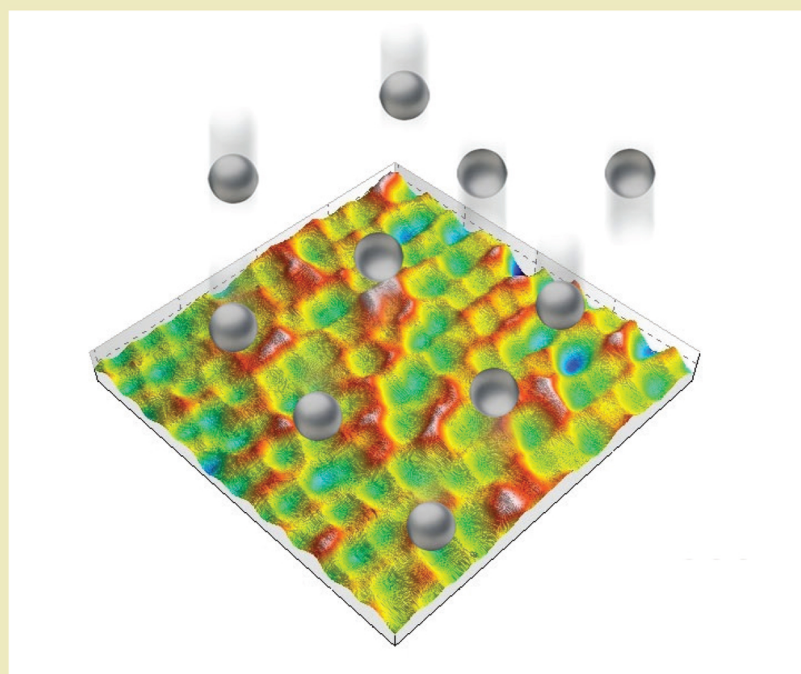




Kazimierz Zaleski

Technologia nagniatania dynamicznego



MONOGRAFIE

Technologia nagniatania dynamicznego

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Kazimierz Zaleski

Technologia nagniatania dynamicznego



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2018

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Leon Kukiełka, Politechnika Koszalińska

prof. dr hab. inż. Andrzej Gontarz, Politechnika Lubelska

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2018

ISBN: 978-83-7947-346-5

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

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

Nakład: 100 egz.

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I AKRONIMÓW	9
PRZEDMOWA.....	11
1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO.....	13
1.1. OBRÓBKA NAGNIATANIEM W PROCESACH WYTWARZANIA	13
1.2. RYS HISTORYCZNY NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO	15
1.3. KLASYFIKACJA NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO	17
1.4. KSZTAŁTOWANIE WARSTWY WIERZCHNIEJ PRZEDMIOTÓW NAGNIATANYCH DYNAMICZNIE.....	19
1.4.1. Budowa i właściwości warstwy wierzchniej.....	19
1.4.2. Oddziaływanie elementu nagniatającego na warstwę wierzchnią obrabianego przedmiotu	21
1.5. ELEMENTY NAGNIATAJĄCE	25
1.6. CIECZE OBRÓBKOWE W NAGNIATANIU DYNAMICZNYM.....	27
1.6.1. Rola cieczy obróbkowych w procesie nagniatania dynamicznego	27
1.6.2. Wpływ grubości rozciąganej folii na współczynnik oddziaływania powierzchniowo aktywnego	32
1.6.3. Wpływ dodatków powierzchniowo aktywnych na stopień umocnienia warstwy wierzchniej	34
2. METODY OCENY SKUTKÓW NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO.....	35
2.1. BIEŻĄCA OCENA PRZEBIEGU NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO.....	35
2.2. POMIAR INTENSYWNOŚCI NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO ZA POMOCĄ PŁYTEK KONTROLNYCH ..	36
2.3. OCENA STOPNIA POKRYCIA NAGNIATANEJ POWIERZCHNI	37
2.4. BADANIA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI PO NAGNIATANIU DYNAMICZNYM.....	39
2.5. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH WARSTWY WIERZCHNIEJ PRZEDMIOTÓW NAGNIATANYCH DYNAMICZNIE.....	43
2.5.1. Badania struktury metalograficznej i mikrotwardości warstwy wierzchniej	43
2.5.2. Badania naprężeń własnych	44
2.6. BADANIA WARSTWY WIERZCHNIEJ TECHNIKAMI WYKORZYSTUJĄCYMI ANIHILACJĘ POZYTONÓW.....	49
2.6.1. Badania rozkładu kąтового kwantów gamma pochodzących z anihilacji dwukwantowej.....	49
2.6.2. Badania czasu życia pozytonów	50
2.7. OCENA EFEKTYWNOŚCI NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO W ASPEKTCIE WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH OBRABIANYCH PRZEDMIOTÓW.....	51

2.7.1. Metody badań wpływu nagniatania dynamicznego na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową	51
2.7.2. Metody badań wpływu nagniatania dynamicznego na zużycie tribologiczne	53
3. NAGNIATANIE SKONCENTROWANE	57
3.1. NAGNIATANIE IMPULSOWE	57
3.1.1. Nagniatanie impulsowe obrotowe	57
3.1.2. Nagniatanie impulsowe narzędziami z mechanizmem krzywkowym	60
3.1.3. Elektromagnetyczne, piezoelektryczne i pneumatyczne nagniatanie impulsowe	69
3.2. NAGNIATANIE ODŚRODKOWE	72
3.2.1. Kinematyka i parametry nagniatania odśrodkowego	72
3.2.2. Narzędzia do nagniatania odśrodkowego	81
3.2.3. Właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów po nagniataniu odśrodkowym	83
4. NAGNIATANIE ROZPROSZONE	95
4.1. NAGNIATANIE STRUMIENIOWE	95
4.1.1. Nagniatanie strumieniowe wirnikowe	96
4.1.2. Nagniatanie strumieniowe pneumatyczne	100
4.1.3. Właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów nagniatanych strumieniowo	104
4.2. NAGNIATANIE WIBRACYJNE	110
4.2.1. Kinematyka oraz warunki technologiczne nagniatania wibracyjnego	110
4.2.2. Właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów nagniatanych wibracyjnie	117
4.2.3. Badania efektów nagniatania wibracyjnego technikami anihilacyjnymi	126
4.2.4. Nagniatanie wibracyjno-rotacyjne	128
4.2.5. Nagniatanie wibracyjne w podwyższonej temperaturze	130
4.3. KONTROLOWANE NAGNIATANIE DYNAMICZNE ROZPROSZONE	131
4.3.1. Metoda kontrolowanego nagniatania dynamicznego rozproszonego	131
4.3.2. Wpływ energii uderzenia i gęstości uderzeń na chropowatość powierzchni	133
4.3.3. Wpływ energii uderzenia i gęstości uderzeń na mikrotwardość oraz naprężenia własne	134

5. SZCZOTKOWANIE NAGNIATAJĄCE.....	139
5.1. KINEMATYKA I PARAMETRY SZCZOTKOWANIA.....	139
5.2. NARZĘDZIA I TECHNOLOGIA SZCZOTKOWANIA	141
5.3. WPŁYW SZCZOTKOWANIA NAGNIATAJĄCEGO NA WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ OBRABIANYCH PRZEDMIOTÓW	147
6. WPŁYW NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE ELEMENTÓW MASZYN.....	151
6.1. WYTRZYMAŁOŚĆ I TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA	151
6.2. ZUŻYCIE TRIBOLOGICZNE.....	160
6.3. ZUŻYCIE I TRWAŁOŚĆ NARZĘDZI	164
6.4. KOROZJA	166
6.5. INNE WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO.....	168
LITERATURA	171
STRESZCZENIE	184
ABSTRACT	185

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I AKRONIMÓW

Symbole

a	– amplituda drgań,
a_s	– odległość między śladami uderzeń,
D	– średnica elementu nagniatającego,
E_u	– energia uderzenia,
E	– moduł Younga,
e	– stopień umocnienia warstwy wierzchniej,
f	– posuw, strzałka ugięcia
f_A, f_C, f_N	– intensywność nagniatania dynamicznego,
g	– dosuw,
g_H	– głębokość warstwy utwardzonej,
g_σ	– głębokość zalegania ściskających naprężeń własnych,
$g_{\sigma m}$	– odległość od powierzchni do punktu o maksymalnej wartości bezwzględnej ściskających naprężeń własnych,
HV	– twardość Vickersa,
j	– gęstość uderzeń,
K_o	– stopień pokrycia nagniatanej powierzchni,
n	– prędkość obrotowa,
p	– podziałka poprzeczna, ciśnienie powietrza,
p_a	– współczynnik oddziaływania powierzchniowo aktywnego,
R	– współczynnik restytucji,
R_a	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,
R_k	– głębokość rdzenia chropowatości,
R_{pk}	– zredukowana wysokość wzniesień profilu chropowatości,
R_{vk}	– zredukowana głębokość wgłębień profilu chropowatości,
R_z	– największa wysokość profilu chropowatości,
S	– suma zliczeń koincydencji w części centralnej krzywej rozkładu kąтового promieniowania anihilacyjnego,
t	– czas nagniatania, podziałka,
v_o	– prędkość obwodowa narzędzia,
v_n	– prędkość w kierunku normalnym do obrabianej powierzchni,
w	– wcisk elementu nagniatającego,
W	– suma zliczeń koincydencji w częściach skrzydłowych krzywej rozkładu kąтового promieniowania anihilacyjnego,
α	– kąt uderzenia,
σ_{wm}	– ściskające naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej,
σ_{wp}	– naprężenia własne bezpośrednio pod powierzchnią przedmiotu,
σ_w	– naprężenia własne,
v	– częstotliwość drgań.

Akronimy

KNDR	– kontrolowane nagniatanie dynamiczne rozproszone,
MES	– metoda elementów skończonych,
ND	– nagniatanie dynamiczne,
NDR	– nagniatanie dynamiczne rozproszone,
NDRS	– nagniatanie dynamiczne rozproszone strumieniowe,
NDRW	– nagniatanie dynamiczne rozproszone wibracyjne,
NDS	– nagniatanie dynamiczne skoncentrowane,
NDSI	– nagniatanie dynamiczne skoncentrowane impulsowe,
NDSO	– nagniatanie dynamiczne skoncentrowane odśrodkowe,
NDSz	– szczotkowanie nagniatające,
SGP	– struktura geometryczna powierzchni,
SSN	– sztuczne sieci neuronowe,
SWC	– strefa wpływu ciepła,
WW	– warstwa wierzchnia.

PRZEDMOWA

Stosowana od kilkudziesięciu lat obróbka umacniająca nagniataniem dynamicznym jest technologią ciągle rozwijającą się, o czym świadczy duża liczba ciągle publikowanych prac. Do państw przodujących pod względem prowadzonych badań procesu nagniatania dynamicznego należy zaliczyć Japonię, Stany Zjednoczone, Niemcy, Wielką Brytanię. Technologia ta stosowana jest w wielu zakładach przemysłowych, szczególnie w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i zbrojeniowym. Głównym celem stosowania nagniatania dynamicznego jest osiągnięcie zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej wytwarzanych części maszyn, co zostało wykazane w licznych badaniach. Struktura geometryczna powierzchni obrobionych nagniataniem dynamicznym ułatwia utrzymanie środka smarnego między współpracującymi ślizgowo częściami maszyn, co wpływa na zmniejszenie zużycia tribologicznego.

Małe wymiary elementów nagniatających oraz niewielkie siły występujące w procesie nagniatania dynamicznego umożliwiają obróbkę cienkościennych części maszyn o złożonym kształcie. Takie części stosowane są w maszynach transportowych, szczególnie w samolotach i śmigłowcach, ze względu na dążenie do zmniejszenia masy tych maszyn. Mając na uwadze, że części maszyn często narażone są na obciążenia zmienne należy uznać, że nagniatanie dynamiczne jest ważnym sposobem zwiększania ich trwałości eksploatacyjnej.

Prowadzone w wielu krajach badania koncentrują się na wprowadzaniu nowych sposobów nagniatania dynamicznego, ocenie wpływu parametrów technologicznych na stan warstwy wierzchniej i cechy użytkowe obrabianych przedmiotów, badaniach efektywności nagniatania nowych materiałów wprowadzanych do budowy maszyn. Szereg prac poświęconych jest możliwości łączenia nagniatania z innymi technologiami, takimi jak obróbka cieplna i cieplno – chemiczna, nagniatanie statyczne, implantacja jonów i inne. Dostępne są materiały na temat nagniatania dynamicznego połączeń spawanych, a w ostatnich latach pojawiły się prace poświęcone nagniataniu dynamicznemu części wykonanych technologią przyrostową.

Monografia została opracowana, w dużym stopniu, na podstawie 40-letnich badań autora. Wyniki tych badań zostały przedstawione w około 70- ciu publikacjach (autorskich i współautorskich), z których ponad 50 zacytowano w monografii. Tematyka badań własnych obejmowała, między innymi, badania wpływu nagniatania wibracyjnego stali i stopu tytanu na właściwości warstwy wierzchniej, opracowanie metody fizycznego modelowania procesu nagniatania dynamicznego rozproszonego oraz metody oceny właściwości powierzchniowo aktywnych cieczy obróbkowych, badania wpływu nagniatania dynamicznego na zużycie narzędzi skrawających, ocena stanu warstwy wierzchniej stali stopowych i niestopowych, stopów tytanu, aluminium i niklu po nagniataniu dynamicznym różnymi sposobami, badania wpływu nagniatania wibracyjnego oraz nagniatania wibracyjno-rotacyjnego i zużywania na trwałość zmęczeniową, ba-

dania możliwości oceny efektów nagniatania dynamicznego metodą anihilacji pozytonów (we współpracy z Instytutem Fizyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie). W ramach projektu kluczowego „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” przeprowadzono badania stanu warstwy wierzchniej stopów aluminium i magnezu po usuwaniu zadziorów metodą szczotkowania, na podstawie których opracowana została pod opieką naukową autora rozprawa doktorska dr. inż. Jakuba Matuszaka. W ostatnich latach widoczny jest intensywny rozwój technologii cięcia laserowego, jednakże powierzchnie po tym cięciu wymagają, na ogół, obróbki wykończeniowej. Pracę doktorską na temat efektywności nagniatania odśrodkowego powierzchni przedmiotów wyciętych laserem zrealizowała pod opieką naukową autora dr inż. Agnieszka Skoczylas.

W ostatnim czasie opublikowane zostały liczne artykuły na temat laserowego umacniania części maszyn (laser shot peening). Biorąc pod uwagę odmienny charakter tej obróbki umacniającej w porównaniu z nagniataniem dynamicznym, tematyka ta została pominięta w monografii.

Autor ma nadzieję, że monografia spotka się z zainteresowaniem inżynierów pracujących w zakładach przemysłu maszynowego, zwłaszcza tych, którzy zajmują się obróbką wykończeniową części maszyn, a także pracowników i studentów wydziałów mechanicznych wyższych uczelni technicznych.

Autor wyraża podziękowania wszystkim, którzy przyczynili się do powstania monografii w jej obecnej formie, a szczególnie Koleżankom i Kolegom z Katedry Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO

1.1. Obróbka nagniataniem w procesach wytwarzania

W procesie produkcyjnym muszą być spełnione określone wymagania odnośnie do jakości wytwarzanych przedmiotów. Jakość ta, nazywana jakością technologiczną, określana jest przez zespół właściwości przedmiotu, do których zalicza się właściwości materiału, dokładność wymiarów i kształtu oraz właściwości warstwy wierzchniej. Korzystne ze względu na jakość przedmiotu właściwości warstwy wierzchniej można ukształtować w procesie obróbki nagniataniem.

Nagniatanie polega na wywieraniu nacisku na powierzchnię obrabianego przedmiotu gładkim i twardym elementem nagniatającym, stanowiącym część roboczą narzędzia nagniatającego, lub uderzaniu w tę powierzchnię elementami nagniatającymi. Elementy nagniatające najczęściej mają kształt kuli, walca, stożka, bryły złożonej z walca i stożka, wycinka kuli, wycinka torusa. W procesie nagniatania następują zmiany struktury geometrycznej powierzchni oraz odkształcenia plastyczne materiału warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu.

W zależności od głównego celu, jaki zamierza się osiągnąć, obróbkę nagniataniem dzieli się na [126]:

- 1) gładkościową, stosowaną w celu zmniejszenia chropowatości powierzchni,
- 2) umacniającą, mającą na celu ukształtowanie wymaganych właściwości warstwy wierzchniej,
- 3) wymiarowo-gładkościową, której celem jest zwiększenie dokładności wymiarowo-kształtowej nagniatanego przedmiotu oraz zmniejszenie chropowatości powierzchni.

Najczęściej osiągnany jest cel pierwszy i drugi, osiągnięcie trzeciego celu wymaga użycia narzędzi ze sztywnym dociskiem.

Ze względu na rodzaj oddziaływania elementów nagniatających na powierzchnię obrabianego przedmiotu, nagniatanie dzieli się na statyczne i dynamiczne.

Nagniatanie statyczne charakteryzuje się występowaniem stałej (w przybliżeniu) siły, z jaką element nagniatający oddziałuje na obrabianą powierzchnię. W zależności od kształtu elementu nagniatającego oraz rodzaju tarcia między elementem nagniatającym a obrabianym przedmiotem rozróżnia się nagniatanie toczne oraz ślizgowe. Nagniataniem tocznym nazywane są te odmiany nagniatania statycznego, podczas których element nagniatający w kształcie bryły obrotowej (kulka, krążek, rolka) wykonuje ruch obrotowy i toczy się po powierzchni obrabianego przedmiotu. Natomiast nagniatanie ślizgowe zachodzi wówczas, gdy pomiędzy elementem nagniatającym, najczęściej w kształcie wycinka kuli

lub torusa (może też być kula, ale nieobracająca się), a przedmiotem występuje tarcie ślizgowe.

Nagniatanie toczne, stosowane jako obróbka umacniająca, umożliwia ukonstytuowanie w warstwie wierzchniej obrabianych przedmiotów ściskających naprężeń własnych o dużej wartości (kilkuset a nawet powyżej 1000 MPa), zalegających na głębokości, zwykle, od kilku dziesiątych milimetra do kilku milimetrów. Podobnie, następuje też znaczny wzrost twardości warstwy wierzchniej. Osiągnięcie tak dużych zmian właściwości warstwy wierzchniej wymaga użycia dużych sił nagniatających, co wiąże się z koniecznością posiadania bardzo sztywnej maszyny technologicznej. Nagniatanie toczne może być również zastosowane jako obróbka gładkościowa. W takim przypadku stosuje się mniejszą siłę nagniatania i posuw oraz, na ogół, narzędzia z mniejszymi elementami nagniatającymi. Do obróbki wymiarowo – gładkościowej nagniataniem tocznym stosowane są narzędzia ze sztywnym dociskiem elementu nagniatającego do obrabianej powierzchni, co wiąże się z tym, że nie nastawia się wartości siły nagniatania tylko wartość wcisku elementu nagniatającego w obrabiany materiał.

Nagniatanie ślizgowe obejmuje wygładzanie powierzchni za pomocą narzędzi, najczęściej z elementami nagniatającymi w kształcie wycinka kuli, wykonanymi z kompozytów diamentowych, rzadziej z węglików spiekanych, oraz przetłaczanie ślizgowe otworów [126]. Wygładzanie ślizgowe jest obróbką gładkościową, gdyż małe wartości promienia elementu nagniatającego powodują, że umocnienie materiału występuje na niewielkiej głębokości [64].

Nagniatanie dynamiczne, charakteryzujące się uderzeniowym oddziaływaniem elementów nagniatających na obrabianą powierzchnię, zwykle stosowane jest jako obróbka umacniająca. Głównym celem tego nagniatania jest ukonstytuowanie w warstwie wierzchniej (WW) ściskających naprężeń własnych oraz utwardzenie tej warstwy. Takie zmiany stanu warstwy wierzchniej wpływają korzystnie na właściwości użytkowe obrabianych przedmiotów, a głównie na wzrost wytrzymałości zmęczeniowej. Jednakże dobierając odpowiednie elementy nagniatające oraz warunki technologiczne nagniatania dynamicznego, można uzyskać małą chropowatość obrobionej powierzchni [63].

Metodami statycznymi nagniatana się głównie powierzchnie o regularnych kształtach, na przykład walcowe (zewnątrzne i wewnętrzne), stożkowe, czy płaskie, natomiast ograniczone są możliwości nagniatania powierzchni kształtowych. Wprawdzie nagniatanie statyczne (toczne) narzędziami z końcówką w kształcie kuli na obrabiarkach sterowanych numerycznie umożliwia obróbkę złożonych powierzchni przestrzennych [19], ale biorąc pod uwagę, że średnica elementów nagniatających stosowanych do nagniatania tocznego (około 10 mm) jest dużo większa niż średnica elementów nagniatających w procesie nagniatania dynamicznego (nawet kilkadziesiąt mikrometrów), można stwierdzić, że nagniataniem dynamicznym można obrabiać złożone powierzchnie

przestrzenne o znacznie mniejszych promieniach krzywizny niż nagniataniem statycznym.

