$$

$$r_{07} = 1.023$$

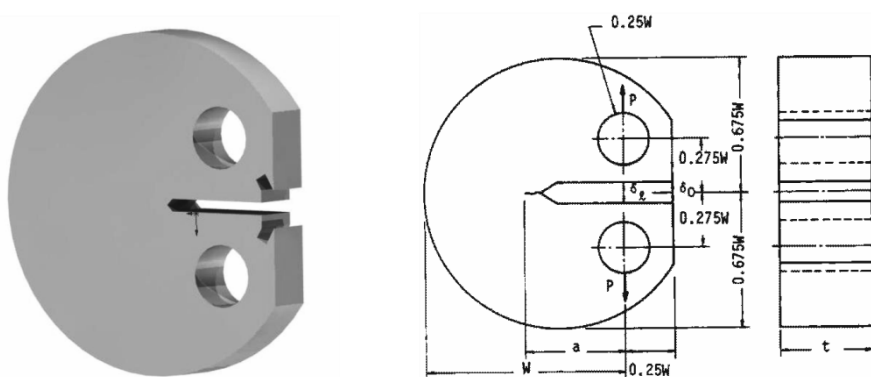
$$I_{07} := \frac{2P_7}{\pi \cdot r_{07}^2 \cdot \left[\exp\left(-2 \cdot \frac{r_{c7}^2}{r_{07}^2}\right) + \sqrt{2\pi} \cdot \left[\frac{r_{c7}}{r_{07}} \left(1 - \operatorname{erf}\left(-\sqrt{2} \cdot \frac{r_{c7}}{r_{07}}\right)\right) \right] \right]} \quad I_{07} = 178.857$$

$$I_7(r) := I_{07} \exp\left[-2 \left(\frac{r - r_{c7}}{r_{07}}\right)^2\right] + I_{07} \exp\left[-2 \left(\frac{r + r_{c7}}{r_{07}}\right)^2\right] \quad \frac{I_{07}}{e^2} = 24.206$$

b) W wyniku obróbki stali 30 HGSNA (próbki RCT - Rotate Compact Tension) przy stosowaniu w/o energii wiązki laserowej uzyskano blokadę propagacji pęknięć zmęczeniowych na próbkach poddanych obciążeniom zmęczeniowym.

2. Bień A., Kłysz S., 2012, Metoda blokady propagacji pęknięć zmęczeniowych (uwzględniony w monografii) Numer patentu/prawa ochronnego: 212181

Próbkę typu RCT ($W = 40$ mm, $B = 7$ mm, $a_0 = 12,5$ mm) z nadpęknięciem (rys. 8) poddano obustronnie naświetlaniu wiązką impulsową lasera CO₂ (o mocy w zakresie 800 - 1150 W, przy czym odległość powierzchni próbki od płaszczyzny soczewki skupiającej wiązkę wynosiła 110 - 140 mm przy ogniskowej soczewki 3,8", prędkość przesuwu wiązki względem powierzchni obrabianej 3,5 ÷ 4,5 mm/s w osłonie argonu w zakresie niskich ciśnień) tworząc ścieżki ułożone równoległe do siebie we wzajemnej odległości 4 ÷ 8 mm, a prostopadłe do kierunku rozwoju pęknięcia, pierwsza w odległości 2,5 ÷ 5 mm od wierzchołka pęknięcia.

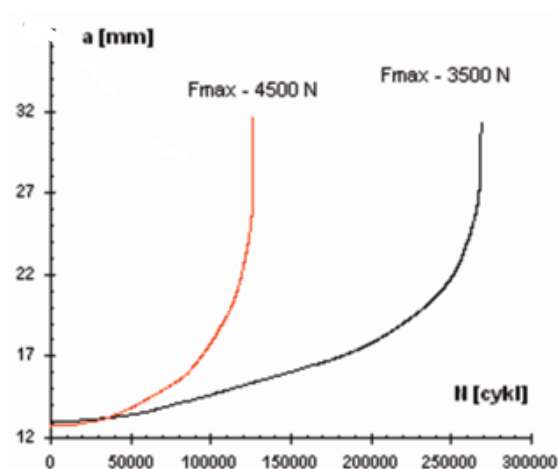


Rys. 8. Próбка typu RCT do badań propagacji pęknięć zmęczeniowych

Tak wykonane próbki poddane badaniom zmęczeniowym, w odniesieniu do próbek bez obróbki laserowej, wykazały wielokrotnie większą wytrzymałość zmęczeniową, przedstawioną porównawczo na rys. 9 i 10.

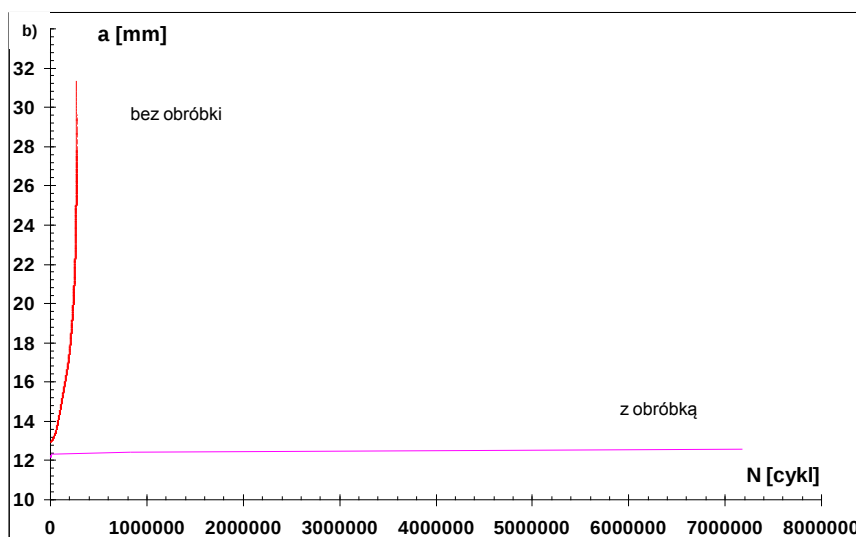
Dla próbek bez obróbki laserowej, poddanej obciążeniu na poziomie $F_{max} = 3500$ N, oraz $F_{max} = 4500$ N przy współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,2$, propagacja pęknięć następowała

zgodnie z wykresami przedstawionymi na rys. 9. Trwałość próbki do zniszczenia w pierwszym przypadku wyniosła niespełna 270 000 cykli, a w drugim 126 000 cykli.



Rys. 9. Wyniki badań propagacji pęknięć zmęczeniowych dla próbek nie poddanych obróbce laserowej, dla dwóch poziomów obciążenia; wykresy: $a=f(N)$,

Przebieg rozwoju pęknięcia w próbce poddanej obróbce laserowej, w identycznych warunkach obciążeniowych jak na rys.9, przedstawiono na rys. 10. W próbce tej po 8 000 000 cykli przyrost długości pęknięcia nie przekroczył 0,4 mm, propagacja pęknięcia została wyhamowana. Ten efekt występuje tylko dla określonego, wąskiego zakresu parametrów wiązki laserowej – poza tym zakresem wzrost trwałości próbek nie jest tak znaczny i mieści się w zakresie 20-100%.



Rys. 10. Porównanie przebiegu krzywych $a=f(N)$ dla próbek z i bez obróbki laserowej, badanych w identycznych warunkach obciążeń.

Metodyka. Do oceny odporności na propagację pęknięć zmęczeniowych wykorzystano następującą metodykę. Ustalono relacje między prędkością rozwoju pęknięcia (da/dN) a zakresem współczynnika intensywności naprężeń (ΔK).

Dla próbki RCT zależność współczynnika intensywności naprężeń od długości pęknięcia ma postać:

$$\Delta K = \frac{F}{B\sqrt{W}} \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left(0.76 + 4.8 \frac{a}{W} - 11.58 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 11.43 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 4.08 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right)}{\left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right)^{1.5}} \quad (3.1)$$

Funkcja podatności dla tej próbki ma postać:

$$\frac{a}{W} = 1 - 4.459u + 2.066u^2 - 13.041u^3 + 167.627u^4 - 481.4u^5 \quad (3.2)$$

gdzie u jest podatnością próbki, $u = \frac{1}{1 + \left(\frac{E \cdot B \cdot COD}{F}\right)^{0.5}}$ (3.3)

a COD jest wielkością rozwarcia szczeliny pęknięcia (Crack Opening Displacement).

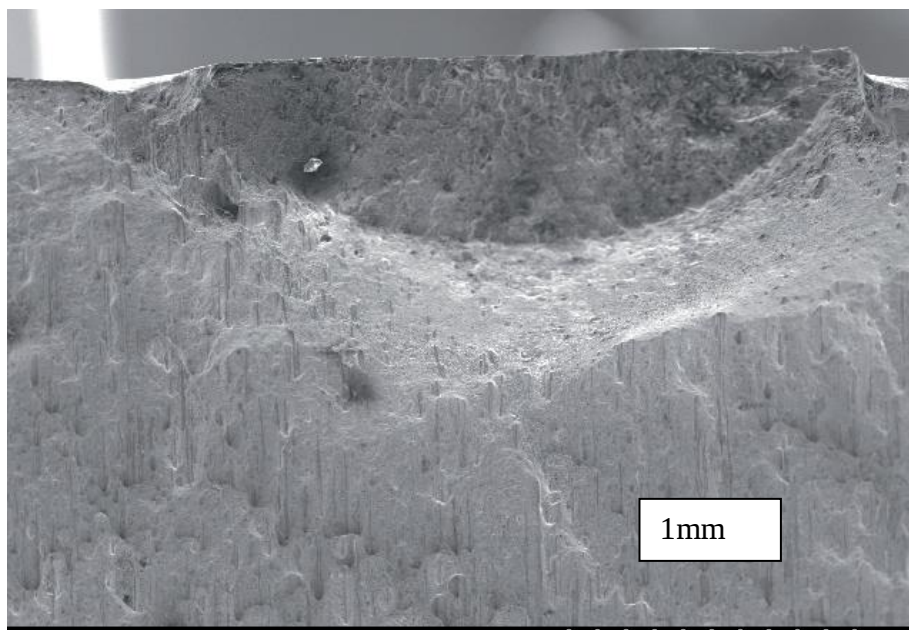
Badania prędkości propagacji pęknięć przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowo-zmęczeniowej MTS 8502 w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w Warszawie. Częstotliwość obciążenia w trakcie badań wynosiła 10 Hz. Temperatura w trakcie badań wynosiła od 20 do 25 °C, wilgotność od 40 do 60%. W próbkach wykonywano pęknięcie wstępne (precracking) do długości $a_0 = 12.5$ mm przy cyklicznie zadawanym obciążeniu. Określono krzywe propagacji $a = f(N)$ i $da/dN = f(\Delta K)$ oraz wyznaczono parametry równań propagacyjnych.

Znaczenie aplikacyjne metody obróbki laserowej powodującej zatrzymanie generacji pęknięć zmęczeniowych polega na tym, że w oparciu o wyniki numerycznej analizy wytrzymałościowej danego elementu konstrukcji lub części maszyny, tą metodą można zabezpieczyć miejsca newralgiczne, w których spodziewany jest rozwój pęknięć, bez konieczności „wzmacniania” konstrukcji np. zwiększeniem przekrojów, co jest problemem ze względu na wzrastający ciężar konstrukcji, szczególnie lotniczych.

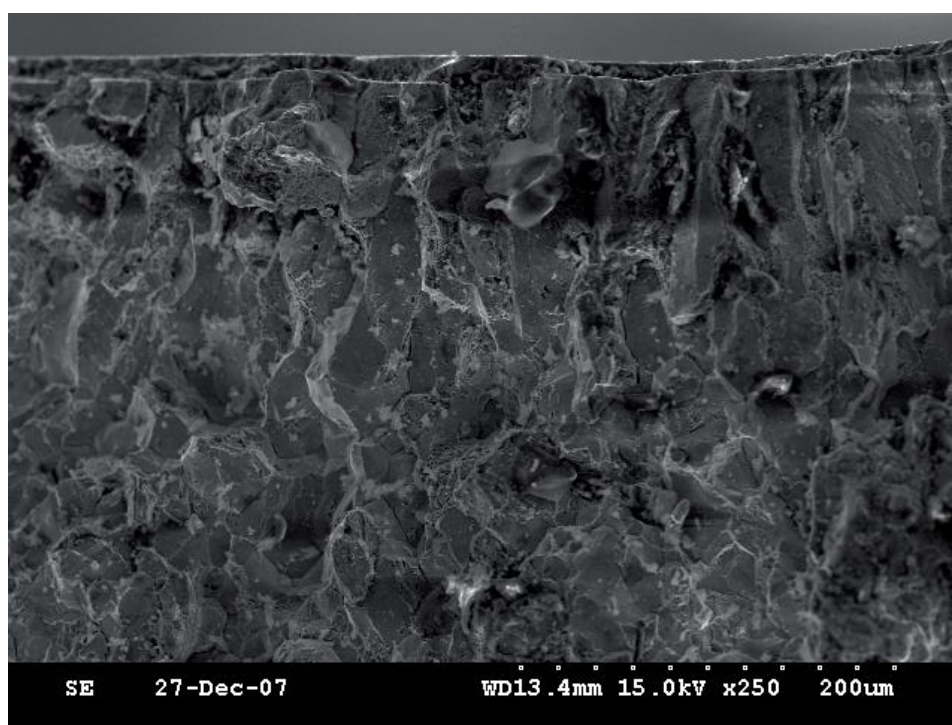
W przypadku pęknięć natomiast, które powstają w procesie eksploatacji można tę metodę zastosować do przedłużenia żywotności danej części maszyny jako alternatywną dla przeprowadzania regeneracji lub remontu. W ten sposób prezentowana metoda może stanowić element przeglądów okresowych, regenerowania i remontów elementów konstrukcji.

c) Określono wpływ mikrostruktury złomu próbki RCT obróbjonej laserowo, na hamowanie propagacji pęknięć zmęczeniowych w stali 30HGSNA

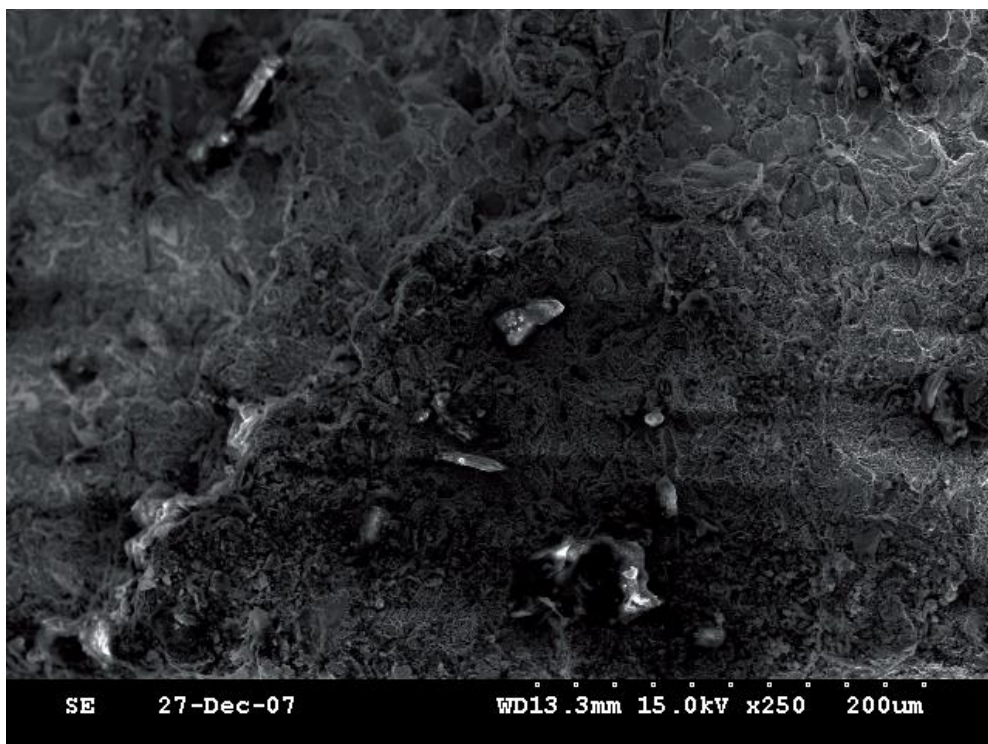
Na rys.12 przedstawiono poszczególne obszary złomu ścieżki laserowej pokazanego na fotografii, rys.11, celem zobrazowania i omówienia mikrostruktury, oraz jej cech charakterystycznych, mających znaczenie w spowalnianiu, a właściwie hamowaniu pęknięć zmęczeniowych.



