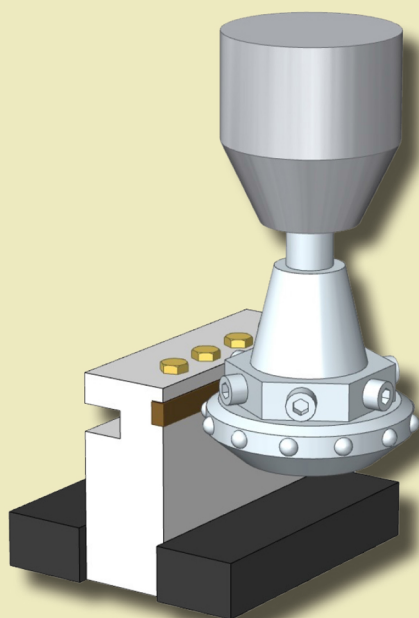




Agnieszka Skoczylas

Kazimierz Zaleski

Wpływ warunków nagniatania na właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów wycinanych laserem



Lublin 2020

M
O
N
O
G
R
A
F
I
E

Wpływ warunków nagniatania na
właściwości warstwy wierzchniej
przedmiotów wycinanych laserem

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Agnieszka Skoczylas
Kazimierz Zaleski

Wpływ warunków nagniatania na właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów wycinanych laserem



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2020

Recenzenci:

prof. dr hab. Barbara Surowska

prof. dr inż. Włodzimierz Przybylski

Redakcja i skład: Agnieszka Skoczylas

Badania zostały sfinansowane z Projektu Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie umowy nr 030/RID/2018/19

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-440-0

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59

Druk: DjaF – 30-092 Kraków, ul. Kmiotowicza 1/1
www.djaf.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 50 egz.

SPIS TREŚCI

WYKAZ OZNACZEŃ	9
ABSTRACT	12
1. WPROWADZENIE	13
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA	15
2.1. Właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów wycinanych laserem	15
2.1.1. Chropowatość powierzchni po cięciu laserem	19
2.1.2. Stan naprężeń własnych w przedmiotach po cięciu laserem	22
2.1.3. Mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem	23
2.2. Obróbka wykończeniowa powierzchni po cięciu laserem	26
2.3. Charakterystyka obróbki nagniataniem	27
2.3.1. Właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu statycznym	28
2.3.2. Właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu dynamicznym	32
3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ	36
3.1 .Obiekt i zakres badań	36
3.2. Materiał stosowany w badaniach	37
3.3. Metodyka badań	39
3.3.1. Badania chropowatości powierzchni	39
3.3.2. Badania mikrotwardości i mikrostruktury warstwy wierzchniej	40
3.3.3. Badania rentgenograficzne	41
3.3.4. Badania naprężeń własnych	42
3.3.5. Badania dokładności geometrycznej	43
3.4. Stanowiska obróbkowe	46
3.4.1. Stanowisko do frezowania wykończeniowego	46
3.4.2. Stanowisko do nagniatania odśrodkowego	46
3.4.3. Stanowisko do nagniatania tocznego	48
4. BADANIA WSTĘPNE	50
4.1. Wyznaczenie liczebności próby w badaniach warstwy wierzchniej po nagniataniu odśrodkowym	50
4.2. Wyznaczanie liczebności próby w badaniach warstwy wierzchniej po nagniataniu tocznym	52

SPIS TREŚCI

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ	53
5.1. Chropowatość powierzchni	53
5.1.1. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem	53
5.1.2. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym	55
5.1.3. Chropowatość powierzchni po frezowaniu przedmiotów niewycinanych laserem	58
5.1.4. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym	59
5.1.5. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym	69
5.1.6. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu tocznym	77
5.1.7. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym	86
5.1.8. Chropowatość powierzchni po frezowaniu i nagniataniu odśrodkowym przedmiotów nie wycinanych laserem	90
5.1.9. Podsumowanie badań chropowatości powierzchni	96
5.2. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej	97
5.2.1. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem	97
5.2.2. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym	100
5.2.3. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej po frezowaniu przedmiotów nie wycinanych laserem	101
5.2.4. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym	102
5.2.5. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym	107
5.2.6. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu tocznym	111
5.2.7. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym	114
5.2.8. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej po frezowaniu i nagniataniu odśrodkowym przedmiotów nie wycinanych laserem	116
5.2.9. Podsumowanie badań mikrostruktury i mikrotwardości	120

SPIS TREŚCI

5.3. Naprężenia własne	121
5.3.1. Naprężenia własne po cięciu laserem przedmiotów.....	121
5.3.2. Naprężenia własne po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym przedmiotów	122
5.3.3. Naprężenia własne po frezowaniu przedmiotów nie wycinanych laserem	123
5.3.4. Naprężenia własne po cięciu laserem i nagniataniu osiowym przedmiotów	123
5.3.5. Naprężenia własne po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu osiowym przedmiotów.....	126
5.3.6. Naprężenia własne po cięciu laserem i nagniataniu tocznym przedmiotów	127
5.3.7. Naprężenia własne po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym przedmiotów.....	128
5.3.8. Naprężenia własne po frezowaniu i nagniataniu osiowym przedmiotów nie wycinanych laserem	130
5.3.9. Podsumowanie badań naprężeń własnych	132
5.4. Dokładność geometryczna	133
5.4.1. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem	133
5.4.2. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym.....	134
5.4.3. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu osiowym	135
5.4.4. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu osiowym	137
5.4.5. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu tocznym	139
5.4.6. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym	141
5.4.7. Podsumowanie badań dokładności geometrycznej	142
6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ	143
6.1. Nagniatanie osiowe	144
6.2. Nagniatanie toczne	149
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE.....	152
7.1. Rezultaty poznawcze.....	152
7.2. Rezultaty praktyczne	154

SPIS TREŚCI

7.3. Kierunki dalszych badań.....	154
LITERATURA	155
SPIS RYSUNKÓW	168
SPIS TABEL.....	175

Wykaz oznaczeń

a	– grubość ciętego elementu,
Δa	– zmniejszenie grubości,
BLS	– Boundary Layer Separation Point (linia podziału warstw granicznych),
d_N	– średnica elementu nagniatającego,
e	– stopień umocnienia,
EDM	– Electrical Discharge Machining (obróbka elektroerozyjna),
f_{Hz}	– częstotliwość pracy generatora lasera,
f	– posuw,
f_p	– przesuw poprzeczny,
F	– siła nagniatania,
F	– wartość statystyki testowej Fishera-Snedecora,
g	– dosuw,
g_h	– grubość warstwy utwardzonej,
i	– ilość przejść,
K_{Ra}	– współczynnik zmniejszenia parametru Ra chropowatości powierzchni,
K_{Rz}	– współczynnik zmniejszenia parametru Rz chropowatości powierzchni,
KAF	– krzywa Abbotta-Firestone'a,
LAB	– Laser Assisted Burnishing (nagniatanie w obecności wiązki lasera),
LAMM	– Laser Assisted Mechanical Micromachining (mechaniczna obróbka wspomagana wiązką lasera),
n	– prędkość obrotowa,
n_l	– liczebność próby,
n_o	– liczba powtórzeń,
N	– narzędzie,
PO	– przedmiot obrabiany,
Ra	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,
R_e	– granica plastyczności,
Rk	– głębokość rdzenia chropowatości,
R_m	– wytrzymałość materiału na rozciąganie,
Rmr	– udział materiałowy profilu chropowatości,
Rpk	– zredukowana wysokość wzniesień,
Rt	– całkowita wysokość profilu chropowatości,
Rvk	– zredukowana głębokość wgłębień,
Rz	– największa wysokość profilu chropowatości,
$Rz5$	– średnia wysokość profilu powierzchni cięcia,
Rzt	– teoretyczna wysokość chropowatości,
Sa	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu 3D,

WYKAZ OZNACZEŃ

S_p	– wysokość najwyższego wzniesienia profilu 3D,
S_v	– wartość najniższego wgłębienia profilu 3D,
S_z	– maksymalna wysokość profilu 3D,
SP	– Shot Peening (nagiatanie dynamiczne),
SWC	– strefa wpływu ciepła,
t	– odległość dwóch płaszczyzn,
u	– tolerancja prostopadłości lub nachylenie powierzchni cięcia,
u_F	– tolerancja prostopadłości powierzchni po frezowaniu,
u_{OB}	– tolerancja prostopadłości po obróbce wykończeniowej,
v	– prędkość cięcia wiązką lasera,
v_c	– prędkość skrawania,
v_g	– prędkość obwodowa głowicy nagiatającej,
v_f	– prędkość posuwu,
v_N	– prędkość nagiatania,
x_s	– odległość pomiędzy prążkami,
XRD	– X-Ray Diffraction (dyfraktometria rentgenowska),
z_k	– liczba kulek nagiatających.

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów ze stali C45 wycinanych laserem a następnie poddanych obróbce nagniataniem jak i łącznej obróbce skrawaniem i nagniataniem.

We wstępie scharakteryzowano proces cięcia laserem. Przedstawiono właściwości stereometryczne i fizyczne warstwy wierzchniej po cięciu laserem oraz opisano wskaźniki służące do oceny stanu powierzchni i krawędzi po cięciu laserem. Zaprezentowano również obecnie stosowane metody redukcji negatywnych efektów cięcia laserem oraz sposoby obróbki powierzchni po cięciu.

W rozdziale poświęconym ocenie stanu wiedzy w zakresie obróbki nagniataniem omówiono istotę obróbki nagniataniem odśrodkowym i nagniataniem tocznym. Przedstawiono również analizę literatury krajowej oraz zagranicznej dotyczącej właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu.

Dalsza część pracy obejmuje analizę parametrów chropowatości Ra , Rz , Rmr oraz parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a, stopnia umocnienia i grubości warstwy utwardzonej, mikrostruktury, dokładności geometrycznej oraz naprężeń własnych po cięciu laserem, cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym oraz frezowaniu elementów nie wycinanych laserem. Szczegółowa analiza właściwości stereometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej została także wykonana dla próbek wyciętych laserem a następnie poddanych obróbce nagniataniem jak i łącznej obróbce skrawaniem i nagniataniem. Badania zostały przeprowadzone dla różnych parametrów technologicznych obróbki nagniataniem tocznym oraz odśrodkowym.

Opracowana została również analiza statystyczna uzyskanych wyników badań celem oceny istotności wpływu parametrów technologicznych na wybrane wskaźniki warstwy wierzchniej.

W ostatniej części pracy podsumowano uzyskane wyniki oraz sformułowano wnioski.

Słowa kluczowe: cięcie laserem, nagniatanie toczne, nagniatanie odśrodkowe, struktura geometryczna, właściwości fizyczne warstwy wierzchniej

ABSTRACT

This work reports the results of a study on the effect of burnishing as well as machining combined with burnishing on selected properties of the surface layer of C45 steel objects after laser cutting.

The introduction describes the laser cutting process. The stereometric and physical properties of surface layer after laser cutting are presented and the indicators for assessing the state of surface and edges after cutting are described. In addition, this section gives an overview of both methods used for reducing the negative effect of laser cutting and surface treatment methods applied after cutting.

The first chapter describes the state of the art in the burnishing treatment. It discusses the nature of centrifugal shot peening and ball burnishing. Moreover, the chapter examines the domestic and foreign literature on surface layer properties after burnishing.

The next part of the work includes an analysis of the roughness parameters Ra , Rz , Rmr ; the parameters describing the Abbott-Firestone curve; the degree of strengthening of the surface layer and the depth of the hardened layer; as well as the geometrical accuracy and residual stress of the surface layer after laser cutting, laser cutting combined with finish milling, and milling. Moreover, a detailed analysis of the stereometric and physical properties of the surface layer is performed for the samples after laser cutting and then subjected to burnishing and machining combined with burnishing. The research is conducted for different technological parameters of burnishing and shot peening.

Another section of the work is devoted to a statistical analysis of the research results to assess the significance of technological parameters on the selected indicators surface layer.

The final part of the work provides a summary of the obtained results and presents conclusions formulated on the basis of the results.

Keywords: laser cutting, ball burnishing, centrifugal shot peening, geometric structure, physical properties of the surface layer

1. WPROWADZENIE

Cięcie jest bardzo często pierwszą operacją, od której zaczyna się proces technologiczny wytwarzania elementu. Podział materiału może odbywać się metodami mechanicznymi (cięcie na gilotynach, prasach, nożycami) oraz metodami erozyjnymi (cięcie wiązką lasera, plazmy, strugą wodno-ścierną, cięcie tlenem).

Pierwsze udane próby zastosowania wiązki lasera do dzielenia materiałów miały miejsce w latach 70. ubiegłego wieku. W 1971 roku Houldcroft „wprowadził” do wiązki lasera dodatkowy strumień gazu, co pozwoliło na zwiększenie prędkości cięcia oraz uzyskanie węższej szczeliny cięcia [63]. Obecnie wiązka lasera, ze względu na wiele zalet oraz szerokie spektrum zastosowania, powszechnie stosowana jest do dzielenia materiałów, jako podstawowa technika technologii rozwiniętych konstrukcji.

Zastosowanie wiązki lasera do podziału materiału wpływa na strukturę geometryczną powierzchni, mikrotwardość i strukturę metalograficzną oraz naprężenia własne. Istotnym zagadnieniem wydaje się poznanie właściwości warstwy wierzchniej elementów wycinanych laserem. Właściwości stereometryczne jak i fizyczne przedmiotu wycinanego wpływają na przydatność wykorzystania półfabrykatu w kolejnym etapie produkcyjnym. Zastosowanie elementu wycinanego laserem zależy również od obecności na krawędziach bądź powierzchniach nieprawidłowości. Występowanie tych niepożądanych zjawisk ogranicza zastosowanie danego elementu oraz utrudnia nanoszenie powłok malarskich.

Przeprowadzony przegląd literatury oraz dokonane rozeznanie w warunkach przemysłowych skłaniają do podjęcia próby rozwiązania problemu dotyczącego stanu powierzchni po cięciu laserem. Przeprowadzona obróbka wykończeniowa powierzchni po cięciu laserem powinna zredukować negatywne skutki cięcia laserem, niedokładności geometryczne wycinanego elementu, równocześnie, powinna umożliwić poprawę właściwości stereometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej wycinanego elementu.

W niniejszej pracy zaprezentowano kompleksową analizę obróbki wykończeniowej stali C45 po procesie cięcia laserem za pomocą obróbki nagniataniem jak i łącznej obróbki skrawaniem i nagniataniem.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów.

W rozdziale drugim dokonano analizy stanu zagadnienia. Omówiono właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów wycinanych laserem z ukierunkowaniem na chropowatość powierzchni, mikrotwardość i stan naprężeń własnych. Przedstawiono stosowane obecnie rozwiązania technologiczne jako metody obróbki wykończeniowej powierzchni i krawędzi po cięciu laserem. Scharakteryzowano obróbkę nagniataniem jako obróbkę wykończeniową elementów maszyn.

Rozdział trzecim opisuje materiał stosowany w eksperymencie, metodykę oraz przedstawia stanowiska obróbkowe wykorzystane podczas badań.

1.WPROWADZENIE

W rozdziale czwartym zawarto wyniki badań wstępnych w celu wyznaczenia liczebności próby.

Rozdział piąty to kompleksowa analiza wybranych właściwości warstwy wierzchniej (chropowatości powierzchni, mikrotwardości i mikrostruktury, naprężeń własnych oraz dokładności geometrycznej) dla wszystkich sposobów obróbki wykonanych w pracy.

W rozdziale szóstym przedstawiono opracowanie statystyczne uzyskanych wyników, celem oceny istotności wpływu warunków obróbki na analizowane wskaźniki warstwy wierzchniej.

Rozdział siódmy przedstawia rezultaty o charakterze poznawczym i praktycznym, kierunki dalszych badań i wnioski końcowe.

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

2.1. Właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów wycinanych laserem

Cięcie laserem jest procesem, w którym wiązka promieniowania laserowego (ciągłego lub impulsowego) może powodować:

- stopienie materiału w szczelinie cięcia,
- jednoczesne stopienie i odparowanie materiału w szczelinie cięcia,
- stopienie i/lub spalanie materiału w szczelinie cięcia.

Cięcie laserem polega na bezpośrednim oddziaływaniu energii wiązki laserowej w szczelinie cięcia wraz ze strumieniem gazu towarzyszącego. Zadaniem gazu towarzyszącego jest usunięcie ciekłego metalu i oparów metalu ze szczeliny cięcia. Jako gaz towarzyszący może być zastosowany gaz reaktywny względem ciekłego materiału (tlen, powietrze, mieszanki gazów zawierających powietrze) oraz gaz obojętny (azot, argon) [63]. Aby w obszarze szczeliny cięcia doszło do zjawiska topnienia bądź parowania, wiązka lasera musi dostarczyć wymaganą wartość energii, której część jest absorbowana, a część ulega odbiciu. Energia kwantów promieniowania wiązki lasera absorbowana jest przez wolne elektrony chmury elektronowej otaczające jądra atomów metalu. Elektrony pod wpływem zaabsorbowanej energii fotonów przechodzą w stan wymuszonych drgań, co wyraża się w postaci energii cieplnej. Gdy dostarczona jest wymagana wartość energii, drgania cieplne elektronów są tak intensywne, że następuje osłabienie wiązań cząsteczkowych i w konsekwencji metal przechodzi w stan ciekły – bezpostaciowy. Dalszy wzrost energii promieniowania wiązki laserowej prowadzi do znacznego spadku sił wiązań cząsteczkowych, co powoduje przejście metalu w stan gazowy (ulega odparowaniu) [63].

Technologie laserowe stosowane mogą być do cięcia większości materiałów inżynierskich: metali i ich stopów [31, 86, 93, 108, 133, 160, 161], cermetali, materiałów ceramicznych, tworzyw sztucznych [16], a nawet materiałów naturalnych. Szerokie spektrum zastosowania wiąże się z pewnymi zaletami i wadami tej technologii. Do zalet należy zaliczyć:

- dużą prędkość cięcia (przewyższająca wielokrotnie prędkości stosowane podczas obróbki mechanicznej),
- zadowalającą dokładność wymiarową cięcia i gładkość powierzchni cięcia,
- wąską szczelinę cięcia o minimalnym odchyleniu i równej powierzchni cięcia,
- brak bezpośredniego oddziaływania poprzez zgniot na obrabiany materiał, co bardzo często występuje w tradycyjnych metodach,
- łatwość automatyzacji i/ lub robotyzacji procesu cięcia,

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

- znacznie mniejszą emisję szkodliwych dymów i pyłów w stosunku do cięcia tlenem i cięcia łukiem plazmowym,
- brak zużycia narzędzia,
- szerokie spektrum zastosowania [63, 117, 141].

Słabymi stronami i ograniczeniami tej technologii są:

- maksymalna grubość ciętych elementów ograniczona do 20÷25 mm, poza procesem LASOX (pozwalającym na cięcie blach stalowych o grubości nawet 100 mm),
- niebezpieczeństwo dla operatorów w postaci niewidzialnego promieniowania elektromagnetycznego,
- obecność naprężeń własnych, pojawiających się w okolicach krawędzi cięcia,
- zmiany struktury materiału, których konsekwencją są zmiany mechaniczne elementów konstrukcyjnych, powstawanie wypływek przy wycinaniu elementów ze stali nierdzewnej,
- specjalne wymagania co do stanu powierzchni, składu chemicznego i właściwości fizycznych ciętych materiałów [28, 63, 158, 175].

Na przebieg procesu cięcia oraz jakość wyrobu finalnego wpływ ma wiele czynników o różnych możliwościach sterowania. Czynniki te można podzielić na trzy grupy:

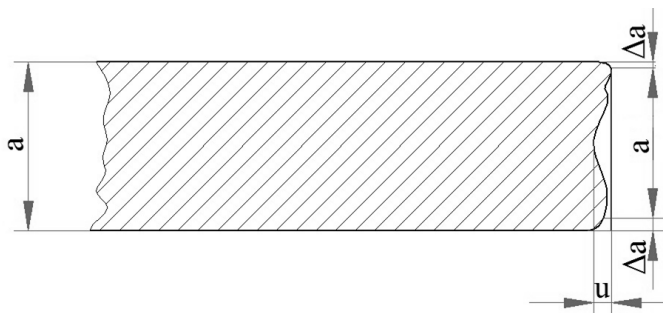
1. Parametry materiału:
 - skład chemiczny,
 - struktura,
 - jednorodność,
 - kształt, stan i grubość przecinanego elementu.
2. Parametry lasera i wycinarki laserowej:
 - rodzaj lasera,
 - moc lasera,
 - sposób funkcjonowania lasera (praca w sposób ciągły – CW, praca w sposób pulsacyjny – P),
 - przekrój poprzeczny wiązki lasera,
 - polaryzacja,
 - dywergencja,
 - geometria otworu dyszy,
 - rodzaj i stan soczewki ogniskującej.
3. Parametry procesu cięcia:
 - prędkość cięcia,
 - rodzaj i ciśnienie gazu towarzyszącego,
 - położenie ogniska względem powierzchni obrabianego materiału [9, 22, 46, 63].

Jakość krawędzi i powierzchni po cięciu laserowym oceniana jest na podstawie pomiarów geometrycznych kształtu krawędzi i powierzchni cięcia oraz badań mechanicznych i metaloznawczych [18, 92].

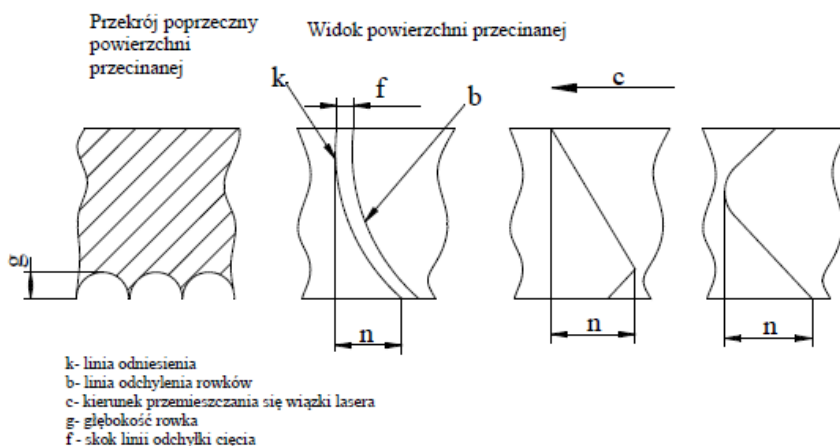
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

Ocena ilościowa jakości krawędzi i powierzchni po cięciu wyrażana jest za pomocą następujących wielkości charakterystycznych w oparciu o normę PN-EN ISO 9013:2017-04:

- tolerancja prostopadłości lub nachylenie powierzchni cięcia u – odległość pomiędzy dwiema liniami prostymi równoległymi, między które wpisany jest profil powierzchni cięcia i które są prowadzone pod ustalonym kątem (rys. 2.1),
- średnia wysokość profilu powierzchni cięcia $Rz5$ – średnia arytmetyczna wysokości pojedynczych elementów profilu pięciu sąsiadujących odcinków pomiarowych,
- wymiar Δa – zmniejszenie grubości przecinanego elementu (rys. 2.1),
- odchyłka cięcia n – określa rodzaj płaskości powierzchni (rys. 2.2),
- nadtopienie górnej krawędzi r – miara charakteryzująca kształt górnej krawędzi cięcia (rys. 2.3),
- wystąpienie żużlu i zakrzepłych kropli na dolnej krawędzi cięcia [184].

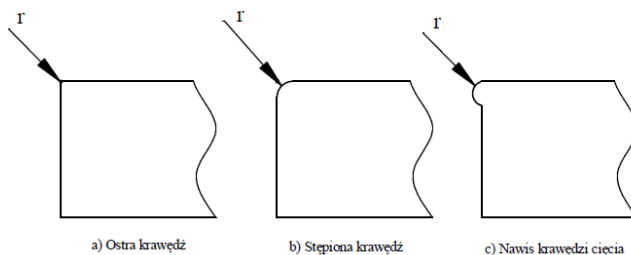


Rys. 2.1. Tolerancja prostopadłości i zmniejszenia grubości [184]



Rys. 2.2. Odchyłka cięcia n [184]

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA



Rys. 2.3. Kształt górnej krawędzi przecinanego elementu [184]

Jakość elementów wycinanych wiązką lasera może być przyporządkowana klasie jakości. Podział na odpowiednie grupy opiera się na podstawowych wielkościach charakterystycznych u oraz $Rz5$. Klasa 1 odpowiada najwyższej jakości cięcia, natomiast klasa 5 to najniższa jakość wykonania. W tabelach 2.1 i 2.2 przedstawiono zakresy podstawowych wielkości charakterystycznych dla poszczególnych klas.

Tabela 2.1. Dopuszczalna tolerancja prostokątności lub nachylenia u oraz średnia wysokość profilu $Rz5$ dla ciętych laserowo powierzchni blach metalowych w oparciu o PN-EN ISO 9013:2017-04 [184]

Klasa jakości*	Parametry	
	u [mm]	$Rz5$ [μm]
1	$0,05+0,003a$	$10 + 0,6a$
2	$0,15+0,007a$	$40 + 0,8a$
3	$0,4+0,1a$	$70 + 1,2a$
4	$0,8+0,02a$	$100 + 1,8a$
5	$1,2+0,035a$	-

a [mm]- grubość ciętego przedmiotu metalowego

*- wg normy PN-EN ISO 9013:2017-04 jest to zakres pomiarowy. Proponuje się, aby klasa jakości 1 wymagana była w przypadku cięcia bez dalszej obróbki mechanicznej, klasa 2, gdy krawędzie cięte przygotowane są do spawania łukowego

Tabela 2.2. Dopuszczalne zmniejszenie grubości przecinanego elementu Δa w oparciu o PN-EN ISO 9013:2017-04

Grubość cięcia a [mm]	Δa [mm]
≤ 3	0,1
$>3 \leq 6$	0,3
$>6 \leq 10$	0,6
$>10 \leq 20$	1
$>20 \leq 40$	1,5

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

Cięcie laserem w związku z oddziaływaniem koherentnej wiązki powoduje powstawanie na powierzchni i krawędziach cięcia niezgodności. Niezgodności są to nieprawidłowości lub odchyłki od określonego kształtu lub położenia linii cięcia. Niezgodności te pochodzą bezpośrednio z procesu cięcia laserem, nie uwzględnione są natomiast żadne niekorzystne zjawiska, będące wynikiem zewnętrznych naprężeń lub odkształceń. Wyróżnia się następujące rodzaje niezgodności:

- niezgodności na krawędzi cięcia (stopień krawędzi cięcia, ciągły zakrzep kropelek ciekłego metalu, nawis krawędzi cięcia, podtopienia górnej krawędzi cięcia),
- niezgodności na powierzchni cięcia (miejscowe odchylenie rowków, nadmierna głębokość rowków, niepłaska powierzchnia cięcia, nieregularna głębokość rowków, nieregularny profil cięcia, odchylenia geometryczne, wklęsnięcia powierzchni, żłobienia),
- żużel,
- pęknięcia (mikropęknięcia, makropęknięcia),
- inne niezgodności (niecałkowite przecięcie, nadmierna szerokość szczeliny cięcia, przypalenie powierzchni, odchylenie wymiarowe) [185].

2.1.1. Chropowatość powierzchni po cięciu laserem

Wynikowa chropowatość powierzchni po cięciu laserem jest skutkiem nakładania się efektów procesów termicznych i hydrodynamicznych, charakterystycznych dla obróbki laserowej i wymuszonych wysokociśnieniowym nadmuchem gazu drgań wycinanego elementu, co przejawia się falistością powierzchni [56, 97].

Na skutek cięcia laserem na powierzchni przecinanej pojawia się tendencja do występowania dwóch, odmiennych kształtem oraz jakością, obszarów. Strefy te oddzielone są od siebie tzw. linią podziału warstw granicznych, określaną jako linia BLS (ang. BLS - Boundary Layer Separation Point). Linia BLS (rys. 2.4) rozdziela obszar wejścia wiązki lasera, zwykle o wysokiej jakości, prawie bez rowków, z obszarem dolnym o wyższej chropowatości powierzchni. W obszarze górnym usuwanie ciekłego materiału odbywa się z przepływem laminarnym, w strefie dolnej ciekły metal usuwany jest z przepływem turbulentnym. Niestabilność procesu usuwania ciekłego materiału spowodowana jest turbulencją wypływania materiału z dolnej części ciętego przedmiotu, zależną od prędkości cięcia i grubości ciętego materiału oraz temperatury ciekłego metalu [56, 131, 156]. Chropowatość powierzchni zmienia się na grubości przecinanego elementu. Zauważalny jest wzrost chropowatości wraz z oddalaniem się od powierzchni wejścia wiązki lasera [14].

Podczas cięcia laserem stopniowo zwiększa się objętość ciekłego materiału przesuwanego w kierunku dolnej krawędzi cięcia, spada temperatura ciekłego metalu, a tym samym wzrasta jego lepkość. W efekcie, tuż przy dolnej krawędzi,

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

prędkość strumienia usuwania materiału spada do zera. Powoduje to zwiększenie się grubości warstwy ciekłego metalu, a tym samym występuje duża nieregularność powierzchni [62].



Rys. 2.4. Widok skaningowy powierzchni cięcia blachy ze stali austenitycznej ANSI 308 o grubości 8 mm z wyraźną linią rozdziału powierzchni (BLS) (parametry cięcia: moc wiązki 4 kW, prędkość cięcia 1 m/min, gaz - azot o ciśnieniu 0,48 MPa) [63]

Struktura geometryczna powierzchni powstała po cięciu laserem wykazuje systematyczność. Charakteryzuje się ona regularnym rozkładem rzędnych profilu, zbliżonym do normalnego. Występuje typowy stosunek parametru Rz do parametru Ra , $Rz/Ra \approx 4,5$. Powierzchnie nie zawierają zbyt wielu ekstremalnych miejscowych wzniesień ani wgłębień, jednak wartość stosunku parametru Rt do Ra jest wysoka i oscyluje w granicach od 7 do 8. Powstałą strukturę geometryczną powierzchni po cięciu laserem należy sklasyfikować jako anizotropowo losową, w niektórych przypadkach – anizotropowo okresową [53, 160].

Jakość powierzchni powstałej na skutek cięcia laserem determinowana jest obecnością charakterystycznych prążków na powierzchni cięcia. Prążki są to okresowe linie pojawiające się na powierzchni przecinanej z pewną częstotliwością [60]. Pojawienie się ich na powierzchni przecinanej świadczy o tym, że ciekły materiał „ucieka” ze szczeliny cięcia [72]. Obecność ich spowodowana jest następującymi czynnikami:

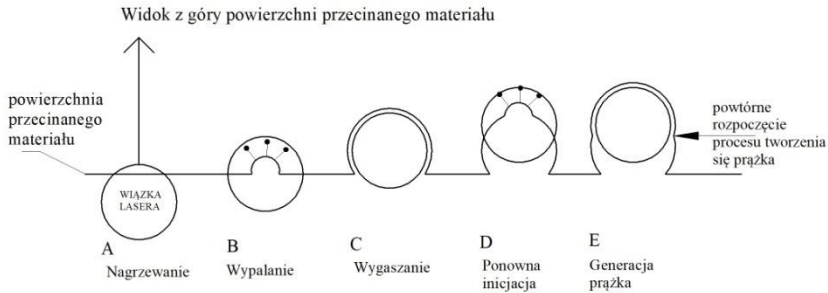
- oscylacją głowicy laserowej,
- fluktuacją mocy lasera (wiązki lasera),
- fluktuacją w przepływie gazu,
- hydrodynamicznym przepływem roztopionego materiału [57].

Powstanie prążków na powierzchni cięcia tłumaczy się tym, że liniowa prędkość spalania się materiału jest większa od prędkości przemieszczania się wiązki laserowej [141].

Występowanie prążków na powierzchni cięcia wynika również z nieciągłości procesu [85]. Etapy procesu cięcia, takie jak: nagrzewanie, wypalanie, wygaśnięcie, ponowna inicjacja spalania, prowadzą do powstania prążków. Wielokrotne wygaśnięcie i wznawianie reakcji spalania ma miejsce, ponieważ czoło przecinania przesuwają się szybciej niż wiązka laserowa i w pewnym momencie

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

proces spalania wygasa przed wiązką. Etapy procesu cięcia oraz schemat tworzenia się prążka przedstawiono na rysunku 2.5 [10].



Rys. 2.5. Interpretacja powstawania prążka podczas cięcia laserem stali [10]

Należy zaznaczyć, że ilość prążków, a tym samym odstęp pomiędzy nimi, związana jest ściśle z wysokością powstających nierówności, określoną parametrem chropowatości powierzchni R_z [10]. Zaistniała korelacja pomiędzy chropowatością powierzchni a częstotliwością występowania prążków jest liniową zależnością [108].

Pomiędzy odległością między prążkami na powierzchni cięcia a wartością chropowatości powierzchni R_z istnieje ścisły związek, który jest słuszny dla stali niestopowej S235JR, opisany zależnością [10]:

$$R_z = 0,134 \cdot x_s, \quad \mu m, \quad (2.1)$$

gdzie:

x_s – odstęp pomiędzy prążkami wyrażony w μm .

Chropowatość powierzchni po cięciu laserem jest uzależniona od grupy trzech czynników. Są to parametry: materiału, lasera i urządzenia do cięcia oraz procesu cięcia. Czynnikiem najbardziej wpływającym na wynik jakościowy procesu cięcia są: grubość przecinanego materiału, prędkość cięcia, moc wiązki lasera, częstotliwość cyklu pracy oraz ciśnienie i rodzaj gazu towarzyszącego procesowi [12, 22, 28, 31].

Zwiększanie mocy wiązki lasera oraz ciśnienia gazu prowadzi do niewielkiego wzrostu chropowatości powierzchni. Zaistniałe zjawisko należy tłumaczyć wzrostem ilości energii oraz mechanicznej siły, która sprzyja procesowi topienia się materiału i tworzy głębsze rowki, co powoduje większą chropowatość [28]. Wpływ mocy wiązki lasera na chropowatość powierzchni jest bardziej zauważalny w zakresie niższych poziomów mocy. Spowodowane jest tym, że proces cięcia laserem jest mniej stabilny w zakresie niskich poziomów mocy wiązki lasera [108]. Parametry chropowatości osiągają większe wartości ze wzrostem częstotliwości cyklu pracy. Spowodowane jest to dodatkowym gromadzeniem

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

ciepła przez materiał podczas każdego impulsu wiązki lasera, co sprzyja głębszemu topnieniu.

Zastosowanie tlenu jako gazu towarzyszącego procesowi cięcia powoduje powstawanie szerszej szczeliny cięcia oraz większej chropowatości powierzchni [31]. Tlen stanowi dodatkowe źródło energii [22, 31]. Wykorzystanie azotu jako gazu towarzyszącego umożliwia uzyskanie powierzchni jasnej i czystej, jednak aby osiągnąć żądany efekt jakościowy wymagane jest stosowanie wysokich wartości ciśnienia oraz niskich prędkości cięcia, co nie jest ekonomiczne [31, 32]. Wybór gazu podyktowany jest rodzajem przecinanego materiału. Wysokiej jakości tlen rekomendowany jest do wysokowydajnej obróbki stali niskowęglowych. Kłopotliwe jest uzyskanie niskiej chropowatości powierzchni stosując gaz obojętny o niskim ciśnieniu [20]. Wzrost ciśnienia gazu towarzyszącego procesowi cięcia przekłada się na zwiększenie wahań temperatury, czego konsekwencją jest zwiększenie głębokości prążków [19].

Wzrost prędkości cięcia powoduje zmniejszenie ilości wydzielanego ciepła, co przyczynia się do minimalizacji efektu palenia, a tym samym zmniejszenia się chropowatości powierzchni [134].

2.1.2. Stan naprężeń własnych w przedmiotach po cięciu laserem

Cięcie laserem jest procesem, któremu towarzyszy wysoka temperatura w strefie obróbki, co przekłada się na powstanie naprężeń termicznych. Podczas cięcia laserem następuje najpierw gwałtowne nagrzanie materiału, a następnie również szybkie schłodzenie za pomocą gazu towarzyszącego, co w konsekwencji prowadzi do skurczu materiału i przemian fazowych. Działanie w krótkim czasie impulsowej wiązki lasera wytwarza wzdłuż linii cięcia niestacjonarne pole temperaturowe o dużym gradiencie. W wysokiej temperaturze w warstwie wierzchniej materiału znajdującego się w strefie cięcia następuje przemieszczanie się atomów. Konsekwencją tego niepożądanego zjawiska może być powstawanie dyslokacji krawędziowych wzdłuż linii cięcia jak i powstanie mikropęknięć. Obecność wad sprzyja powstawaniu nieciągłości, co prowadzi do pogorszenia właściwości warstwy wierzchniej. Czynnikiem sprzyjającym powstaniu naprężeń jest również duża prędkość chłodzenia [30, 158, 159].

Niekorzystne zjawiska towarzyszące procesowi cięcia laserem powodują ograniczenie zastosowania tych elementów. Newralgicznymi punktami elementów wycinanych laserem są obszary w okolicach krawędzi cięcia oraz naroża [158, 159].

Procesowi cięcia laserem towarzyszy zjawisko powtórnego krzepnięcia roztopionego materiału. Przebiega on w niestabilnych warunkach, co sprzyja powstawaniu własnych naprężeń hartowniczych, które są zawsze rozciągające [52].

Dynamika występujących przemian fazowych przy zróżnicowanym tempie chłodzenia prowadzi do wytworzenia zarówno naprężeń ściskających jak i naprężeń rozciągających. Rozciągające naprężenia w kierunku wzdłużnym poja-

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

wiają się w strefie przejściowej pomiędzy strefą zahartowaną a materiałem rodzimym na skutek zmian objętości składników struktury podczas obróbki laserowej [15].

Wartość powstałych naprężeń po cięciu laserem uzależniona jest od takich czynników jak odkształcenia plastyczne oraz właściwości termoelastyczne materiału, do których należy zaliczyć moduł Younga, granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie względne, ciepło właściwe oraz gęstość materiału [49].

Stan naprężeń powstały w wyniku cięcia laserem różnych materiałów inżynierskich był analizowany przez wielu naukowców [1, 4, 74, 157, 158]. Ciepło dostarczone do przecinanego materiału przez wiązkę lasera przyczynia się do jego rozszerzania w kierunku krawędzi cięcia. Zjawisko to powoduje powstawanie wysokiego gradientu temperatury w napromieniowanym regionie. Przekazane ciepło do wycinanego elementu sprzyja powstawaniu w tym obszarze termicznych odkształceń, a tym samym występowaniu zarówno naprężeń ściskających jak i rozciągających w tym rejonie. Wartość oraz głębokość zalegania termicznych naprężeń własnych zależy od przewodności cieplnej przecinanego materiału.

2.1.3. Mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem

Podczas cięcia laserem dochodzi do intensywnych reakcji chemicznych pomiędzy roztopionym materiałem a tlenem, równocześnie ciepło pochodzące z roztopionego metalu przenika do zimnych obszarów otaczających szczelinę cięcia. Dostarczone ciepło do materiału oraz wysoki gradient temperatury powoduje powstanie cienkiej, roztopionej warstewki materiału, zwanej strefą wpływu ciepła [37].

Strefa wpływu ciepła (SWC) to warstwa materiału w otoczeniu szczeliny cięcia. Charakteryzuje się ona wprawdzie niewielką grubością, ale lokalnie, zwłaszcza przy krawędziach i narożach, znaczną twardością [141]. Następuje również przemiana strukturalna materiału w otoczeniu szczeliny cięcia oraz powierzchnia przeciętego materiału ulega utlenieniu. Struktura powstała w wyniku cięcia laserem jest efektem procesu topienia się materiału i powtórnego krzepnięcia [52]. Zróżnicowana twardość SWC może wynikać z niejednorodnego rozkładu energii na przekroju poprzecznym wiązki lasera oraz różnej szybkości odprowadzenia ciepła [15, 83]. Zjawiskiem nieuniknionym w większości przypadków jest obecność mikropęknięć na powierzchni przecinanego materiału. Źródłem nieciągłości i mikropęknięć jest nierównomierne oraz szybkie chłodzenie ciekłego materiału na powierzchni [72]. Występowanie mikropęknięć oraz przemiany strukturalne powodują znaczne obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej [80, 138].

Powstała strefa wpływu ciepła podczas cięcia stali składa się ze strefy przetopionej, zahartowanej oraz przejściowej [15]. W celu przeprowadzenia efek-

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

tywnej obróbki wykończeniowej należy poznać właściwości tych obszarów i zastosować odpowiednią technologię.

W wyniku cięcia laserem powierzchnia przecinanego elementu jest mocno utleniona oraz zawiera dużą ilość magnetytu. Magnetyt, jest to tlenek żelaza Fe_3O_4 , który powstaje na skutek silnej eksploatacji powierzchni stali. W przypadku stali nierdzewnej można wyróżnić na powierzchni przecinanego materiału pewne formacje $\text{Fe}_{3-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ oraz występowanie następującego zjawiska. Niektóre atomy żelaza w podsieci magnetytu zostają zastąpione atomami chromu. Tlenki żelaza powstają na powierzchni w dużej ilości na skutek nagrzewania materiału przez wiązkę lasera. Magnetyt występuje natomiast w dyspersyjnych nanokryształicznych produktach erozji [2]. W przypadku stali nierdzewnej można na powierzchni przecinanej również znaleźć tlenek chromu Cr_2O_3 [50].

Zaistniały proces utleniania podczas cięcia laserem stanowi dodatkowe źródło energii. Na powierzchni przecinanej stali niestopowej można wyróżnić fazy tlenkowe żelaza FeO oraz Fe_3O_4 o niewielkiej grubości, co sprzyja zmianie barwy powierzchni przecinanego materiału na niebieskawą [52, 60, 113]. Powstałe cząstki mają wielkość około $50\ \mu\text{m}$ i najczęściej są w postaci sfer żelaza otoczonych powłokami tlenku żelaza [98]. Temperatura występująca na powierzchni przecinanego materiału waha się od $1950\ ^\circ\text{C}$ do $2250\ ^\circ\text{C}$ dla stali austenitycznych, w przypadku stali niestopowych jest niższa. Związane jest to z przewodnością cieplną tej grupy materiałów [37].

Reakcja utleniania, do której dochodzi w szczelinie podczas procesu cięcia, inicjuje dyfuzję tlenu do roztopionej warstwy [58]. Parametry technologiczne procesu cięcia laserem wpływają na szerokość warstwy utlenionej. Wzrost mocy wiązki lasera powoduje uzyskanie grubszej warstwy utlenionej, natomiast wzrost prędkości zmniejsza grubość warstwy utlenionej [113].

Sighn i inni w swojej pracy [116] badali wpływ mikrocięcia wiązką lasera LAMM (Laser Assisted Mechanical Micromachining) na rozkład twardości warstwy wierzchniej i zmiany strukturalne. Materiałem badanym była stal H13 (według [182] X40CrMoV5 – 1). Zauważono, że głębokość strefy wpływu ciepła zależy od prędkości przemieszczania się wiązki lasera oraz mocy lasera. Wzrost twardości w SWC spowodowany jest zastosowaniem promieniowania laserowego o dużej intensywności, które w bardzo krótkim czasie nagrzewa materiał do temperatury austenizacji. Wysoki gradient temperatury, powstały w wyniku szybkiego chłodzenia, przyczynia się do przekazywania ciepła od powierzchni do rdzenia. Powoduje to przemianę fazową austenitu w martenzyt.

W pracy [141] autor analizował rozkład mikroćwierdności warstwy wierzchniej próbek ze stali C45 (grubość próbek 2,5 mm, 4 mm, 5 mm) i S235JR (grubość 2 mm, 4 mm, 6 mm) na zglądach poprzecznych po procesie cięcia laserem. Dla materiału S235JR strefa zmian twardości wynosi około 0,5 mm, w przypadku próbki o grubości 6 mm. Dla próbek cieńszych odnotowano utwardzenie na mniejszej głębokości. Spadek twardości w głębszych warstwach materiału oznacza, że zmienia się struktura jego kolejnych warstw, od najtwardszych perlitycz-

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

no-bainitycznych aż do struktury rodzimej ferrytycznej z drobnymi wydzieleniami perlitu. Dla stali C45 strefa utwardzona jest węższa i wynosi około 0,3 mm. Największa twardość występuje tuż przy powierzchni cięcia w okolicach naroża. W strefie utwardzonej można wyróżnić strefę zahartowaną, najbliższą powierzchni (z widocznymi gęstymi płytkami martenzytu) oraz strefę przejściową z rozdrobnionymi ziarnami martenzytu oraz bainitu. Powstanie nowej struktury wskazuje na przemiany fazowe, które są wynikiem nagrzania materiału, a następnie szybkiego chłodzenia. Energia potrzebna do przemiany pochodzi od wiązki lasera oraz z reakcji utleniania [72].

Podczas cięcia laserem stali niestopowych po procesie obróbki termomechanicznej (np. S700MC – oznaczenie zgodnie z [179]) oraz ulepszonej cieplnie (np. S690QL – oznaczenie według [177]) na skutek oddziaływania wiązki lasera może dojść do utraty właściwości uzyskanych w procesie obróbki poprzedzającej cięcie oraz utwardzenia warstwy przypowierzchniowej. Podczas cięcia laserem stali S690QL przy powierzchni cięcia powstaje warstwa martenzytu niskowęglowego o twardości do 460 HV_{0,1}. Jej grubość wynosi około 0,3 mm. Podczas obróbki stali S700MC powstaje warstwa bainityczna o twardości ok. 360-405 HV_{0,1} i grubości 0,6 mm [34, 92].

Autorzy pracy [132] analizowali zasięg SWC oraz rodzaj struktury strefy po procesie wycinania laserowego okrągłych półfabrykatów z czterech różnych gatunków stali. Powstała mikrostruktura krążków w obszarze brzegowym jest zróżnicowana i składa się z mieszaniny struktury SWC i osnowy charakterystycznej dla danego gatunku stali. Struktura w obszarze krawędzi posiada liczne nieciągłości w postaci pęknięć i „uskoków” ułożonych w kierunku, w którym była wyciągana wytloczka. Powstałe wady na krążkach nie wywierają istotnego wpływu na proces wytłaczania z wyciągnięciem ścianki wytloczki. Stanowią one odpad technologiczny usuwany z brzegów wytloczki.

Wielkość strefy wpływu ciepła cięcia laserowego jest zmienna na grubości przecinanego materiału. W strefie wejścia wiązki lasera w przecinany element tworzy się grubsza strefa wpływu ciepła [92, 132, 141]. Gatunek stali i zastosowany gaz pomocniczy podczas cięcia wpływają również na grubość strefy wpływu ciepła [34, 117, 127].

Na grubość SWC wpływ mają również parametry technologiczne procesu. Wzrost mocy wiązki lasera przyczynia się do absorpcji przez materiał większej ilości ciepła pochodzącej od wiązki lasera. Powoduje to wzrost szerokości strefy wpływu ciepła oraz mikrotwardości. Równocześnie tworzą się tlenki na powierzchni [13, 113, 115].

Prędkość zastosowana podczas cięcia laserem wpływa głównie na grubość SWC. Zauważalne jest zmniejszenie grubości strefy wpływu ciepła ze wzrostem prędkości cięcia. Związane jest to z krótszym czasem kontaktu wiązki lasera z materiałem przecinanym. Zastosowanie zbyt małej prędkości sprzyja powstawaniu żużlu przy dolnej krawędzi cięcia, co stanowi dodatkowe miejsce absorpcji ciepła [113]. Wzrost prędkości cięcia przekłada się również na zachodzące

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

zmiany w mikrostrukturze przecinanego materiału. W przypadku wzrostu prędkości cięcia dla stali S355 w strefie przykrawędziowej powstaje znacznie większa ilość martenzytu, która podnosi twardość tej strefy [137]. Wzrost ciśnienia gazu towarzyszącego procesowi cięcia, gdy jest nim tlen, powoduje zmniejszenie SWC. Związane jest to z usuwaniem przez gaz nawisu ciekłego materiału z dolnej krawędzi, co skutkuje obniżeniem dodatkowego miejsca absorpcji ciepła [113].

2.2. Obróbka wykończeniowa powierzchni po cięciu laserem

Obecnie jako rozwiązania technologiczne pozwalające na redukcję negatywnych skutków cięcia laserem są stosowane następujące metody: pokrywanie powierzchni przecinanego materiału specjalną substancją chemiczną redukującą powstawanie nawisu metalowego [87] oraz mechaniczne i ręczne usuwanie powstałej zgorzeliny i wyływek [28].

Celem uniknięcia obecności nawisu metalowego zwanego „gratem”, osadzającego się na powierzchni przedmiotu od strony wyjścia wiązki lasera przy powierzchni cięcia, należy pokryć powierzchnie przecinanych płyt specjalnym płynem, który utrudnia „przyklejanie się” wydmuchiwanego roztopionego metalu do pomalowanej dolnej powierzchni płyty. Rozwiązanie to sprawdza się dla elementów o niewielkich grubościach. Utrudniona jest eliminacja metalowego nawisu tą metodą w przypadku elementów wykonanych ze stali nierdzewnej [87].

Usuwanie metalowego nawisu odbywa się najczęściej przy wykorzystaniu szlifierek taśmowych, pilników ręcznych, gratowników lub drucianych szczotek oraz za pomocą frezowania stosowanego do przedmiotów o większych wymiarach i bardziej złożonych kształtach [28].

Potrzeba przeprowadzenia obróbki wykończeniowej wiąże się nie tylko z obecnością kropli zastygniętego materiału przy dolnej krawędzi wycinanego elementu, ale również z brakiem prostopadłości konturu cięcia do powierzchni przecinanej płyty [22, 28].

W celu przebudowy struktury geometrycznej powierzchni powstałej w wyniku cięcia laserem stosowane jest mechaniczne szlifowanie [96] oraz „diamentowe wygładzanie” [110].

Obróbka szlifowaniem pozwala wprawdzie na zmniejszenie grubości warstwy utwardzonej, z drugiej strony wprowadza w materiał obrabiany rozciągający stan naprężeń własnych oraz na powierzchni obrabianej pojawiają się pęknięcia. Powstałe wady są miejscem koncentracji naprężeń oraz obniżają nośność obrabianej powierzchni [96].

„Diamentowe wygładzanie” pozwala na obniżenie chropowatości powierzchni, powstałej w wyniku cięcia wiązką lasera. Podczas obróbki wykorzystywane jest odkształcenie plastyczne powierzchni na skutek oddziaływania gładkiego narzędzia diamentowego na element obrabiany. W wyniku kontaktu elementu nagiętego z przedmiotem obrabianym ma miejsce wzrost gęstości

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

dyslokacji i mikroodkształceń w sieci krystalicznej. Parametr Ra przed obróbką wynosił 1,48 μm , natomiast po obróbce – 0,317 μm . Równocześnie następują przemiany strukturalne oraz fazowe. „Diamentowe wygładzanie” powoduje przemianę austenitu w martenzyt. Dochodzi do mechanicznego umocnienia warstwy wierzchniej oraz wzrostu szerokości SWC. Twardość w strefie przykrawędziowej wzrasta o około 220 HV, w odniesieniu do twardości po cięciu laserem [110].

2.3. Charakterystyka obróbki nagniataniem

Nagniatanie jest jednym ze sposobów obróbki wykończeniowej elementów maszyn. Polega ono na wywieraniu nacisku za pomocą gładkiego narzędzia na powierzchnię obrabianą lub uderzaniu w tę powierzchnię elementami nagniatającymi [101, 162]. Idea tej obróbki polega na wykorzystaniu miejscowego odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej w temperaturze otoczenia lub podwyższonej, wywołanego oddziaływaniem twardego narzędzia na powierzchnię [106].

Ze względu na charakter działania sił podczas nagniatania można wyróżnić nagniatanie statyczne, w którym siły nagniatania mają w przybliżeniu stałą wartość oraz nagniatanie dynamiczne, w którym siły są okresowo zmienne w czasie obróbki [101].

Nagniatanie statyczne może być realizowane jako naporowe toczone lub naporowe ślizgowe. Zależy to od tego, czy element nagniatający podczas obróbki obtacza się po powierzchni obrabianej (z tarcie tocznym), czy też ślizga się po niej (z tarcie ślizgowym) [101]. Podczas nagniatania tocznego elementy nagniatające toczą się po obrabianej powierzchni przedmiotu pod obciążeniem statycznie działającej siły naporu [65, 101].

W przypadku nagniatania ślizgowego twardy i gładki element nagniatający, dociskany do powierzchni obrabianej, przemieszcza się po obrabianym elemencie, wywołując w strefie nagniatania tarcie ślizgowe i odkształcenie plastyczne nierówności [101]. Nagniatanie stosowane jest jako obróbka umacniająca lub gładkościowa [106].

Podczas nagniatania dynamicznego na powierzchni obrabianej powstają odciski (ślady) wskutek uderzeń elementów nagniatających. W zależności od sposobu nanoszenia tych odcisków można rozróżnić nagniatanie dynamiczne skoncentrowane, podczas którego odciski tworzą się w sposób „uporządkowany”, oznacza to, że elementy nagniatające poruszają się w prowadnicach, i rozproszone, gdzie elementy nagniatające nie są ograniczone prowadnicami a uderzenia następują w sposób przypadkowy [101, 162].

Podstawowymi odmianami nagniatania dynamicznego skoncentrowanego jest nagniatanie odśrodkowe i impulsowe [65, 101]. Nagniatanie odśrodkowe polega na tym, że elementy nagniatające, umieszczone symetrycznie w tarczy, pod wpływem siły odśrodkowej uderzają w obrobioną powierzchnię [167]. Na-

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

nagniatanie impulsowe charakteryzuje się uderzeniowym oddziaływaniem elementów nagniatających w powierzchnię obrabianą w wyniku ruchu obrotowego odpowiednio ukształtowanej bieżni, zamontowanej w głowicy nagniatającej [68]. Szczotkowanie nagniatające, stanowiące odrębną odmianę nagniatania dynamicznego [164], polega na dynamicznym oddziaływaniu szczotki w kształcie walca lub tarczy na obrabianą powierzchnię [82, 89].

W przypadku nagniatania rozproszonego należy wyróżnić nagniatanie strumieniowe oraz wibracyjne. W procesie nagniatania strumieniowego na powierzchnię obrabianą kierowany jest strumień elementów nagniatających wyrzucanych za pomocą łopatek wirnika lub sprężonego powietrza [101]. Natomiast podczas nagniatania rozproszonego wibracyjnego swobodne elementy nagniatające ulegają zderzeniu z obrabianą powierzchnią pod wpływem drgań komory roboczej, która posadowiona jest na płycie wibratora [101, 166].

2.3.1. Właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu statycznym

Nagniatanie statyczne ze względu na swoje pozytywne aspekty, takie jak możliwość uzyskania powierzchni o bardzo małej chropowatości [26], poprawa odporności na zużycie ściernie, zmęczenie powierzchniowe [5] i korozję [135] oraz zwiększanie niezawodności, stosowane jest w przemyśle od dziesięcioleci [40, 101]. Ten sposób nagniatania dedykowany jest głównie do elementów maszyn z materiałów o mniejszej twardości (stal, stopy aluminium, mosiądz, żeliwa ciągliwe) [109]. Nagniatanie tych grup materiałów z powodzeniem realizowane jest w przemyśle maszynowym od kilku dekad. Technologia ta z powodzeniem jest wykorzystywana jako obróbka wykończeniowa takich przedmiotów jak: matryce, formy, wały [5, 36].

Nagniatanie toczne w szczególnych przypadkach umożliwia zastąpienie typowych operacji wykończeniowych, takich jak szlifowanie, docieranie, w procesie wytwarzania, co pozwala na zwiększenie elastyczności produkcji [114].

Ważnym celem nagniatania statycznego jest zmniejszenie chropowatości powierzchni, która ma istotny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową [102] i odporność na ścieranie oraz modyfikacja profilu powierzchni. Wysokość i odstęp mikronierówności ukształtowanych poprzez nagniatanie statyczne są uzależnione od następujących czynników: odmiany nagniatania, konstrukcji narzędzia, warunków obróbki i właściwości materiału [101].

W praktyce chropowatość powierzchni ukształtowana poprzez nagniatanie zależy od siły docisku gładkiego narzędzia do powierzchni, posuwu nagniatania oraz, w mniejszym stopniu, od prędkości nagniatania. Zastosowanie zbyt małych sił nie prowadzi do całkowitego odkształcenia nierówności. Zbyt duże wartości mogą prowadzić do łuszczenia powierzchni. W przypadku posuwu istnieje odwrotna zależność, mały posuw – następuje łuszczenie się powierzchni obrabianej, duży posuw – następuje wzrost odległości pomiędzy kolejnymi śladami narzędzia, co uniemożliwia wyrównanie „wybrzuszonych krawędzi” poprzed-

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

niego śladu. Skutkiem tego negatywnego zjawiska jest niecałkowite odkształcenie mikronierówności [106, 111]. Zastosowanie małej prędkości nagniatania powoduje większą deformację obrabianej powierzchni [27, 47]. Obróbka realizowana ze zwiększoną prędkością powoduje wzrost temperatury przedmiotu i narzędzia. Sprzyja również występowaniu drgań oraz ogranicza czas kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym [111]. Efekty jakościowe zrealizowanej obróbki nagniataniem zależą również od rodzaju środowiska obróbkowego [17].

Obecnie nagniatanie toczne wykorzystywane jest na skalę przemysłową jako obróbka wykończeniowa części maszyn o twardości do 45 HRC [24, 76, 91, 99, 130, 148] jak również spotyka się zastosowanie tej odmiany nagniatania do elementów o twardości około 65 HRC [38, 40, 42, 43]. Obróbka nagniataniem materiałów o podwyższonej twardości pozwala na zmniejszenie chropowatości powierzchni o około 90% w odniesieniu do wartości wyjściowej [77, 112]. Parametr chropowatości powierzchni R_a osiąga wartość 0,17 μm do 0,3 μm , co odpowiada jakości powierzchni otrzymanej po szlifowaniu [21, 64, 77]. Zmiana chropowatości powierzchni podczas obróbki proporcjonalna jest do wartości siły nagniatania [73].

W wyniku nagniatania następuje modyfikacja profilu powierzchni, co w konsekwencji przekłada się na wzrost udziału materiałowego profilu chropowatości. Liniowe, a nawet degresywne krzywe udziału nośnego, otrzymane po obróbce poprzedzającej, zmieniają się w progresywne. Co więcej, wartość parametru R_{pk} po nagniataniu wynosi 0,06÷0,1 μm , a przed nagniataniem 0,25÷0,85 μm , co może świadczyć o wysokiej odporności na ścieranie [44, 129, 148].

Autor pracy [136] zajmował się obróbką nagniataniem stali 42CrMo4 o twardości 32 HRC wykorzystując jako element nagniatający kulkę oraz rolkę wykonaną z PCD. Chropowatość powierzchni, opisana parametrem S_a , po realizowanej obróbce wynosiła od 0,0497 μm do 0,185 μm , natomiast przed nagniataniem S_a było równe 0,63 μm . Struktura geometryczna powierzchni po obróbce stała się powierzchnią anizotropową.