Siły występujące w procesie nagniatania dynamicznego są dużo mniejsze w porównaniu z siłami w nagniataniu statycznym (zwłaszcza toczy). Toteż nagniataniem dynamicznym mogą być obrabiane przedmioty o małej sztywności, na przykład, szeroko stosowane w lotnictwie elementy cienkościenne.

Nagniatanie dynamiczne stosowane jest, jako obróbka wykończeniowa elementów maszyn, w wielu zakładach produkcyjnych, zwłaszcza w przemyśle lotniczym. Argumentami przemawiającymi za wprowadzeniem tej technologii są jej zalety, do których należy zaliczyć możliwość uzyskania powierzchni o małej chropowatości i dużym udziale materiałowym, utwardzenie warstwy wierzchniej, ukształtowanie ściskających naprężeń własnych, brak niebezpieczeństwa pozostawania na powierzchni obrobionej narostu i drobnych wiórów, co często ma miejsce po obróbce skrawaniem, brak odprysków ziaren ściernych (wada obróbki ścierniej), możliwość obróbki przedmiotów o bardzo złożonym kształcie, a także przedmiotów o małej sztywności.

1.2. Rys historyczny nagniatania dynamicznego

Prace nad wykorzystaniem piaskowania do obróbki powierzchniowej części maszyn prowadzone były w drugiej połowie XIX wieku. Piaskowanie zostało opatentowane przez amerykańskiego wynalazcę Benjamina Chew Tilghmana w roku 1870, a już rok później zbudowana została dmuchawa służąca do wyrzucania pod dużym ciśnieniem strumienia piasku kwarcowego na obrabiany przedmiot [69].

W latach dwudziestych ubiegłego wieku intensywnie rozwijał się przemysł motoryzacyjny, szczególnie w takich krajach jak Stany Zjednoczone, Niemcy, Japonia. Rozwojowi temu towarzyszył szybki postęp techniczny. Dążenie do zwiększenia czasu eksploatacji i niezawodności samochodów zmuszało do poszukiwania takich metod obróbki, które wpływałyby na wzrost trwałości wytwarzanych elementów. W fabrykach należących wówczas do koncernu General Motors stosowano strumień śrutu metalowego do czyszczenia sprężyn zaworów, kół zębatach, korbowodów. Zauważono, że metoda ta jest lepsza od innych metod oczyszczania, gdyż wpływa na zwiększenie wytrzymałości wyprodukowanych elementów [18].

Na lata trzydzieste i czterdzieste XX wieku przypada dalszy rozwój nagniatania dynamicznego. Oprócz przemysłu motoryzacyjnego technologią tą zainteresował się przemysł lotniczy i zbrojeniowy. Rozpoczęto badania wpływu obróbki umacniającej na wytrzymałość zmęczeniową obrabianych przedmiotów. Badania te prowadzone były głównie w Stanach Zjednoczonych i w Niemczech [18]. Wybuch II wojny światowej wpłynął na przyśpieszenie rozwoju technologii nagniatania dynamicznego. Duży wkład w rozwój tej technologii włożył amerykański badacz i wynalazca J.O. Almen, który w 1943 roku opublikował

wyniki swoich badań wpływu nagniatania dynamicznego na wytrzymałość zmęczeniową części maszyn [3, 4]. J.O. Almen jest autorem wielu patentów w dziedzinie nagniatania. Najbardziej znanym jego wynalazkiem było opracowanie metody sprawdzania intensywności nagniatania dynamicznego (tzw. test Almena), która jest stosowana do chwili obecnej. W Rosji (wówczas Związek Radziecki) korzystny wpływ nagniatania dynamicznego na twardość części maszyn zauważono już w okresie przed wybuchem II wojny światowej. Intensywny rozwój badań tej technologii i jej wpływu na wytrzymałość zmęczeniową części maszyn przypada na lata powojenne [130].

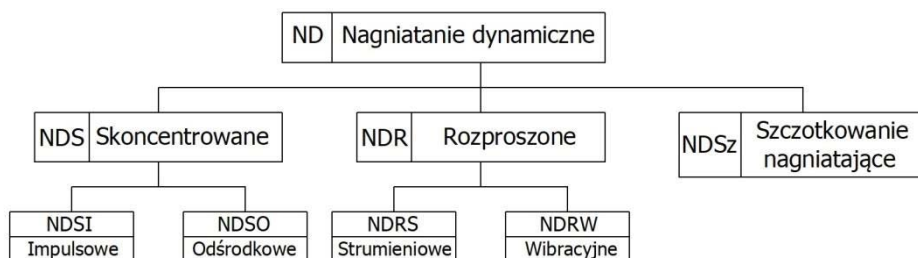
W Polsce pierwsze artykuły w czasopismach technicznych na temat nagniatania dynamicznego, opracowane głównie na podstawie publikacji zagranicznych, pojawiły się na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego wieku [14, 49, 101]. W roku 1965 wydane zostało pierwsze opracowanie monograficzne w języku polskim na temat nagniatania (używano nazwy „mechaniczne wzmacnianie powierzchni części maszyn”), oparte głównie na wynikach badań prowadzonych za granicą [59]. W latach sześćdziesiątych rozpoczęto w kraju na szerszą skalę badania własne z zakresu nagniatania dynamicznego [24, 48]. Wyniki badań nagniatania dynamicznego zostały przedstawione w wielu publikacjach, zarówno w kraju jak i za granicą. Od 1974 roku organizowane są konferencje, w cyklu trzy-czteroletnim, pod tytułem „Technologia obróbki przez nagniatanie”, początkowo w Bydgoszczy, a od 2005 roku w Gdańsku. Jednym z wniosków uczestników pierwszej konferencji było wydanie podręcznika obejmującego aktualną wiedzę w zakresie obróbki nagniataniem [67]. Naprzeciw tym oczekiwaniom wyszedł W. Przybylski, którego książka, obejmująca zarówno podstawy jak i technologię nagniatania, została wydana w 1979 roku [125].

Natomiast nie zostało unormowane nazewnictwo związane z nagniataniem, co też było jednym z wniosków wspomnianej konferencji [67]. Przez wielu autorów używana jest nazwa „kulowanie”, zgodnie z normą branżową BN-80/1062-01 [56, 63, 77, 107]. Często używana jest też nazwa „kulkowanie” [82, 120, 126, 200, 214], która wynika stąd, że jako elementy nagniatające często stosowane są kulki stalowe (łożyskowe) i szklane. Spotyka się też inne nazwy tej technologii, takie jak ubijanie strumieniowe [59], dogniatanie swobodnymi kulkami [40, 51], dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna [102], mikro-kulkowanie [84], śrutowanie [103]. Na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego stulecia używane były nazwy zarówno „dogniatanie” jak i „nagniatanie” [60, 67, 116, 114]. Wydaje się, że przeważały argumenty przemawiające za tą drugą nazwą i obecnie używa się głównie określenia „nagniatanie”. W niektórych krajach, obok nazw w języku rodzimym, używana jest też nazwa anglojęzyczna „Shot Peening” [157]. Z nazwą tą można spotkać się również w Polsce, zwłaszcza w przedsiębiorstwach zagranicznych.

1.3. Klasyfikacja nagniatania dynamicznego

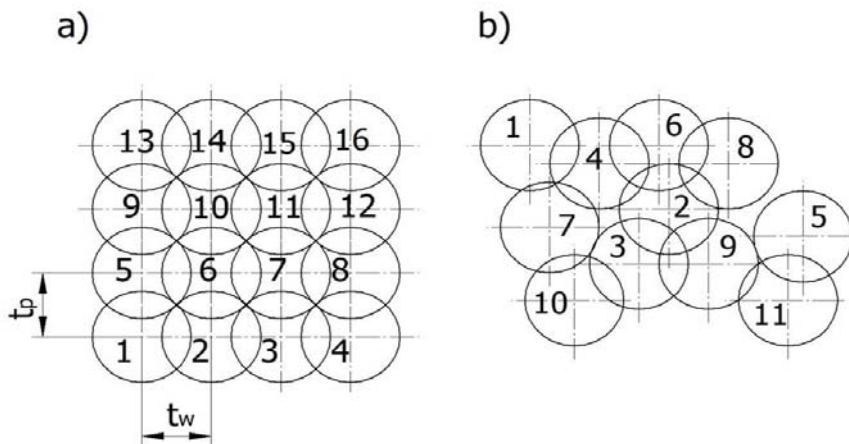
Podobnie jak nazewnictwo również podział obróbki nagniataniem kształtował się w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku [61, 116, 125]. Kompleksowy i spójny podział obróbki nagniataniem przedstawił W. Przybylski [125, 126]. Przedstawiona na rys. 1.1 klasyfikacja nagniatania dynamicznego jest, w zasadzie, zgodna z klasyfikacją podaną przez W. Przybylskiego. Odstępstwem od tej klasyfikacji jest umieszczenie nagniatania szczotkującego, jako odrębnego sposobu, nie będącego jedną z odmian nagniatania rozproszonego (szczotkowanie ma cechy zarówno nagniatania rozproszonego jak i skoncentrowanego).

Podział nagniatania dynamicznego na skoncentrowane i rozproszone jest związany ze sposobem nanoszenia odcisków na obrabianą powierzchnię pod wpływem uderzeń elementów nagniatających.



Rys. 1.1. Klasyfikacja nagniatania dynamicznego

Dynamiczne nagniatanie skoncentrowane (NDS) charakteryzuje się tym, że elementy nagniatające, które zwykle przemieszczają się w prowadnicach narzędzia, uderzają kolejno w obrabianą powierzchnię. Powstające wskutek tych uderzeń odciski nanoszone są sukcesywnie, w kolejnych rzędach (jeden obok drugiego), na powierzchnię nagniatanego przedmiotu (rys. 1.2a). Odległości między środkami odcisków w danym rzędzie są jednakowe i równe podziałce wzdłużnej t_w . Również odległości między środkami odcisków w dwóch sąsiednich rzędach, określone jako podziałka poprzeczna t_p , są jednakowe. Dla tak „uporządkowanego” systemu nanoszenia odcisków można wartości podziałek t_p i t_w obliczyć na podstawie geometrii narzędzia nagniatającego i parametrów technologicznych nagniatania. W procesie nagniatania skoncentrowanego znany jest też kierunek ruchu elementów nagniatających.



Rys. 1.2. Kolejność nanoszenia i układ odcisków elementów nagniatających na powierzchni obrabianej nagniataniem dynamicznym: a) skoncentrowanym (NDS), b) rozproszonym (NDR)

Nagniatanie skoncentrowane, ze względu na budowę narzędzi nagniatających i związanego z tym sposobu wprawiania w ruch elementów nagniatających, dzieli się na nagniatanie impulsowe (NDSI) oraz odśrodkowe (NDSO). Podczas nagniatania impulsowego elementy nagniatające wykonują ruch postępowo-zwrotny, który najczęściej wymuszany jest przez ruch obrotowy odpowiednio ukształtowanej bieżni lub przez przetwornik piezoelektryczny. Natomiast w procesie nagniatania odśrodkowego wykorzystywana jest siła odśrodkowa działająca na elementy nagniatające (kulki) umieszczone w promieniowych otworach obracającej się tarczy.

W procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego (NDR) elementy nagniatające nie poruszają się w prowadnicach narzędzia, lecz swobodnie uderzają w powierzchnię obrabianego przedmiotu. Podczas „nieuporządkowanego” ruchu elementów nagniatających trudne do określenia są ich tory oraz prędkości. Jednocześnie obrabiana jest cała powierzchnia przedmiotu lub znaczna jej część. Powstające na powierzchni obrabianej wskutek uderzeń elementów nagniatających odciski są rozmieszczone w odległościach znacznie większych od ich średnicy (nie nakładają się na siebie jak w przypadku nagniatania skoncentrowanego). Ze wzrostem czasu nagniatania powstające w przypadkowej kolejności odciski zagęszczają się (rys. 1.2b), co prowadzi do pokrycia nimi całej powierzchni (zwykle wielokrotnie).

W zależności od zasady działania urządzeń do NDR rozróżnia się dynamiczne nagniatanie rozproszone strumieniowe (NDRS) oraz wibracyjne (NDRW). Nagniatanie strumieniowe charakteryzuje się tym, że elementy nagniatające są wyrzucane z urządzenia nagniatającego w postaci strumienia i uderzają w obrabianą powierzchnię. Natomiast w procesie nagniatania wibracyjnego uderzenia elementów nagniatających w powierzchnię obrabianego przedmiotu następują

wskutek drgań komory roboczej, w której znajdują się obrabiane przedmioty (zwykle zamocowane) oraz luźne elementy nagniatające.

Szczotkowanie nagniatające (NDSz) polega na oddziaływaniu na obrabianą powierzchnię włókien obracającej się z dużą prędkością szczotki. Włókna mogą być rozmieszczone na obwodzie lub powierzchni czołowej korpusu szczotki. Wprawdzie rozmieszczenie włókien w korpusie szczotki jest stałe (dla danej szczotki), jednakże duża elastyczność oraz dość szybko postępujące zużywanie się włókien powodują brak regularności powstających śladów uderzeń na powierzchni obrabianej.

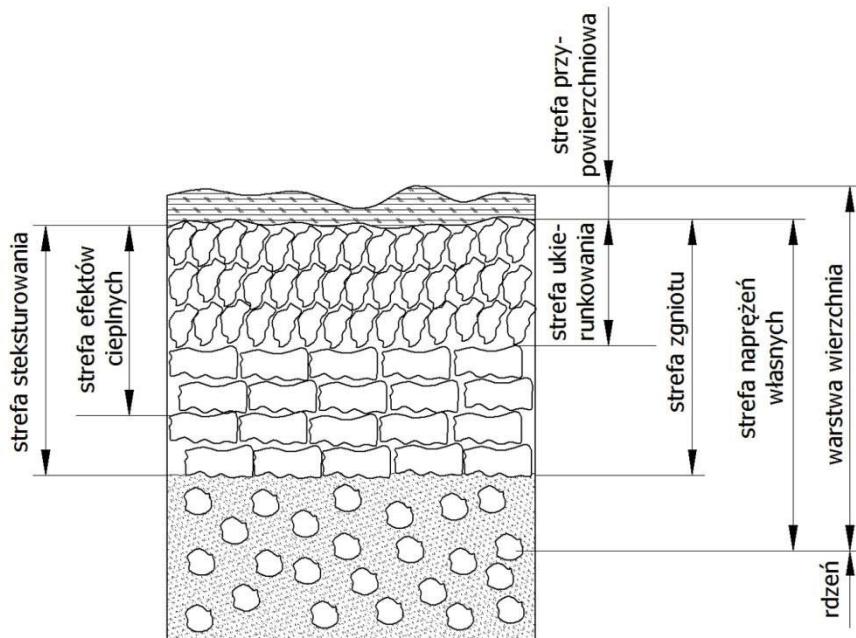
1.4. Kształtowanie warstwy wierzchniej przedmiotów nagniatanych dynamicznie

1.4.1. Budowa i właściwości warstwy wierzchniej

Głównym celem nagniatania dynamicznego jest, na ogół, zmiana właściwości warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu, czego korzystnym skutkiem jest poprawa właściwości użytkowych tego przedmiotu.

Warstwa wierzchnia (WW) jest to zewnętrzna warstwa materiału przedmiotu, która obejmuje powierzchnię tego przedmiotu oraz część jego objętości położoną bezpośrednio pod powierzchnią, charakteryzującą się właściwościami fizycznymi, a niekiedy również chemicznymi, różniącymi się od właściwości rdzenia.

Budowa i właściwości WW ukształtowanej w procesie wytwarzania przedmiotu (tzw. technologiczna warstwa wierzchnia) zależą od wielu czynników, takich jak skład chemiczny, właściwości i struktura materiału rdzenia, sposób i warunki technologiczne obróbki. Stan WW ukształtowany w procesie wytwarzania może ulegać zmianom podczas eksploatacji danego przedmiotu, prowadząc do powstania eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. Warstwa wierzchnia przedstawiana jest w postaci modeli o różnym stopniu szczegółowości [16]. Uproszczony schemat modelu warstwy wierzchniej przedmiotu po obróbce mechanicznej przedstawiono na rys. 1.3.



Rys. 1.3. Schemat modelu warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego mechanicznie

W warstwie wierzchniej wyodrębnia się szereg stref, które określają zasięg zmian cech materiału WW zachodzących podczas wytwarzania lub eksploatacji przedmiotu. Do typowych stref WW powstających w procesach obróbki mechanicznej można zaliczyć:

- strefę przypowierzchniową, w której występują zaadsorbowane cząsteczki organiczne, np. oleju, oraz cząsteczki wody i gazów,
- strefę ukierunkowaną, charakteryzującą się wyraźnym ukierunkowaniem ziaren materiału,
- strefę zgniotu, umocnioną wskutek odkształceń plastycznych materiału,
- strefę naprężeń własnych,
- strefę efektów cieplnych, charakteryzującą się występowaniem przemian wskutek wzrostu temperatury,
- strefę stekturowaną, w której występuje uprzywilejowana orientacja kryształów lub ziaren ze względu na elementy sieciowe.

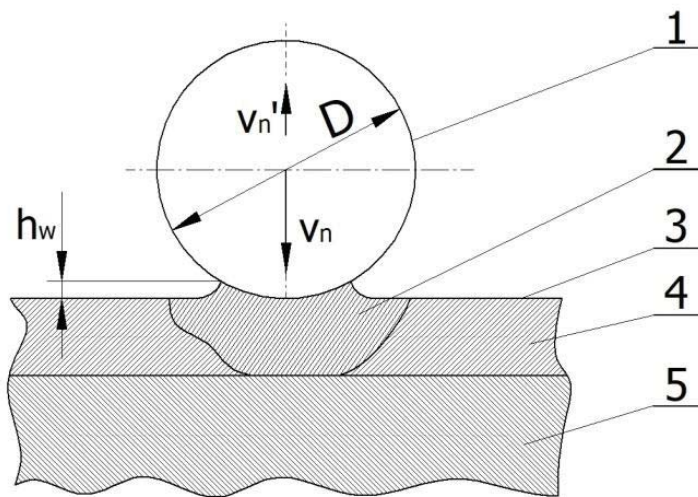
Niekiedy pod strefą przypowierzchniową tworzy się strefa tlenków jako wynik reakcji tlenu z materiałem rdzenia. Natomiast pod fizycznie czystą powierzchnią metalu może powstać cienka warstwa materiału o strukturze pozornie bezpostaciowej, nazywana warstwą Beilby'ego [16].

Stan warstwy wierzchniej charakteryzowany jest za pomocą jej właściwości. Wyodrębnia się strukturę geometryczną powierzchni (SGP) oraz właściwości

fizyczne WW. Analizując SGP uwzględnia się chropowatość i falistość powierzchni oraz wady powierzchniowe. Do głównych właściwości fizycznych WW zalicza się mikrostrukturę i twardość materiału WW oraz naprężenia własne. W mniejszym stopniu uwzględniane są inne właściwości WW, takie jak właściwości magnetyczne, adsorpcyjne, dyfuzyjne, adhezyjne.

1.4.2. Oddziaływanie elementu nagniatającego na warstwę wierzchnią obrabianego przedmiotu

Wskutek nagniatania dynamicznego następują zmiany zarówno SGP jak i właściwości fizycznych WW. Na rys. 1.4 przedstawiono oddziaływanie elementu nagniatającego na przedmiot obrabiany. Element w kształcie kuli o średnicy D uderza z prędkością v_n w powierzchnię 3 przedmiotu nagniatanego, w kierunku prostopadłym do tej powierzchni, powodując powstanie wgniecen w obrabianym materiale. Na obrzeżach uderzającej kuli tworzy się wypływka o wysokości h_w . Na pewnej głębokości pod wgnieceniem powstaje strefa odkształcenia plastycznego 2. Wielokrotne uderzenia elementu nagniatającego powodują „nakładanie się” stref odkształcenia plastycznego, czego skutkiem jest ukształtowanie strefy zgięcia warstwy wierzchniej 4 o twardości większej od twardości rdzenia nagniatanego przedmiotu 5.



Rys. 1.4. Schemat oddziaływania elementu nagniatającego na warstwę wierzchnią obrabianego przedmiotu: 1 – element nagniatający, 2 – strefa odkształcenia plastycznego, 3 – powierzchnia obrabianego przedmiotu, 4 – strefa zgięcia warstwy wierzchniej, 5 – rdzeń

Energię uderzenia elementu nagniatającego w kształcie kuli można obliczyć ze wzoru:

$$E_u = \frac{\pi D^3 \rho v_n^2}{12}, \quad (1.1)$$

gdzie: D – średnica kuli,

ρ – masa właściwa materiału elementu nagniatającego,

v_n – prędkość elementu nagniatającego w kierunku normalnym do obrabianej powierzchni.