Rys. 11. Mikrostruktura przełomu próbki po próbie zmęczeniowej w obszarze ścieżki laserowej



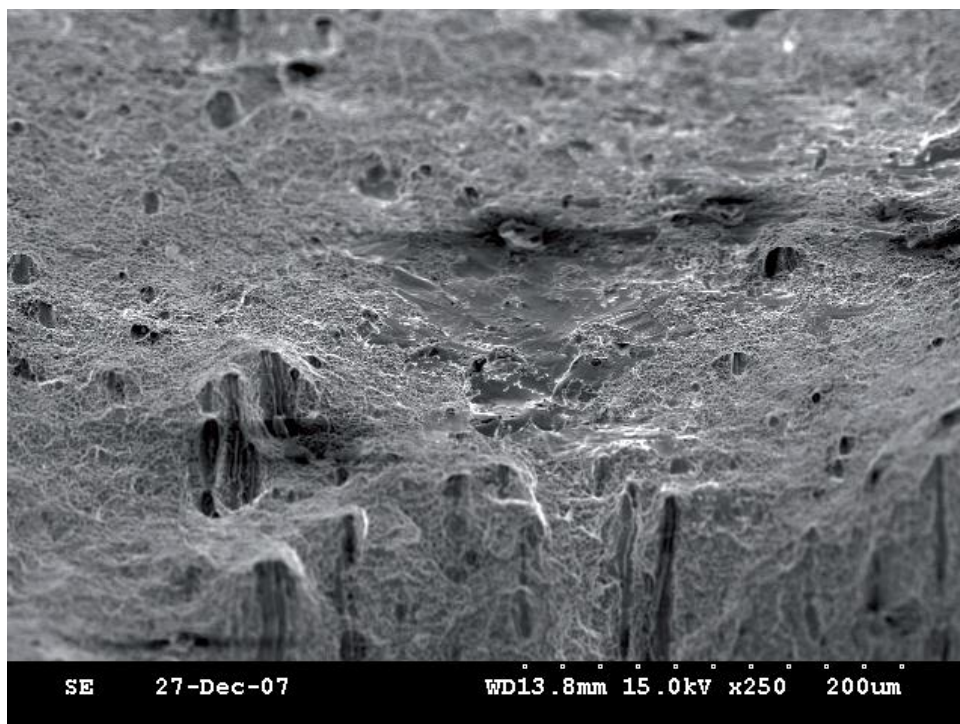
a) Strefa zahartowana ze stanu ciekłego o grubości nie przekraczającej 200 μm . Mikrostruktura dendrytyczna



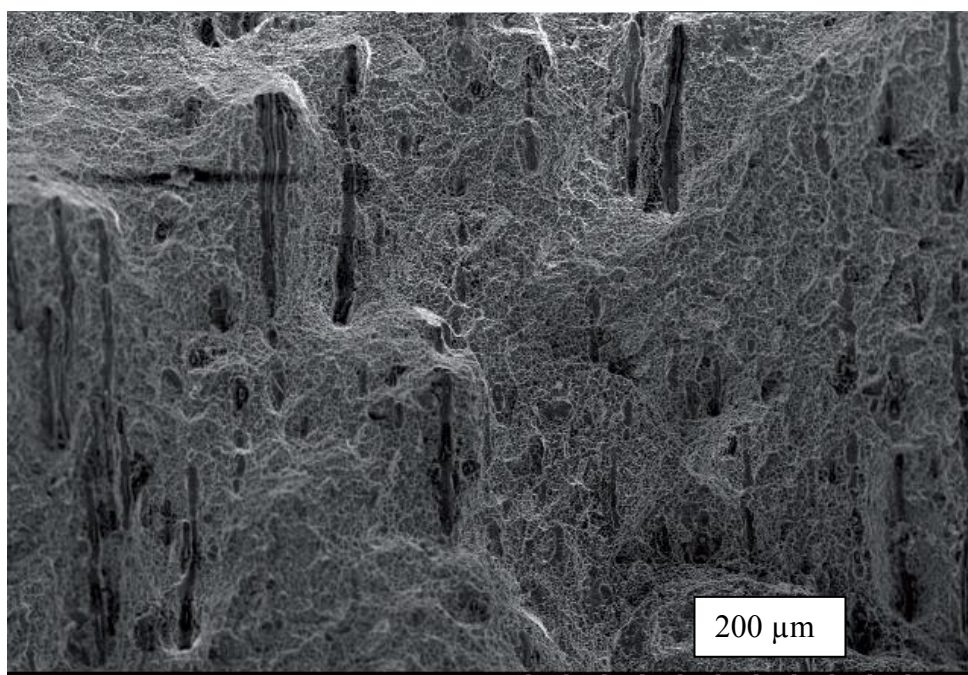
b) Mikrostruktura obszaru zahartowanego ze stanu stałego. Widoczne nadtopione siarczki manganu.



c) Mikrostruktura obszaru zahartowanego ze stanu stałego granicząca z strefą przejściową



d) Mikrostruktura strefy przejściowej



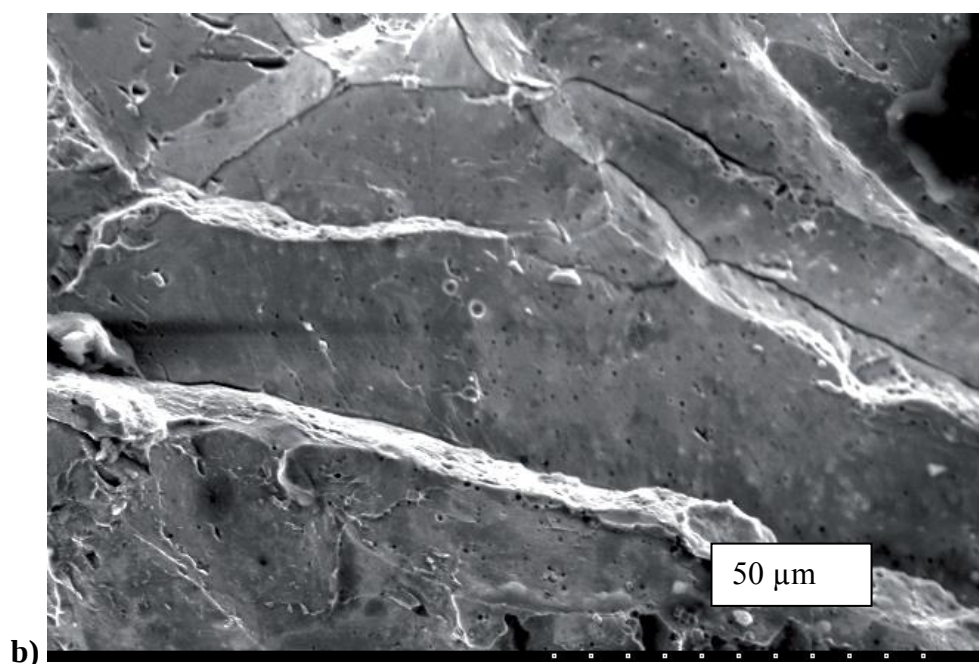
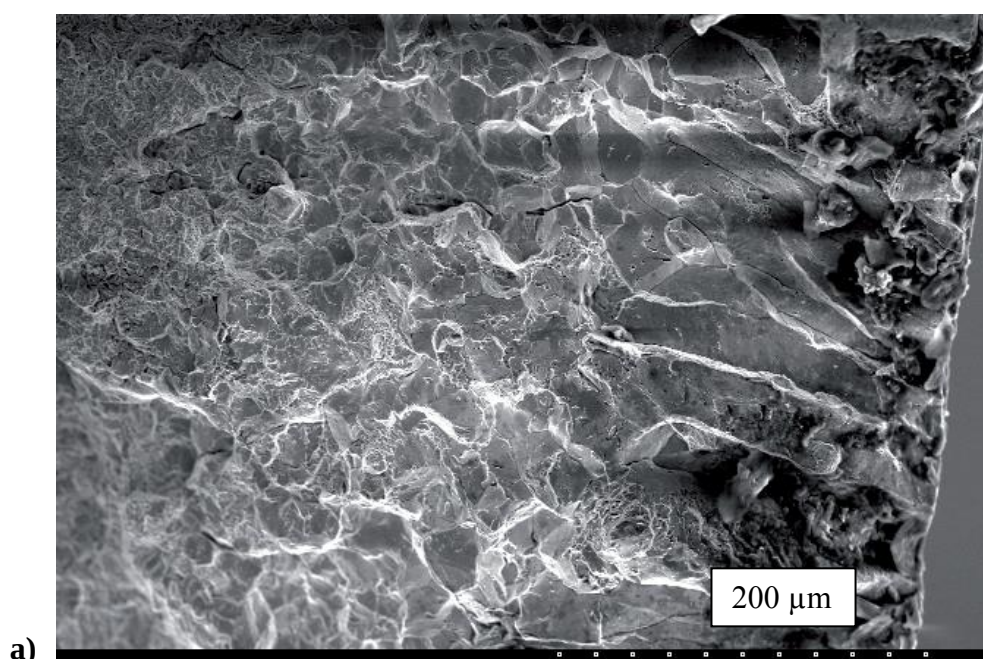
e) Fragment strefy rdzenia materiału. Podłużne wtrącenia niemetaliczne - siarczki manganu; przełom plastyczny.

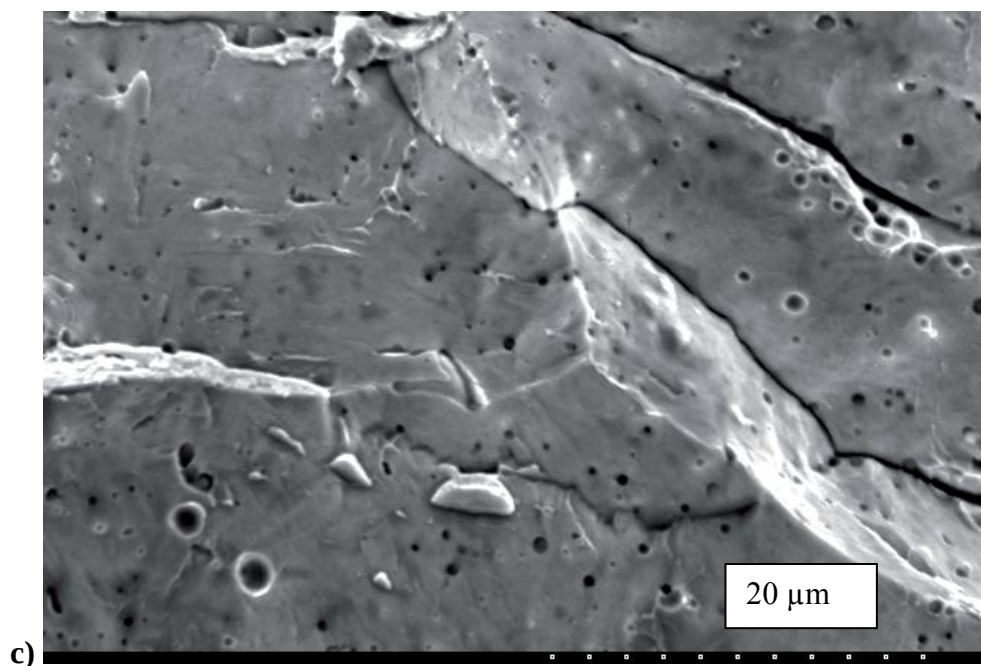
Rys. 12. Mikrostruktura poszczególnych stref przełomu próbki po próbie zmęczeniowej w obszarze ścieżki laserowej przechodzącej w obszar rdzenia materiału

Mikrostruktura strefy zahartowanej ze stanu ciekłego

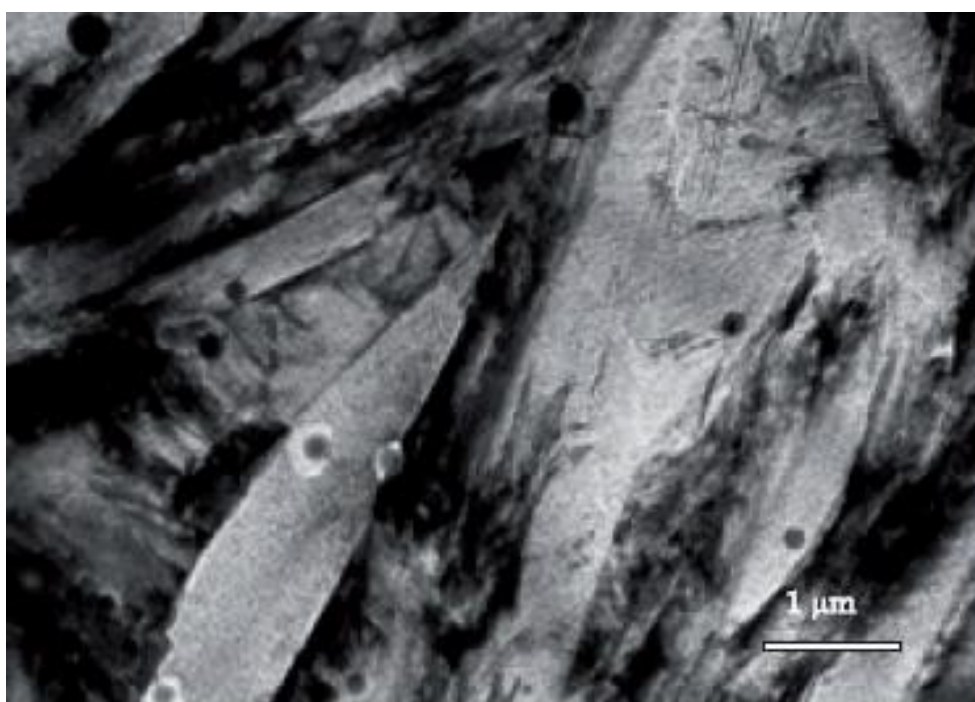
W wyniku analizy punktowej metodą spektrograficzną ujawniono występowanie takich pierwiastków jak siarka, mangan, tlen, chrom, magnez, aluminium. Należy więc przypuszczać, że wydzielania sferyczne występujące w badanych punktach są to siarczki manganu, węgliki, tlenki.