Czynnikami wpływającym w sposób istotny na przebieg procesu nagniatania jest dokładność wykonanej obróbki poprzedzającej. Obróbką poprzedzającą bardzo często jest frezowanie [55, 91] lub toczenie [41, 42, 70]. Negatywnym skutkiem obróbki poprzedzającej jest powstawanie odchyłek od zamierzonego zarysu, co może powodować występowanie podczas procesu nagniatania negatywnego zjawiska, jakim jest łuszczenie się powierzchni. Aby temu zapobiec stosuje się sprężysty docisk narzędzi do powierzchni obrabianej, zapewniający stały stopień zgniotu niezależnie od niedokładności obróbki poprzedzającej [114]. Celem eliminacji negatywnego zjawiska, jakim jest występowanie tarcia pomiędzy elementami nagniatającymi a materiałem obrabianym, jest zastosowanie narzędzia łożyskowanego hydrostatycznie [64, 76].

Głównym celem procesu wytwórczego elementów maszyn jest integracja funkcjonalności właściwości stereometrycznych i użytkowych powierzchni. Cel ten zapewnia obróbka sekwencyjna, czyli następująca jedna po drugiej, która

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

bardzo często łączy obróbkę ubytkową i bezubytkową [41, 42, 55], np. toczenie, a następnie nagniatanie. Powierzchnia uzyskana po obróbce sekwencyjnej charakteryzuje się małą chropowatością, minimalnym zużyciem ściernym podczas docierania oraz większą zdolnością retencji środka smarnego [41]. Istnieje również możliwość zintegrowanej obróbki nagniataniem i toczeniem, wykorzystując tzw. tokarko-nagniatarkę, obrabiarkę, która pozwala na równoczesną obróbką toczeniem i nagniataniem w tym samym czasie i z tym samym posuwem wzdłużnym [100, 103]. Metoda ta pozwala na obróbkę wałów o średnicy $20 \div 100$ mm i dużej smukłości ($l/d \leq 20$). Zaletą tego sposobu obróbki jest znaczne skrócenie czasu obróbki w stosunku do tradycyjnych sposobów obróbki smukłych wałów i tłoczek silników hydraulicznych. Zintegrowana obróbka na tokarko-nagniatarce pozwala na wykonaniu przedmiotów w klasie dokładności IT7–IT8 i chropowatości powierzchni $Ra < 0,32 \mu\text{m}$.

Kolejnym bardzo ważnym skutkiem procesu nagniatania jest ukształtowanie ściskającego stanu naprężeń własnych, a ich wartość i głębokość zalegania zależą od wywieranych nacisków [101]. Przyczyną powstawania naprężeń są odkształcenia plastyczne, przemiany strukturalne, jakie mają miejsce oraz wzrost temperatury materiału w czasie obróbki. W wyniku oddziaływania narzędzia na materiał obrabiany zmniejsza się jego objętość właściwa. Głębiej położone warstwy materiału nie pozwalają na rozprzestrzenianie się odkształceń plastycznych, co powoduje powstanie stanu naprężeń [101, 106]. Naprężenia własne powstające w wyniku nagniatania zalegają na większych głębokościach ($1,3 \div 1,8$ razy) niż głębokość zgniotu [101].

Głębokość zalegających naprężeń oraz ich wartość uzależniona jest od zastosowanych parametrów obróbki i rodzaju materiału obrabianego [40, 111, 112, 171]. Podczas nagniatania stali 41Cr4 zostają ukonstruowane ściskające naprężenia obwodowe i osiowe zalegające na głębokości ok. $100 \div 120 \mu\text{m}$ [40]. W przypadku obróbki stali AISI 1045 (zgodnie z [178] C45) naprężenia ściskające zalegają do głębokości ok. 1 mm [112]. Podobnie kształtuje się stan naprężeń własnych podczas obróbki stali 17-4PH. Charakter ściskający mają zarówno składowe obwodowe jak i osiowe naprężenia własnych. Wzrost ciśnienia na agregacie hydraulicznym, odpowiedzialnym za docisk narzędzia do powierzchni obrabianej, sprzyja większym naprężeniom [171].

Na skutek oddziaływania gładkiego narzędzia na powierzchnię obrabianą następuje zgniot materiału, co prowadzi do przebudowy oraz zmian mikrostruktury. Następuje wydłużenie ziaren oraz dochodzi do zjawiska naruszenia spójności ziaren [81]. W zależności od środowiska obróbkowego mechanizm powodujący efekt umocnienia spowodowany jest poprzez zgniot oraz uplastycznienie termiczne [17].

Warstwa wierzchnia ukształtowana poprzez nagniatanie wykazuje budowę strefową, w której należy wyodrębnić następujące obszary: strefę rozdrobnienia,

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

strefę odkształceń plastycznych, strefę odkształceń sprężystych oraz naprężeń własnych [101, 129].

Zmiany twardości i struktury materiału obrabianego zachodzą zazwyczaj w niewielkiej odległości od powierzchni obrabianej. Jednak wzrost twardości w obszarze przypowierzchniowym wywołuje deformację w obrabianym materiale nawet na większych głębokościach [40, 112]. Przyrost twardości zależy od parametrów obróbki [24, 42, 47, 148]. Istotnym czynnikiem, wpływającym na przyrost twardości jest rodzaj środowiska obróbkowego. Autorzy pracy [105] dowiedli, że nagniatanie realizowane w środowisku chłodzenia kriogenicznego ($\text{SCCO}_2 + \text{MQL}$) pozwala na zmniejszenie ilości wydzielanego ciepła oraz ograniczenie tarcia w strefie nagniatania. Autorzy zauważyli również, że nagniatanie realizowane w środowisku $\text{SCCO}_2 + \text{MQL}$ ogranicza szerokość „białej warstwy”.

Interesującym zjawiskiem, które można uzyskać w wyniku nagniatania tocznego stali jest rozpad austenitu szczałkowego rozłokowanego na granicach ziaren [40].

Istotnym zagadnieniem, opisującym wpływ nagniatania naporowego na właściwości warstwy wierzchniej jest ocena stanu energetycznego obrabianego przedmiotu [152, 153]. Odkształcenie plastyczne występujące podczas nagniatania powoduje wytworzenie energii mechanicznej, która częściowo wydzielana jest w postaci ciepła, reszta zaś pozostaje zmagazynowana w materiale, powodując wzrost jego energii powierzchniowej. Skumulowana w ten sposób energia może stać się siłą napędową wielu zjawisk zachodzących na powierzchni odkształconego metalu i powodować wzrost aktywności adsorpcyjnej i chemicznej warstwy wierzchniej oraz zdolności do dyfuzji [152].

Obecnie można spotkać rozwiązania technologiczne, które łączą obróbkę nagniataniem tocznym z obróbką laserową [139] czy obróbką wspomaganą drganiami (VABB – Vibration Assisted Ball Burnishing) [54, 140]. Tian i Shin w swojej pracy [139] zajmowali się obróbką hybrydową, było to nagniatanie toczne wspomaganie wiązką lasera (LAB – Laser Assisted Burnishing). Materiałem poddanym obróbce była stal AISI 4140 wstępnie zahartowana. Zastosowanie wiązki lasera pozwoliło na czasowe wyżarzanie zmiękczające, dzięki czemu mogło nastąpić pełniejsze odkształcenie plastyczne materiału obrabianego. Obecność wiązki lasera podczas nagniatania umożliwiła uzyskanie gładziej powierzchni oraz większych zmian twardości i ściskających naprężeń własnych, zalegających na większych głębokościach w porównaniu do konwencjonalnego nagniatania. Siły występujące podczas obróbki LAB są mniejsze niż przy „normalnym” nagniataniu, co gwarantuje mniejsze zużycie narzędzia. Realizacja nagniatania tocznego wspomaganego drganiami (VABB) pozwala na poprawę nośności powierzchni oraz parametrów amplitudowych powierzchni, równocześnie brak jest uszkodzeń powierzchni, np. zadrapań powierzchni [54, 140].

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

2.3.2. Właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu dynamicznym

Nagniatanie dynamiczne odśrodkowe, zwane inaczej kulkowaniem odśrodkowym, wyróżnia się wieloma zaletami. Do mocnych stron tego sposobu obróbki należy zaliczyć prostą budowę urządzeń technologicznych, możliwość wykorzystania uniwersalnych obrabiarek skrawających, możliwość polepszenia stanu warstwy wierzchniej elementów o małej sztywności, a także możliwość obróbki powierzchni kształtowych przy zastosowaniu specjalnego programu sterującego na obrabiarkach CNC [101].

Podstawowym celem nagniatania odśrodkowego jest umocnienie warstwy wierzchniej oraz zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej obrabianych przedmiotów. Wytrzymałość zmęczeniowa zależy od właściwości fizycznych warstwy wierzchniej (naprężeń własnych, utwardzenia) oraz chropowatości powierzchni [8, 101].

Nagniatanie odśrodkowe pozwala zapewnić małą chropowatość powierzchni i równomierne rozłożenia zgniotu w warstwie wierzchniej. Istnieje możliwość zastosowania podczas obróbki różnych rodzajów cieczy smarująco-chłodzących, co podnosi efekt gładkościowy, przeciwkorozyjny i umocnieniowy oraz zmniejsza zużycie ściernic powierzchni nagniatanych [144].

Uzyskanie zadowalających właściwości eksploatacyjnych obrabianych przedmiotów wskutek nagniatania dynamicznego uwarunkowane jest doбором parametrów wpływających na dynamikę uderzenia, które determinują proces odkształcenia oraz określeniem stanu geometrycznego powierzchni wyjściowej [61, 144].

W przypadku nagniatania dynamicznego skoncentrowanego za chropowatość powierzchni można uznać nierówności wywołane następującymi czynnikami [61]: zrealizowaną obróbką, pęknięciami materiału podczas obróbki, strukturą materiału.

Chropowatość powierzchni ukształtowana poprzez nagniatanie skoncentrowane zależy od: wielkości zmian dosuwu narzędzia do przedmiotu obrabianego, prędkości obwodowej głowicy, liczby przejazdów narzędzia, wymiarów elementów nagniatających, rodzaju materiału obrabianego, chropowatości wyjściowej materiału obrabianego [23, 101, 144].

W literaturze można spotkać prace poświęcone nagniataniu dynamicznemu odśrodkowemu stali niestopowej i stopowej [144], żeliwa [8, 35, 61, 143, 146], stopów tytanu [167, 168], gdzie analizowano wpływ parametrów technologicznych na chropowatość powierzchni. W wyniku przeprowadzonych badań zauważono, że chropowatość powierzchni ze wzrostem dosuwu narzędzia najpierw maleje, a następnie rośnie. W zakresie małych wartości dosuwu występuje większa zmiana chropowatości powierzchni. Zwiększenie dosuwu powoduje zmniejszenie wpływu bicia kulek na równomierność śladów uderzeń na powierzchni obrabianej, ale następuje także intensyfikacja tarcia w strefie obróbki, co przekłada się na wzrost parametrów R_a i R_z . Wzrost prędkości obwodowej narzędzia

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

powoduje zwiększenie energii kinetycznej elementów nagniatających, co wpływa na wielkość odkształceń sprężysto – plastycznych. Wpływ prędkości obwodowej głowicy nagniatającej jest identyczny jak w przypadku dosuwu. Przekroczenie wartości optymalnej prędkości powoduje wzrost falistości oraz łuszczenie się powierzchni [35]. Wzrost posuwu wzdłużnego oraz przesuwu poprzecznego powoduje zwiększenie się chropowatości powierzchni obrabianej. Zjawisko to należy tłumaczyć tym, że następuje zmniejszanie liczby uderzeń kulek przypadających na jednostkę powierzchni obrabianej, a tym samym wzrost odległości między śladami uderzeń. Chropowatość powierzchni po nagniataniu odśrodkowym uwarunkowana jest również właściwościami mechanicznymi materiału obrabianego oraz stanem geometrycznym powierzchni wyjściowej [61, 144, 167, 168].

Cechą charakterystyczną powierzchni obrobionych przez nagniatanie jest stosunkowo duży udział nośny. Spowodowane jest to zmianą kształtu mikronierówności, cechują się one bardziej „opływowym” kształtem [35]. „Wybijanie” na powierzchni obrabianej śladów obróbkowych pozwala na powstanie potencjalnych „zbiorników” mogących gromadzić w swej przestrzeni substancję smarującą bądź też stymulować korzystne eksploatacyjne procesy hydrodynamicznego „unoszenia smarownego” [146].

Autorzy pracy [67] zauważyli, że dzięki nagniataniu odśrodkowemu parametr Ra można zmniejszyć sześciokrotnie w odniesieniu do wartości uzyskanej po toczeniu. Po obróbce nagniataniem nie powstaje struktura powierzchni anizotropowa. Parametr Ra po nagniataniu można uzyskać na poziomie $0,25 \div 0,5 \mu\text{m}$. Chropowatość powierzchni po nagniataniu zależy od stanu powierzchni przed obróbką.

Obróbka nagniataniem odśrodkowym powoduje umocnienie warstwy wierzchniej obrabianego materiału, która jest oceniana na podstawie pomiarów mikrotwardości tej warstwy. Podczas nagniatania odśrodkowego następuje rozdrobnienie struktury i zwiększenie gęstości dyslokacji, co przyczynia się do zwiększenia twardości i wytrzymałości [143]. Głębokość i stopień umocnienia warstwy wierzchniej uzależnione są od parametrów technologicznych procesu [35, 145, 167]. Głębokość utwardzenia jak i przyrost twardości przy nagniataniu odśrodkowym wzrastają ze zwiększaniem prędkości obwodowej narzędzia. Związane jest to ze wzrostem energii zderzenia, jak i liczby uderzeń przypadających na jednostkę powierzchni. Wzrost prędkości obwodowej przedmiotu i posuwu powoduje spadek stopnia umocnienia warstwy wierzchniej. Duża chropowatość początkowa stanowi jakby „osłonę” podstawowych warstw materiału przed uderzeniami, co utrudnia równomierne rozłożenie zgniotu [145, 167, 168].

Nagniatanie odśrodkowe może być również z powodzeniem wykorzystywane w jednej operacji ze szlifowaniem stosując w tym celu narzędzia hybrydowe, które umożliwiają obróbkę materiałów trudnoobrabialnych takich jak stopy niklu oraz tytanu [88].

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

Nagniatanie dynamiczne rozproszone umożliwia łatwiejszą obróbkę przedmiotów kształtowych. Obróbka ta może być realizowana na obrabiarkach uniwersalnych (śrutownicach). Nagniatanie rozproszone pozwala na zmiany strukturalne w warstwie wierzchniej części po obróbce cieplnej [65, 101], jak również wzrost odporności na zużycie zmęczeniowe [78, 94, 166].

W wyniku dynamicznego oddziaływania na przedmiot obrabiany rozproszonych elementów nagniatających na powierzchni obrabianej tworzą się liczne wzniesienia i zagłębienia. W miarę trwania obróbki ślady nakładają się na siebie, pokrywając powstałe w pierwszym etapie. Wzrost liczby uderzeń elementów nagniatających powoduje zmniejszenie wysokości mikronierówności [84, 162].

Chropowatość powierzchni po nagniataniu dynamicznym rozproszonym uzależniona jest od stopnia pokrycia, średnicy kulek nagniatających, częstotliwości uderzeń oraz czasu trwania obróbki [6, 7, 81, 163]. Znaczenie ma także rodzaj materiału, z którego wykonane są kulki nagniatające [48, 51]. W wyniku obróbki uzyskuje się charakterystyczną bezkierunkową strukturę stereometryczną powierzchni [25].

Nagniatanie dynamiczne rozproszone, tzw. „shot peening” – SP, realizowane za pomocą kulistych elementów o niewielkich wymiarach ma na celu wprowadzenie ściskających naprężeń własnych oraz bardzo często rozdrobnienie mikrostruktury na powierzchni i pod powierzchnią, co sprzyja wzrostowi twardości. Naprężenia ściskające powstają w miejscu uderzenia elementem nagniatającym z odpowiednio dużą energią kinetyczną. Są one wynikiem lokalnych odkształceń plastycznych warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego [154]. Konstytuowanie w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej ściskających naprężeń własnych pozwala na zmniejszenie koncentracji naprężeń pochodzących od obciążenia zewnętrznego, co przekłada się na wzrost wytrzymałości zmęczeniowej [174].

Obróbka kulkowaniem strumieniowym pozwala również na kompensację naprężeń w warstwie wierzchniej części ze stali hartowanej w celu zapobiegania powstawaniu mikropęknięć podczas szlifowania. Nagniatanie strumieniowe, zrealizowane przed szlifowaniem, powoduje wytworzenie dużych technologicznych naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej. Pozwala to zwiększyć intensywność szlifowania bez powstawania mikropęknięć szlifierskich [99].

Przyrost twardości warstwy wierzchniej po nagniataniu dynamicznym rozproszonym zależy od zawartości węgla w materiale obrabianym [71, 95]. Głębokość zalegania naprężeń oraz ich wartość zależy od rodzaju materiału obrabianego i parametrów obróbki [29, 155, 172, 173].

Obecnie stosowane jest umacnianie warstwy wierzchniej za pomocą lasera. Hartowanie laserowe jest jedną z nowoczesnych metod obróbki cieplnej, stosowaną w wielu procesach wytwórczych elementów maszyn. Podczas obróbki, która przebiega w bardzo krótkim czasie, do przedmiotu obrabianego dostarczana jest bardzo duża ilość ciepła. Zatem rzeczą nieuniknioną jest występowanie nierównomiernej struktury oraz obecność rozciągających naprężeń pomiędzy

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

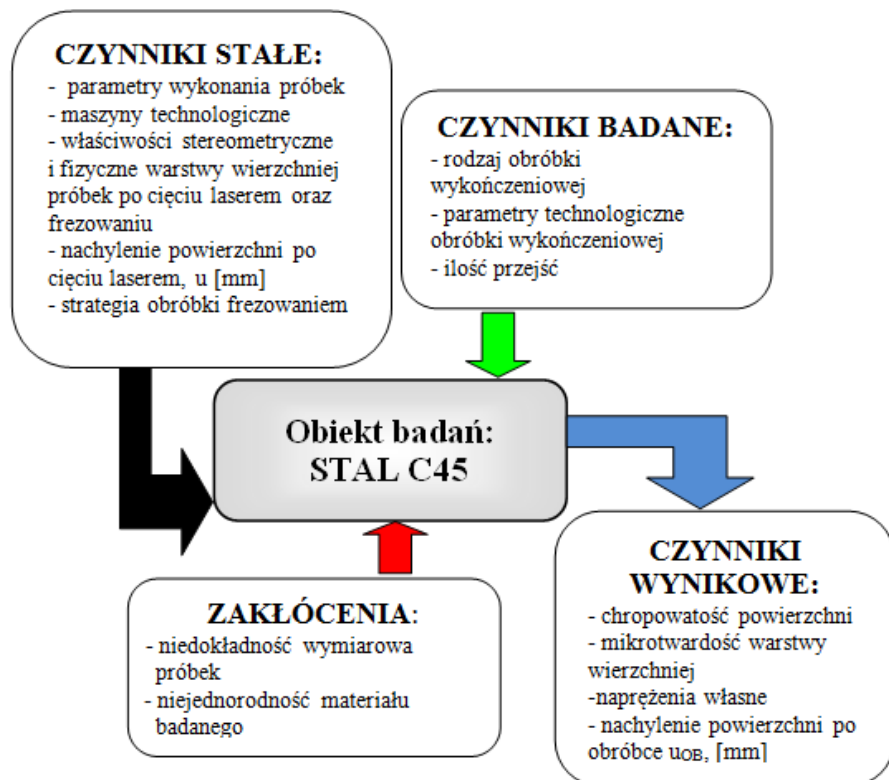
powierzchnią hartowaną a rdzeniem materiału [63, 149]. Występowanie rozciągających naprężeń powoduje obniżenie odporności przeciwkorozyjnej [79]. Dlatego też poszukiwane są rozwiązania pozwalające na niwelację negatywnych skutków oddziaływania wiązki lasera.

Nagniatanie rozproszone z powodzeniem może być stosowane do przebudowy mikrostruktury stali 17-4PH po hartowaniu laserowym [149, 150]. Przeprowadzona obróbka pozwoliła na wyeliminowanie austenitu szczątkowego (następstwo hartowania laserowego). Modyfikacja ilości austenitu szczątkowego oraz mikrostruktury w pobliżu obszaru powierzchniowego uzależnione jest od intensywności nagniatania. Zmniejszenie ilości austenitu szczątkowego spowodowane jest przeniesieniem cząstek tej fazy do martenzytu, co przekłada się na zmniejszenie objętości tej frakcji [79]. Następstwem zrealizowanej obróbki jest również zmiana rozmiaru domen oraz stanu mikroodkształceń i przyrost twardości. Warstwa wierzchnia stali 17-4PH po hartowaniu laserowym charakteryzuje się wyższą granicą plastyczności niż materiał rodzimy, co wpływa na zmiany stanu naprężeń własnych. W wyniku nagniatania w warstwie wierzchniej powstają ściskające naprężenia własne. Przyrost naprężeń dla warstwy wierzchniej materiału rodzimego jest mniejszy niż dla warstwy po hartowaniu przy tej samej intensywności nagniatania. Po zrealizowanej obróbce nastąpiła poprawa właściwości mechanicznych obrabianego materiału. Następstwem przeprowadzonej obróbki są również zmiany gęstości dyslokacji w materiale obrabianym, co sprzyja efektowi umocnienia.

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

3.1. Obiekt i zakres badań

Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu warunków technologicznych obróbki nagniataniem oraz łącznej obróbki frezowaniem wykończeniowym i nagniataniem na wybrane właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów wycinanych laserem. Technologia obróbki wykończeniowej łącząca obróbkę skrawaniem i nagniataniem może być zastosowana do elementów, od których wymaga się odpowiedniej dokładności geometrycznej oraz korzystnych właściwości warstwy wierzchniej, np. krzywki, prowadnice. Natomiast technologia wykorzystująca tylko obróbkę nagniataniem przeznaczona może być do obróbki elementów narażonych na obciążenia zmienne, np. dźwignie.



Rys. 3.1. Model obiektu badań

Obiektem badań były próbki ze stali C45 po procesie cięcia laserem. W wyniku przeprowadzonych badań wstępnych określono zbiór czynników

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

stałych, badanych, wynikowych oraz zakłóceń (rys. 3.1). Jako czynniki stałe przyjęto:

- parametry wykonania próbek za pomocą wycinarki laserowej,
- rodzaj maszyn technologicznych,
- rodzaj narzędzi do frezowania i strategię obróbki,
- właściwości stereometryczne i fizyczne warstwy wierzchniej próbek po cięciu laserem i po frezowaniu,
- dosuw głowicy nagniatającej $g = 0,5$ mm,
- dokładność wykonania: nachylenie powierzchni po cięciu laserem u .

Czynnikami analizowanymi były:

- rodzaj obróbki wykończeniowej powierzchni po procesie cięcia laserem,
- parametry technologiczne:
 - nagniatanie odśrodkowe: v_g – prędkość obwodowa głowicy nagniatającej, v_f – prędkość posuwu, f_p – przesuw poprzeczny,
 - nagniatanie toczne: F – siła nagniatania, f – posuw, d_N – średnica elementu nagniatającego,
- i – ilość przejść obróbkowych.

Jako czynniki wynikowe przyjęto:

- parametry chropowatości powierzchni Ra , Rz ,
- parametry krzywej Abbotta-Firestone'a (Rpk , Rk , Rvk),
- udział materiałowy profilu chropowatości Rmr ,
- mikrotwardość warstwy wierzchniej po obróbce wykończeniowej,
- naprężenia własne po obróbce wykończeniowej,
- u_{OB} – nachylenie powierzchni po obróbce wykończeniowej.

Zostały wytypowane cztery sposoby obróbki wykończeniowej powierzchni po cięciu laserem:

- nagniatanie odśrodkowe,
- frezowanie wykończeniowe i nagniatanie odśrodkowe,
- nagniatanie toczne,
- frezowanie wykończeniowe i nagniatanie toczne.

Obróbka nagniataniem odśrodkowym została zrealizowana dla 13 zestawów parametrów technologicznych. W przypadku nagniatania tocznego wytypowano 7 zestawów parametrów oraz 3 średnice elementów nagniatających. Obróbkę frezowaniem przeprowadzono dla stałych warunków skrawania. Podczas frezowania i nagniatania odśrodkowego zastosowano ciecz chłodząco-smarującą Mobil Cut. Nagniatanie toczne było realizowane w obecności oleju syntetycznego Mobil Vactra Oil.

3.2. Materiał stosowany w badaniach

W badaniach wykorzystano próbki ze stali niestopowej C45 (oznaczenie według PN-EN ISO 683-2:2018-08). Gatunek tej stali stosowany jest powszechnie

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

w przemyśle maszynowym. Znajduje on zastosowanie na średnio obciążone elementy maszyn i urządzeń, jak: wrzeciona, wały, osie, niehartowane koła zębate, tarcze, dźwignie, piasty do kół. W tabeli 3.1 przedstawiono skład chemiczny oraz wybrane właściwości stali wykorzystywanej w badaniach.

Tabela 3.1. Procentowy skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe stali C45

Skład chemiczny (średni), [%]								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0,48	0,74	0,36	0,011	0,01	0,09	0,02	0,002	reszta
Granica plastyczności (min.)						R _e = 430MPa		
Wytrzymałości na rozciąganie (min.)						R _m = 740 MPa		
Twardość (min.)						250 HB		

Celem weryfikacji części badawczej, dotyczącej wpływu stanu warstwy wierzchniej przedmiotów przed obróbką wykończeniową na efekty obróbki nagniataniem, eksperyment został przeprowadzony dla próbek ze stali C45, wykonanych przy użyciu wycinarki laserowej oraz dla próbek ze stali C45 obrabianych frezowaniem (nie wycinanych laserem).

Do procesu cięcia laserem wykorzystana została wycinarka laserowa LASER Amada 3000 W firmy Amada America Inc. Próbkę wycięto na wymiar 5 x 8 x 100 mm, przy wykorzystaniu tlenu jako gazu roboczego stosując parametry standardowe (tabela 3.2).

Tabela 3.2. Parametry wycinania laserem próbek wykorzystywanych w badaniach

PARAMETRY CIĘCIA	
Prędkość cięcia v	1150 mm/min
Moc	2,15 kW
Częstotliwość f_{Hz}	1280 Hz
Ciśnienie gazu	0,06 MPa
Położenie ogniskowej	+13 mm
Rodzaj gazu	Tlen

Obróbkę frezowaniem przeprowadzono na pionowym centrum frezarskim FV580a, wyposażonym w system sterowania Fanuc 0iMC, znajdującym się w Katedrze Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej. Próbkę została w pierwszym etapie wycięta z płyty za pomocą piły mechanicznej, a następnie frezowane na taki sam wymiar jak po procesie cięcia laserem, wykorzystując dwuostrzowy frez firmy Sandvick. Proces frezowania współbieżnego został przeprowadzony przy posuwie na ostrze $f_z = 0,067$ mm/ostrze, prędkości skrawania $v_c = 102$ m/min i głębokości skrawania $a_p = 0,12$ mm.

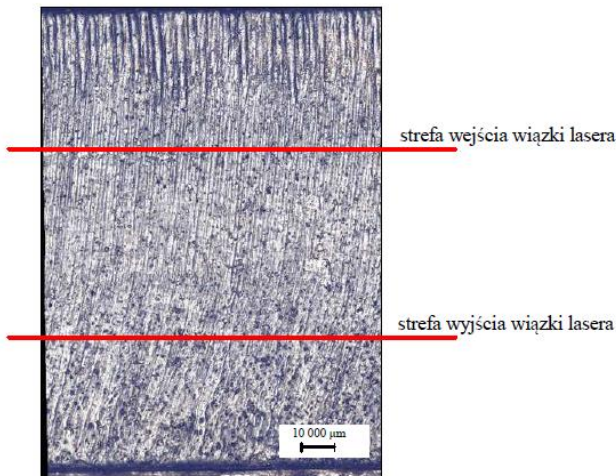
3.3. Metodyka badań

3.3.1. Badania chropowatości powierzchni

Pomiary chropowatości powierzchni oraz topografii 3D wykonano za pomocą urządzenia T8000RC 120-140 firmy Hommel – Etamic, które pozwala na wyznaczenie parametrów amplitudowych, wysokościowych, horyzontalnych oraz krzywej Abbotta-Firestone'a [186].

W wyniku oddziaływania na przecinany element koherentnej wiązki lasera na powierzchni powstają strefy o zróżnicowanej chropowatości. Kierując się wytycznymi zawartymi w PN-EN ISO 9013:2017-04 pomiary chropowatości powierzchni powinny być dokonane w odległości 1/3 grubości od górnej krawędzi cięcia, gdy grubość przecinanego elementu wynosi powyżej 2 mm [184].

Zgodnie z powyższą normą zostały wykonane pomiary chropowatości powierzchni w odległości 1/3 grubości od górnej krawędzi cięcia, w tzw. „strefie wejścia wiązki lasera” oraz w odległości 1/3 od dolnej krawędzi cięcia, w tzw. „strefie wyjścia wiązki lasera”. Wybór dolnego obszaru do wyznaczenia parametrów chropowatości wynikał z obecności dwóch charakterystycznych stref. Pomiary wykonano w kierunku prostopadłym do śladów obróbkowych na powierzchni. Rysunek 3.2 przedstawia schematycznie miejsce pomiaru chropowatości powierzchni.



Rys. 3.2. Widok powierzchni przecięcia z zaznaczonymi miejscami pomiaru chropowatości

Taki sam schemat pomiarów chropowatości powierzchni został przyjęty dla próbek po obróbce wykończeniowej.

Z przeglądu literatury wiadomo, że po procesie cięcia laserem stali niestopowych parametr Ra wynosi powyżej $2 \mu\text{m}$ [14, 22, 92]. Uwzględniając wytyczne odnośnie do pomiarów chropowatości [151, 181] przyjęto długość odcinka elementarnego $lr = 2,5 \text{ mm}$. Według normy PN – EN ISO 4288: 2011 gdy

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

parametr Ra jest większy od $2 \mu\text{m}$ i mniejsze lub równe $10 \mu\text{m}$ to długość odcinka elementarnego powinna być równa $2,5 \text{ mm}$. W przypadku powierzchni po obróbce wykończeniowej, na podstawie wcześniejszych badań własnych [123, 128, 169], do pomiarów chropowatości przyjęto odcinek elementarny $lr = 0,8 \text{ mm}$.

Udział materiałowy profilu chropowatości Rmr został wyznaczony na poziomie $c = 1 \mu\text{m}$ oraz $c = 2 \mu\text{m}$ poniżej najwyższego piku profilu chropowatości [181].

3.3.2. Badania mikrotwardości i mikrostruktury warstwy wierzchniej

Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa zgodnie z [183] na zglądach poprzecznych po wcześniejszej standardowej obróbce przygotowawczej. Do pomiarów wykorzystano mikrotwardościomierz LM 700AT firmy Leeco. Zastosowano obciążenie węgelnika równe 50 g ($HV_{0,05}$) oraz 10 g ($HV_{0,01}$). Do oceny struktury materiału wykorzystano mikroskop metalograficzny Nikon Eclipse MA 100 [125] oraz mikroskop skaningowy Phenom ProX. Celem łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników zmiany mikrotwardości warstwy wierzchniej w wyniku realizowanej obróbki, został wyznaczony stopień umocnienia e z zależności:

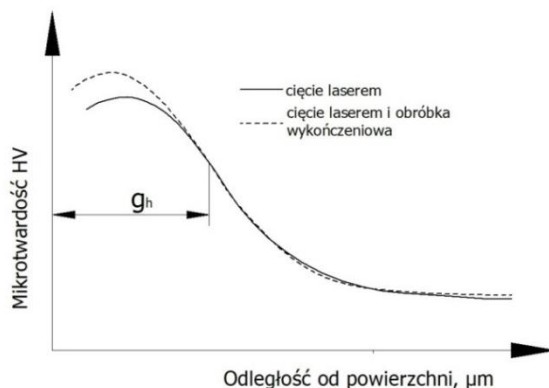
$$e = 100 \cdot \frac{HV_{max} - HV_0}{HV_0}, \quad [\%] \quad (3.1)$$

gdzie:

HV_{max} – maksymalna wartość mikrotwardości warstwy wierzchniej dla danego sposobu obróbki,

HV_0 – mikrotwardość rdzenia.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów mikrotwardości wyznaczona została również grubość warstwy umocnionej w wyniku zrealizowanej obróbki wykończeniowej elementu wycinanego laserem g_h (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Metodyka wyznaczania grubości warstwy umocnionej g_h [122]

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

3.3.3. Badania rentgenograficzne

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wiadomo, że w wyniku cięcia laserem powierzchnia przecinanego elementu jest mocno utleniona [52, 60, 129]. Celem potwierdzenia tej hipotezy dla materiału stosowanego w eksperymencie zostały wykonane badania rentgenograficzne XRD (ang. *X-ray Diffraction*) w Analitycznym Laboratorium Wydziału Chemii UMCS. Do rentgenowskiej analizy jakościowej wykorzystano dyfraktometr Empyrean firmy Panalytical (rys. 3.4).

Badania rentgenograficzne wykonano w symetrycznej geometrii Bragg-Brentano, w temperaturze pokojowej przy ciśnieniu atmosferycznym. W geometrii Bragg-Brentano wykorzystywana jest wiązka rozbieżna. Jest to technika ogniskująca, gdzie źródło promieniowania i detektor znajdują się na obwodzie okręgu ogniskowania, w którego centrum znajduje się płaska próbka [142].

Badaniom poddano próbki prostopadłościennne o wymiarach 5 x 8 x 15 mm, które przed badaniami XRD były czyszczone w acetonie.

Jako źródło promieniowania rentgenowskiego wykorzystano lampę z anodą miedzianą o mocy 3 kW. Promieniowanie anody było filtrowane niklem pochłaniającym promieniowanie K_{β} . Rejestracji danych dokonywano metodą krokowego skanowania w zakresie kątów $2\theta = 5^{\circ} \div 110^{\circ}$. Krok skanowania wyniósł $0,05^{\circ}$, a czas ekspozycji w punkcie $3 \div 5$ s.

a)



b)



Rys. 3.4. Wysokorozdzielczy dyfraktometr rentgenowski Empyrean: a) widok ogólny, b) układ pomiarowy

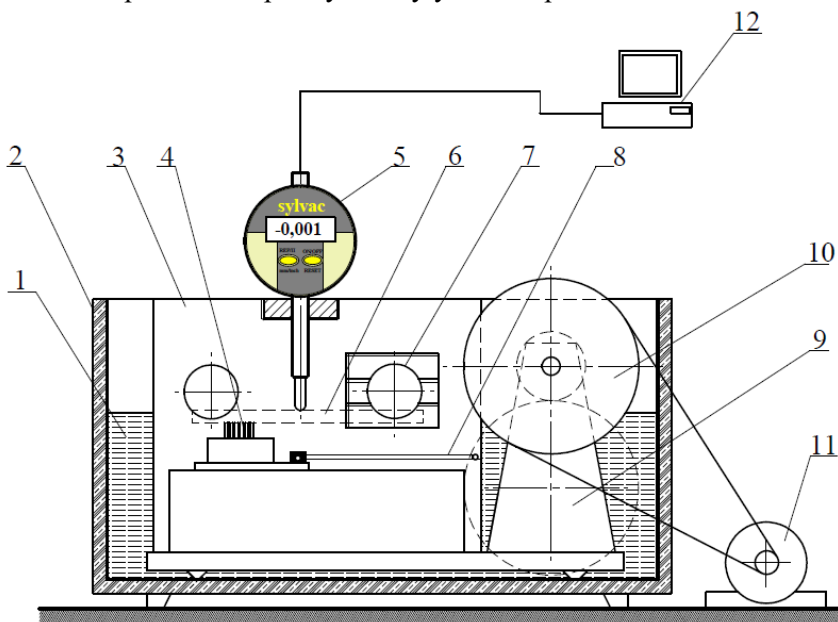
W wyniku pomiarów dyfrakcyjnych uzyskano dyfraktogramy, których analiza w oparciu o bazę danych dyfrakcyjnych PDF (ang. Powder Diffraction File), pozwoliła na określenie faz i struktur powstałych na powierzchni stali C45 po cięciu laserem oraz obróbce wykończeniowej tych powierzchni. Identyfikacja poszczególnych faz i struktur polega na dopasowaniu otrzymanego obrazu dyfrakcyjnego na podstawie pozycji kątowej pików i ich intensywności do danych zawartych w bazach PDF.

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

3.3.4. Badania naprężeń własnych

Badania rozkładu naprężeń własnych przeprowadzono metodą mechaniczną. Naprężenia własne obliczano na podstawie pomiaru wielkości odkształceń próbki, następujących podczas zdejmowania kolejnych warstw materiału, w którym te naprężenia „zalegają”. Pomiar naprężeń własnych został przeprowadzony na stanowisku do trawienia chemicznego, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.5. Stal C45 była trawiona w 5% roztworze kwasu azotowego HNO_3 .

Przyrząd do trawienia chemicznego 3 umieszcza się w wannie 2 wypełnionej roztworem trawiącym. Próbka 6 o wymiarach 4 x 8 x 100 mm, charakteryzująca się występowaniem powierzchni po danym sposobie obróbki tylko z jednej strony, mocowana jest w dwóch uchwytach: stałym i przesuwym 7, co pozwala na jej odkształcenie. W celu zapewnienia stałej prędkości trawienia szczotka 4, poruszająca się ruchem posuwisto – zwrotnym, powoduje usuwanie produktów trawienia. Ruch szczotki zapewnia mechanizm korbowy 8, który poprzez przekładnię zębatą 9 oraz przekładnię pasową 10 napędzany jest za pomocą silnika 11. Wartość odkształceń próbki 6 mierzona była za pomocą czujnika 5, którego końcówka pomiarowa styka się z powierzchnią trawionej próbki. Dane pomiarowe przesyłane były do komputera 12.



Rys. 3.5. Schemat stanowiska do trawienia chemicznego

Wartość naprężeń własnych wyznaczono na podstawie zależności Dawidenkova [11], korzystając z programu do obliczeń:

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

$$\sigma_a = \frac{4 \cdot E}{3 \cdot L_0^2} \left[(h - a_i)^2 \cdot \frac{df(a_i)}{da_i} - 4 \cdot (h - a_i) \cdot f(a_i) + 2 \cdot \int_0^2 f(\xi) d\xi \right] \quad (3.1)$$

gdzie:

L_0 – odległość pomiędzy podporami [mm],

h – grubość trawionej próbki [mm],

a_i – grubość zdjętej warstwy [mm],

E – moduł Younga [MPa],

$f(a_i)$ – ugięcie próbki, odpowiadające usunięciu warstwy o grubości a_i [mm],

ξ – pośrodkowa grubość usuniętej warstwy.

Zależność Dawidenkowa, równorzędna metodzie Weismanna-Philipsa, zmodyfikowana przez Biergera [11] jest metodą uniwersalną, gdyż znajduje zastosowanie do pomiaru naprężeń własnych warstwy wierzchniej na powierzchniach płaskich jak i również na powierzchniach walcowych [34].

Znak minus przy wyliczonych naprężeniach oznacza, że w próbce zalegały naprężenia ściskające, natomiast znak plus świadczy o naprężeniach rozciągających.

3.3.5. Badania dokładności geometrycznej

Ocena dokładności wymiarowo-kształtowej wyrobów wycinanych wiązką laserową realizowana jest w oparciu o PN-EN ISO 9013:2017-04, gdzie można wyznaczyć wartości charakterystyczne opisujące jakość elementu. Do charakterystyk należy zaliczyć wskaźnik u , określany jako tolerancja prostopadłości lub nachylenie powierzchni cięcia. Według PN-EN ISO 9013:2017-04 jest to odległość pomiędzy dwiema liniami prostymi równoległymi, między które wpisany jest profil powierzchni cięcia [184].

Specyfikacja geometrii wyrobów definiowana jest również w oparciu o PN-EN ISO 1101:2017-05 [180]. Według powyższej normy tolerancja prostopadłości płaszczyzny odniesienia do płaszczyzny bazowej oznacza, że płaszczyzna zaobserwowana (rzeczywista) powinna zawierać się między dwiema płaszczyznami równoległymi, odległymi od siebie o odległość t , które są prostopadłe do płaszczyzny bazowej A [180].

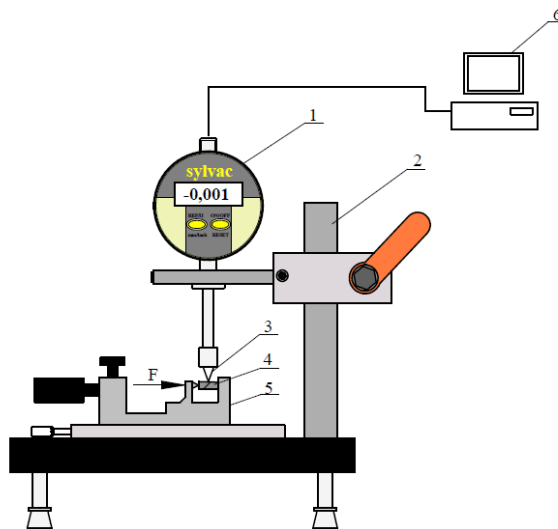
Definicje tolerancji prostopadłości w oparciu o normę PN-EN ISO 9013:2017-04 i PN-EN ISO 1101:2017-05 są spójne, dlatego podczas określania tolerancji prostopadłości elementów wycinanych laserem posłużono się obydwoema normami.

Pomiary nachylenia powierzchni elementów po cięciu laserem wykonane zostały na stanowisku przedstawionym na rysunku 3.6. Stanowisko to wyposażone jest w specjalny stolik ze śrubą mikrometryczną, na którym umiejscowiono imadło 5. Próbka 4 bazowana była na dolnej powierzchni przycinanej płyty, tak aby móc analizować kształt konturu powierzchni po cięciu laserem. Profil powierzchni wyznaczony został metodą stykową za pomocą czujnika Tesa DIGI-

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

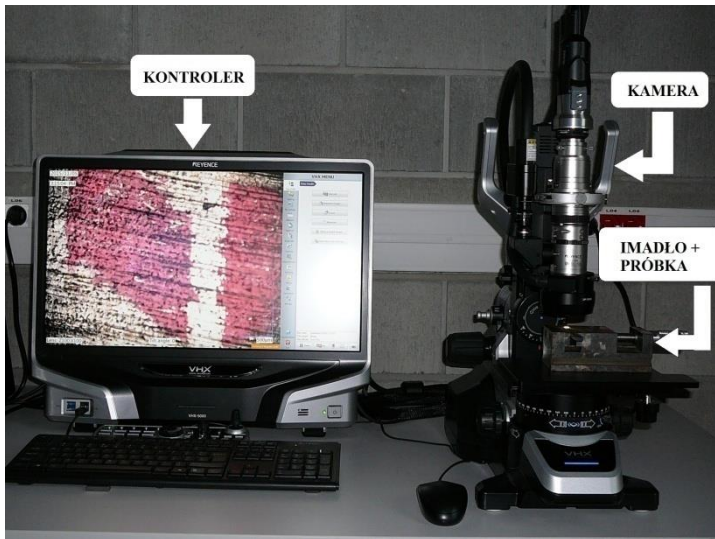
CO1, wyposażonego w ostrą końcówkę 3, z dokładnością do $1\ \mu\text{m}$, z krokiem co $1\ \text{mm}$, znajdującego się na trzpieniu 2. Dane były przesyłane do komputera 6. Zebrane punkty pozwoliły na wyznaczenie wskaźnika u , czyli wymiaru poziomego, opisującego odległość między dwiema liniami prostymi równoległymi, między które wpisany jest profil [184].

Celem weryfikacji uzyskanych wyników dodatkowe pomiary nachylenia powierzchni elementów po cięciu laserem wykonane zostały za pomocą metody optycznej, opartej na analizie obrazu powierzchni po cięciu laserem. Do pomiarów wykorzystano mikroskop cyfrowy 3D z serii VHX-500 firmy Keyence, wyposażony w kamerę cyfrową o możliwości powiększenia analizowanego obrazu od 100 do 1000 razy. Rysunek 3.7 przedstawia stanowisko wykorzystane do pomiarów.



Rys. 3.6. Widok stanowiska do badania nachylenia powierzchni

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ



Rys. 3.7. Widok stanowiska do wyznaczania nachylenia powierzchni

Próbki, które były badane, zostały zamocowane w imadle bazując na powierzchni dolnej, która była prostopadła do wiązki lasera podczas procesu cięcia. Korzystając z kamery cyfrowej skanowano powierzchnię o wymiarach 2 mm x 8 mm przy powiększeniu 300 razy. Następnie, wykorzystując oprogramowanie do analizy obrazu, wyznaczono kontur skanowanej powierzchni oraz wskaźnik nachylenia powierzchni cięcia u . Mikroskop Keyence został również wykorzystany do pomiarów wskaźnika u , którego rezultaty przedstawiono w pracy [118].



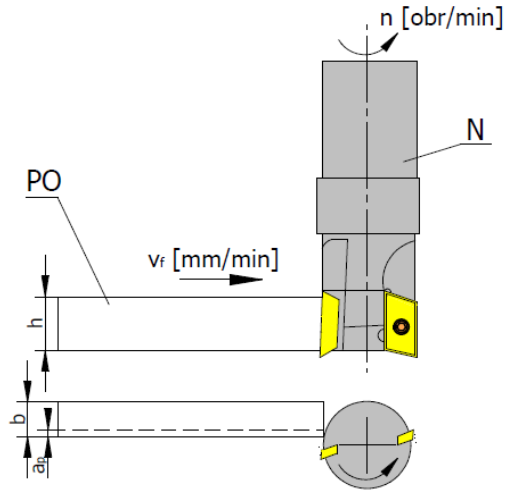
Rys. 3.8. Przykładowy kontur powierzchni stali C45 po cięciu laserem

Rysunek 3.8 przedstawia przykład skanowanej powierzchni wraz z wyznaczonym profilem.

3.4. Stanowiska obróbkowe

3.4.1. Stanowisko do frezowania wykończeniowego

Proces frezowania wykończeniowego, celem eliminacji negatywnych skutków cięcia laserem, został przeprowadzony na pionowym centrum obróbkowym FV-580a, znajdującym się na Politechnice Lubelskiej.



Rys. 3.9. Schemat procesu frezowania: N – narzędzie, PO – przedmiot obrabiany, a_p – głębokość skrawania, b – szerokość próbki, h – wysokość próbki

Frezowanie obwodowe (rys. 3.9) zrealizowano wykorzystując frezy dwustrzowe firmy Sandvik o średnicy 20 mm z płytkami 215880 APKT10, pokrytymi powłoką TiN. Na podstawie wcześniejszych badań własnych [119, 120, 124, 170] przyjęto następujące parametry technologiczne frezowania: $a_p = 0,12$ mm, $f_z = 0,067$ mm/ostrze, $v_c = 102$ m/min. Podczas frezowania została usunięta tylko część warstwy utwardzonej powstałej w procesie cięcia laserem.

3.4.2. Stanowisko do nagniatania odśrodkowego

Nagniatanie odśrodkowe zostało przeprowadzone na pionowym centrum obróbkowym FV-580a.

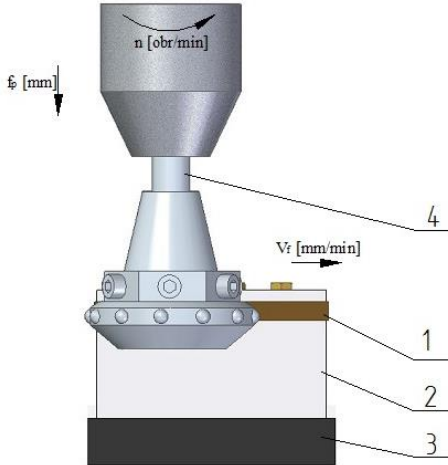
Narzędziem wykorzystanym do obróbki była specjalna głowica nagniatająca o średnicy zewnętrznej 70 mm, która w obsadzie posiada symetrycznie rozmieszczone kulki nagniatające o średnicy 6,3 mm, w ilości $z_k = 12$.

Podczas obróbki próbka 1 była zamocowana w uchwycie 2 w taki sposób, że powierzchnia obrabiana była równoległa do osi wrzeciona. Uchwyt znajdował się w szczękach imadła 3 posadowionego na stole obrabiarki, który podczas nagniatania przemieszczał się z prędkością v_f . Głowica nagniatająca 4 wykonywała ruch obrotowy z prędkością obrotową n oraz równocześnie przesuw po-

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

przecznym f_p . Rysunek 3.10 przedstawia schemat procesu nagniatania oraz widok stanowiska.

a)



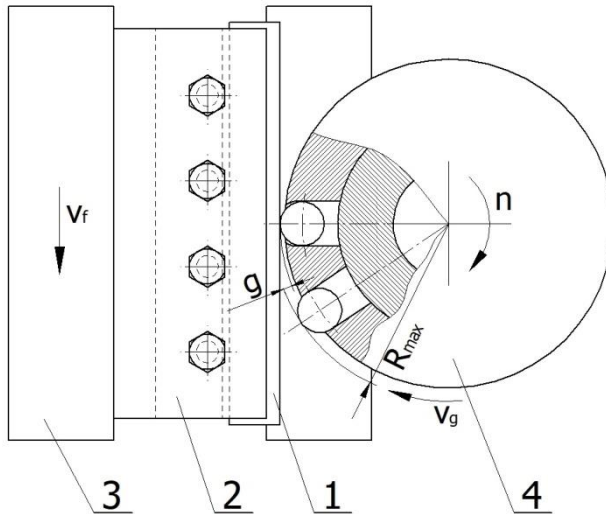
b)



Rys. 3.10. Schemat procesu nagniatania na pionowym centrum obróbkowym (1 – próbka, 2 – uchwyt, 3 – imadło, 4 – głowica nagniatająca): a) kinematyka nagniatania, b) widok stanowiska

Proces nagniatania odśrodkowego został zrealizowany z zastosowaniem cieczy chłodząco smarującej Mobile Cut, przy stałej wartości dosuwu $g = 0,5$ mm. Dosuw jest to parametr opisujący cofnięcie się kulki w głąb gniazda głowicy nagniatającej podczas uderzenia (rys. 3.11). Eksperyment realizowano dla parametrów technologicznych przedstawionych w tabeli 3.3, które przyjęto na podstawie wcześniejszych badań własnych [120, 121].

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ



Rys. 3.11. Graficzna interpretacja dosuwu g (1 – próbka, 2 – uchwyt, 3 – imadłem 4 – głowica nagniatająca) (g – dosuw, R_{max} – maksymalny promień głowicy, v_g – prędkość obwodowa głowicy, v_f – prędkość posuwu, n – prędkość obrotowa) [121]

Tabela 3.3. Zestaw parametrów technologicznych zastosowanych w próbach nagniatania

Lp.	v_g [m/min]	v_f [mm/min]	f_p [mm]	
1	528	3648	0,08	
2	681			
3	835			
4	989			
5	1143			
6	835	1368	0,03	
7		5928		
8		8208		
9		10488		
10		3648		0,13
11				0,18
12				0,23
13				0,23

3.4.3. Stanowisko do nagniatania tocznego

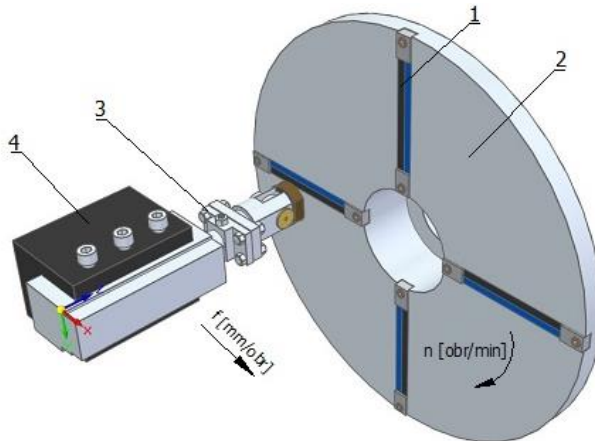
Nagniatanie toczne zostało przeprowadzone na tokarce uniwersalnej C11/MB. Jako narzędzie wykorzystano nagniatak, składający się z zespołu wywierającego siłę docisku oraz elementu nagniatającego, którym były kulki wykonane z azotku krzemu (Si_3N_4) o średnicach: $d_{N1} = 8$ mm, $d_{N2} = 12$ mm,

3. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

$d_{N3} = 16$ mm. Azotek krzemu posiada niewielkie oddziaływanie adhezyjne ze stalą.

Podczas obróbki próbki 1 były zamocowane w specjalnym uchwycie 2, w kształcie tarczy z czterema rowkami na płaskie próbki o maksymalnej szerokości 15 mm, która wykonywała ruch obrotowy. Nagniatak 3, zamocowany w imaku 4, wykonywał ruch posuwowy, będąc równocześnie dociskany ze stałą siłą F do przedmiotu obrabianego. Docisk elementu nagniatającego do powierzchni obrabianej był elastyczny. Wartość siły docisku F została wyznaczona na podstawie charakterystyki sprężyny. Na rysunku 3.12 przedstawiono schemat stanowiska oraz kinematykę nagniatania.

Proces nagniatania tocznego zrealizowano dla parametrów przedstawionych w tabeli 3.4, stosując olej syntetyczny o nazwie handlowej Mobil Vactra Oil. Wybór warunków obróbki został oparty o wcześniejsze własne prace [122, 123, 126].



Rys. 3.12. Schemat procesu nagniatania tocznego: 1 – próbka, 2 – uchwyt, 3 – nagniatak, 4 – imak narzędziowy

Tabela 3.4. Zestawy parametrów technologicznych zastosowanych w próbach nagniatania

Lp.	F [N]	v_N [m/min]	f [mm/obr]	d_N [mm]		
1	300	24,08	0,17	8		
2	510					
3	720					
4	930		0,05	12		
5	720				0,28	16
6						
7						

4. BADANIA WSTĘPNE

4.1. Wyznaczenie liczebności próby w badaniach warstwy wierzchniej po nagniataniu odśrodkowym

W celu weryfikacji statystycznej uzyskanych wyników przeprowadzono badania wstępne, dla których określono liczebność próby przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Liczebność próby wyznaczono z zależności [66]:

$$n = \frac{t_{(\alpha;f)}^2 S_x^2}{\varepsilon^2} \quad (4.1)$$

gdzie:

S_x^2 – wariancja analizowanej zmiennej na podstawie wyników pomiarów próby wstępnej,

ε – dokładność oceny,

α – poziom istotności,

f – liczba stopni swobody,

t – wartość krytyczna rozkładu t-Studenta.

Do badań wstępnych nagniatania odśrodkowego został wytypowany następujący zestaw parametrów technologicznych: $v_g = 1143$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm. Na każdej z powierzchni dokonano pomiarów parametrów chropowatości Ra i Rz oraz wskaźnika nachylenia powierzchni po obróbce wykończeniowej - u_{OB} . Zgodnie z przyjętą metodyką pomiarów chropowatości zostały one wykonane w „strefie wejścia wiązki lasera” i w „strefie wyjścia wiązki lasera” dla powierzchni po nagniataniu odśrodkowym. Pomiary powtórzono trzykrotnie dla każdej ze stref, uśredniając wynik, który był traktowany jako pomiar dla jednej próbki. Wyznaczony został również stopień umocnienia warstwy wierzchniej. Eksperyment powtórzono sześciokrotnie dla danego zestawu parametrów. W tabelach 4.1 i 4.2 przedstawiono liczebność próby.

Dokładność oceny ε przyjęto na poziomie 5% wartości średniej dla danego zestawu parametrów technologicznych. Z tablicy rozkładu t-Studenta dobrano współczynnik t dla zadanego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ oraz liczby stopni swobody $f = 5$. Ponieważ największa wartość przy wyznaczaniu liczebności dla próby $n_l = 5,96$, dla pomiarów chropowatości powierzchni, do dalszych analiz przyjęto $n_l = 6$ dla wszystkich warunków obróbki oraz sposobów obróbki wykończeniowej wykorzystujących nagniatanie odśrodkowe. Przy wyznaczaniu wskaźnika nachylenia u_{OB} i stopnia umocnienia przyjęto odpowiednio liczebność próby na poziomie $n_l = 7$ i $n_l = 8$.

4. BADANIA WSTĘPNE

Tabela 4.1. Wyniki badań wstępnych chropowatości powierzchni w celu wyznaczenia liczebności próby

Parametr chropowatości	$Ra, \mu\text{m}$		$Rz, \mu\text{m}$	
Strefa pomiaru	wejście	wyjście	wejście	wyjście
Numer próby				
1	2,78	3,46	15,17	15,73
2	2,67	3,26	16,02	16,77
3	2,75	3,41	14,63	15,03
4	3,01	3,71	16,28	16,03
5	2,87	3,41	16,23	17,00
6	2,88	3,64	16,11	16,29
średnia, \bar{y}	2,83	3,48	15,74	16,14
odchylenie standardowe, σ	0,1208	0,1652	0,6792	0,715
wariancja, S_x^2	0,0146	0,0273	0,4614	0,5113
dokładność oceny, ε	0,1414	0,174	0,7871	0,8071
Poziom istotności, α	0,05			
$t_{(0,05;5)}$	2,571			
liczebność próby, n_l	4,82	5,96	4,92	5,19

Tabela 4.2. Wyniki badań wstępnych stopnia umocnienia e i nachylenia powierzchni u_{OB} w celu wyznaczenia liczebności próby

Numer próby	Stopień umocnienia $e, \%$	Nachylenie u_{OB}, mm
1	23,76	0,15
2	22,68	0,165
3	21,94	0,166
4	24,19	0,165
5	21,91	0,158
6	24,97	0,14
średnia, \bar{y}	23,02	0,16
odchylenie standardowe, σ	1,288	0,008
wariancja, S_x^2	1,6581	$6,4467 \cdot 10^{-5}$
dokładność oceny, ε	1,151	0,0079
Poziom istotności, α	0,05	
$t_{(0,05;5)}$	2,571	
liczebność próby, n_l	8,27	6,79

4. BADANIA WSTĘPNE

4.2. Wyznaczanie liczebności próby w badaniach warstwy wierzchniej po nagniataniu tocznym

Liczebność próby wyznaczono korzystając z zależności (4.1).

Badania wstępne nagniatania tocznego zostały przeprowadzone dla następujących warunków obróbki: $F = 720 \text{ N}$, $f = 0,05 \text{ mm/obr}$, $d_N = 16 \text{ mm}$. Liczba powtórzeń wynosiła $n_o = 6$. W tabeli 4.3 przedstawiono wyniki badań wstępnych chropowatości powierzchni, stopnia umocnienia oraz nachylenia powierzchni u_{OB} wraz z wyznaczoną liczebnością próby.