Uderzająca z określoną energią kulka powoduje sprężysto-plastyczne odkształcenia materiału i skutek działania sił sprężystości zostaje odbita z prędkością v'_n . Prędkość kulki po odbiciu można obliczyć z zależności:

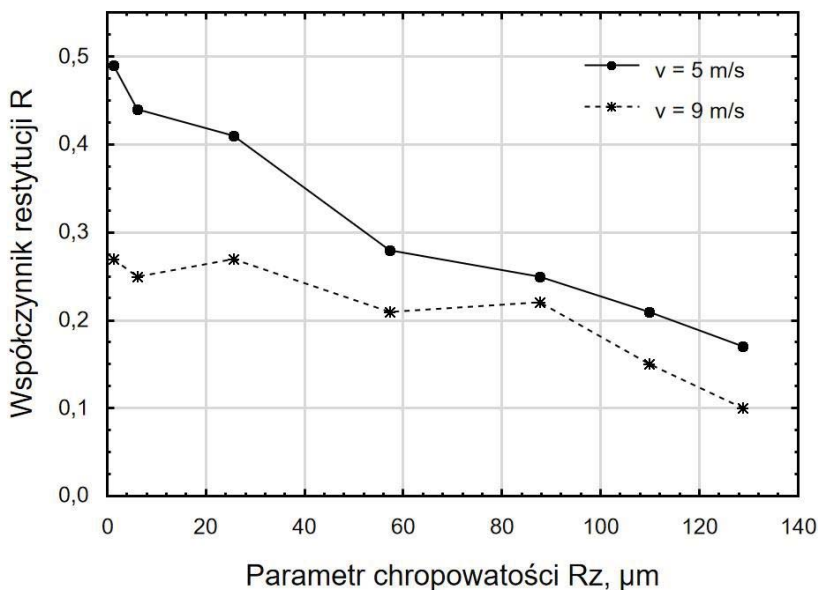
$$v'_n = R v_n, \quad (1.2)$$

gdzie: R – współczynnik restytucji.

Zwrot wektora \vec{v}'_n jest przeciwny do zwrotu wektora \vec{v}_n .

Wartość prędkości v'_n jest mniejsza od wartości v_n (współczynnik restytucji $R < 1$), co oznacza, że podczas uderzenia następuje zmniejszenie energii kinetycznej uderzającej kulki. Energia ta zużywana jest na pracę odkształceń plastycznych, pracę tarcia zewnętrznego kontaktujących się ciał, pracę tarcia wewnętrznego między ziarnami oraz pracę drgań układu [41, 217].

Współczynnik restytucji zależy od materiału, z którego wykonane zostały zderzające się ciała, ale również od warunków, w jakich zderzenie nastąpiło. Do czynników wpływających na wartość współczynnika restytucji należy zaliczyć prędkość zderzenia oraz chropowatość powierzchni zderzających się przedmiotów. Wyniki badań współczynnika restytucji podczas uderzania kulką stalową (łożyskową) w powierzchnie o różnej chropowatości przedstawiono w pracy [12]. Chropowatość powierzchni próbek ze stopu aluminium EN AW 7075 frezowanych ze zmiennym posuwem ($f_z = 0,01 \div 0,55$ mm/ostrze) zmieniała się w granicach od $Rz = 1,26 \mu\text{m}$ do $Rz = 128,7 \mu\text{m}$. Prędkość uderzającej w te powierzchnie kulki łożyskowej o średnicy równej 5,50 mm zmieniała się w zakresie od 5 m/s do 9 m/s. Na wykresach przedstawionych na rys. 1.5 widoczne jest zmniejszanie się współczynnika restytucji ze wzrostem chropowatości powierzchni, co jest związane z przejmowaniem części energii uderzenia przez odkształcające się plastycznie nierówności. Widoczne jest też zmniejszanie się współczynnika restytucji ze wzrostem prędkości uderzenia.



Rys. 1.5. Wpływ chropowatości powierzchni próbki ze stopu aluminium i prędkości uderzenia w nią kulki stalowej na współczynnik restytucji

Chropowatość powierzchni i prędkość uderzającej kulki wpływa też na głębokość odcisku, jaki powstaje po uderzeniu. Wyniki badań doświadczalnych oraz obliczeń metodą elementów skończonych (MES), przeprowadzonych w programie ABAQUS, wpływu chropowatości powierzchni próbek ze stopu aluminium EN AW 6060T6 frezowanych ze zmiennym posuwem oraz prędkości uderzającej w te próbki kulki stalowej o średnicy 5,5 mm na głębokość odcisku przedstawiono w tabeli 1.1 [11]. Założono, że kulka jest nieodkształcalna, a chropowatość jej powierzchni pominięto.

Tabela 1.1. Wyniki pomiarów i obliczeń MES głębokości odcisków w próbkach ze stopu aluminium EN AW 6060T6 po uderzeniu kulką stalową o średnicy 5,5 mm [11]

Chropowatość powierzchni próbki	Średnia zmierzona głębokość odcisku, μm , po uderzeniu z prędkością		Głębokość odcisku obliczona MES, μm , po uderzeniu z prędkością	
	$v_1 = 3 \text{ m/s}$	$v_2 = 5 \text{ m/s}$	$v_1 = 3 \text{ m/s}$	$v_2 = 5 \text{ m/s}$
Rz = 1,8 μm	23,80	29,20	28,62	50,48
Rz = 55 μm	41,60	50,40	43,42	63,60
Rz = 90 μm	50,80	73,75	56,52	82,26

Ze wzrostem chropowatości powierzchni widoczny jest wyraźny wzrost głębokości „wybitego” przez kulkę odcisku, co potwierdziły również obliczenia numeryczne. Dla próbek o dużej chropowatości powierzchni głębokość odcisków nie przekracza wysokości chropowatości powierzchni, a zatem przy pojedynczym uderzeniu następuje tylko wgniecenie w obrębie nierówności powierzchni. Stan taki byłby bardzo niekorzystny ze względu na wytrzymałość zmęczeniową przedmiotów po nagniataniu. Zatem, w przypadku nagniatania powierzchni o dużej chropowatości należy dobrać warunki technologiczne zapewniające dużą energię uderzenia i wielokrotne uderzenia w obszar tego samego odcisku. Głębokości odcisków obliczone numerycznie wykazują zadowalającą zbieżność z wynikami otrzymanymi doświadczalnie.

Zachodzące pod wpływem uderzeń odkształcenia plastyczne materiału są uwarunkowane osiągnięciem wartości krytycznej naprężeń, nazywanej naprężeniem uplastyczniającym [99]. Wartość naprężeń uplastyczniających może być obliczona na podstawie hipotezy Hubera – Misesa – Hencky’ego, według której warunkiem przejścia ciała metalicznego ze stanu sprężystego w stan plastyczny jest osiągnięcie intensywności naprężeń równej naprężeniu uplastyczniającemu w warunkach odpowiadających odkształceniu (temperatura i prędkość odkształcenia) [68, 98, 99].

Odształcenia plastyczne monokryształów następują przez poślizg lub bliźniakowanie. Poślizg następuje wówczas, gdy jedna część kryształu przemieszcza się względem drugiej wzdłuż płaszczyzny poślizgu, natomiast odkształcenie przez bliźniakowanie polega na przemieszczaniu się kolejnych równoległych płaszczyzn poślizgu, przy czym wartość przesunięcia jest mniejsza od parametru sieci krystalicznej. Odształcanie ciał polikrystalicznych wiąże się z jednoczesnym odkształcaniem wielu ziaren, które wzajemnie na siebie oddziałują. Materiały polikrystaliczne mogą, podobnie jak monokryształy, odkształcać się przez poślizg lub bliźniakowanie, a ponadto odkształcenia mogą następować w wyniku wzajemnego przemieszczania się ziaren wzdłuż ich granic [29].

Podczas odkształceń plastycznych metali następuje wzrost gęstości dyslokacji, która jest określana jako suma długości linii dyslokacji na jednostkę objętości materiału (jednostką gęstości dyslokacji jest cm^{-2}). Od gęstości dyslokacji zależy wytrzymałość metali. Dużą wytrzymałością odznaczają się metale o bardzo małej i o bardzo dużej gęstości dyslokacji. Materiałem o małej gęstości dyslokacji i o dużej wytrzymałości są kryształy nitkowe. Metale techniczne w stanie wyżarzonym charakteryzują się gęstością dyslokacji odpowiadającą najmniejszej wytrzymałości. Wytrzymałość metali o dużej gęstości dyslokacji (większej od gęstości dyslokacji odpowiadającej minimalnej wytrzymałości) może być zwiększona wskutek odkształceń plastycznych, gdyż ruch dyslokacji związany z tym odkształceniem jest utrudniony z powodu wzajemnego oddziaływania dyslokacji [52].

Wraz ze wzrostem odkształceń kryształu następuje jego umocnienie deformacyjne, które jest wyjaśniane na gruncie teorii dyslokacji i oddziaływań defek-

tów punktowych z dyslokacjami [47]. W polikryształach sieci graniczących ze sobą ziaren są wzajemnie nachylone i skrzyżowane, co stanowi przeszkodę dla ruchu dyslokacji. Zatem, umocnienie materiałów polikrystalicznych zachodzi zarówno w poszczególnych ziarnach jak i na granicach ziaren [32].

1.5. Elementy nagniatające

Materiał, kształt oraz wymiary elementów nagniatających mają znaczący wpływ na efekty nagniatania dynamicznego. Budowa tych elementów związana jest ze sposobem nagniatania.

Do obróbki nagniataniem skoncentrowanym stosowane są narzędzia przeznaczone do obróbki powierzchni o określonym kształcie. Elementy nagniatające, stanowiące integralną część tych narzędzi, mogą być trwale połączone z innymi, wprawiającymi je w ruch, elementami narzędzi lub luźno przemieszczać się w prowadnicach narzędzia. Najczęściej stosuje się elementy nagniatające w kształcie kulek, rolek (walcowych lub stożkowych), krążków oraz trzpieni z czaszą kulistą. W charakterze elementów nagniatających często wykorzystywane są kulki i rolki łożyskowe, zwykle o średnicach nie przekraczających kilkunastu milimetrów.

Medium obróbkowe w procesie nagniatania strumieniowego składa się z elementów dużo mniejszych w porównaniu z nagniataniem skoncentrowanym (wymiary tych elementów mieszczą się w przedziale od kilkudziesięciu mikrometrów do kilku milimetrów). Elementy te często nazywane są śrutem.

Do ważniejszych mediów obróbkowych stosowanych do nagniatania strumieniowego (NDRS) można zaliczyć:

- kulki stalowe,
- kulki szklane,
- kulki ceramiczne,
- śrut cięty z drutu,
- kulisty śrut stalowy,
- kulisty śrut żeliwny.

W obróbce NDRS stosowane są stalowe kulki łożyskowe o niewielkiej średnicy (zwykle od 1 mm do 4 mm). Zaletą tych kulek jest brak ostrych krawędzi, mała chropowatość powierzchni i dość duża trwałość. Przykładem użycia takich kulek w charakterze elementów nagniatających jest odmiana NDRS nazywana pneumokulkowaniem [81, 215].

Coraz szersze zastosowanie, jako medium nagniatające w obróbce NDRS, znajdują kulki szklane, które ze względu na małe wymiary nazywane są też mikrokulkami. Zalecane jest stosowanie do nagniatania dynamicznego części maszyn kulek szklanych o granulacji (0,06 ÷ 0,85) mm. Małe wymiary kulek umożliwiają obróbkę powierzchni zewnętrznych i wewnętrznych o bardzo skomplikowanym kształcie, charakteryzującym się występowaniem wgłębień o bardzo

małych promieniach zaokrąglenia. Kulki ulegające podczas uderzeń rozbiciu rozpadają się w drobny pył, nie stanowiący zagrożenia dla pracowników ani dla środowiska naturalnego.

Kulki (mikrokulki) ceramiczne zalecane do obróbki NDRS części maszyn mają większą granulację w porównaniu z kulkami szklanymi, wynoszącą $(0,2 \div 1,2)$ mm [102], a także większą trwałość. Duża dokładność kulistego kształtu korzystnie wpływa na jakość obrobionej powierzchni.

Śrut cięty z okrągłego drutu stalowego stosowany jest do oczyszczania powierzchni, np. z rdzy czy zgorzeliny, oraz do umacniania warstwy wierzchniej metalowych przedmiotów. Długość ziaren śrutu powinna być równa jego średnicy. Na powierzchni ziaren śrutu nie powinno być śladów rdzy, oleju i zanieczyszczeń. Według wycofanej normy PN – 90/M – 81090 granulacja śrutu technicznego z drutu powinna zawierać się w granicach $(0,4 \div 4,0)$ mm [Nor. 1], a według norm amerykańskich zalecana granulacja śrutu stalowego ciętego do nagniatania części maszyn wynosi $(0,5 \div 1,6)$ mm [102]. Śrut ten przed użyciem powinien zostać poddany procesowi zaokrąglenia krawędzi.

Śrut kulisty określany jest, zgodnie z normą PN – EN ISO 11124-4: 2000, jako ziarna ścierne, które nie mają krawędzi i są zaokrąglone w taki sposób, że ich długość jest mniejsza niż podwojona maksymalna szerokość, a na ich powierzchni nie ma pęknięć ani innych ostrych uszkodzeń [Nor. 2]. Śrut kulisty stalowy wytwarzany jest podczas procesu odlewania, w którym w wyniku rozpylenia roztopione staliwo formowane jest w postaci kulistej.

Wytwarzany jest śrut kulisty z niskowęglowego staliwa, o zawartości węgla od 0,08% do 0,2%, oraz ze staliwa wysokowęglowego, które zawiera od 0,8% do 1,2% węgla [Nor. 3]. Granulacja kulistego śrutu ze staliwa niskowęglowego zmienia się w granicach od 0,125 mm do 3,35 mm (liczby oznaczają wymiar oczka sita) [Nor. 2], natomiast dla śrutu kulistego ze staliwa wysokowęglowego granulacja wynosi $(0,125 \div 4,75)$ mm [Nor. 3].

Śrut żeliwny w postaci kulistej powstaje w wyniku rozpylenia roztopionego żeliwa. Granulacja wytwarzanego kulistego śrutu żeliwnego wynosi od kilku dziesiątych milimetra do $(5 \div 6)$ mm.

W charakterze elementów nagniatających w procesie nagniatania strumieniowego stosowany jest również śrut aluminiowy, śrut nierdzewny chromowy (staliwo z odpowiednim dodatkiem chromu), śrut nierdzewny chromowo-niklowy (staliwo z dodatkiem chromu i niklu).

W obróbce nagniataniem wibracyjnym (NDRW) elementami nagniatającymi zwykle są kulki stalowe. W praktyce stosowane są kulki łożyskowe o średnicach w zakresie $(3 \div 15)$ mm. Zastosowanie kulek stalowych umożliwia uzyskanie zarówno umocnienia warstwy wierzchniej jak i „wygładzenie” powierzchni obrabianych przedmiotów.

Elementami nagniatającymi w procesie szcztokowania nagniatającego (NDSz) są włókna z drutu mosiężnego, stalowego o twardości naturalnej, stalo-

wego hartowanego, stalowego nierdzewnego i kwasoodpornego, stalowego miedziowanego. W ostatnich latach widoczny jest wzrost zastosowania włókien ceramicznych.

1.6. Ciecze obróbkowe w nagniataniu dynamicznym

Nagniatanie dynamiczne (ND) może być prowadzone w powietrzu („na sucho”) albo w środowisku cieczy obróbkowej. W charakterze cieczy obróbkowych w procesie nagniatania dynamicznego najczęściej stosowane są oleje (np. olej transformatorowy) oraz nafta [76, 113]. W przypadku, gdy nagniatanie, np. odśrodkowe lub impulsowe, prowadzone jest na obrabiarkach skrawających, to do nagniatania często stosowane są te same ciecze co do obróbki skrawaniem. Z badań przeprowadzonych przez różnych autorów (np. [113]) wynika, że zastosowanie cieczy obróbkowej w procesie nagniatania dynamicznego korzystnie wpływa na właściwości warstwy wierzchniej oraz wytrzymałość zmęczeniową nagniatanych przedmiotów.

1.6.1. Rola cieczy obróbkowych w procesie nagniatania dynamicznego

Ciecze obróbkowe szeroko stosowane są w obróbce skrawaniem i obróbce plastycznej, co znajdowało odzwierciedlenie w wielu pracach badawczych. Natomiast bardzo uboga jest literatura na temat wpływu cieczy obróbkowych na przebieg i wyniki nagniatania dynamicznego.

Z analizy przebiegu procesu nagniatania dynamicznego wynika, że do głównych zadań cieczy obróbkowych w tym procesie należy zaliczyć zmniejszenie tarcia w strefie kontaktu elementu nagniatającego z obrabianą powierzchnią. Element nagniatający, po uderzeniu, zagłębia się w obrabiany materiał, powodując przemieszczanie się tego materiału w kierunku krawędzi powstającego odcisku. Wprowadzenie środka smarnego zmniejsza tarcie pomiędzy elementem nagniatającym a obrabianym materiałem, przyczyniając się do wzrostu odkształceń plastycznych materiału.

Wskutek wzrostu odkształceń plastycznych następuje zwiększenie twardości warstwy wierzchniej materiału. Wzrost twardości WW może być wyrażony za pomocą stopnia umocnienia warstwy wierzchniej, który definiowany jest według zależności:

$$e = 100 \frac{HV_{max} - HV_0}{HV_0}, \% \quad (1.3)$$

gdzie: HV_{max} – maksymalna mikrotwardość WW,
 HV_0 – mikrotwardość rdzenia materiału.

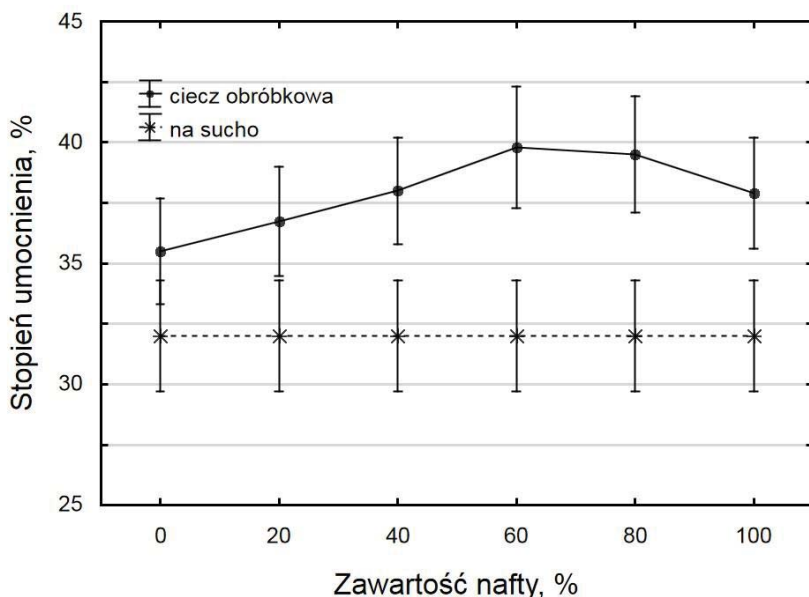
Stopień umocnienia WW uzależniony jest od właściwości cieczy obróbkowych, co potwierdziły badania nagniatania dynamicznego w środowisku mieszaniny

oleju parafinowego i nafty [173, 200]. Ze wzrostem zawartości nafty następuje zmniejszenie lepkości dynamicznej oraz napięcia powierzchniowego cieczy (tabela 1.2).

Tabela 1.2. Wyniki pomiarów lepkości dynamicznej i napięcia powierzchniowego cieczy obróbkowej

Skład procentowy cieczy obróbkowej		Lepkość dynamiczna, mPas	Napięcie powierzchniowe, mN/m
Olej parafinowy, %	Nafta, %		
100	0	113	26,4
80	20	29	23,2
60	40	8,5	22,0
40	60	4,2	21,3
20	80	2,4	20,6
0	100	2,6	20,1

Na rys. 1.6 przedstawiono zależność stopnia umocnienia próbek ze stali C45 w stanie normalizowanym, poddanych obróbce nagniataniem dynamicznym rozproszonym w środowisku mieszaniny oleju parafinowego z naftą, od zawartości nafty. Nagniatanie w środowisku cieczy obróbkowej spowodowało wzrost stopnia umocnienia WW o (11 ÷ 24)% w stosunku do stopnia umocnienia WW po nagniataniu „na sucho”. Największy przyrost stopnia umocnienia uzyskano dla cieczy zawierającej około 70% nafty. Wraz ze wzrostem zawartości nafty, a tym samym zmniejszaniem się zawartości oleju, następuje zmniejszanie się lepkości cieczy obróbkowych, co wpływa na pogorszenie się właściwości smarnych tej cieczy. Jednakże ciecz o mniejszej lepkości powoduje mniejsze „wyhamowanie” uderzających elementów nagniatających. Mniejsze napięcie powierzchniowe wpływa na poprawę zwilżalności obrabianej powierzchni oraz ułatwia wnikanie cieczy w zagłębienia mikronierówności.