Zarówno tą metodą, jak i w wyniku analizy metalograficznej (rys.13, 14), obecność w strefie przetopionej rozdrobnionych siarczków manganu, jak i innych sferycznych wydzieliń, została potwierdzona. Postać sferyczna wydzieliń, w odniesieniu do ich kształtów podłużnych, może być istotnym czynnikiem, mającym wpływ na propagację pęknięć zmęczeniowych.





Rys. 13. Mikrostruktura stref przypowierzchniowych: zahartowanych ze stanu ciekłego i stałego (*a*), ciekłego (*b*, *c*) – sferyczne wydzielenia.



Rys. 14. Mikrostruktura stali 30HGSNA po obróbce laserowej. Zdjęcia pochodzą ze strefy zahartowanej ze stanu ciekłego. Próbkę po pękaniu zmęczeniowym. Mikroskop TEM.

Mikrostruktura strefy zahartowanej ze stanu ciekłego o grubości nie przekraczającej 0,2 [mm], charakterystyczna tym, że w listwach drobnego martenzytu, zdefektowanych,

wewnętrznie zbliżnionych, występują kuliste wydzielenia siarczków i węglików, powstałe z przetopionych podłużnych wydzielen w materiale wyjściowym. Sferoidalna postać wtrąceń jest bardziej korzystna, i pozytywnie wpływa na wytrzymałość zmęczeniową. Cienka warstewka przetopiona stwarzała warunki do bardzo szybkiego chłodzenia, i tym samym powstania dużej liczby zarodków krystalizacji i drobnoziarnistej mikrostruktury, co również sprzyja zwiększeniu wytrzymałości zmęczeniowej.

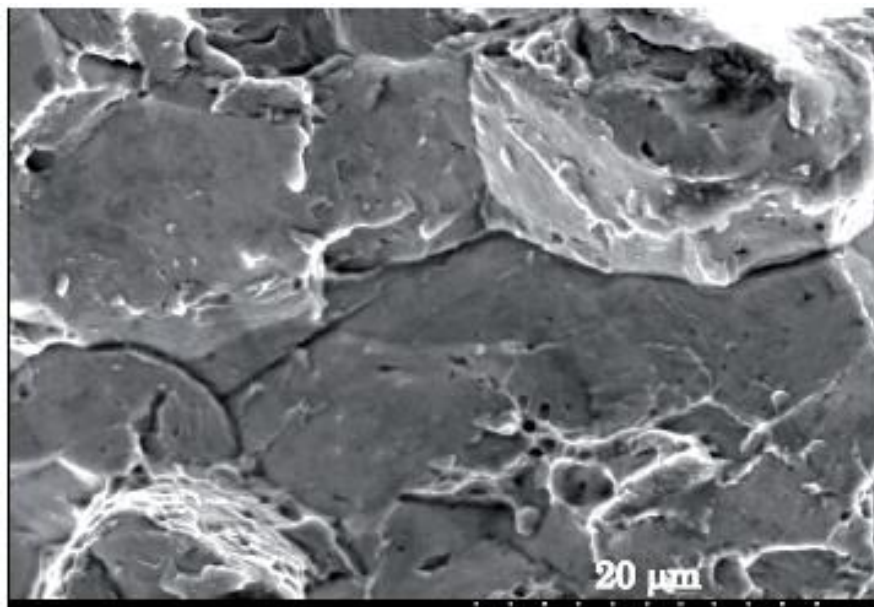
Występujące również drobne podłużne wydzielania cementytu wewnątrz listew martenzytu oraz skupiska dyslokacji, sprzyjają zwiększeniu twardości i tym samym wytrzymałości.

Mikrostruktura strefy zahartowanej ze stanu stałego

Mikrostruktura strefy zahartowanej ze stanu stałego na przelomie nie wykazuje kierunkowości (rys. 15,) oraz wtrąceń sferycznych.

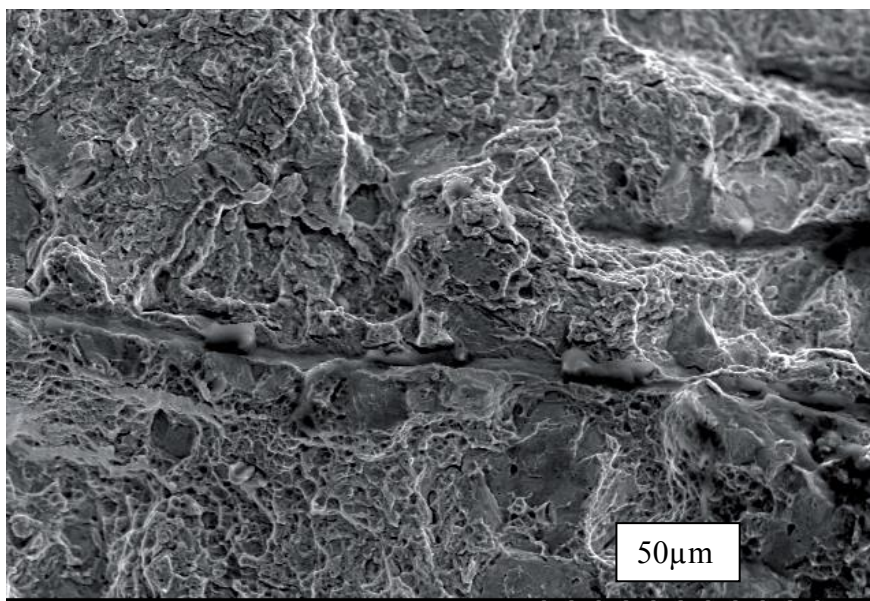
Występowanie martenzytu z obecnością austenitu szczątkowego, bardzo dużą liczbą dyslokacji, linii poślizgu w listwach martenzytu i płytkami niecałkowicie roztopionego cementytu potwierdzono na mikroskopie TEM.

Mikrostruktura drobnoiglasta wpływa korzystnie na właściwości materiału.

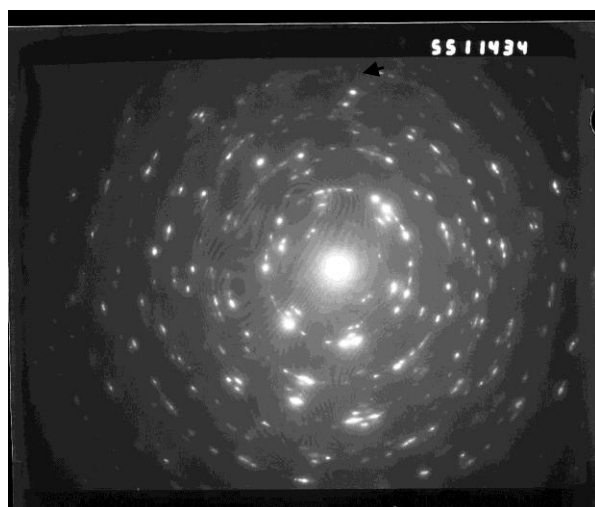
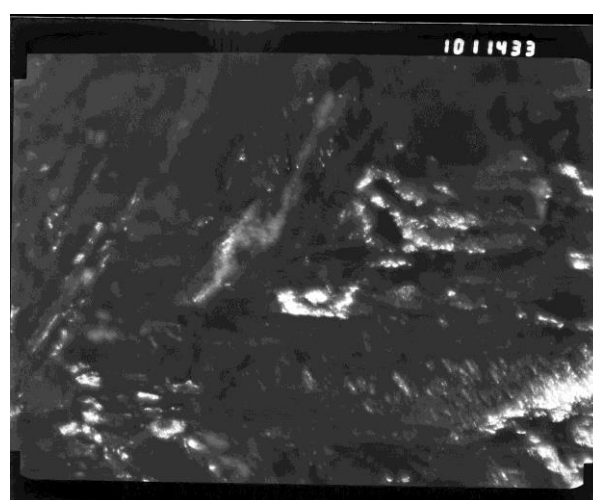


Rys. 15. Mikrostruktura stref przypowierzchniowych: zahartowanych ze stanu stałego

Mikrostruktura strefy „przejściowej” w kierunku rdzenia materiału



Rys. 16. Widok popękanych fragmentarycznie siarczków manganu w strefie przejściowej



Rys. 17. Mikrostruktura TEM obszaru „przejściowego” ścieżki laserowej

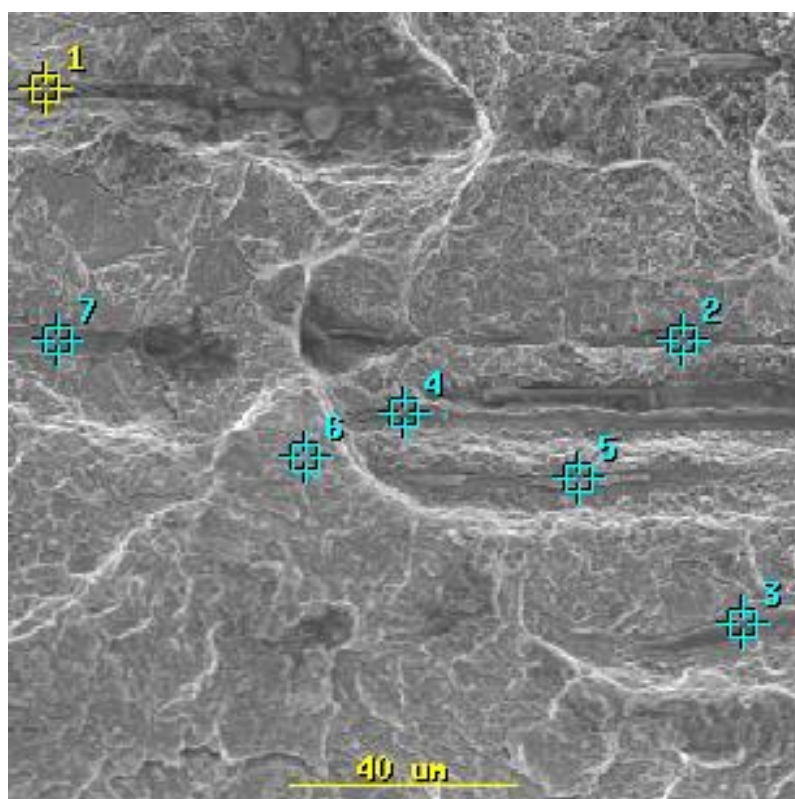
Mikrostruktura strefy „przejściowej” jest to strefa martenzytu odpuszczonego, powstałego w wyniku przewodzenia ciepła w głąb materiału ze strefy przypowierzchniowej. Występują w niej listwy martenzytu z wydzieleniami cementytu wewnątrz listew oraz listwy austenitu szczątkowego. Mikrostruktura jest mocno zdefektowana, co wykazują „rozmyte” refleksy (rys. 17).

Nie występują sferyczne wydzielenia charakterystyczne dla mikrostruktury powstałej ze stanu ciekłego. Wydzielenia na zdjęciu (rys. 16) to siarczki manganu. Niektóre z nich utraciły ciągłość, niektóre uległy nadtopieniu. Występują też wydzielenia Cr i Mn, czyli węgiel Cr i węgiel Mn, oraz węgiel Si (analiza spektroskopowa).

Mikrostruktura rdzenia od strony strefy przejściowej

Przełom plastyczny z długimi wydzieleniami (rys.12 e), zidentyfikowanymi przy pomocy spektrografu, to mikrostruktura rdzenia. Analiza spektrograficzna wykazała, że są to wydzielenia siarczków manganu. W punktach pomiarowych, rdzenia od strony strefy przejściowej, 6 i 7 występuje Cr i Mn, czyli węgiel Cr i węgiel Mn. W punkcie 4 – węgiel Mn oraz węgiel Si.

Siarczki manganu są przeważnie popękane, a niektóre nadtopione



Rys.19. Mikrostruktura rdzenia. Wydzielenia 1÷7 poddane analizie spektrograficznej. Widok popękanych fragmentarycznie siarczków manganu w strefie rdzenia -w pobliżu strefy przejściowej od strony materiału rdzenia,

Podsumowanie wyników badań aplikacyjnych

W wyniku całokształtu analizy wpływu mikrostruktury ścieżki laserowej na blokadę propagacji pęknięć zmęczeniowych, stwierdzono, że przetopienie cienkiej warstwy przypowierzchniowej, nagrzewanie głębszych stref warstwy wierzchniej, wywołane lokalnym oddziaływaniem skupionej wiązki laserowej i samoistnym hartowaniem, które wytwarza szczątkowe fazy metastabilne, pewną liczbę warstw epitaksjalnych i naprężenia szczątkowe w przypowierzchniowej warstwie wierzchniej elementu, były głównym czynnikiem wpływającym na hamowanie propagacji pęknięć zmęczeniowych. Szczególną rolę należy przypisać mikrostrukturze powstałej w przypowierzchniowym obszarze przetopionym i mikrostrukturze strefy przejściowej otrzymanej w wyselekcjonowanej metodyce obróbki laserowej. Mikrostruktura strefy przetopionej, posiada dużą liczbę drobnych wydzielen, w tym siarczków manganu, które z długich, pasmowatych kształtów przeobraziły się w kuliste drobne wydzielania w wyniku roztopienia i powtórnej krystalizacji. Chłodzenie mikroobszaru odbywające się z bardzo dużą szybkością ze względu na bardzo szybkie odprowadzenie ciepła w głąb materiału i liczba zarodków krystalizacji kilkadziesiąt razy większa w odniesieniu do konwencjonalnej obróbki, spowodowała powstanie drobnych wydzielen. Rozdrobnienie siarczków i duża ilość innych drobnych wydzielen wykazanych w pracy w histogramach, mogło być jedną z przyczyn spowalniania propagacji pęknięć zmęczeniowych.