Tabela 4.3. Wyniki badań wstępnych chropowatości powierzchni, stopnia umocnienia i nachylenia powierzchni u_{OB} w celu wyznaczenia liczebności próby

	Chropowatość powierzchni				Stopień umocnienia, %	Nachylenie u_{OB} , mm
	Ra , μm		Rz , μm			
	wejście	wyjście	wejście	wyjście		
średnia, \bar{y}	2,26	2,65	12,87	12,9	12,22	0,15
odchylenie standardowe, σ	0,0889	0,0936	0,4758	0,5727	0,6166	0,0065
wariancja, S_x^2	0,0079	0,0088	0,2264	0,328	0,3801	$4,19 \cdot 10^{-5}$
dokładność oceny, ε	0,1128	0,1325	0,6436	0,6450	0,6108	0,0076
Poziom istotności, α	0,05					
$t_{(0,05;5)}$	2,571					
liczebność próby, n_l	4,11	3,3	3,61	5,21	6,73	4,76

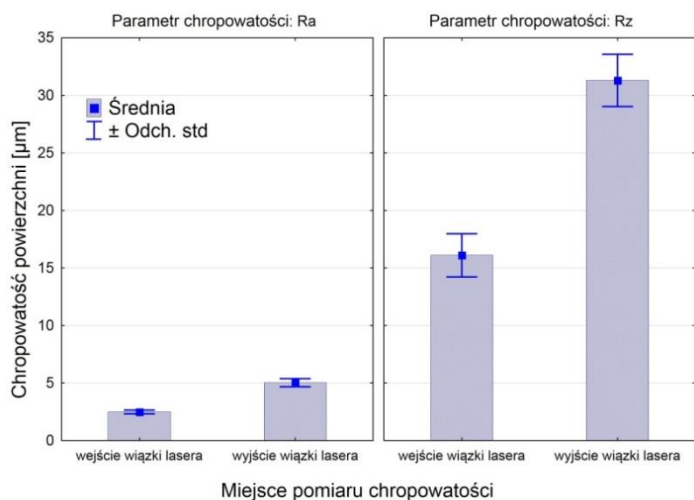
Do dalszych analiz przyjęto $n_l = 5$ dla pomiarów chropowatości powierzchni, $n_l = 7$ dla pomiarów mikrotwardości oraz $n_l = 5$ przy wyznaczaniu wskaźnika u_{OB} dla wszystkich warunków obróbki i sposobów obróbki wykorzystujących nagniatanie toczne.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ

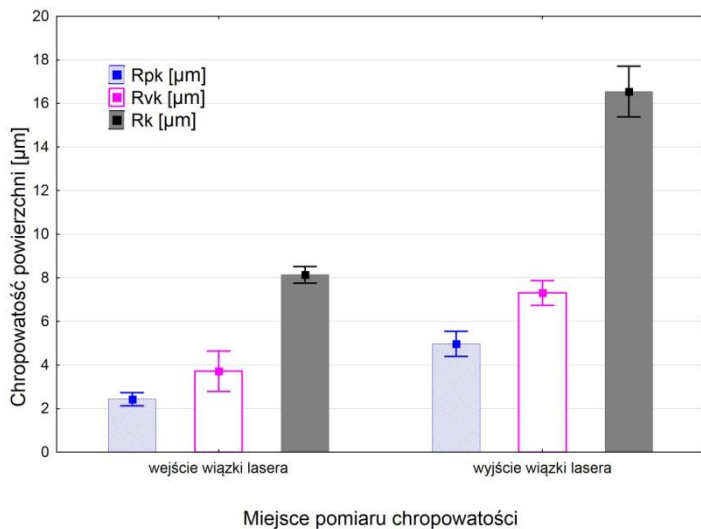
5.1. Chropowatość powierzchni

5.1.1. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem

Na rysunkach 5.1 i 5.2 przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości powierzchni po cięciu laserem.



Rys. 5.1. Parametry chropowatości powierzchni R_a i R_z próbek po cięciu laserem

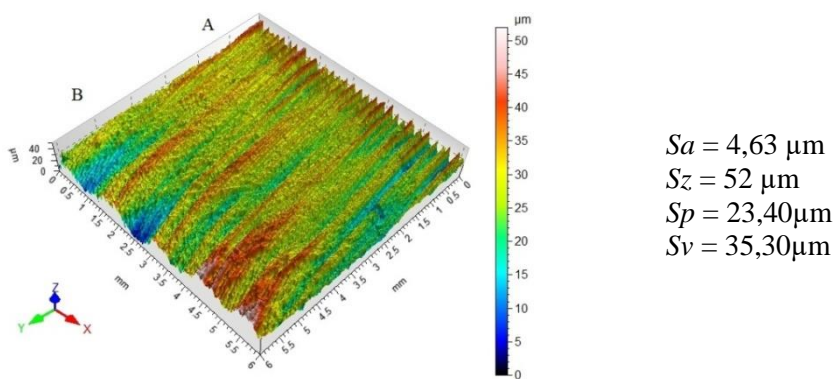


Rys. 5.2. Parametry chropowatości R_{pk} , R_k , R_{vk} próbek po cięciu laserem

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Wraz z oddalaniem się wiązki lasera od krawędzi cięcia chropowatość powierzchni wzrasta. Parametry Ra i Rz w strefie wyjścia wiązki lasera są około dwa razy większe niż w strefie wejścia. Taka sama zależność zaobserwowana została dla parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a. Spowodowane jest to wzrostem lepkości przecinanego materiału przy dolnej krawędzi cięcia, co powoduje zwiększenie się grubości warstwy ciekłego metalu, który przykleja się do przecinanej powierzchni. Sprzyja to powstawaniu dużych nieregularności powierzchni.

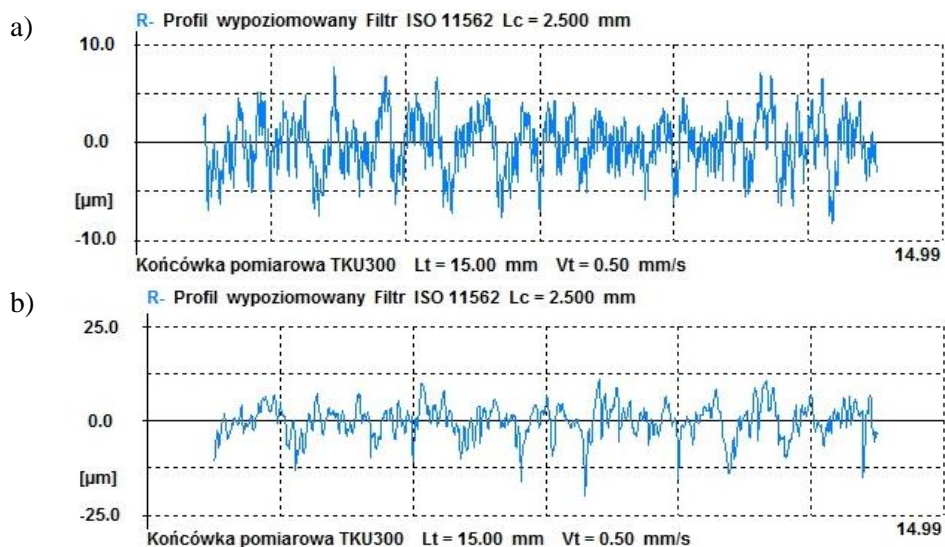
Topografia powierzchni ukształtowana poprzez cięcie laserem charakteryzuje się dużymi różnicami poziomów (występują liczne wzniesienia i zagłębienia) (rys. 5.3). Strefa wejścia wiązki lasera (A) charakteryzuje się występowaniem prążków drobnych, równomiernych, prostoliniowych o zbliżonych odstępach pomiędzy sobą. W strefie wyjścia (B) zauważalne są prążki krzywoliniowe, odchylone od zamierzonego toru przemieszczania się wiązki. Świadczy to o tym, że materiał „ucieka” ze szczeliny cięcia. Różnice w kształcie i wysokości prążków powstałych na powierzchni przecinanej najlepiej widoczne są na profilogramach (rys. 5.4 a i b).



Rys. 5.3. Topografia powierzchni stali C45 po cięciu laserem

Po cięciu laserem krzywą udziału materiałowego (tabela 5.1) należy zakwalifikować jako krzywą degresywno-progresywną. Charakteryzuje się ona dużym kątem pochylenia. Powierzchnia opisana tą odmianą krzywej posiada „ostre” wierzchołki mikronierówności oraz mały udział nośny materiału. Profil takiej powierzchni nazywa się krzywą z „cienkim środkiem” [151]. Udział materiałowy profilu chropowatości dla strefy wejścia wynosi $Rmr_{(2)} = 6,08\% \pm 0,57\%$, natomiast dla strefy wyjścia $Rmr_{(2)} = 5,42\% \pm 0,42\%$. Oznacza to, że powierzchnia po cięciu laserem charakteryzuje się niską odpornością na zużycie ścierne.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.4. Przykładowe profilogramy powierzchni po cięciu laserem:

a) strefa wejścia - $Ra = 2,3 \mu\text{m}$, $Rz = 16 \mu\text{m}$, $RSm = 160 \mu\text{m}$,

b) strefa wyjścia - $Ra = 3,39 \mu\text{m}$, $Rz = 31,08 \mu\text{m}$, $RSm = 240 \mu\text{m}$

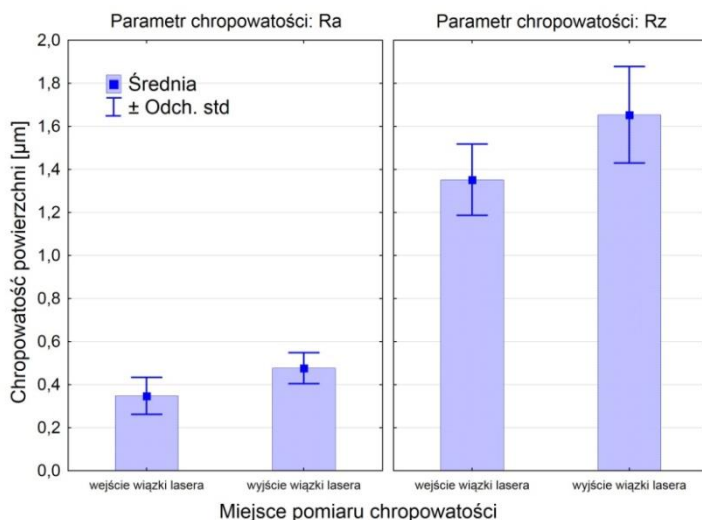
Tabela 5.1. Krzywa udziału materiałowego po cięciu laserem: a) strefa wejścia, b) strefa wyjścia

a)	b)
$Rpk = 2,9 \mu\text{m}$, $Rk = 11,3 \mu\text{m}$, $Rvk = 4,4 \mu\text{m}$, $Rmr_{(2)} = 5,2 \%$	$Rpk = 6,2 \mu\text{m}$, $Rk = 13,5 \mu\text{m}$ $Rvk = 7,8 \mu\text{m}$, $Rmr_{(2)} = 4,56 \%$

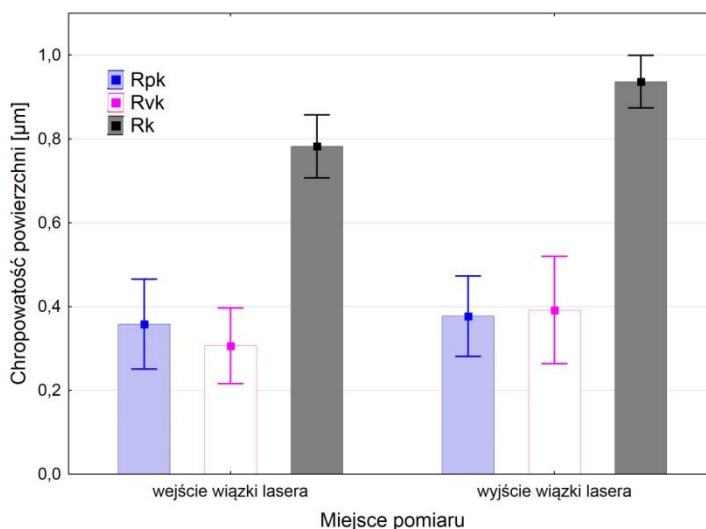
5.1.2. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym

Frezowanie wykończeniowe stali C45 pozwoliło na eliminację negatywnych skutków cięcia laserem. Poprzez frezowanie została wyeliminowana strefa wejścia i strefa wyjścia wiązki lasera. Parametry chropowatości Ra i Rz dla poszczególnych stref posiadają zbliżone wartości (rys. 5.5). W przypadku parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a (rys. 5.6), które pozwalają na ocenę właściwości eksploatacyjnych warstwy wierzchniej, istnieje podobna zależność jak dla parametrów Ra i Rz .

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



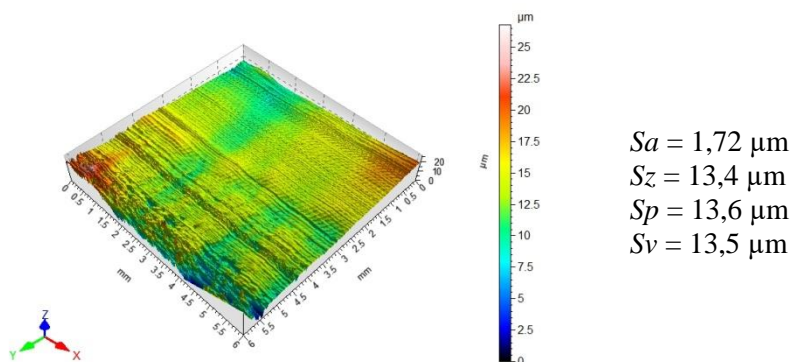
Rys. 5.5. Parametr chropowatości powierzchni Ra i Rz próbek po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym



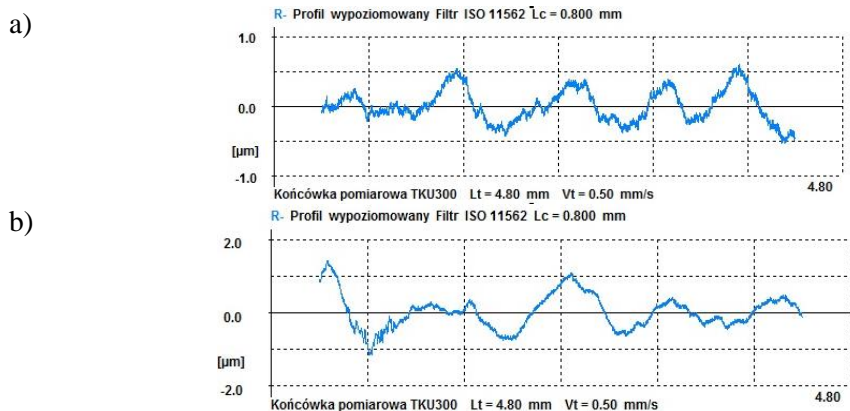
Rys. 5.6. Parametr chropowatości powierzchni Rpk , Rk , Rvk próbek po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym

Wysokość mikronierówności dla strefy wejścia i strefy wyjścia charakteryzuje się zbliżoną wysokością. Widoczne są jedynie ślady pracy ostrza oraz ślady drgań narzędzia (rys. 5.7), co potwierdzają profilogramy przedstawione na rysunkach 5.8a i 5.8b.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.7. Topografia powierzchni stali C45 po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym



Rys. 5.8. Przykładowe profilogramy powierzchni stali C45 po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym: a) strefa wejścia $Ra = 0,19 \mu\text{m}$, $Rz = 0,81 \mu\text{m}$, b) strefa wyjścia $Ra = 0,37 \mu\text{m}$, $Rz = 1,65 \mu\text{m}$

Krzywa udziału materiałowego po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym jest krzywą o charakterze degresywno-progresywnym (tabela 5.2). Udział materiałowy wynosi dla strefy wejścia $Rmr_{(1)} = 75,68\% \pm 6,5\%$, a dla strefy wyjścia $Rmr_{(1)} = 73,27\% \pm 7,25\%$.

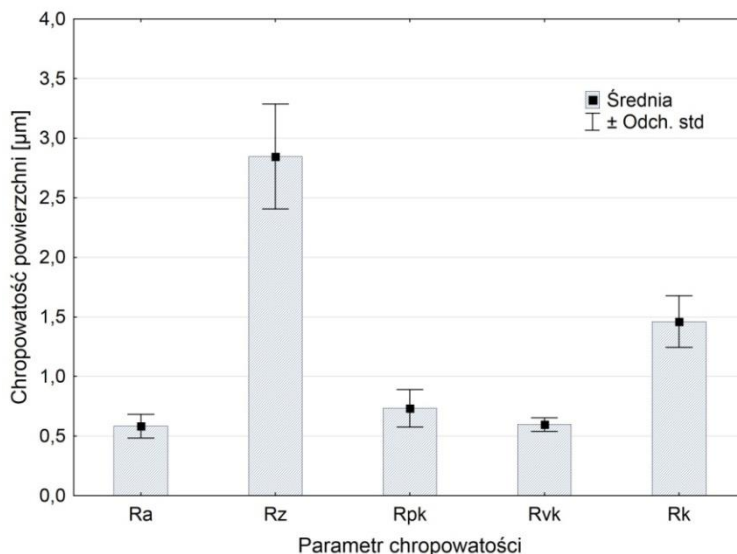
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Tabela 5.2. Krzywa udziału materiałowego po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym:
a) strefa wejścia, b) strefa wyjścia

a)	b)
$Rpk = 0,24 \mu\text{m}$, $Rk = 0,75 \mu\text{m}$, $Rvk = 0,54 \mu\text{m}$, $Rmr_{(1)} = 78,8\%$	$Rpk = 0,28 \mu\text{m}$, $Rk = 1,02 \mu\text{m}$ $Rvk = 0,68 \mu\text{m}$, $Rmr_{(1)} = 75,3\%$

5.1.3. Chropowość powierzchni po frezowaniu przedmiotów niewycinanych laserem

Rysunek 5.9 przedstawia parametry chropowości powierzchni po frezowaniu próbek ze stali C45 nie wycinanych laserem. Chropowość powierzchni mieści się w przedziale $Ra = (0,48 \div 0,68) \mu\text{m}$, $Rz = (2,41 \div 3,29) \mu\text{m}$, $Rpk = (0,57 \div 0,89) \mu\text{m}$, $Rvk = (0,54 \div 0,66) \mu\text{m}$, $Rk = (1,25 \div 1,68) \mu\text{m}$.



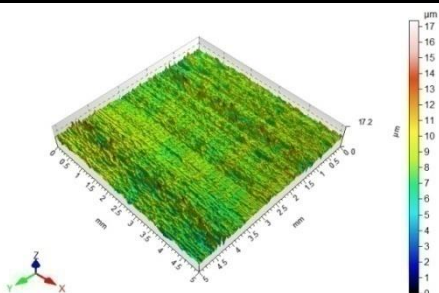
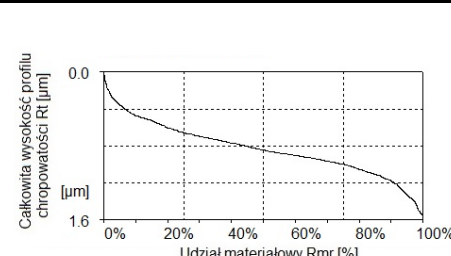
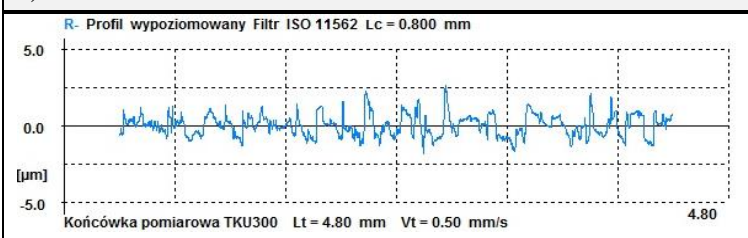
Rys. 5.9. Chropowość powierzchni po frezowaniu próbek nie wycinanych laserem

Przykładową topografię powierzchni po frezowaniu przedstawiono w tabeli 5.3. Widoczny jest jednokierunkowy układ mikronierówności o zbliżonej wysokości z zauważalnymi śladami pracy ostrza. Profil powierzchni po

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

frezowaniu charakteryzuje się ostrymi wierzchołkami mikronierówności (tabela 5.3c). Krzywa Abbotta-Firestone'a jest krzywą stromą (tabela 5.3b), posiadającą udział materiałowym $Rmr_{(1)} = 70,4\% \pm 5,95\%$.

Tabela 5.3. Topografia powierzchni (a), krzywa Abbotta-Firestone'a (b) oraz profil powierzchni (c) po frezowaniu próbek nie wycinanych laserem

a)	b)
	
$Sa = 0,68 \mu\text{m}$, $Sz = 17,4 \mu\text{m}$ $Sp = 9,17 \mu\text{m}$, $Sv = 8,18 \mu\text{m}$	$Rpk = 0,32 \mu\text{m}$, $Rk = 1,1 \mu\text{m}$ $Rvk = 0,55 \mu\text{m}$, $Rmr_{(1)} = 79\%$
c)	
	$Ra = 0,56 \mu\text{m}$, $Rz = 3,24 \mu\text{m}$

5.1.4. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym

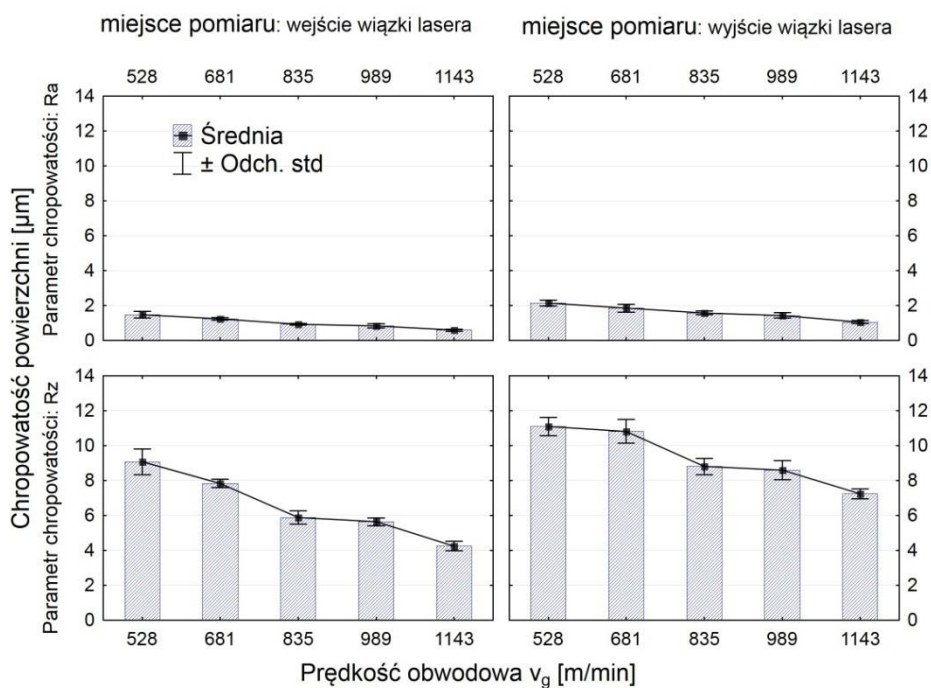
W badaniach analizowano wpływ prędkości obwodowej głowicy nagniatającej v_g , prędkości posuwu v_f oraz przesuwu poprzecznego f_p na chropowatość powierzchni wyrażoną za pomocą parametrów Ra , Rz , parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a oraz udziału materiałowego Rmr .

Na rysunkach 5.10÷5.12 przedstawiono wpływ parametrów technologicznych nagniatania odśrodkowego na chropowatość powierzchni. Wykresy przygotowano w programie Statistica wersja 12. Pionowo na wykresach zaprezentowano wartości parametrów chropowatości powierzchni w zależności od miejsca pomiaru chropowatości („wejście wiązki lasera” oraz „wyjście wiązki lasera”). Natomiast w układzie poziomym przedstawiono wartości prędkości obwodowej v_g , prędkości posuwu v_f oraz przesuwu poprzecznego f_p .

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

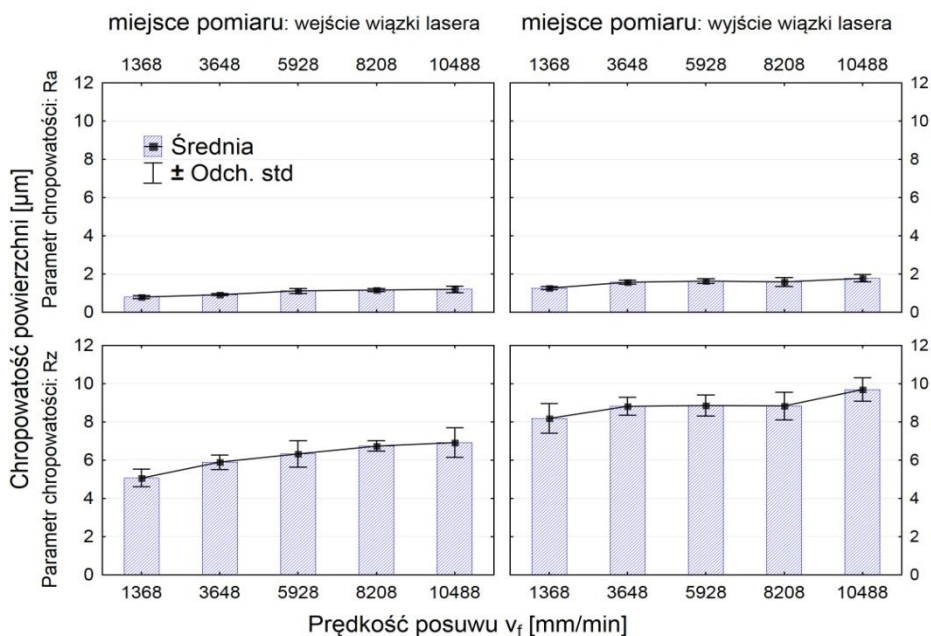
Wzrost prędkości obrotowej n , a tym samym prędkości obwodowej narzędzia v_g powoduje spadek chropowatości powierzchni (rys. 5.10). Związane jest to z bardziej intensywnym wyrównywaniem mikronierówności powierzchni po cięciu laserem na skutek rosnącej energii zderzenia. Parametr Ra w odniesieniu do wartości po cięciu laserem zmniejszył się od 40% do 79%, natomiast parametr Rz odpowiednio od 54% do 76%, w zależności od prędkości obwodowej v_g . Spowodowane jest to oddziaływaniem gładkiego narzędzia na „charakterystyczne prążki”, co powoduje ich deformację i zmniejszanie wysokości.

Wzrost prędkości posuwu skutkuje zmniejszeniem ilości uderzeń kulek przypadających na jednostkę powierzchni, czego następstwem jest wzrost chropowatości powierzchni (rys. 5.11). Współczynnik zmniejszenia chropowatości K_{Ra} , w zależności od prędkości posuwu, wynosi od 2,11 do 3,72 dla „strefy wejścia” oraz od 2,86 do 4,34 dla „strefy wyjścia”. W przypadku parametru Rz nastąpiło zmniejszenie jego wartości po nagniataniu odśrodkowym dla „strefy wejścia” około 3-krotnie a dla „strefy wyjścia” około 4 razy.

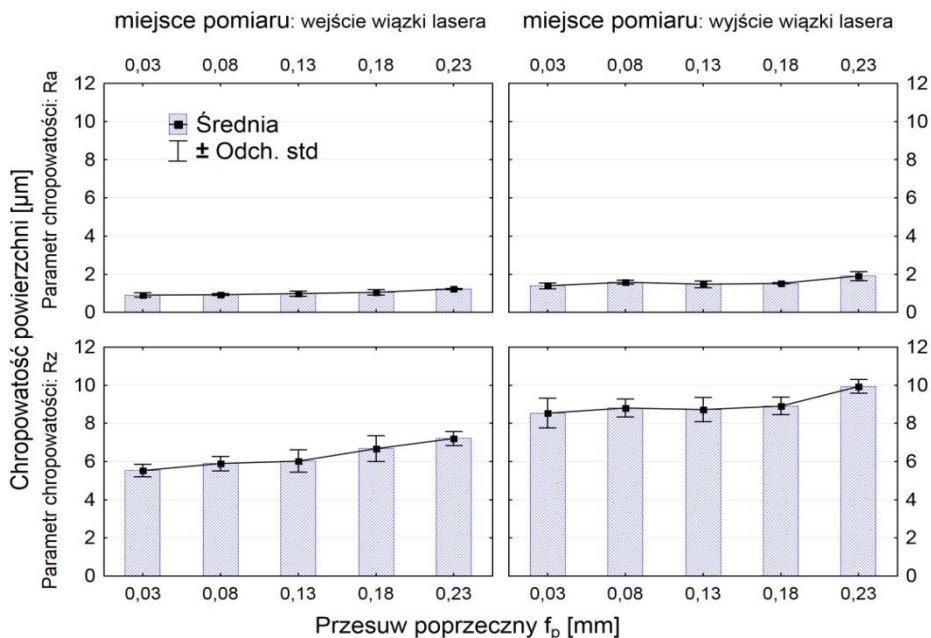


Rys. 5.10. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.11. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)



Rys. 5.12. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3684$ mm/min, $i = 1$)

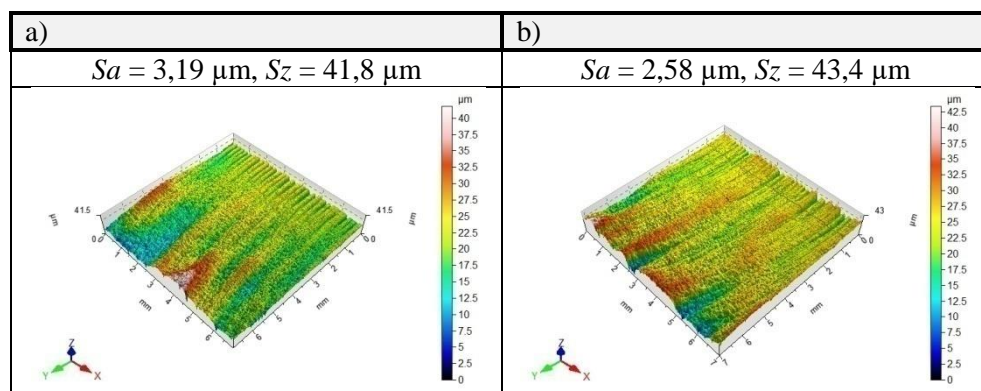
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Zwiększanie przesuwu poprzecznego f_p , a co za tym idzie spadek gęstości kulowania, powoduje pogorszenie chropowatości powierzchni (rys. 5.12). Ślady obróbkowe pojawiają się w większej odległości od siebie, powodując nierówne deformacje powierzchni obrabianej. Nastąpiło zmniejszenie parametrów chropowatości Ra i Rz od 2 do 4 razy w odniesieniu do powierzchni po cięciu laserem.

Podczas obróbki elementy nagniatające (kulki) pozostają w kontakcie z powierzchnią obrabianą. Prowadzi to do równomiernej deformacji struktury geometrycznej powierzchni po cięciu laserem (tabela 5.4). Następuje zmniejszenie wysokości prążków oraz spłaszczenie wierzchołków mikronierówności (tabela 5.5). Zostaje zredukowana różnica poziomów pomiędzy wysokością profilu chropowatości powierzchni „strefy wejścia wiązki” a „strefy wyjścia wiązki”.

Tabela 5.4. Topografia powierzchni próbek po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym:

- a) $v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$, b) $v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm, $i = 1$

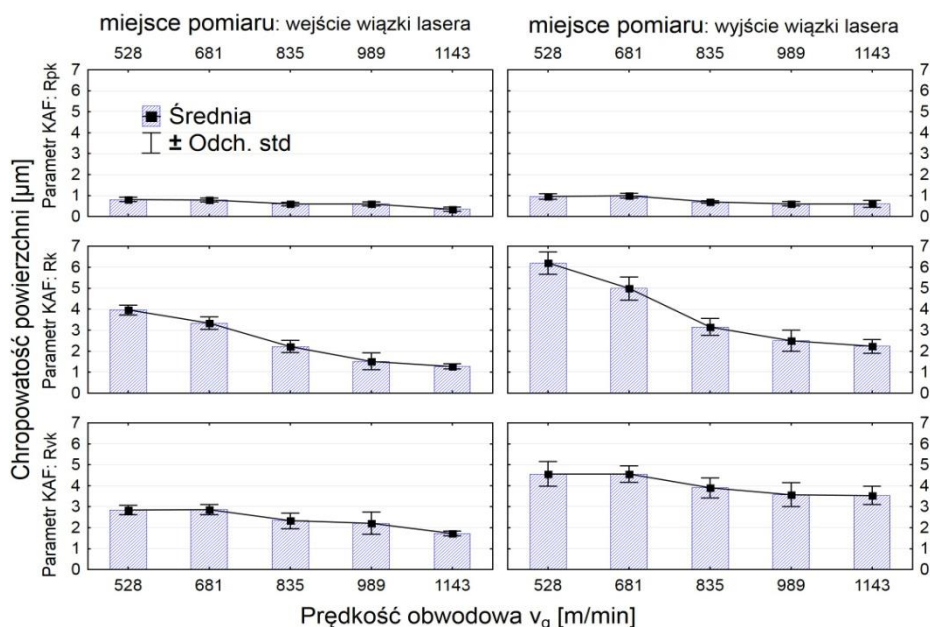
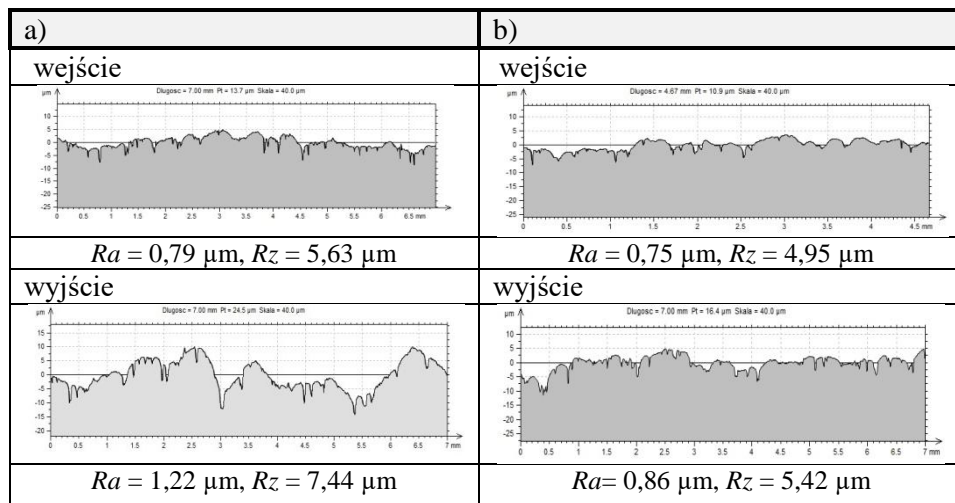


W aspekcie współpracy dwóch powierzchni ze sobą, ważnymi parametrami, które pozwalają na opis charakteru tej współpracy, są parametry związane z krzywą Abbotta-Firestone'a [151, 169]. Rysunki 5.13÷5.15 przedstawiają wpływ parametrów technologicznych nagniatania odśrodkowego na głębokość rdzenia chropowatości – Rk , zredukowaną wysokość wzniesienia – Rpk oraz zredukowaną głębokość wgłębień – Rvk . Parametry chropowatości z grupy Rk charakteryzuje nie tylko wysokość chropowatości, ale także jej kształt [151]. Jest to bardzo ważne w aspekcie opisu funkcjonalnego zachowania się powierzchni.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Tabela 5.5. Profilogramy powierzchni próbek po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym:

a) $v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$ b) $v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm, $i = 1$

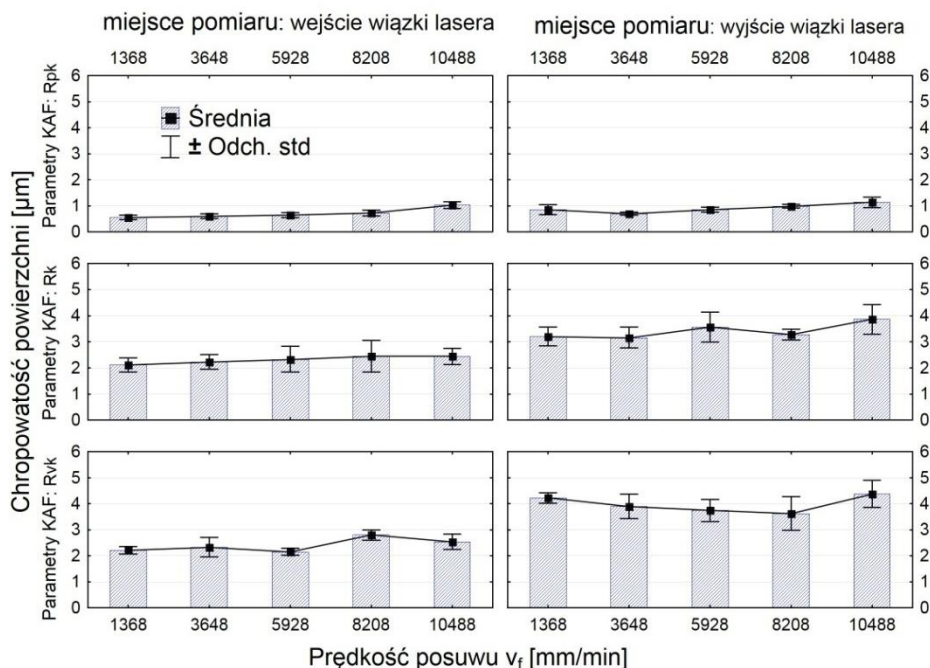


Rys. 5.13. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Głębokość rdzenia chropowatości Rk , w zależności od warunków obróbki, zmniejszyła się od 2 do 7 razy po nagniataniu odśrodkowym. Oznacza to, że obróbka poprawia tzw. obciążalność powierzchni, to znaczy, że po okresie do-

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

tarcia znaczna część powierzchni będzie się stykała z powierzchnią elementu współpracującego. Parametr Rpk , charakteryzujący zachowanie się powierzchni podczas docierania, zmniejszył się od 2,4 do 7,2 razy w odniesieniu do wartości po cięciu laserem.

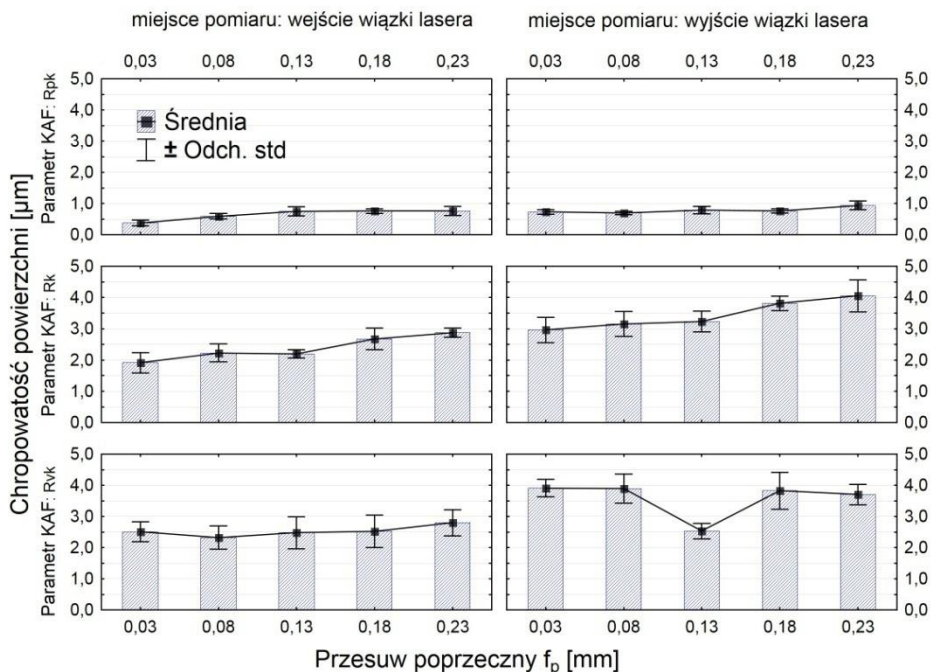


Rys. 5.14. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Zredukowana głębokość wgłębień, czyli parametr Rvk , po nagniataniu odśrodkowym zmniejszył się dla strefy wejścia od 23% do 54%, natomiast dla strefy wyjścia – od 42% do 65%, w zależności od parametrów technologicznych obróbki. Może to oznaczać że powierzchnie obrobione w ten sposób posiadają mniejszą zdolność retencji oleju.

Wpływ parametrów technologicznych nagniatania odśrodkowego na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a jest podobny jak dla parametrów Ra i Rz . Wzrost prędkości obwodowej głowicy nagniatającej v_g powoduje bardziej intensywne wyrównywanie mikronierówności po cięciu laserem, co przekłada się na obniżenie wartości Rpk , Rk i Rvk (rys. 5.13). Wzrost prędkości posuwu v_f (rys. 5.14) oraz przesuwu poprzecznego f_p (rys. 5.15) przekłada się na mniejszy udział deformacji sprężysto-plastycznych, co powoduje wzrost parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a.

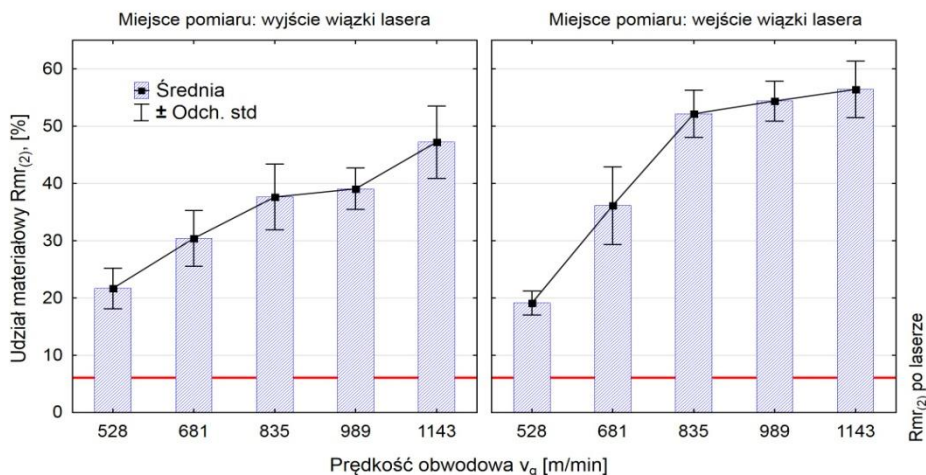
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



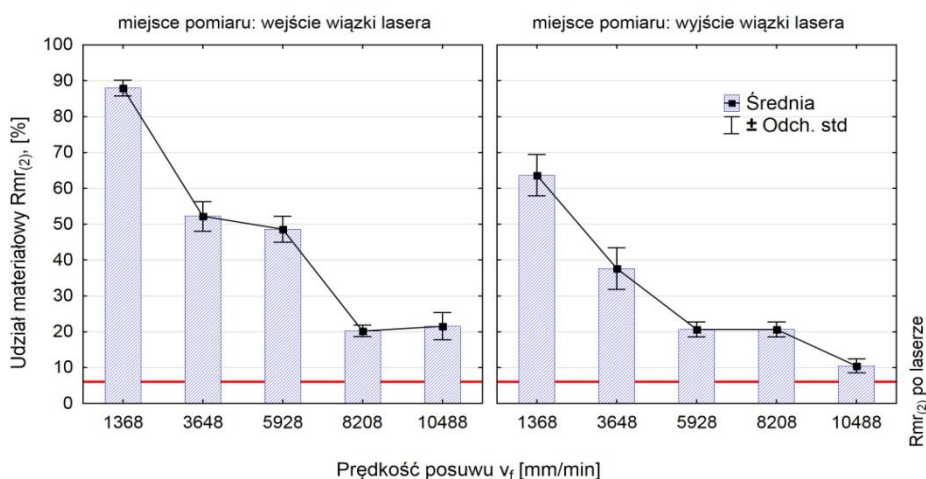
Rys. 5.15. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ m/min, $i = 1$)

Na rysunkach 5.16÷5.18 przedstawiono wpływ parametrów technologicznych nagniatania odśrodkowego na udział materiałowy profilu chropowatości Rmr . Przeprowadzona obróbka nagniataniem odśrodkowym pozwoliła na wzrost udziału materiałowego dla wszystkich warunków obróbki w odniesieniu do powierzchni po cięciu laserem (rys. 5.16÷5.18). Pozwala to przypuszczać, że wzrośnie odporność na ścieranie powierzchni obrobionej nagniataniem odśrodkowym.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



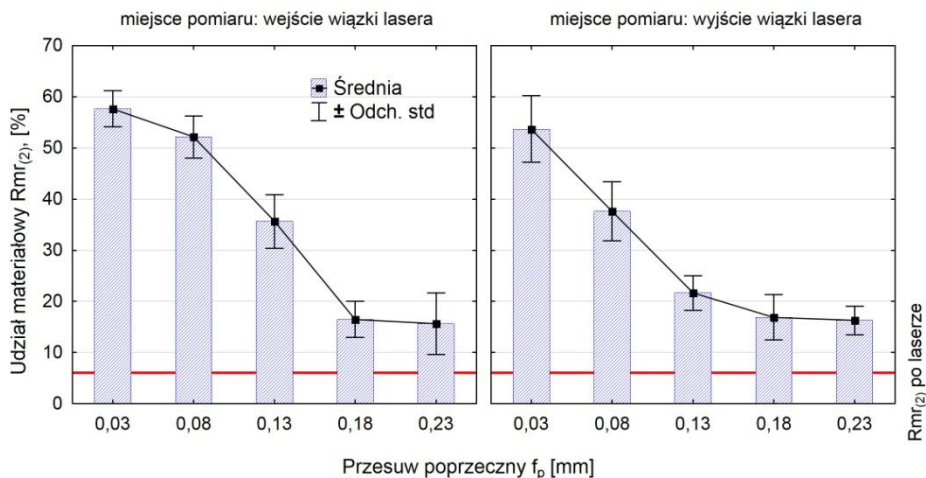
Rys. 5.16. Wpływ prędkości obwodowej v_g na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)



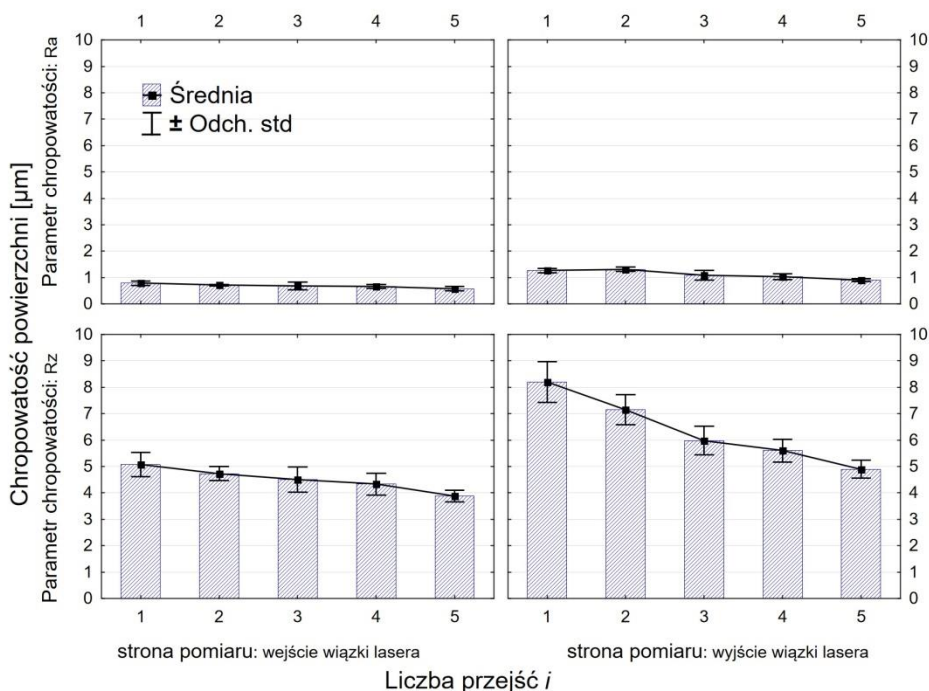
Rys. 5.17. Wpływ prędkości posuwu v_f na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Na chropowatość powierzchni wpływa również liczba przejść nagniatających (rys. 5.19÷5.21). Wzrost liczby przejść powoduje, że ślady obróbkowe częściowo się pokrywają, co przyczynia się do wielokrotnego odkształcania tych samych mikronierówności. Efektem jest powstanie powierzchni o mniejszej chropowatości, co powoduje zmniejszenie wartości parametrów Ra i Rz (rys. 5.19) i parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a (rys. 5.20) oraz wzrost udziału materiałowego Rmr (rys. 5.21).

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

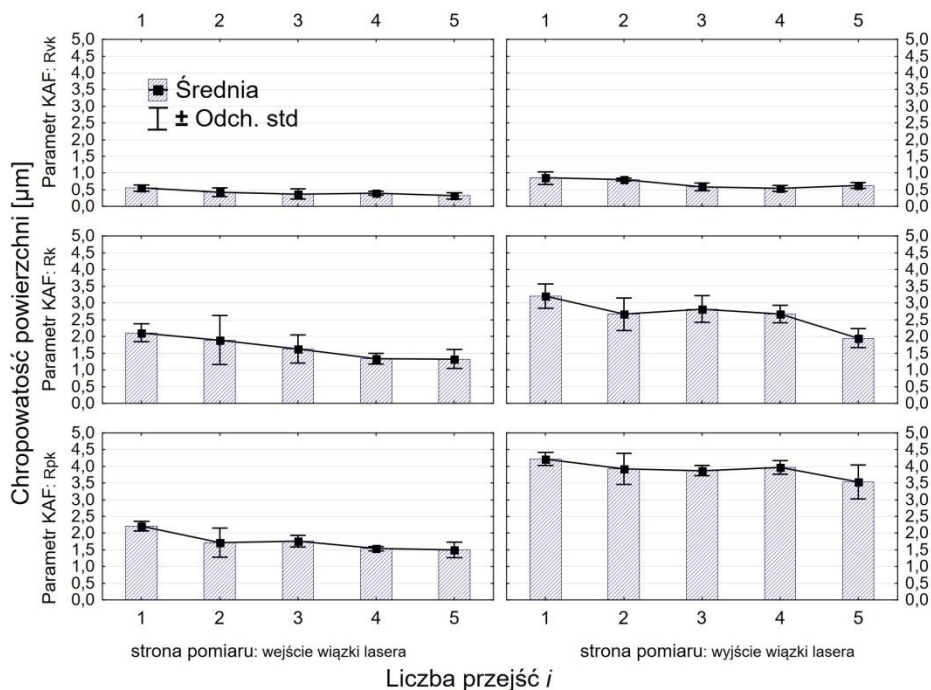


Rys. 5.18. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

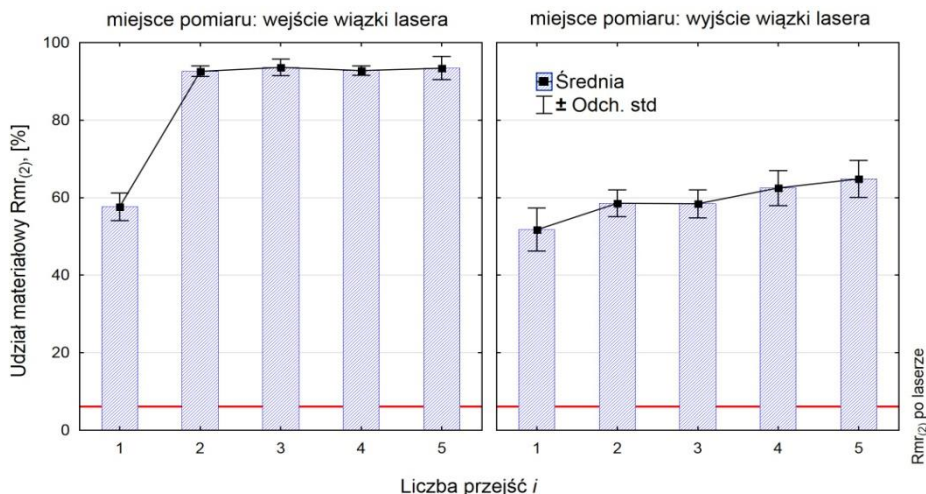


Rys. 5.19. Wpływ liczby przejść i na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.20. Wpływ liczby przejść i na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm)

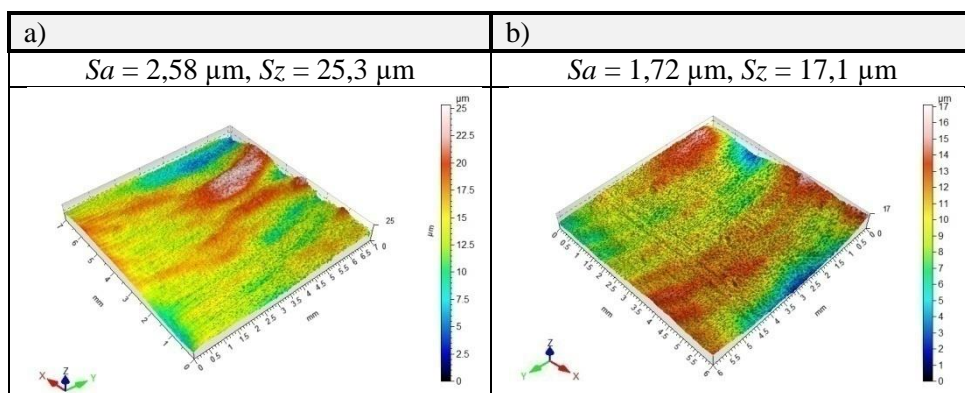


Rys. 5.21. Wpływ liczby przejść i na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Wzrost liczby przejść powoduje większe odkształcenie mikronierówności powierzchni po cięciu laserem. Zostaje zmniejszona różnica wysokości mikronierówności pomiędzy strefą „wejścia wiązki lasera” a strefą „wyjścia wiązki lasera” (tabela 5.6).

Tabela 5.6. Topografia powierzchni po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 1143$ m/min, $v_f = 3648$ m/min, $f_p = 0,08$ mm): a) $i = 1$, b) $i = 5$



Podczas nagniatania odśrodkowego występuje duży kąt pomiędzy wektorem prędkości normalnej a obrabianą powierzchnią. Sprzyja to zjawisku intensywnego tarcia pomiędzy powierzchnią nagniataną odśrodkowo a elementami nagniatającymi, co powoduje intensywne ścieranie wierzchołków mikronierówności po cięciu laserem, co przekłada się na zmniejszenie ich wysokości. Zachodzące korzystne zmiany we właściwościach stereometrycznych powierzchni nagniatanej odśrodkowo prawdopodobnie przełożą się na odporność na zużycie ścierne [165]. „Wygładzenie” powierzchni na skutek deformacji powoduje redukcję stref o zróżnicowanej chropowatości powierzchni, co prawdopodobnie wpłynie korzystnie na wykorzystanie danego elementu w kolejnym etapie produkcyjnym (np. nanoszenie powłok malarskich).

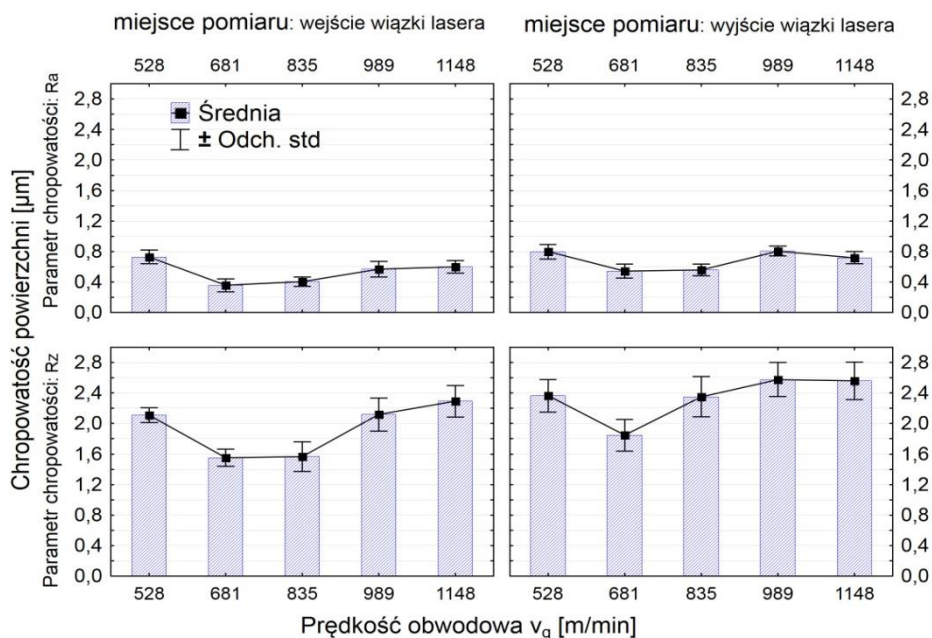
5.1.5. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym

Na rysunkach 5.22÷5.24 przedstawiono wpływ parametrów technologicznych nagniatania odśrodkowego na chropowatość powierzchni po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym. Wzrost prędkości obwodowej głowicy nagniatającej powoduje na początku niewielki spadek chropowatości powierzchni, potem natomiast następuje wzrost parametrów Ra i Rz dla obydwu stref (rys. 5.22). Dla $v_g = 681$ m/min uzyskano wartość parametru Ra dla strefy wejścia zbliżoną do wartości po frezowaniu wykończeniowym. W przypadku pozostałych wartości prędkości obwodowej nastąpiło pogorszenie jakości po-

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

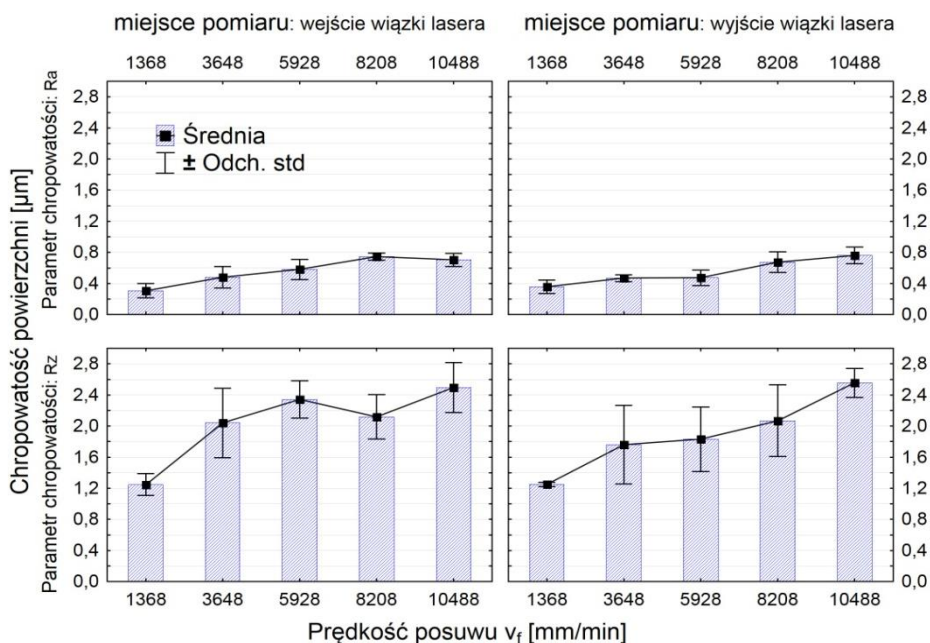
wierzchni. Na powierzchni frezowanej powstają wgłębienia, które powodują wzrost chropowatości powierzchni.