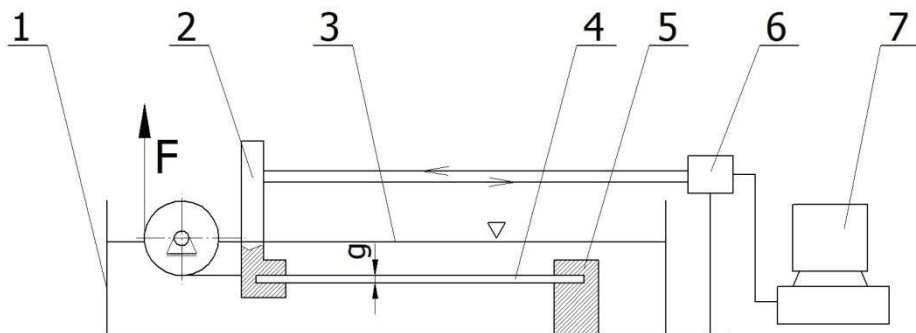
Rys. 1.6. Wpływ zawartości ropy w cieczy obróbkowej na stopień umocnienia warstwy wierzchniej [200]

Efektywność cieczy obróbkowych w procesie nagniatania można zwiększyć poprzez wprowadzenie do tych cieczy substancji powierzchniowo aktywnych. Substancje te klasyfikowane są jako dodatki typu EP (Extreme Pressure) oraz dodatki polarne [21]. Dodatki EP reagują chemicznie z obrabianym metalem, tworząc na jego powierzchni związki chemiczne działające jak stały film smarowy. Dodatki polarne oddziałują na nagniatany materiał w wyniku adsorpcji na jego powierzchni cząstek cieczy obróbkowej, co powoduje ułatwienie odkształceń plastycznych i zmniejszenie wytrzymałości. Zmiany właściwości materiału wskutek powierzchniowo aktywnego oddziaływania cieczy związane są z efektem Rebintera [15, 36, 37, 127]. Rozróżnia się zewnętrzny i wewnętrzny charakter efektu Rebintera. Efekt zewnętrzny polega na powierzchniowym oddziaływaniu metalu i cieczy, natomiast efekt wewnętrzny związany jest z adsorpcją substancji powierzchniowo aktywnych na wewnętrznych powierzchniach mikropęknięć towarzyszących procesowi odkształcenia metalu.

Dodatki powierzchniowo aktywne typu polarnego korzystnie wpływają na przebieg obróbki metali a także na właściwości warstwy wierzchniej ukształtowanej podczas obróbki. Zastosowanie cieczy obróbkowej z dodatkami powierzchniowo aktywnymi w procesie nagniatania dynamicznego powoduje zwiększenie stopnia umocnienia warstwy wierzchniej nagniatanych przedmiotów [137]. W charakterze dodatków powierzchniowo aktywnych mogą być za-

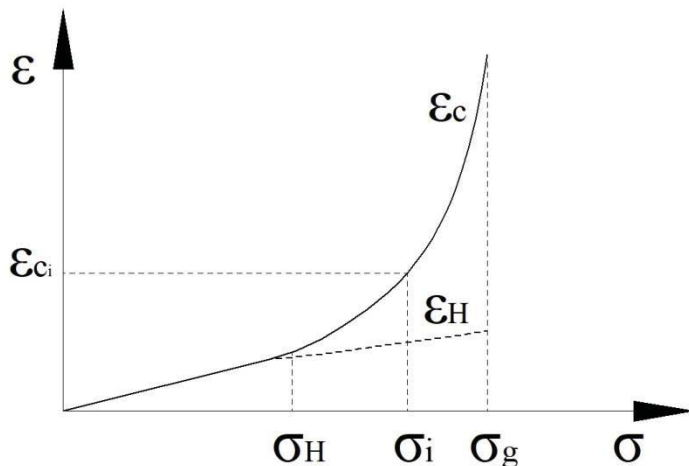
stosowane niektóre kwasy organiczne (palmitynowy, stearynowy, oleinowy, izowalerianowy), a także roztwory polimerów [37, 72].

Opracowana metoda, polegająca na rozciąganiu cienkiej folii metalowej zanurzonej w cieczy, umożliwia ocenę właściwości powierzchniowo aktywnych tej cieczy [173, 193, 195]. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.7. Badaną próbkę z cienkiej folii metalowej 4 mocuje się w uchwytach 2 i 5, znajdujących się w zbiorniku 1, po czym do zbiornika wlewa się ciecz 3. Próbkę z cienkiej folii mogą być wykonywane metodą szlifowania cienkich blach (patent PL 209068 [194]). Metoda ta polega na szlifowaniu cienkiej folii, która zamocowana jest w specjalnym uchwycie, zapewniającym stałą siłę naciągu [173]. Próbkę powinna być dokładnie odtłuszczona i wysuszona. Następnie próbkę obciąża się siłą F , która jest stopniowo zwiększana. Przyrost długości próbki mierzy się po każdym zwiększeniu siły F za pomocą czujnika 6. Wyniki pomiarów przesyłane są do komputera 7.



Rys. 1.7. Schemat stanowiska do badania właściwości powierzchniowo aktywnych cieczy:
 1 – zbiornik, 2 – uchwyt przesuwany, 3 – badana ciecz, 4 – próbka z folii metalowej,
 5 – uchwyt stały, 6 – czujnik, 7 – komputer

Na podstawie przeprowadzonych badań można opracować wykres obrazujący względne odkształcenia plastyczne ε próbki w funkcji naprężeń rozciągających σ (rys. 1.8). Krzywa ε_c przedstawia całkowite odkształcenia względne rozciąganej próbki, a prosta ε_H odpowiada odkształceniom wprost proporcjonalnym do naprężeń σ . Wartość naprężeń granicznych σ_g należy przyjmować na poziomie nieco niższym od naprężeń rozrywających próbkę.



Rys. 1.8. Zależność odkształceń względnych rozciąganej próbki z folii metalowej od naprężeń [195]

Średnie odkształcenia plastyczne ε_p próbki z folii metalowej można wyrazić wzorem [173, 195]:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\sigma_g - \sigma_H} \int_{\sigma_H}^{\sigma_g} \left[\varepsilon_c(\sigma) - \frac{\sigma}{E} \right] d\sigma, \quad (1.4)$$

gdzie: ε_c – odkształcenia całkowite,

σ – naprężenia rozciągające,

σ_g – naprężenia graniczne,

σ_H – naprężenia odpowiadające stosowalności prawa Hooke’a,

E – moduł Younga.

Wartość naprężeń granicznych należy przyjmować na poziomie nieco niższym od naprężeń rozrywających próbkę.

Wzór (1.4) można zapisać w postaci przybliżonej [173, 195]:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\varepsilon_{ci} - \frac{\sigma_i}{E} \right), \quad (1.5)$$

gdzie: σ_i – naprężenia w i -tym punkcie z przedziału (σ_H , σ_g),

ε_{ci} – odkształcenia całkowite próbki przy naprężeniach σ_i ,

n – liczba rozpatrywanych punktów.

Ocena właściwości powierzchniowo aktywnych cieczy może być dokonana na podstawie wartości współczynnika oddziaływania powierzchniowo aktywnego p_a , który definiowany jest według zależności [173, 195]:

$$p_a = 100 \frac{\varepsilon_{px} - \varepsilon_{po}}{\varepsilon_{po}}, \% \quad (1.6)$$

gdzie: ε_{px} – średnie odkształcenia plastyczne próbek z folii metalowej rozciąganych w danej cieczy,

ε_{po} – średnie odkształcenia plastyczne próbek z folii metalowej rozciąganych w powietrzu.

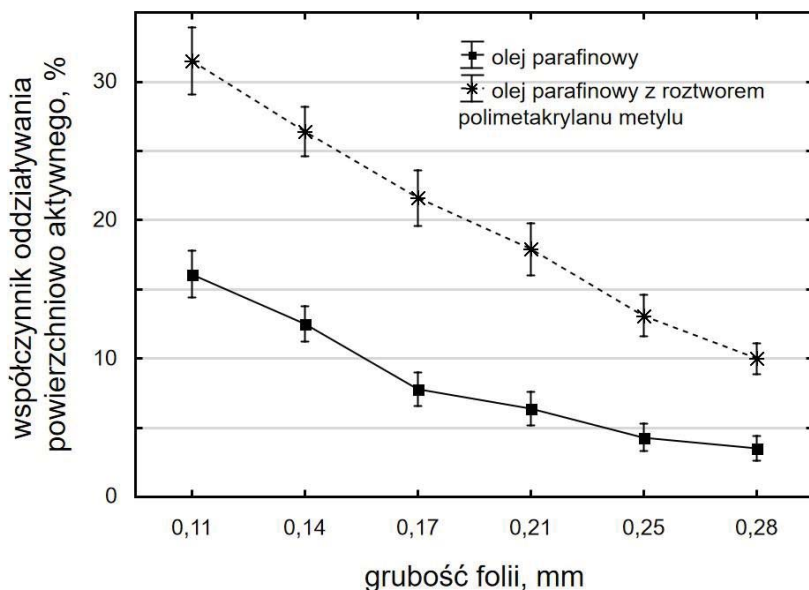
Kolejną funkcją cieczy obróbkowych jest usuwanie produktów zużycia, które powstają wskutek uderzeń kulek w obrabiane przedmioty, ścianki komory roboczej oraz wzajemnie o siebie. Produkty te zanieczyszczają nagniatane przedmioty i mogą przyczynić się do pogorszenia jakości obrabianych powierzchni.

Proces nagniatania dynamicznego może odbywać się w temperaturze otoczenia lub podwyższonej. Najczęściej przedmioty obrabiane nie są podgrzewane w czasie ND (obróbka „na zimno”). Jednakże wskutek uderzenia elementu nagniatającego następuje lokalny wzrost temperatury w strefie odkształceń plastycznych obrabianego materiału. Tylko niewielka część energii odkształceń plastycznych pozostaje, jako energia potencjalna, w odkształconej warstwie, natomiast zdecydowana większość tej energii zamieniana jest na ciepło. Ze względu na krótki czas kontaktu elementu nagniatającego z obrabianym materiałem, ilość ciepła przenikającego do elementu nagniatającego jest bardzo mała. Z obliczeń, przeprowadzonych przy założeniu równowartości energii uderzenia i wydzielonego ciepła, wynika, że średni wzrost temperatury w strefie uderzenia może osiągnąć wartość około 500°C [115]. Zatem ciecz obróbkowa spełnia również funkcję chłodzącą.

Do niekorzystnych skutków stosowania cieczy obróbkowych można zaliczyć zmniejszenie prędkości elementów nagniatających wskutek „hamującego” działania warstwy cieczy, co przekłada się na zmniejszenie energii zderzenia tych elementów z obrabianym przedmiotem.

1.6.2. Wpływ grubości rozciąganej folii na współczynnik oddziaływania powierzchniowo aktywnego

Pomiary współczynnika oddziaływania powierzchniowo aktywnego cieczy według metody przedstawionej w podrozdziale 1.6.1 wymagają użycia cienkiej folii metalowej. Próbkę z tej folii powinny charakteryzować się dużą powtarzalnością kształtu i wymiarów. Duże znaczenie ma też grubość folii. Wpływ grubości folii, z której wycinano próbki do rozciągania, na współczynnik oddziaływania powierzchniowo aktywnego przedstawiono na rys. 1.9 [168].



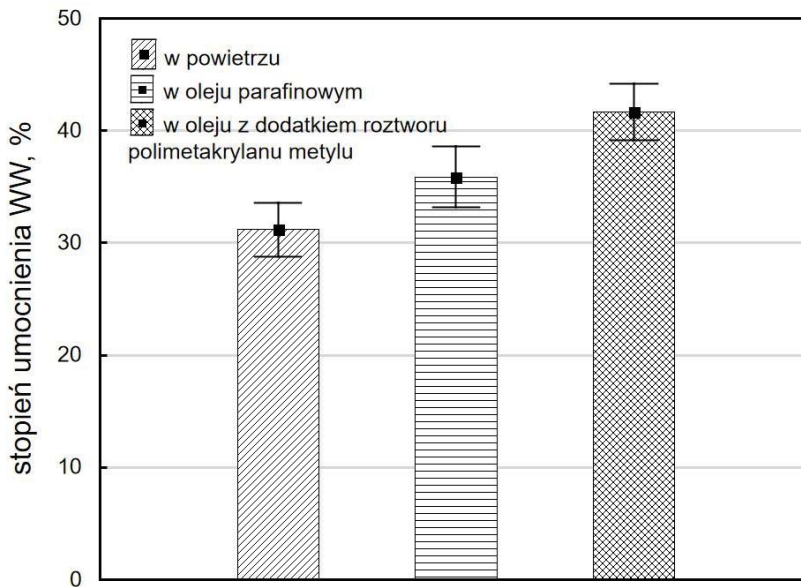
Rys. 1.9. Wpływ grubości folii metalowej na współczynnik oddziaływania powierzchniowo aktywnego dla oleju parafinowego oraz oleju parafinowego z dodatkiem roztworu polimetakrylanu metylu

Grubość rozciąganych próbek, wykonanych ze stali C35, zmieniano w granicach od 0,11 mm do 0,28 mm. Próbki rozciągano w oleju parafinowym, w mieszaninie oleju parafinowego z dodatkiem roztworu polimetakrylanu metylu oraz, dla porównania, w powietrzu. Na podstawie wyznaczonych doświadczalnie krzywych całkowitych odkształceń względnych od naprężeń można obliczyć według zależności (1.5) średnie odkształcenia plastyczne ε_p . Po wyznaczeniu średnich odkształceń plastycznych próbki rozciąganej w badanej cieczy i w powietrzu, korzystając ze wzoru (1.6), oblicza się współczynnik oddziaływania powierzchniowo aktywnego p_a .

Zmniejszenie grubości folii z 0,28 mm do 0,11 mm powoduje około trzykrotne zwiększenie wartości współczynnika oddziaływania powierzchniowo aktywnego. Można to wyjaśnić wzrostem stosunku grubości warstwy, której właściwości ulegają zmianie pod wpływem cieczy powierzchniowo aktywnej, do grubości rozciąganej próbki. Dodatek roztworu polimetakrylanu metylu do cieczy, w której rozciągana jest folia metalowa, powoduje około dwu- trzykrotny wzrost współczynnika oddziaływania powierzchniowo aktywnego w porównaniu z rozciąganiem w samym oleju parafinowym [168].

1.6.3. Wpływ dodatków powierzchniowo aktywnych na stopień umocnienia warstwy wierzchniej

Nagniatanie dynamiczne w środowisku środka smarnego pozwala uzyskać większe odkształcenia plastyczne obrabianego materiału w porównaniu z nagniataniem „na sucho”, co przekłada się na zwiększenie twardości warstwy wierzchniej nagniatanego przedmiotu. Dalszy wzrost twardości WW można uzyskać poprzez wprowadzenie do cieczy smarującej dodatków powierzchniowo aktywnych. Wzrost twardości WW po nagniataniu dynamicznym rozproszonym przedmiotów ze stali C45, wyrażony w postaci stopnia umocnienia WW obliczonego według zależności (1.3), widoczny jest na rys. 1.10 [173].



Rys. 1.10. Wpływ rodzaju cieczy obróbkowej na stopień umocnienia WW próbek ze stali C45 po nagniataniu dynamicznym rozproszonym

Zwiększenie stopnia umocnienia WW po nagniataniu dynamicznym wskutek wprowadzenia do strefy uderzeń w obrabianą powierzchnię oleju z dodatkiem roztworu polimetakrylanu metylu o około 30% w stosunku do nagniatania w powietrzu jest argumentem uzasadniającym celowość stosowania cieczy z dodatkami powierzchniowo aktywnymi w procesie nagniatania.

2. METODY OCENY SKUTKÓW NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO

Nagniatanie dynamiczne stosowane jest, na ogół, w celu poprawy właściwości użytkowych obrabianych przedmiotów. Toteż badania wpływu ND na konkretne właściwości użytkowe, np. na wytrzymałość zmęczeniową, dają najbardziej miarodajną ocenę efektów tej obróbki. Jednakże badania takie są długotrwałe i kosztowne, dlatego częściej bada się cechy warstwy wierzchniej obrabianego materiału mające związek z właściwościami użytkowymi, albo stosuje się metody kontroli prawidłowości przebiegu procesu ND. Prawidłowość przebiegu i skutki nagniatania dynamicznego mogą być oceniane metodami:

- kontroli procesu w czasie jego trwania,
- pomiaru intensywności ND (często używana jest nazwa: „intensywność kulowania”),
- oceny stopnia pokrycia powierzchni odciskami powstającymi wskutek uderzeń elementów nagniatających,
- badań struktury geometrycznej powierzchni,
- badań właściwości fizycznych warstwy wierzchniej,
- badań anihilacji pozytonów,
- badań właściwości użytkowych nagniatanych przedmiotów.

2.1. Bieżąca ocena przebiegu nagniatania dynamicznego

Obserwacja wzrokowa przebiegu obróbki ND jest, na ogół, utrudniona, albo wręcz niemożliwa. Łatwiejsza jest obserwacja przebiegu nagniatania impulsowego (NDSI) oraz odśrodkowego (NDSO). Nagniatanie tymi sposobami bardzo często jest prowadzone na maszynach technologicznych do obróbki skrawaniem, które wyposażone są w przezroczyste osłony umożliwiające obserwację strefy obróbki. Dokładniej można obejrzeć powierzchnię przedmiotu podczas przerwy w nagniataniu (można ocenić, w przybliżeniu, równomierność nanoszonych odcisków).

Nagniatanie rozproszone (NDR), zarówno strumieniowe (NDRS) jak i wibracyjne (NDRW), które polega na uderzaniu w powierzchnie obrabianych przedmiotów swobodnymi elementami nagniatającymi, prowadzone jest zwykle w zamkniętej przestrzeni ze względu na bezpieczeństwo, gdyż odbite elementy nagniatające (śrut albo kulki) są zagrożeniem dla otoczenia. Bezpośrednia obserwacja jest możliwa tylko wówczas, gdy w ściankach osłon lub komór roboczych umiejscowione są okna z przezroczystego materiału.

Ciągła kontrola prawidłowości przebiegu nagniatania rozproszonego może być przeprowadzona metodą specjalnej sondy metalowej. Badania procesu nagniatania ultradźwiękowe w komorze roboczej za pomocą swobodnych kulek, przeprowadzone z zastosowaniem czujnika elektrodynamicznego do pomiaru

odkształceń sondy, potwierdziły wpływ masy i średnicy nagniatających kulek oraz amplitudy drgań komory na efekty nagniatania [112]. Metoda ta może być zastosowana również podczas obróbki innymi sposobami NDR.

2.2. Pomiar intensywności nagniatania dynamicznego za pomocą płytek kontrolnych

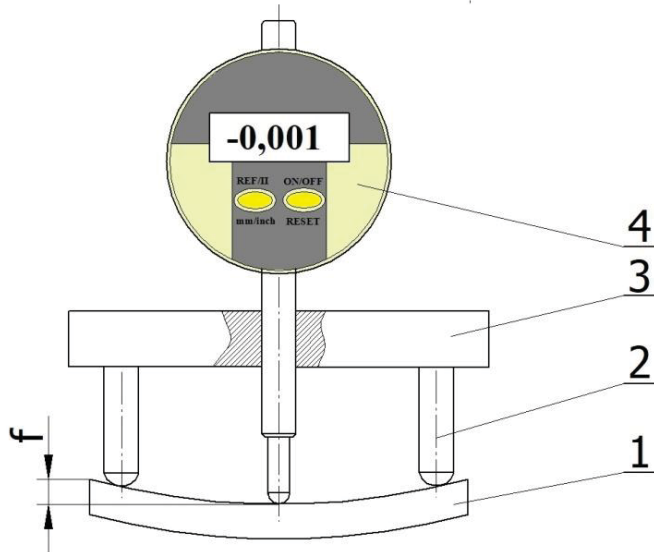
Intensywność nagniatania dynamicznego rozproszonego, szczególnie strumieniowego, określana jest za pomocą płytek kontrolnych, nazywanych płytkami Almena. Płytki te wykonywane są ze stali sprężynowej, ich długość wynosi 76 mm, a szerokość – 19 mm. Grubość płytek, w zależności od intensywności nagniatania, wynosi:

- dla małej intensywności nagniatania – 0,8 mm (typ płytki oznaczany symbolem „N”),
- dla średniej intensywności – 1,3 mm (typ płytki „A”),
- dla dużej intensywności – 2,4 mm (typ płytki „C”).

Odchyłki grubości wszystkich płytek wynoszą $\pm 0,02$ mm. Powierzchnie płytek powinny być szlifowane.

Płytki mocowane są w specjalnym uchwycie i nagniatane dynamicznie razem z obrabianymi przedmiotami (w jednakowych warunkach technologicznych). Pod wpływem nagniatania w warstwie wierzchniej powstają naprężenia własne, które, przy jednostronnym nagniataniu, powodują odkształcanie się (wyginanie) płytek.