W prowadzonych badaniach argon stosowany jako gaz osłonowy podczas oddziaływania wiązki laserowej na materiał zasysał automatycznie azot z powietrza i wprowadzał do przetopionego mikroobszaru. Istniała możliwość gromadzenia azotu w warstwie przetopionej, gdy obojętny gaz ochronny, argon, wypływał z dyszy, zasysał azot z atmosfery, rozszerzał się i przepływał do roztopionego mikroobszaru w postaci skomplikowanych prądów konwekcyjnych. Azot mógł tworzyć fazy międzywęzłowe i tym sposobem wpływać na hamowanie propagacji pęknięć zmęczeniowych.

W przypadku żelaza jako osnowy i azotu może się wytworzyć II typ układu równowagi fazowej Fe_3N , roztwór stały międzywęzłowy, mający wpływ również na wytrzymałość zmęczeniową. Podobne zjawisko, wpływające na spowalnianie propagacji pęknięć zmęczeniowych, uzyskano w patencie (US nr 5,306,360, Process for Improving the fatigue crack growth resistance by laser beam).

Należy podkreślić, że próbki wykazujące tak wysoką odporność na propagację pęknięć zmęczeniowych miały bardzo niewielkie przetopienie, a próbki z większym przetopieniem i bez przetopienia nie wykazywały odporności na propagację pęknięć zmęczeniowych (badania prowadzone w ramach patentu, BIEŃ, KŁYSZ 2008). Można przypuszczać, że gruboiglasta warstwa martenzytyczna powstała ze stanu ciekłego przy głębszych przetopieniach, wpływa negatywnie na rozkład i rodzaj powstałych naprężeń i tym samym na właściwości ukonstytuowanej warstwy w zakresie blokady propagacji pęknięć zmęczeniowych.

Drobnoiglasta mikrostruktura zdefektowanego martenzytu w strefie przetopionej, o stabilnych dyslokacjach, dużej liczbie drobnych wydzielen i wysokiej mikrotwardości, sąsiadująca z mikrostrukturą martenzytu powstałego w wyniku hartowania ze stanu stałego, a ta z kolei przechodząca w strefę martenzytu nisko odpuszczonego, utworzyły warstwę wierzchnią o łagodnym gradiencie zmian właściwości, która usytuowana przed zainicjonowanym pęknięciem spowodowała spowolnienie rozwoju pęknięć zmęczeniowych.

Zmiany mikrostruktury z kolei miały wpływ na rozkład naprężeń ściskających, co zbadano i przedstawiono w kolejnym opracowaniu. Rozkład mikrotwardości na przekroju ścieżki laserowej o łagodnym gradiencie skutkował powstawaniem korzystnego stanu naprężeń w warstwie między ścieżkami.

Podsumowując, wiele czynników, mających wpływ na propagację pęknięć zmęczeniowych, można wymienić, natomiast wszystkie one są wynikiem powstałych podczas oddziaływania wiązki laserowej

zmian mikrostrukturalnych (ich usytuowania na powierzchni i w głębszych partiach warstwy wierzchniej materiału) polegających na:

- a) wytworzeniu w ścieżce laserowej szczątkowych faz metastabilnych i warstw epitaksjalnych;
- b) wytworzeniu w cienkiej strefie przetopionej zdefektowanego drobnoiglastego martenzytu i tym samym przypowierzchniowych naprężeń ściskających;
- c) powstaniu drobnych kulistych wydzieli w wyniku roztopienia siarczków manganu i powtórnej ich krystalizacji na bazie dużej liczby powstałych zarodków w wyniku bardzo szybkiego chłodzenia;
- d) możliwości tworzenia mikrocząsteczkowych azotków i faz międzywęzłowych w warstwie przetopionej;
- e) wytworzeniu stabilnych dyslokacji;
- f) powstaniu mikrostruktury zdefektowanego martenzytu z dużą liczbą dyslokacji i drobnodispersyjnych wydzieli, węglików wewnątrz igieł martenzytu, powodujących dodatkowy wzrost mikrotwardości;
- g) wytworzeniu mikrostruktury zdefektowanego martenzytu w strefie przetopionej, o stabilnych dyslokacjach, dużej liczbie drobnych wydzieli i wysokiej mikrotwardości, przechodzącej w mikrostrukturę martenzytu uzyskaną w wyniku hartowania ze stanu stałego, a tej z kolei przechodzący w strefę martenzytu nisko odpuszczonego, co spowodowało powstanie warstwy wierzchniej o łagodnym gradencie zmian właściwości, która usytuowana przed zainicjowanym pęknięciem spowodowała spowolnienie rozwoju pęknięć zmęczeniowych.

Monografia wniosła nowe informacje również o znaczeniu ilości energii wiązki laserowej i jej rozkładu czasowo-przestrzennego w impulsie na kształtowanie właściwości materiału. W aspekcie mikrostrukturalnym określono wpływ ukonstytuowanych właściwości na rozprzestrzenianie się pęknięć zmęczeniowych. Uzyskano mikrostrukturę o budowie martenzytycznej z licznymi stabilnymi dyslokacjami, o wysokiej mikrotwardości, mającymi istotny wpływ na właściwości wytrzymałościowe.

Analizując cele cząstkowe, wynikające z wieloetapowości badań opisanych w monografii, można stwierdzić, że:

- wyselekcjonowano obszary zmienności parametrów obróbki laserowej, konstytuujących mikrostrukturę stali o wysokiej mikrotwardości z minimalnym ubytkiem materiału;
- określono zakresy parametrów kształtujących mikrostrukturę o możliwie wysokiej mikrotwardości – bez względu na ubytek materiału;
- wytworzono twarde struktury zawierające jednorodne stabilne dyslokacje o dużej gęstości;
- opisano zależności funkcyjne otrzymanych wyników z parametrami obróbki;
- wyjaśniono wpływ energii laserowej dostarczonej do mikroobszaru na zmianę mikrostruktury i niektórych właściwości warstwy wierzchniej materiału na podstawie pomiarów mikrotwardości, analizy mikrostruktur, analizy rozkładów energii w impulsie laserowym. Określono z wykorzystaniem metody elementów skończonych przebieg zmian temperatury materiału w funkcji czasu.

Wspomaganie obliczeniami rozkładu energii w wiązce laserowej oraz analizą przebiegu procesu nagrzewania laserowego i reakcji materiału na impulsy laserowe z wykorzystaniem metody elementów skończonych skutkowało wyjaśnieniem przyczyn powstałych zmian w materiale.

Zastosowana sumaryczna analiza wyników uzyskanych różnymi metodami, pozwoliła na pełne wyjaśnienie zachodzących zjawisk w materiale i powstałych zmian.

W monografii określono kierunki i cele dalszych badań, które zostały zrealizowane, lub są realizowane.

Kolejnym kierunkiem badań i celem było określenie stanu naprężeń w próbkach RCT obrobionych laserowo, które opisano na łamach czasopisma *Surface and Coatings Technology* i które jest częścią osiągnięcia naukowego.

3. Marek Szkodo, Anna Bień, 2016, *Influence of laser processing of the low alloy medium carbon structural steel on the development of the fatigue crack*, (Wpływ obróbki laserowej stali konstrukcyjnej niskostopowej na rozwój pęknięć zmęczeniowych *Surface and Coatings Technology*, s. 117-123 ; p-ISSN: 0257-8972 Charakt. merytoryczna: praca oryginalna, język publikacji: ENG Czasopismo umieszczone na Liście Filadelfijskiej, wskaźnik Impact Factor ISI: 2.139, praca afiliowana przez UWM, DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.032

Udział autora: 50%

(opracowanie wykazuje możliwość zatrzymania pęknięć zmęczeniowych w stali, opisanych w patencie (2) jak i monografii (1) na podstawie przeprowadzonych badań mikrostruktury i stanu naprężeń własnych, wywołanych obróbką laserową).

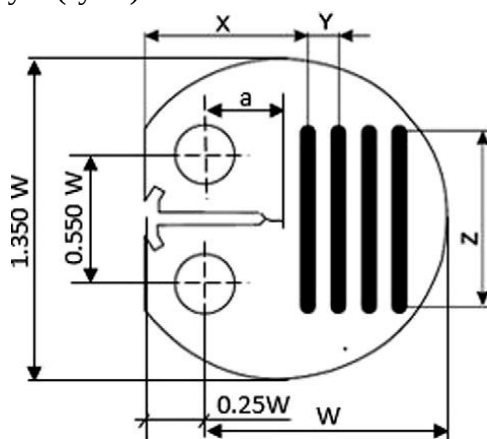
W artykule poddano analizie wpływ obróbki laserowej wykonanej na stali wysokowytrzymałościowej do ulepszania cieplnego, stosowanej w lotnictwie, na blokadę propagacji pęknięć zmęczeniowych, w aspekcie mikrostruktury i rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stali.

Istotne osiągnięcie

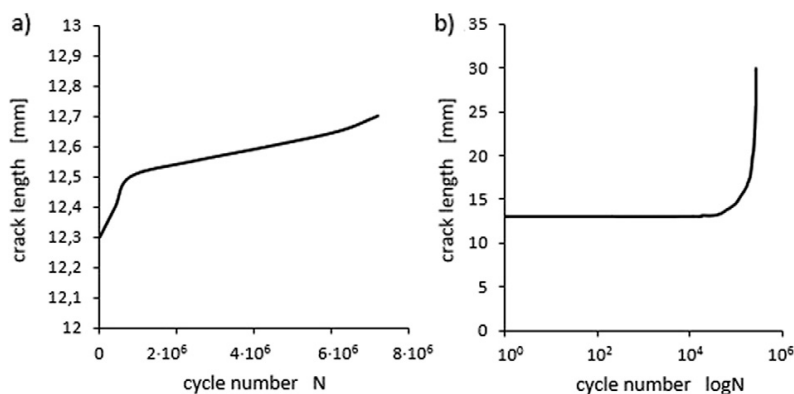
Zbadano rozkład naprężeń w odniesieniu do mikrostruktury w próbkach, które wytrzymały 7,2 mln cykli obciążeń zmęczeniowych (wg technologii opisanej w patencie nr 212181). Wykazano, że wartość maksymalnych naprężeń ściskających w obszarze ścieżek laserowych wielokrotnie przekraczała naprężenia niezbędne do zatrzymania pęknięcia w wierzchołku nadpęknięcia w próbce RCT (Rotate Compact Tension), co spowodowało zatrzymanie propagacji pęknięć. Stan naprężeń był kompatybilny z mikrostrukturą.

Metodyka i wyniki badań uzasadniające osiągnięcie

Próbkę (rys.1), po testach zmęczeniowych, których wyniki przedstawiono na rys.3, poddano analizie mikrostrukturalnej (rys.7) w obszarach przetopienia laserowego, oraz badaniom stanu naprężeń szczątkowych w obszarach przetopionych, strefie wpływu ciepła i materiale rodzimym (rys.2).

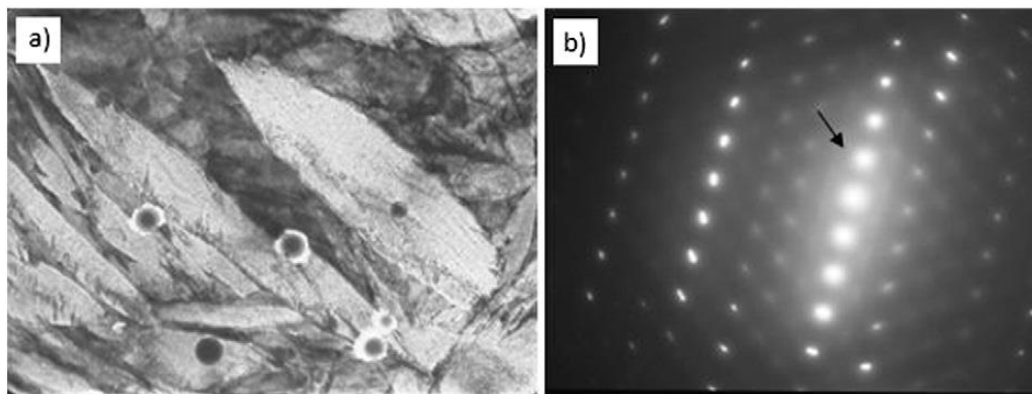


Rys. 1. Próbkę RCT stosowaną do testów zmęczeniowych z znacznymi ścieżkami przetopienia. W - szerokość próbki, X - odległość od stopionej ścieżki do przedniej części próbki, Y - odległość pomiędzy przetopionymi ścieżkami, Z - długość stopionej ścieżki, a - długość wstępnego pęknięcia.



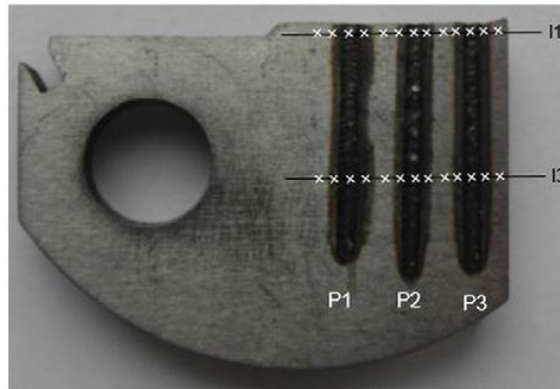
Rys.3. Zmiany długości pęknięć w funkcji czasu dla próbki po obróbce laserowej (a) i dla materiału bazowego (b)

Analiza mikrostruktury w strefie ścieżki przetopionej wykazała występowanie rozdrobnionych siarczków manganu i sferycznych wydzielen węglików w drobnoiglastym martenzycie (rys.7), które mają korzystny wpływ na zmianę twardości i wzrost naprężeń.