Z wykresów przedstawionych na rysunku 5.23 wynika, że wzrost prędkości posuwu v_f powoduje wzrost parametrów chropowatości powierzchni Ra i Rz . Tylko dla $v_f = 1368$ mm/min uzyskano wartości parametrów Ra i Rz na poziomie zbliżonym do wartości po frezowaniu wykończeniowym. Przy dużych wartościach prędkości posuwu następuje „wybijanie” wgłębień w materiale obrabianym w większej odległości od wgłębienia poprzedzającego, co przekłada się na nierównomierną deformację powierzchni obrabianej. W przypadku wpływu przesuwu poprzecznego f_p (rys. 5.24) na chropowatość powierzchni występuje podobna zależność jak dla parametru technologicznego v_f . Dla całego zakresu przesuwu poprzecznego f_p następuje pogorszenie jakości powierzchni w odniesieniu do powierzchni po frezowaniu wykończeniowym.

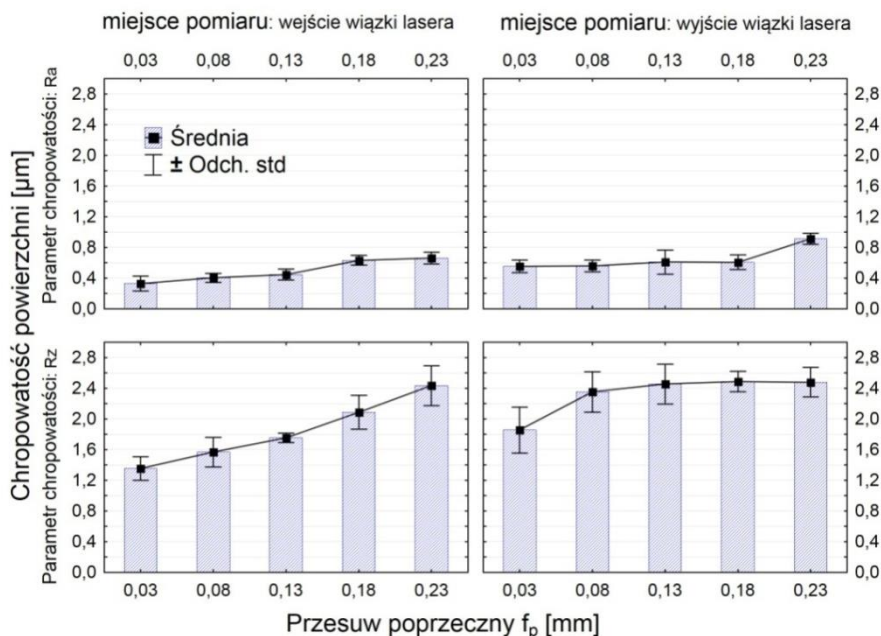


Rys. 5.22. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.23. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)



Rys. 5.24. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

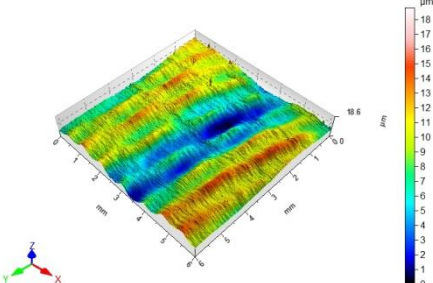
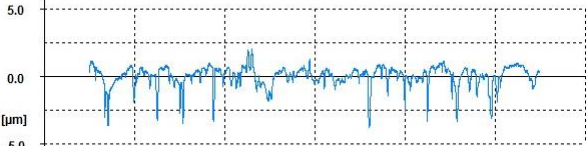
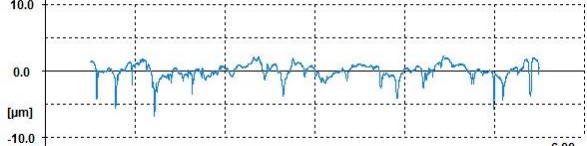
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Topografia powierzchni powstała po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym charakteryzuje się licznymi wgłębieniami, powstałymi na skutek uderzeń elementów nagniatających w powierzchnię obrabianą. Powstaje struktura jednokierunkowa, mocno zdeformowana z licznymi wzniesieniami i dolinami (tabela 5.7).

W wyniku nagniatania stali C45 po frezowaniu wykończeniowym powstaje powierzchnia charakteryzująca się odmiennymi właściwościami stereometrycznymi, opisanymi za pomocą parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a, w odniesieniu do powierzchni po obróbce poprzedzającej.

Po nagniataniu powierzchni przedmiotów wycinanych laserem i frezowanych chropowatość dla większości stosowanych parametrów nagniatania odśrodkowego jest większa niż po frezowaniu wykończeniowym, ale zdecydowanie mniejsza niż po cięciu laserem.

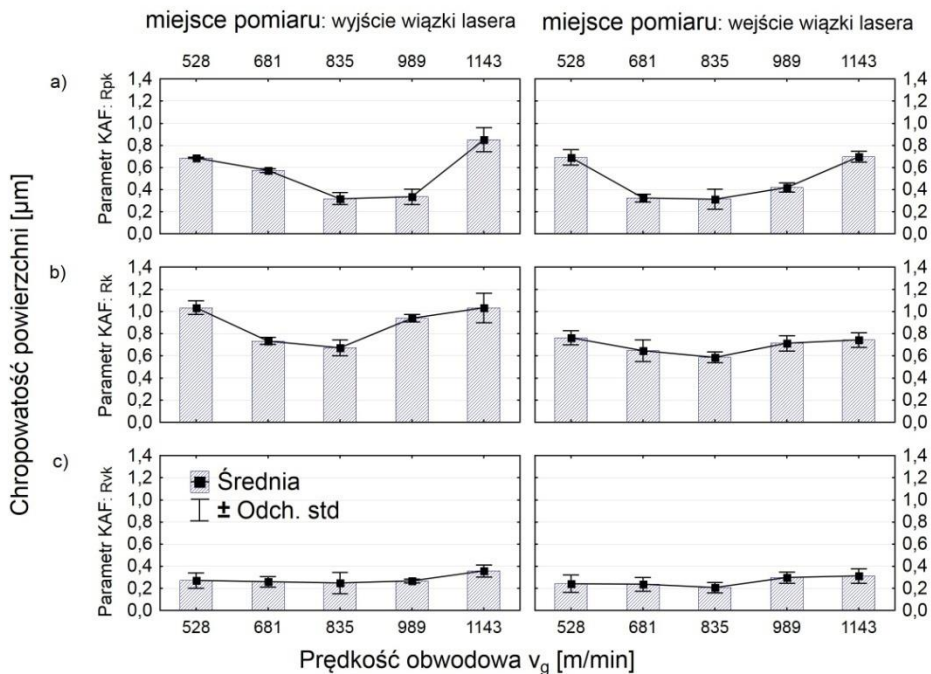
Tabela 5.7. Topografia (a) i profile powierzchni (b) po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

<p>a)</p> 	<p> $Sa = 2,40\mu\text{m}$ $Sz = 19,90\mu\text{m}$ $Sp = 11,30\mu\text{m}$ $Sv = 8,53\mu\text{m}$ </p>
<p>b)</p> <p>R- Profil wyzmiomowany Filtr ISO 11562 Lc=0.800 mm</p>  <p>Końcówka pomiarowa TKU300 Lt=6.00 mm Vt=0.30 mm/s</p>	<p>strefa wejścia</p> <p> $Ra = 0,54\mu\text{m}$ $Rz = 4,50\mu\text{m}$ </p>
<p>R- Profil wyzmiomowany Filtr ISO 11562 Lc=0.800 mm</p>  <p>Końcówka pomiarowa TKU300 Lt=6.00 mm Vt=0.30 mm/s</p>	<p>strefa wyjścia</p> <p> $Ra = 0,85\mu\text{m}$ $Rz = 6,87\mu\text{m}$ </p>

Na rysunkach 5.25÷5.31 przedstawiono wpływ parametrów technologicznych nagniatania odśrodkowego na parametry Rpk , Rk , Rvk i udział materiałowy

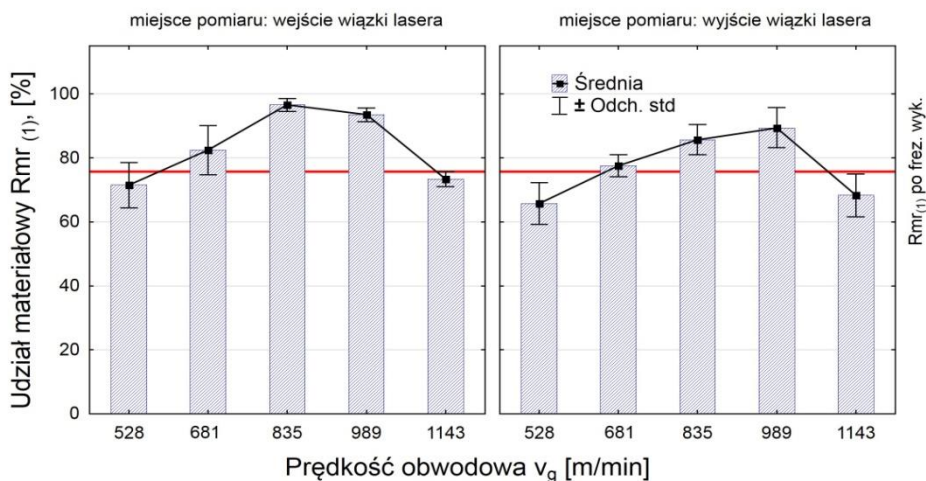
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Rmr. Ze wzrostem prędkości obwodowej w zakresie $v_g = 681 \div 989$ m/min następują zmiany badanych parametrów chropowatości pozwalające przypuszczać, że nastąpi poprawa odporności na zużycie ścierne (rys. 5.25) oraz wzrost długości stykowej powierzchni nośnej (rys. 5.26). W przypadku wpływu prędkości obwodowej v_g na zmianę parametru Rvk , zauważono zmniejszenie zdolności retencji środka smarnego w całym zakresie analizowanego parametru w odniesieniu do wartości po frezowaniu wykończeniowym (rys. 5.25c).



Rys. 5.25. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

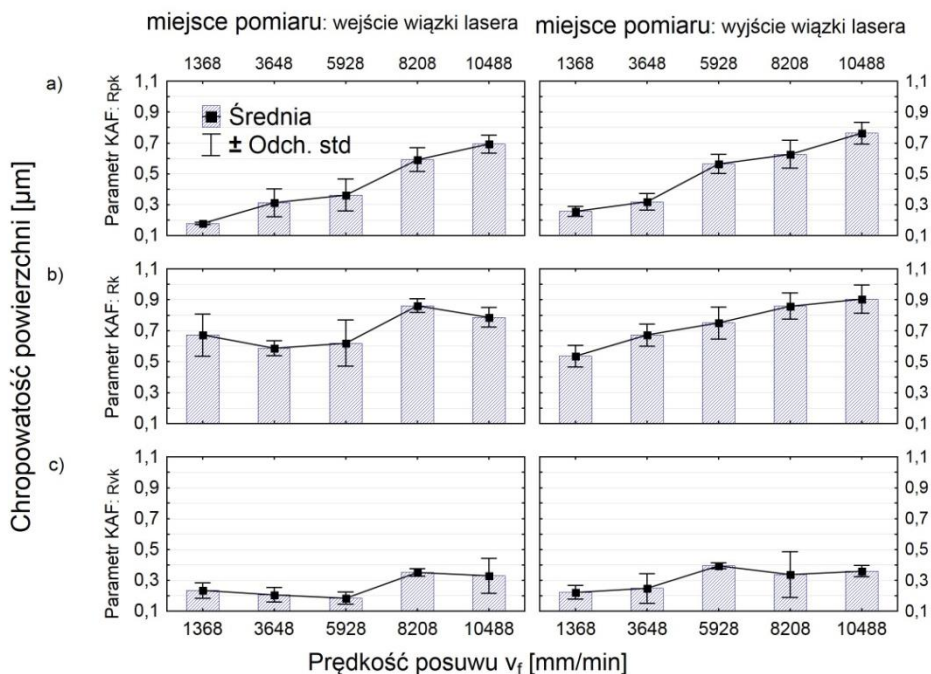
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



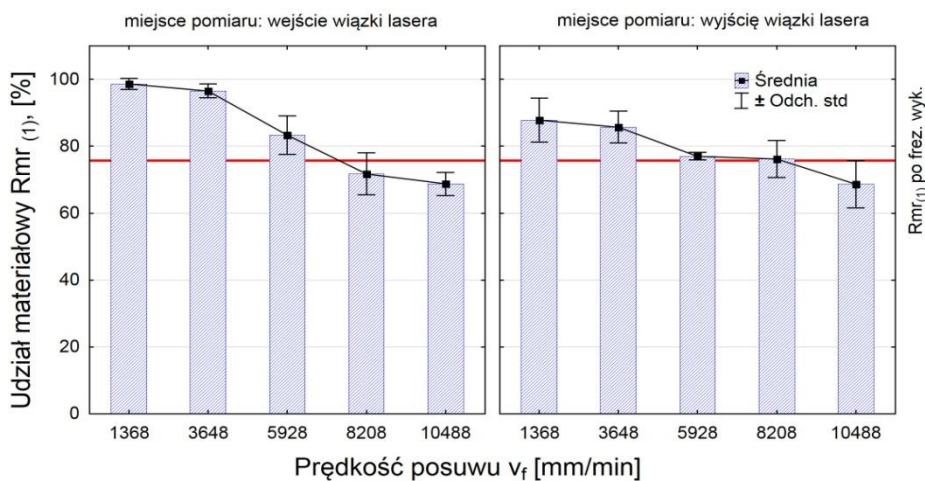
Rys. 5.26. Wpływ prędkości obwodowej v_g na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Wzrost prędkości posuwu v_f oraz przesuwu poprzecznego f_p powoduje zwiększenie odległości między wgłębieniami powstającymi wskutek uderzenia. Dla zakresu $v_f = 1368 \div 3648$ m/min (rys. 5.27a,b) i $f_p = 0,03 \div 0,08$ mm (rys. 5.29a,b) następuje zmniejszenie wartości parametrów Rk i Rpk w odniesieniu do powierzchni po frezowaniu wykończeniowym. W wyniku obróbki nagniataniem odśrodkowym dla tego zakresu parametrów następuje zwiększenie powierzchni przylegania (rys. 5.28, rys. 5.30). Oznacza to, że naciski będą rozkładały się bardziej równomiernie, co pozwoli na łagodniejszy przebieg zużycia powierzchni obrobionej frezowaniem wykończeniowym i nagniataniem odśrodkowym. Niestety dla całego zakresu analizowanej prędkości posuwu i przesuwu poprzecznego następuje pogorszenie zdolności gromadzenia na powierzchni obrabianej środków smarnych (rys. 5.27c i rys. 5.29c). Wyjątkiem jest wartość parametru $Rvk = 0,66$ μm , wyższa niż dla powierzchni po frezowaniu wykończeniowym, uzyskanego dla „strefy wyjścia” przy $f_p = 0,03$ mm (rys. 5.29c). Spowodowane jest to tym, że, dla małej wartości przesuwu powstaje na powierzchni obrabianej duża ilość wgłębień, które będą stanowiły dodatkowe kieszenie smarowe.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

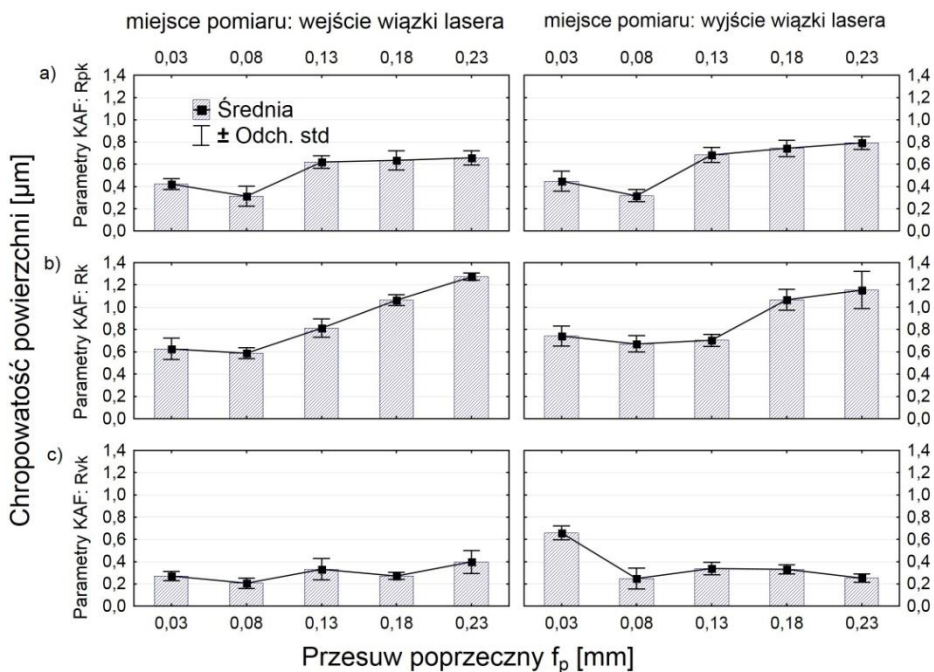


Rys. 5.27. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

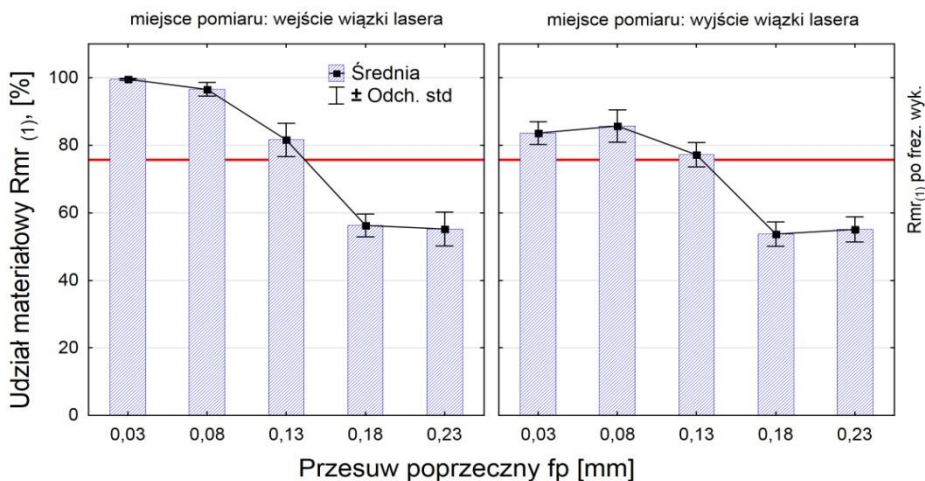


Rys. 5.28. Wpływ prędkości posuwu v_f na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.29. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3684$ mm/min, $i = 1$)



Rys. 5.30. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

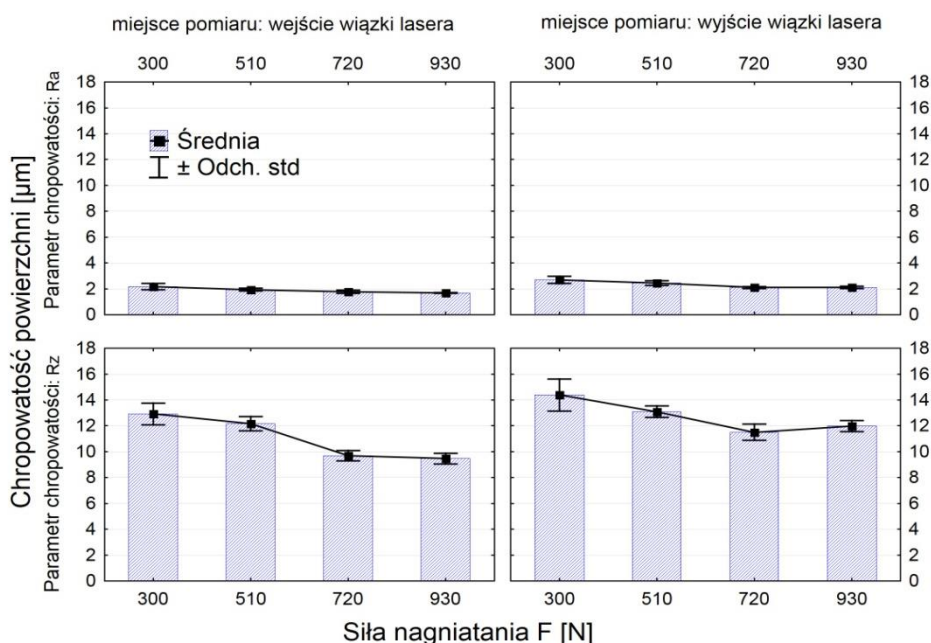
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Dla zakresu parametrów $v_f = 1368 \div 5928$ mm/min (rys. 5.28) i $f_p = 0,03 \div 0,13$ mm (rys. 5.30) następuje wzrost udziału materiałowego Rmr . Oznacza to, że powierzchnia obrobiona frezowaniem wykończeniowym i nagniataniem odśrodkowym będzie charakteryzowała się mniejszym zużyciem w kontakcie ruchomym dwóch elementów.

5.1.6. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu tocznym

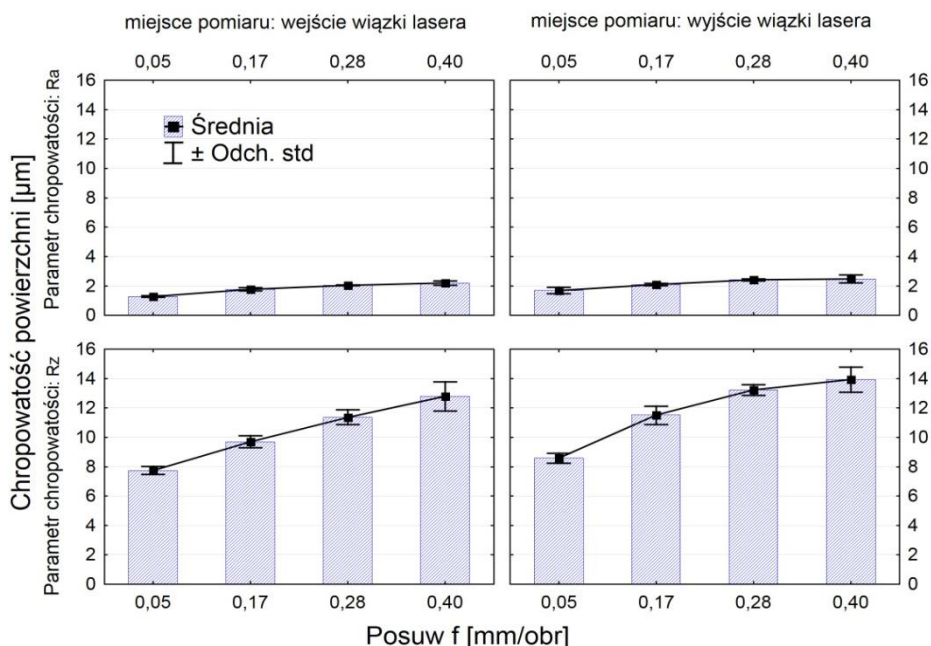
Na rysunkach 5.3÷5.43 przedstawiono wpływ parametrów technologicznych nagniatania tocznego na chropowatość powierzchni.

Analizując wpływ siły nagniatania F na chropowatość powierzchni (rys. 5.31) można zauważyć spadek wartości parametrów Ra i Rz ze wzrostem siły F . Należy to tłumaczyć, że przy wzroście siły nagniatania występuje głębsza penetracja elementu nagniatającego (kulki) w głąb, co powoduje bardziej skuteczne wyrównywanie mikronierówności po cięciu laserem. Parametry chropowatości dla strefy wejścia zmniejszyły się od 12% do 41%, natomiast dla „strefy wyjścia” w zakresie 46%÷63% w odniesieniu do chropowatości po cięciu laserem.



Rys. 5.31. Wpływ siły nagniatania F na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

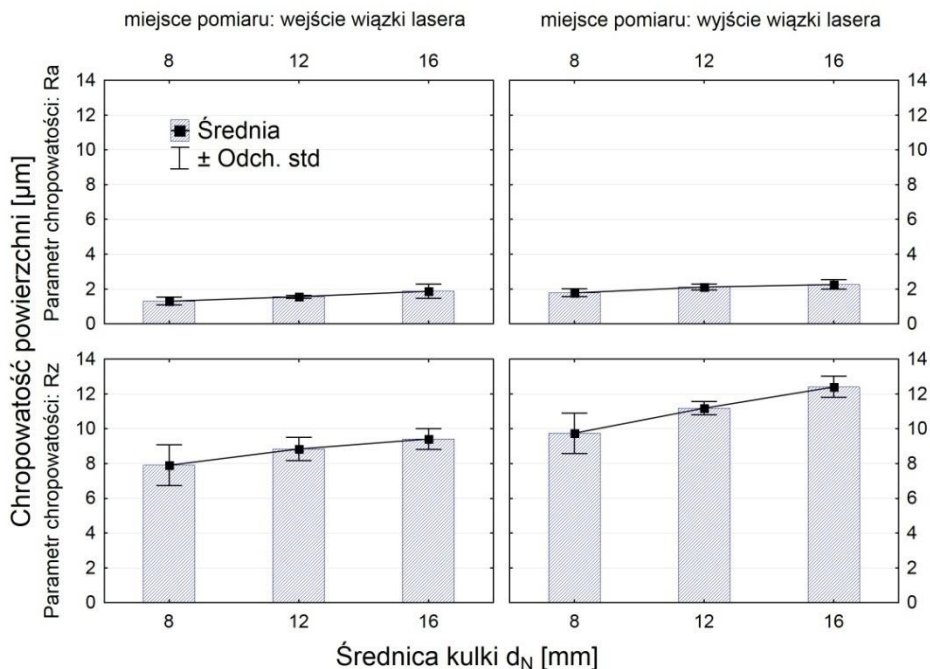


Rys. 5.32. Wpływ posuwu f na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720 \text{ N}$, $d_N = 8 \text{ mm}$, $i = 1$)

Rysunek 5.32 przedstawia wpływ posuwu nagniatania na chropowatość powierzchni. Wzrost analizowanego parametru powoduje wzrost wartości parametrów Ra i Rz . Spowodowane jest to tym, że ślady obróbkowe dla dużych wartości posuwu pojawiają się w większej odległości od siebie, co powoduje nierównomierną deformację prążkowanej struktury, co z kolei nie pozwala na uzyskanie gładkiej powierzchni. Współczynnik zmniejszenia chropowatości powierzchni po nagniataniu tocznym K_{Ra} wynosi $1,13 \div 2,99$, natomiast K_{Rz} zawiera się w przedziale $1,26 \div 3,65$.

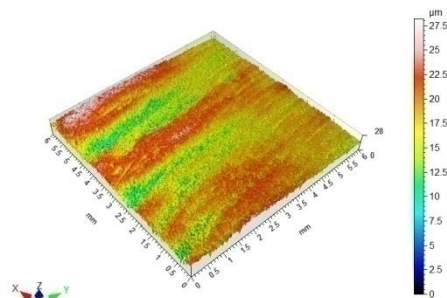
Rysunek 5.33 przedstawia wpływ średnicy kulki d_N na parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz . Podczas obróbki element nagniatający o mniejszej średnicy tworzy mniejszą powierzchnię kontaktu z przedmiotem obrabianym, co umożliwi uzyskanie dużych nacisków powierzchniowych, powodując bardziej intensywne wyrównywanie mikronierówności, efektem tego jest mniejsza chropowatość powierzchni.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



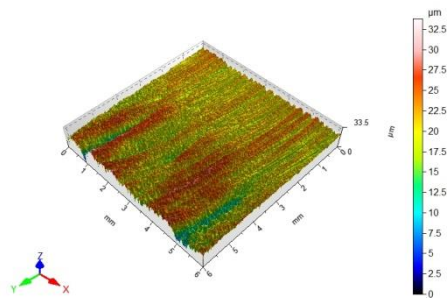
Rys. 5.33. Wpływ średnicy kulki d_N na parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$)

a)



$Sa = 2,64 \mu\text{m}$ $Sz = 28,2 \mu\text{m}$
 $Sv = 17,4 \mu\text{m}$ $Sp = 10,9 \mu\text{m}$

b)



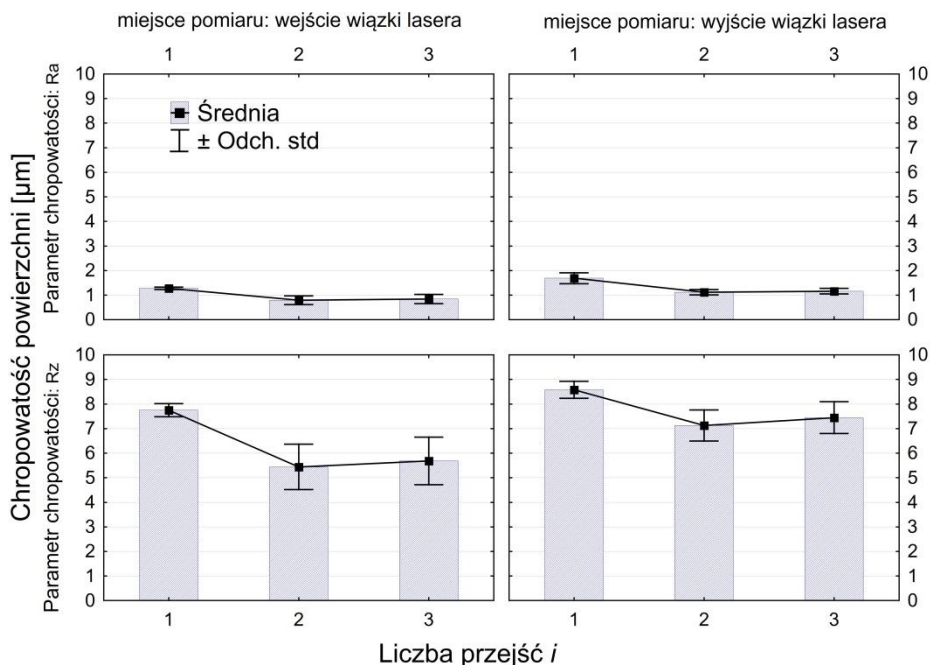
$Sa = 2,44 \mu\text{m}$ $Sz = 33,8 \mu\text{m}$
 $Sv = 20,4 \mu\text{m}$ $Sp = 13,4 \mu\text{m}$

Rys. 5.34. Topografia powierzchni próbek po cięciu laserem i nagniataniu tocznym ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$): a) $d_N = 8$ mm, b) $d_N = 12$ mm

Porównując topografię powierzchni w funkcji średnicy kulki, można zauważyć, że dla powierzchni obrobionej kulką o średnicy $d_N = 8$ mm widoczny jest równomierny zgniot (rys. 5.34a). Trudno wyróżnić strefę wejścia i wyjścia. Brak jest wzniesień i wgłębień, które zaburzałyby topografię powierzchni.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

W przypadku elementu nagniatającego o średnicy 12 mm (rys. 5.34b) następuje delikatne spłaszczenie prążków. Została zniwelowana różnica wysokości pomiędzy wzniesieniami i wgłębieniami.

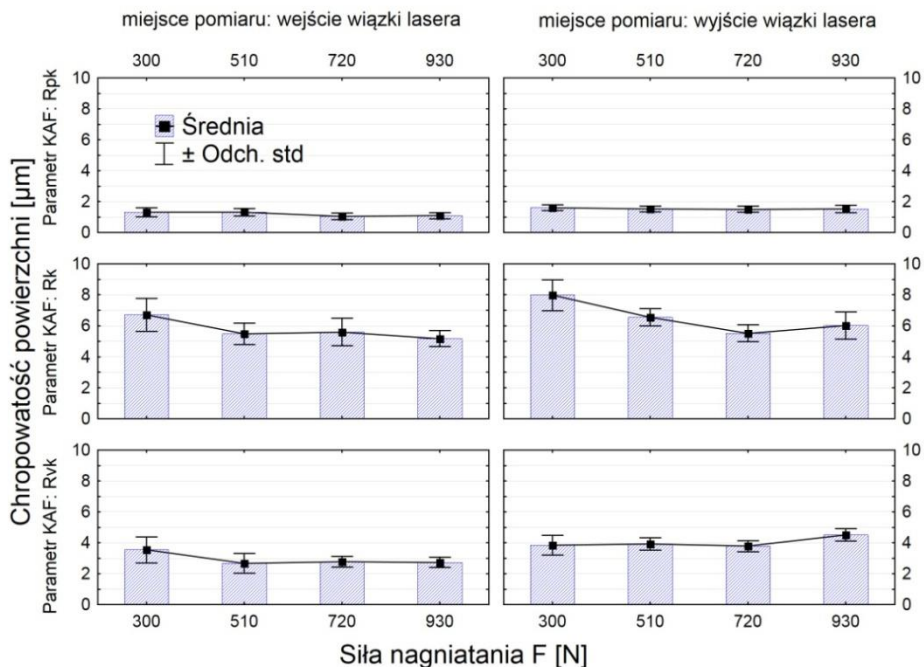


Rys. 5.35. Wpływ liczby przejść *i* na parametry chropowatości powierzchni *Ra* i *Rz* próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($d_N = 8$ mm, $F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr)

Rysunek 5.35 przedstawia wpływ liczby przejść *i* na chropowatość powierzchni. Wzrost liczby przejść do 2 powoduje poprawę jakości powierzchni. Dalsze zwiększanie ilości przejść przekłada się na niewielki wzrost parametrów *Ra* i *Rz*. Spowodowane jest to najprawdopodobniej wzrostem odkształceń plastycznych wraz z kolejnym przejściem, co przyczynia się do płynięcia materiału i tworzenia się sfałdowań powierzchni.

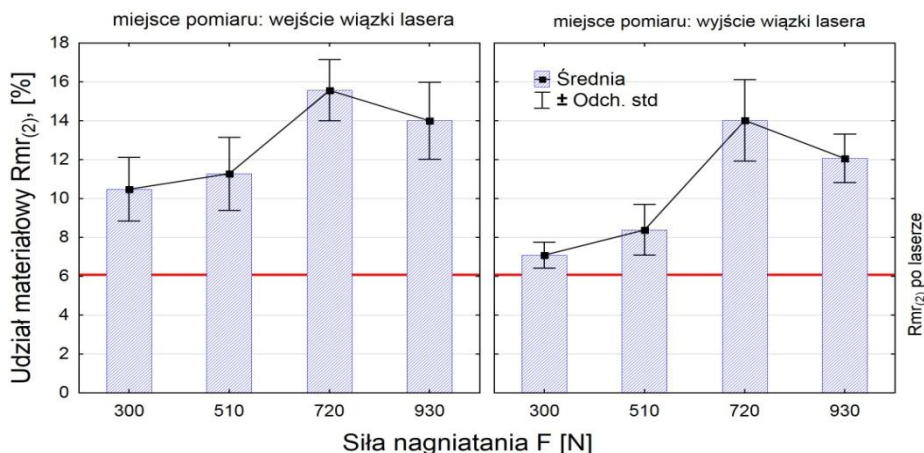
Na rysunkach 5.36÷5.39 przedstawiono wpływ parametrów technologicznych nagniatania na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a i udział materiałowy *Rmr*. Wpływ warunków obróbki na parametry *Rpk*, *Rk*, *Rvk* jest identyczny jak w przypadku parametrów amplitudowych i wysokościowych. Wzrost siły nagniatania powoduje „pełniejsze” odkształcenie prążków powstałych po cięciu laserem, co pozwala uzyskać gładszą powierzchnię (rys. 5.36). Parametr *Rpk* zmniejszył się od 46% do 70%, *Rk*: 18%÷67%, natomiast *Rvk* od 5% do 48% w odniesieniu do wartości po cięciu laserem. Najmniejsze zmiany zauważono dla zredukowanej głębokości wgłębienia. Najprawdopodobniej jest to związane z odkształcaniem się głównie wierzchołków mikronierówności.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



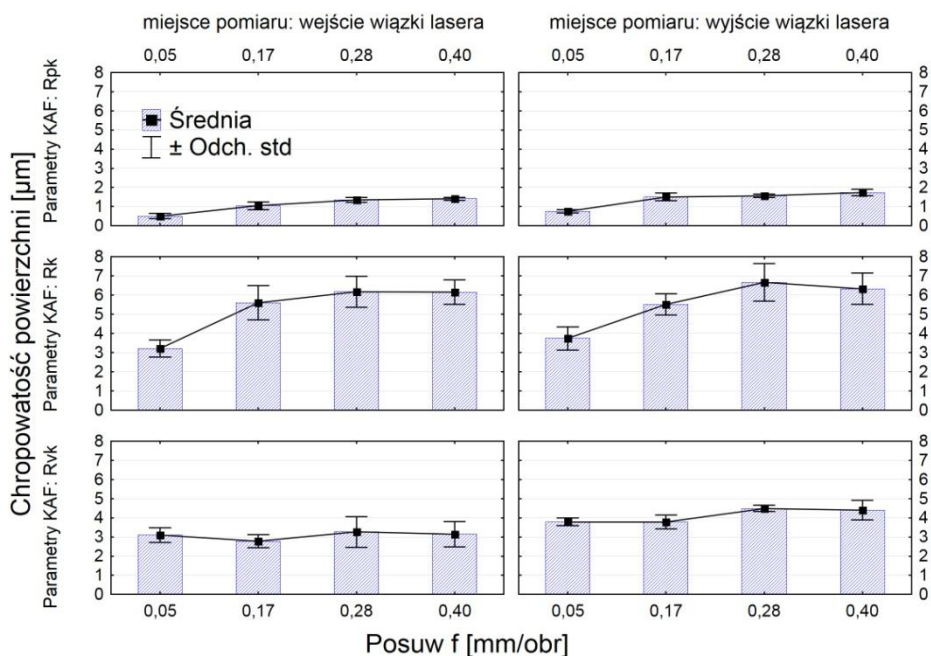
Rys. 5.36. Wpływ siły nagięcia F na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagiętych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

W zakresie siły nagięcia $F = 300 \div 720$ N następuje wzrost udziału materiałowego profilu powierzchni, natomiast dla $F = 930$ N odnotowano spadek parametru Rmr (rys. 5.37). W całym badanym zakresie sił nagięcia nastąpił wzrost udziału materiałowego w odniesieniu do powierzchni po cięciu laserem.

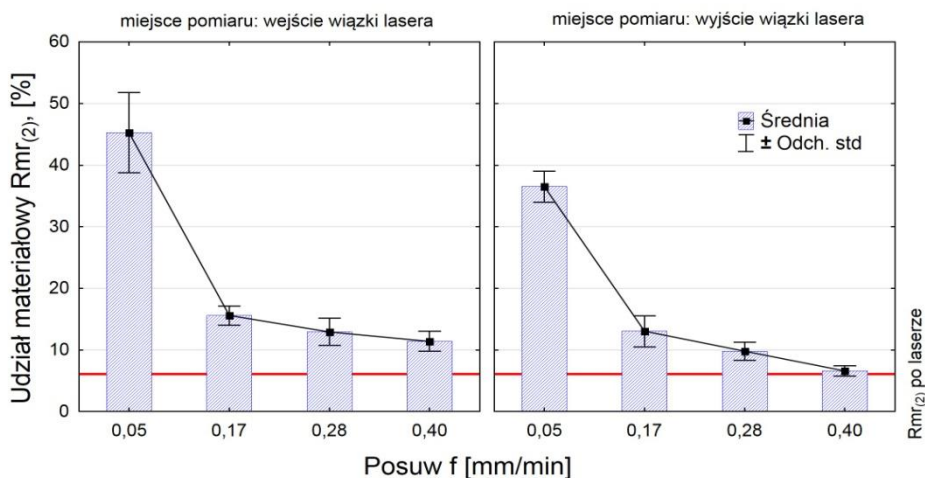


Rys. 5.37. Wpływ siły nagięcia F na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagiętych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.38. Wpływ posuwu f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720 \text{ N}$, $d_N = 8 \text{ mm}$, $i = 1$)



Rys. 5.39. Wpływ posuwu f na udział materiałowy R_{mr} próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720 \text{ N}$, $d_N = 8 \text{ mm}$, $i = 1$)

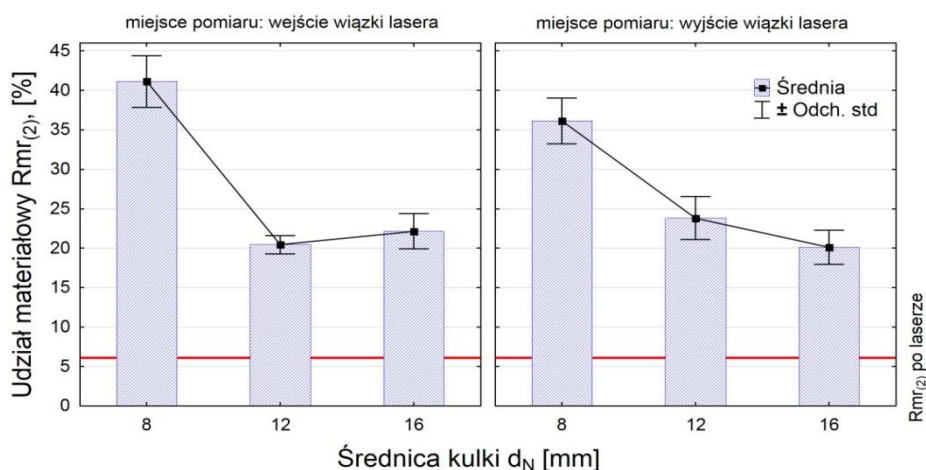
W zakresie małych wartości posuwu ($f = 0,05 \div 0,17 \text{ mm/obr}$) (rys. 5.38) zauważalne są największe zmiany parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a, R_{pk} i R_k oraz udziału materiałowego (rys. 5.39). Spowodowane jest to prawdopo-

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

dobnie większym odkształceniem mikronierówności materiału, następującym w wyniku zwiększania krotności oddziaływania obciążenia na jednostkę powierzchni.

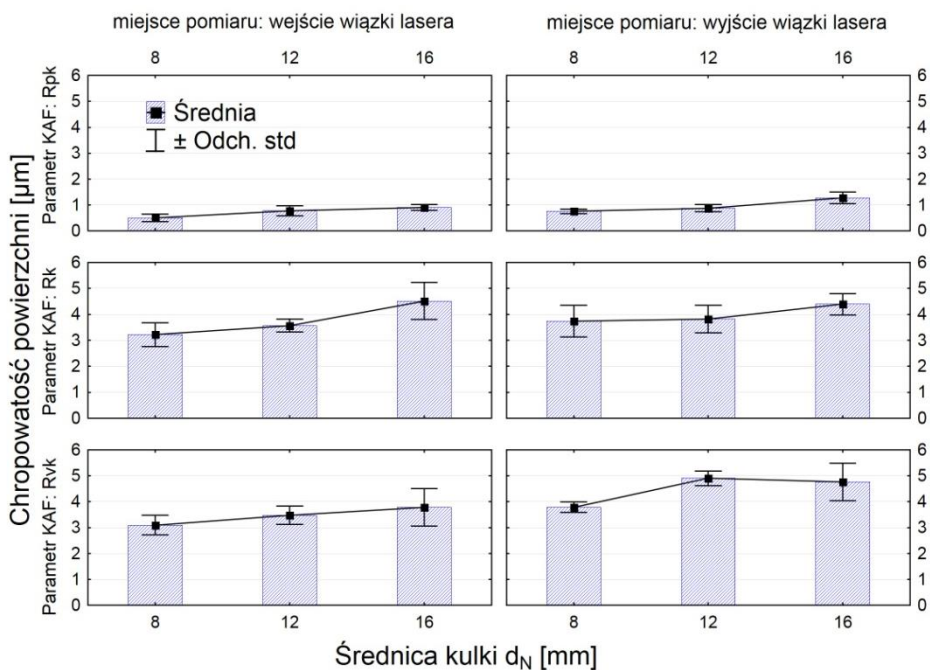
Na rysunku 5.41 przedstawiono wpływ średnicy kulki d_N na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a i udział materiałowy Rmr (rys. 5.40). Zastosowanie elementu nagniatającego o mniejszej średnicy pozwala na uzyskanie powierzchni o mniejszej chropowatości i większym udziale nośnym. Wydaje się, że jest to związane z większymi naprężeniami w materiale obrabianym w przypadku oddziaływania powierzchni kulistej o mniejszym promieniu (przy takiej samej sile nagniatającej).

Z wykresów przedstawionych na rysunkach 5.42 i 5.43 wynika, że najkorzystniejsze jest stosowanie dwóch przejść narzędzia. Dalsze zwiększanie liczby przejść powoduje pogorszenie parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a oraz spadek udziału materiałowego, co może być spowodowane uszkodzeniem struktury warstwy wierzchniej w wyniku nadmiernego zgniotu. Zmiany pomiędzy drugim i trzecim przejściem są tak niewielkie, że ze względu na efektywność ekonomiczną jest niezasadne zwiększanie liczby przejść powyżej 2.



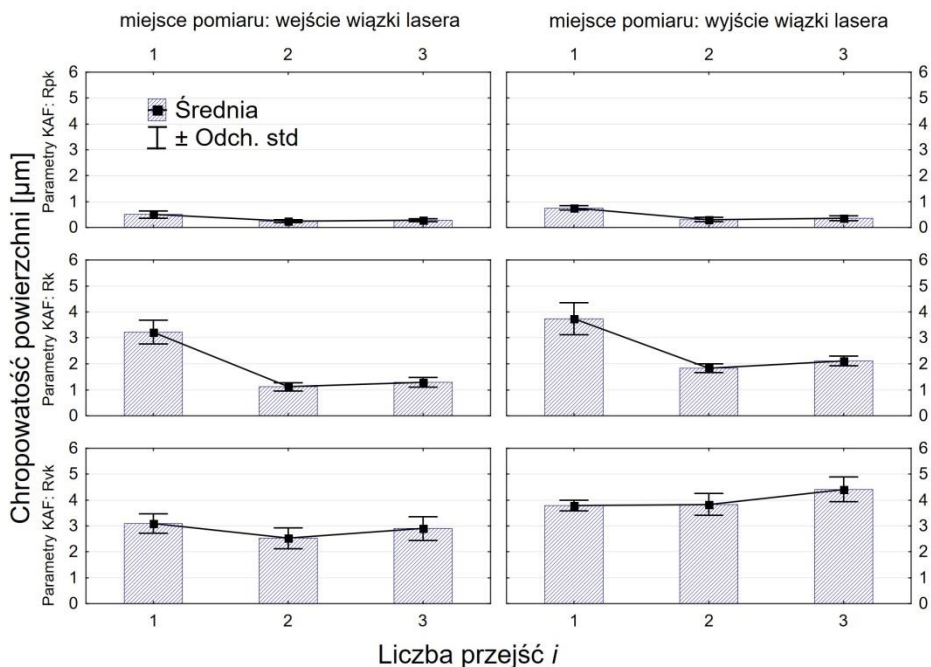
Rys. 5.40. Wpływ średnicy kulki d_N na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

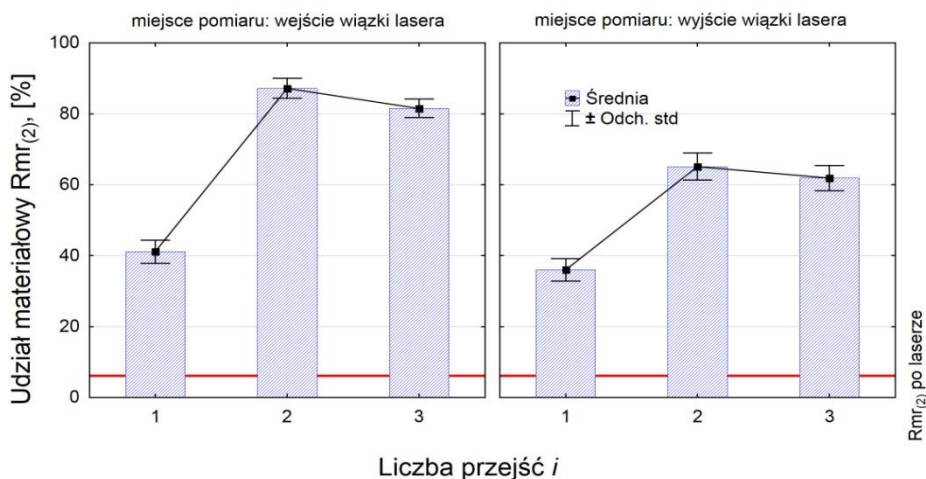


Rys. 5.41. Wpływ średnicy d_N na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,05$ mm/obr, $F = 720$ N, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.42. Wpływ liczby przejść i na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,05$ mm/obr, $F = 720$ N, $d_N = 8$ mm)



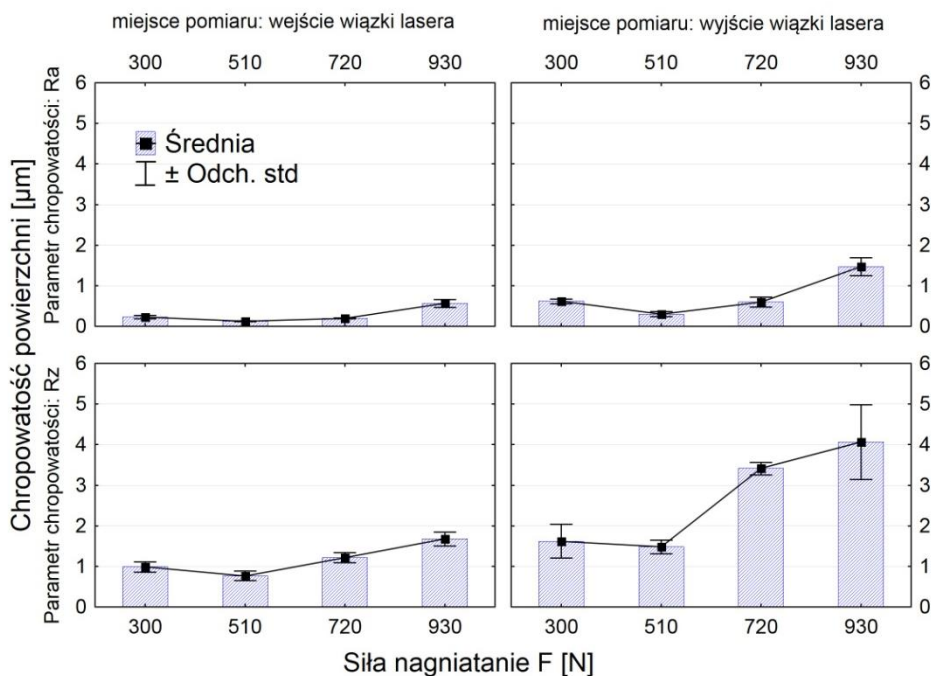
Rys. 5.43. Wpływ liczby przejść i na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $d_N = 8$ mm)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

5.1.7. Chropowatość powierzchni przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym

Na rysunkach 5.44÷5.49 przedstawiono wpływ parametrów technologicznych nagniatania na chropowatość powierzchni po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym.

Wraz ze wzrostem siły nagniatania na początku następuje niewielki spadek chropowatości, do wartości minimalnej osiągniętej dla $F = 510$ N (rys. 5.44). Po przekroczeniu siły nagniatania $F = 720$ N następuje wzrost parametrów chropowatości Ra i Rz . Może być to spowodowane zjawiskiem „wygniatania rowków”, które ma miejsce dla dużych wartości sił, co może oznaczać, że powierzchnia osiąga znaczny stopień deformacji, aż do prawdopodobnej utraty spójności. Poprawa parametrów chropowatości w odniesieniu do powierzchni po frezowaniu występuje podczas nagniatania z siłą $F = 510$ N.

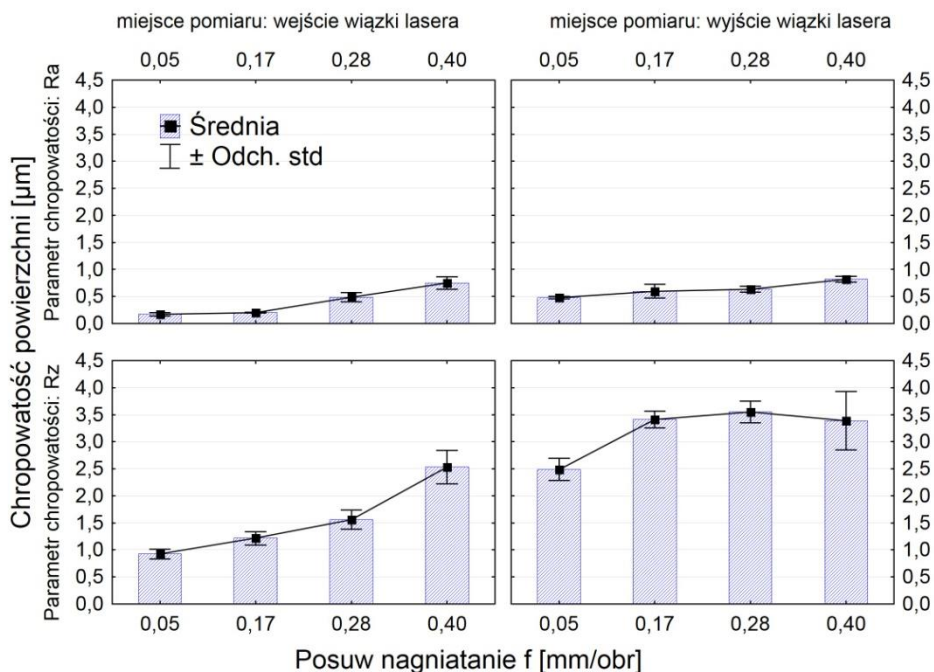


Rys. 5.44. Wpływ siły nagniatania F na parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

Wzrost posuwu nagniatania powoduje wzrost chropowatości powierzchni (rys. 5.45). Należy to tłumaczyć tym, że wartość posuwu ($f = 0,28$ mm/obr oraz $f = 0,4$ mm/obr) jest prawdopodobnie większa od szerokości śladu jaki pozostawia element nagniatający na obrabianej powierzchni, powoduje to powstawanie na niej miejsc nieobrobionych. Zastosowanie $f = 0,05$ mm/obr pozwala na

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

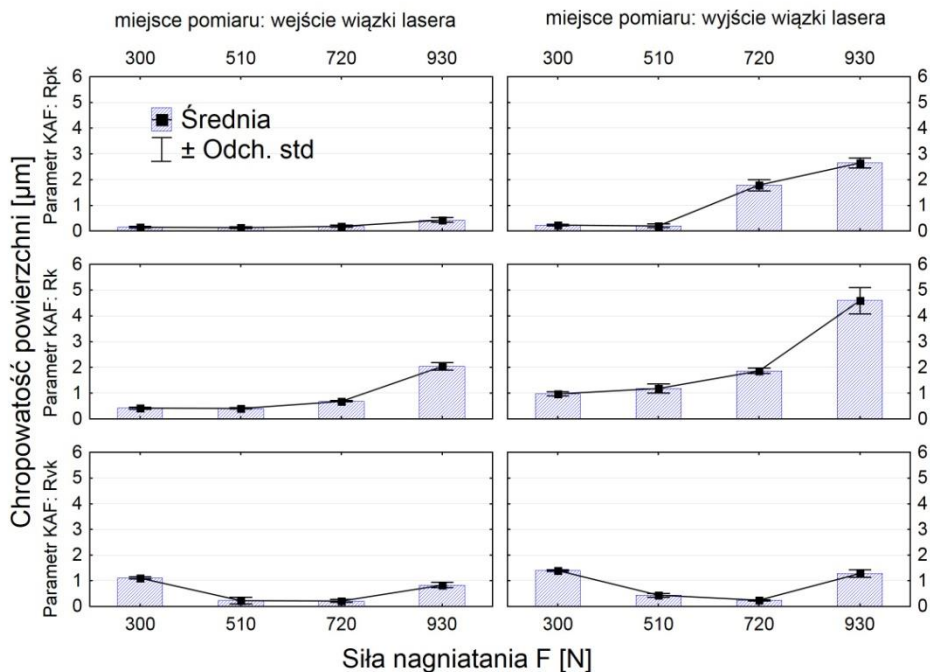
zmniejszenie wartości parametrów amplitudowych i wysokościowych chropowatości obrabianej powierzchni w odniesieniu do powierzchni po frezowaniu.



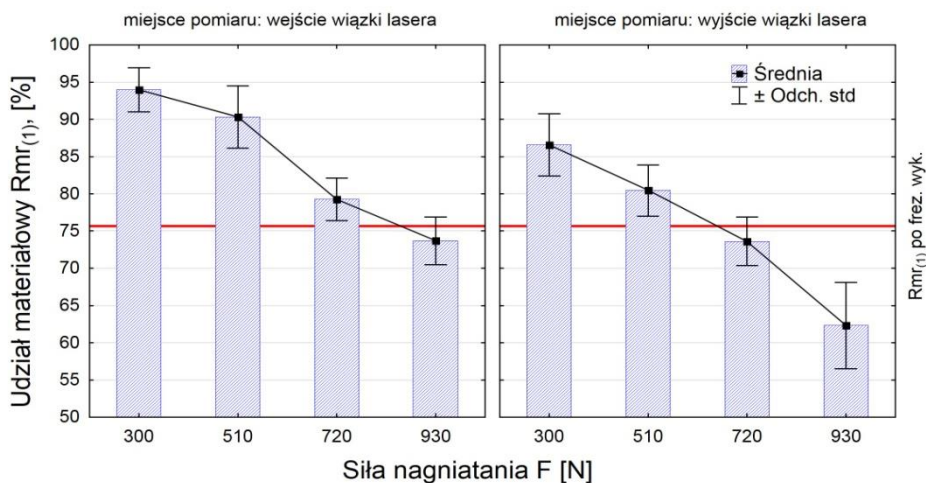
Rys. 5.45. Wpływ posuwu f na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

Parametry krzywej Abbotta-Firestone'a zawierają informację o aspekcie przydatności eksploatacyjnej danej powierzchni. W wyniku wzrostu siły nagniatania wartość parametrów Rpk oraz Rk wzrasta (rys. 5.46). W przypadku parametru Rvk w zakresie siły nagniatania $F = 300 \div 510$ N następuje zmniejszenie zredukowanej głębokości rdzenia, a po przekroczeniu $F = 510$ N parametr Rvk wzrasta. Zwiększenie parametru Rvk świadczy o poprawie zdolności utrzymania środka smarowego. Poprawa parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a w odniesieniu do obróbki poprzedzającej występuje podczas nagniatania z siłą $F = 510$ N. W zakresie $F = 300 \div 720$ następuje poprawa udziału materiałowego dla powierzchni po frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym (rys. 5.47).