Do pomiarów strzałki ugięcia płytek używa się specjalnego przyrządu, którego budowę schematycznie przedstawiono na rys. 2.1. Płytkę kontrolną 1 ustawia się tak, aby opierała się na kołkach oporowych 2, po czym strzałkę ugięcia f mierzy się za pomocą czujnika 4, który zamocowany jest w obsadzie 3. Wynik pomiaru intensywności nagniatania dynamicznego zawiera typ płytki oraz wartość strzałki ugięcia wyrażoną w milimetrach.



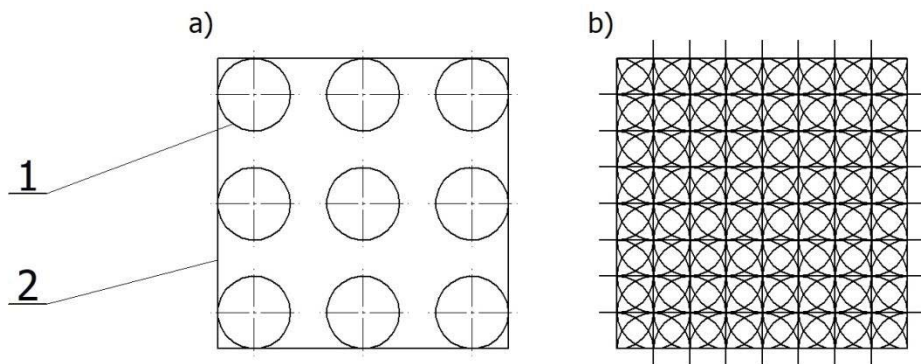
Rys. 2.1. Schemat budowy przyrządu do pomiaru strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena:
1 – płytka Almena, 2 – kołek oporowy, 3 – obsada, 4 – czujnik

Optymalną intensywność ND można określić na podstawie wykresu przedstawiającego zależność strzałki ugięcia płytki w funkcji czasu nagniatania [102].

Płytki kontrolne Almena często stosowane są do sprawdzania stabilności warunków nagniatania dynamicznego, które mogą zmieniać się wskutek, na przykład, zużywania się medium obróbkowego w procesie NDR.

2.3. Ocena stopnia pokrycia nagniatanej powierzchni

W zależności od warunków technologicznych nagniatania dynamicznego zmieniają się wymiary odcisków, powstających na obrabianej powierzchni wskutek uderzeń elementów nagniatających, jak i „zagęszczenie” tych odcisków. Na rys. 2.2a przedstawiono przykład powierzchni 2 tylko częściowo pokrytej odciskami 1, natomiast na rys. 2.2b widoczna jest powierzchnia w całości pokryta odciskami (ślądami uderzeń).



Rys. 2.2. Przykład powierzchni częściowo pokrytej odciskami (a) oraz całkowicie pokrytej odciskami (b): 1 – odcisk, 2 – nagniatana powierzchnia

Stosunek sumy pól rzutów odcisków na daną powierzchnię do pola tej powierzchni, zwykle wyrażany w procentach, nazywany jest stopniem pokrycia tej powierzchni. Jeżeli odciski są jednakowe, to stopień pokrycia K_o można wyznaczyć z zależności [126]:

$$K_o = 100A_o j, \% \quad (2.1)$$

gdzie: A_o – pole rzutu pojedynczego odcisku na nagniataną powierzchnię,
 j – liczba uderzeń (odcisków) elementów nagniatających przypadająca na jednostkę nagniatanej powierzchni.

Według wzoru (2.1) łatwo można obliczyć stopień pokrycia powierzchni obrabianej nagniataniem skoncentrowanym (NDS), ponieważ na podstawie parametrów obróbki możliwe jest wyznaczenie liczby uderzeń elementu nagniatającego na jednostkę powierzchni, a pole rzutu odcisku na nagniataną powierzchnię można zmierzyć. Bardziej złożona jest sytuacja w przypadku nagniatania rozproszonego (NDR), gdyż ze względu na „nieuporządkowany” ruch elementów nagniatających rozmieszczenie śladów uderzeń jest nieregularne, a pola rzutów odcisków na obrabianą powierzchnię mogą być różne.

Obserwację powierzchni po nagniataniu w celu określenia stopnia pokrycia wykonuje się przy użyciu mikroskopu (zwykle stosuje się powiększenie 50x). W celu ułatwienia analizy powierzchni oraz określenia stopnia pokrycia może być zastosowana fluoroscencyjna powłoka elastyczna, która pod wpływem uderzeń elementów nagniatających jest usuwana z powierzchni [102].

2.4. Badania struktury geometrycznej powierzchni po nagniataniu dynamicznym

Pojęcie struktury geometrycznej powierzchni (SGP) obejmuje układ wzniesień i wgłębień powierzchni przedmiotu, z uwzględnieniem ich kształtu, rozmieszczenia i wymiarów. Na SGP składają się błędy kształtu, falistość, chropowatość oraz wady powierzchni.

Błędy kształtu spowodowane nagniataniem dynamicznym najczęściej powstają wskutek naprężeń własnych generowanych w warstwie wierzchniej obrabianych przedmiotów. Największe zagrożenie powstawaniem błędów kształtu występuje podczas nagniatania elementów cienkościennych, o złożonym kształcie oraz o zmiennym przekroju, gdyż takie elementy najbardziej narażone są na odkształcenia spowodowane naprężeniami własnymi.

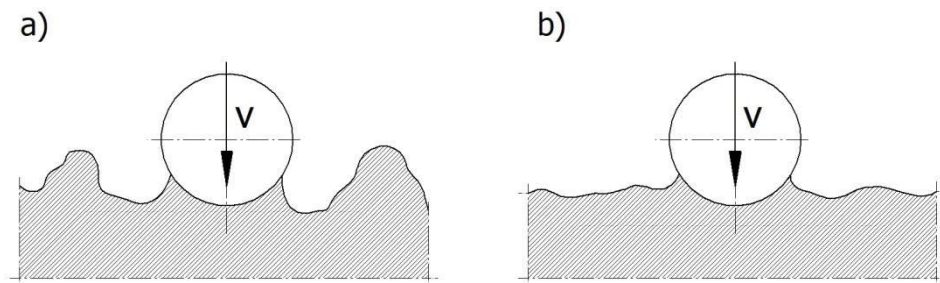
Nagniatanie dynamiczne powoduje zwykle zmianę kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni. SGP przed nagniataniem jest, na ogół, ukierunkowana, a rodzaj kierunkowości zależy od sposobu obróbki poprzedzającej ND (może być, na przykład, równoległa, skrzyżowana, współśrodkowa, promieniowa). Natomiast podczas obróbki ND odciski, powstające na obrabianej powierzchni wskutek uderzeń elementów nagniatających, tworzą strukturę bezkierunkową, nazywaną też punktową. Jeżeli elementy nagniatające uderzają w obrabianą powierzchnię pod niewielkim kątem, np. podczas nagniatania odśrodkowego, to powierzchnia po obróbce może wykazywać cechy ukierunkowania.

Pod wpływem nagniatania dynamicznego następuje zmiana kształtu mikronierówności powierzchni, co przekłada się na zmianę wartości parametrów chropowatości. Do czynników wpływających na chropowatość powierzchni po ND można zaliczyć:

- rodzaj i właściwości materiału obrabianego,
- chropowatość powierzchni przed nagniataniem,
- geometrię i chropowatość powierzchni elementu nagniatającego,
- właściwości materiału elementu nagniatającego,
- prędkość i kąt uderzenia elementu nagniatającego w obrabianą powierzchnię,
- liczbę uderzeń na jednostkę obrabianej powierzchni.

Jednym z celów nagniatania dynamicznego, zwłaszcza gładkościowego, jest zmniejszenie chropowatości powierzchni. Jednakże, w zależności od warunków technologicznych ND, chropowatość powierzchni może ulec zmniejszeniu albo zwiększeniu. Na rys. 2.3a pokazano schematycznie zmniejszanie wysokości mikronierówności powierzchni w wyniku ich odkształcenia („spłaszczania”) przez uderzający element nagniatający. Takiemu kształtowaniu SGP sprzyja mała energia uderzenia elementu nagniatającego w obrabianą powierzchnię i duża chropowatość powierzchni przed nagniataniem. Natomiast, jeżeli energia uderzenia jest duża, to może nastąpić nie tylko odkształcenie mikronierówności, zwłaszcza gdy ich wysokość jest mała, ale również „wybicie” wgłębienia

w obrabianym materiale (rys. 2.3b). W takim przypadku po ND wysokość chropowatości może ulec zwiększeniu. Wzrost chropowatości powierzchni często następuje po nagniataniu z zastosowaniem, jako medium nagniatającego śrutu ciętego, charakteryzującego się małymi promieniami zaokrąglenia krawędzi (tzw. śrutowanie).



Rys. 2.3. Schemat kształtowania chropowatości powierzchni podczas nagniatania dynamicznego: a) „spłaszczanie” mikronierówności, b) wybijanie wgłębień

W procesie umacniającego nagniatania dynamicznego należy dobierać takie warunki technologiczne, które zapewnią odkształcenie plastyczne warstwy materiału pod całą powierzchnią nagniataną a nie tylko odkształcenie wzniesień mikronierówności.

Do pomiarów chropowatości i falistości powierzchni po nagniataniu dynamicznym najczęściej stosuje się przyrządy stykowe, nazywane profilometrami. Pomiar tymi przyrządami polega na przesuwanie po badanej powierzchni igły o znanej geometrii, której przemieszczenia pionowe, po przekształceniu i wzmocnieniu, są przetwarzane na wartości liczbowe parametrów chropowatości. Definicje parametrów chropowatości i falistości powierzchni podano w normie PN – EN ISO 4287: 1999 [Nor.4].

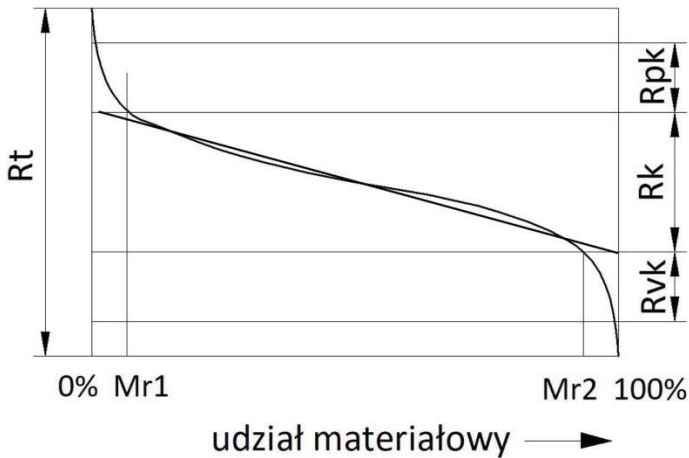
Do najbardziej rozpowszechnionych parametrów chropowatości, stosowanych również do oceny stanu powierzchni po ND, należy zaliczyć:

- największą wysokość profilu chropowatości R_z ,
- średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowatości R_a .

Do oceny „spłaszczenia” wierzchołków mikronierówności powierzchni pod wpływem uderzeń elementów nagniatających może być stosowany współczynnik asymetrii profilu chropowatości R_{sk} , nazywany też skośnością. Ujemna wartość tego współczynnika świadczy o płaskich wierzchołkach wzniesień profilu i wąskich wgłębieniach. Powierzchnia taka wykazuje korzystne cechy podczas obciążeń stykowych. Współczynnik R_{sk} jest funkcją sześciannu rzędnych profilu, a w związku z tym, pojedyncze duże wzniesienia czy zagłębienia mają znaczący wpływ na jego wartość. Zatem uzyskanie wiarygodnych wyników wymaga dużej liczby powtórzeń pomiarów [163].

Zmiany kształtu mikronierówności powierzchni wskutek ND mogą być oceniane za pomocą wartości średniego kwadratowego wzniosu profilu chropowatości $R\Delta q$. W dawniej obowiązującej normie PN – 87/M-04256/02 [Nor. 5] występuje spełniający podobną funkcję parametr Δ_a , określany jako średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości, który był stosowany do oceny stanu powierzchni po ND [80].

Struktura geometryczna powierzchni po nagniataniu często charakteryzowana jest za pomocą krzywej udziału materiałowego, nazywanej też krzywą Abbott'a – Firestone'a. Krzywa ta przedstawia udział materiałowy profilu Mr , zwykle wyrażony w procentach, w funkcji odległości od linii przechodzącej przez najwyższy punkt profilu i równoległej do linii średniej (rys. 2.4).



Rys. 2.4. Graficzna interpretacja parametrów krzywej udziału materiałowego profilu chropowatości

Kształt krzywej udziału materiałowego profilu chropowatości charakteryzowany jest przez następujące parametry, których graficzną interpretację pokazano na rys. 2.4:

- zredukowaną wysokość wzniesień chropowatości R_{pk} ,
- głębokość rdzenia chropowatości R_k ,
- zredukowaną głębokość wgłębień chropowatości R_{vk} .

Na podstawie kształtu oraz parametrów krzywej udziału materiałowego można wnioskować o przebiegu docierania badanego elementu, a także o odporności na zużycie ściernie.

W badaniach naukowych struktury geometrycznej powierzchni po nagniataniu coraz częściej stosuje się pomiary przestrzenne. W celu trójwymiarowej

analizy powierzchni może być przedstawiona graficznie w postaci izometrycznego obrazu oraz mapy konturowej.

Do badań przestrzennych chropowatości powierzchni stosowane są parametry, które definiowane są podobnie jak parametry chropowatości 2D (tylko w układzie trójwymiarowym). Do takich parametrów można zaliczyć [1]:

- średnie kwadratowe odchylenie powierzchni Sq ,
- współczynnik skośności powierzchni Ssk ,
- współczynnik nachylenia powierzchni Sku ,
- średnie kwadratowe pochylenie powierzchni Sdq .

Są też parametry określające właściwości nośne powierzchni oraz zdolność powierzchni do gromadzenia środka smarnego [1].

Metody pomiarów struktury geometrycznej powierzchni dzieli się na stykowe i bezstykowe. Do badań SGP po nagniataniu najczęściej stosowane są metody stykowe. Jako wady metod stykowych wymieniane są odkształcenia sprężyste i plastyczne materiału wskutek nacisku pomiarowego oraz możliwość zarysowania powierzchni badanego przedmiotu przez przesuujące się ostrze odwzorowujące. Obróbce ND poddawane są, na ogół, elementy wykonane z materiałów niezbyt miękkich, przy czym ich twardość jest dodatkowo zwiększana wskutek umocnienia WW, zatem wydaje się, że błędy spowodowane wyżej wymienionymi wadami nie mają istotnego znaczenia. Obróbce nagniataniem nie są też poddawane materiały bardzo twarde, które mogłyby powodować przyspieszone zużywanie się igły odwzorowującej.

Do pomiarów chropowatości powierzchni po ND stosowane są głównie profilometry. Przyrządy te można podzielić na przenośne, nazywane też warsztatowymi, oraz stacjonarne, które stosowane są do badań laboratoryjnych. Przyrządy przenośne umożliwiają zwykle pomiar kilku parametrów chropowatości, a niektóre z nich również wykonywanie profilogramów powierzchni. Znacznie szersze możliwości pomiarowe mają przyrządy stacjonarne, przy czym możliwości te są bardzo zróżnicowane w zależności od rodzaju profilometru. Przyrządy te umożliwiają zarówno pomiary SGP w wybranym przekroju powierzchni (2D) jak i pomiary oraz analizę przestrzenną (3D). Mogą być stosowane do pomiarów chropowatości, falistości oraz błędów kształtu.

Pomiary bezstykowe są znacznie rzadziej stosowane w badaniach SGP po nagniataniu. Jedną z szybko rozwijających się metod bezstykowego pomiaru SGP jest metoda oparta na zastosowaniu sondy laserowej, w której ostrze igły odwzorowującej zastąpione zostało silnie zogniskowaną wiązką światła. Do badań struktury geometrycznej bardzo gładkich powierzchni mogą być wykorzystane mikroskopy sił atomowych, które mogą pracować w trybie kontaktowym jak i bezkontaktowym.

2.5. Badania właściwości fizycznych warstwy wierzchniej przedmiotów nagniatanych dynamicznie

Pod wpływem uderzeń elementów nagniatających następuje odkształcenie plastyczne obrabianego przedmiotu na głębokości od kilku setnych do kilku dziesiątych milimetra. Grubość warstwy odkształconej plastycznie zależy od warunków technologicznych ND. Głównym mechanizmem odkształcenia plastycznego są poślizgi zachodzące w siatce krystalicznej [102, 113, 126]. Ze wzrostem gęstości defektów sieci krystalicznej, głównie dyslokacji i wakansów, następuje zwiększenie oporów odkształceń plastycznych. Umocnienie przez zgniot charakteryzuje się wzrostem granicy plastyczności, twardości, kruchości, a zmniejszeniem plastyczności warstwy wierzchniej nagniatanych przedmiotów. Następuje też zmiana innych właściwości WW, takich jak odporność na pełzanie, tarcie wewnętrzne, oporność elektryczna, koercja, przenikalność magnetyczna, indukcja szczątkowa [113]. Jednakże najczęściej właściwości fizyczne warstwy wierzchniej przedmiotów nagniatanych dynamicznie oceniane są na podstawie wzrostu twardości i przemian strukturalnych a także rozkładu naprężeń własnych.

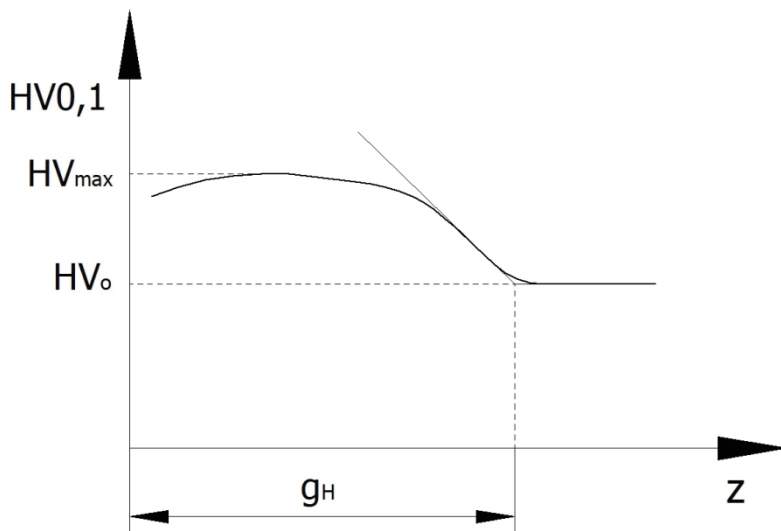
2.5.1. Badania struktury metalograficznej i mikrotwardości warstwy wierzchniej

Obróbce nagniataniem dynamicznym poddawane są przedmioty wykonane ze stopów różnych metali, na przykład ze stali, stopów tytanu, czy stopów aluminium, o różnej strukturze metalograficznej. Przemiany strukturalne materiału WW spowodowane są głównie odkształceniem plastycznym wskutek uderzeń elementów nagniatających. Po nagniataniu zwykle widoczne są zmiany kształtu (wydłużenie) ziaren, ich ukierunkowanie, a także rozdrobnienie. Rzadziej można zaobserwować przemiany fazowe, na przykład przemianę austenitu szczątkowego w martenzyt. Do badań struktury metalograficznej WW po nagniataniu używane są mikroskopy optyczne i elektronowe.

Kolejną wielkością stosowaną do oceny skutków nagniatania dynamicznego jest twardość WW. Grubość warstwy o zwiększonej twardości jest niewielka (zwykle nie przekracza kilku dziesiątych milimetra), zatem rozkład twardości w tej warstwie może być określony metodami pomiarów mikrotwardości. Najczęściej stosuje się metodę Vickersa, rzadziej Knoopa. Mikrotwardość mierzona jest na zglądach prostopadłych albo ukośnych.

Podczas pomiarów mikrotwardości sposobem Vickersa, zgodnie z normą PN – EN ISO 6507-1: 2007 [Nor. 6], siła obciążająca diamentowy wgłębnik w kształcie ostrosłupa prawidłowego o podstawie kwadratowej jest większa lub równa 0,09807 N i mniejsza od 1,961 N. Mikrotwardość Vickersa jest proporcjonalna do ilorazu siły obciążającej i pola powierzchni odcisku powstającego

wskutek wciskania wgłębnika w powierzchnię badanej próbki. Przykładowy rozkład mikrotwardości $HV_{0,1}$ w funkcji odległości od powierzchni z po nagniataniu przedstawiono na rys. 2.5. Na podstawie rozkładu mikrotwardości można wyznaczyć przyrost mikrotwardości (różnica mikrotwardości maksymalnej HV_{max} i mikrotwardości rdzenia HV_o), głębokość warstwy utwardzonej g_H oraz stopień umocnienia e , obliczany według wzoru (1.3).