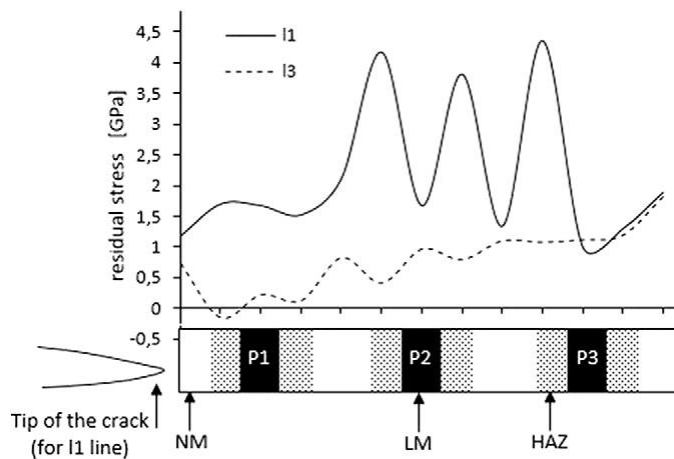
Rys.7. Mikrostruktura stali stopiona przez wiązkę laserową (TEM). Martenzyt z dużą liczbą siarczków i węglików sferydalnych - rys. A). Dyfrakcja mikrostruktury przedstawionej na rys. A. Rozmyte odbicia wykazują dużą gęstość defektów krystalograficznych w mikrostrukturze - rys. B).

Naprężenia szczątkowe, wywołane obróbką laserową w nadtopionych ścieżkach, w strefie wpływu ciepła oraz w materiale rodzimym, oceniano stosując testy twardości (nanoindenter).



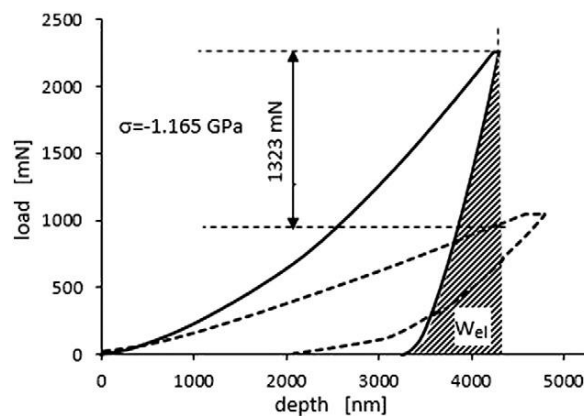
Rys. 2. Widok fragmentu próbki RCT po wykonanych testach zmęzeniowych, z znaczonymi liniami I1 i I3, wzdłuż których wykoano pomiary twardości. Miejsce pomiarów twardości oznaczono krzyżykami.

Najwyższe poziomy naprężen szczątkowych występowały w strefach wpływu ciepła (HAZ). Ich wartości sięgały do 4 GPa (rys.12).



Rys. 12. Rozkład naprężeń szczątkowych wzdłuż linii I1 i I3. Punkty pomiarowe pokazano na rys. 2.

W strefie wierzchołka pęknięcia naprężenia szczątkowe wynosiły 1,165 GPa, i były wystarczające do zatrzymania pęknięcia zmęczeniowego (rys. 10).



Rys. 10. Obciążenie w stosunku do przesunięcia penetracyjnego stosowane do pomiaru twardości w wierszu II - materiał macierzysty przed końcówką pęknięcia.

Linia ciągła - dla materiału z naprężeniem i linią przerywaną - dla materiału po wyżarzaniu.
Obliczony naprężenie ściskające wynosi 1,165 GPa

Wykorzystanie wyników badań

Wydłużenie okresu trwałości propagacyjnej pęknięć zmęczeniowych po obróbce laserowej wybranych części maszyn lotniczych, zostało potwierdzone przez wstępne testy i trwa procedura wdrożeniowa. Istnieje możliwość zastosowania tej metody obróbki laserowej w innych dziedzinach przemysłu, do części maszyn pracujących w warunkach obciążenia zmęczeniowego.

Kierunki badań realizowane po i przed napisaniem monografii, szczegółowo zostały przedstawione w dalszej analizie dorobku potwierdzające wkład autora w Dziedzinę Nauk Technicznych.

3. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych wnioskodawcy, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta oraz stanowiących istotny wkład w Dziedzinę Nauk Technicznych w ramach dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn

Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze, zrealizowane w postaci artykułów, wystąpień na konferencjach, wdrożeń i patentów, można pogrupować w odniesieniu do realizowanej tematyki.

A) Modyfikacja warstwy wierzchniej przy pomocy obróbek cieplnych, cieplno – chemicznych, cieplno-plastycznych

W pracach „Badania wpływu nagniatania elektromechanicznego na wybrane właściwości warstwy wierzchniej części maszyn” (Bień A., 1990, praca doktorska (Q2)) oraz „Badania utwardzania stali 40H metodą nagniatania elektromechanicznego” (Przybylski W., Bień A., 1990 (E14)) analizowano wpływ obróbki elektromechanicznej nagniataniem na właściwości warstwy wierzchniej, wyniki opisano w postaci funkcji i wykresów. Uzyskano wzrost mikrotwardości ok. 200% na stali średniowęglowej do ulepszenia cieplnego na głębokości 160 μm .

W artykule „Wpływ obróbki cieplno-plastycznej na właściwości stali 40GS” (Bień A., Wolak Z., 1984, (Zeszyty ART)) badano na lemieszach pługów rolniczych, poddając analizie porównawczej twardość i udarność lemieszy po obróbce cieplnej oraz cieplno-plastycznej. Korzystniejsze wyniki udarności uzyskano na partii lemieszy po obróbce cieplno-plastycznej, pomimo nieco niższej twardości.

„Analiza technologii strefowego hartowania lemieszy” (Dutka K, Bień A., 1984, (Zeszyty ART)) wyselekcjonowała doświadczalnie optymalny czas grzania dla uzyskania żądanej twardości.

Opatentowano „Stal konstrukcyjną na lemiesz pługów zwłaszcza rolniczych” (Patent nr 144178, 1984, Bień A. i inni), modyfikując skład chemiczny celem uzyskania odpowiednich właściwości.

Wyniki badań, dotyczące modyfikacji warstwy wierzchniej przy pomocy obróbek cieplnych, cieplno – chemicznych, cieplno-plastycznych prezentowano również na międzynarodowych i krajowych konferencjach. Na konferencji „Wydział Mechaniczny gospodarcze regionu” przedstawiono możliwość zastąpienia importowanych noży materiałem dostępnym w kraju i wskazano na parametry tej stali i technologię obróbki cieplnej w referacie „Noże bębnowe sieczkarni samobieżnej E-281” (inni i Bień A., 1984,

ART)). Ustalono przyczynę pęknięcia segmentów gąsienic po ich regeneracji -w wyniku obserwacji metalograficznych stwierdzono występowanie kruchych faz na granicach ziaren austenitu. Zaproponowano zastosowanie przesycania, które pozwoliło usunąć siatkę cementytu (inni i Bień A., 1984, Regeneracja segmentów gąsienic ciągników rolniczych (ART)), i wyeliminować problem pęknięcia.

Zwiększenie twardości i odporności na zużycie ścierne badano na stali i żeliwie, poddając próbki nagniataniu elektromechanicznemu oraz procesowi RW - nakładania powłok plazmowych z przetopieniem (Bień A. i inni, 1994, Podwyższanie właściwości mechanicznych części maszyn metodami elektromechanicznego nagniatania i natryskiwania cieplnego) (L2)). Wyniki badań doświadczalnych wykazały na zwiększenie twardości we wszystkich przypadkach, natomiast odporność na zużycie ścierne nie zwiększyła się w przypadku nakładania powłok z przetopieniem na próbki żeliwne. Tłumaczono to przedostaniem się roztopionego żeliwa do powłoki, które ma niska odporność na zużycie ścierne. W artykule „Wybrane zagadnienia doboru materiałów do wytwarzania maszyn i urządzeń w przemyśle spożywczym” (Bień A. i inni, 1994, (L3)) przeanalizowano warunki pracy urządzeń i aparatury stosowanej w przetwarzaniu żywności w aspekcie stosowalności materiałów do ich wytwarzania. Analizowano możliwości sterowania twardością i grubością warstwy wierzchniej konstytuowanej przez nagniatanie elektromechaniczne w artykule (Bień A., Przybylski W., 1991 (L1)), a w wyniku badań eksperymentalnych i analiz matematycznych określono wpływ parametrów nagniatania elektromechanicznego na twardość i grubość warstwy wierzchniej wałków ze stali 50H. Na podstawie badań na mikroskopie elektronowym transmisyjnym opisano powstałe zmiany w mikrostrukturze tzw. ”białej strefy”, uwidoczniono gęsto rozmieszczone dyslokacje, silne zdeformowanie i zdefektowanie (dyfraktogram), oraz węgliki na tle ferrytu – co było przyczyną wysokich mikrotwardości.

W powiązaniu z tematyką badań i modyfikacji warstwy wierzchniej były również wykonywane ekspertyzy i prace badawcze w współpracy z przemysłem i ośrodkami naukowymi, w których brałam udział (w większości są to prace przed doktoratem). Przykładowa tematyka ekspertyz i innych prac zleconych, przedstawia się następująco (szczegóły w zał. 5) :

- Badania w celu opracowania technologii i wdrożenia przemysłowego metody zwiększenia trwałości ostrzy narzędzi skrawających do drewna, zlecone przez Olsztyńskie Przedsiębiorstwo-Przemysłu Drzewnego. Olsztyn;
- Badania defektoskopowe autoklawów po remoncie, OPCB Olsztyn. Pasym;
- Lokalizacja wad uszkodzonej płomienicy, Okręgowa Spółdzielnia Mleczarska; Węgorzewo.
- Badania defektoskopowe autoklawu po remoncie, OPCB Olsztyn. Iława;
- Ustalenie obszaru występowania pęknięć w rejonie otworów wlotowych pary pod uszczelkę w 5 autoklawach, ZWP, Pasym;

- Badanie płomienicy kotła parowego P2, Zakłady Przemysłu Dzierwiarskiego MORENA, Morąg;
- Ustalenie gatunku stali noża, produkcji RFN, do cięcia papieru; zbadanie własności tej stali oraz zaproponowanie zamiennika produkcji krajowej. Praca własna;
- Ekspertyza materiałowa i badania defektoskopowe materiału powłok trzech sztuk słupów belek podsuwnicowych, Przedsiębiorstwo Konstrukcji Stalowych i Montażu Budownictwa Rolniczego. Mrągowo;
- Zastosowanie ATD do oceny zawartości niektórych pierwiastków oraz właściwości mechanicznych staliwa węglowego. Praca naukowo-badawcza wykonana w ramach Międzyresortowego Problemu Badań Podstawowych MR 20, Politechnika Śląska, Gliwice;
- Badania tulei sprzęgła napędu bocznego ciągarci mimośrodowej typu CN-82-II. Praca własna;
- Określenie gatunku materiału użytego do wykonania tulejek sprzęgła, Instytut Rybactwa Śródlądowego, Olsztyn;
- Ustalenie przyczyn pęknięcia występującego w elementach ze stali N7S, Praca -własna;
- Badania charakterystyk eksploatacyjnych i niezawodnościowych kombajnów zbożowych w sezonie agrotechnicznym 1984. Część materiałowa. Badanie wybranych części ogniwo stalowych, FMŻ , Płock;
- Badania charakterystyk niezawodności eksploatacyjnej kombajnów zbożowych 2056 i 2058 w sezonie agrotechnicznym, Fabryka Maszyn Żniwnych, Płock.
- Zastosowanie analizy termiczno-derywacyjnej do przewidywania wybranych własności staliwa w wytopach przemysłowych. Praca naukowo-badawcza wykonana w ramach Międzyresortowego Problemu Badań Podstawowych MR 20, Politechnika Śląska, Gliwice;
- Badania materiałowe wybranych części kombajnu zbożowego Bizon – Super, Fabryka Maszyn Żniwnych, Płock;
- Obliczenia wytrzymałościowe belki jezdnej oraz konstrukcji nośnej ciągnika elektrycznego o udźwigu 5000N zainstalowanego w Zakładzie Elektromechanicznym, Spółdzielnia Pracy Kormoran, Kętrzyn;
- Ocena techniczna silosów na zboża, Zakład Rolniczy, Kanigowo;
- Utwardzanie strefowe lemieszki ze stali 38GSA, Praca własna;
- Wpływ elektromechanicznego nagniatania na powierzchnię stali poddawanej chromowaniu, Praca własna;
- Wykonanie ekspertyzy konstrukcji toru jezdni ciągnika liniowego o udźwigu 5000 N, Okręgowa Spółdzielnia Mleczarska, Nidzica;
- Przyczyny kruchości stali zbrojeniowej żebrowanej w gatunku 34GS i 18G2, Kombinat Budowlany, Olsztyn;
- Dobór materiału na ogniwa przenośników zgrzeblowych i kubelkowych, SPOMASZ, Olsztyn;
- Krzywe różniczkowe procesu krzepnięcia a własności mechaniczne staliwa. Praca naukowo-badawcza wykonywana w ramach Międzyresortowego Problemu Badań Podstawowych MR20, Politechnika Śląska, Gliwice;

- Badania materiałowe wybranych części kombajnu zbożowego Bizon – Super, Fabryka Maszyn Żniwnych, Płock;
- Badania materiałowe kątownika. Przedsiębiorstwo Remontowo-Produkcyjne PREFABET, Olsztyn;
- Badania materiałowe stali austenitycznej. Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN;
- Badania materiałowe stali austenitycznych. Praca własna;
- Badania właściwości powłok bazaltowych uzyskanych metodą napyłania plazmowego. Praca własna;
- Ekspertyza materiałowa tulejek kalandra miksera nr 10, OZOS, Olsztyn;
- Ekspertyza materiałowa walcówki ze stali ST0, Kombinat Budowlany, Olsztyn;
 - Przyczyny przedwczesnego zużywania się lemieszów w świetle badań metaloznawczych, PPGR, Garbno;
- Świadectwo materiałowe blachy ze stali w gatunku 65, POM, Malbork;
- Optymalizacja obróbki cieplnej lemieszów ze stali 40GS i 38GSA. AGROMET-UNIA Grudziądz;
- Opracowanie technologii produkcji, dobór materiału i ustalenie warunków odbioru technicznego noży do sieczkarni E 281, POM, Malbork.
- *Optymalizacja strefowego utwardzania lemieszów*, Wdrożenie: UNIA Grudziądz;
- *Badania charakterystyk eksploatacyjnych niezawodnościowych kombajnów zbożowych w sezonie agrotechnicznym*. Wdrożenie: PMŻ Płock;
- *Opracowanie technologii produkcji, dobór materiałów i ustalenie warunków technicznego odbioru noży do sieczkarni E 281*, Wdrożenie: POM Malbork;
- *Dobór materiału na ogniwa przenośników zgrzeblowych i kubelkowych*, Wdrożenie: POM Malbork.