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



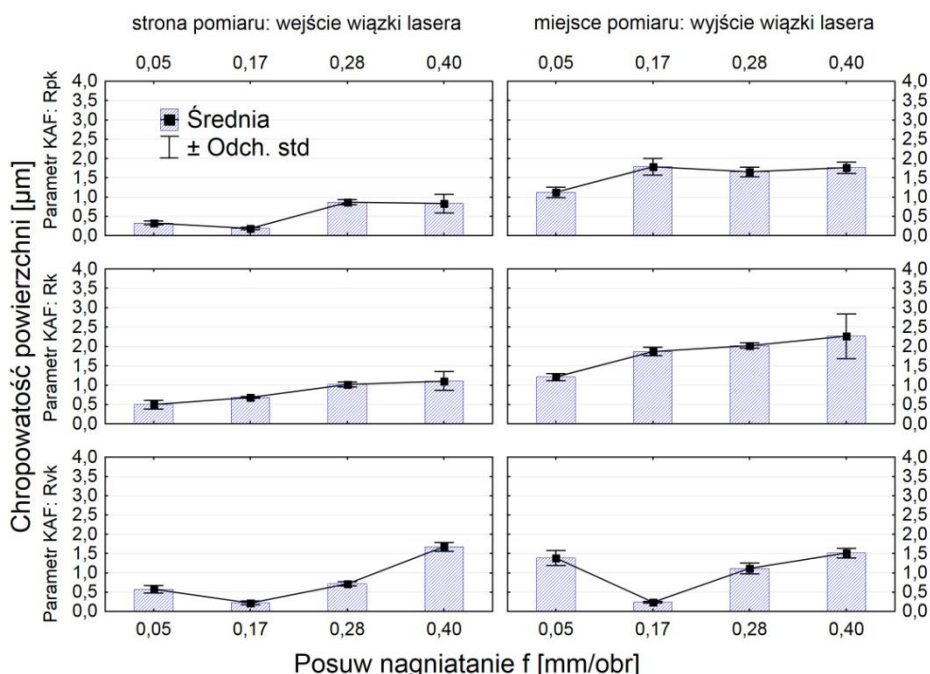
Rys. 5.46. Wpływ siły nagięcia F na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagiętych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)



Rys. 5.47. Wpływ siły nagięcia F na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagiętych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

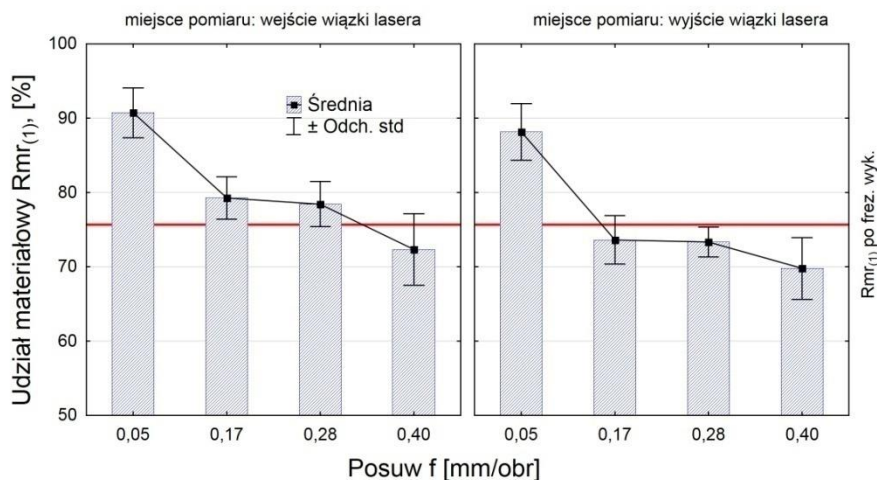
Na rysunku 5.48 przedstawiono wpływ posuwu nagniatania na parametry Rpk , Rk i Rvk . Dla posuwu z przedziału $0,05 \div 0,17$ mm/obr zauważalny jest niewielki spadek wartości parametrów Rpk , Rvk . Po przekroczeniu $f = 0,17$ mm/obr następuje wzrost wszystkich analizowanych parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a. Ten wzrost parametrów Rpk , Rk i Rvk można wytłumaczyć tym, że dla większych wartości posuwu następuje wygniatanie większych rowków.



Rys. 5.48. Wpływ posuwu f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

Udział materiałowy dla powierzchni nagniatanych tocznie po frezowaniu wykończeniowym zależy od posuwu. Poprawa w odniesieniu do powierzchni po frezowaniu ma miejsce dla małych wartości posuwu (rys. 5.49).

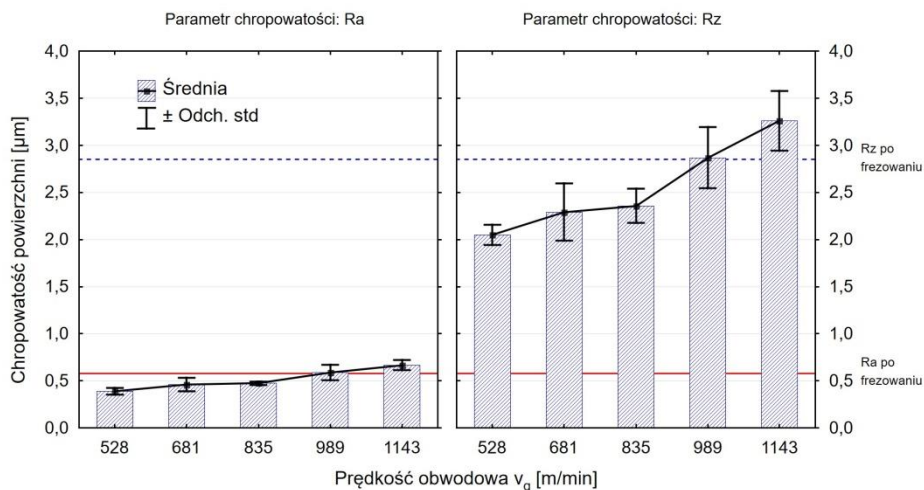
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.49. Wpływ posuwu f na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720 \text{ N}$, $d_N = 8 \text{ mm}$, $i = 1$)

5.1.8. Chropowatość powierzchni po frezowaniu i nagniataniu odśrodkowym przedmiotów nie wycinanych laserem

Na rysunku 5.50 przedstawiono wpływ prędkości obwodowej v_g głowicy nagniatającej na parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz . Wzrost prędkości obwodowej powoduje zwiększenie energii kinetycznej, co wpływa na wielkość odkształceń sprężysto-plastycznych nierówności powierzchni, które

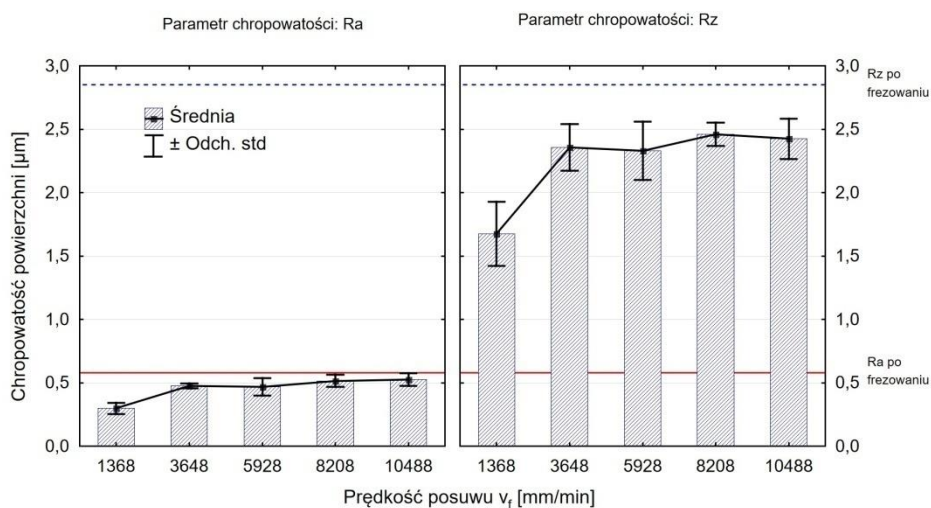


Rys. 5.50. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry chropowatości Ra i Rz próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648 \text{ mm/min}$, $f_p = 0,08 \text{ mm}$, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

determinują chropowatość powierzchni. Dla v_g z zakresu 528÷835 m/min następuje poprawa chropowatości powierzchni w odniesieniu do powierzchni po frezowaniu elementów nie wycinanych laserem. Współczynnik zmniejszenia chropowatości K_{Ra} wynosi od 1,22 do 1,44, a K_{Rz} od 1,21 do 1,39.

Rysunek 5.51 przedstawia wpływ prędkości posuwu v_f na chropowatość powierzchni. Wzrost analizowanego parametru powoduje wzrost parametrów chropowatości powierzchni Ra i Rz , co jest związane ze wzrostem odległości pomiędzy śladami obróbkowymi.

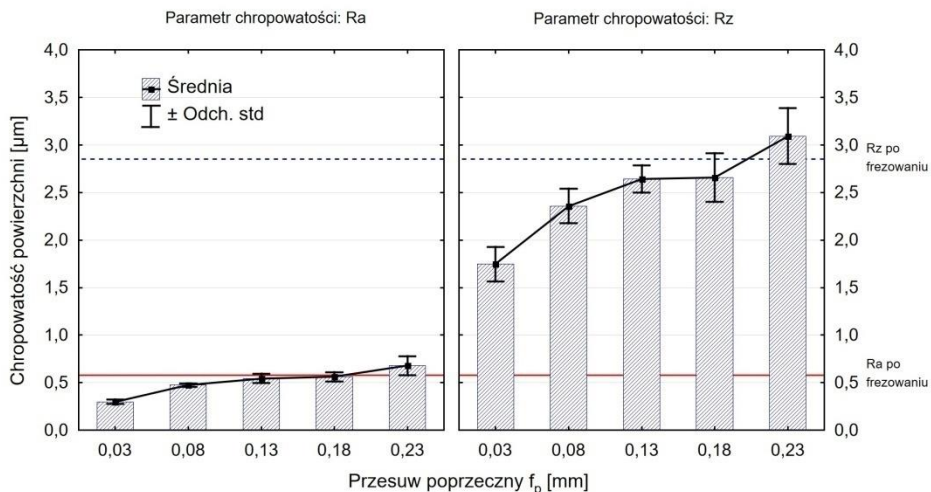


Rys. 5.51. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry chropowatości Ra i Rz próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Ilość śladów przypadających na powierzchnię obrabianą zmniejsza się ze wzrostem przesuwu poprzecznego. Dla przesuwu poprzecznego $f_p > 0,18$ mm następuje pogorszenie chropowatości powierzchni w odniesieniu do powierzchni po frezowaniu. Poprawa parametrów chropowatości Ra i Rz w stosunku do obróbki poprzedzającej ma miejsce podczas obróbki z przesuwem poprzecznym $f_p = (0,03 \div 0,13)$ mm.

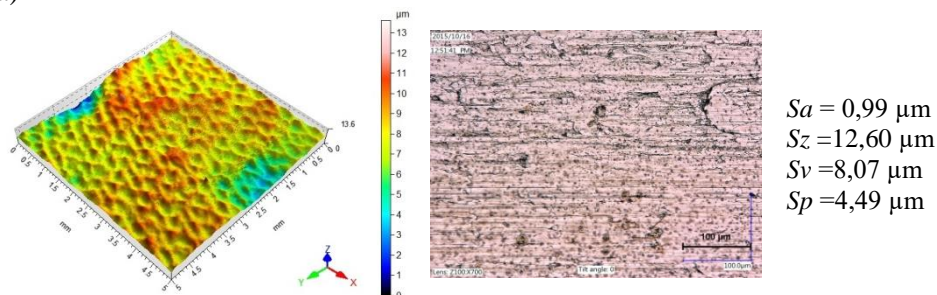
Na rysunku 5.53 przedstawiono przykładową topografię powierzchni po nagniataniu odśrodkowym dla różnych warunków obróbki. Skanowana powierzchnia o wymiarach 5 x 5 mm wykazuje, że dla powierzchni obrobionej z mniejszą wartością v_g ślady obróbkowe są w większej odległości. Na fotografiach obrobionych powierzchni nagniataniem odśrodkowym widoczne są niewielkie pęknięcia i mikrowgłębienia.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

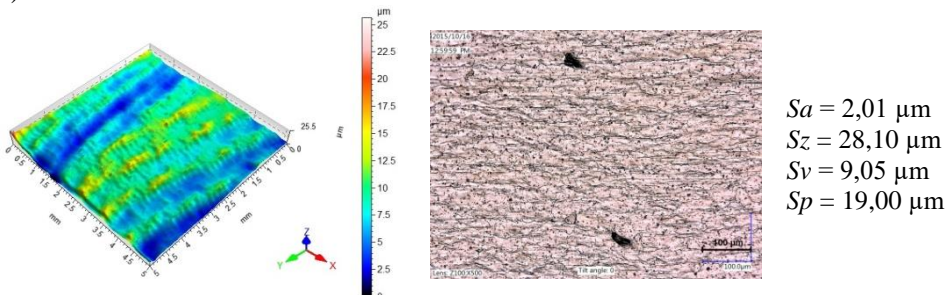


Rys. 5.52. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry chropowatości Ra i Rz próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835 \text{ m/min}$, $v_f = 3648 \text{ mm/min}$, $i = 1$)

a)



b)

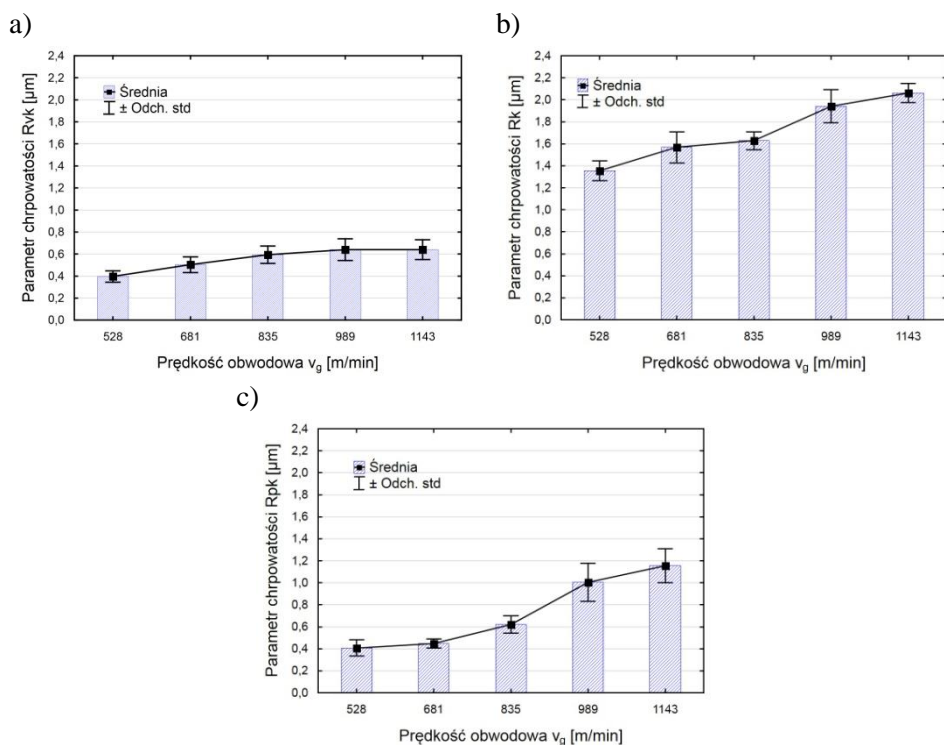


Rys. 5.53. Topografia powierzchni próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo: a) $v_g = 528 \text{ m/min}$, b) $v_g = 1143 \text{ m/min}$ ($v_f = 3648 \text{ mm/min}$, $f_p = 0,08 \text{ mm}$, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Powstała struktura geometryczna w wyniku nagniatania odśrodkowego jest sumarycznym rezultatem wielkości i form tworzących się śladów obróbkowych oraz ich względnego rozmieszczenia na powierzchni obrabianej.

Wartości parametrów krzywej Abbotta-Firestone'a determinowane są zastosowanymi parametrami technologicznymi obróbki. Z przeprowadzonej analizy wpływu warunków nagniatania odśrodkowego na funkcjonalne parametry chropowatości (rys. 5.54÷5.56) wynika, że wzrost prędkości obwodowej v_g , prędkości posuwu v_f oraz przesuwu poprzecznego f_p powoduje wzrost parametrów Rpk , Rk , Rvk i spadek udziału materiałowego Rmr (rys. 5.57) oraz w dużym zakresie wartości tych parametrów pogorszenie wskaźników jakościowych w odniesieniu do powierzchni po frezowaniu.

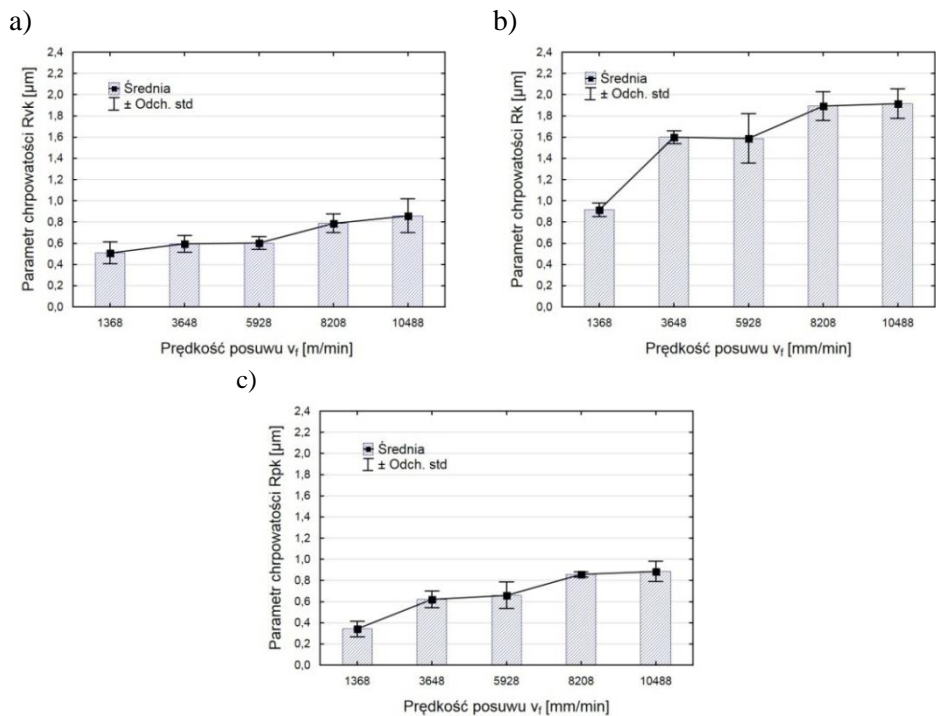


Rys. 5.54. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo: a) parametr Rvk , b) parametr Rk , c) parametr Rpk ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

W wyniku obróbki na powierzchni obrabianej nakładają się na siebie ślady obróbkowe. Powstające wgłębienia mogą stanowić potencjalne „zbiorniki”, mogące gromadzić substancje smarne, co może przyczynić się do ograniczenia zużycia ściernego. Zdolność retencji powierzchni określana jest za pomocą parametru Rvk . Z rysunków 5.54a, 5.55a, 5.56a wynika, że zdolność utrzymania

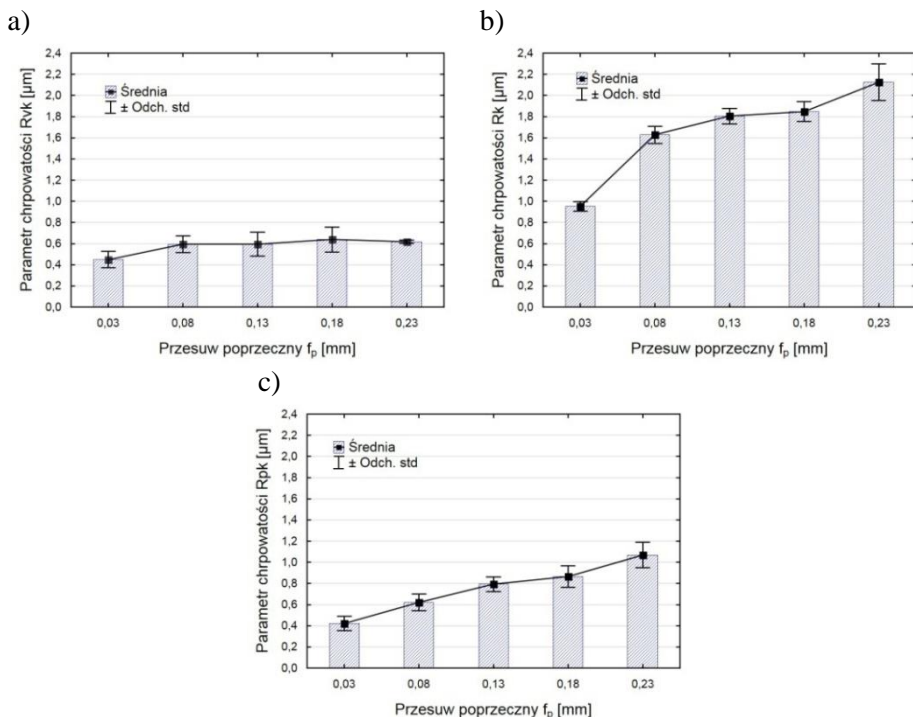
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

środka smarnego poprawia się ze wzrostem parametrów nagniatania odśrodkowego.



Rys. 5.55. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo: a) parametr Rvk , b) parametr Rk , c) parametr Rpk ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

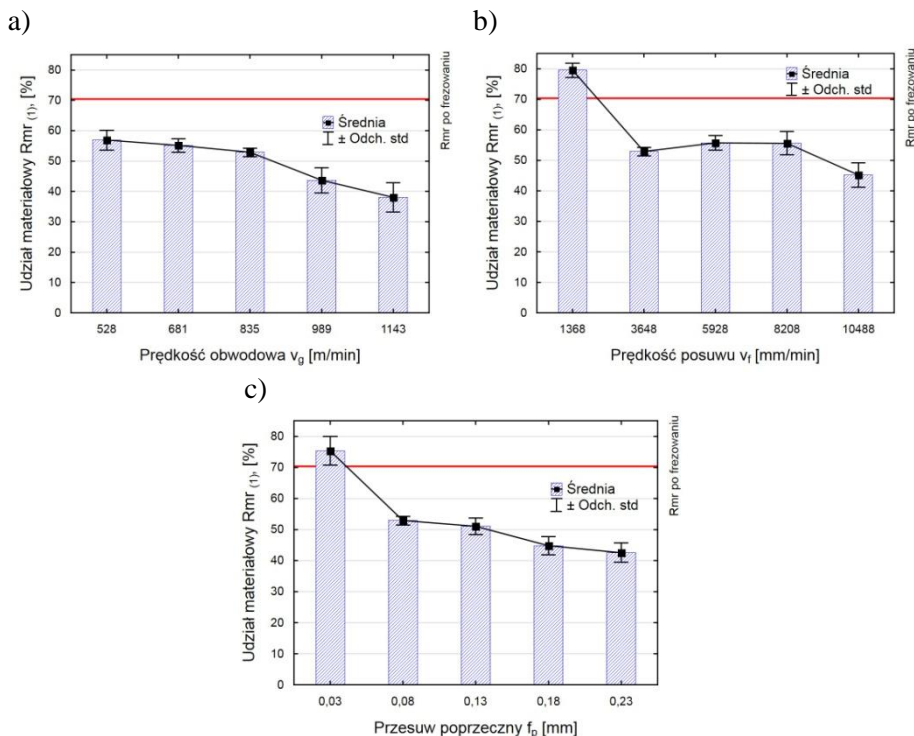


Rys. 5.56. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo: a) parametr Rvk , b) parametr Rk , c) parametr Rpk ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ m/min, $i = 1$)

Na rysunku 5.57 przedstawiono wpływ parametrów nagniatania odśrodkowego na udział materiałowy Rmr . Zgodnie z przypuszczeniami wzrost prędkości obwodowej v_g , prędkości posuwu v_f oraz przesuwu poprzecznego f_p powoduje spadek udziału materiałowego. Poprawa parametru Rmr następuje podczas obróbki nagniataniem z $v_f = 1368$ mm/min ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$) oraz $f_p = 0,03$ mm ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ m/min, $i = 1$) w odniesieniu do wartości po frezowaniu.

Podsumowując przeprowadzone badania chropowatości powierzchni stali C45 po nagniataniu odśrodkowym można zauważyć, że parametry technologiczne obróbki w dużym stopniu decydują o geometrycznym i funkcjonalnym „obliczu” powierzchni obrabianej. W odniesieniu do zastosowanych warunków obróbki zauważa się w dużym zakresie parametrów obróbki pogorszenie parametrów chropowatości w odniesieniu do powierzchni po frezowaniu.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.57. Udział materiałowy profilu chropowatości powierzchni Rmr próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo w funkcji: a) prędkości obwodowej v_g ($v_f = 3648$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$), b) prędkości posuwu v_f ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$), c) przesuwu poprzecznego f_p ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ m/min, $i = 1$)

5.1.9. Podsumowanie badań chropowatości powierzchni

Na podstawie przeprowadzonych badań chropowatości powierzchni można stwierdzić, że stan powierzchni po obróbce silnie uzależniony jest od sposobu obróbki i parametrów technologicznych.

Powierzchnia po cięciu laserem posiada dwie strefy o zróżnicowanej chropowatości. Charakteryzuje się ona wysokimi wartościami parametru Ra , Rz , Rpk i Rk oraz niską wartością udziału materiałowego Rmr , co jest mało korzystne ze względu na zużycie ściernic.

Obróbka nagniataniem odśrodkowym oraz nagniataniem tocznym powierzchni po cięciu laserem umożliwia poprawę właściwości stereometrycznych warstwy wierzchniej. Parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz zmniejszają się ponad czterokrotnie dla nagniatania odśrodkowego. Podczas obróbki nagniataniem tocznym przedmiotów po cięciu laserem również następuje poprawa parametrów amplitudowych, wysokościowych, krzywej Abbotta-Firestone'a oraz udziału materiałowego w odniesieniu do wartości po cięciu laserem.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Przeprowadzenie frezowania wykończeniowego powierzchni po cięciu laserem pozwala na zmniejszenie wysokości mikronierówności. Parametry wysokościowe i amplitudowe zmniejszają swoje wartości około 10-krotnie w odniesieniu do powierzchni po cięciu laserem. Krzywa udziału materiałowego nie zmienia swojego kształtu, pozostając krzywą degresywno – progresywną, co jest niekorzystnym zjawiskiem w aspekcie współpracy dwóch elementów w parze.

Nagniatanie odśrodkowe próbek po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym kształtuje nowy stan warstwy wierzchniej o zmiennych właściwościach stereometrycznych w odniesieniu do obróbki poprzedzającej. Przeprowadzone nagniatanie odśrodkowe próbek po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym pozwala na poprawę parametrów chropowatości powierzchni Ra i Rz oraz poprawę właściwości funkcjonalnych powierzchni dla prędkości obwodowej głowicy $v_g = 681 \div 835$ m/min, prędkości posuwu $v_f = 1368 \div 3648$ mm/min, przesuwu poprzecznego $f_p = 0,03 \div 0,08$ mm. W przypadku nagniatania tocznego próbek po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym poprawa właściwości stereometrycznych w odniesieniu do obróbki poprzedzającej następuje dla siły nagniatania $F = 300 \div 510$ N oraz posuwu $f = 0,05 \div 0,17$ mm/obr.

W wyniku nagniatania odśrodkowego próbek nie wycinanych laserem, a jedynie frezowanych powstaje struktura z licznymi zagłębieniami. Poprawa parametrów Ra , Rz , Rpk , Rk oraz wzrost udziału materiałowego następuje podczas obróbki z $v_f = 1368$ mm/min oraz $f_p = 0,03$ mm.

Nagniatanie odśrodkowe próbek nie wycinanych laserem, a jedynie frezowanych powoduje w dużym zakresie parametrów, wykorzystanych w badaniach, pogorszenie wskaźników jakościowych, podczas gdy dla próbek wycinanych laserem następuje poprawa jakości powierzchni. Przeprowadzone badania chropowatości powierzchni próbek wycinanych laserem oraz nie wycinanych laserem po nagniataniu odśrodkowym pozwalają stwierdzić, że właściwości warstwy wierzchniej ukształtowane podczas cięcia laserem wpływają na chropowatość powierzchni po nagniataniu.

5.2. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej

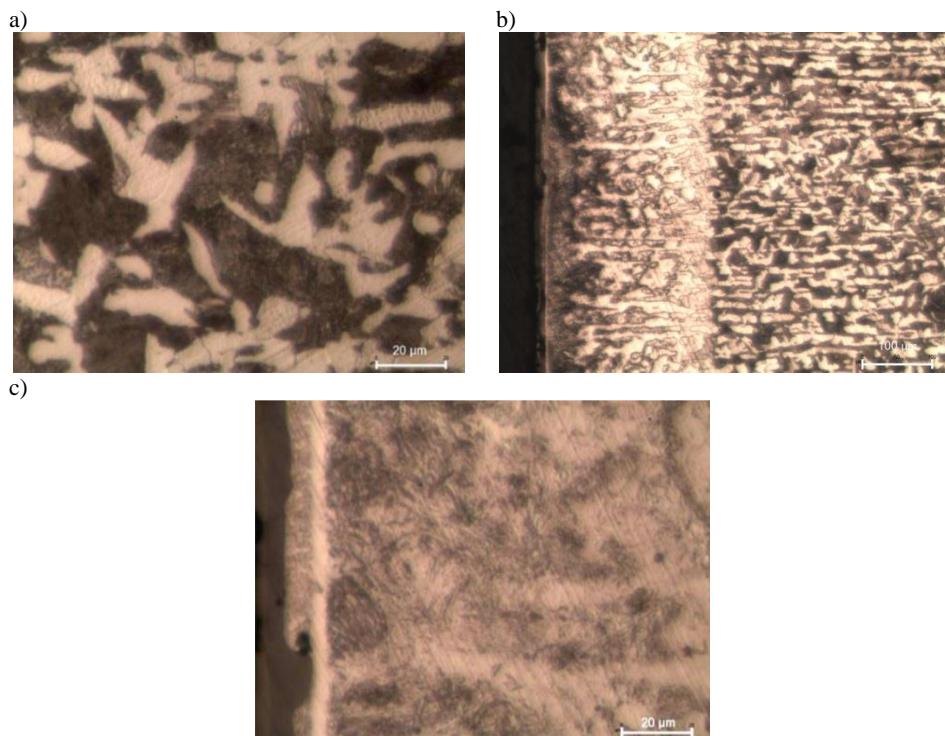
5.2.1. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem

Podczas procesu cięcia laserem dochodzi do umocnienia strefy przykrawędziowej. Ciepło dostarczone do przecinanego materiału poprzez wiązkę lasera, powoduje przemiany strukturalne, czego następstwem jest zmiana mikrostruktury oraz przyrost twardości.

Stal C45 przed procesem cięcia posiada strukturę ferrytyczno-perlityczną (rys. 5.58a). Na skutek silnego nagrzania materiału wiązką lasera, a następnie

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

schłodzenia w okolicach krawędzi cięcia następuje zahartowanie materiału tej strefy. Powstaje strefa wpływu ciepła (SWC), która różni się strukturą i właściwościami od materiału rodzimego (rys. 5.58b). W SWC widoczne są igielki martenzytu (rys. 5.58c), następnie ferryt oraz martenzyt (środek SWC) oraz struktura materiału rodzimego (rys. 5.58b). Ziarna ferrytu podczas procesu cięcia laserem nie zdążyły się wzbogacić węglem, co spowodowało powstanie martenzytu niskowęglowego. Natomiast perlit przekształcił się w martenzyt wysokowęglowy.



Rys. 5.58. Mikrostruktura stali C45: a) przed cięciem laserem, b) SWC i strefa przejściowa po cięciu laserem, c) SWC po cięciu laserem

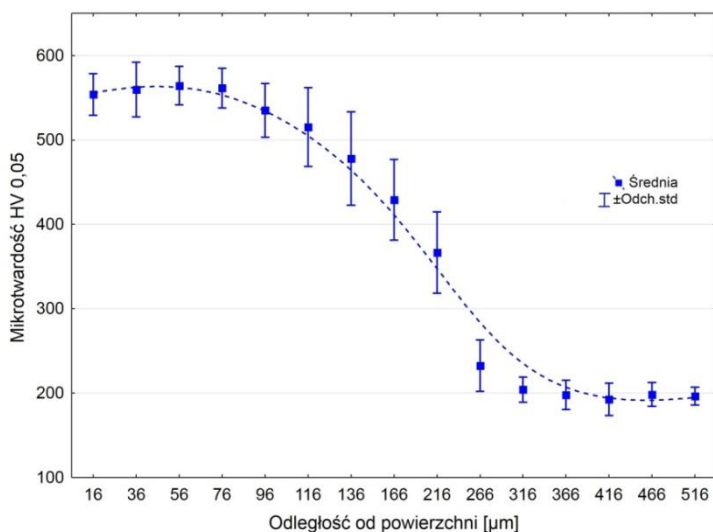
W celu określenia szerokości strefy wpływu ciepła została wyznaczona twardość krytyczna, czyli twardość która odpowiada strukturze półmartenzytycznej, tzn. składającej się co najmniej z 50% martenzytu i w 50% z innych dodatków stopowych. W przypadku stali niestopowej C45 twardość krytyczna wynosi 47 HRC [104]. Znając wartość twardości krytycznej oraz przebieg rozkładu mikrotwardości można było wyznaczyć szerokość strefy wpływu ciepła.

Szerokość strefy wpływu ciepła wynosi ponad 0,3 mm, potwierdza to rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej stali C45 po cięciu laserem (rys. 5.59). W wyniku cięcia laserem mikrotwardość warstwy wierzchniej wzrasta ponad

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

dwukrotnie w obszarze krawędzi cięcia, następnie powoli spada, aby osiągnąć wartość mikrotwardości rdzenia.

Na rysunku 5.60 przedstawiono dyfraktogram wraz z dopasowanymi refleksami teoretycznymi otrzymany po analizie powierzchni próbki stali C45 po cięciu laserem. W tabeli 5.8 podano zidentyfikowane związki oraz dane na podstawie których zostały one określone.



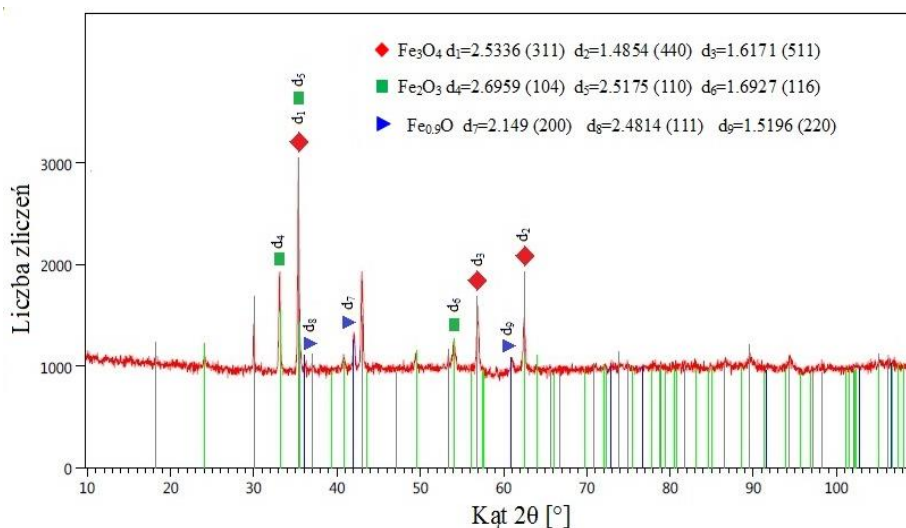
Rys. 5.59. Rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej stali C45 po cięciu laserem

Z przeprowadzonych badań składu fazowego powierzchni stali C45 po cięciu laserem wynika, że na jej powierzchni występują następujące fazy: Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , $\text{Fe}_{0,9}\text{O}$ (rys. 5.60 i tabela 5.8).

Tabela 5.8. Dane zidentyfikowanych związków na podstawie dyfraktogramu otrzymanego po analizie powierzchni próbki stali C45 po cięciu laserem

Nr w bazie ICDD PDF – 4+	Wzór chemiczny	Parametry sieci [Å]	Kąty [°]
04-009-8436	Fe_3O_4	$a=b=c=8.4030$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
04-006-9058	Fe_2O_3	$a=b=5.0350$ $c=13.72$	$\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$
04-001-9267	$\text{Fe}_{0,9}\text{O}$	$a=b=c=4.2980$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

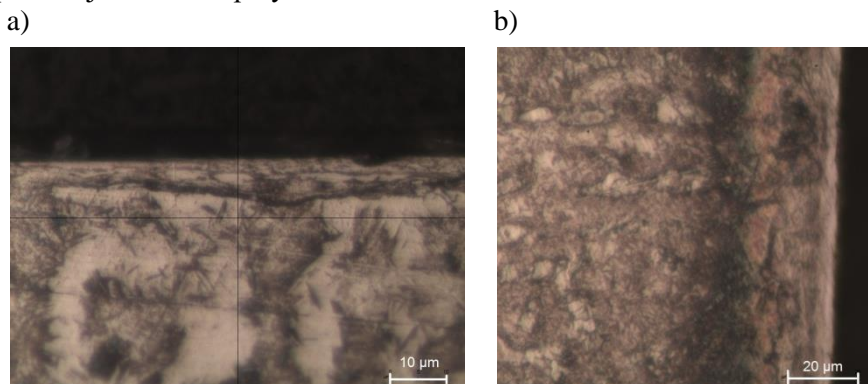


Rys. 5.60. Dyfraktogram otrzymany po analizie powierzchni próbki stali C45 po cięciu laserem z dopasowanymi refleksami teoretycznymi

Obecność tlenu, jako gazu towarzyszącego procesowi cięcia, sprzyja reakcji egzotermicznej, co z kolei powoduje powstanie produktów spalania głównie tlenków żelaza [63]. Potwierdzeniem tego jest jakościowa zmiana składu fazowego warstwy wierzchniej po procesie cięcia laserem.

5.2.2. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym

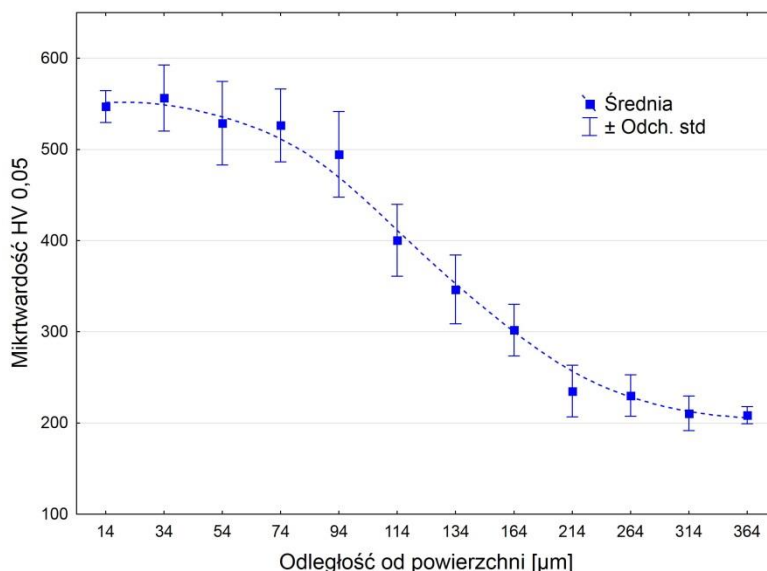
Podczas frezowania wykończeniowego część warstwy utwardzonej została usunięta (usunięta została warstwa o grubości 120 μm) (rys. 5.61b). Na skutek mechanicznego oddziaływania ostrzy narzędzia na obrabianą powierzchnię, po cięciu laserem nastąpiło niewielkie umocnienie warstwy wierzchniej (rys. 5.62), co powoduje niewielki przyrost twardości.



Rys. 5.61. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym: a) wydłużone ziarna, b) obszar wpływu obróbki frezowaniem

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Mikrostruktura powstała po procesie frezowania obwodowego charakteryzuje się w okolicach krawędzi wydłużonymi ziarnami (rys. 5.61a). Następnie widoczna jest strefa przejściowa, w której obecna jest mikrostruktura powstała po cięciu laserem i frezowaniu, przechodząca w materiał rdzenia, strukturę ferrytyczno-perlityczną.



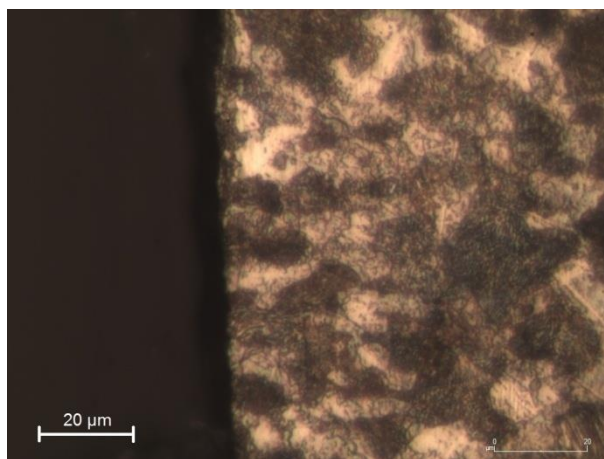
Rys. 5.62. Rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej stali C45 po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym

Powstała mikrostruktura oraz rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym prawdopodobnie jest wynikiem wpływu dwóch przeciwnych zjawisk: odpuszczania zahartowanej warstwy, co powoduje zmniejszenie twardości i/lub wtórne umocnienie poprzez oddziaływanie mechaniczne ostrzy [59].

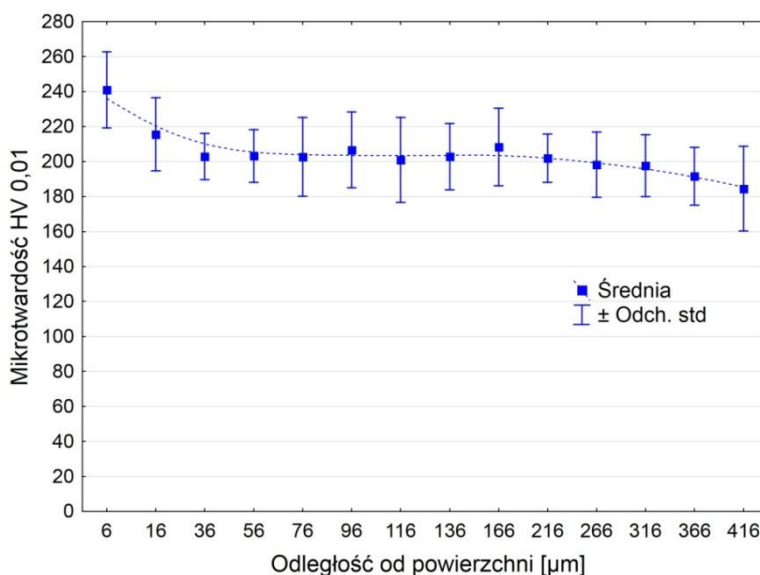
5.2.3. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej po frezowaniu przedmiotów nie wycinanych laserem

Podczas frezowania obwodowego nastąpiło odkształcenie pojedynczych ziaren na skutek tarcia powierzchni narzędzia o powierzchnie obrabianego materiału (rys. 5.63). W obszarze przy powierzchni obrabianej występują wydłużone ziarna. Zmiany kształtu ziaren występują na niewielkiej głębokości. Stwierdzono niewielki przyrost twardości warstwy wierzchniej stali C45 po frezowaniu (rys. 5.64).

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.63. Mikrostruktura stali C45 nie wycinanej laserem, po frezowaniu ($v_c = 102$ m/min, $f_z = 0,067$ mm/ostrze, $a_p = 0,12$ mm)



Rys. 5.64. Rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej stali C45 nie wycinanej laserem, po frezowaniu ($v_c = 102$ m/min, $f_z = 0,067$ mm/ostrze, $a_p = 0,12$ mm)

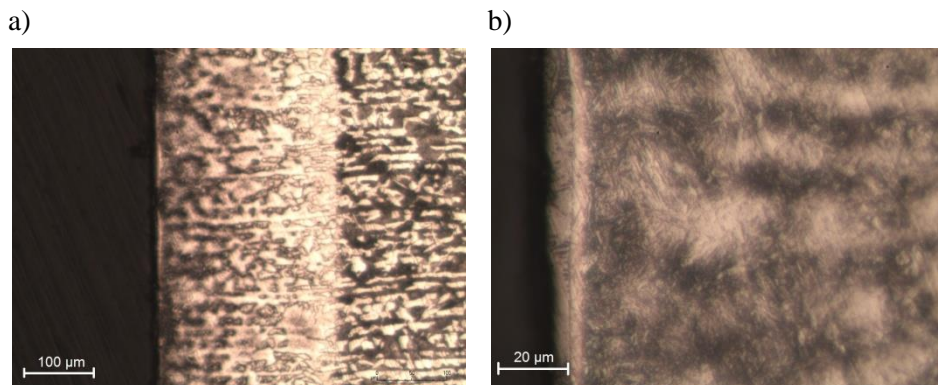
5.2.4. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym

W wyniku oddziaływania cyklicznych uderzeń elementów nagniatających w powierzchnię obrabianą następuje przebudowa struktury materiału.

Na rysunku 5.65 przedstawiono strukturę powstałą po nagniataniu odśrodkowym stali C45 po cięciu laserem. Obróbka może powodować powstawanie

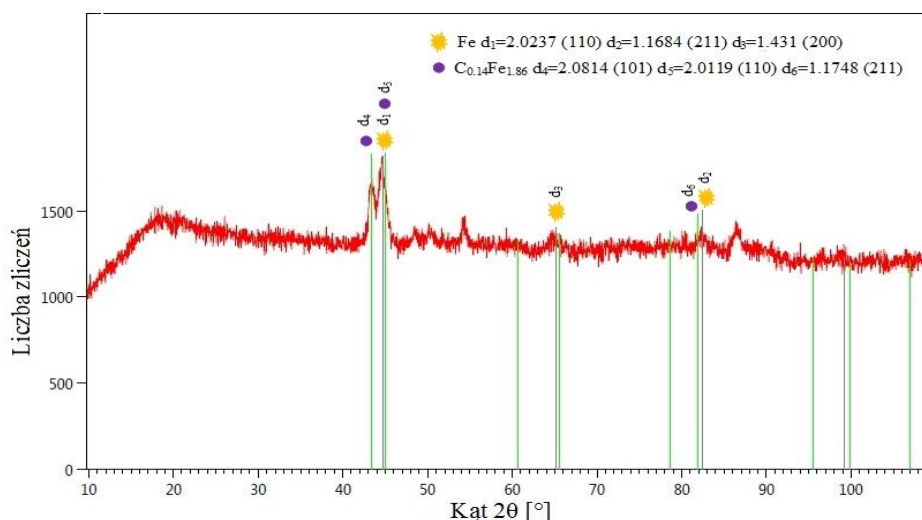
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

niewielkich pęknięć i nieciągłości (rys. 6.65b), co sprzyja wzrostowi gęstości dyslokacji. Przemierzające się dyslokacje zostają zatrzymane, gdy na swojej drodze spotykają przeszkody, np. inne dyslokacje, granice ziarn lub wydzielienia cementytu. Wzrost gęstości dyslokacji powoduje efekt umocnienia materiału.



Rys. 5.65. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 1143$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$): a) obszar krawędzi, b) obszar wpływu obróbki nagniataniem

Uderzenia kulek w powierzchnię obrabianą powodują usunięcie cienkiej warstewki tlenkowej, powstałej na powierzchni wycinanego elementu. Elementy nagniatające pozostające w przerywanym kontakcie z przedmiotem obrabianym powodują „zbijanie” i „ścianianie” faz tlenkowych (rys. 5.66). Po obróbce na powierzchni obrobionej występuje jedynie ferryt i martenzyt (tabela 5.9).



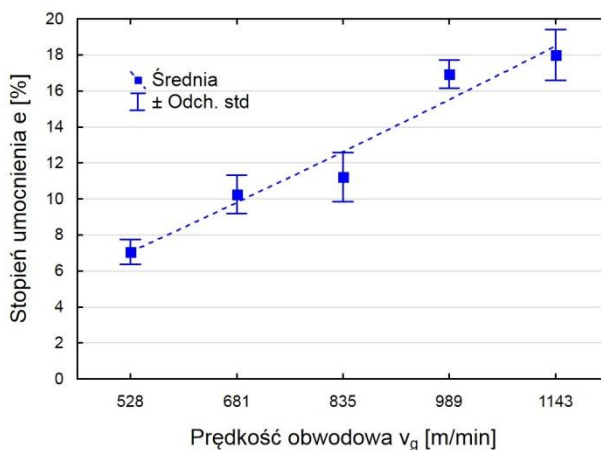
Rys. 5.66. Dyfraktogram otrzymany po analizie powierzchni próbki stali C45 po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym z dopasowanymi refleksami teoretycznymi ($v_g = 989$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 3$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Tabela 5.9. Dane zidentyfikowanych faz na podstawie dyfraktogramu otrzymanego po analizie powierzchni próbki stali C45 po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym

Nr w bazie ICDD PDF – 4+	Wzór chemiczny	Parametry sieci [Å]	Kąty [°]
04-002-1061	Fe – α	a=b=c=2.862	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
00-044-1289	C _{0.14} Fe _{1.86}	a=b=2.846 c=3.053	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$

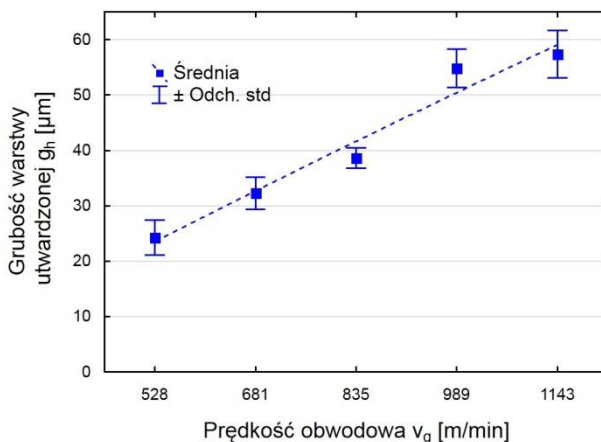
Zmiany twardości warstwy wierzchniej stali C45 po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym uzależnione są od parametrów technologicznych obróbki. Na rysunku 5.67 przedstawiono wpływ prędkości obwodowej głowicy v_g na stopień umocnienia. Wzrost prędkości obwodowej powoduje zwiększenie energii zderzenia i wzrost liczby uderzeń przypadających na jednostkę powierzchni, co przekłada się na większy udział odkształceń plastyczno-sprężystych w obrabianym elemencie.



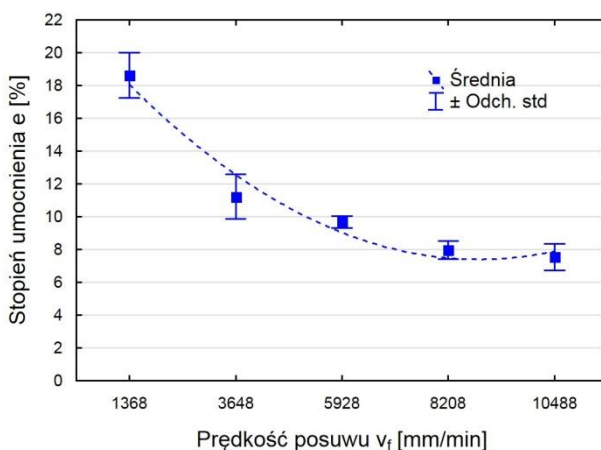
Rys. 5.67. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia v_g na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Grubość warstwy utwardzonej g_n wskutek nagniatania odśrodkowego wynosi od 25 μm do 59 μm dla danego zakresu v_g (rys. 5.68). Największe zmiany twardości występują tuż przy powierzchni obrabianej, gdzie występują najbardziej odkształcone ziarna.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



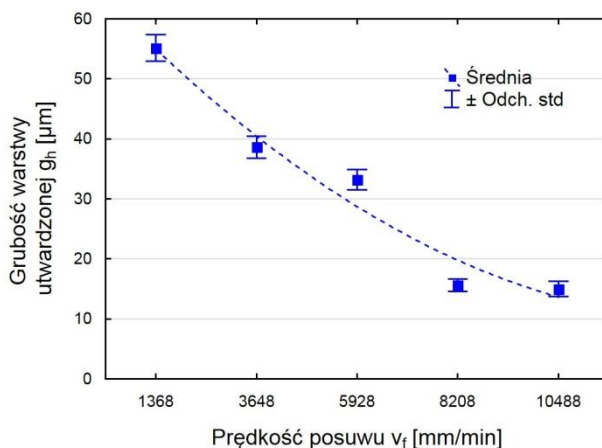
Rys. 5.68. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia v_g na grubość warstwy utwardzonej g próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)



Rys. 5.69. Wpływ prędkości posuwu v_f na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

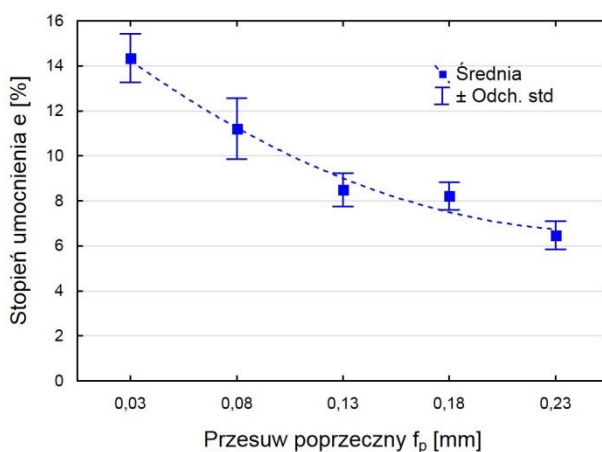
Rysunek 5.69 przedstawia wpływ prędkości posuwu v_f na stopień umocnienia e . Wzrost wartości analizowanego parametru powoduje zmniejszenie stopnia pokrycia powierzchni obrabianej. Ślady obróbkowe pojawiają się w większej odległości, co skutkuje nierównomierną deformacją obrabianej powierzchni. Głębokość zachodzących zmian wynosi od $55 \mu\text{m}$ do $15 \mu\text{m}$ dla danego zakresu v_f . Przy małej wartości prędkości posuwu liczba uderzeń przypadających na jednostkę powierzchni jest większa, co wpływa na zwiększenie grubości warstwy utwardzonej (rys. 5.70).

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.70. Wpływ prędkości posuwu v_f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

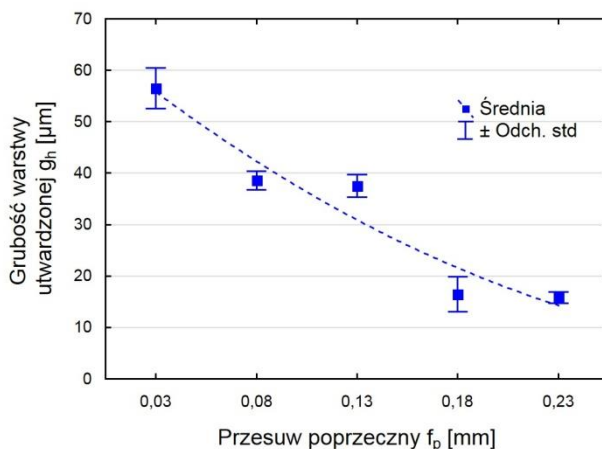
Zwiększenie przesuwu poprzecznego f_p powoduje spadek stopnia umocnienia e warstwy wierzchniej (rys. 5.71).



Rys. 5.71. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

Zgodnie z przewidywaniami ze wzrostem przesuwu poprzecznego f_p maleje grubość warstwy utwardzonej g_h (rys. 5.72).

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

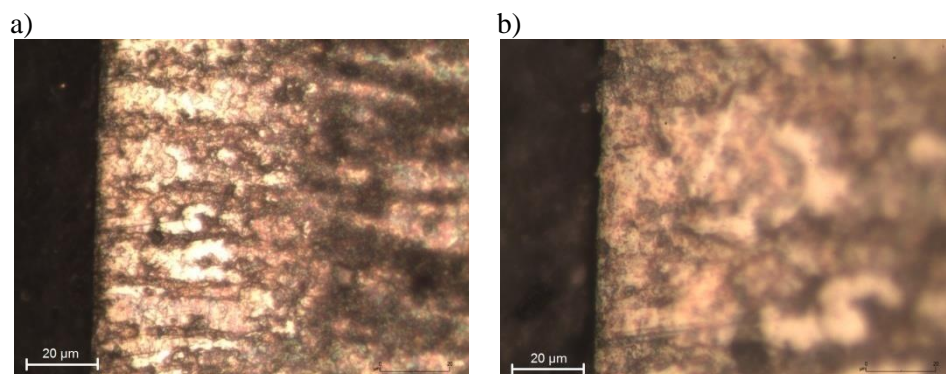


Rys. 5.72. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

Duże wahania stopnia umocnienia e dla poszczególnych zestawów parametrów technologicznych obróbki mogą być spowodowane dużymi różnicami mikrotwardości warstwy powstałej po cięciu laserem. Oznacza to obecność warstwy trudnoobrabialnej.

5.2.5. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym

Rysunek 5.73 przedstawia strukturę materiału powstałą w wyniku cięcia laserem, frezowania wykończeniowego i nagniatania odśrodkowego. Zrealizowana obróbka skrawaniem pozwoliła na usunięcie części warstewki utwardzonej



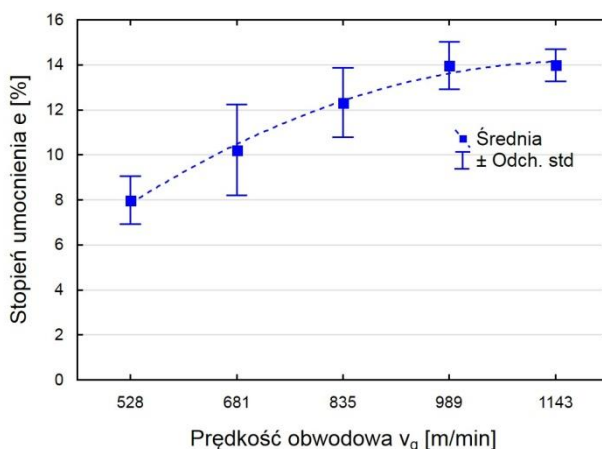
Rys. 5.73. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 1143$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$): a) obszar wpływu zastosowanej technologii oraz materiał rdzenia, b) obszar w pobliżu krawędzi

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

powstałej po cięciu laserem. Po nagniataniu odśrodkowym przy powierzchni powstała niewielka strefa o zmienionej strukturze (rys. 5.73b). Jej szerokość wynosi około 10 μm .