Rys. 2.5. Typowy rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej po nagniataniu dynamicznym

Pomiary twardości sposobem Knoopa przeprowadza się według normy PN – EN ISO 4545-1: 2006 [Nor. 7]. Sposób ten różni się od sposobu Vickersa kształtem wgłębnika, którym jest ostrosłup o podstawie rombu, oraz przyjmowaniem do obliczeń twardości pola powierzchni rzutu odcisku a nie pola powierzchni odcisku jak w metodzie Vickersa.

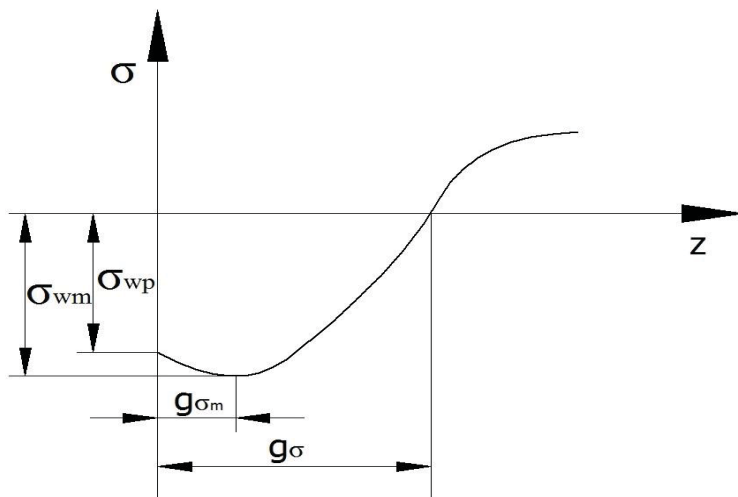
W krótszym czasie można ocenić utwardzenie WW po nagniataniu poprzez pomiary twardości na powierzchni przedmiotu przed i po nagniataniu. Wartości siły obciążającej są zalecane w zakresie od 9,81 N do 49,03 N [102]. Jednak pomiary te nie pozwalają na ocenę gradientu zmian mikrotwardości ani na określenie głębokości warstwy utwardzonej.

2.5.2. Badania naprężeń własnych

Część pracy odkształceń plastycznych warstwy wierzchniej w procesie wytwarzania przedmiotu wydzielana jest w postaci ciepła, a część pozostaje w tej warstwie wpływając na zwiększenie energii wewnętrznej. Różnica między energią odkształconego ciała a energią tego ciała przed odkształceniem nazywana jest energią naprężeń własnych [134].

Powstawanie naprężeń własnych w WW obrabianych przedmiotów może być spowodowane przyczynami mechanicznymi, cieplnymi i strukturalnymi. Naprężenia własne kształtowane podczas obróbki ND są związane z przyczynami mechanicznymi. Odształceniom plastycznym materiału WW towarzyszy wzrost gęstości dyslokacji, w następstwie czego następuje zwiększenie objętości właściwej odkształconego materiału, które może wynosić około $(0,3 \div 0,8)\%$ [16]. Zatem odkształcona plastycznie warstwa materiału, położona bezpośrednio pod nagniataną powierzchnią, dąży do zwiększenia swoich wymiarów. Warstwa ta może zwiększyć swój wymiar w kierunku prostopadłym do powierzchni, natomiast nie mogą być zwiększone wymiary w kierunkach równoległych do powierzchni, ponieważ warstwa odkształcona oraz rdzeń stanowią jednolity materiał. W tej sytuacji w warstwie odkształconej plastycznie kształtowane są naprężenia ściskające, a ponieważ warstwa ta „rozciąga” rdzeń, to powstają w nim, na pewnej głębokości, naprężenia rozciągające.

Przykładowy rozkład naprężeń własnych σ w funkcji odległości od powierzchni nagniatanego dynamicznie przedmiotu z przedstawiono na rys. 2.6. Na głębokości g_σ występują naprężenia własne ściskające (ujemne), które na większej głębokości przechodzą w naprężenia rozciągające. Ściskające naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej σ_{wm} oddalone są o $g_{\sigma m}$ od powierzchni przedmiotu. Ściskające naprężenia własne na powierzchni przedmiotu oznaczono σ_{wp} .



Rys. 2.6. Typowy rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu nagniatanego dynamicznie

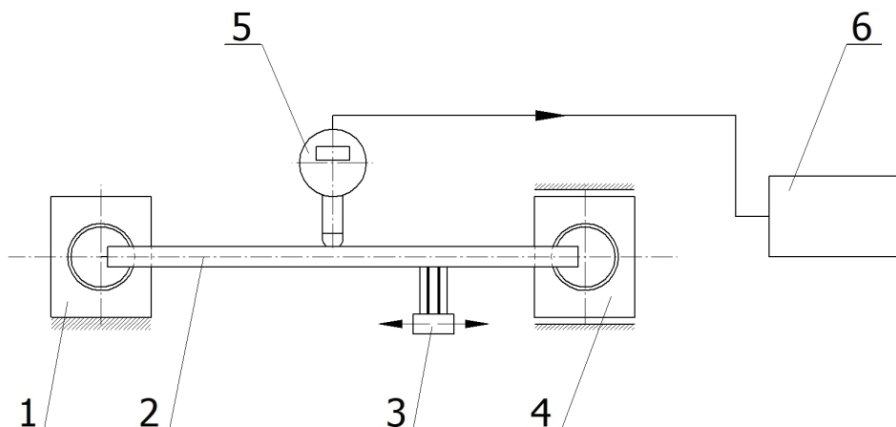
Naprężenia własne mogą być mierzone metodami niszczącymi i nieniszczącymi. Za najczęściej stosowaną metodę niszczącą można uznać metodę mecha-

niczną, a z metod nieniszczących najbardziej rozpowszechniona jest metoda rentgenowska.

Metoda mechaniczna pomiaru naprężeń własnych polega na pomiarze odkształceń cienkościennej próbki podczas usuwania materiału warstwy wierzchniej, w której ukształtowane zostały naprężenia własne. Usuwanie kolejnych warstwek materiału powoduje zakłócenie istniejącego stanu równowagi naprężeń, wskutek czego następuje odkształcenie próbki. Po wyznaczeniu odkształceń próbki w funkcji odległości od badanej powierzchni oblicza się, korzystając z zależności teoretycznych, rozkład naprężeń własnych w badanej warstwie wierzchniej.

Usuwanie materiału WW może odbywać się metodą trawienia chemicznego, trawienia elektrochemicznego lub docierania. Podczas trawienia chemicznego produkty reakcji chemicznych pokrywają trawioną powierzchnię, utrudniając dostęp kwasu do materiału próbki, przez co następuje zmniejszenie prędkości trawienia. W celu zachowania jednakowej prędkości trawienia można zastosować mechaniczne usuwanie produktów reakcji chemicznych z trawionej powierzchni.

Budowę stanowiska do wyznaczania odkształceń próbki prostokątnej podczas trawienia chemicznego przedstawiono schematycznie na rys. 2.7. Badana próbka 2, której powierzchnie nietrawione zabezpiecza się lakierem chemoodpornym, jest mocowana w uchwycie obrotowym 1 oraz uchwycie obrotowo –



Rys. 2.7. Schemat stanowiska do pomiaru naprężeń własnych w próbkach prostokątnych:
1 – uchwyt obrotowy, 2 – badana próbka, 3 – szczotka, 4 – uchwyt obrotowo – przesuwny,
5 – czujnik, 6 – komputer

przesuwny 4. Takie zamocowanie umożliwia swobodne odkształcanie się próbki. Próbka wraz z uchwytem zanurzona jest w roztworze trawiącym, którego skład chemiczny dobierany jest w zależności od materiału próbki. Szczotka 3

przesuwa się ruchem posuwisto-zwrotnym wzdłuż próbki, usuwając produkty trawienia. Odkształcenia próbki (ugięcie) mierzy się za pomocą czujnika 5, a wartości tych odkształceń przesyłane są do komputera 6.

Całkowitą grubość strawionej warstwy określa się na podstawie pomiarów masy próbki przed i po trawieniu oraz wymiarów próbki (masa właściwa materiału próbki jest znana), a po uwzględnieniu sumarycznego czasu trawienia obliczana jest prędkość trawienia. Znajomość tej prędkości umożliwia obliczenie odległości od powierzchni próbki odpowiadające cząstkowym wartościom czasu trawienia, po upływie których mierzone były odkształcenia.

Wartość naprężeń własnych w punkcie położonym w odległości a_i od powierzchni próbki można obliczyć na podstawie zależności [10]:

$$\sigma(a_i) = \frac{4E}{3l^2} \left[(h_0 - a_i)^2 \frac{df(a_i)}{da_i} - 4(h_0 - a_i)f(a_i) + 2 \int_0^{a_i} f(\xi) d\xi \right], \quad (2.2)$$

gdzie: E – moduł Young'a,

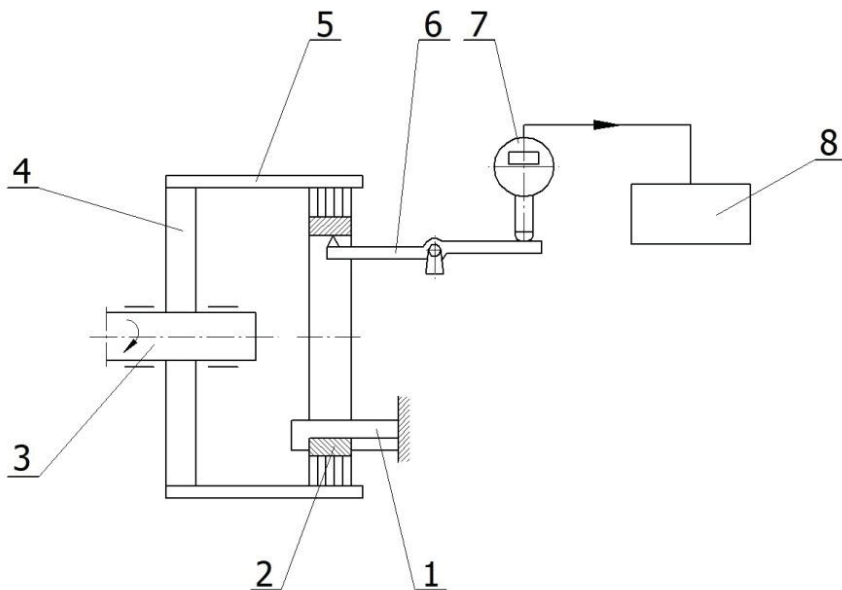
l – długość próbki,

h_0 – grubość próbki przed trawieniem,

$f(a_i)$ – odkształcenie (ugięcie) próbki odpowiadające usunięciu warstwy materiału o grubości a_i ,

ξ – pośrednia grubość warstwy usuniętego materiału.

Na rys. 2.8 przedstawiono schemat stanowiska do pomiaru obwodowych naprężeń własnych w próbkach, które mają kształt cienkościennych pierścieni. Przed rozpoczęciem trawienia próbkę należy przeciąć wzdłuż tworzącej, co umożliwi odkształcenie (zmianę średnicy) próbki w czasie trawienia. Badane są naprężenia własne w zewnętrznej WW próbki, zatem pozostałe powierzchnie zabezpiecza się lakierem chemoodpornym. Przygotowaną do badań próbkę 2 mocuje się w uchwycie 1. Do usuwania produktów reakcji chemicznych z powierzchni trawionej próbki stosowane są szczotki 5, zamocowane na obwodzie tarczy 4, która osadzona jest na obracającym się wale 3. Próbkę wraz z przyrządem zanurza się w roztworze trawiącym. Pomiary odkształceń próbki dokonywane są za pomocą czujnika 7, za pośrednictwem dźwigni 6. Wyniki pomiarów są przekazywane do komputera 8.



Rys. 2.8. Schemat stanowiska do pomiaru naprężeń własnych w próbkach pierścieniowych: 1 – uchwyt, 2 – badana próbka, 3 – wał napędowy, 4 – tarcza, 5 - szczotka, 6 – dźwignia, 7 – czujnik, 8 – komputer

Naprężenia obwodowe oblicza się jako różnicę między naprężeniami zmierzonymi a naprężeniami dodatkowymi, które powstają wskutek wycięcia pierścienia i przecięcia go wzdłuż tworzącej, a także wcześniejszego usunięcia płycej położonych stref WW [10, 39].

W metodach rentgenowskich naprężenia własne obliczane są na podstawie dyfraktometrycznych pomiarów odkształceń sieci krystalicznej. Naprężenia własne mierzone metodą dyfrakcji są wartością średnią naprężeń w objętości badanego materiału, która jest równa iloczynowi powierzchni omiatanej przez wiązkę promieniowania rentgenowskiego i głębokości wnikania tego promieniowania. Promienie rentgenowskie wnikają na niewielką głębokość w badany materiał, która uzależniona jest od rodzaju promieniowania i materiału oraz od warunków, w jakich przeprowadzone zostały pomiary. Na podstawie wyników pomiarów można określić naprężenia własne równoważone w całej objętości materiału (makronaprężenia), naprężenia równoważone w blokach zawierających jedno lub kilka ziaren (mikronaprężenia) oraz naprężenia równoważone w obszarach rzędu stałych komórki elementarnej sieci przestrzennej [39].

Główną zaletą metod rentgenowskich jest ich nieniszczący charakter. Metoda ta jest intensywnie rozwijana i znajduje szerokie zastosowanie zarówno w badaniach laboratoryjnych jak i w warunkach przemysłowych (kontrola jakości części po obróbce). Pomiary tą metodą wymagają długich obliczeń, które wykonywane są przy zastosowaniu technik komputerowych [133].

2.6. Badania warstwy wierzchniej technikami wykorzystującymi anihilację pozytonów

Proces anihilacji polega na wzajemnym oddziaływaniu cząstki z jej antycząstką, w wyniku czego następuje zamiana masy obu tych cząstek na energię. Przykładem anihilacji jest oddziaływanie pozytonu z elektronem. Pozytony są to cząstki mające taką samą masę jak elektrony, ale przeciwny znak ładunku. Źródłem pozytonów mogą być preparaty niektórych izotopów promieniotwórczych, na przykład sodu ^{22}Na , miedzi ^{64}Cu , kobaltu ^{58}Co [45]. Pozytony, po wnikięciu do materiału, tracą swoją energię, po czym anihilują z jednym z elektronów. W wyniku anihilacji pary elektron – pozyton następuje emisja kwantów promieniowania gamma o energii równoważnej masie obydwu cząstek.

Można wyróżnić najczęściej stosowane metody badań procesu anihilacji pozytonów [38, 45]:

- 1) badania rozkładu kąтового kwantów gamma pochodzących z anihilacji dwukwantowej,
- 2) badania średniego czasu życia pozytonów,
- 3) badania poszerzenia dopplerowskiego linii gamma promieniowania anihilacyjnego,
- 4) analiza stosunku natężeń anihilacji trójkwantowej do dwukwantowej.

W badaniach stanu WW po nagniataniu dynamicznym stosowane były głównie dwie pierwsze z wyżej wymienionych metod.

2.6.1. Badania rozkładu kąтового kwantów gamma pochodzących z anihilacji dwukwantowej

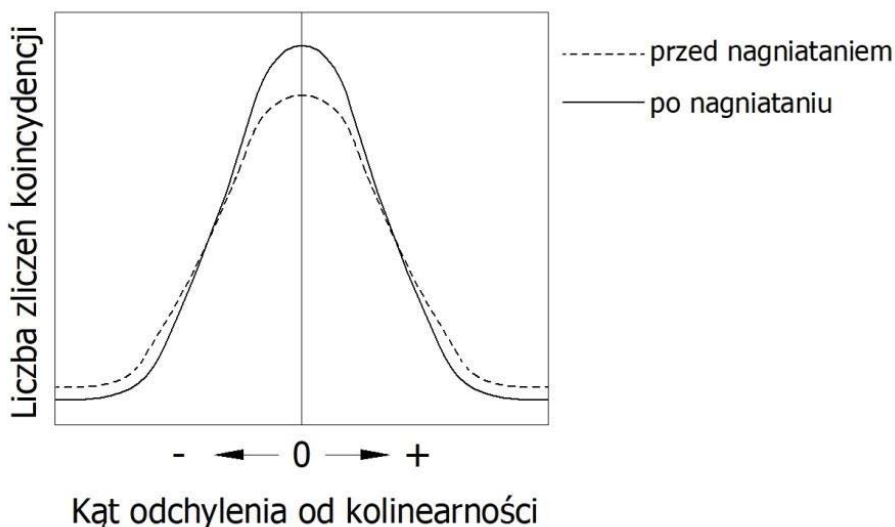
W procesie anihilacji pozytonów może powstać różna liczba kwantów gamma, ale najbardziej prawdopodobna (około 99,7%) jest anihilacja dwukwantowa, dla której energia każdego z nich jest ściśle określona [23]. Jeżeli całkowity pęd pary elektron – pozyton jest równy zeru, to kwanty anihilacyjne gamma rozbiegają się dokładnie pod kątem 180° , natomiast gdy pęd tej pary jest różny od zera, to kierunki ruchu kwantów gamma charakteryzują się pewnym odchyleniem od kolinearności, które jest rzędu kilku – kilkudziesięciu miliradianów.

Do badań rozkładu kąтового kwantów gamma pochodzących z anihilacji dwukwantowej pozytonów może być wykorzystany układ pomiarowy wyposażony w dwa liczniki kwantów gamma, przy czym jeden licznik zamocowany jest nieruchomo, natomiast drugi, znajdujący się po przeciwległej stronie zestawu źródło pozytonów – badana próbka, zmienia w czasie pomiarów swoje położenie. Układ taki umożliwi rejestrowanie kwantów promieniowania anihilacyjnego odchylonego od kolinearności o znany kąt.

Kształt krzywej rozkładu kąтового promieniowania anihilacyjnego zależy od rozkładu pędów elektronów biorących udział w procesie anihilacji. Natomiast rozkład pędów anihilujących elektronów uzależniony jest, między innymi, od

gęstości defektów struktury krystalicznej materiału badanej próbki [45]. Wzrost gęstości defektów (wakansów, dyslokacji) wpływa na zwiększenie liczby zliczeń koincydencji w zakresie małych kątów odchylenia od kolinearności.

Wiadomo, że nagniatanie dynamiczne wpływa na zwiększenie gęstości defektów struktury krystalicznej w WW obrabianych przedmiotów, co ma odzwierciedlenie w kształcie krzywej rozkładu kąтового promieniowania anihilacyjnego. Na rys. 2.9 przedstawiono typowy rozkład kątowy promieniowania anihilacyjnego w próbce ze stali C45 przed nagniataniem (linia przerywana) i po nagniataniu dynamicznym (linia ciągła). Widoczny jest wpływ ND na wzrost liczby zliczeń koincydencji w części centralnej krzywej, odpowiadającym małym wartościom kąta odchylenia od kolinearności, i zmniejszeniem liczby zliczeń w częściach skrzydłowych krzywej rozkładu w obydwu kierunkach.



Rys. 2.9. Schemat rozkładu kąтового promieniowania pochodzącego z anihilacji dwukwantowej pozytonów w próbkach ze stali C45

Jako miarę szerokości rozkładu kąтового promieniowania anihilacyjnego można przyjąć iloraz S/W , gdzie S jest sumą zliczeń koincydencji w części centralnej krzywej rozkładu, a W – w obydwu częściach skrzydłowych.

2.6.2. Badania czasu życia pozytonów

Czas życia pozytonu należy rozumieć jako czas od emisji pozytonu do jego anihilacji. W pomiarach czasu życia pozytonów wykorzystywana jest taka właściwość izotopu ^{22}Na , że gdy to jądro rozpada się, to emituje pozyton oraz niemal jednocześnie kwant gamma o energii 1274 keV. Natomiast anihilacji pozytonu towarzyszy kwant gamma o energii 511 keV. Jako czas życia pozytonów

mierzony jest czas między rejestracją kwantów gamma o energii 1274 keV i energii 511 keV [23].

Czasy życia pozytonów często są rzędu kilkuset pikosekund, co określa wymagania dotyczące zdolności rozdzielczej aparatury pomiarowej. Do pomiarów czasu życia pozytonów wykorzystywane są spektrometry koincydencji opóźnionych typu fast – slow. Źródło pozytonów ^{22}Na umieszcza się między dwiema jednakowymi próbkami tak, aby wszystkie emitowane pozytony anihilowały w badanym materiale. Próbkę wraz ze źródłem pozytonów umieszcza się między dwoma detektorami scyntylicyjnymi, które rejestrują promieniowanie gamma o energii 1274 keV wysyłane w momencie wyemitowania pozytonu (rozpad ^{22}Na) oraz kwanty o energii 511 keV wysyłane w chwili anihilacji pozytonu. Seria pomiarów czasu między tymi dwoma zdarzeniami rejestrowana jest w postaci widma czasów życia pozytonów. Analiza numeryczna widma umożliwia wyodrębnienie składowych o określonym średnim czasie życia i natężeniu, które można przyporządkować poszczególnym frakcjom pozytonów [204].