B) Modyfikacja warstwy wierzchniej przy zastosowaniu energii wiązki laserowej

Osiągnięcia naukowo-badawcze po zdobyciu stopnia doktora nauk technicznych w zakresie w/w tematyki można posegregować ze względu na stosowane techniki laserowe i uzyskane efekty:

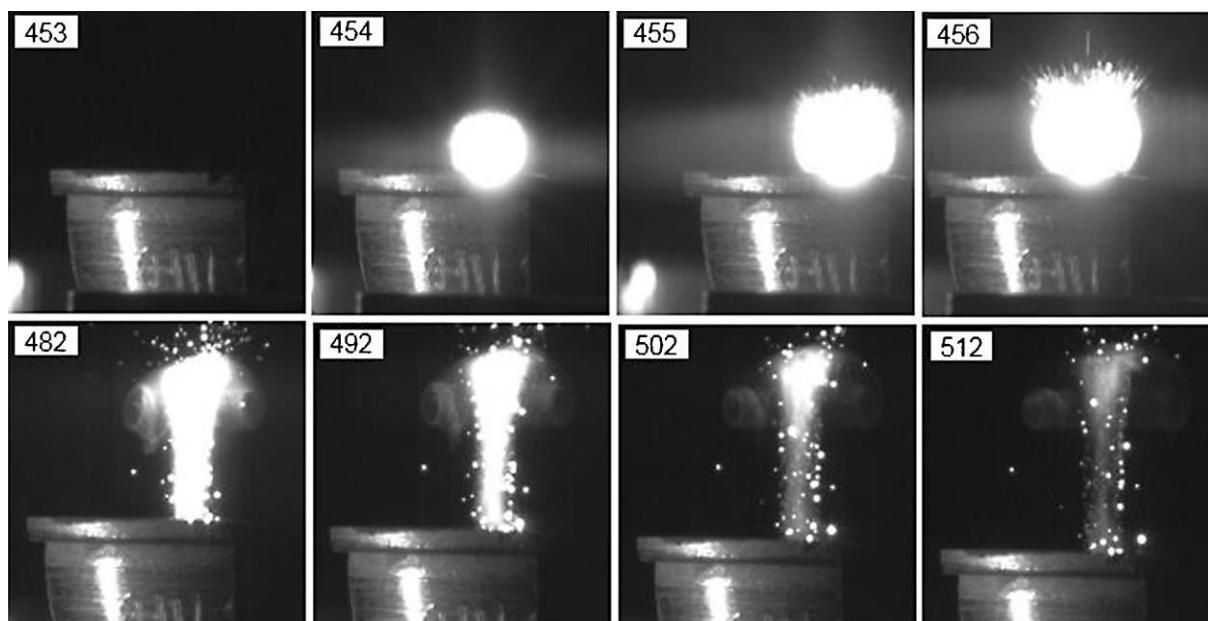
B.1) Wpływ oddziaływania plazmy laserowej na właściwości warstwy wierzchniej

Opracowano technikę generacji plazmy laserowej wykorzystując laser CO₂ i generując na nim długie impulsy laserowe (od 2 do 200 [ms]). (Bień A. (60%), Szkoła M. (40%), 2014, **Generacja plazmy laserowej wiązką impulsową lasera CO₂**, nr zgłoszenia wynalazku: P.409550);

Przedmiotem wynalazku jest generacja plazmy laserowej wiązką impulsową lasera CO₂. Wygenerowana plazma może mieć zastosowanie – zarówno w aspekcie badawczym jak i

przemysłowym. Dodatkowa energia w postaci obłoku plazmowego generowana równocześnie z początkiem cyklu generacji impulsu laserowego jest dodatkowym źródłem ciepła, które może być wykorzystane w przypadku kształtowania warstwy wierzchniej materiałów, może być również źródłem generacji fali udarowej, wprowadzającej naprężenia ściskające w warstwie wierzchniej materiału, zwiększającej mikrotwardość jak i właściwości wytrzymałościowe. Powszechnie stosowany obłok wygenerowanej plazmy laserowej jest zależny w dużym stopniu od długości fali generowanej przez laser, i jest co najmniej dziesięciokrotnie mniejszy od obłoku plazmy generowanej przez laser CO₂.

Plazmę pozyskiwano na początku generacji impulsu. Wraz z początkiem generacji impulsu następował zapłon plazmy w punkcie nad powierzchnią materiału, „punkt rozszerzał się”, przyjmował postać kuli, która po ok. 1/3 czasu trwania impulsu eksplodowała i zaczynała zanikać (rys.1).



Rys.1. Zdjęcia kolejnych etapów generacji plazmy. Liczba oznacza kolejne ujęcia szybką kamerą, . nagrane co 0.222 ms. Pierwsza klatka - 453, kolejne klatki - co 0,222 ms, a następnie obrazy otrzymane co 10 klatek.

W wyniku oddziaływania impulsów laserowych na materiał wraz z generacją plazmy i jej udarowym oddziaływaniem na roztopiony materiał, uzyskano powierzchnię materiału o bardzo wysokiej, lecz zróżnicowanej twardości. W zależności od miejsca pomiaru wahała się w granicach 3200–3100 HV, 1800 HV, 400–300 HV. Mikrostruktura bardzo silnie zdefektowana z obszarami gęstych dyslokacji, naprężenia pod powierzchnią ściskające. (Bień A., Szkodo M., 2015, Surface treatment of C80U steel by long CO₂ laser pulses, Journal of Materials Processing Technology, 217, s. 114-121 ; p-ISSN: 0924-0136).

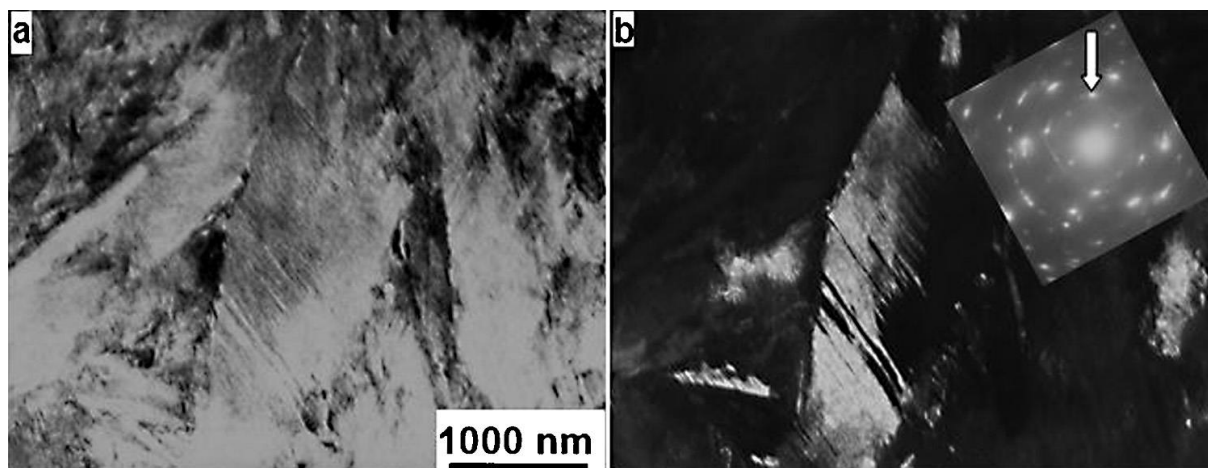


Fig. 6. TEM images in bright (a) and dark (b) field, made in the selected diffraction reflex (depicted by arrow) showing micro twins in martensitic plates – rise.

Rys.6. Obrazy TEM w polu jasnym (a) i ciemnym (b), obraz dyfrakcyjny świadczy o dużym zdefektowaniu mikrostruktury.

Wygenerowanie obłoku plazmy, równocześnie z impulsem laserowym lasera CO₂, w początkowej fazie impulsu, ściśle związane z wielkością i długością czasu generacji impulsu i energia impulsu, daje szerokie perspektywy zastosowania tego efektu, zarówno w aspekcie kształtowania powierzchni i mikrostruktury warstwy wierzchniej materiału na który oddziałuje wiązka laserowa, jak i wykorzystanie obłoku plazmy do innych aplikacji, np. do nakładania cienkich warstw materiału z postaci gazowej.

Dodatkowa energia w postaci obłoku plazmowego generowana równorzędnie z impulsem laserowym, jako dodatkowe źródło ciepła powoduje podwyższenie gradientu temperatury pomiędzy obszarem powierzchni a rdzeniem materiału laserowanego, co zmienia kinetykę przemian fazowych, i w efekcie powoduje korzystne zmiany mikrostruktury.

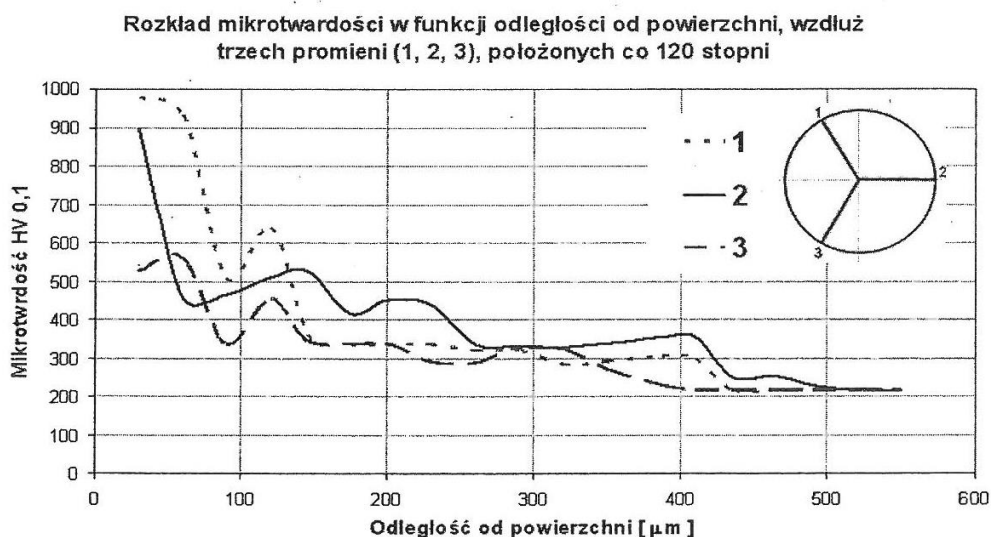
B. 2) Wpływ laserowej modyfikacji warstwy wierzchniej na mikrotwardość

Wykonano badania porównawcze rozkładów mikrotwardości w warstwie wierzchniej stali 50H po obróbce elektromechanicznej i laserowej. Maksymalna mikrotwardość była zbliżona przy stosowaniu zarówno obróbki laserowej jak i elektromechanicznej (ponad 1200 HV_{0,1}) natomiast grubość warstwy utwardzonej była kilkakrotnie mniejsza w przypadku obróbki laserowej (Bień A., Nakonieczny A., Nalepa K., 1994, Porównanie wybranych właściwości warstw wierzchnich po obróbkach elektromechanicznej i laserowej. V Polsko-Niemieckie Sympozjum Nauka dla praktyki, Politechnika Gdańska, Gdańsk, s.132÷38).

Interesujące wyniki (rys.1) uzyskano naświetlając w sposób spiralny energią laserową CO₂ wałki o średnicy 8mm ze stali 50H (Bień A., Kłysz S., 2008, Badania struktury i mikrotwardości warstwy konstituowanej laserowo na stali konstrukcyjnej, Prace Naukowe ITWL, Zeszyt nr 23, s.37-49).

Charakterystyczny rozkład mikrotwardości wskazuje na strukturę warstwy wierzchniej z wzajemnie przeplatającymi się obszarami o wyższej i niższej mikrotwardości. W strefie przypowierzchniowej występuje struktura dendrytyczna. Na bazie pomiarów dyfraktometrycznych można potwierdzić występowanie w tej strefie dwóch twardych mikrostruktur: martenzytu i chromitu.

Przedstawione wyniki badań sugerują, że stal nie tylko można odpowiednio utwardzić, lecz równocześnie wytworzyć warstwę antykorozyjną. Wyniki badań wskazują, że tematyka pozostaje otwarta i jednocześnie istnieje potrzeba przeprowadzenia dalszych badań, m. in. W zakresie analizy odporności na korozję wytworzonej warstwy, jak również zbadania właściwości wytrzymałościowych części maszyn z wytworzoną warstwą wierzchnią.



Rys. 1. Rozkład mikrotwardości na przekroju próbki walcowej, naświetlonej wiązką laserową

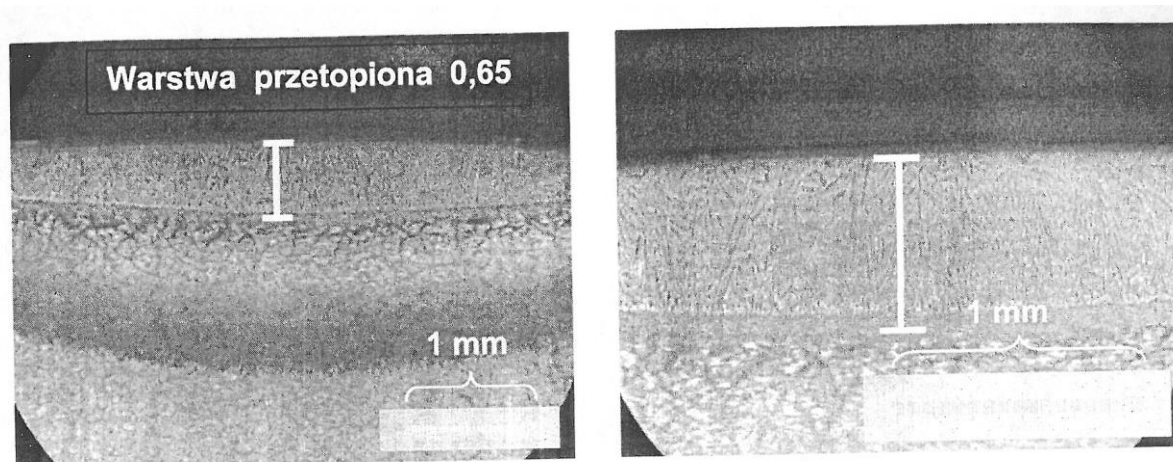
Rozkłady mikrotwardości opisano funkcją wiążącą parametry obróbki laserowej i uzyskane efekty (Bień A., 2003, Analysis of the effects of laser treatment parameters on the thickness of a hardened steel layer. Technical Science, No. 6, p. 149 – 157; Bień A., 2006, Optymalizacja laserowego procesu utwardzania stali. Poster. VIII Sympozjum techniki laserowej, Szczecin-Świnoujście.)