Zmiany twardości oraz głębokość zachodzących zmian pozostają w jednoznacznej współzależności z parametrami technologicznymi nagniatania odśrodkowego.

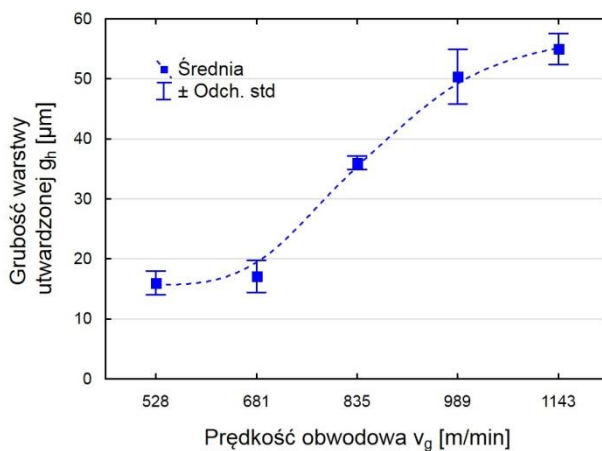
Na rysunku 5.74 przedstawiono wpływ prędkości obwodowej v_g na stopień umocnienia e . W zakresie $v_g = 528\div 835$ m/min stopień umocnienia wzrasta w miarę zwiększania prędkości obwodowej narzędzia. Zastosowanie większych prędkości nagniatania odśrodkowego, powyżej $v_g = 989$ m/min, powoduje zauważalne zmniejszenie przyrostu twardości. Może być to spowodowane występowaniem zjawiska „przesycenia energetycznego”. Głębokość zachodzących zmian wynosi od 16 μm do 55 μm dla danego zakresu v_g (rys. 5.75).



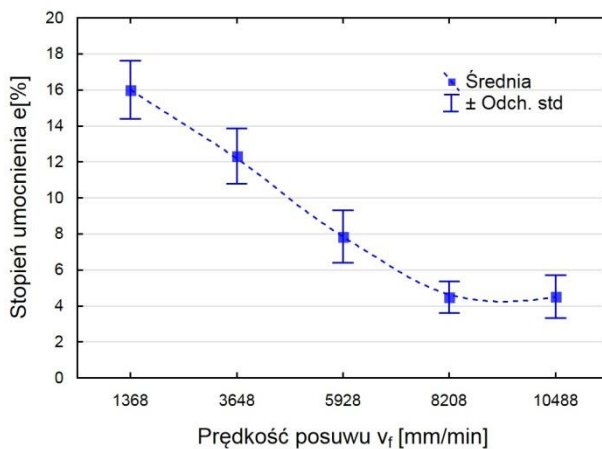
Rys. 5.74. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia v_g na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Zmniejszenie liczby uderzeń kulek na jednostkę powierzchni, wskutek zwiększenia prędkości posuwu przekłada się na nierównomierny zgniot w warstwie wierzchniej, co ma decydujący wpływ na spadek wskaźnika stopnia umocnienia e (rys. 5.76) oraz grubości warstwy utwardzonej g_h (rys. 5.77). Od prędkości posuwu większych od $v_f = 5928$ mm/min zmiany grubości warstwy utwardzonej g_h oraz stopnia umocnienia e są minimalne.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

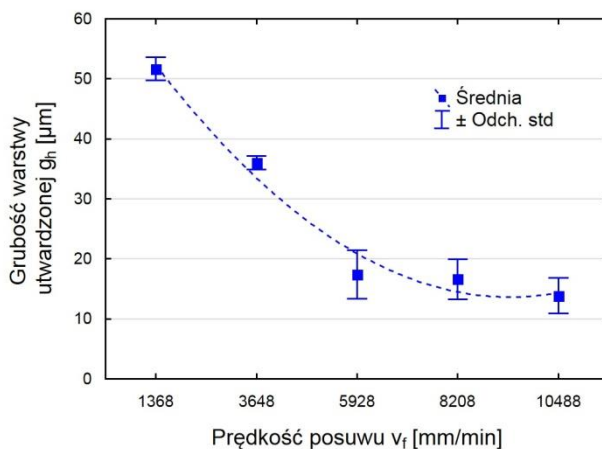


Rys. 5.75. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia v_g na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)



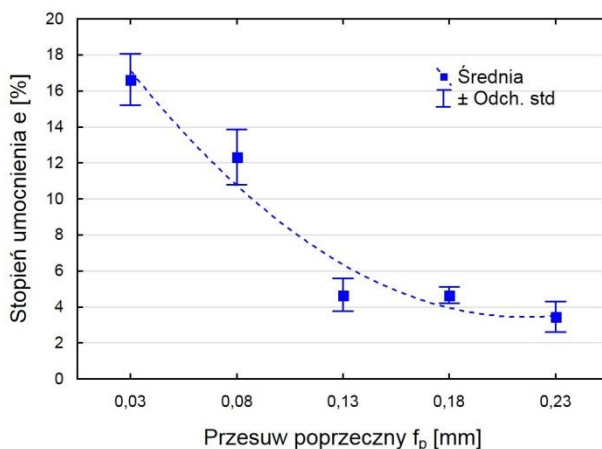
Rys. 5.76. Wpływ prędkości posuwu v_f na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



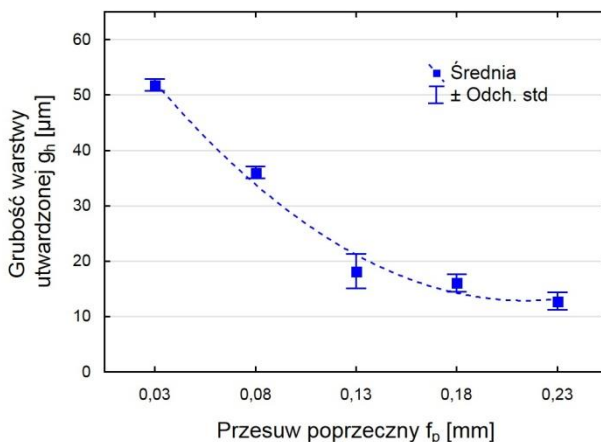
Rys. 5.77. Wpływ prędkości posuwu v_f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

W przypadku badań wpływu przesuwu poprzecznego f_p na mikrotwardość w zakresie $f_p = 0,03 \div 0,13$ mm widoczny jest wyraźny spadek przyrostu twardości z równoczesnym spadkiem grubości warstwy utwardzonej (rys. 5.78 i rys. 5.79). Natomiast od $f_p = 0,18$ mm następuje wyraźne zahamowanie spadku grubości warstwy utwardzonej oraz stopnia umocnienia.



Rys. 5.78. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

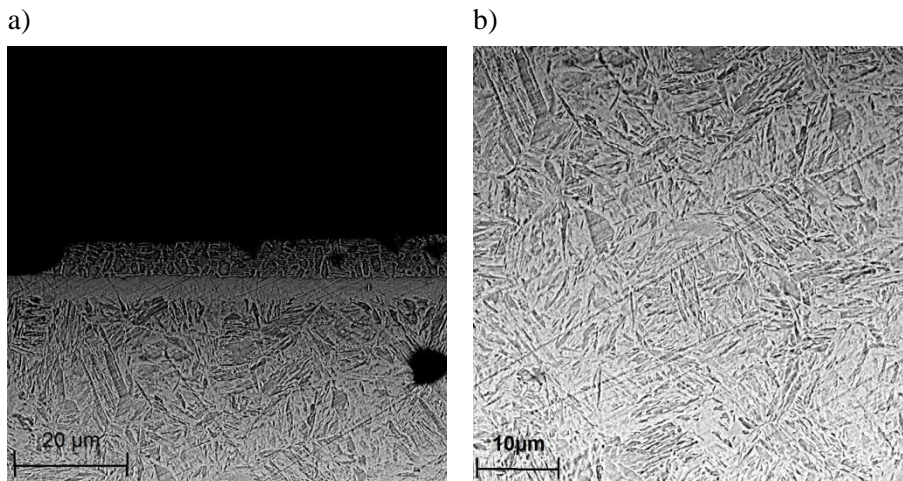
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.79. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

5.2.6. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu tocznym

Warstwa wierzchnia po nagniataniu tocznym stanowi zbiór plastycznie odkształconych kryształów. W związku z tym następują zmiany twardości oraz zmiany strukturalne materiału.



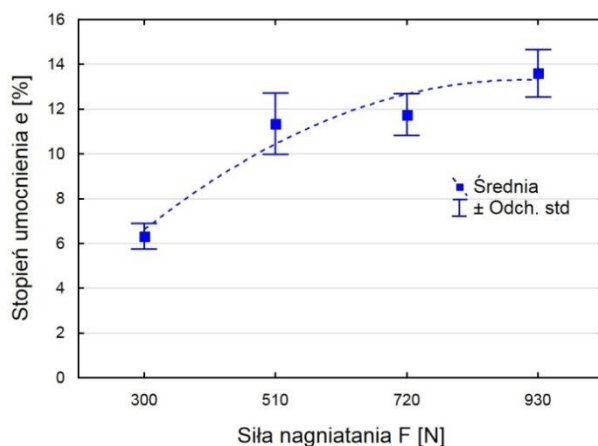
Rys. 5.80. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem i nagniataniu tocznym ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$, $d_N = 8$ mm): a) obszar wpływu obróbki oraz materiał rdzenia, b) obszar wpływu obróbki

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

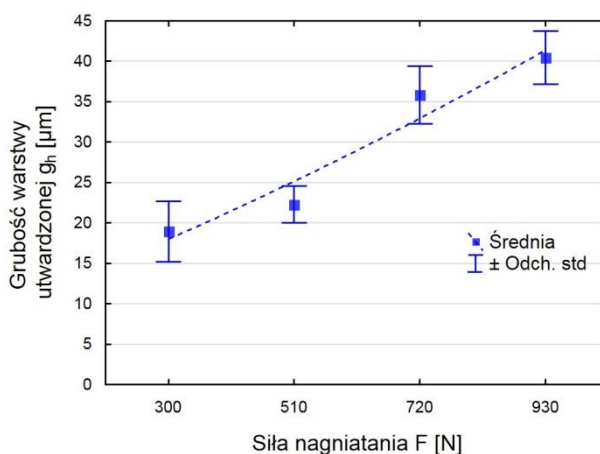
Na rysunku 5.80a przedstawiono mikrostrukturę powstałą na skutek cięcia laserem i nagniatania tocznego. W strefie przykrawędziowej, której mikrotwardość HV 0,01 wynosi 731,4 (rys. 5.80b), nastąpiło rozbitcie listew martenzytu na drobniejsze – tzw. fragmentacja. W wyniku kontaktu narzędzia z elementem obrabianym zachodzą zjawiska, które przyczyniają się do defragmentaryzacji strefy przykrawędziowej.

Stopień umocnienia oraz grubość warstwy utwardzonej uzależnione są od warunków obróbki. Na rysunku 5.81 i 5.82 przedstawiono wpływ siły nagniatania na stopień umocnienia e oraz głębokość zachodzących zmian twardości g_h .

Grubość warstwy utwardzonej wynosi od 18 μm do 40 μm , dla danych warunków obróbki i uzależniona jest od zastosowanej siły nagniatania (rys. 5.82).



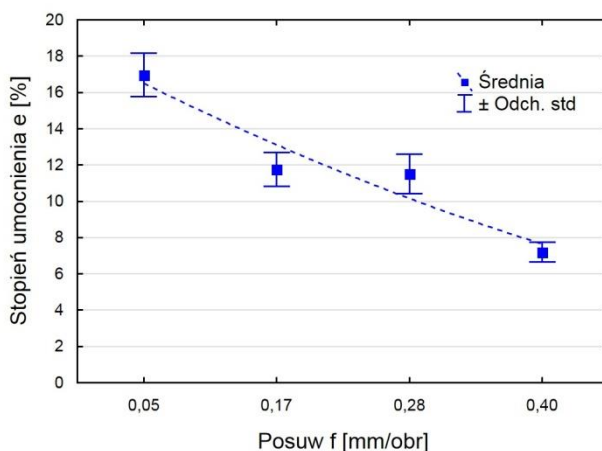
Rys. 5.81. Wpływ siły nagniatania F na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)



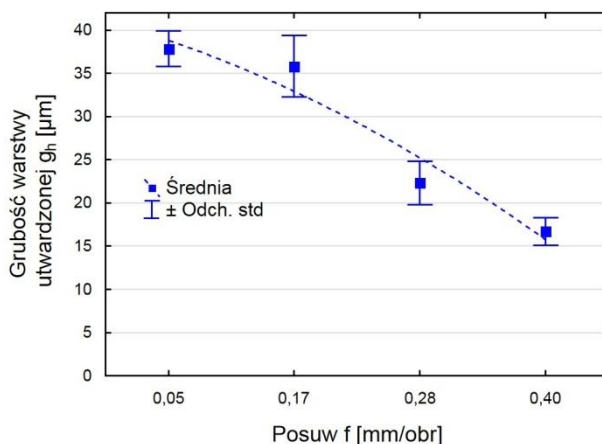
Rys. 5.82. Wpływ siły nagniatania F na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Zmiana posuwu nagniatania powoduje przyrost twardości od 8% do 17% w zależności od zastosowanej wartości analizowanego parametru (rys. 5.83), natomiast grubość warstwy utwardzonej wynosi od 17 μm do 38 μm (rys. 5.84). Niewielki przyrost twardości oraz mała głębokość zachodzących zmian mogą być spowodowane występowaniem struktury matrenzytycznej, która należy do struktur średnio podatnych na obróbkę poprzez zgniot [101].



Rys. 5.83. Wpływ posuwu nagniatania f na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720 \text{ N}$, $d_N = 8 \text{ mm}$, $i = 1$)



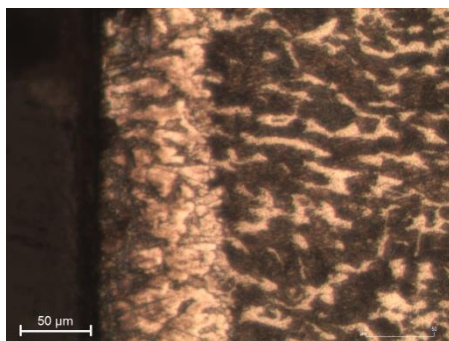
Rys. 5.84. Wpływ posuwu f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720 \text{ N}$, $d_N = 8 \text{ mm}$, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

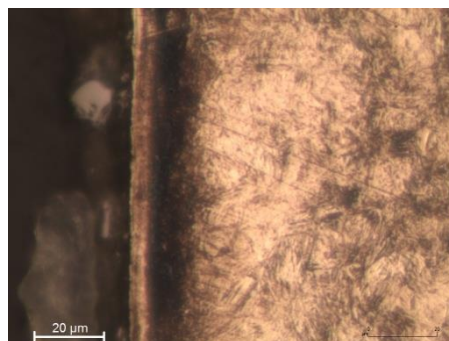
5.2.7. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym

Obróbka frezowaniem wykończeniowym i nagniataniem tocznym powoduje przemiany strukturalne warstwy wierzchniej (rys. 5.85). Na skutek silnego tarcia, które powoduje nagrzanie się powierzchni obrabianej, struktura, powstała po obróbce poprzedzającej, uległa dodatkowemu odpuszczaniu. Powoduje to obniżenie twardości (ok. 480 HV 0,01 tuż przy powierzchni obrabianej). Należy ją sklasyfikować jako martenzyt odpuszczony.

a)



b)



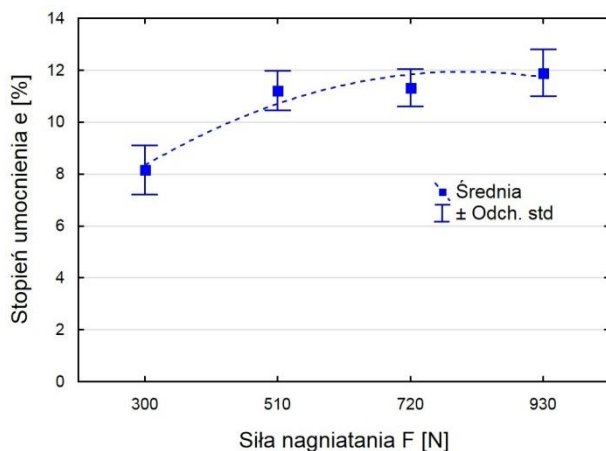
Rys. 5.85. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$, $d_N = 8$ mm):

a) obszar wpływu obróbki oraz materiał rdzenia, b) obszar wpływu obróbki

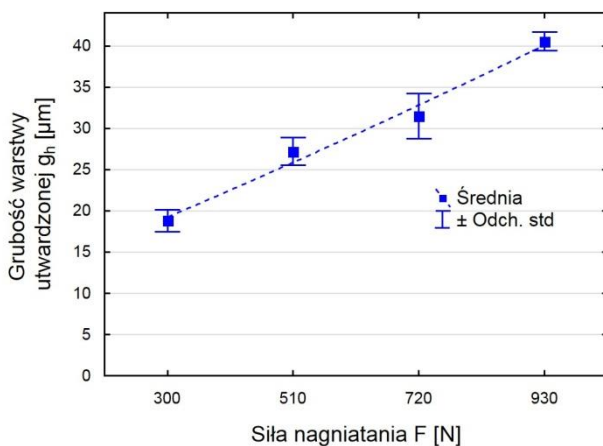
Wpływ czynników wejściowych (siły nagniatania i posuwu) na stopień umocnienia i grubość warstwy utwardzonej przedstawiono na rysunkach 5.86÷5.89.

Wzrost siły nagniatania prowadzi do zwiększania energii zgniotu, która akumulowana powoduje wzrost twardości obszarów przypowierzchniowych (rys. 5.86). Głębokość warstwy utwardzonej zmienia się w granicach od 18 μm do 40 μm dla danego zakresu sił (rys. 5.87). Większe zmiany stopnia umocnienia e i grubości warstwy utwardzonej g_h widoczne są dla siły z zakresu 300÷510 N. Powyżej $F = 510$ N wyraźnie maleje wpływ analizowanego parametru technologicznego na stopień umocnienia i grubość warstwy utwardzonej, występuje stan nasycenia.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



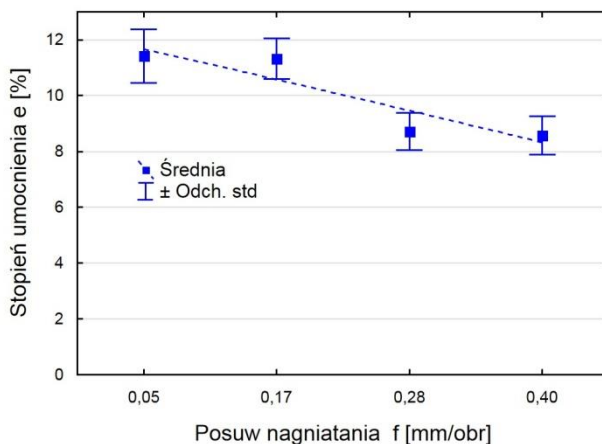
Rys. 5.86. Wpływ siły nagniatania F na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)



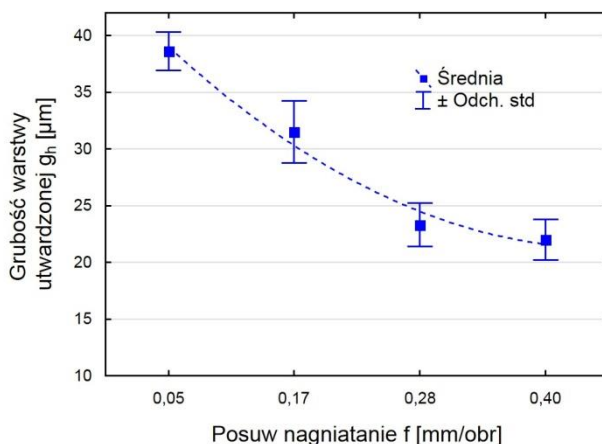
Rys. 5.87. Wpływ siły nagniatania F na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

Wzrost posuwu nagniatania oznacza zwiększenie odległości między kolejnymi śladami kulki toczącej się po powierzchni obrabianej. Prowadzi to zatem do spadku jednorodności strukturalnej, co przekłada się na spadek stopnia umocnienia (rys. 5.88) i grubości warstwy utwardzonej (rys. 5.89).

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.88. Wpływ posuwu nagniatania f na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)



Rys. 5.89. Wpływ posuwu nagniatania f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

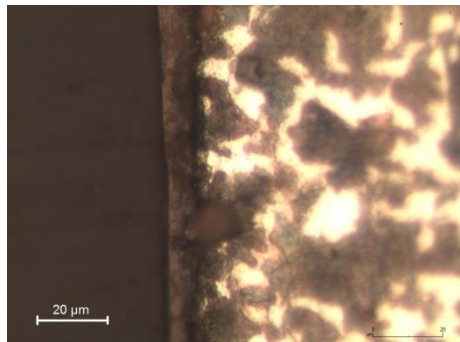
5.2.8. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy wierzchniej po frezowaniu i nagniataniu odśrodkowym przedmiotów nie wycinanych laserem

W wyniku zrealizowanej obróbki nagniataniem odśrodkowym nastąpiła przebudowa struktury stali C45 po procesie frezowania próbek nie wycinanych laserem (rys. 5.90). Ziarna zostają do pewnej głębokości spłaszczone i wyciągnięte w kierunku równoległym do powierzchni i ruchu narzędzia. W strefie zgniezionej wzrasta gęstość dyslokacji, co powoduje nagromadzenie dużej energii odkształcenia. Powstające dyslokacje blokują się na granicach ziaren, co

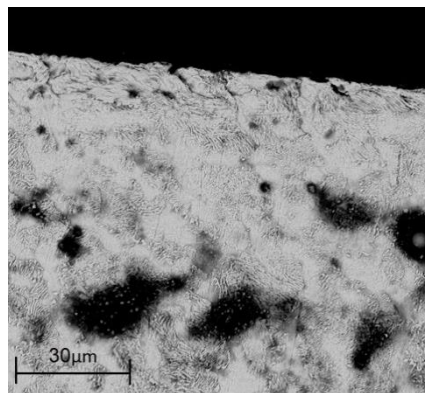
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

przyczynia się do wzrostu twardości. Powstała struktura posiada drobne ziarna, jest to tzw. „struktura mozaikowa”.

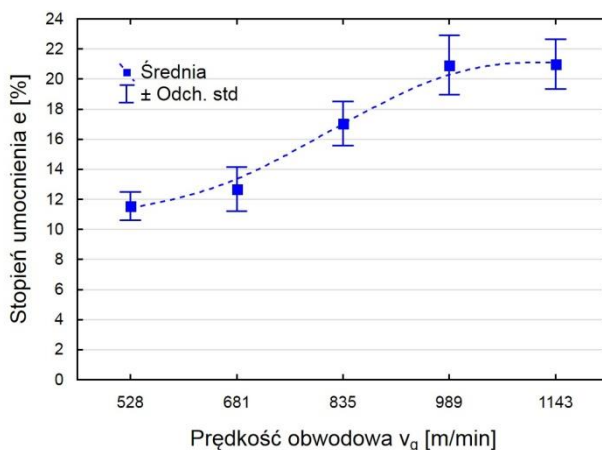
a)



b)



Rys. 5.90. Mikrostruktura stali C45 nie wycinanej laserem, frezowanej i nagniatanej odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 1368$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$):
a) strefa wpływu obróbki i rdzeń, b) strefa wpływu obróbki

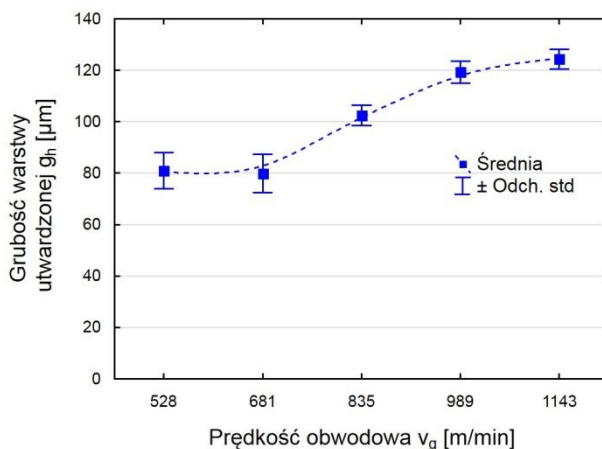


Rys. 5.91. Wpływ prędkości obwodowej v_g na stopień umocnienia e próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

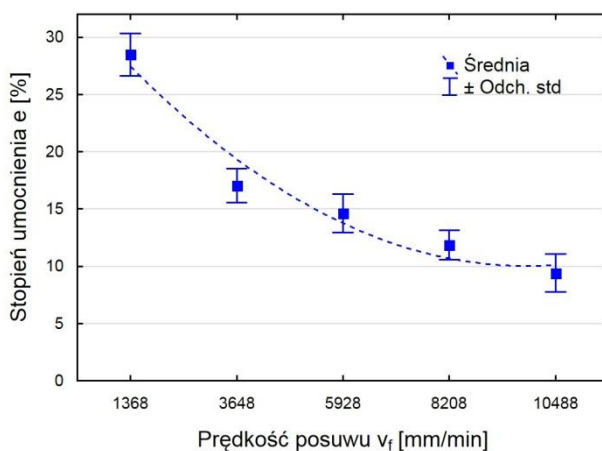
Nagniatanie odśrodkowe, poza aspektem ukształtowania struktury geometrycznej powierzchni, powoduje również powierzchniowe umocnienie.

Wzrost prędkości obwodowej v_g przekłada się na wzrost stopnia umocnienia (rys. 5.91). Największe zmiany twardości występują w zakresie $v_g = 528 \div 835$ m/min. Grubość warstwy utwardzonej wynosi od 81 μm do 125 μm dla badanego zakresu v_g (rys. 5.92).

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



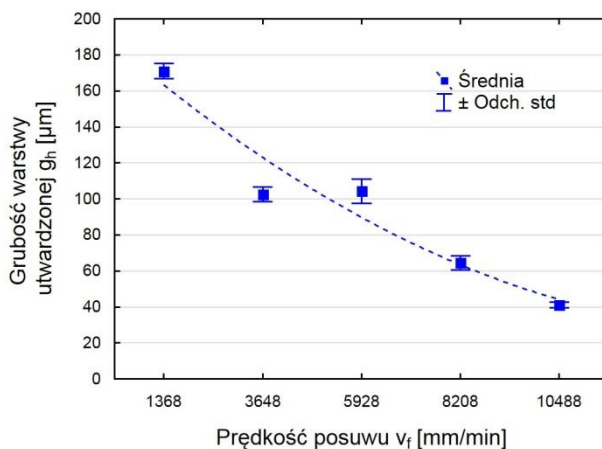
Rys. 5.92. Wpływ prędkości obwodowej v_g na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)



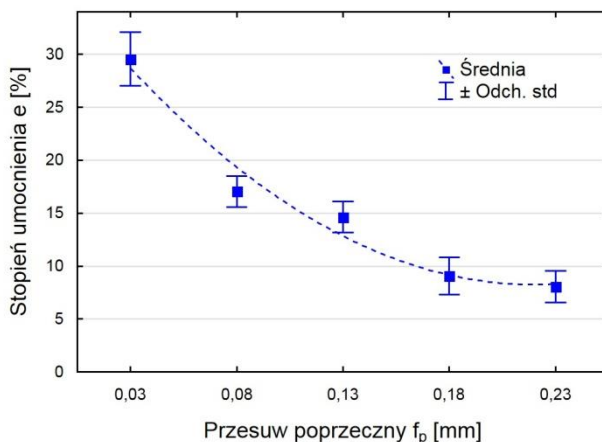
Rys. 5.93. Wpływ prędkości posuwu v_f na stopień umocnienia e próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Wzrost prędkości posuwu v_f (rys. 5.93 i 5.94) oraz przesuwu poprzecznego f_p (rys. 5.95 i 5.96) powoduje obniżenie intensywności oddziaływania kulek nagniatających na powierzchnię obrabianą, co wiąże się ze zmniejszeniem stopnia umocnienia e i grubości warstwy utwardzonej g_h .

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



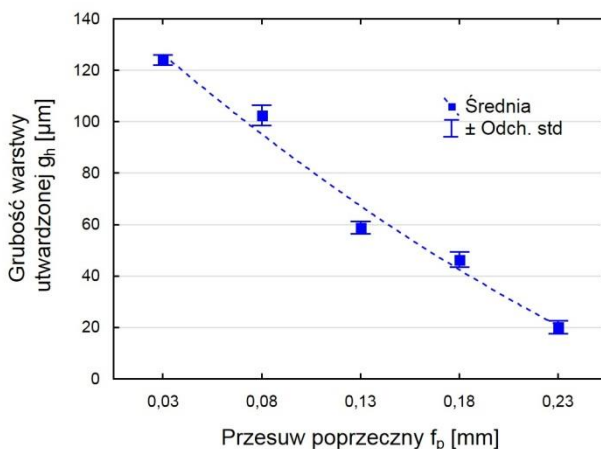
Rys. 5.94. Wpływ prędkości posuwu v_f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)



Rys. 5.95. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na stopień umocnienia e próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

Dla $v_f = 1368$ mm/min i $f_p = 0,03$ mm uzyskano najwyższe wartości stopnia umocnienia i grubości warstwy utwardzonej w zakresie warunków realizowanego eksperymentu. Grubość warstwy utwardzonej dla zmiennej prędkości posuwu wynosi od 41 μm do 171 μm dla badanego zakresu v_f (rys. 5.94).

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.96. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

Analizując wpływ przesuwu poprzecznego f_p można zauważyć, że w zakresie $f_p = 0,13 \div 0,18$ mm zmiana analizowanego parametru w większym stopniu wpływa na grubość warstwy utwardzonej (rys. 5.96) niż stopnia umocnienia (rys. 5.95).

5.2.9. Podsumowanie badań mikrostruktury i mikrotwardości

Podczas cięcia laserem, w wyniku oddziaływania termicznego wiązki, dochodzi do umocnienia strefy przykrawędziowej. Szerokość strefy wpływu ciepła wynosi około 0,3 mm. Powstaje struktura martenzytyczna. Tlen jako gaz towarzyszący cięciu laserem powoduje reakcje utleniania, co skutkuje obecnością faz tlenkowych Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , $Fe_{0,9}O$ na powierzchni przecinanej.

Nagniatanie odśrodkowe powierzchni po cięciu laserem powoduje umocnienie obszarów przykrawędziowych. Zmiany grubości warstwy utwardzonej sięgają od 15 μm do 63 μm w zależności od parametrów obróbki, a przyrost twardości wynosi od 7% do 19%. Równocześnie następstwem przeprowadzonej obróbki jest usunięcie faz tlenkowych. Na powierzchni obrabianej występuje jedynie żelazo i martenzyt.

Nagniatanie toczne powierzchni po cięciu laserem powoduje mniejszy przyrost twardości i głębokości zachodzących zmian twardości niż nagniatanie odśrodkowe. Zmiany twardości sięgają maksymalnie do 40 μm , a przyrost twardości w odniesieniu do powierzchni po cięciu laserem wynosi od 6% do 17%. Podczas obróbki następuje również zjawisko defragmentaryzacji strefy przykrawędziowej.

Frezowanie wykończeniowe elementów po cięciu laserem powoduje usunięcie części warstewki utwardzonej, jednak w wyniku mechanicznego oddziały-

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

wania ostrzy skrawających narzędzia następuje umocnienie warstwy wierzchniej. Zmiany te są niewielkie, ale powodujące przyrost twardości.

Obróbka nagniataniem odśrodkowym elementów ukształtowanych poprzez cięcie laserem oraz frezowanie wykończeniowe powoduje zmiany twardości sięgające maksymalnie do 55 μm , a przyrost twardości wynosi do 17% w odniesieniu do obróbki poprzedzającej. W przypadku obróbki nagniataniem tocznym próbek po cięciu laserem oraz frezowaniu wykończeniowym zmiany twardości sięgają maksymalnie do 40 μm , a wzrost twardości wynosi do 12%. W wyniku obróbki powstaje martenzyt odpuszczony

Frezowanie wykończeniowe przedmiotów wycinanych laserem powoduje usunięcie części warstwy wierzchniej o największej mikrotwardości, jednakże sam proces frezowania przyczynia się do zwiększenia mikrotwardości warstwy wierzchniej, a nagniatanie wpływa na dalszy wzrost mikrotwardości tej warstwy. Można zatem uznać, że łączna obróbka skrawaniem i nagniataniem przedmiotów wycinanych laserem korzystnie wpływa na stopień umocnienia warstwy wierzchniej. Natomiast usunięcie części warstwy utwardzonej, w procesie cięcia laserem powoduje, że skutkiem łącznego skrawania i nagniatania jest zmniejszenie grubości warstwy utwardzonej.

Największe zmiany twardości uzyskane zostały podczas nagniatania odśrodkowego próbek ze stali C45 nie wycinanych laserem, a jedynie frezowanych. Frezowanie, jako obróbka poprzedzająca powoduje wydłużenie ziaren struktury, co w konsekwencji przekłada się na niewielki przyrost twardości. Oddziaływanie kulek nagniatających powoduje spłaszczenie ziaren. Grubość warstwy utwardzonej maksymalnie wynosi około 170 μm , a stopień umocnienia e około 30%. Zmiany twardości oraz grubości warstwy utwardzonej są maksymalnie 3-krotnie większe niż dla próbek wycinanych laserem oraz wycinanych laserem i frezowanych wykończeniowo i zależą od warunków obróbki. Uzyskane różnice wartości stopnia umocnienia i grubości warstwy utwardzonej, świadczą o wpływie stanu warstwy wierzchniej przedmiotów wycinanych laserem na efekty obróbki nagniataniem.

5.3. Naprężenia własne

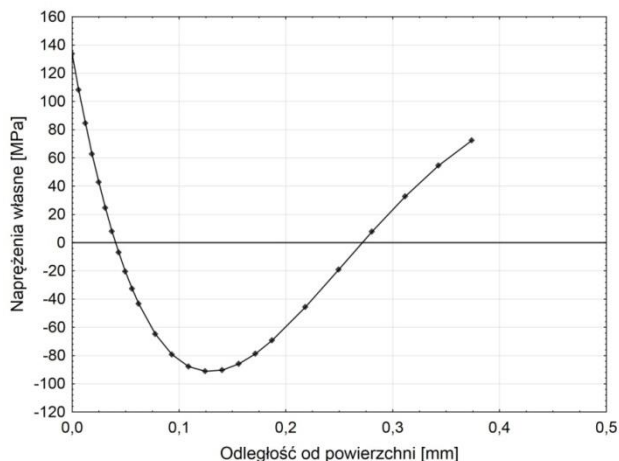
Stan naprężeń własnych ukształtowany podczas przeprowadzonej obróbki wpływa na właściwości użytkowe elementów maszyn. Zewnętrzne oddziaływania na materiał zakłócają budowę sieci krystalicznej, powodują przemieszczanie się atomów. Po odciążeniu tylko część atomów wraca do swojego pierwotnego położenia, natomiast reszta pozostaje w stanie przesuniętym, powodując zmiany naprężeń własnych w materiale warstwy wierzchniej [3, 162].

5.3.1. Naprężenia własne po cięciu laserem przedmiotów

Procesowi cięcia laserem towarzyszy zjawisko powtórnego krzepnięcia roztopionego materiału, które przebiega w niestabilnych warunkach. Sprzyja to

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

powstawaniu rozciągających naprężeń własnych, które zalegają na głębokości około 0,05 mm od powierzchni wycinanego elementu (rys. 5.97).

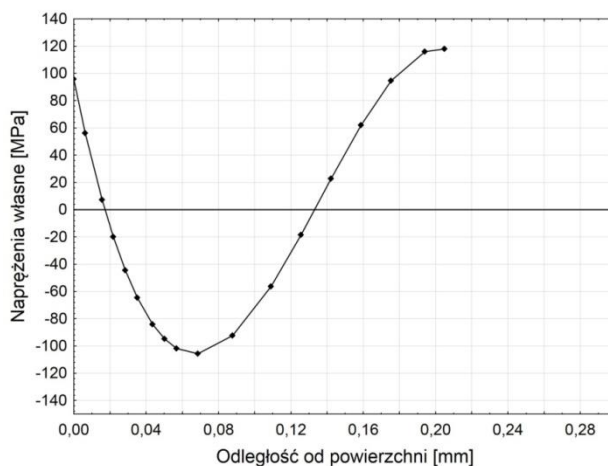


Rys. 5.97. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem

Obecność naprężeń rozciągających należy tłumaczyć również przemianami fazowymi i strukturalnymi występującymi podczas cięcia.

5.3.2. Naprężenia własne po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym przedmiotów

W wyniku oddziaływania mechanicznego ostrzy skrawających na przedmiot obrabiany oraz ciepła dostarczonego do strefy obróbki w warstwie wierzchniej wytworzony zostaje rozciągająco-ściskający stan naprężeń własnych (rys. 5.98).



Rys. 5.98. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i frezowanych wykończeniowo

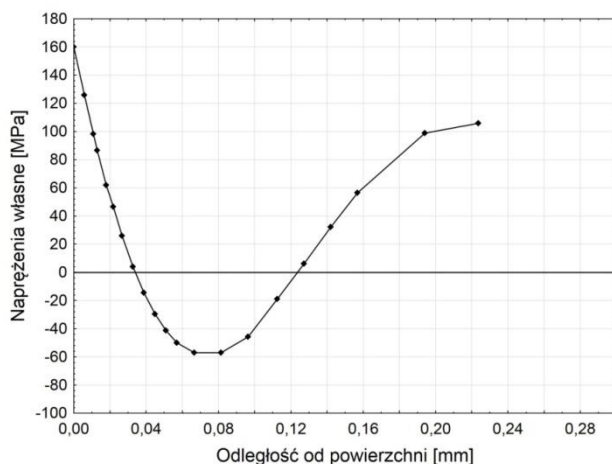
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Wiadomo, że oddziaływaniu ostrzy skrawających towarzyszy wytworzenie pól naprężeń ściskających (przed ostrzem) i rozciągających (za ostrzem) [39]. Ciepło pochodzące od tarcia powierzchni roboczych narzędzia o przedmiot obrabiany konstytuuje rozciągający stan naprężeń własnych. Ponieważ udział zjawisk cieplnych jest dominujący, do głębokości 0,02 mm powstają naprężenia rozciągające, które następnie zmieniają znak na ściskające.

Powstałe naprężenia ściskające zalegają do głębokości około 0,13 mm, a na głębokości 0,07 mm osiągają wartość około -100 MPa.

5.3.3. Naprężenia własne po frezowaniu przedmiotów nie wycinanych laserem

W wyniku obróbki frezowaniem w warstwie przypowierzchniowej do głębokości ok. 0,04 mm zalegają naprężenia rozciągające, które następnie przekształcają się w naprężenia ściskające zalegające do głębokości ok. 0,12 mm (rys. 5.99). Podczas frezowania siła tarcia jest przeciwna do kierunku skrawania. Powoduje to „rozciąganie” strefy przypowierzchniowej warstwy wierzchniej. Po przejściu ostrzy skrawających narzędzia rozciągnięta sprężyste strefa usiłuje powrócić do stanu wyjściowego, napotyka jednak na opór ze strony odkształconych stref i powoduje powstanie ściskających naprężeń własnych.



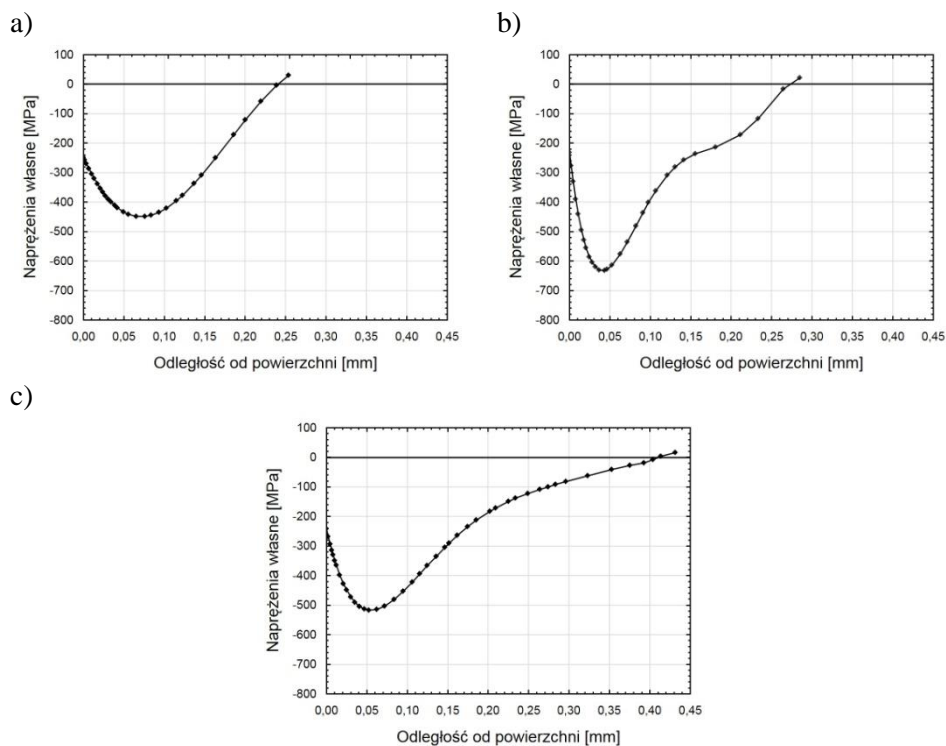
Rys. 5.99. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek nie wycinanych laserem, frezowanych ($v_c = 102$ m/min, $f_z = 0,067$ mm/ostrze, $a_p = 0,12$ mm)

5.3.4. Naprężenia własne po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym przedmiotów

Na rysunkach 5.100÷5.102 przedstawiono rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni przy zmiennych parametrach technologicznych obróbki. W wyniku przeprowadzonej obróbki dla wszystkich warunków obróbki ukonstytuowany został ściskający stan naprężeń własnych.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Na rysunku 5.100 przedstawiono wpływ prędkości obwodowej na rozkład naprężeń własnych. Największe ściskające naprężenia własne znajdują się na głębokości $0,05 \div 0,1$ mm od powierzchni obrabianej, osiągając wartości do około -620 MPa. Wzrost energii uderzenia powoduje, że ściskające naprężenia własne zalegają na większych głębokościach, do około 0,4 mm (dla $v_g = 1143$ m/min).

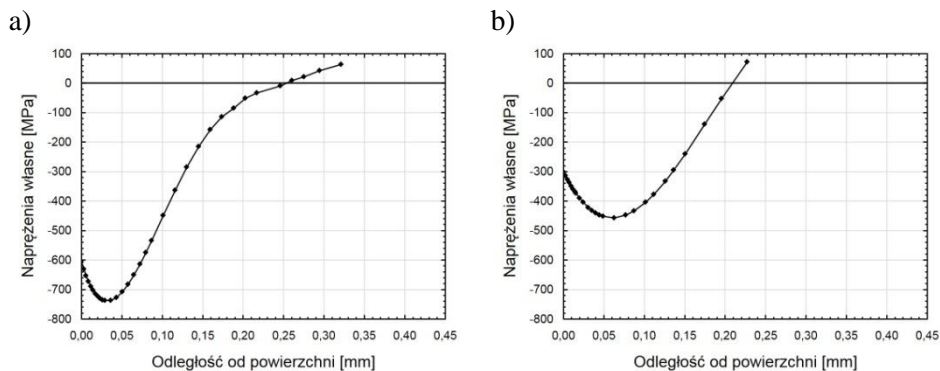


Rys. 5.100. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości obwodowej v_g ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$): a) $v_g = 528$ m/min, b) $v_g = 835$ m/min, c) $v_g = 1143$ m/min

Wzrost prędkości posuwu przekłada się na mniejsze odkształcenia plastyczne, powoduje to zmniejszenie wartości ściskających naprężeń własnych (rys. 5.101). Głębokość zalegania największych naprężeń ściskających znajduje się w podobnej odległości od powierzchni obrabianej. Dla większej prędkości posuwu ($v_f = 10488$ mm/min) widoczne jest wyraźne zmniejszenie ściskających naprężeń własnych.

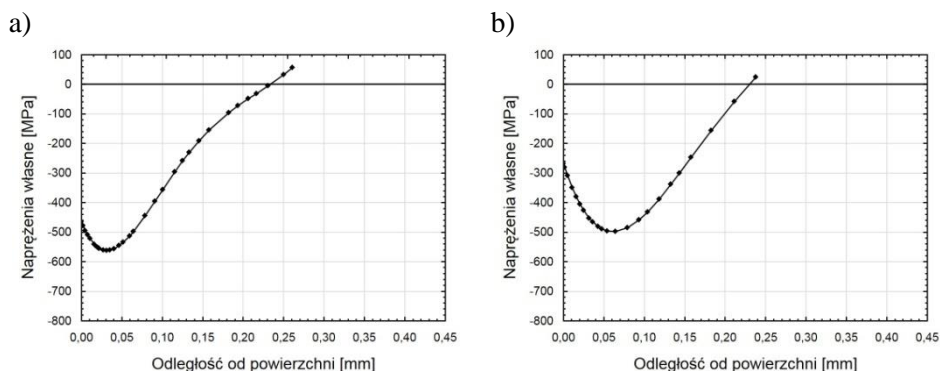
Na rysunku 5.102 przedstawiono wpływ przesuwu poprzecznego f_p na rozkład naprężeń własnych. Wzrost przesuwu poprzecznego f_p powoduje powstanie naprężeń ściskających o mniejszych wartościach i zalegających bliżej powierzchni obrabianej.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.101. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości posuwu v_f ($v_g = 835$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$): a) $v_f = 1368$ mm/min, b) $v_f = 10488$ mm/min

Występowanie naprężeń o niższych wartościach należy tłumaczyć mniejszym udziałem przemian fazowych, co potwierdza zmiana mikrotwardości w funkcji analizowanego parametru.



Rys. 5.102. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennym przesuwie poprzecznym f_p ($v_g = 835$ mm/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$): a) $f_p = 0,03$ mm, b) $f_p = 0,23$ mm

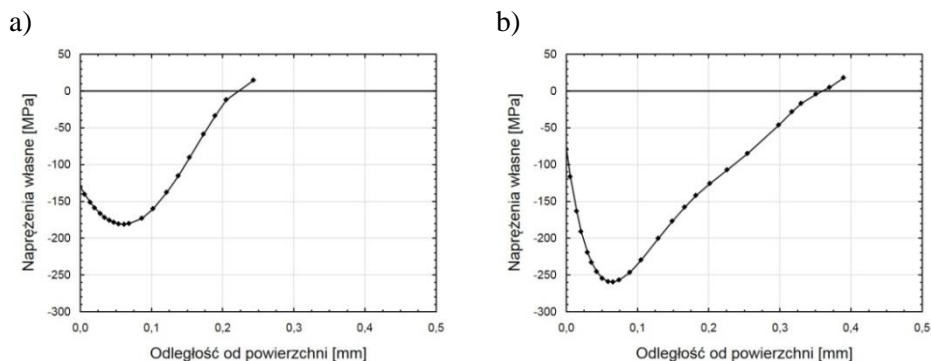
W wyniku nagniatanie odśrodkowego w warstwie wierzchniej powstały ścisnąjące naprężenia własne, co jest istotne ze względu na właściwości użytkowe, np. wzrost odporności na zużycie zmęczeniowe [69]. Szlifowanie, które było stosowane do tej pory jako obróbka wykończeniowa elementów wycinanych laserem powodowało powstawanie w warstwie wierzchniej rozciągających naprężeń własnych [96].

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

5.3.5. Naprężenia własne po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym przedmiotów

W wyniku kontaktowo-ruchowego schematu deformacji [147] występującego podczas nagniatania odśrodkowego uzyskano typowy rozkład naprężeń własnych z bezwzględną wartością maksymalną znajdującą się w pewnej odległości od powierzchni.

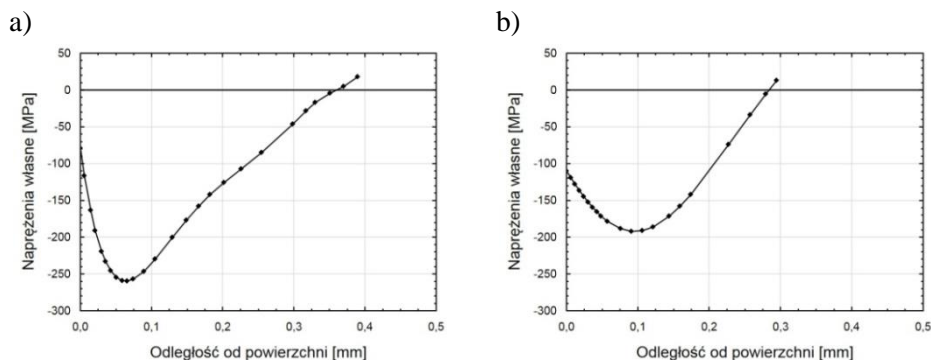
Na rysunku 5.103 przedstawiono wpływ prędkości obwodowej v_g na rozkład



Rys. 5.103. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości obwodowej v_g ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$):
a) $v_g = 528$ m/min, b) $v_g = 989$ m/min

naprężeń własnych dla próbek po frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym. Wzrost analizowanego parametru technologicznego powoduje wzrost wartości bezwzględnej naprężeń własnych oraz głębokości ich zalegania.

Analizując wpływ prędkości posuwu v_f (rys. 5.104) należy zauważyć zmniejszenie wartości bezwzględnej naprężeń własnych oraz głębokości ich zalegania wraz ze wzrostem v_f .

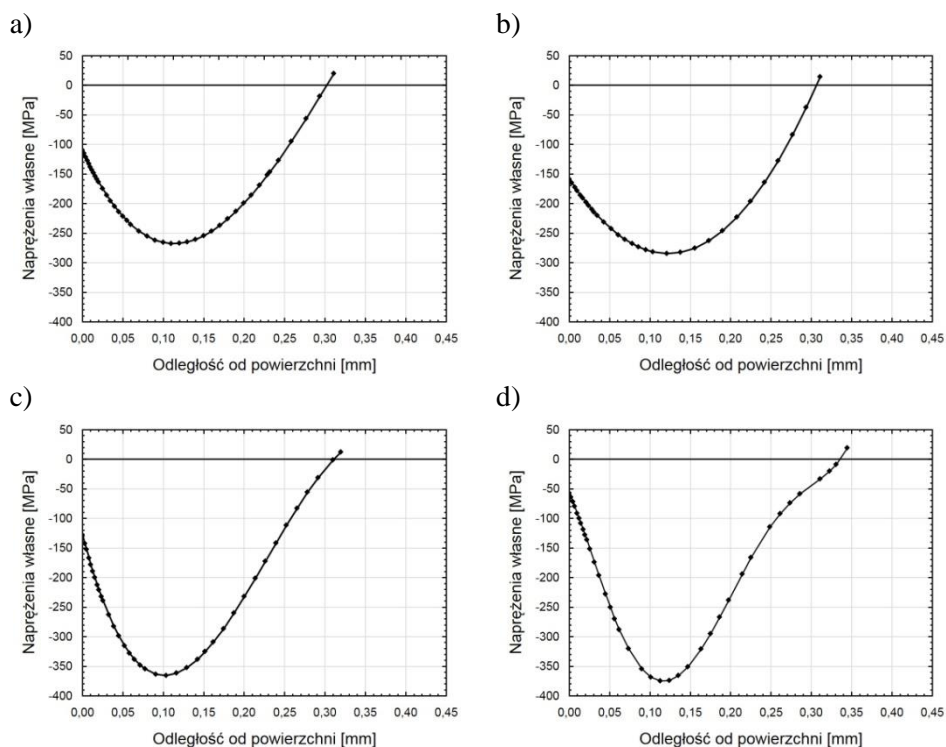


Rys. 5.104. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości posuwu v_f ($v_g = 835$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$):
a) $v_f = 3648$ mm/min, b) $v_f = 8208$ mm/min

5.3.6. Naprężenia własne po cięciu laserem i nagniataniu tocznym przedmiotów

Naprężenia własne powstałe w warstwie wierzchniej zależą od parametrów technologicznych nagniatania oraz właściwości mechanicznych obrabianego materiału.

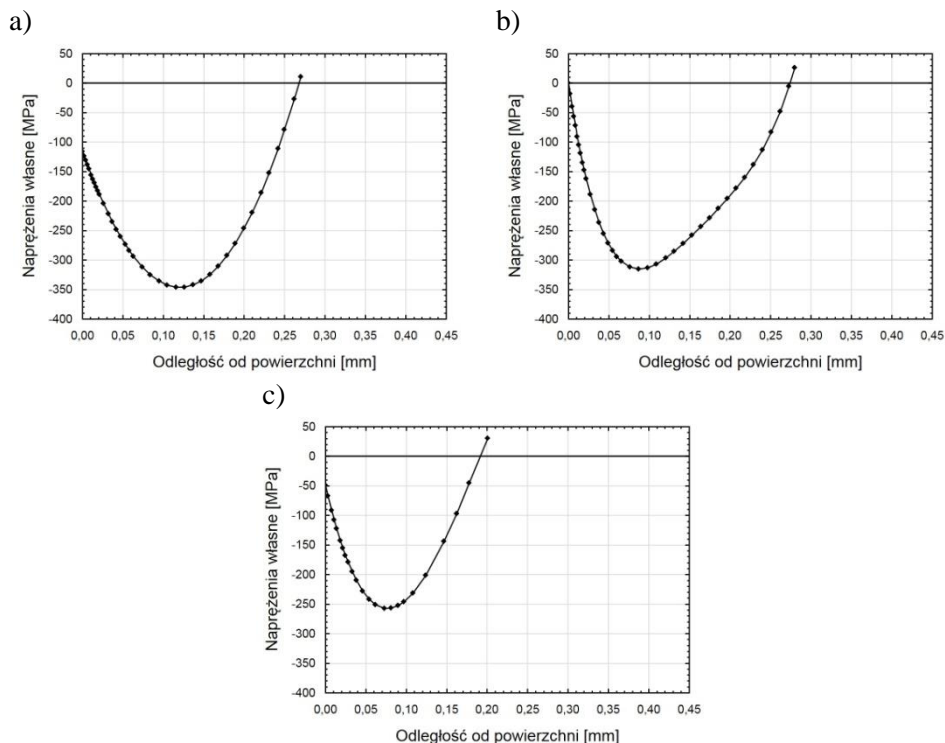
Na rysunku 5.105 przedstawiono wpływ siły nagniatania na rozkład naprężeń własnych. Wzrost siły nagniatania powoduje powstanie naprężeń ściskających o większych wartościach bezwzględnych i zalegających na większych głębokościach, których zmiany dla poszczególnych wartości siły są stosunkowo niewielkie.



Rys. 5.105. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie przy zmiennej sile nagniatania F ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 16$ mm, $i = 1$): a) $F = 300$ N, b) $F = 510$ N, c) $F = 720$ N, d) $F = 930$ N

Wzrost posuwu nagniatania powoduje spadek wartości bezwzględnej naprężeń własnych oraz głębokości ich zalegania (rys. 5.106). Większy posuw nagniatania ($f = 0,28$ mm/obr, $f = 0,4$ mm/obr) przekłada się na krótszy czas kontaktu elementu nagniatającego z powierzchnią obrabianą, co wiąże się z mniejszym udziałem odkształceń plastyczno-sprężystych. Wpływ posuwu nagniatania na rozkład naprężeń własnych jest bardziej zauważalny niż siły nagniatania F .

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

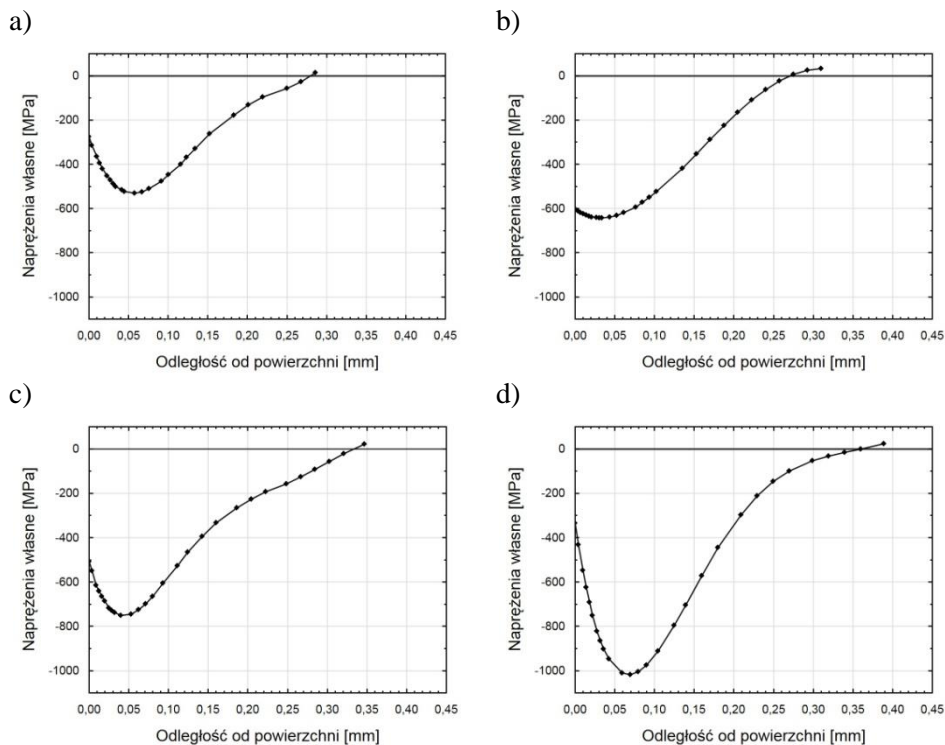


Rys. 5.106. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie przy zmiennym posuwie f ($F=720$ N, $d_N=16$ mm, $i=1$): a) $f=0,05$ mm/obr, b) $f=0,28$ mm/obr, c) $f=0,4$ mm/obr

5.3.7. Naprężenia własne po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym przedmiotów

Na rysunku 5.107 przedstawiono rozkład naprężeń własnych dla próbek po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym przy zmiennej sile nagniatania. Wzrost siły nagniatania F powoduje zwiększenie maksymalnych wartości bezwzględnych ściskających naprężeń własnych oraz głębokości ich zalegania. Podczas obróbki wartość siły nagniatania wpływa na wzrost ilości dyslokacji w strefie zgniatanej, co powoduje zmianę gęstości stali. Po przejściu elementu nagniatającego w postaci kulki, głębiej położone strefy materiału odkształcone sprężycie ściskają obszary przypowierzchniowe. Maksimum naprężeń własnych znajduje się na głębokości około $g_n=0,05$ mm.