2.7. Ocena efektywności nagniatania dynamicznego w aspekcie właściwości użytkowych obrabianych przedmiotów

Podstawowym celem nagniatania dynamicznego jest poprawa właściwości użytkowych części maszyn. W wyniku ND osiągnięty jest znaczący wzrost wytrzymałości zmęczeniowej obrabianych przedmiotów. Według wielu autorów publikacji, uzyskiwana jest też, chociaż w mniejszym stopniu, poprawa odporności na zużycie tribologiczne nagniatanych części maszyn. Natomiast wpływ ND na odporność na korozję nie jest określony w sposób jednoznaczny (w zależności od warunków obróbki może ulec poprawie albo pogorszeniu).

2.7.1. Metody badań wpływu nagniatania dynamicznego na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową

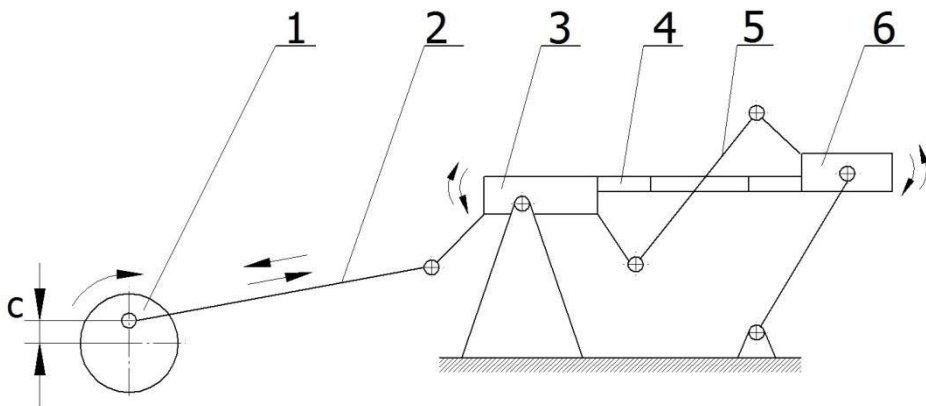
Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej obrabianych przedmiotów jest, w większości przypadków, głównym celem stosowania nagniatania dynamicznego. Kształtowane w wyniku ND ściskające naprężenia własne redukują naprężenia rozciągające występujące w częściach maszyn podczas ich eksploatacji. Również przyrost twardości WW powoduje zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej. Korzystnie na wytrzymałość zmęczeniową wpływa też zmniejszenie chropowatości powierzchni części maszyn, co można osiągnąć poprzez dobór odpowiednich warunków technologicznych ND.

Ocena wpływu nagniatania dynamicznego na wytrzymałość lub trwałość zmęczeniową może być dokonana na podstawie badań laboratoryjnych lub eksploatacyjnych. Badania laboratoryjne mogą być przeprowadzone na specjalnie wykonanych do tych badań próbkach lub na gotowych częściach maszyn.

Próbki do badań wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej powinny być przygotowane bardzo starannie, z zachowaniem wąskich granic tolerancji wymia-

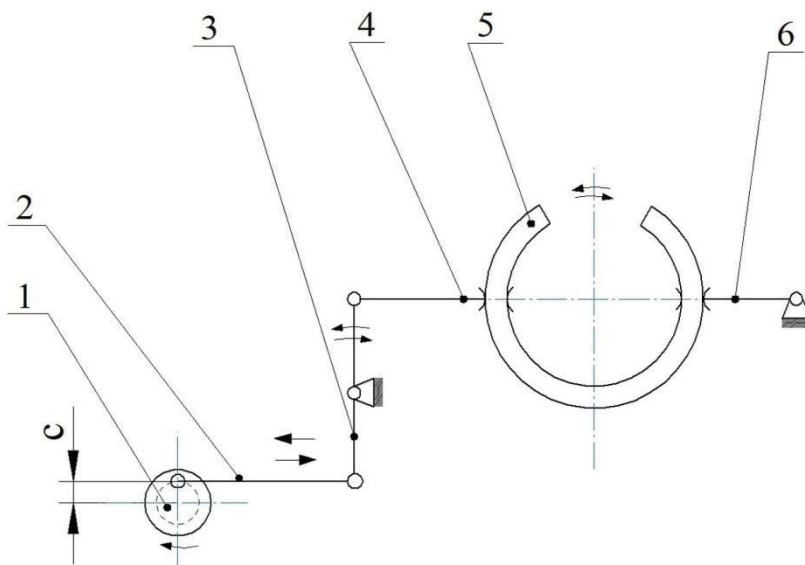
rów, gdyż nawet nieznaczne różnice materiałowe i geometryczne pomiędzy poszczególnymi próbkami znacząco pogarszają dokładność badań. Badania wytrzymałości zmęczeniowej mogą być wykonywane na próbkach znormalizowanych. Do badań porównawczych wpływu sposobu czy też warunków technologicznych nagniatania na trwałość zmęczeniową często stosowane są próbki specjalne. W badaniach wpływu stanu WW na wytrzymałość zmęczeniową ważną kwestią jest zapewnienie jednorodnego stanu WW w miejscach możliwego pojawienia się pęknięć zmęczeniowych. Warunek ten spełniają próbki specjalne, wcięte z przedmiotów w kształcie walca, stosowane przez J. Łunarskiego i współpracowników [81]. Do oceny efektywności ND w aspekcie trwałości zmęczeniowej stosowane są też próbki prostopadłościenne z przewężeniem w części środkowej (obróbka powierzchni płaskich) oraz w kształcie przeciętych wzdłuż tworzącej pierścieni (obróbka powierzchni walcowych).

Próbki prostopadłościenne z przewężeniem mogą być badane na specjalnym urządzeniu, które schematycznie przedstawiono na rys. 2.10. Obracający się wał z mechanizmem mimośrodowym 1 poprzez korbowód 2 i układ dźwigni 5 powoduje wahadłowe zginanie próbki 4, której końce zamocowane są w uchwytach 3 i 6.



Rys. 2.10. Schemat urządzenia do badań trwałości zmęczeniowej próbek prostopadłościennych z przewężeniem: 1 – mechanizm mimośrodowy, 2 – korbowód, 3 – uchwyt lewy, 4 – próbka, 5 – układ dźwigni, 6 – uchwyt prawy

Na rys. 2.11 przedstawiono schematycznie urządzenie do badań trwałości zmęczeniowej próbek pierścieniowych. Próbka 5, której fragment został wycięty w sposób umożliwiający jej cykliczne odkształcanie (przebiegnięcia) w czasie badań, mocowana jest w uchwytach 4 i 6. Odkształcenia próbki 5 wymusza obracający się wał z mechanizmem mimośrodowym 1 poprzez korbowód 2 i dźwignię 3.



Rys. 2.11. Schemat urządzenia do badań trwałości zmęczeniowej próbek pierścieniowych:
 1 – mechanizm mimośrodowy, 2 – korbowód, 3 – dźwignia 4 – uchwyt lewy,
 5 – próbka, 6 – uchwyt prawy

Urządzenia przedstawione na rys. 2.10 i 2.11 wyposażone są w liczniki rejestrujące liczbę przegięć próbki do jej złamania oraz w czujniki powodujące samoczynne wyłączenie układu napędowego po złamaniu próbki. Liczba przegięć próbki do jej złamania przyjmowana jest jako miara trwałości zmęczeniowej. Amplitudę odkształceń próbki można zmieniać w sposób bezstopniowy poprzez dobór wartości mimośrodu c .

Badaniom trwałości zmęczeniowej mogą być poddawane części lub zespoły części maszyn wykonane „na gotowo”, na przykład resory, sprężyny, dźwignie drążka układu kierowniczego samochodu, koła zębate. Badania takie umożliwiają ocenę wpływu ND na trwałość zmęczeniową części lub zespołów części poddanych obciążeniom zbliżonym do obciążeń, na jakie narażone są w czasie eksploatacji.

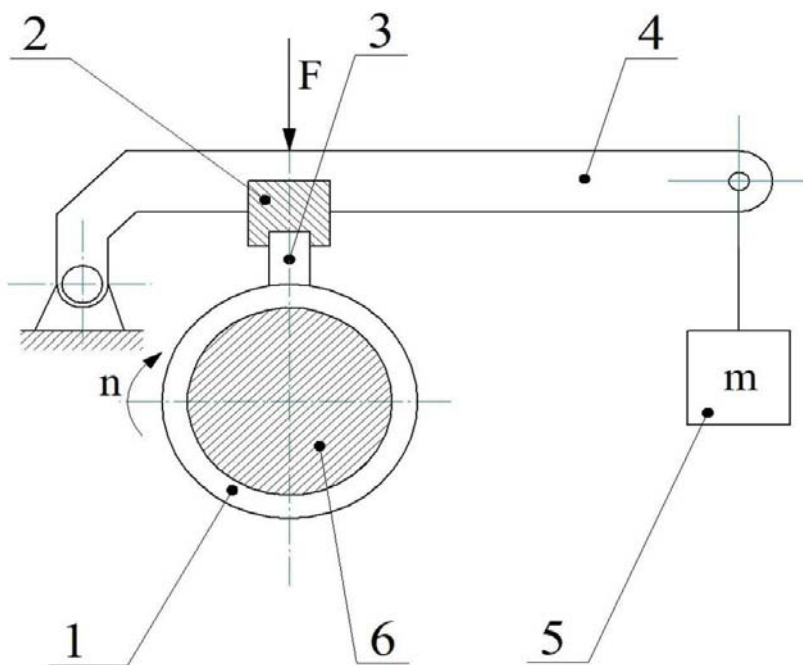
2.7.2. Metody badań wpływu nagiatania dynamicznego na zużycie tribologiczne

Procesy tribologiczne są procesami bardzo złożonymi, trudnymi do analizy wyłącznie metodami teoretycznymi, toteż konieczne jest prowadzenie badań doświadczalnych. Tribologiczne badania doświadczalne dzieli się na podstawowe, stosowane i eksploatacyjne [71].

Jednym z ważniejszych czynników wpływających na przebieg tarcia i zużycia się współpracujących elementów maszyn jest stan ich warstwy wierzchniej.

niej. Jak wiadomo, nagniatanie dynamiczne wpływa na strukturę geometryczną powierzchni oraz fizyczne właściwości WW obrabianych przedmiotów. Należy też zwrócić uwagę, że obróbce ND poddawane są części maszyn narażone w czasie eksploatacji na zużywanie się tribologiczne, na przykład koła zębate. Toteż badania odporności na zużywanie nagniatanych przedmiotów mają istotne znaczenie.

Do badań procesów tarcia i zużycia stosowane są maszyny tribologiczne, które charakteryzują się bardzo dużą różnorodnością ze względu na budowę, rodzaj styku próbki z przeciwpówką, wzajemny ruch próbki i przeciwpówki oraz zakres zmian parametrów ich współpracy, wielkości mierzone i metodę ich pomiaru [71]. Przykładowo, sposób badań tribologicznych próbek w kształcie pierścieni, których powierzchnie zewnętrzne obrabiane były ND przedstawiono na rys. 2.12. Próbka 1, zamocowana na wrzecionie 6, obraca się z prędkością n . Drugim elementem zespołu tribologicznego jest przeciwpówka 3 w kształcie prostopadłościanu, w którym jedna z powierzchni została „dopasowana” tak, aby styk między próbką i przeciwpówką był rozłożony na całej tej powierzchni. Przeciwpówka 3 zamocowana jest w uchwycie 2 połączonym z dźwignią 4. Siła F , z jaką przeciwpówka jest dociskana do próbki, wywierana jest za pomocą dźwigni 4, obciążonej obciążnikami 5 o masie m .



Rys. 2.12. Schemat stanowiska do badań zużycia tribologicznego: 1 – badana próbka, 2 – uchwyt przeciwpówki, 3 – przeciwpówka, 4 – dźwignia, 5 – obciążnik, 6 – wrzeciono

Przed badaniami zasadniczymi przeciwpróbka powinna być docierana do próbki. Na przedstawionym stanowisku może być zmieniana prędkość tarcia, poprzez zmianę prędkości obrotowej wrzeciona n , oraz siła docisku, poprzez zmianę masy m obciążnika.

Oprócz badań laboratoryjnych, w celu oceny wpływu ND na zużycie współpracujących elementów prowadzi się badania eksploatacyjne, które realizowane są na rzeczywistych maszynach lub zespołach części maszyn (np. przekładnie zębate).

3. NAGNIATANIE SKONCENTROWANE

3.1. Nagniatanie impulsowe

Do nagniatania impulsowego (NDSI) stosowane są urządzenia o bardzo zróżnicowanej budowie. Ze względu na sposób wymuszania ruchu elementów nagniatających można wyodrębnić odmiany nagniatania impulsowego: obrotowe, krzywkowe, elektromagnetyczne, piezoelektryczne oraz pneumatyczne.

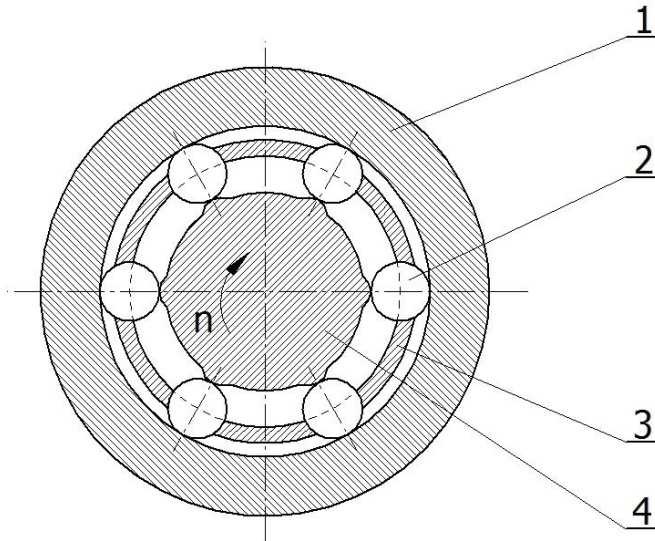
3.1.1. Nagniatanie impulsowe obrotowe

W procesie nagniatania impulsowego obrotowego uderzenia elementów nagniatających w obrabianą powierzchnię następują w wyniku obrotowego ruchu narzędzia. Impulsy uderzeniowe mogą powstawać wskutek:

- odpowiedniego ukształtowania bieżni trzpienia głowicy nagniatającej,
- przesunięcia osi narzędzia względem osi obrabianego otworu.

Elementami nagniatającymi najczęściej są kulki albo wałeczki.

Na rys. 3.1 przedstawiono schematycznie nagniatanie impulsowe głowicą obrotową z bieżnią rowkowaną. Podstawowymi elementami głowicy są: trzpień, elementy nagniatające oraz koszyk. Nagniatana jest powierzchnia wewnętrzna przedmiotu 1. Na powierzchni zewnętrznej trzpienia 4, będącej bieżnią dla elementów nagniatających, występują wypukłości, które podczas ruchu obrotowego trzpienia wymuszają impulsy uderzeniowe elementów nagniatających 2 w obrabianą powierzchnię. Koszyk 3 umożliwia zachowanie stałej odległości między elementami nagniatającymi 2.

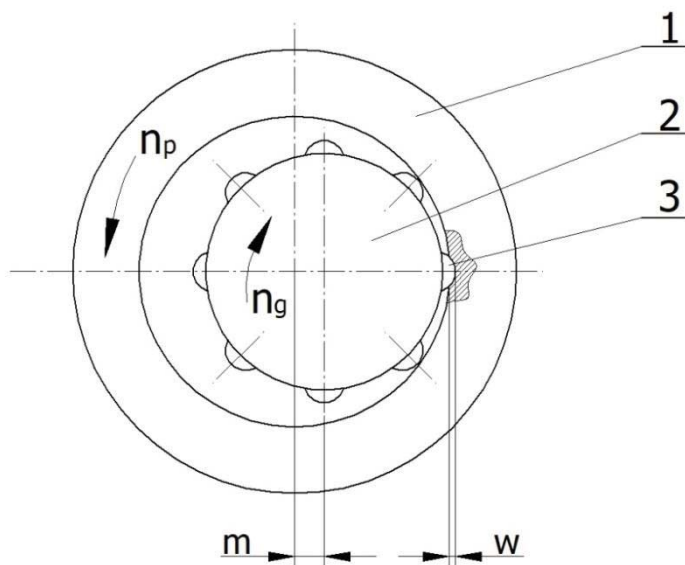


Rys. 3.1. Schemat nagniatania głowicą obrotową z bieżnią rowkowaną: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – element nagniatający, 3 – koszyk, 4 – trzpień głowicy

Do parametrów charakteryzujących głowicę należy zaliczyć średnicę głowicy oraz materiał, wymiary i liczbę elementów nagniatających. Natomiast parametrami technologicznymi są: prędkość obrotowa głowicy, posuw oraz wcisk elementów nagniatających w obrabiany materiał.

Nagniatanie impulsowe obrotowe umożliwia uzyskanie dużego stopnia umocnienia warstwy wierzchniej. Przykładowo, po nagniataniu otworów o średnicy $D = 78$ mm impulsową głowicą kulkową uzyskano stopień umocnienia WW w granicach $(37 \div 39)\%$ w przypadku wcisku $w = 0,18$ mm i $(22 \div 24)\%$ dla wcisku $w = 0,04$ mm (prędkość obrotowa głowicy była równa 400 obr/min). Chropowatość powierzchni po nagniataniu wynosiła od $Ra = 1,4$ μm do $Ra = 5$ μm , w zależności od parametrów technologicznych (głównie posuwu, zmieniającego się w zakresie $f = (0,1 \div 0,7)$ mm/obr). Najmniejszą chropowatość powierzchni otrzymano dla wcisku wynoszącego około 0,1 mm [214].

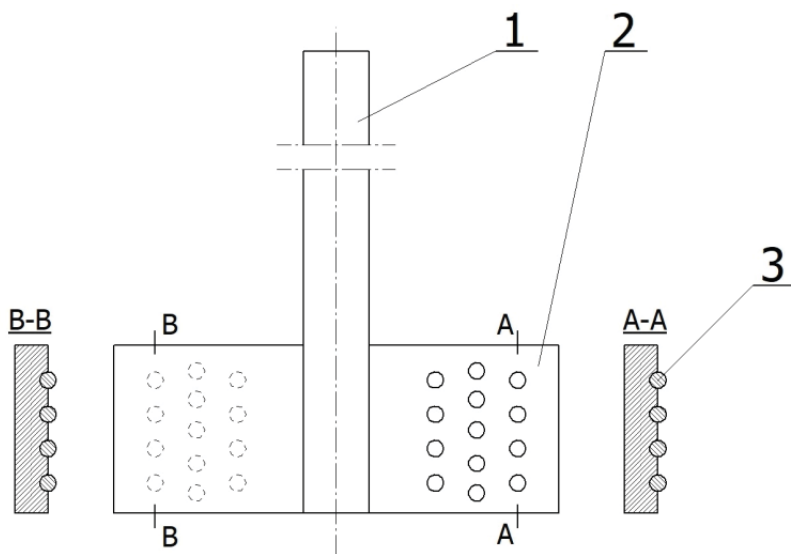
Nagniatanie impulsowe obrotowe głowicą o osi przesuniętej względem osi obrabianego otworu, nazywane też mimośrodowym, przedstawiono schematycznie na rys. 3.2. Na obwodzie trzpienia głowicy 2 zamocowane są elementy nagniatające 3. Głowica wykonuje ruch obrotowy z prędkością n_g , natomiast przedmiot obrabiany obraca się, zwykle w kierunku przeciwnym niż głowica, z prędkością n_p . Oś głowicy jest przesunięta względem osi nagniatanego otworu o wartość m , aby elementy nagniatające 3 uderzały w obrabianą powierzchnię. Wartość przesunięcia m dobierana jest w taki sposób, aby zapewniony był wcisk w elementów nagniatających 3 w obrabiany materiał.



Rys. 3.2. Schemat nagniatania impulsowego obrotowego głowicą o osi przesuniętej względem osi obrabianego otworu: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – trzpień głowicy, 3 – element nagniatający

Nagniatanie mimośrodowe stosowane jest głównie jako obróbka wykończeniowa otworów. Wartość prędkości obrotowej głowicy przyjmowana jest rzędu kilkuset obrotów na minutę, natomiast przedmiot obrabiany obraca się znacznie wolniej (kilkadziesiąt obrotów na minutę). Wcisk, na ogół, nie przekracza 0,3 mm. Po nagniataniu impulsowym obrotowym na obrobionej powierzchni powstają ślady uderzeń elementów nagniatających w postaci wydłużonych, regularnie rozmieszczonych wgłębień (odcisków).

Do nagniatania impulsowego obrotowego stosowane są również narzędzia typu roto-peen (rys. 3.3). Narzędzia te składają się z trzpienia 1, w którym zamocowane są elastyczne płytki 2 z osadzonymi w nich elementami nagniatającymi 3. Jako elementy nagniatające stosowane są kulki o niewielkiej średnicy, rzędu jednego milimetra, wykonane z twardego materiału (np. z węgla spiekanego).