B.3) Wpływ laserowej modyfikacji warstwy wierzchniej na chropowatość powierzchni i grubość warstwy utwardzonej

Analizie poddano parametry wiązki laserowej, prędkość jej przemieszczania oraz położenie ogniska względem powierzchni próbki w aspekcie uzyskanej grubości warstwy utwardzonej, badanej stali 50H. Na powierzchnię próbki oddziaływano wiązką lasera CO₂ o mocy 75W. Grubość warstwy utwardzonej oceniano na podstawie rozkładów mikrotwardości na przekroju poprzecznym warstwy wierzchniej. Do analizy wyników badań zastosowano program statystyczny. Uzyskano funkcje matematyczne uzależniające grubość warstwy utwardzonej od parametrów obróbki. Przedstawiono graficznie uzyskane zależności. Określono istotność wpływu poszczególnych parametrów obróbki na grubość warstwy utwardzonej i poczyniono próby interpretacji fizycznej zachodzących zjawisk. Odniesiono uzyskane wyniki badań grubości warstwy utwardzonej do chropowatości tejże powierzchni po obróbce laserowej.

(Bień A., 2003, Analysis of the effects of the laser treatment parameters on the roughness of a modified surface layer of steel. Technical Science, No 6, p 159 – 166).

Hartowanie laserowe warstwy wierzchniej stali może być prowadzone zarówno ze stanu ciekłego jak i stałego. Przeważnie przy hartowaniu ze stanu ciekłego występuje również obszar w warstwie wierzchniej zahartowany ze stanu stałego. W wyniku analizy metalograficznej można wyraźnie określić położenie tych obszarów. W artykule (Bień A., Szot A., 2004, Analiza eksperymentalno - numeryczna procesu laserowego hartowania stali. Inżynieria Powierzchni nr 1/2004, s. 28-34) przedstawiono wyselekcjonowane parametry hartowania laserowego otrzymane przy stosowaniu dwóch metod : eksperymentalnej i obliczeniowej, wzajemnie uzupełniających się. Określono również poszczególne obszary warstwy wierzchniej (rys.6.) i skorygowano temperatury uzyskane metodą elementów skończonych.



Rys. 6. Struktura metalograficzna próbki nr 1. Trawiono FeCl_3 roztwór alk. Przekrój próbki w osi oddziaływania wiązki laserowej. Widoczna warstwa przetopiona składająca się z kryształów słupkowych i strefy kryształów zamrożonych.

Wyłoniono eksperymentalnie parametry obróbki laserowej, przy których można uzyskać największą grubość warstwy zahartowanej. Zależności pomiędzy parametrami obróbki laserowej a grubością warstwy utwardzonej zostały opisane funkcją ciągłą.

B.4) Wpływ laserowej modyfikacji warstwy wierzchniej na własności użytkowe, wyrażony przy pomocy krzywych propagacji pęknięć zmęczeniowych

Metodykę opisu krzywych propagacji pęknięć zmęczeniowych przy pomocy równań NASGRO przedstawiono w artykule (Kłysz S., Bień A., Szabracki P., 2008, *Zastosowanie równania NASGRO do opisu krzywych propagacji pęknięć zmęczeniowych*, XXII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pęknięcia, Bydgoszcz - Pieczyńska, 13-16.05.

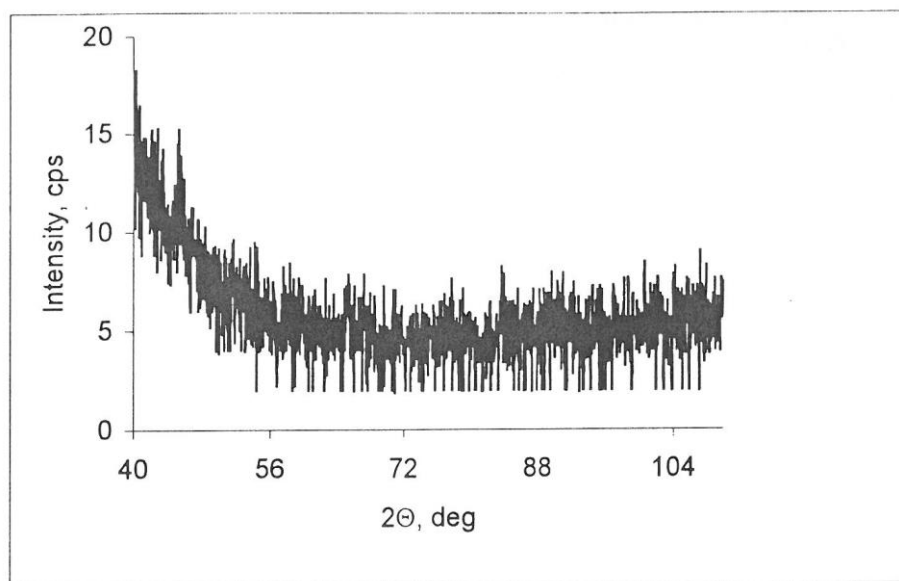
W pracy przedstawiono równanie NASGRO opisujące zależność prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych da/dN w funkcji szeregu parametrów materiałowych i obciążeniowych. W szczególności zobrazowano wpływ poszczególnych parametrów na przebieg i możliwości dopasowania ww. równania do danych doświadczalnych. Ze względu na dużą elastyczność omawianego wzoru w opisie dowolnych i złożonych przebiegów doświadczalnych równanie NASGRO znalazło szerokie zastosowanie praktyczne i jest aktualnie uznawane za najlepiej opisujące zależność $da/dN = f(\Delta K)$.

Z zastosowaniem tej metodyki opisano również propagację pęknięć zmęczeniowych po naświetlaniu laserowym (Bień A., Kłysz S., 2012, Metoda blokady propagacji pęknięć zmęczeniowych, Patent Nr 212181. Właściciel: Uniwersytet Warmińsko -Mazurski w Olsztynie, Polska, Urząd Patentowy).

B.5) Wpływ parametrów wiązki laserowej na proces cięcia laserowego

Dzięki możliwości koncentracji ciepła na obszarach o mikronowej wielkości powierzchni, lasery wykorzystywane są do spawania i cięcia materiałów trudno topliwych, takich jak korund, diament, szkło, ceramika, oraz łączenia ze sobą materiałów o różnych właściwościach fizycznych. Dotychczas stosowane techniki w procesach cięcia laserowego tej grupy materiałów to perforacja, lub wstępne podgrzewanie, w wyniku którego następuje minimalizacja gradientu temperatury i eliminacja efektu szoku termicznego i tym samym eliminacja pęknięć wszelkiego rodzaju. Ponieważ cięcie laserowe z podgrzewaniem jest metodą kłopotliwą i nieekonomiczną, a metoda perforacji nie zapewnia dobrej jakości powierzchni w płaszczyźnie cięcia, opracowano metodę cięcia ceramiki laserem CO₂ (Bień A., 2000, Laserowe techniki cięcia i spawania materiałów. „I Warmińsko – Mazurskie Sympozjum: Metody i techniki spawania elementów maszyn i konstrukcji metalowych, s. 31-38.) bez wstępnego podgrzewania materiału. Cięciu poddano płytki ceramiczne Al₂O₃ (o wymiarach 20x8x0,6) oraz płytki z ceramiki piezoelektrycznej Pb(Zr,Ti)O₃ (20x15x1,6). Zakres parametrów obróbki ustalono na podstawie wskazówek literaturowych, z tym że eliminując warunek wstępnego podgrzewania materiału dążono do zastosowania ekstremalnych parametrów wiązki laserowej, mając na celu eliminację pęknięć w procesie cięcia: minimalną moc średnią przy pracy impulsowej, możliwą do uzyskania na tym urządzeniu (150 W) i maksymalną w tych warunkach energię w impulsie. Chcąc uniknąć zjawiska przekazywania ciepła przez roztopioną ceramikę w głąb materiału, w strefę obróbki podawano tlen pod bardzo wysokim ciśnieniem, w celu usunięcia roztopionego materiału, jak i zmniejszenia chropowatości w płaszczyźnie cięcia.

Ocena chropowatości powierzchni w płaszczyźnie cięcia wykazała, że lepszą gładkość powierzchni uzyskuje się przy cięciu ceramiki piezoelektrycznej. Wartość Ra wynosi 7,46 µm dla ceramiki Al₂O₃ i 2,16 µm dla ceramiki Pb(Zr, Ti)O₃.



Rys.4. Obraz rentgenograficzny warstwy wierzchniej od strony powierzchni cięcia płytki piezoelektrycznej (Rentgenograf): warstwa amorficzna.

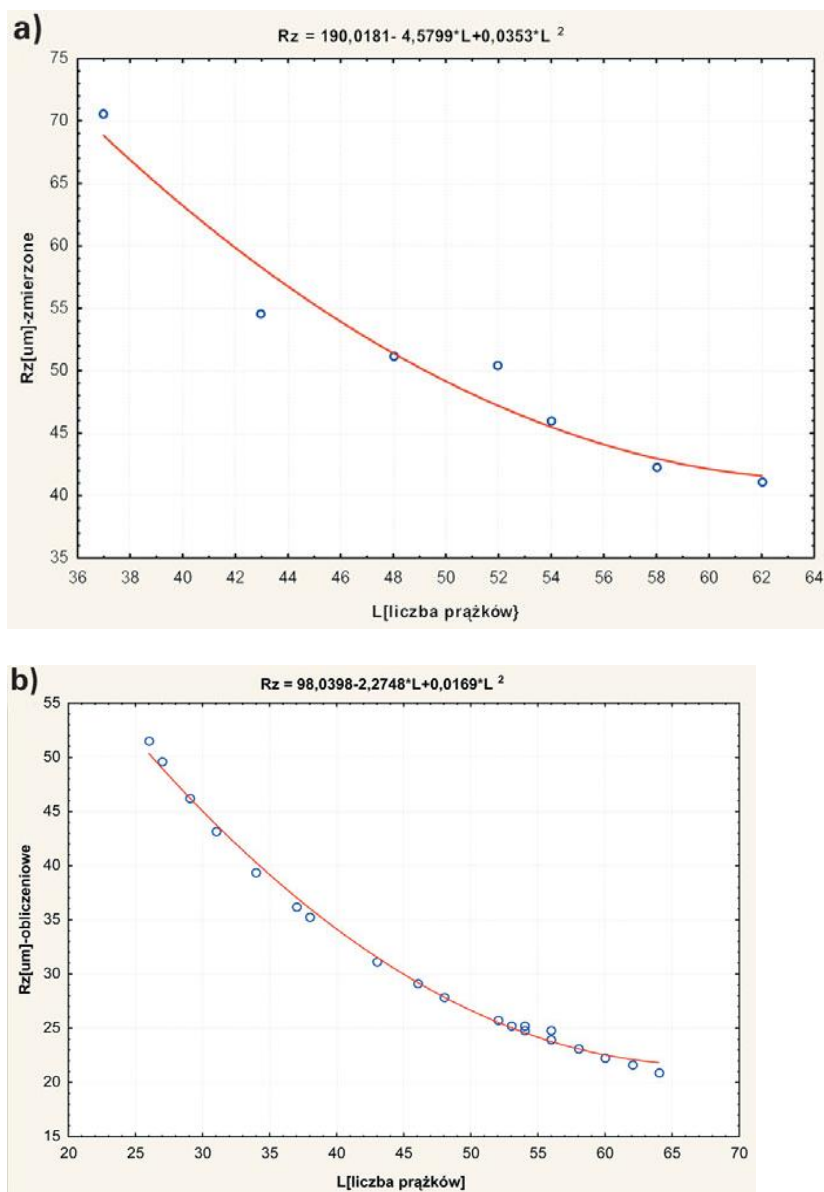
Zastosowane metody badawcze oceny powierzchni cięcia materiału nie wykazały pęknięć materiału w strefie cięcia. Powierzchnia cięcia jest pokryta cienką warstwą amorficzną, powstałą podczas usuwania warstwy roztopionego materiału ze strefy cięcia przy pomocy gazu, oraz schładzania z dużą szybkością. Istnieje możliwość cięcia ceramiki przy pomocy lasera CO₂o mocy 1,75 kW, bez wstępnego podgrzewania próbki.

Analizę eksperymentalną i teoretyczną problematyki cięcia laserowego stali węglowych przedstawiono w licznych artykułach mojego autorstwa i współautorstwa.

Stosowanie strumienia tlenu wspomagającego cięcie laserowe stali węglowych oprócz oszczędności energii laserowej, ma również niekorzystny wpływ na proces – w efekcie powoduje powstawanie regularnych prążków na powierzchni krawędzi cięcia, co wynika z nieciągłości procesu. Etapy procesu, takie jak: nagrzewanie, wypalanie, wygaśnięcie, ponowna inicjacja spalania, prowadzą do utworzenia prążka. Następuje wielokrotne wygasanie i wznowianie reakcji spalania, ponieważ czoło przecinania przesuwa się szybciej w kierunku cięcia niż wiązka laserowa i w pewnym momencie wygasa proces spalania przed wiązką. Po pewnym czasie wiązka znajduje się w miejscu, gdzie spalanie zanikło, i powtarza się etap grzania materiału, spalania i wygaśnięcia.

Powstawanie prążków jest więc nieuniknione i prowadzi do pogorszenia jakości cięcia, natomiast stosując odpowiednio dobrane parametry cięcia laserowego dla konkretnego gatunku stali, można zminimalizować wielkość prążków, jednocześnie je zagęszczając, co prowadzi z kolei do poprawy jakości cięcia. Analizując eksperymentalnie i teoretycznie wpływ parametrów cięcia laserowego stali na długość prążka, uzyskano funkcję opisującą proces cięcia laserowego, pozwalającą na ustawienie parametrów procesu, pozwalających na uzyskanie równomiernych prążków na całej grubości ciętego materiału. (Bień A. Piela T., 2010, Wpływ parametrów cięcia laserowego stali na długość prążka, Technical News, s. 78-79).

Wykazano również eksperymentalnie wpływ liczby prążków na chropowatość powierzchni krawędzi cięcia (rys. a); opisano również zależnością funkcyjną wpływ parametrów obróbki laserowej na chropowatość, przy współczynniku korelacji wielokrotnej $R=0,967$ (Bień A., 2011, Teoretyczno-eksperymentalny dobór parametrów cięcia laserowego stali węglowej, Przegląd Mechaniczny, Zeszyt nr 10, s. 32-39).



Rys. 5. Zależność chropowatości od liczby prążków L na krawędzi cięcia: a) wartości Rz (ISO) mierzone, b) wartości Rz obliczeniowe.