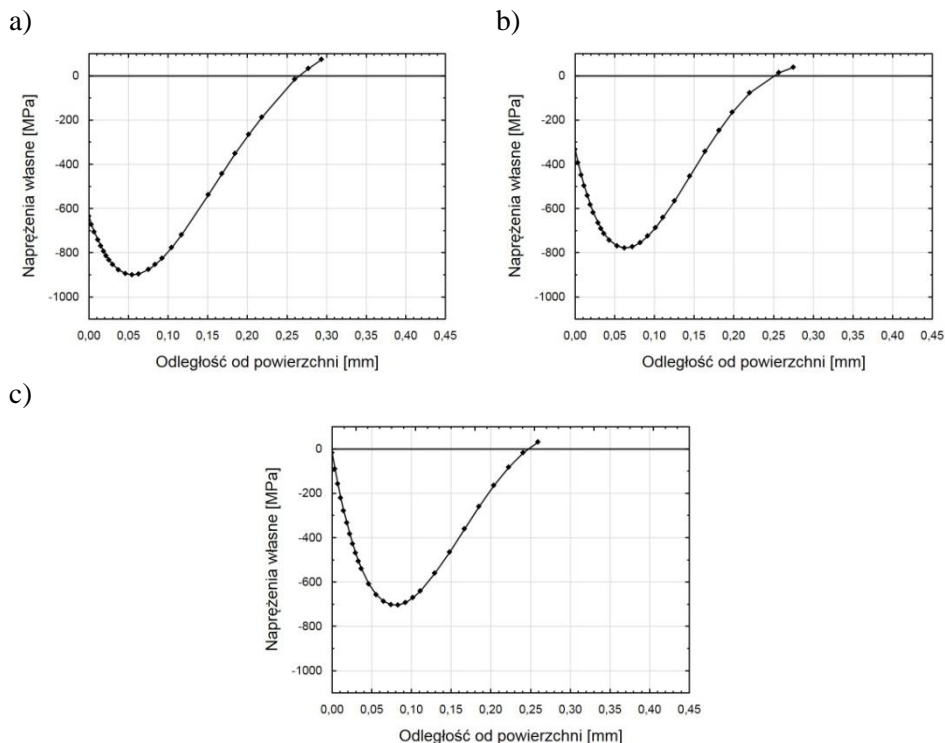
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.107. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie przy zmiennej sile nagniatania F ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$):
a) $F = 300$ N, b) $F = 510$ N, c) $F = 720$ N, d) $F = 930$ N

Rysunek 5.108 przedstawia wpływ posuwu nagniatania na rozkład naprężeń własnych. Z wykresów wynika, że zmniejszenie posuwu spowodowało spadek wartości naprężeń własnych. Dla małych wartości posuwu ($f = 0,05$ mm/obr i $f = 0,17$ mm/obr) podczas obróbki występuje większy zgniot, co przekłada się na ukonstruowanie większych wartości naprężeń ściskających.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.108. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie przy zmiennym posuwie f ($F = 720 \text{ N}$, $d_N = 8 \text{ mm}$, $i = 1$): a) $f = 0,05 \text{ mm/obr}$, b) $f = 0,28 \text{ mm/obr}$, c) $f = 0,4 \text{ mm/obr}$

5.3.8. Naprężenia własne po frezowaniu i nagniataniu odśrodkowym przedmiotów nie wycinanych laserem

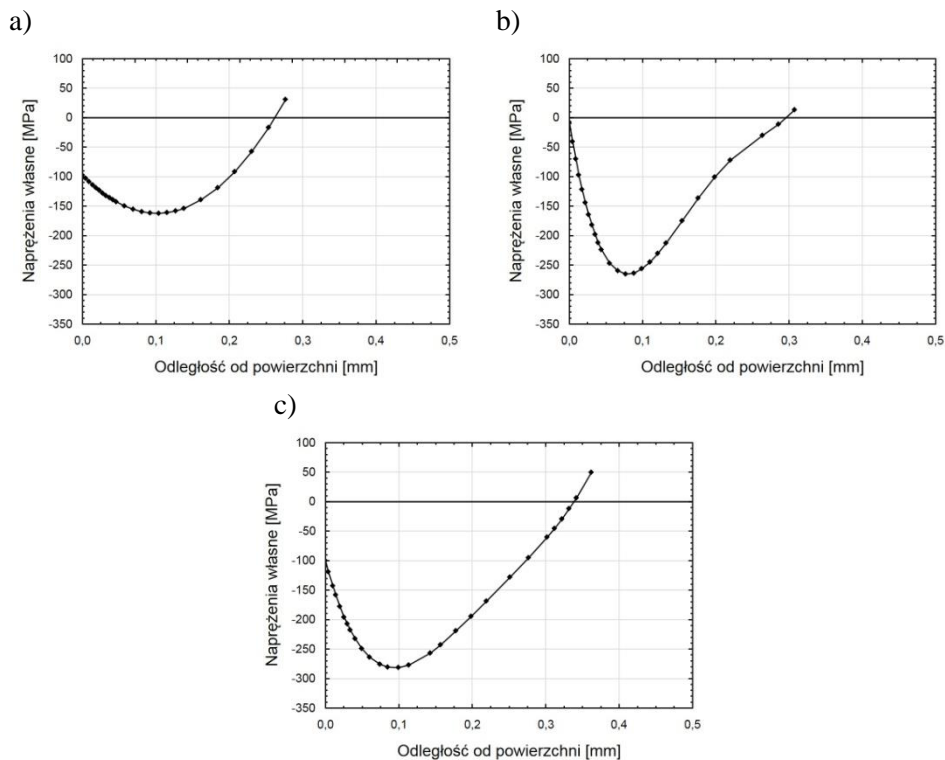
Po nagniataniu odśrodkowym stali C45 w warstwie wierzchniej próbek frezowanych (nie wycinanych laserem) zalegają naprężenia ściskające.

Na rysunkach 5.109÷5.111 przedstawiono wpływ parametrów technologicznych obróbki na wartość naprężeń własnych.

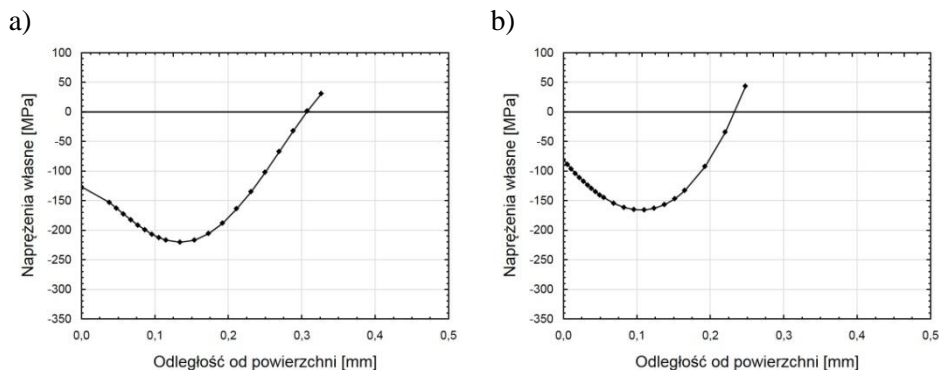
Wzrost prędkości obwodowej narzędzia v_g wpływa na zwiększenie głębokości zalegania ściskających naprężeń własnych, a także, chociaż w mniejszym stopniu, przyczynia się do zwiększania wartości tych naprężeń (rys. 5.109). Maksymalna wartość naprężeń własnych zalega na głębokości ok. 0,1 mm.

Wzrost prędkości posuwu v_f powoduje zmniejszenie wartości naprężeń własnych i głębokości ich zalegania (rys. 5.110).

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.109. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości obwodowej v_g ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$):
a) $v_g = 528$ m/min, b) $v_g = 835$ m/min, c) $v_g = 1143$ m/min

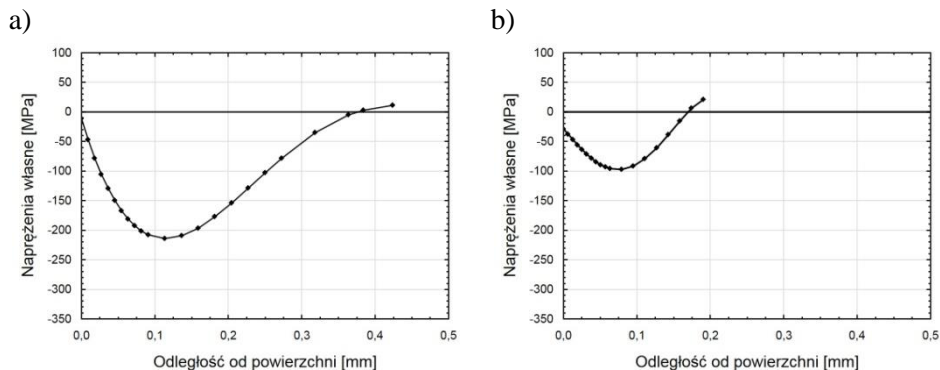


Rys. 5.110. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości posuwu v_f ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$):
a) $v_f = 1368$ mm/min, b) $v_f = 10488$ mm/min

Analizując wpływ przesuwu poprzecznego f_p na rozkład naprężeń własnych można zauważyć wyraźny spadek wartości naprężeń oraz głębokości ich zale-

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

gania ze wzrostem przesuwu f_p (rys. 5.111). Zwiększenie przesuwu z $f_p = 0,03$ mm do $f_p = 0,23$ mm spowodowało ponad dwukrotnie zmniejszenie zarówno wartości jak i głębokości zalegania ściskających naprężeń własnych.



Rys. 5.111. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennym przesuwie poprzecznym f_p ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$):
a) $f_p = 0,03$ mm, b) $f_p = 0,23$ mm

5.3.9. Podsumowanie badań naprężeń własnych

Ukonstytuowany w warstwie wierzchniej przedmiotu stan naprężeń własnych zależy od sposobu obróbki.

Cięcie laserem, jako metoda termicznego dzielenia materiału, powoduje powstanie rozciągająco-ściskających naprężeń własnych. Naprężenia rozciągające zalegają do głębokości ok. 0,04 mm, a następnie przechodzą w naprężenia ściskające, których bezwzględna wartość maksymalna (-91 MPa), znajduje się na głębokości około 0,12 mm od powierzchni obrabianej.

Nagniatanie odśrodkowe próbek po cięciu laserem konstituuje nowy stan naprężeń własnych, są to naprężenia ściskające. Głębokość zalegania naprężeń ściskających wynosi od 0,19 mm do 0,4 mm i jest zależne od parametrów technologicznych obróbki. Maksimum występowania bezwzględnej wartości maksymalnej ściskających naprężeń własnych jest przesunięte w głąb materiału od powierzchni obrabianej.

Po nagniataniu tocznym próbek wycinanych laserem powstają również ściskające naprężenia własne. Głębokość ich zalegania wynosi ok. 0,3 mm w głąb od powierzchni obrabianej.

Frezowanie wykończeniowe próbek wycinanych laserem nie konstituuje nowego stanu naprężeń własnych. Zmianie ulega jedynie głębokość zalegania naprężeń własnych oraz wartości maksymalne, dotyczy to zarówno naprężeń rozciągających jak i ściskających.

Obróbka nagniataniem zrealizowana dla próbek po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym, powoduje wytworzenie w warstwie wierzchniej ściskają-

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

cych naprężeń własnych. Po nagniataniu odśrodkowym wzrasta głębokość zalegania naprężeń ściskających od 2 razy do 3,5 razy w odniesieniu do obróbki poprzedzającej. Również następuje wzrost bezwzględnej wartości maksymalnej naprężeń własnych.

Nagniatanie toczne także powoduje ukształtowanie w warstwie wierzchniej ściskających naprężeń własnych, ale ich wartość bezwzględna oraz głębokość „zalegania” jest mniejsza niż po nagniataniu odśrodkowym.

Powstanie ściskającego stanu naprężeń własnych w wyniku łącznej obróbki skrawaniem i nagniataniem jest istotne ze względu na właściwości użytkowe warstwy wierzchniej. Ukonstytuowany stan naprężeń własnych wpłynie prawdopodobnie korzystnie na odporność na zużycie zmęczeniowe, co będzie odgrywało dużą rolę w konstrukcjach poddawanych obciążeniom zmiennym. Zatem łączna obróbka próbek wyciętych laserem poprzez frezowanie i nagniatanie umożliwi ukształtowanie korzystnego stanu naprężeń własnych. Zmiany głębokości „zalegania” naprężeń pozostają w ścisłej korelacji ze zmianami mikro-twardości i mikrostruktury. Obróbka realizowana z intensywnymi parametrami (np. duża prędkość obwodowa, duża wartość siły nagniatania, małe wartości posuwu oraz przesuwu poprzecznego) przekłada się na większy przyrost mikro-twardości z równoczesnym wzrostem grubości warstwy utwardzonej. Zmiany mikrostruktury wpływają na rozkład naprężeń własnych. Dla większych wartości mikro-twardości uzyskane zostały większe bezwzględne wartości maksymalnych naprężeń własnych ściskających oraz większe głębokości „zalegania”.

W wyniku obróbki frezowaniem próbek nie wycinanych laserem powstaje podobny stan naprężeń własnych jak dla elementów wycinanych laserem oraz wycinanych laserem i frezowanych wykończeniowo.

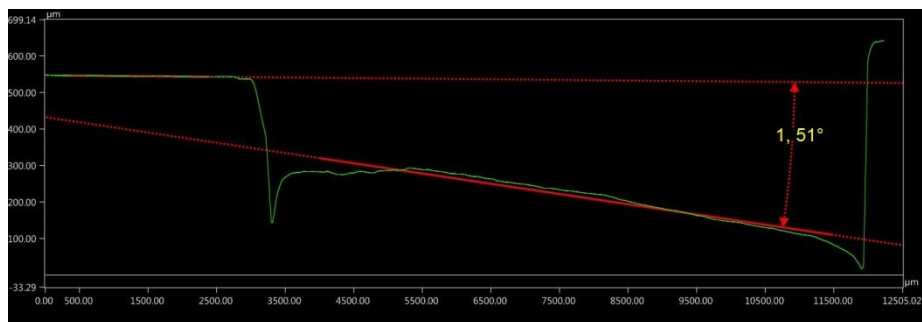
Nagniatanie odśrodkowe próbek nie wycinanych laserem konstituuje ściskający stan naprężeń własnych, których głębokość zalegania oraz bezwzględna wartość maksymalna naprężeń różni się od rezultatów uzyskanych dla próbek po cięciu laserem.

5.4. Dokładność geometryczna

5.4.1. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem

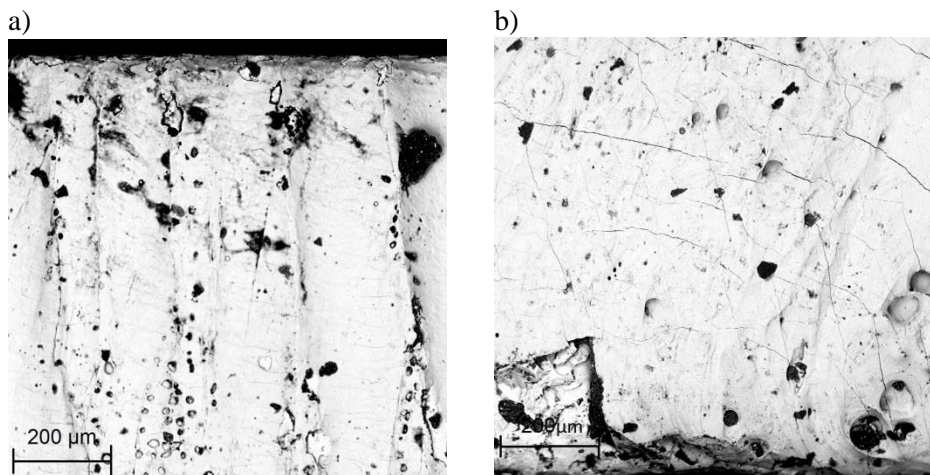
Odchyłka kształtu od zamierzonego konturu, wyrażona nachyleniem powierzchni cięcia, dla próbek ze stali C45 po cięciu laserem wynosi $u = 0,183 \pm 0,049$ mm, a kąt pochylenia powierzchni po cięciu laserem $1^{\circ}24' \pm 0,21'$. Zgodnie z PN-EN ISO:2017-04 uzyskana wartość odchyłki kształtu stanowi przesłanki do przeprowadzenia obróbki mechanicznej [184]. Na rysunku 5.112 widoczne jest odchylenie powierzchni od zamierzonego konturu cięcia laserem.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.112. Kontur powierzchni po cięciu laserem ($u = 0,21$ mm, kąt ukosu = $1,51^\circ$)

Dolne oraz górne krawędzie próbek są zaokrąglone. Przy dolnej krawędzi zbiera się zastygnięty materiał (rys. 5.113b) powodując powstanie metalowego nawisu. Na powierzchni przecinanej zauważalne są mikropęknięcia (rys. 5.113a, 5.113b). Przyczyną powstałych nieciągłości i mikropęknięć jest nierównomierne oraz szybkie chłodzenie ciekłego metalu na powierzchni.



Rys. 5.113. Widok powierzchni po cięciu laserem: a) w strefie wejścia wiązki lasera, b) w strefie wyjścia wiązki lasera

5.4.2. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym

Nachylenie powierzchni u_F dla próbek ze stali C45 po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym wynosi $u_F = 0,08$ mm \pm 0,004 mm. Obróbka frezowaniem pozwoliła na zmniejszenie błędu konturu. Skrawanie z małą głębokością skrawania pozwoliło na ponad dwukrotne zmniejszenie nachylenia powierzchni. Uzyskana wartość wskaźnika u_F pozwala zakwalifikować powierzch-

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

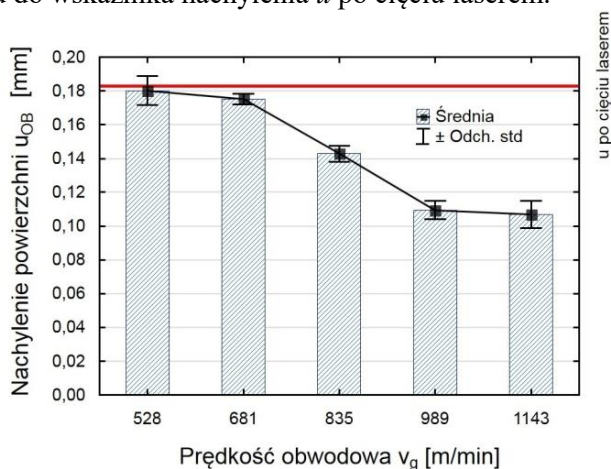
nie po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym do pierwszej klasy jakości według PN-EN ISO 9013:2017-04.

5.4.3. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym

W wyniku nagniatania, będącego bezwiorową metodą obróbki, występują zmiany wymiarowe, które są wywołane następującymi czynnikami: odkształceniem plastycznym i zmniejszeniem nierówności powierzchni oraz zagęszczeniem i zgmiotem struktury [101].

Na rysunkach 5.114÷5.116 przedstawiono wpływ parametrów nagniatania odśrodkowego na wskaźnik nachylenia powierzchni u_{OB} .

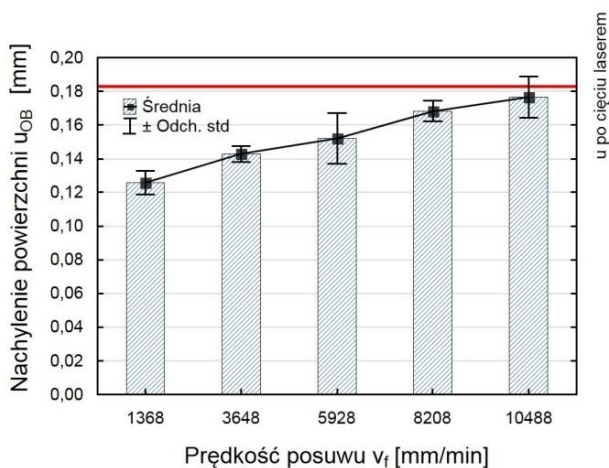
Rysunek 5.114 przedstawia wpływ prędkości obwodowej v_g na wskaźnik u_{OB} . (rys. 5.114). W zakresie prędkości $v_g = 528\div 989$ m/min następuje poprawa dokładności kształtu elementów po cięciu laserem. Po przekroczeniu $v_g = 989$ m/min wartość wskaźnika u_{OB} stabilizuje się. Nachylenie powierzchni u_{OB} po nagniataniu odśrodkowym zmniejszyło się w zakresie od 1,5% do 42% w porównaniu do wskaźnika nachylenia u po cięciu laserem.



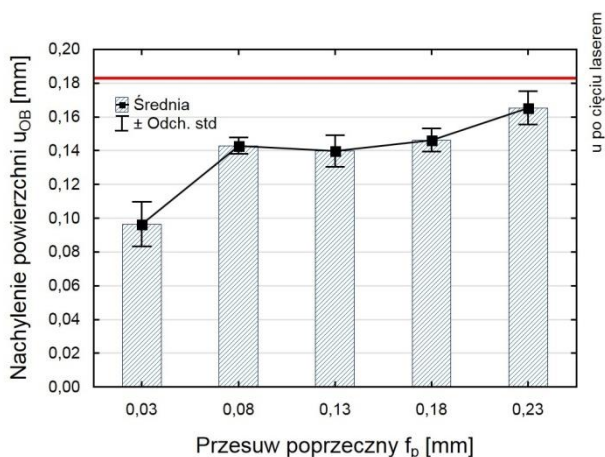
Rys. 5.114. Wpływ prędkości obwodowej v_g na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Wzrost prędkości posuwu (rys. 5.115) oraz przesuwu poprzecznego (rys. 5.116) powoduje zmniejszenie zagęszczenia śladów obróbkowych, czego konsekwencją jest mniejsza deformacja powierzchni obrabianej. W obu przypadkach wzrost analizowanych parametrów obróbki powoduje wzrost wskaźnika nachylenia powierzchni u_{OB} . Najlepsze efekty obróbki uzyskano dla najniższych wartości zastosowanych parametrów obróbki $v_f = 1368$ m/min i $f_p = 0,03$ mm. Dla zastosowanych w badaniach zakresu prędkości posuwu i przesuwu poprzecznego nastąpiła poprawa wskaźnika nachylenia u_{OB} w odniesieniu do wartości po cięciu laserem.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.115. Wpływ prędkości posuwu v_f na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,8$ mm, $i = 1$)



Rys. 5.116. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

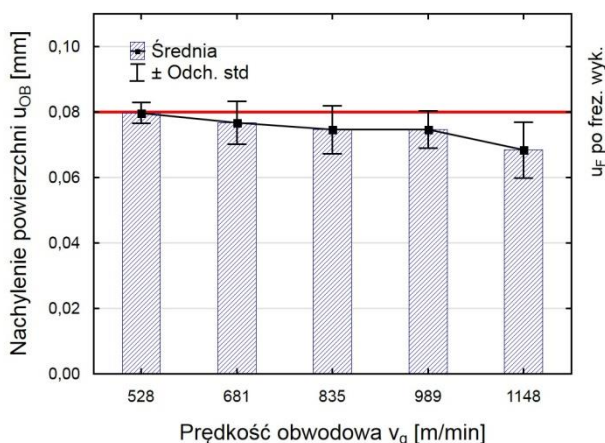
Uzyskany wskaźnik nachylenia powierzchni u_{OB} w wyniku obróbki nagniataniem odśrodkowym zawiera się pomiędzy pierwszą a drugą klasą dokładności dla elementów po cięciu termicznym. Wartość u_{OB} uzależniona jest od zastosowanych parametrów technologicznych obróbki.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

5.4.4. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym

Na rysunkach 5.117÷5.119 przedstawiono wpływ warunków obróbki nagniataniem powierzchni po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym na nachylenie powierzchni.

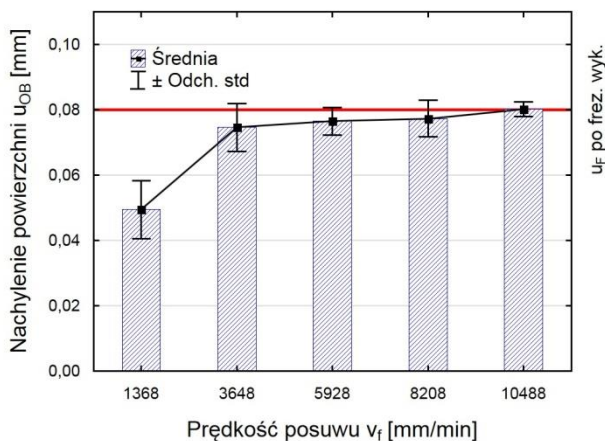
Wzrost prędkości obwodowej powoduje zmniejszenie wartości nachylenia powierzchni u_{OB} (rys. 5.117). W zakresie prędkości obwodowej $v_g = 681 \text{ m/min} \div 1143 \text{ m/min}$ następuje poprawa wskaźnika nachylenia w odniesieniu do wartości po frezowaniu wykończeniowym. Należy to tłumaczyć bardziej intensywnym wyrównywaniem konturu po obróbce poprzedzającej. Dla zakresu prędkości v_g od 681 m/min do 989 m/min zmiany wskaźnika nachylenia powierzchni są niewielkie.



Rys. 5.117. Wpływ prędkości obwodowej v_g na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648 \text{ mm/min}$, $f_p = 0,08 \text{ mm}$, $i = 1$)

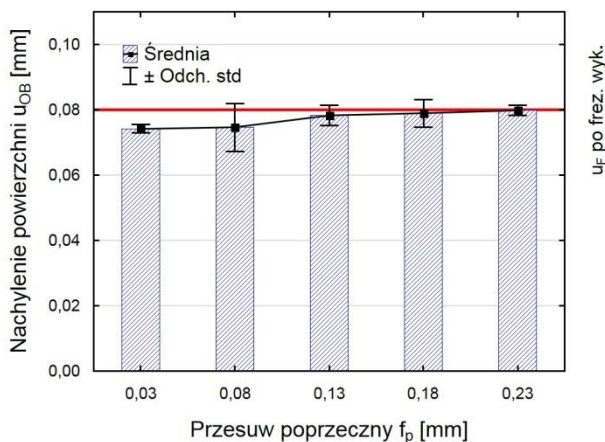
Analizując wpływ prędkości posuwu v_f na nachylenie powierzchni u_{OB} (rys. 5.118) można zaobserwować wzrost wskaźnika u_{OB} ze wzrostem prędkości. Zastosowanie $v_f = 8208 \text{ mm/min} \div 10488 \text{ mm/min}$ powoduje na powierzchni obrabianej wybijanie śladów obróbkowych, które stanowią dodatkowe błędy kształtu, co powoduje, że nachylenie powierzchni u_{OB} odpowiada wartości wskaźnika po frezowaniu wykończeniowym. Wartość u_{OB} uzyskana dla $v_f = 1368 \text{ mm/min}$ i $v_f = 3648 \text{ mm/min}$ pozwala zakwalifikować powierzchnię obrobioną z takimi parametrami do pierwszego zakresu pomiarowego odnośnie dopuszczalnej tolerancji prostopadłości według PN-EN ISO 9013:2017-04.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.118. Wpływ prędkości posuwu v_f na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,8$ mm, $i = 1$)

Wzrost przesuwu poprzecznego f_p powoduje zwiększenie wskaźnika nachylenia powierzchni u_{OB} (rys. 5.119). Dla $f_p = 0,18 \div 0,23$ mm brak jest wyraźnej poprawy dokładności w odniesieniu do obróbki poprzedzającej. Zmiany wskaźnika u_{OB} w funkcji przesuwu poprzecznego f_p są niewielkie w zakresie badanych wartości tego parametru.



Rys. 5.119. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

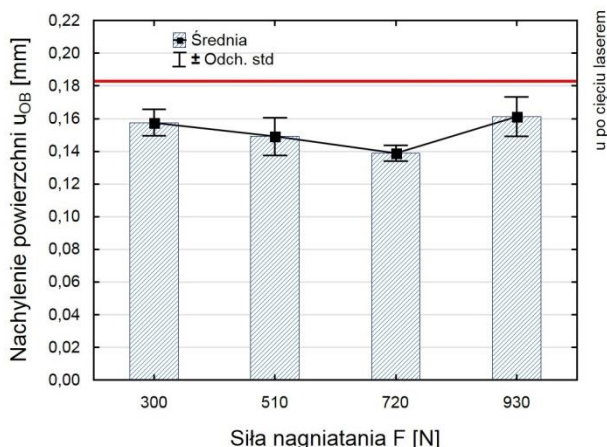
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

5.4.5. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem i nagniataniu tocznym

Podczas nagniatania kulka będąca pod działaniem siły pochodzącej od sprężyny toczy się po obrabianej powierzchni odwzorowując kształt powierzchni w zakresie odkształceń plastycznych.

Wzrost siły nagniatania w zakresie od 300 N do 720 N powoduje zmniejszenie odchyłki kształtu na skutek deformacji prążkowanej struktury na powierzchni po cięciu laserem. W przypadku siły $F = 930$ N występują prawdopodobnie bardzo intensywne odkształcenia plastyczne, powodujące zaburzenia w warstwie wierzchniej, czego konsekwencją jest niewielki wzrost wskaźnika nachylenia powierzchni u_{OB} .

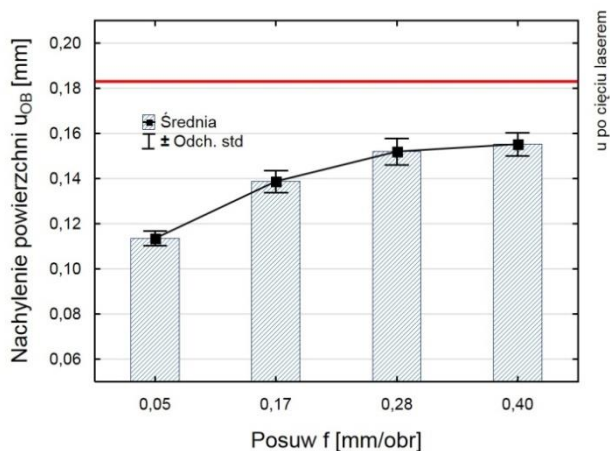
Poprawa wskaźnika nachylenia powierzchni w zakresie zastosowanych sił nagniatania (rys. 5.120) wynosi od 10% do 21%.



Rys. 5.120. Wpływ siły nagniatania F na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

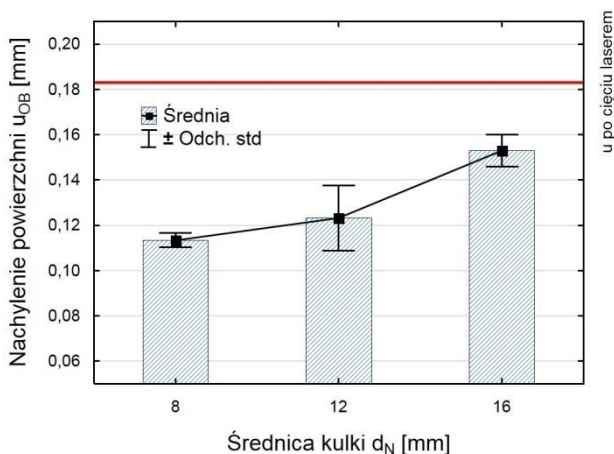
W przypadku posuwu nagniatania f widoczny jest wyraźny wpływ na wartość wskaźnika u_{OB} (rys. 5.121). Wzrost posuwu f powoduje wzrost wskaźnika u_{OB} . Największy wpływ posuwu f widoczny jest w zakresie $f = 0,05 \div 0,28$ mm/obr, spowodowane jest to wielokrotnym odkształceniem prążkowanej struktury, które zachodzi przy nagniataniu z małymi wartościami posuwu. Dla $f = 0,28 \div 0,4$ mm/obr zmiany wskaźnika u_{OB} są niewielkie.

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...



Rys. 5.121. Wpływ posuwu nagniatania f na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720 \text{ N}$, $d_N = 8 \text{ mm}$, $i = 1$)

Wzrost średnicy elementu nagniatającego powoduje wzrost wskaźnika nachylenia powierzchni u_{OB} (rys. 5.122). Spowodowane jest to głównie zwiększeniem powierzchni styku kulki z powierzchnią obrabianą, co przekłada się na zmniejszenie nacisków jednostkowych, które są niewystarczające do całkowitego odkształcenia nierówności po obróbce poprzedzającej. Zmniejszenie odchyłki kształtu w wyniku nagniatania tocznego wynosi od 16% do 37% dla zakresu stosowanych parametrów nagniatania.

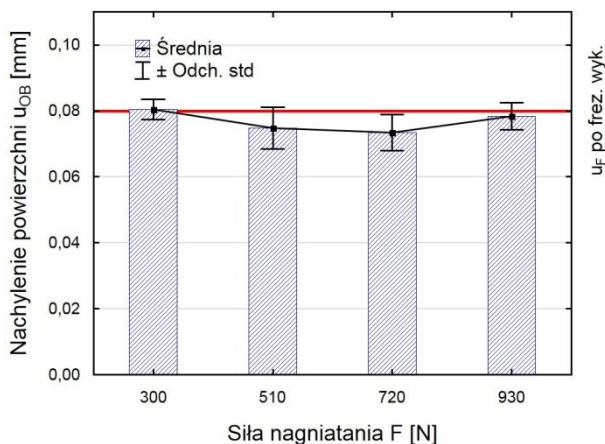


Rys. 5.122. Wpływ średnicy kulki d_N na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720 \text{ N}$, $f = 0,05 \text{ mm/obr}$, $i = 1$)

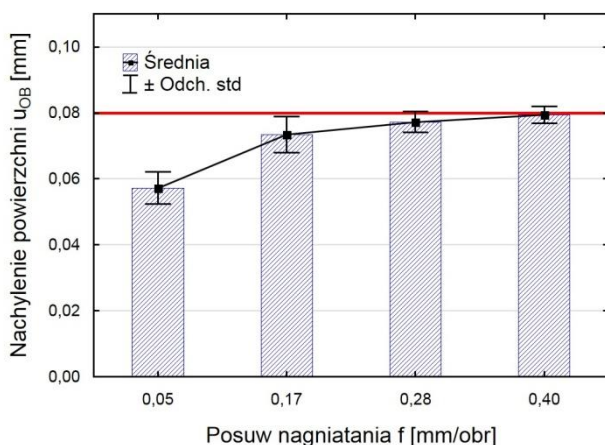
5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

5.4.6. Dokładność geometryczna przedmiotów po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym

Wpływ parametrów technologicznych nagniatania tocznego elementów po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym na wskaźnik nachylenia powierzchni u_{OB} przedstawiono na rysunkach 5.123÷5.124. Wzrost siły nagniatania powoduje niewielki spadek wskaźnika u_{OB} . Wartość minimalna uzyskana została dla $F = 720$ N (rys. 5.123).



Rys. 5.123. Wpływ siły nagniatania F na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)



Rys. 5.124. Wpływ posuwu nagniatania f na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

5. BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY...

Na rysunku 5.124 przedstawiono wpływ posuwu na wskaźnik u_{OB} . Poprawa dokładności geometrycznej uzyskana została dla całego zakresu posuwu wykorzystanego w eksperymencie. Najbardziej zauważalne zmiany w wartości wskaźnika u_{OB} uzyskano dla $f = 0,05 \div 0,17$ mm/obr. Dla pozostałych wartości posuwu $f = 0,28 \div 0,4$ mm/obr nachylenie powierzchni u_{OB} nie ulega znaczącej zmianie.

5.4.7. Podsumowanie badań dokładności geometrycznej

Podczas procesu cięcia laserem, na skutek odchylenia wiązki lasera od zamierzonego toru, powstaje odchylenie powierzchni cięcia od wyznaczonego zarysu. Obecność odchyłki oraz jej wartość $u = 0,183$ mm stanowi przesłanki do przeprowadzenia obróbki mechanicznej.

Obróbka nagniataniem powierzchni po cięciu laserem pozwala na zmniejszenie wskaźnika nachylenia powierzchni u_{OB} . Zmiany te dla nagniatania odśrodkowego wynoszą od 1,5% do 47% w odniesieniu do powierzchni po cięciu laserem. Poprawie ulega również kontur powierzchni po cięciu laserem poddany obróbce nagniataniem tocznym. Zmiany wynoszą od 11% do 37% w porównaniu do wskaźnika u po cięciu laserem. Oznacza to, że obróbka nagniataniem odśrodkowym lub nagniataniem tocznym pozwala na poprawę w niewielkim zakresie dokładności geometrycznej powierzchni po cięciu laserem.

Frezowanie wykończeniowe pozwala na zredukowanie błędu konturu. Powierzchnia po frezowaniu wykończeniowym cechuje się ponad dwukrotnie mniejszym wskaźnikiem nachylenia powierzchni u_{OB} niż powierzchnia po cięciu laserem.

Przeprowadzając nagniatanie odśrodkowe lub nagniatanie toczne dla elementów po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym nie uzyskuje się istotnej poprawy wskaźnika nachylenia u_{OB} . Poprawa dokładności geometrycznej powierzchni uzyskana jest dzięki obróbce frezowaniem. Zadaniem obróbki nagniataniem jest jedynie ukształtowanie korzystnych właściwości stereometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym.

Niewielkie korzystne zmiany wskaźnika nachylenia powierzchni u_{OB} po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym można uzyskać podczas obróbki z następującymi parametrami: nagniatanie odśrodkowe: $v_g = 681 \div 1143$ m/min, $v_f = 1368 \div 8208$ mm/min, $f_d = 0,03 \div 0,13$ mm; nagniatanie toczne: $F = 510 \div 720$ N oraz $f = 0,05 \div 0,28$ mm/obr.

Uzyskane wyniki badań dokładności geometrycznej powierzchni potwierdzają przypuszczenia o możliwości korzystnego kształtowania stanu warstwy wierzchniej poprzez łączną obróbkę skrawaniem i nagniataniem.

6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Celem oceny wpływu istotności parametrów technologicznych nagniatania na chropowatość powierzchni, stopień umocnienia oraz nachylenie powierzchni przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników.

Testowanie hipotezy dotyczącej istotności wpływu czynnika wejściowego na czynnik wynikowy wymaga, aby rozkład badanej zmiennej był zbliżony do rozkładu normalnego. W tym celu normalność rozkładu badano za pomocą testu Shapiro-Wilka [176] wykorzystując program Statistica 12.

Wartość testową statystyki dla testu Shapiro-Wilka podaje zależność:

$$W = \frac{|\sum_i a_i(n)(X_{n-i+1} - X_i)|^2}{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}, \quad (6.1)$$

gdzie:

a_i – stałe podawane w specjalnych tablicach,

X – analizowane zmienne,

\bar{X} – średnia analizowanej zmiennej,

n – liczba pomiarów.

Wartość krytyczna testu Shapiro-Wilka $W_n(p)$ wyznaczona została na podstawie tablic dla danej liczby pomiarów n oraz prawdopodobieństwa p .

Jeżeli spełniona jest nierówność $W \geq W_n(p)$, to badana cecha X ma rozkład zbliżony do normalnego. Istnieje wtedy podstawa do analizowania istotności wpływu czynnika wejściowego na czynnik wynikowy.

Do analizy istotności wpływu parametrów technologicznych nagniatania na chropowatość powierzchni, stopień umocnienia i nachylenie powierzchni wykorzystano program statystyczny randomizowany kompletny [66]. Program ten oparty jest na analizie wariancji.

Hipoteza zerowa zakłada brak wpływu czynnika wejściowego na czynnik wynikowy. W badaniach posłużono się statystyką F Fishera-Snedecora, gdzie wartość testową F oblicza się z zależności [66]:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 (n-p)}{[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (y_{ij} - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2] (p-1)} \quad (7.2)$$

gdzie:

n_i – liczba pomiarów czynnika wejściowego na danym poziomie,

n – całkowita liczba pomiarów,

\bar{y}_i – średnia wyników pomiaru w i -tym wierszu,

\bar{y} – średnia wyników z wszystkich pomiarów,

y_{ij} – wartość j -tego czynnika wynikowego na poziomie i ,

p – liczba poziomów zmienności czynnika wejściowego.

6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Matrycę planowania programu statystycznego randomizowanego, służącego do oceny wpływu jednego czynnika wejściowego na czynnik wynikowy, przedstawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Matryca planowania programu statystycznego randomizowanego kompletnego [66]

Poziom czynnika wejściowego	Numer doświadczenia		
	1	...	q
1	y_{11}	...	y_{1q}
...
p	y_{p1}	...	y_{pq}

Obliczoną wartość testową współczynnika F należy porównać z wartością krytyczną wyznaczoną z tabeli [66], przy przyjętym poziomie istotności α i liczbie stopni swobody, dla licznika (6.3) oraz mianownika (6.4):

$$f_1 = f_l = p - 1, \quad (6.3)$$

$$f_2 = f_m = n - p. \quad (6.4)$$

Jeżeli obliczona wartość statystyki F jest większa bądź równa wartości krytycznej $F_{kr} = F_{(\alpha, f_1, f_2)}$ to wpływ badanego czynnika uznano za istotny przy przyjętym poziomie istotności, jeżeli natomiast nie to należy przyjąć hipotezę zerową za słuszną.

6.1. Nagniatanie odśrodkowe

W pracy analizowano istotność wpływu warunków obróbki nagniataniem odśrodkowym na parametry chropowatości Ra i Rz , stopień umocnienia i nachylenie powierzchni u_{OB} dla próbek po cięciu laserem. Analizę istotności wpływu parametrów technologicznych nagniatania odśrodkowego wykonano również dla elementów nie wycinanych laserem.

Przed przystąpieniem do oceny istotności wpływu czynników wejściowych na czynniki wyjściowe zbadano normalność rozkładu testem Shapiro-Wilka. W tabeli 6.2 przedstawiono wyniki badań normalności rozkładu za pomocą testu Shapiro-Wilka dla parametrów chropowatości Ra i Rz przy zmiennych prędkościach obwodowych narzędzia v_g . Przedstawiono wartości testowe statystyki W oraz wartości krytyczne W_{kr} dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i dla określonej liczby pomiarów n parametrów chropowatości. We wszystkich przypadkach wartość testowa statystyki W przekracza wartość krytyczną W_{kr} , co oznacza, że badana zmienna ma rozkład zbliżony do rozkładu normalnego. Równocześnie wartość prawdopodobieństwa testowego p_i jest większa od założonego poziomu istotności α , co potwierdza słusność postawionej hipotezy zerowej o normalności rozkładu badanej zmiennej.

6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Tabela 6.2. Wyniki badań normalności rozkładu parametrów chropowatości powierzchni Ra i Rz po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym testem Shapiro-Wilka przy zmiennej prędkości obwodowej v_g ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

Prędkość obwodowa v_g [m/min]	n	W_{kr}	Chropowatość powierzchni					
			„strefa wejścia”		„strefa wyjścia”			
			W	p_t	W	p_t		
528	6	0,788	0,818	0,085	0,881	0,273		
681			0,900	0,376	0,829	0,107		
835			0,826	0,099	0,836	0,120		
989			0,828	0,103	0,855	0,173		
1143			0,942	0,675	0,957	0,799		
Prędkość obwodowa v_g [m/min]					Chropowatość powierzchni			
					„strefa wejścia”		„strefa wyjścia”	
					W	p_t	W	p_t
528					0,947	0,719	0,901	0,379
681					0,924	0,532	0,834	0,116
835					0,833	0,113	0,884	0,288
989			0,979	0,946	0,969	0,888		
1143			0,916	0,477	0,934	0,611		

Pozostałe wyniki badań chropowatości, mikrotwardości oraz dokładności geometrycznej również poddano badaniom normalności rozkładu. We wszystkich przypadkach parametr chropowatości Ra i Rz , stopień umocnienia e oraz nachylenie powierzchni u_{OB} mają rozkład zbliżony do rozkładu normalnego. Normalność rozkładu analizowanych zmiennych została również zweryfikowana dla wyników badań uzyskanych podczas obróbki nagniataniem odśrodkowym elementów nie wycinanych laserem

Tabela 6.3. Parametr Ra dla strefy wejścia po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

v_g [mm/min]	Numer doświadczenia						
	1	2	3	4	5	6	\bar{y}_i
	Parametr chropowatości Ra , μm						
528	1,64	1,59	1,26	1,28	1,3	1,32	1,4
681	1,26	1,21	1,19	1,31	1,17	1,32	1,24
835	0,89	0,96	1,02	0,89	0,89	0,93	0,93
989	1,01	0,96	0,76	0,71	0,78	0,76	0,83
1143	0,65	0,66	0,62	0,55	0,59	0,50	0,59

Postawiono hipotezę zerową o braku wpływu warunków obróbki na parametry chropowatości Ra i Rz , stopień umocnienia oraz nachylenie powierzchni.

6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Przykładową analizę istotności wpływu prędkości obwodowej narzędzia v_g na chropowatość powierzchni przedstawiono dla parametru Ra dla strefy wejścia. W tabeli 6.3 przedstawiono średnie wartości parametru Ra po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym dla strefy wejścia w przypadku zmiennej prędkości obwodowej. Została postawiona hipoteza zerowa o braku wpływu prędkości obwodowej narzędzia v_g na parametr chropowatości Ra . Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$ i obliczono liczbę stopni swobody dla licznika i mianownika z wzorów (6.3 i 6.4):

$$f_1 = f_1 = p - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$f_2 = f_m = n - p = 30 - 5 = 25$$

Następnie obliczono wartości pomocnicze:

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 (y_{ij} - \bar{y})^2 = (1,64 - 1,01)^2 + \dots + (0,5 - 1,01)^2 = 3,18$$

$$\sum_{i=1}^5 n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 = 6(1,47 - 1,01)^2 + 6(1,24 - 1,01)^2 + 6(0,93 - 1,01)^2 + 6(0,83 - 1,01)^2 + 6(0,59 - 1,01)^2 = 2,87$$

Obliczono wartość empiryczną współczynnika F:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 (n - p)}{\left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (y_{ij} - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \right] (p - 1)}$$

$$= \frac{2,87 \cdot (30 - 5)}{[3,18 - 2,87](5 - 1)} = 58,39$$

Z tabeli wartości krytycznych testu Fischera-Snedecora [66] przy istotności $\alpha = 0,05$ i liczbie stopni swobody $f_1 = 4$ oraz $f_2 = 25$ określono:

$$F_{kr} = F(\alpha; f_1; f_2) = F(0,05; 4; 25) = 2,76$$

Ponieważ obliczona wartość F znacznie przewyższa wartość F_{kr} istnieje podstawa do odrzucenia weryfikowanej hipotezy. Należy zatem stwierdzić, że (w przyjętym zakresie zmienności) prędkość obwodowa narzędzia v_g w istotnym stopniu wpływa na parametr chropowatości Ra dla strefy wejścia po procesie nagniatania odśrodkowego.

W tabeli 6.4 przedstawiono wyniki analizy istotności wpływu prędkości obwodowej v_g na parametry chropowatości Ra i Rz , stopień umocnienia oraz nachylenie powierzchni u_{OB} .

6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Tabela 6.4. Wyniki analizy istotności wpływu prędkości obwodowej v_g na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

	f_1	f_2	F	F_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
R_a (strefa wejścia)	4	25	58,39	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_a (strefa wyjścia)	4	25	42,46	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_z (strefa wejścia)	4	25	126,41	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_z (strefa wyjścia)	4	25	58,66	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Stopień umocnienia e	4	35	3,86	2,64	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Nachylenie powierzchni u_{OB}	4	30	210,69	2,68	$F > F_{kr}$	istotny wpływ

Tabela 6.5. Wyniki analizy istotności wpływu prędkości posuwu v_f na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

	f_1	f_2	F	F_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
R_a (strefa wejścia)	4	25	13,98	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_a (strefa wyjścia)	4	25	8,26	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_z (strefa wejścia)	4	25	11,06	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_z (strefa wyjścia)	4	25	4,27	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Stopień umocnienia e	4	35	4,83	2,64	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Nachylenie powierzchni u_{OB}	4	30	29,47	2,68	$F > F_{kr}$	istotny wpływ

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono istotność wpływu prędkości obwodowej narzędzia v_g na parametry chropowatości R_a i R_z , stopień umocnienia e oraz nachylenie powierzchni u_{OB} na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. W analogiczny sposób przedstawiono analizę istotności wpływu prę-

6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

kości posuwu v_f (tabela 6.5) i przesuwu poprzecznego f_p (tabela 6.6) na wskaźniki weryfikowane w badaniach przyjmując poziom istotności $\alpha = 0,05$.

Tabela 6.6. Wyniki analizy istotności wpływu przesuwu poprzecznego f_p na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)

	f_1	f_2	F	F_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Ra (strefa wejścia)	4	25	8,69	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Ra (strefa wyjścia)	4	25	9,25	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Rz (strefa wejścia)	4	25	11,15	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Rz (strefa wyjścia)	4	25	5,81	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Stopień umocnienia e	4	35	2,86	2,64	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Nachylenie powierzchni u_{OB}	4	30	52,36	2,68	$F > F_{kr}$	istotny wpływ

Wyniki analizy istotności wpływu liczby przejść i przedstawiono w tabeli 6.7. Podobnie jak dla wcześniej prezentowanych warunków obróbki nagniataniem odśrodkowym, wykazano istotność wpływu liczby przejść na parametry chropowatości Ra i Rz .

Tabela 6.7. Wyniki analizy istotności wpływu liczby przejść i na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm)

	f_1	f_2	F	F_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Ra (strefa wejścia)	4	25	4,45	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Ra (strefa wyjścia)	4	25	13,82	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Rz (strefa wejścia)	4	25	8,12	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Rz (strefa wyjścia)	4	25	33,57	2,76	$F > F_{kr}$	istotny wpływ

Z przeprowadzonej analizy istotności wpływu warunków obróbki nagniataniem na badane wskaźnik wynika, że chropowatość powierzchni oraz nachylenie

6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

nie powierzchni w sposób istotny zależy od prędkości obwodowej v_g natomiast stopień umocnienia w istotny sposób skorelowany jest z prędkością posuwu v_f .

W tabeli 6.8 przedstawiono analizę istotności wpływu obróbki poprzedzającej nagniatanie odśrodkowe (próbki wycinane laserem oraz próbki nie wycinane laserem) na weryfikowane wskaźniki oraz współczynniki zmniejszenia chropowatości K_{Ra} i K_{Rz} po zrealizowanej obróbce.

Tabela 6.8. Wyniki analizy istotności wpływu obróbki poprzedzającej na wybrane wskaźniki obróbki ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 1368$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)

	f_1	f_2	F	F_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Ra	1	10	163,41	4,75	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Rz	1	10	267,56	4,75	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
K_{Ra}	1	10	40,17	4,75	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
K_{Rz}	1	10	91,97	4,75	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Stopień umocnienia e	1	14	72,6	4,61	$F > F_{kr}$	istotny wpływ

Z przeprowadzonej analizy istotności wpływu obróbki poprzedzającej nagniatanie odśrodkowe na chropowatość powierzchni, wskaźniki K_{Ra} i K_{Rz} wynika, że analizowane wskaźniki w sposób istotny zależą od stanu powierzchni elementów obrabianych.

6.2. Nagniatanie toczne

W celu oceny wpływu istotności warunków nagniatania tocznego na chropowatość powierzchni, stopień umocnienia oraz nachylenie powierzchni przeprowadzona została, w analogiczny sposób jak dla nagniatania odśrodkowego, analiza istotności wpływu.

Wszystkie analizowane zmienne posiadają rozkład zbliżony do rozkładu normalnego, zweryfikowane testem Shapiro-Wilka.

W tabelach 6.9÷6.10 przedstawiono analizę statystyczną dla siły nagniatania oraz posuwu nagniatania.

6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Tabela 6.9. Wyniki analizy istotności wpływu siły nagniatania F na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

	f_1	f_2	F	F_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Ra (strefa wejścia)	3	16	11,34	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Ra (strefa wyjścia)	3	16	13,14	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Rz (strefa wejścia)	3	16	43,46	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Rz (strefa wyjścia)	3	16	14,28	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Stopień umocnienia e	3	24	65,01	3,01	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Nachylenie powierzchni u_{OB}	3	16	5,32	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ

Na podstawie przeprowadzonej analizy istotności wpływu parametrów technologicznych nagniatania tocznego wykazano istotność wpływu na czynniki badane przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Tabela 6.10. Wyniki analizy istotności wpływu posuwu f na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)

	f_1	f_2	F	F_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
Ra (strefa wejścia)	3	16	86,21	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Ra (strefa wyjścia)	3	16	19,39	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Rz (strefa wejścia)	3	16	64,11	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Rz (strefa wyjścia)	3	16	82,48	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Stopień umocnienia e	3	24	154,65	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Nachylenie powierzchni u_{OB}	3	16	75,28	3,24	$F > F_{kr}$	istotny wpływ

Analizę istotności wpływu średnicy kulki d_N i liczby przejść i na chropowatość powierzchni i nachylenie u_{OB} przedstawiono w tabelach 6.11÷6.12. Podob-

6. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

nie jak dla wcześniej analizowanych warunków obróbki wykazano istotność wpływu weryfikowanych warunków na badane wskaźniki.

Tabela 6.11. Wyniki analizy istotności wpływu średnicy kulki d_N na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$)

	f_1	f_2	F	F_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
R_a (strefa wejścia)	2	12	5,72	3,88	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_a (strefa wyjścia)	2	12	5,75	3,88	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_z (strefa wejścia)	2	12	3,95	3,88	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_z (strefa wyjścia)	2	12	14,67	3,88	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
Nachylenie powierzchni u_{OB}	2	12	24,09	3,88	$F > F_{kr}$	istotny wpływ

Tabela 6.12. Wyniki analizy istotności wpływu liczby przejść i na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm)

	f_1	f_2	F	F_{kr}	Weryfikacja	Wniosek
R_a (strefa wejścia)	2	12	20,81	3,88	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_a (strefa wyjścia)	2	12	22,46	3,88	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_z (strefa wejścia)	2	12	17,07	3,88	$F > F_{kr}$	istotny wpływ
R_z (strefa wyjścia)	2	12	11,95	3,88	$F > F_{kr}$	istotny wpływ

Z przeprowadzonej analizy istotności wpływu warunków nagniatania tocznego na chropowatość powierzchni, stopień umocnienia oraz nachylenie powierzchni wynika, że analizowane wskaźniki w sposób istotny pozostają w wysokiej korelacji z posuwem nagniatania f .

7. PODSUMOWNIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszej pracy przedstawiono analizę sposobów obróbki wykończeniowej powierzchni po cięciu laserem. Jako sposoby obróbki wykończeniowej powierzchni po cięciu laserem wybrano obróbkę nagniataniem (nagniatanie odśrodkowe oraz nagniatanie toczne) oraz łączną obróbkę skrawaniem jak i nagniataniem.

Konieczność obróbki wykończeniowej powierzchni po cięciu laserem związana jest z obecnością na krawędziach i powierzchniach niezgodności oraz nie spełnieniem wymogów dotyczących jakości, które zawarte są w normie PN-EN ISO 9013:2017-04. Występowanie niepożądanych zjawisk ogranicza możliwości wykorzystania elementu w kolejnym etapie produkcyjnym.

Przeprowadzony przegląd literatury oraz przeprowadzone badania eksperymentalne pozwalają na określenie rezultatów końcowych, które zostały ujęte jako rezultaty poznawcze, praktyczne oraz uwagi dotyczące kierunku dalszych prac.

7.1. Rezultaty poznawcze

1. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że stan warstwy wierzchniej ukształtowany podczas cięcia laserem wpływa na efekty obróbki nagniataniem.
2. W wyniku przeprowadzonych badań udowodniono, że istnieje możliwość kształtowania korzystnego stanu warstwy wierzchniej elementów wycinanych laserem poprzez łączną obróbkę skrawaniem i nagniataniem. Powierzchnie obrobione w sposób sekwencyjny, frezowaniem i nagniataniem, cechują się korzystniejszymi właściwościami warstwy wierzchniej oraz większą dokładnością geometryczną niż elementy po cięciu laserem poddane wyłącznie obróbce nagniataniem w zakresie określonych warunków obróbki.
3. Obróbka nagniataniem tocznym oraz nagniataniem odśrodkowym powierzchni po cięciu laserem pozwala na poprawę parametrów chropowatości Ra , Rz , Rpk , Rk , Rvk oraz udziału materiałowego Rmr w zakresie analizowanych warunków nagniatania.
4. W przypadku obróbki nagniataniem odśrodkowym i obróbki nagniataniem tocznym powierzchni po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym poprawa właściwości stereometrycznych warstwy wierzchniej nastąpiła dla określonych warunków obróbki.
5. Po nagniataniu odśrodkowym elementów ze stali C45 wycinanych laserem uzyskano przyrost twardości od 7% do 19%, a grubość warstwy utwardzonej wynosi $g_h = 15 \div 63 \mu\text{m}$. Dla nagniatania tocznego zmiany

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

- twardości wynoszą od 6% do 17%, natomiast strefa wpływu obróbki nagniataniem tocznym na mikrotwardość wynosi do 40 μm .
- Obróbka nagniataniem odśrodkowym oraz nagniataniem tocznym dla próbek po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym powoduje zbliżony przyrost twardości oraz zmiany zachodzą na podobnych głębokościach jak podczas nagniatania elementów po cięciu laserem
 - W wyniku cięcia laserem powstała struktura martenzytyczna. Frezowanie wykończeniowe spowodowało usunięcie części warstewki utwardzonej oraz umocnienie strefy przykrawędziowej w wyniku mechanicznego oddziaływania ostrzy.
 - Podczas nagniatania tocznego elementów wycinanych laserem występuje zjawisko defragmentaryzacji strefy przykrawędziowej. Przy obróbce elementów po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym powstaje martenzyt odpuszczony.
 - Po cięciu laserem na powierzchni wycinanego elementu powstają fazy tlenkowe Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , $\text{Fe}_{0,9}\text{O}$. Nagniatanie odśrodkowe powierzchni po cięciu laserem pozwala na „zbijanie” i „ściananie” tlenkowych warstewek, występuje jedynie martenzyt i żelazo.
 - Po cięciu laserem oraz po frezowaniu wykończeniowym elementów wycinanych laserem konstytuuje się rozciągająco-ściskający stan naprężeń własnych.
 - Po nagniataniu odśrodkowym oraz nagniataniu tocznym dla próbek po cięciu laserem oraz cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym w warstwie wierzchniej generowany jest nowy korzystny stan naprężeń własnych, są to naprężenia ściskające. Wartość i głębokość zalegania naprężeń zależy od rodzaju obróbki i parametrów technologicznych.
 - Frezowanie wykończeniowe pozwala na zmniejszenie błędu konturu powstałego po cięciu laserem, co przekłada się na zmniejszenie wskaźnika nachylenia powierzchni.
 - W przypadku obróbki nagniataniem odśrodkowym i nagniataniem tocznym powierzchni po cięciu laserem następuje niewielka poprawa wskaźnika nachylenia powierzchni u_{OB} . Warunki obróbki w sposób istotny wpływają na dokładność geometryczną obrabianych powierzchni.
 - Obróbka nagniataniem odśrodkowym i nagniataniem tocznym powierzchni po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym pozwala na poprawę wskaźnika nachylenia powierzchni u_{OB} tylko w zakresie niektórych warunków obróbki.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

7.2. Rezultaty praktyczne

1. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych mogą stanowić wytyczne doboru sposobów i warunków technologicznych obróbki wykończeniowej powierzchni po cięciu laserem.
2. Obróbka nagniataniem elementów po cięciu laserem może być z powodzeniem realizowana na obrabiarkach CNC, jako sekwencyjna obróbka skrawaniem i nagniataniem.
3. W większości przypadków powierzchnie elementów wycinanych laserem wymagają obróbki wykończeniowej, która pozwoli na ukształtowanie nowych korzystnych właściwości stereometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej.
4. Możliwe jest kształtowanie korzystnego stanu warstwy wierzchniej elementów wycinanych laserem poprzez obróbkę nagniataniem jak i łączną obróbkę skrawaniem i nagniataniem.
5. Nie zaleca się stosowania, podczas łącznej obróbki skrawaniem i nagniataniem tocznym, dużych wartości sił docisku elementu nagniatającego F oraz dużych wartości posuwu f , gdyż powodują pogorszenie właściwości stereometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej.
6. Nie zaleca się stosowania, podczas łącznej obróbki skrawaniem i nagniataniem odśrodkowym, dużych wartości prędkości obwodowej v_g , prędkości posuwu v_f , przesuwu poprzecznego f_p , gdyż powodują pogorszenie właściwości stereometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej.

7.3. Kierunki dalszych badań

Rozważając dalsze kierunki badań z zakresu obróbki wykończeniowej powierzchni po cięciu laserem, należałoby uwzględnić:

1. Przeprowadzenie badań dla innych materiałów, które są rozdzielane przy wykorzystaniu wiązki lasera.
2. Rozszerzenie eksperymentu na obróbkę wykończeniową po cięciu laserem płyt o różnej grubości.
3. Przeprowadzenie badań wpływu obróbki nagniataniem jak i łącznej obróbki skrawaniem i nagniataniem na właściwości użytkowe obrabianych przedmiotów (np. wytrzymałość zmęczeniową, zużycie ściernie, odporność na korozję).
4. Wykorzystanie innych odmian nagniatania dynamicznego do kształtowania właściwości stereometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej elementów po cięciu laserem.
5. Bardziej szczegółową analizę przemian strukturalnych zachodzących w warstwie wierzchniej po obróbce wykończeniowej powierzchni po cięciu laserem w oparciu o bardziej zaawansowane metody badawcze.

Literatura

1. Akarapu R., Li B. Q., Segall A., *A thermal stress and failure model for laser cutting and forming operations*, "Journal of Failure Analysis and Prevention", 2004, Vol. 4, No. 5, s. 51-62.
2. Amulevičius A., Mažeika K., Sipavičius Č., *Oxidation of stainless steel by laser cutting*, "Acta Physica Polonica A", 2009, Vol. 115, No. 5, s. 880–855.
3. Arasimowicz A., Nowicki B., Podolak-Lejtas A., *Pomiar naprężeń własnych metodą usuwania warstw przez docieranie po obróbce EDM i kulowaniu strumieniowym*, „Inżynieria Maszyn”, 2011, Vol. 16, No. 3, s. 112–118.
4. Arif A. F. M., Yilbas B. S., *Thermal stress developed during the laser cutting process: consideration of different materials*, "International Journal of Advanced Manufacturing Technology", 2008, 37, s. 697–704.
5. Avilés, R.; Albizuri, J.; Rodríguez, A.; López de Lacalle, L.N., *Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel*, "International Journal of Fatigue", 2013, 55, s. 230-244.
6. Bagherifard S., Fernandez - Pariente I., Ghelichi R., Guagliano M., *Effect of severe shot peening on microstructure and fatigue strength*, "International Journal of Fatigue", 2014, 65, s. 64–70.
7. Bagherifard S., Ghelichi R., Guagliano M., *Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening*, "Applied Surface Science", 2012, 258, s. 6831–6840.
8. Banaś G., Laber S., Laber A., *Wpływ parametrów kulowania udarowego na właściwości warstwy wierzchniej żeliwa Zl 25 + Cu*, „Mechanik”, 1975, 12, s. 630–633.
9. Banasik M., Dworak J., *Cięcie i spawanie laserem CO₂*, „Przegląd Spawalnictwa”, 2002, 8-10, s. 147–151.
10. Bień A., *Teoretyczno-eksperymentalny dobór parametrów cięcia laserowego stali węglowej*, „Przegląd Mechaniczny”, 2011, 10, s. 32–39.
11. Birger I. A., *Ostatočné napriaženija*, Moskwa, Mašgiz, 1963.
12. Boujelbene M., *Influence of the CO₂ laser cutting process parameters on the Quadratic Mean Roughness Rq of the low carbon steel*, "Procedia Manufacturing", 2018, 20, s. 259–264.
13. Boujelbene M., Alghamdi A.S., Miraoui I., Bayraktar E., Gazbar M., *Effects of the laser cutting parameters on the micro-hardness and on the heat affected zone HAZ of the mi-hardened steel*, "International Journal of Advanced and Applied Sciences", 2017, 4, s. 19–25.
14. Brzozowski A., *Jakość technologicznej warstwy wierzchniej blachy po cięciu laserem*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją”, 2008, 8, s. 13–21.

LITERATURA

15. Bylica A., Bochnowski W., Więcek G., *Naprężenia własne w stali C45 nadtapianej laserowo*, „Archiwum Odlewnictwa”, 2006, 19, s. 43–48.
16. Caiazza F., Curicio F., Daurelio G., Memola Capece Minutola F., *Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP, and PC) by CO₂ laser beam*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2005, 159, s. 279–285.
17. Caudill J., Huang B., Arvin C., Schoop J., Meyer K., Jawahir I. S., *Enhancing the surface integrity of Ti-6Al-4V alloy through cryogenic burnishing*, “Procedia CIRP”, 2014, 13, s. 243–248.
18. Cekic A., Begic- Hajdarevic D., Kulenovic M., Omerspahic A., *CO₂ laser cutting of alloy steels using N₂ assist gas*, “Procedia Engineering”, 2014, 69, s. 310–315.
19. Chen K., Yao L., Modi V., *Numerical simulation of oxidation effects in laser cutting process*, “International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 1999, 15, s. 835–842.
20. Chen S. L., *The effects of gas composition on the CO₂ laser cutting of mild steel*, “Journal of Materials Processing Technology”, 1998, 73, s. 147–159.
21. Czarnecki H., Chmielik I., Tomasik J., *Mikrogeometria powierzchni po wybranych metodach nagniatania w układzie 3D*, „Mechanik”, 2012, 7, s. 577–579.
22. Czupryn M., Szul T., *Wpływ wybranych parametrów cięcia laserowego na jego wynik*, „Przegląd Spawalnictwa”, 2004, 10, s. 9–12.
23. Dopierała A., *Wybór zasadniczych parametrów kulowania udarowego*, Sesja Naukowa Komisji Technologii Budowy Maszyn, Poznań, 1979.
24. Dyl T., *Nagniatanie powierzchni płaskich elementów części maszyn okrętowych*, „Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni”, 2011, 71, s. 38–48.
25. Dzierwa A., Korzyński M., *Badania możliwości poprawy przez kulkowanie właściwości zmęczeniowych elementów chromowych*, „Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji”, 2007, Vol. 27, 1, s. 121–130.
26. Dzionk S.; Ścibiorski B.; Przybylski W., *Surface Texture Analysis of Hardened Shafts after Ceramic Ball Burnishing*, “Materials”, 2019, 12, 2, 204.
27. El-Axir M. H., Ibrahim A. A., *Some surface characteristics due to center rest ball burnishing*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2005, 167, s. 47–53.
28. Feldshtein E., Koman I., *Wycinanie laserowe elementów o dużej grubości w blachach ze stali nierdzewnej*, „Przegląd Mechaniczny”, 2010, 4, s. 13–18.
29. Feng Q., Jiang C., Xu Z., Xie L., Ji V., *Effect of shot peening on the residual stress and microstructure of duplex stainless steel*, “Surface & Coatings Technology”, 2013, 226, s. 140–144.
30. Gaworska - Koniarek D., Szubzda B., Wilczyński W., Drosik J., Karaś K., *Wpływ wycinania laserem na właściwości magnetyczne blach elektrotechnicznych*, „Prace Instytutu Elektrotechniki”, 2009, 241, s. 139–152.

LITERATURA

31. Ghany K. A., Newishy M., *Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd: YAG laser*, "Journal of Materials Processing Technology", 2005, 168, s. 438–447.
32. Golnabi H., Bahar M., *Investigation of optimum in oxygen gas- assisted laser cutting*, "Optics & Laser Technology", 2009, 41, s. 454–460.
33. Górecka R., Polański Z.: *Metrologia warstwy wierzchniej*. WNT, Warszawa 1983.
34. Górka J., Skiba R., *Wpływ procesów cięcia termicznego i strumieniem wody na właściwości i jakość powierzchni ciętych stali niskostopowych o wysokiej granicy plastyczności*, „Przegląd Spawalnictwa”, 2013, 2, s. 11–18.
35. Grajcar J., Laber S., *Niektóre zagadnienia technologii wykończającej kulowania udarowego żeliwa Żł 25 + Cu*. W:] Materiały konferencyjne: IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna Postępy w teorii i technice obróbki materiałów, Kraków, 1973, s. 5–14.
36. Grochała D., Berczyński S., Grządziel Z., *Stress in the surface layer of objects burnished after milling*, "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology", 2014, 72,7 -9, p. 1655-1663.
37. Grum J., Zuljan D., J., *Analysis of heat effects in laser cutting of steels*, "Journal of Materials Engineering and Performance", 1996, 5, s. 526–537.
38. Grzesik W., *Functional properties of hardened steel parts generated by turning and ball burnishing operations*, "Advances in Manufacturing Science and Technology", 2012, Vol. 36, 4, s. 5–17.
39. Grzesik W., *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, Warszawa, WNT, 2018.
40. Grzesik W., *Polepszanie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych Cz. III. Nagniatanie toczne i ślizgowe twardych stali*, „Mechanik”, 2012, 7, s. 558–563.
41. Grzesik W., *Wpływ obróbki sekwencyjnej na topografię powierzchni utwardzonej*, „Mechanik”, 2014, 5–6, s. 350–363.
42. Grzesik W., Żak K., *Producing high quality hardened parts using sequential hard turning and ball burnishing operations*, "Precision Engineering", 2013, 37, s. 849–855.
43. Grzesik W., Żak K., Chudy R., Prażmowski M., Małecka J., *Optimization of subtractive-trans formative hybrid processes supported by the technological heredity concept*, "CIRP Annals – Manufacturing Technology", 2019, 68, s. 101-104.
44. Grzesik W., Żak K., Prażmowski M., *Surface integrity of hard turned parts modified by ball burnishing*, "Journal of Machine Engineering", 2012, 1, s. 18–27..
45. Gubała R., Grochała D., Olszak W., *Mikrohydrauliczne narzędzie do nagniatania złożonych powierzchni przestrzennych*, „Mechanik”, 2014, 1, s. 22–23.

LITERATURA

46. Haduch J., Szczepanik M., *Wpływ wybranych parametrów technologicznych na jakość warstwy wierzchniej blachy OH18N9 po cięciu laserowym*, „Mechanika. Kwartalnik Akademii Górniczo- Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie”, 2004, Vol. 23, 4, s. 447–459.
47. Hamadache H., Laouar L., Zeghib N. E., Chaoui K., *Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2006, 180, s. 130–136.
48. Harada Y., Fukaura K., Haga S., *Influence of microshot peening on surface layer characteristics of structural steel*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2007, 191, s. 297–301.
49. Harničárová M., Valíček J., Öchsner A., Grznárik R., Kušnerová M., Neugebauer J., Kozak D., *Predicting residual and flow stresses from surface topography created by laser cutting technology*, “Optics & Laser Technology”, 2013, 52, s. 21–29.
50. Hsu M. J., Molian P. A., *Off- axial, gas- jet- assisted, laser cutting of 6.35- mm thick stainless steel*, “Journal of Engineering for Industry”, 1995, 117, s. 272–276.
51. Iida K., Hirose Y., *The residual stress distribution in shot peened carburized steel under fatigue*, [W:] Materiały konferencyjne: The 7th International Conference of Shot Peening, Warszawa, 1999, s. 96–101.
52. Iordanova I., Antonov V., Gurkovsky S., *Changes of microstructure and mechanical properties of cold- rolled low carbon steel due to its surface treatment by Nd: glass pulsed laser*, “Surface & Coatings Technology”, 2002, 153, s. 267–276.
53. Jakubiec W., Malinowski J., *Metrologia wielkości geometrycznych*, Warszawa, WNT, 2004.
54. Jerez-Mesa R., Landon Y., Travieso-Rodriguez J.A., Desein G., Lluma-Fuentes J., V. Wagner, *Topological surface integrity modification of AISI 1038 alloy after vibration assisted ball burnishing*, “Surface & Coatings Technology”, 2018, 349, s. 364–377.
55. Kalisz J., Janczewski Ł., Czechowski K., Czerwiński A., Polowski W., Łętocha A., *Rozwój technologii nagniatania tocznego powierzchni frezowanych*, „Mechanik”, 2014, 3, s. 186–189.
56. Kalita W., Hoffman J., Radziejewska J., *Jakościowe efekty cięcia blachy wiązką lasera CO₂ z wysokociśnieniowym nadmuchem gazów neutralnych*, „Przegląd Mechaniczny”, 1996, 13–14, s. 22–27.
57. Kannatey- Asibu E., Jr., *Principles of laser materials processing*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2009.
58. Karatas C., Keles O., Usalan I., Usta Y., *Laser cutting of steel sheet: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria*

LITERATURA

- formation, "Journal of Materials Processing Technology", 2006, 172, s. 22–29.
59. Kawalec M., *Mikrostruktura i twardość technologicznej warstwy wierzchniej po toczeniu zahartowanej stali narzędziowej*, „Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń”, 1996, 3, s. 23–35.
60. Keles O., Oner U., *A study of laser cutting process: influence of laser power and cutting speed on cut quality*, “Lasers in Engineering”, 2010, 20, s. 319–327.
61. Kęsy M., *Problemy kształtowania warstwy wierzchniej żeliwa szarego dynamicznymi metodami nagniatania*, „Inżynieria Materiałowa”, 2005, 5, s. 755–757.
62. Klimpel A., *Jakość cięcia laserowego metali*, „Stal. Metale & Nowe Technologie”, 2012, 5–6, s. 48–56.
63. Klimpel A., *Technologie laserowe*, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
64. Klocke F. Lieremann J., *Roller burnishing of hard turned surface*, “International Journal of Machine Tools & Manufacture”, 1998, 38, s. 419–423.
65. Kolman R., *Mechaniczne wzmocnianie powierzchni części maszyn*, Warszawa, WNT, 1965.
66. Korzyński M., *Metodyka eksperymentu*, Warszawa, WNT, 2006.
67. Korzyński M., Pacana A., *Centreless burnishing and influence of its parameters on machining effects*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2010, 210, s. 1217–1223.
68. Kozłowski M., Wróblewski M., *Nagniatanie otworów impulsowymi głowicami rolkowymi*, [W:] Materiały II Konferencji N-T: “Technologia obróbki przez nagniatanie”, Bydgoszcz, 1980, s. 273–279.
69. Kubit A., Bucior M., Zielecki W., Stachowicz F., *The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel*, “Procedia Structural Integrity”, 2016, 2, 3330–3336.
70. Kukielka L., Kułakowska A., Patyk R., *Problematyka kształtowania jakości technologicznej części w procesie nagniatania powierzchniowego*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, 2008, Vol. 54, 4, s. 196–199.
71. Lee W.B., Cho K. T., Moon K.I., Lee Y., *The effect of the cementite phase on the surface hardening of carbon steel by shot peening*, “Materials Science and Engineering A”, 2010, 527, s. 5852–5857.
72. Leszczyńska- Madej B., Richert M., Sak T., *Effect of unconventional methods of cutting on microstructure, topography and microhardness changes in steel*, “Metallurgy and Foundry Engineering”, 2012, Vol. 38, 2, s. 109–115.
73. Li F. L., Xia W., Zhao Z. Y., Tang Z. Q., *Analytical prediction and experimental verification of surface roughness during the burnishing process*, “International Journal of Machine Tool & Manufacture”, 2012, 62, s. 67–75.

LITERATURA

74. Li K., Sheng P., *Plane stress model for fracture of ceramics laser cutting*, "International Journal of Machine Tool & Manufacture", 1995, 11, s. 1493–1506.
75. Lin Y. C., Yan B. H., Huang F. Y., *Surface improvement using a combination of electrical discharge machining with ball burnish machining based on the Taguchi Method*, "International Journal of Advanced Manufacturing Technology", 2001, 18, s. 673–682.
76. Lopez de Lacalle L.N., Lamikiz A., Munoa J., Sanchez J.A., *Quality improvement of ball- end milled sculptured surfaces by ball burnishing*, "International Journal of Machine Tool & Manufacture", 2005, 45, s. 1659–1668.
77. Luca L. Neagu-Ventzel S., Marinescu I., *Effects of working parameters on surface finish in ball- burnishing of hardened steels*, "Precision Engineering", 2005, 29, s. 253–256.
78. Łunarski J., *Właściwości fizyczne i użytkowe stopów tytanu po procesie nagniatania dynamicznego*, Rzeszów, Wydawnictwo Politechnik Rzeszowskiej, 1982.
79. Lv Y., Lei L., Sun L., *Effect of shot peening on the fatigue resistance of laser surface melted 20CrMnTi steel gear*, "Materials Science and Engineering A", 2015, 629, s. 8–15.
80. Mäntyjävi K., Väisänen A., Karjalainen J. A., *Cutting method influence on the fatigue resistance of ultra- high- strength steel*, "Journal of Material Forming", 2009, 2, s. 547–550.
81. Marteau J., Bigerelle M., Mazaran P. E., Bouvier S., *Relation between roughness and processing conditions of AISI 316L stainless steel treated by ultrasonic shot peening*, "Tribology International", 2015, 82, s. 319–329.
82. Matuszak J., Zaleski K., *Effect of brushing parameters upon edge states after wire brushing of AZ91 HP magnesium alloy*, "Advances in Science and Technology Research Journal", 2013, 7, s. 55–60.
83. Mazurkiewicz A., Deja G., *Jakość cięcia plazmowego i laserowego wybranych materiałów*, „Logistyka”, 2014, 3, s. 4240–4249.
84. Miao H. Y., Larose S., Lévesque M. Perron C., *On the potential applications of a 3D radom finite element model for the simulation of shot peening*, "Advances in Engineering Software", 2009, Vol. 40, 10, s. 1023–1038.
85. Miyamoto I., Maruo H., *The mechanism of laser cutting*, "Journal of Welding Word", 1991, 9-10, s. 283–294.
86. Murav'ev V. I., Fizulakov R. A., Mel'nichuk A. F., Semashko N. A. and Matveenko D. V., *Effect of gas- laser cutting on formation of texture, structure, and chemical composition of cut surfaces of titanium preforms*, "Metal Science and Heat Treatment", 2005, 1–2, s. 62–66.

LITERATURA

87. Muzykiewicz W., Łach A., *Analiza możliwości wykonania gęstych perforacji blach niekonwencjonalnymi technikami wysokoenergetycznymi*, „Obróbka Plastyczna Metali”, 2007, 1, s. 13–21.
88. Nadolny K., Plichta J., Radowski M., *Reciprocal internal cylindrical grinding integrated with dynamic centrifugal burnishing of hard-to-cut materials*, “Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering”, 2015, vol. 229, 4, s. 265–279.
89. Nakonieczny A., *Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna kulowanie –shot peening*, Warszawa, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, 2002.
90. Nowicki B., Podolak-Lejtas A., *Investigations of the effect of combined EDM machining with burnishing process on the condition of the surface layer*, “Advances in Manufacturing Science and Technology”, 2008, Vol. 32, 4, s. 5–17.
91. Olszak W., Grochała D., *Nagniatanie powierzchni 3D na frezarkach CNC*, [W:] Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, pod red. W. Przybylski, Gdańsk, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Politechnika Gdańska, s. 387–398, 2008.
92. Pakos R., *Wpływ metody cięcia na właściwości stalowej krawędzi ciętej*, „Przegląd Spawalnictwa”, 2012, 8, s. 54–57.
93. Patidar D., Rana R. S., *The effect of CO2 laser cutting parameter on Mechanical & Microstructural characteristics of high strength steel-a review*, “Materials today: Proceedings”, 2018, 5, s. 17753–17762.
94. Patyk R., Kukielka L., *Wpływ obróbki wykończeniowej zęba kultywatora na zużycie zmęczeniowe*, „Inżynieria Rolnicza”, 2010, 7, s. 175–181.
95. Piekarski R., *Wyznaczanie naprężeń własnych w warstwie wierzchniej elementów maszyn ze stali 42CrMo4 poddanych kulowaniu strumieniowemu*, „Mechanik”, 2005, 2, s. 102–105.
96. Popov E.V., Kovalev V.G., Shubin I. N., *Technology and Automation of Stamping*, Moscow, Izd. MGTU Im. Baumana, 2003.
97. Powell J., *Laser Cutting*, London, Springer Verlag, 1993.
98. Powell J., Ivarson A., Magnusson C., *Laser cutting of steels: a physical and chemical analysis of the particles ejected during cutting*, “Journal of Laser Applying”, 1993, 1, s. 25–31.
99. Przybylski W., *Metody zapobiegania mikropęknięciom szlifierskim przez kompensację naprężeń technologicznych w warstwie wierzchniej*, „Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń”, 1990, 3–4, s. 39–55.
100. Przybylski W., *Technologia i urządzenia do nagniatania z jednoczesnym toczeniem*. Materiały V Konferencji N-T “Technologia obróbki przez nagniatanie”, Bydgoszcz. 183–197 (1992).
101. Przybylski W., *Technologia obróbki nagniataniem*, Warszawa, WNT, 1987.

LITERATURA

102. Przybylski W., *Wpływ nagniatania umacniającego na wytrzymałość zmęczeniową wałów okrętowych*, „Mechanik”, 2014, 11, s. 220–227.
103. Przybylski W., *Zintegrowana obróbka toczeniem i nagniataniem*, „Mechanik”, 2011, 12.
104. Przybyłowicz K., „*Metaloznawstwo*”, Warszawa, WNT, 1992.
105. Rachmat H., Mahalil K., Mohid Z., Abd Rahim E., *Comparison between Dry, MQL, and Cryogenic Cooling Technique on Surface Integrity of Burnished Surface*, International Journal of Integrated Engineering, 2019, vol. 11, 5, s. 35-41.
106. Radziejewska J., *Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem*, Warszawa, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, 2011.
107. Radziejewska J., Kalita W., Nowicki B., *Laserowo-mechaniczna modyfikacja warstwy wierzchniej stali*, „Przegląd Mechaniczny”, 2006, 7-8, s. 17–23.
108. Rajaram N., Sheikh- Ahmad J., Cheraghi S. H., *CO₂ laser cut quality of 4130 steel*, “International Journal of Machine Tool & Manufacture”, 2003, 43, s. 351–358.
109. Rapior A., Wieczorowski K., *Wybrane technologiczne właściwości warstwy wierzchniej żeliwa ŻL 250 po nagniataniu tocznym*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej Mechanika”, 2002, 48, s. 67–80.
110. Razumov M. S., Zubkov N. S., Afanas’eva L.E., *Effect of diamond smoothing on the structure and properties of the deposited metal in the laser-affected zone*, “Laser Treatment”, 2009, Vol. 51, 11–12, s. 606–609.
111. Revankar G. D., Shetty R., Rao S. S., Gaitonde V. N., *Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy*, “Measurement”, 2014, 58, s. 256–268.
112. Rodríguez A., López de Lacalle L. N., Celaya A., Lamikiz A., Albizuri J., *Surface improvement of shafts by deep ball- burnishing technique*, “Surface & Coatings Technology”, 2012, 206, s. 2817–2824.
113. Salem H. G., Mansour M.S., Badr Y., Abbas W. A., *CW Nd: YAG laser cutting of ultra low carbon steel thin sheet using O₂ assist gas*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2008, 196, s. 64–72.
114. Ścibiorski B., *Wybrane problemy nagniatania tocznego stali twardych ceramiką na tokarce CNC*, „Inżynieria Maszyn”, 2013, 2, s. 32–44.
115. Sheng P. S., Joshi V. S., *Analysis of heat – affected zone formation for laser cutting of stainless steel*, “Journal of Materials Processing Technology”, 1995, 3-4, s. 879–892.
116. Singh R., Alberts M. J., Melkote S. N., *Characterization and prediction of the heat-affected zone in a laser assisted mechanical micromachining process*, “International Journal of Machine Tools & Manufacture”, 2008, 48, s. 994–1004.

LITERATURA

117. Sirotkin O. S., Blinkow V. V., Kondratiuk D. I., Michalski J., Nakonieczny A., Wach P., *Precyzyjna obróbka laserowa, jako końcowa operacja wytwarzania części maszyn*, „Inżynieria Powierzchni”, 2010, 3, s. 54–61.
118. Skoczylas A., *Studying the effect of finishing work on the geometric accuracy of the laser cut elements*, “Advances in Science and Technology Research Journal”, 2018, Vol. 12, 1, s. 267–272.
119. Skoczylas A., Zaleski K., *Badania frezowania obwodowego warstwy utwardzonej wskutek cięcia laserem*, „Mechanik”, 2012, 8-9, s. 249-256.
120. Skoczylas A., Zaleski K., *Badania wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów ze stali C45 po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym oraz nagniataniu odśrodkowym*, „Mechanik”, 2016, 8–9, s. 1088–1089.
121. Skoczylas A., Zaleski K., *Effect of Centrifugal Shot Peening on the Surface Properties of Laser-Cut C45 Steel Parts*, “Materials”, 2019, Vol. 12, 3635.
122. Skoczylas A., Zaleski K., *Selected Properties of the Surface Layer of C45 Steel Parts Subjected to Laser Cutting and Ball Burnishing*, “Materials”, 2020, Vol. 13, 15.
123. Skoczylas A., Zaleski K., *Struktura geometryczna powierzchni przedmiotów ze stali C45 wycinanych laserem a następnie nagniatanych tocznie*, „Mechanik”, 2014, 11, s. 228–235.
124. Skoczylas A., Zaleski K., *Studies on the selected properties of C45 steel elements surface layer after laser cutting, finishing milling and burnishing*, “Advances in Science and Technology Research Journal”, 2016, Vol. 10, 32, s.118–132.
125. Skoczylas A., Zaleski K., Szewczyk S., *Wpływ nagniatania odśrodkowego na mikrostrukturę i mikrotwardość stali C45 po procesie cięcia laserem*. „Inżynieria Powierzchni”, 2017, Vol. 22, 2, s.17-21.
126. Skoczylas A., Zaleski K., *Wpływ parametrów nagniatania tocznego powierzchni stali C45 po przecinaniu wiązką laserową na wybrane właściwości warstwy wierzchniej*, [W:] *Innowacyjne procesy technologiczne*, pod red. A. Świć, Lublin, Politechnika Lubelska, s. 7–18, 2011.
127. Skoczylas A., Zaleski K., *Wpływ parametrów technologicznych cięcia wiązką laserową na wybrane właściwości warstwy wierzchniej stali S235JR*, [W:] *Zastosowani informatyki w inżynierii produkcji*, pod red. A. Świć, Lublin, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 82–92, 2009.
128. Skoczylas A., Zaleski K., *Wpływ warunków nagniatania odśrodkowego na chropowatość powierzchni przedmiotów ze stali C45 wycinanych laserem*, „Mechanik”, 2014, 8–9, s. 517–524.
129. Sobczak A., Legutko S., *Analiza wybranych parametrów charakterystyki warstwy wierzchniej powstałej w wyniku obróbki nagniataniem kół zębatych*,

LITERATURA

- „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika”, 2001, Vol. 57, 188, s. 279–287.
130. Sosnowski M., Grochała D., *Problemy nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych na centrach obróbkowych*, „Mechanik”, 2011, 1, s. 14–18
131. Steen W.M., *Laser Material Processing*, Londyn, Springer-Verlag, 2003.
132. Stępień J., Gawor J., *Określenie zasięgu, właściwości i struktury strefy wpływu ciepła w procesie wycinania laserowego*, „Prace Statusowe Instytutu Metalurgii Żelaza”, 2004, 4, s. 53–55.
133. Stournaras A., Stavraopoulos P., Salonitis K., Chryssolouris, *An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum*, “CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology”, 2009, 2, s. 61–69.
134. Sundar M., Nath A. K., Bandyopadhyay D. K., Chaudhuri S. P., Dey P. K., Misra D., *Effect of process parameters on the cutting quality in lasox cutting of mild steel*, “International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2009, 40, s. 865–874.
135. Surowska B., *Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2002.
136. Świrad S., *The surface texture analysis after sliding burnishing with cylindrical elements*, “Wear”, 2011, 271, s. 576–581.
137. Thomas D. J., *The influence of the laser and plasma traverse cutting speed process parameter on the cut-edge characteristics and durability of Yellow Goods vehicle applications*, “Journal of Manufacturing Processes”, 2011, 13, s. 120–132.
138. Thomas D. J., Whittaker M. T., Bright G. W., Gao Y., *The influence of mechanical and CO₂ laser cut-edge characteristics on the fatigue life performance of high strength automotive steels*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2011, 211, s. 263–274.
139. Tian Y., Shin Y. C., *Laser-assisted burnishing of metals*, “International Journal of Machine Tool & Manufacture”, 2007, 47, s. 14–22.
140. Travieso-Rodriguez J. A., Gomez-Gras G.; Dessein G., Carrillo F., Alexis J., Jorba-Peiro J., Aubazac N., *Effects of a ball burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens*, “The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2015, 81, s. 1757–1765.
141. Trela S., *Badania wpływu cięcia laserowego na twardość stali nisko- i średniowęglowych*, „Mechanik”, 2004, 12, s. 877–878.
142. Trzaska-Durski Z., Trzaska-Durska D., *Podstawy krystalografii*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
143. Tubielewicz K., *Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych*, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2005.
144. Tubielewicz K., *Wpływ parametrów kulkowania odśrodkowego na wskaźniki chropowatości powierzchni*, „Mechanik”, 1974, 2, s. 89–92.

LITERATURA

145. Tubielewicz K., *Wpływ parametrów kulkowania odśrodkowego na wskaźnik umocnienia warstwy wierzchniej stali*, „Mechanik”, 1973, 8, s. 415–419.
146. Tubielewicz K., Kęsy M., *Technologiczne problemy obróbki żeliwa szarego*, [W:] Materiały konferencyjne : XXVI Szkoła Tribologiczna Problemy Tribologiczne w Przyrodzie i Technice oraz VI Konferencja Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych, Łódź – Niedzica, s. 161–175, 2003.
147. Tubielewicz K., Zaborski A., *Kształtowanie stanu naprężeń własnych w procesach nagniatania*, „Mechanik”, 2014, 11, s. 299–313.
148. Tubielewicz K., Zaborski A., *Wpływ obróbki powierzchniowej nagniataniem na wybrane właściwości warstwy wierzchniej stali 55*, „Tribologia”, 1995, 4, s. 399–407.
149. Wang Z., Jiang C., Gan X., Chen Y., Ji V., *Influence of shot peening on the fatigue life of laser hardened 17-4PH steel*, “International Journal of Fatigue”, 2011, 33, s. 549–556.
150. Wang Z., Luan W., Huang J., Jiang C., *XRD investigation of microstructure strengthening mechanism of shot peening on laser hardened 17-4PH*, “Materials Science and Engineering A”, 2011, 528, s. 6417–6425.
151. Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J., *Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko*, Poznań, Zakład Poligraficzno-Wydawniczy M- Druk, 2003.
152. Wojciechowski Ł., *Zmiana aktywności chemicznej warstwy wierzchniej stali 45 wskutek nagniatania naporowego*, „Tribologia”, 2007, 3–4, s. 401–409.
153. Wojciechowski Ł., Nosal S., *Wpływ nagniatania naporowego na odporność na zacieranie*, „Tribologia”, 2007, 3–4, s. 411–420.
154. Xie L., Jiang C., Lu W., Zhan K., Chen Y., *Investigation on the residual stress and microstructure of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composite after shot peening*, “Materials Science and Engineering A”, 2011, 528, s. 3423–3427.
155. Xie L., Zhang J., Xiong C., Wu L., Jiang C. Lu W., *Investigation on experiments and numerical modelling of the residual stress distribution in deformed surface layer of Ti-6Al-4V after shot peening*, “Materials and Design”, 2012, 41, s. 314–318.
156. Yilbas B. S., *Laser cutting of thick sheet metals: Effects of cutting parameters on kerf size variations*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2008, 204, s. 285–290.
157. Yilbas B. S., Arif A. F. M., Abdul Aleem B. J., *Laser cutting of holes in thick sheet metals: Development of stress field*, “Optics and Lasers in Engineering”, 2009, 47, s. 909–916.
158. Yilbas B. S., Arif A. F. M., Abdul Aleem B. J., *Laser cutting of rectangular blanks in thick sheet steel: Effect of cutting speed on thermal stresses*, “Journal of Materials Engineering and Performance”, 2010, 19, s. 177–184.

LITERATURA

159. Yilbas B. S., Arif A. F. M., Abdul Aleem B. J., *Laser cutting of sharp edge: Thermal stress analysis*, "Optics and Lasers in Engineering", 2010, 48, s. 10–19.
160. Zaborski S., Stechnij T., *Laserowe i plazmowe cięcie blach ze stali niestopowych i kwasoodpornych*, „Inżynieria Maszyn”, 2011, 4, s. 109–116.
161. Zaborski S., Szpunar P., Poroś D., *Efektywność cięcia laserem blach niestopowych*, „Inżynieria Maszyn”, 2009, Vol. 12, 4, s. 94–102.
162. Zaleski K., *Kształtowanie wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów metalowych w procesie nagniatania dynamicznego rozproszonego*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2008.
163. Zaleski K., *Modelowanie chropowatości powierzchni i stopnia umocnienia warstwy wierzchniej stali 30HGSA po nagniataniu wibracyjnym*, „Mechanik”, 2007, 3, s. 194–198.
164. Zaleski K., *Technologia nagniatania dynamicznego*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2018.
165. Zaleski K., *The effect of vibratory and rotational shot peening and wear on fatigue life of steel*, "Eksploracja i Niezawodność Maintenance and Reliability", 2017, 19, 1, s. 102–107.
166. Zaleski K., *The effect of shot peening on the fatigue life of parts made of titanium alloy Ti-6Al-4V*, „Eksploracja i Niezawodność Maintenance and Reliability”, 2009, 4, s. 64–71.
167. Zaleski K., Lipski J., *Modelowanie za pomocą sieci neuronowej odśrodkowego kulkowania stopu tytanu*, „Przegląd Mechaniczny”, 2006, 12, s. 29–33
168. Zaleski K., Lipski J., *Zastosowanie sieci neuronowej do projektowania procesu technologicznego kulkowania odśrodkowego stopu tytanu*, [W:] Wytwarzanie elementów maszyn ze stopów metali o specjalnych właściwościach, pod red. M. Korzyński, Rzeszów – Bystre, Politechnika Rzeszowska, s. 167–174, 2001.
169. Zaleski K., Skoczylas A., *Struktura geometryczna powierzchni stali po cięciu laserowym i nagniataniu odśrodkowym*, „Przegląd Mechaniczny”, 2015, 6, s. 32–36.
170. Zaleski K., Skoczylas A., *Studies on selected properties of surface layer of C45 steel objects after laser cutting and milling*, "Advances in Science and Technology Research Journal", 2014, Vol. 8, 23, s. 26–32.
171. Zhang T., Bugtai N., Marinescu I. D., *Burnishing of aerospace alloy: A theoretical-experimental approach*, "Journal of Manufacturing Systems", internet available, 2014.
172. Zhan K., Jiang C. H., Ji V., *Effect of prestress state on surface layer characteristic of S30432 austenitic stainless steel in shot peening process*, "Materials and Design", 2012, 42, s. 89–93.

LITERATURA

173. Zhan K., Jiang C.H., Ji V., *Uniformity of residual stress distribution on the surface of S30432 austenitic stainless steel by different shot peening processes*, "Materials Letters", 2013, 99, s. 61–64.
174. Zielecki W., Perłowski R., Trzepieciński T., *Analiza stanu naprężeń w spoinie zakładkowego połączenia klejowego umocnionego metodą pneumatyzacji*, „Technologia i Automatykacja Montażu”, 2007, 1, s. 31–33.
175. Zowczak W., *Wpływ obróbki laserowej na własności mechaniczne elementów konstrukcyjnych*, „Przegląd Mechaniczny”, 1999, Vol. 23-24, 22, s. 27–28.
176. <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>, 15.09.2015.
177. PN-EN 10025-6:2019-11 *Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 6: Warunki techniczne dostawy wyrobów płaskich o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie*
178. PN-EN ISO 683-2:2018-08 *Stale do ulepszania cieplnego. Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy*
179. PN – EN 10149-2:2014-02 *Wyroby płaskie walcowane na gorąco ze stali o podwyższonej granicy plastyczności do obróbki plastycznej na zimno. Część 2: Warunki techniczne dostawy wyrobów walcowanych termomechanicznie*
180. PN-EN ISO 1101:2017-05 *Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS)- Tolerancje geometryczne - Tolerancje kształtu, kierunku, położenia i bicia*
181. PN-EN ISO 4288:2011 *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Struktura geometryczna powierzchni: Metoda profilowa . Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni*
182. PN-EN ISO 4957:2018-09 *Stale narzędziowe*
183. PN-EN ISO 6507-1:2018-05 *Metale -Pomiar twardości sposobem Vickersa- Część 1: Metoda badań*
184. PN-EN ISO 9013:2017-04 *Cięcie termiczne. Klasyfikacja cięcia termicznego. Specyfikacja geometrii wyrobu i tolerancje jakości*
185. PN-EN ISO 17658:2015-06 *Niezgodności w procesach cięcia płomieniowego tlenowo-gazowego, cięcia wiązką laserową i cięcia plazmowego. Terminologia*
186. PN -EN ISO 13565 – 2: 1999 *Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa; powierzchnie o warstwowych właściwościach funkcjonalnych*

Spis rysunków

Rys. 2.1. Tolerancja prostopadłości i zmniejszenia grubości [184].....	17
Rys. 2.2. Odchyłka cięcia n [184]	17
Rys. 2.3. Kształt górnej krawędzi przecinanego elementu [184].....	18
Rys. 2.4. Widok skaningowy powierzchni cięcia blachy ze stali austenitycznej ANSI 308 o grubości 8 mm z wyraźną linią rozdziału powierzchni (BLS) (parametry cięcia: moc wiązki 4 kW, prędkość cięcia 1 m/min, gaz - azot o ciśnieniu 0,48 MPa) [63]	20
Rys. 2.5. Interpretacja powstawania prążka podczas cięcia laserem stali [10].....	21
Rys. 3.1. Model obiektu badań.....	36
Rys. 3.2. Widok powierzchni przecięcia z zaznaczonymi miejscami pomiaru chropowatości	39
Rys. 3.3. Metodyka wyznaczania grubości warstwy umocnionej g_n [122].....	40
Rys. 3.4. Wysokorozdzielczy dyfraktometr rentgenowski Empyrean: a) widok ogólny, b) układ pomiarowy	41
Rys. 3.5. Schemat stanowiska do trawienia chemicznego.....	42
Rys. 3.6. Widok stanowiska do badania nachylenia powierzchni	44
Rys. 3.7. Widok stanowiska do wyznaczania nachylenia powierzchni	45
Rys. 3.8. Przykładowy kontur powierzchni stali C45 po cięciu laserem.....	45
Rys. 3.9. Schemat procesu frezowania: N – narzędzie, PO – przedmiot obrabiany, a_p – głębokość skrawania, b – szerokość próbki, h – wysokość próbki	46
Rys. 3.10. Schemat procesu nagniatania na pionowym centrum obróbkowym (1 – próbka, 2 – uchwyt, 3 – imadło, 4 – głowica nagniatająca): a) kinematyka nagniatania, b) widok stanowiska	47
Rys. 3.11. Graficzna interpretacja dosuwu g (1 – próbka, 2 – uchwyt, 3 – imadłem 4 – głowica nagniatająca) (g – dosuw, R_{max} – maksymalny promień głowicy, v_g – prędkość obwodowa głowicy, v_f – prędkość posuwu, n – prędkość obrotowa) [121]	48
Rys. 3.12. Schemat procesu nagniatania tocznego: 1 – próbka, 2 – uchwyt, 3 – nagniatak, 4 – imak narzędziowy	49
Rys. 5.1. Parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz próbek po cięciu laserem.....	53
Rys. 5.2. Parametry chropowatości Rpk , Rk , Rvk próbek po cięciu laserem	53
Rys. 5.3. Topografia powierzchni stali C45 po cięciu laserem.....	54
Rys. 5.4. Przykładowe profilogramy powierzchni po cięciu laserem: a) strefa wejścia - $Ra = 2,3$ μm , $Rz = 16 \mu\text{m}$, $RSm = 160 \mu\text{m}$, b) strefa wyjścia - $Ra = 3,39 \mu\text{m}$, $Rz = 31,08 \mu\text{m}$, $RSm =$ $240 \mu\text{m}$	55
Rys. 5.5. Parametr chropowatości powierzchni Ra i Rz próbek po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym.....	56
Rys. 5.6. Parametr chropowatości powierzchni Rpk , Rk , Rvk próbek po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym	56
Rys. 5.7. Topografia powierzchni stali C45 po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym....	57
Rys. 5.8. Przykładowe profilogramy powierzchni stali C45 po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym: a) strefa wejścia $Ra = 0,19 \mu\text{m}$, $Rz = 0,81 \mu\text{m}$, b) strefa wyjścia $Ra = 0,37 \mu\text{m}$, $Rz = 1,65 \mu\text{m}$	57
Rys. 5.9. Chropowatość powierzchni po frezowaniu próbek nie wycinanych laserem	58
Rys. 5.10. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648 \text{ mm/min}$, $f_p = 0,08 \text{ mm}$, $i = 1$)	60
Rys. 5.11. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835 \text{ m/min}$, $f_p = 0,08 \text{ mm}$, $i = 1$)	61

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 5.12. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry chropowości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3684$ mm/min, $i = 1$)	61
Rys. 5.13. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$) . 63	
Rys. 5.14. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	64
Rys. 5.15. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ m/min, $i = 1$)	65
Rys. 5.16. Wpływ prędkości obwodowej v_g na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	66
Rys. 5.17. Wpływ prędkości posuwu v_f na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	66
Rys. 5.18. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)	67
Rys. 5.19. Wpływ liczby przejść i na parametry chropowości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm) .	67
Rys. 5.20. Wpływ liczby przejść i na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm) 68	
Rys. 5.21. Wpływ liczby przejść i na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm)	68
Rys. 5.22. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry chropowości Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	70
Rys. 5.23. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry chropowości Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	71
Rys. 5.24. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry chropowości Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)	71
Rys. 5.25. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	73
Rys. 5.26. Wpływ prędkości obwodowej v_g na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	74
Rys. 5.27. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	75
Rys. 5.28. Wpływ prędkości posuwu v_f na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	75
Rys. 5.29. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3684$ mm/min, $i = 1$)	76
Rys. 5.30. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)	76
Rys. 5.31. Wpływ siły nagniatania F na parametry chropowości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	77

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 5.32. Wpływ posuwu f na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	78
Rys. 5.33. Wpływ średnicy kulki d_N na parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$)	79
Rys. 5.34. Topografia powierzchni próbek po cięciu laserem i nagniataniu tocznym ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$): a) $d_N = 8$ mm, b) $d_N = 12$ mm	79
Rys. 5.35. Wpływ liczby przejść i na parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($d_N = 8$ mm, $F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr)	80
Rys. 5.36. Wpływ siły nagniatania F na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	81
Rys. 5.37. Wpływ siły nagniatania F na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	81
Rys. 5.38. Wpływ posuwu f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	82
Rys. 5.39. Wpływ posuwu f na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	82
Rys. 5.40. Wpływ średnicy kulki d_N na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$)	83
Rys. 5.41. Wpływ średnicy d_N na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,05$ mm/obr, $F = 720$ N, $i = 1$)	84
Rys. 5.42. Wpływ liczby przejść i na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,05$ mm/obr, $F = 720$ N, $d_N = 8$ mm)	85
Rys. 5.43. Wpływ liczby przejść i na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $d_N = 8$ mm)	85
Rys. 5.44. Wpływ siły nagniatania F na parametry chropowatości powierzchni Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	86
Rys. 5.45. Wpływ posuwu f na parametry chropowatości Ra i Rz próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	87
Rys. 5.46. Wpływ siły nagniatania F na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	88
Rys. 5.47. Wpływ siły nagniatania F na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	88
Rys. 5.48. Wpływ posuwu f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	89
Rys. 5.49. Wpływ posuwu f na udział materiałowy Rmr próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	90
Rys. 5.50. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry chropowatości Ra i Rz próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	90
Rys. 5.51. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry chropowatości Ra i Rz próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	91
Rys. 5.52. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry chropowatości Ra i Rz próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)	92
Rys. 5.53. Topografia powierzchni próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo: a) $v_g = 528$ m/min, b) $v_g = 1143$ m/min ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	92

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 5.54. Wpływ prędkości obwodowej v_g na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo: a) parametr Rvk , b) parametr Rk , c) parametr Rpk ($v_g = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	93
Rys. 5.55. Wpływ prędkości posuwu v_f na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo: a) parametr Rvk , b) parametr Rk , c) parametr Rpk ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	94
Rys. 5.56. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na parametry krzywej Abbotta-Firestone'a próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo: a) parametr Rvk , b) parametr Rk , c) parametr Rpk ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ m/min, $i = 1$)	95
Rys. 5.57. Udział materiałowy profilu chropowatości powierzchni Rmr próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo w funkcji: a) prędkości obwodowej v_g ($v_f = 3648$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$), b) prędkości posuwu v_f ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$), c) przesuwu poprzecznego f_p ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ m/min, $i = 1$).....	96
Rys. 5.58. Mikrostruktura stali C45: a) przed cięciem laserem, b) SWC i strefa przejściowa po cięciu laserem, c) SWC po cięciu laserem	98
Rys. 5.59. Rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej stali C45 po cięciu laserem	99
Rys. 5.60. Dyfraktogram otrzymany po analizie powierzchni próbki stali C45 po cięciu laserem z dopasowanymi refleksami teoretycznymi	100
Rys. 5.61. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym: a) wydłużone ziarna, b) obszar wpływu obróbki frezowaniem.....	100
Rys. 5.62. Rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej stali C45 po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym.....	101
Rys. 5.63. Mikrostruktura stali C45 nie wycinanej laserem, po frezowaniu ($v_c = 102$ m/min, $f_c = 0,067$ mm/ostrze, $a_p = 0,12$ mm)	102
Rys. 5.64. Rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej stali C45 nie wycinanej laserem, po frezowaniu ($v_c = 102$ m/min, $f_c = 0,067$ mm/ostrze, $a_p = 0,12$ mm).....	102
Rys. 5.65. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 1143$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$): a) obszar krawędzi, b) obszar wpływu obróbki nagniataniem.....	103
Rys. 5.66. Dyfraktogram otrzymany po analizie powierzchni próbki stali C45 po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym z dopasowanymi refleksami teoretycznymi ($v_g = 989$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 3$).....	103
Rys. 5.67. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia v_g na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	104
Rys. 5.68. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia v_g na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	105
Rys. 5.69. Wpływ prędkości posuwu v_f na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	105
Rys. 5.70. Wpływ prędkości posuwu v_f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	106
Rys. 5.71. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$).....	106
Rys. 5.72. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)	107
Rys. 5.73. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 1143$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$): a) obszar wpływu zastosowanej technologii oraz materiał rdzenia, b) obszar w pobliżu krawędzi	107

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 5.74. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia v_g na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	108
Rys. 5.75. Wpływ prędkości obwodowej narzędzia v_g na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	109
Rys. 5.76. Wpływ prędkości posuwu v_f na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	109
Rys. 5.77. Wpływ prędkości posuwu v_f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	110
Rys. 5.78. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$)	110
Rys. 5.79. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$).....	111
Rys. 5.80. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem i nagniataniu tocznym ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$, $d_N = 8$ mm): a) obszar wypływu obróbki oraz materiał rdzenia, b) obszar wpływu obróbki	111
Rys. 5.81. Wpływ siły nagniatania F na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$).....	112
Rys. 5.82. Wpływ siły nagniatania F na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$).....	112
Rys. 5.83. Wpływ posuwu nagniatania f na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	113
Rys. 5.84. Wpływ posuwu f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	113
Rys. 5.85. Mikrostruktura stali C45 po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu tocznym ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$, $d_N = 8$ mm): a) obszar wpływu obróbki oraz materiał rdzenia, b) obszar wpływu obróbki.....	114
Rys. 5.86. Wpływ siły nagniatania F na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$) 115	115
Rys. 5.87. Wpływ siły nagniatania F na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$).....	115
Rys. 5.88. Wpływ posuwu nagniatania f na stopień umocnienia e próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	116
Rys. 5.89. Wpływ posuwu nagniatania f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	116
Rys. 5.90. Mikrostruktura stali C45 nie wycinanej laserem, frezowanej i nagniatanej odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 1368$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$): a) strefa wpływu obróbki i rdzeń, b) strefa wpływu obróbki	117
Rys. 5.91. Wpływ prędkości obwodowej v_g na stopień umocnienia e próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	117
Rys. 5.92. Wpływ prędkości obwodowej v_g na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	118

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 5.93. Wpływ prędkości posuwu v_f na stopień umocnienia próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g=835$ m/min, $f_p=0,08$ mm, $i=1$).....	118
Rys. 5.94. Wpływ prędkości posuwu v_f na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g=835$ m/min, $f_p=0,08$ mm, $i=1$).....	119
Rys. 5.95. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na stopień umocnienia e próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g=835$ m/min, $v_f=3648$ mm/min, $i=1$).....	119
Rys. 5.96. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na grubość warstwy utwardzonej g_h próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo ($v_g=835$ m/min, $v_f=3648$ mm/min, $i=1$).....	120
Rys. 5.97. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem.....	122
Rys. 5.98. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i frezowanych wykończeniowo.....	122
Rys. 5.99. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek nie wycinanych laserem, frezowanych ($v_c=102$ m/min, $f_c=0,067$ mm/ostrze, $a_p=0,12$ mm).....	123
Rys. 5.100. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości obwodowej v_g ($v_f=3648$ mm/min, $f_p=0,08$ mm, $i=1$): a) $v_g=528$ m/min, b) $v_g=835$ m/min, c) $v_g=1143$ m/min.....	124
Rys. 5.101. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości posuwu v_f ($v_g=835$ mm/min, $f_p=0,08$ mm, $i=1$): a) $v_f=1368$ mm/min, b) $v_f=10488$ mm/min.....	125
Rys. 5.102. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennym przesuwie poprzecznym f_p ($v_g=835$ mm/min, $v_f=3648$ mm/min, $i=1$): a) $f_p=0,03$ mm, b) $f_p=0,23$ mm.....	125
Rys. 5.103. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości obwodowej v_g ($v_f=3648$ mm/min, $f_p=0,08$ mm, $i=1$): a) $v_g=528$ m/min, b) $v_g=989$ m/min.....	126
Rys. 5.104. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości posuwu v_f ($v_g=835$ mm/min, $f_p=0,08$ mm, $i=1$): a) $v_f=3648$ mm/min, b) $v_f=8208$ mm/min.....	126
Rys. 5.105. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie przy zmiennej sile nagniatania F ($f=0,17$ mm/obr, $d_N=16$ mm, $i=1$): a) $F=300$ N, b) $F=510$ N, c) $F=720$ N, d) $F=930$ N.....	127
Rys. 5.106. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie przy zmiennym posuwie f ($F=720$ N, $d_N=16$ mm, $i=1$): a) $f=0,05$ mm/obr, b) $f=0,28$ mm/obr, c) $f=0,4$ mm/obr.....	128
Rys. 5.107. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie przy zmiennej sile nagniatania F ($f=0,17$ mm/obr, $d_N=8$ mm, $i=1$): a) $F=300$ N, b) $F=510$ N, c) $F=720$ N, d) $F=930$ N.....	129
Rys. 5.108. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie przy zmiennym posuwie f ($F=720$ N, $d_N=8$ mm, $i=1$): a) $f=0,05$ mm/obr, b) $f=0,28$ mm/obr, c) $f=0,4$ mm/obr.....	130
Rys. 5.109. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennej prędkości	

SPIS RYSUNKÓW

obwodowej v_g ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$): a) $v_g = 528$ m/min, b) $v_g = 835$ m/min, c) $v_g = 1143$ m/min.....	131
Rys. 5.110. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowoprzy zmiennej prędkości posuwu v_f ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$): a) $v_f = 1368$ mm/min, b) $v_f = 10488$ mm/min.....	131
Rys. 5.111. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni próbek nie wycinanych laserem, frezowanych i nagniatanych odśrodkowo przy zmiennym przesuwie poprzecznym f_p ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$): a) $f_p = 0,03$ mm, b) $f_p = 0,23$ mm.....	132
Rys. 5.112. Kontur powierzchni po cięciu laserem ($u = 0,21$ mm, kąt ukosu = $1,51^\circ$).....	134
Rys. 5.113. Widok powierzchni po cięciu laserem: a) w strefie wejścia wiązki lasera, b) w strefie wyjścia wiązki lasera.....	134
Rys. 5.114. Wpływ prędkości obwodowej v_g na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	135
Rys. 5.115. Wpływ prędkości posuwu v_f na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,8$ mm, $i = 1$).....	136
Rys. 5.116. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$).....	136
Rys. 5.117. Wpływ prędkości obwodowej v_g na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	137
Rys. 5.118. Wpływ prędkości posuwu v_f na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,8$ mm, $i = 1$).....	138
Rys. 5.119. Wpływ przesuwu poprzecznego f_p na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych odśrodkowo ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$).....	138
Rys. 5.120. Wpływ siły nagniatania F na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$).....	139
Rys. 5.121. Wpływ posuwu nagniatania f na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$).....	140
Rys. 5.122. Wpływ średnicy kulki d_N na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$).....	140
Rys. 5.123. Wpływ siły nagniatania F na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$).....	141
Rys. 5.124. Wpływ posuwu nagniatania f na nachylenie powierzchni u_{OB} próbek wycinanych laserem, frezowanych wykończeniowo i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$).....	141

Spis tabel

Tabela 2.1. Dopuszczalna tolerancja prostopadłości lub nachylenia u oraz średnia wysokość profilu $Rz5$ dla ciętych laserowo powierzchni blach metalowych w oparciu o PN-EN ISO 9013:2017-04 [184]	18
Tabela 2.2. Dopuszczalne zmniejszenie grubości przecinanego elementu Δa w oparciu o PN-EN ISO 9013:2017-04	18
Tabela 3.1. Procentowy skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe stali C45	38
Tabela 3.2. Parametry wycinania laserem próbek wykorzystywanych w badaniach.....	38
Tabela 3.3. Zestaw parametrów technologicznych zastosowanych w próbach nagniatania	48
Tabela 3.4. Zestawy parametrów technologicznych zastosowanych w próbach nagniatania	49
Tabela 4.1. Wyniki badań wstępnych chropowatości powierzchni w celu wyznaczenia liczebności próby.....	51
Tabela 4.2. Wyniki badań wstępnych stopnia umocnienia e i nachylenia powierzchni u_{OB} w celu wyznaczenia liczebności próby.....	51
Tabela 4.3. Wyniki badań wstępnych chropowatości powierzchni, stopnia umocnienia i nachylenia powierzchni u_{OB} w celu wyznaczenia liczebności próby	52
Tabela 5.1. Krzywa udziału materiałowego po cięciu laserem: a) strefa wejścia, b) strefa wyjścia.....	55
Tabela 5.2. Krzywa udziału materiałowego po cięciu laserem i frezowaniu wykończeniowym: a) strefa wejścia, b) strefa wyjścia	58
Tabela 5.3. Topografia powierzchni (a), krzywa Abbotta-Firestone'a (b) oraz profil powierzchni (c) po frezowaniu próbek nie wycinanych laserem.....	59
Tabela 5.4. Topografia powierzchni próbek po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym: a) $v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$, b) $v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm, $i = 1$	62
Tabela 5.5. Profilogramy powierzchni próbek po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym: a) $v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$ b) $v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,03$ mm, $i = 1$	63
Tabela 5.6. Topografia powierzchni po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 1143$ m/min, $v_f = 3648$ m/min, $f_p = 0,08$ mm): a) $i = 1$, b) $i = 5$	69
Tabela 5.7. Topografia (a) i profile powierzchni (b) po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	72
Tabela 5.8. Dane zidentyfikowanych związków na podstawie dyfraktogramu otrzymanego po analizie powierzchni próbki stali C45 po cięciu laserem	99
Tabela 5.9. Dane zidentyfikowanych faz na podstawie dyfraktogramu otrzymanego po analizie powierzchni próbki stali C45 po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym	104
Tabela 6.1. Matryca planowania programu statystycznego randomizowanego kompletnego [66]	144
Tabela 6.2. Wyniki badań normalności rozkładu parametrów chropowatości powierzchni Ra i Rz po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym testem Shapiro – Wilka przy zmiennej prędkości obwodowej v_g ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	145
Tabela 6.3. Parametr Ra dla strefy wejścia po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$)	145
Tabela 6.4. Wyniki analizy istotności wpływu prędkości obwodowej v_g na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	147

SPIS TABEL

Tabela 6.5. Wyniki analizy istotności wpływu prędkości posuwu v_f na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 835$ m/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	147
Tabela 6.6. Wyniki analizy istotności wpływu przesuwu poprzecznego f_p na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $i = 1$).....	148
Tabela 6.7. Wyniki analizy istotności wpływu liczby przejść i na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm).....	148
Tabela 6.8. Wyniki analizy istotności wpływu obróbki poprzedzającej na wybrane wskaźniki obróbki ($v_g = 835$ m/min, $v_f = 1368$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $i = 1$).....	149
Tabela 6.9. Wyniki analizy istotności wpływu siły nagniatania F na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm, $i = 1$)	150
Tabela 6.10. Wyniki analizy istotności wpływu posuwu f na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $d_N = 8$ mm, $i = 1$) ..	150
Tabela 6.11. Wyniki analizy istotności wpływu średnicy kulki d_N na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,05$ mm/obr, $i = 1$)	151
Tabela 6.12. Wyniki analizy istotności wpływu liczby przejść i na wybrane wskaźniki obróbki dla elementów wycinanych laserem i nagniatanych tocznie ($F = 720$ N, $f = 0,17$ mm/obr, $d_N = 8$ mm).....	151