Funkcję tę poddano dalszej analizie (Bień A., Żarnowski P., 2011), Optymalizacja parametrów cięcia laserowego. Przegląd Mechaniczny, 12, s.37-40), optymalizując parametry cięcia laserowego.

Przeprowadzono optymalizację jedno i dwukryterialną. W wyniku optymalizacji jednokryterialnej uzyskany wynik teoretyczny poddano korekcie doświadczałnej i ostateczny wariant poddano optymalizacji dwukryterialnej. Celem optymalizacji dwukryterialnej było

znalezienie parametrów cięcia laserowego, przy których otrzymuje się największą liczbę prążków, przy założeniu, że długość prążka regularnego jest równa grubości ciętego materiału. Cel osiągnięto oraz potwierdzono doświadczalnie. Otrzymany matematycznie wynik optymalizacji dwukryterialnej z dużym przybliżeniem potwierdza wynik otrzymany laboratoryjnie dla grubości blachy 1 mm. Natomiast różnice wyników obliczeniowych i rzeczywistych, należałoby tłumaczyć wpływem faktycznych warunków obróbki i parametrów nieuwzględnianych w tym procesie, takich np. jak wielkość plamki w ognisku, lub kształt dyszy.

B.6) Optymalizacja parametrów laserowego drażenia małych otworów w stali 1H18N9T

Opracowano oryginalną technologię laserowego drażenia małych otworów w listwach ze stali austenitycznej 1H18N9T, będących ramą sit stosowanych w technologii żywności do produkcji serków homogenizowanych. Rozwiązano problem – obróbkę skrawaniem, wiercenie średnic otworów mniejszych od 0,8mm, zastąpiono drażeniem laserowym. Wyeliminowano problem łamania się i zakleszczania się wiertel w miękkiej stali austenitycznej, jak i wydrażone otwory lekko stożkowe, pozwalały na łatwiejszy proces lutowania drutów w tych otworach (Bień A., 2004, Technologia laserowego drażenia otworów w stali stopowej, Wdrożenie: „REMOPOL”, Opole).

B.7). Jednorodność warstwy wierzchniej konstytuowanej laserowo

Warstwa wierzchnia po obróbce laserowej w większości przypadków nie jest jednorodna, ze względu na niejednorodny rozkład energii na przekroju wiązki laserowej, zależny od modu TEM wiązki. Jednorodność warstwy wierzchniej możemy modyfikować kształtując odpowiednio optykę laserową (np. zwierciadła modyfikujące kształt i energię wiązki laserowej), lub dobierając parametry obróbki laserowej. W przypadku modyfikacji powierzchni wielokrotnie przekraczających przekrój wiązki laserowej, modyfikacja jest ściśle związana z właściwościami warstwy wierzchniej, jakie chcemy uzyskać po modyfikacji. Tą problematyką zajmowałam się przy realizacji projektu (Bień A.: Optymalizacja warunków kształtowania warstwy wierzchniej przy pomocy wiązki laserowej, przy założonym kryterium jednorodności. Ocena jednorodności. Grant uczelniany 07060.205. Raport nr 07060.205. 1997 – 1998r, Akademia Rolniczo-Techniczna w Olsztynie, s. 1-68). Rozważaniom poddano różne kryteria jednorodności (rozkład mikrotwardości na przekroju warstwy wierzchniej, lub tylko na określonej głębokości, stan naprężeń, mikrostruktura itp.). Metodyka oceny jednorodności, w zależności od celu konstytuowania, była różna, niszcząca lub nieniszcząca.

W publikacji (Bień A., Szachnowski W: Evaluation of properties of the laser modified surface layer. Acta Physica Polonica, A, Vol. 96 (1999) No.2 , Polish Academy of Science Institute of the Physics and Polish physical society. Warszawa, v 263-273) przedstawiono analizę jednorodności warstwy wierzchniej ukonstytuowanej prostokątną wiązką laserową, stosując jednocześnie kilka metod, co pozwoliło na ocenę jednorodności w różnych aspektach.

B.8) Przetapianie, stopowanie i hartowanie laserowe

Przetapianie laserowe stosowane jest do przetapiania powłok nałożonych inną technologią związanych adhezyjnie z powierzchnią. Prowadzi się również przetapianie laserowe z

jednoczesnym podawaniem w przetopiony mikroobszar innego składnika stopowego w postaci proszkowej, celem zmiany składu chemicznego warstwy wierzchniej. Te metody były stosowane w opracowaniach autora. Analizę właściwości powłoki ceramicznej Al_2O_3 , nałożonej plazmowo na stal austenityczną i przetopionej laserowo, przedstawiono w artykule (Szkodo M., Bień A., Antoszkiewicz M., 2016, Effect of plasma sprayed and laser re-melted Al_2O_3 coatings on hardness and wear properties of stainless steel, Ceramics International, 42 (9), s. 11275-11284 ; p-ISSN: 0272-8842). Badano wpływ wiązki laserowej o różnych parametrach na mikrostrukturę, skład fazowy, właściwości mechaniczne i tribologiczne powłoki ceramicznej. Oceny dokonywano za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej, mikroskopii świetlnej, tomografii komputerowej, techniki dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego i testów nanoindencyjnych. Odporność na zużycie ściernie mikro powłok badano przy użyciu nanoindentera. Badania wykazały poprawę właściwości mechanicznych i tribologicznych spowodowanych obróbką laserową.

Laserowe przetapianie powłok (NiCrBSi), nakładanych plazmowo na stal do ulepszenia cieplnego (0,4%C) w celu zwiększenia odporności korozyjnej, stosowano w celu zwiększenia przyczepności i twardości warstwy wierzchniej (Bień A.: Laser remelting of thermal sprayed surface layers. Proceedings of SPIE –The International Society for Optical Engineering, v 4238, 2000, p 137 – 141). Uzyskano warstwy przetopione o twardości ponad dwukrotnie większej (685HV) w odniesieniu do powłok plazmowych i trzykrotnie w odniesieniu do twardości wyjściowej materiału rdzenia. Warstwy całkowicie przetopione mają łagodny gradient spadku mikrotwardości na przekroju warstwy wierzchniej.

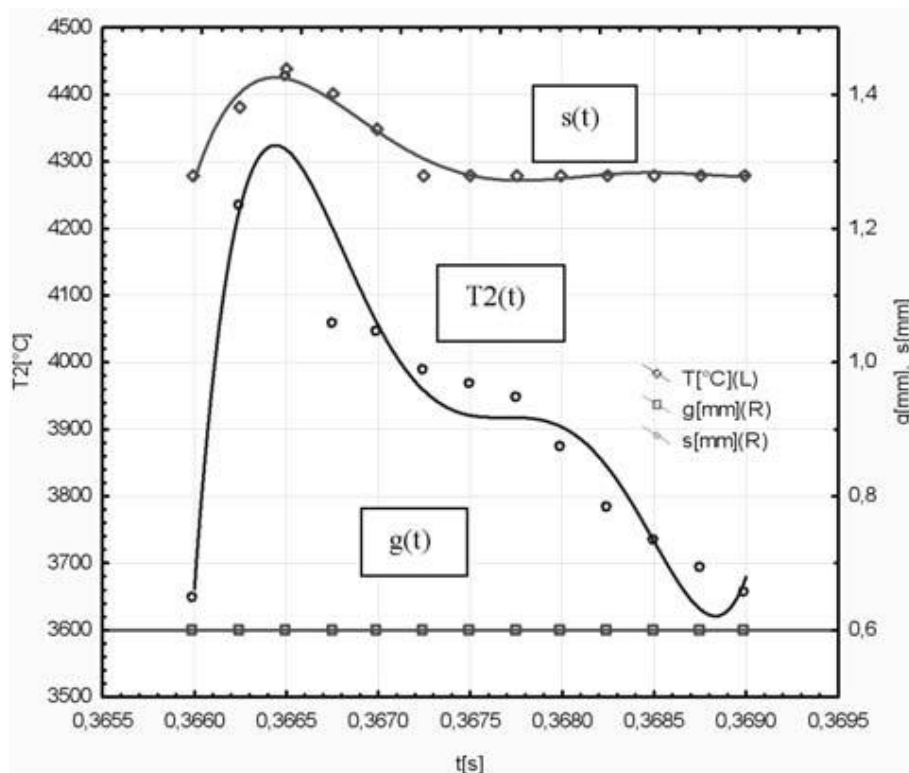
Wykonano pod opieką autora pracę magisterską pt.: „Projekt i wykonanie stanowiska do stopowania laserowego”. Stanowisko, z głowicą do podawania proszku w jeziorko stopionego metalu, jest wykorzystywane aktualnie do wykonywania prac dyplomowych i opracowań naukowych.

B.9) Modelowanie numeryczne procesu obróbki laserowej

Modelowanie numeryczne wprowadzono do badań oddziaływania wiązki laserowej na materiał, ze względu na bardzo krótkie czasy zachodzących procesów i praktycznie brak możliwości przeprowadzenia fizycznych pomiarów ich przebiegu. Analizę tej problematyki przedstawiono w kilku artykułach.

W artykule (Bień. A, Dacko A., Osiński J., Szot A., 2004, Modelowanie numeryczne procesu laserowej obróbki, Przegląd Mechaniczny, Zeszyt 6, s.16-19) podjęto próbę modelowania laserowej obróbki powierzchniowej stali za pomocą MES. Obliczono rozkłady temperatur w ścieżce i przy punktowym jej oddziaływaniu. Wykonano obliczenia naprężeń termicznych po zakończeniu procesu naświetlania i schłodzeniu próbki.

W opracowaniu (Bień A., 2014, Analiza zmian temperatury w warstwie wierzchniej stali podczas impulsowego oddziaływania wiązki laserowej (Analysis of temperature changes in the surface layer during laser pulse impact), Inżynieria Materiałowa, 35 (5), s. 354-357 ; p-ISSN: 0208-6247), przedstawiono w postaci funkcji - zależności temperatury w warstwie wierzchniej materiału od czasu trwania jednego impulsu, oraz serii impulsów laserowych, oraz określono wpływ ilości energii w impulsie na grubość warstwy wierzchniej objętej zmianami temperatury w trakcie naświetlania (Rys.7).



Rys. 7. Rozkład temperatury na powierzchni próbki w środku plamki laserowej w trakcie impulsu i przerwy między impulsami dla $t = 0,366 \div 0,369$ s i średniej mocy $P_{\text{sr}} = 1300$ W, krzywa $T_2(t)$. Grubość próbki objęta zmianą temperatury w czasie jednego impulsu g , mm, s , mm – szerokość obszaru na powierzchni próbki objęta zmianą temperatury w czasie jednego impulsu

Porównanie rozkładów temperatury w warstwie wierzchniej stali, uzyskanych metodą obliczeń numerycznych (MES) przy modelowaniu obciążenia powierzchni energią laserową, z wynikami eksperymentalnymi, przedstawiono w artykule (Bień A., 2015, Numeryczna analiza procesu obróbki laserowej w aspekcie badań materiałowych (Numerical analysis of temperature changes in the surface layer during laser pulse impact), Inżynieria Materiałowa, 36 (3), s. 143-147 ; p-ISSN: 0208-6247). Na bazie otrzymanych wyników stwierdzono, że obszar pulsacji temperatury (obliczenia MES) odpowiada obszarowi, który uległ degradacji w trakcie procesu.

B.10) Wpływ laserowej modyfikacji warstwy wierzchniej na mikrostrukturę

Laserowa modyfikacja warstwy wierzchniej jest ściśle związana ze zmianami mikrostruktury, niezależnie od metody jej konstytuowania, i dotyczy wszystkich przedstawionych metod. Ponieważ procesy fizyczne zachodzące w wyniku laserowej modyfikacji przebiegają z bardzo dużą szybkością, zarówno proces krystalizacji, jak i nagrzewania są odmienne od procesów konwencjonalnych. Powstałe mikrostruktury są przeważnie o wysokiej dyspersji. Niektóre procesy, związane z roztopianiem, nie zawsze przebiegają do końca, więc powstała mikrostruktura jest zbliżona do mikro-kompozytu (Bień A., 2006, Kształtowanie struktury mikro - kompozytu w procesie laserowego utwardzania stali. Poster. 8 Sympozjum techniki laserowej. Szczecin-Świnoujście).

Skomplikowane mikrostruktury uzyskano przy wielokrotnym przetopieniu (Bień A., 2006, Microstructure investigation and phase analysis in layer after laser treatment, referat na konferencji Mechanika, Gdańsk); (Breczko T., Bień, A., 2006, Influence of multiple melting on the structure and geometry of the surface layer of 50H steel, p.1-7. *Ninth International Workshop on Nondestructive Testing and Computer Simulations*, Jun 6-12, Physics and Mechanics Faculty, St. Petersburg State Polytechnical University [et al.] (conf. org.) (A. I. Melker Ed(s).), Proc. SPIE vol. 6253, (publ. by) Bellingham, Wash, SPIE, pp. 6253OE.

DOI : 10.1117/12.676394): 10.1117/12.676394). Wynikało to wielokrotnego, cyklicznego podgrzewania z przetopieniem lub bez przetopienia tej samej powierzchni.

Autorski wkład

**w Dziedzinę Nauk Technicznych, rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn
stanowi:**

1. **Eksperymentalne oszacowanie wpływu parametrów obróbek elektromechanicznej oraz laserowej na wybrane właściwości warstwy wierzchniej części maszyn, przedstawione w postaci funkcji ciągłych w danym obszarze zmienności parametrów obróbki.**
2. **Opisanie z zastosowaniem metody numerycznej rozkładu temperatury w warstwie wierzchniej stali podczas impulsowego oddziaływania wiązki laserowej, oraz określenie grubości warstwy przypowierzchniowej w której występuje pulsacja temperatury w okresie stabilizacji procesu.**
3. **Uzyskanie pulsującej plazmy laserowej w procesie generacji długich impulsów laserowych przy pomocy lasera molekularnego i wykorzystanie ich do konstytuowania polikrystalicznej warstwy wierzchniej stali o twardościach w zakresie 2000 – 3000 HV_{0,1}.**
4. **Uzyskanie zjawiska blokady propagacji pęknięć zmęczeniowych na stali 30HGSNA przy pomocy odpowiedniego doboru parametrów obróbki laserowej i usytuowania ścieżek laserowych względem wierzchołka pęknięcia, wykonanie analizy wpływu zmian mikrostrukturalnych w warstwie wierzchniej stali po obróbce laserowej, powodujących blokadę propagacji pęknięć zmęczeniowych, ocena stanu naprężeń oraz analiza ich rozkładu w warstwie wierzchniej stali po obróbce laserowej, mających wpływ na blokadę propagacji pęknięć zmęczeniowych.**

Anna Bień