Rys. 3.3. Narzędzie do nagniatania impulsowego obrotowego typu roto-peen: 1 – trzpień, 2 – płytka elastyczna, 3 – element nagniatający

Obracający się z dużą prędkością trzpień 1, wynoszącą od 3000 obr/min do 8000 obr/min, wprawia w ruch elastyczne płytki 2. Średnica narzędzi typu roto-peen zwykle zawiera się w granicach (30 ÷ 50) mm, co pozwala na nagniatanie z prędkością obwodową (240 ÷ 780) m/min. Po umieszczeniu obrabianego przedmiotu w takim położeniu, aby odległość obrabianej powierzchni od osi trzpienia była mniejsza niż odległość od tej osi elementów nagniatających, na-

stępują uderzenia elementów nagniatających 3 w powierzchnię obrabianego przedmiotu [7, 110].

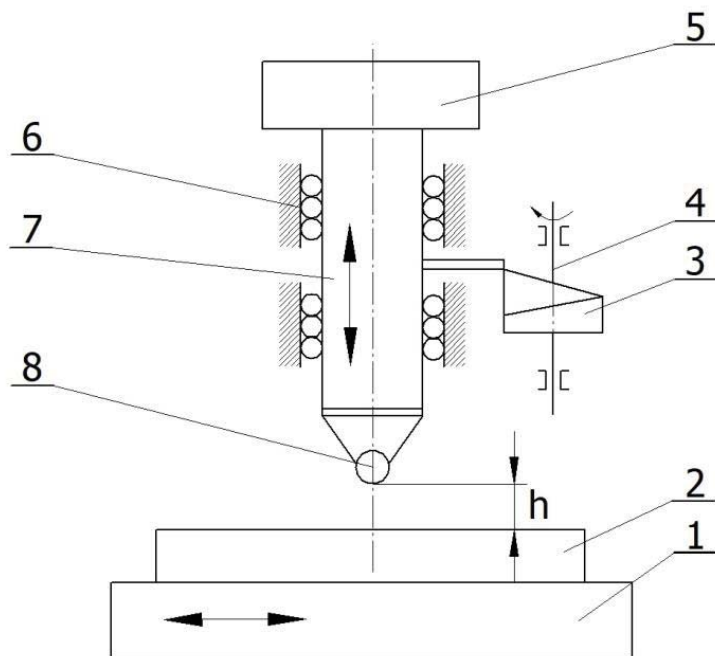
Korzystny wpływ nagniatania impulsowego narzędziami roto-peen na właściwości WW obrabianych przedmiotów można prześledzić na przykładzie próbek ze stali NC10 obrobionych elektroerozyjnie (EDM), a następnie nagniatanych. Stosowano następujące parametry NDSI narzędziami roto-peen: prędkość obrotowa $n = 7000$ obr/min i 5000 obr/min a czas obróbki $t = 2,5$ min i 5 min. W wyniku obróbki umacniającej następuje zwiększenie mikrotwardości WW z około $800 \mu\text{HV}$ do około $1200 \mu\text{HV}$. Korzystnie zmienia się stan naprężeń własnych w WW obrabianych próbek. Po obróbce elektroerozyjnej występowały naprężenia rozciągające o wartości $\sigma = (400 \div 600)$ MPa na głębokości $g_\sigma = (40 \div 50)$ μm . Poddanie próbek obrobionych elektroerozyjnie nagniataniu impulsowemu spowodowało ukształtowanie ściskających naprężeń własnych o wartości około $\sigma = -1400$ MPa na głębokości do $0,4$ mm [7].

Nagniatanie narzędziami roto-peen powierzchni po obróbce elektroerozyjnej pozwala na uzyskanie chropowatości powierzchni $R_a = (1,73 \div 12,7)$ μm . Chropowatość powierzchni po nagniataniu narzędziami typu roto-peen w dużym stopniu zależy od chropowatości powierzchni po poprzedzającej ją obróbce elektroerozyjnej (chropowatość ta związana jest z parametrami technologicznymi procesu EDM). Przykładowo, po nagniataniu powierzchni o chropowatości $R_a = 21,96$ μm uzyskano $R_a = (6,86 \div 12,7)$ μm , a dla powierzchni po obróbce EDM równej $R_a 6,38$ μm chropowatość po nagniataniu wynosiła $R_a = (1,73 \div 4,63)$ μm [110].

3.1.2. Nagniatanie impulsowe narzędziami z mechanizmem krzywkowym

Nagniatanie impulsowe za pomocą narzędzi z mechanizmem krzywkowym odbywa się w taki sposób, że uderzenia elementu nagniatającego w obrabianą powierzchnię następują pod wpływem siły ciężkości obciążnika zamocowanego na suwaku lub siły wywieranej przez sprężynę, natomiast mechanizm krzywkowy służy do przemieszczania elementu nagniatającego na określoną odległość od obrabianej powierzchni.

Na rys. 3.4 przedstawiono schematycznie stanowisko do nagniatania impulsowego powierzchni płaskich. Elementem nagniatającym jest kulka 8 zamocowana w suwaku 7, który przesuwa się w prowadnicach tocznych 6. Zamocowana na obracającym się wale 4 krzywka 3 powoduje wznoszenie suwaka 7 na wysokość h , po czym suwak, pod wpływem siły ciężkości związanej z masą obciążnika 5 i samego suwaka, przemieszcza się w dół, powodując uderzenie elementu nagniatającego 8 w obrabiany przedmiot 2. Stół 1, na którym zamocowany jest przedmiot 2, wykonuje ruch posuwowy wzdłużny oraz skokowy ruch poprzeczny (w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku).



Rys. 3.4. Schemat urządzenia do nagniatania impulsowego płaszczyzn: 1 – stół, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – krzywka, 4 – wał krzywki, 5 – obciążnik, 6 – prowadnica toczna, 7 – suwak, 8 – element nagniatający

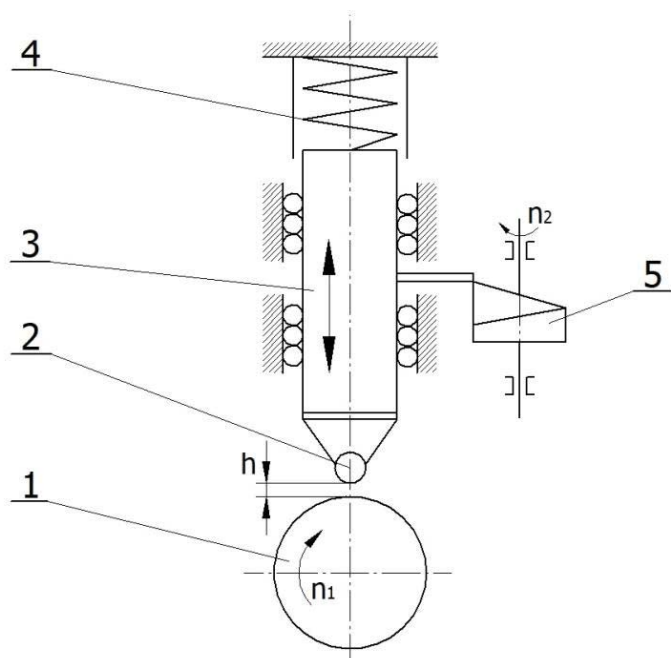
Urządzenie umożliwia dobór parametrów technologicznych nagniatania. Energia uderzenia uzależniona jest od masy suwaka i obciążnika oraz wysokości h , natomiast gęstość uderzeń (liczba uderzeń na jednostkę powierzchni) zależy od prędkości ruchu posuwowego, dosuwu poprzecznego i prędkości obrotowej krzywki. Promień krzywizny elementu nagniatającego można zmienić poprzez wymianę kulki nagniatającej. Widok części roboczej urządzenia pokazano na rys. 3.5.

Nagniatanie impulsowe powierzchni walcowej zewnętrznej przedstawiono na rys. 3.6. Podobnie jak w urządzeniu do nagniatania impulsowego płaszczyzn, suwak 3 wraz z elementem nagniatającym 2 przemieszcza się na odległość h od powierzchni obrabianego wałka wskutek ruchu obrotowego n_2 krzywki 5. Uderzenie elementu nagniatającego 2 w powierzchnię przedmiotu obrabianego 1 następuje pod wpływem siły wywieranej przez sprężynę 4. Obrabiany wałek 1 wykonuje ruch obrotowy ze stałą prędkością obrotową n_1 , co przy stałej częstotliwości uderzeń zapewnia równomierne pokrycie śladami uderzeń na obwodzie wałka. W celu pokrycia odciskami całej powierzchni obrabianego wałka wykonywany jest ruch posuwowy, zwykle przez narzędzie, w kierunku równoległym



Rys. 3.5. Część robocza urządzenia do nagniatania impulsowego płaszczyzn:
1 – suwak z elementem nagniatającym, 2 – przedmiot obrabiany

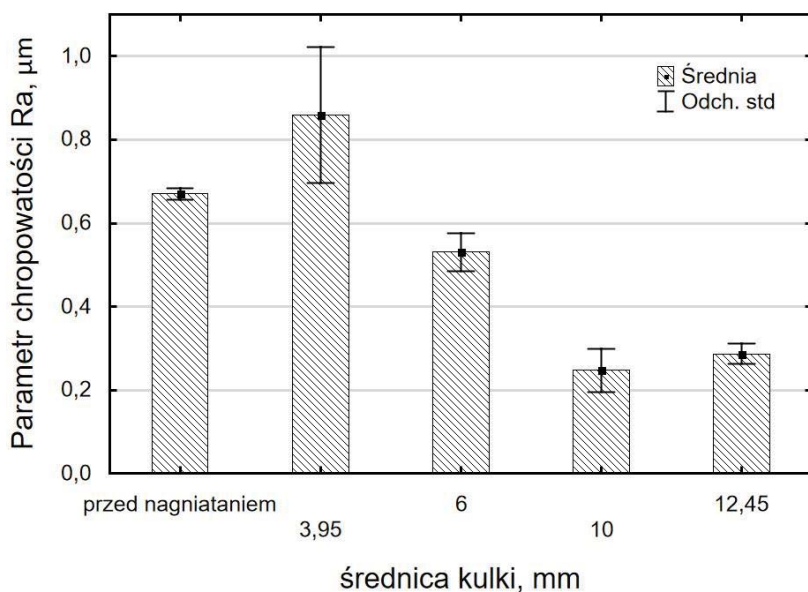
do osi wałka. Nagniatanie impulsowe wałków może być realizowane na tokarce, w której imaku narzędziowym zamontowane jest urządzenie nagniatające.



Rys. 3.6. Schemat urządzenia do nagniatania impulsowego wałków: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – element nagniatający, 3 – suwak, 4 – sprężyna, 5 – krzywka

Energia uderzenia określana jest w zależności od sztywności i ugięcia sprężyny oraz masy suwaka wraz z elementem nagniatającym, natomiast gęstość uderzeń oblicza się na podstawie prędkości obrotowej n , obrabianego wałka, prędkości ruchu posuwowego i częstotliwości uderzeń elementu nagniatającego. Promień krzywizny elementu nagniatającego można zmienić poprzez wymianę części roboczej suwaka wraz z zamocowaną w niej kulką.

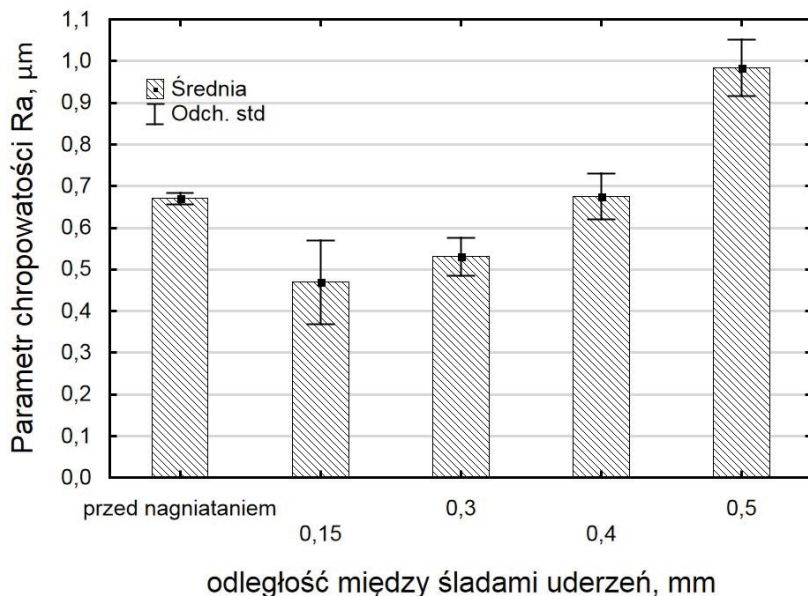
Parametry technologiczne nagniatania impulsowego mają wpływ na właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów. Wpływ średnicy kulki nagniatającej oraz odległości między śladami uderzeń w procesie NDSI (urządzenie krzywkowe) stopu niklu Inconel 718 na parametr Ra chropowatości powierzchni przedstawiono na rys. 3.7 i 3.8 [188]. Ze wzrostem średnicy kulki nagniatającej, przy stałej energii uderzenia i odległości między śladami uderzeń następuje zmniejszenie parametru Ra chropowatości powierzchni (około 3,5-krotne w zakresie średnic kulek od 3,95 mm do 10 mm). Podczas uderzenia kulką o mniejszej średnicy mniejsze jest pole styku kulki z obrabianym materiałem i, przy stałej energii uderzenia, kulka bardziej zagłębia się, „wybijając” większe mikronierówności. Ze wzrostem średnicy kulki zmniejsza się głębokość odcisków powstających wskutek uderzeń a następuje wyrównywanie istniejących



Rys. 3.7. Wpływ średnicy kulki nagniatającej na parametr Ra chropowatości powierzchni stopu Inconel 718 (energia uderzenia $E_u = 180$ mJ, odległość między śladami uderzeń $a_s = 0,3$ mm) [188]

mikronierówności. Dla kulek o średnicy powyżej 10 mm zmniejszenie chropowatości powierzchni nie jest już widoczne (rys. 3.7). Ze wzrostem odległości

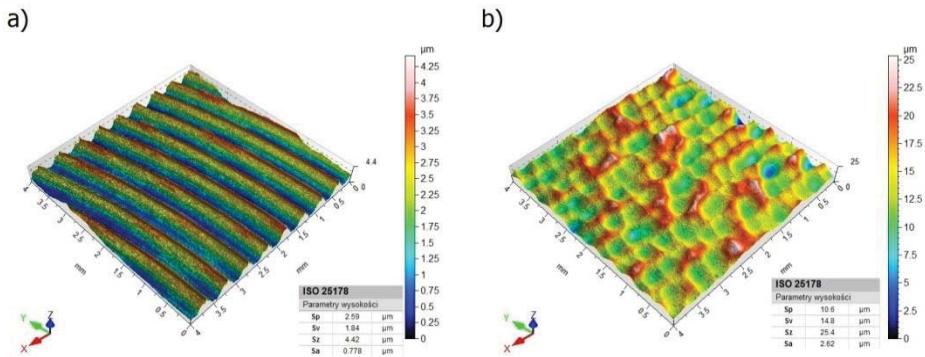
między śladami uderzeń elementu nagniatającego zwiększa się pole powierzchni poszczególnych odcisków, co prowadzi do zwiększenia wysokości chropowatości powierzchni (rys. 3.8).



Rys. 3.8. Wpływ odległości między śladami uderzeń na parametr Ra chropowatości powierzchni stopu Inconel 718 (energia uderzenia $E_u = 180$ mJ, średnica kulki $D_k = 6$ mm) [188]

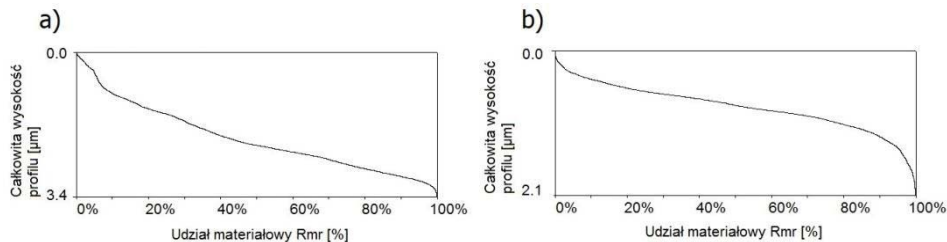
Chropowatość powierzchni po nagniataniu w stosunku do poprzedzającego nagniatanie frezowania, w zależności od parametrów technologicznych, może ulegać zwiększeniu bądź zmniejszeniu. Jednak należy mieć na uwadze, że przedstawione zależności są słuszne tylko dla określonego materiału obrabianego, sposobu i parametrów technologicznych obróbki poprzedzającej nagniatanie oraz przyjętej energii uderzenia.

W wyniku nagniatania impulsowego następuje zmiana kierunkowości struktury geometrycznej obrabianej powierzchni. Na powierzchni po frezowaniu widoczne są podłużne wgłębienia pozostawione przez przemieszczające się ostrze frezu (rys. 3.9a). Wskutek obróbki NDSI istniejące mikronierówności zostały zdeformowane i na obrabianej powierzchni wyraźnie widoczne są odciski elementu nagniatającego, ułożone w kolejnych rzędach, zgodnie z przebiegiem procesu nagniatania (rys. 3.9b).



Rys. 3.9. Topografia powierzchni próbek ze stopu Inconel 718: a) po frezowaniu czołowym, b) po nagniataniu impulsowym (energia uderzenia $E_u = 180$ mJ, odległość między śladami uderzeń $a_s = 0,3$ mm, średnica kulki $D_k = 6$ mm)

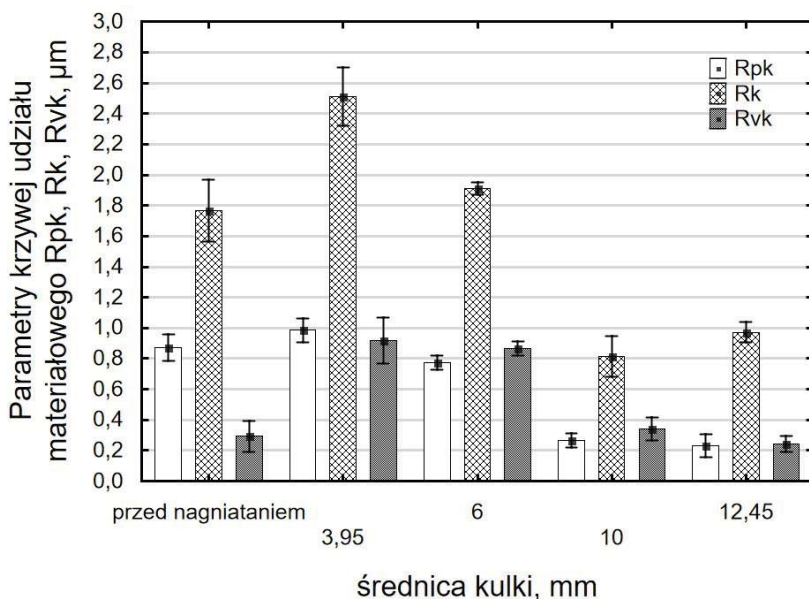
Kształt mikronierówności powierzchni po frezowaniu oraz nagniataniu impulsowym może być oceniany na podstawie krzywej udziału materiałowego. SGP po frezowaniu charakteryzuje się wyższymi i bardziej „ostrymi” wzniesieniami mikronierówności powierzchni, a krzywa udziału materiałowego może być uznana za krzywą o charakterze degresywnym (rys. 3.10a). Krzywa udziału materiałowego po nagniataniu impulsowym ma charakter zdecydowanie bardziej progresywny, widoczne jest znaczne zmniejszenie wysokości wzniesień mikronierówności w stosunku do grubości rdzenia (rys. 10b).



Rys. 3.10. Krzywa udziału materiałowego po frezowaniu (a) oraz po nagniataniu impulsowym (b) stopu Inconel 718, parametry nagniatania: $E_u = 180$ mJ, $a_s = 0,3$ mm, $D_k = 6$ mm [188]

Zmiany kształtu krzywej udziału materiałowego pod wpływem nagniatania dynamicznego można wyrazić za pomocą parametrów tej krzywej. Na rys. 3.11 przedstawiono wpływ średnicy kulki nagniatającej na parametry Rpk , Rk oraz Rvk . Po obróbce stopu niklu Inconel 718 metodą NDSI za pomocą kulki o średnicy 3,95 mm można zauważyć wzrost wartości parametrów Rk i Rvk w porównaniu z wartościami tych parametrów po frezowaniu, natomiast parametr Rpk pozostał na zbliżonym poziomie. Ze wzrostem średnicy kulki następuje zmniejszenie wartości parametrów krzywej udziału materiałowego. O „spłaszczeniu”

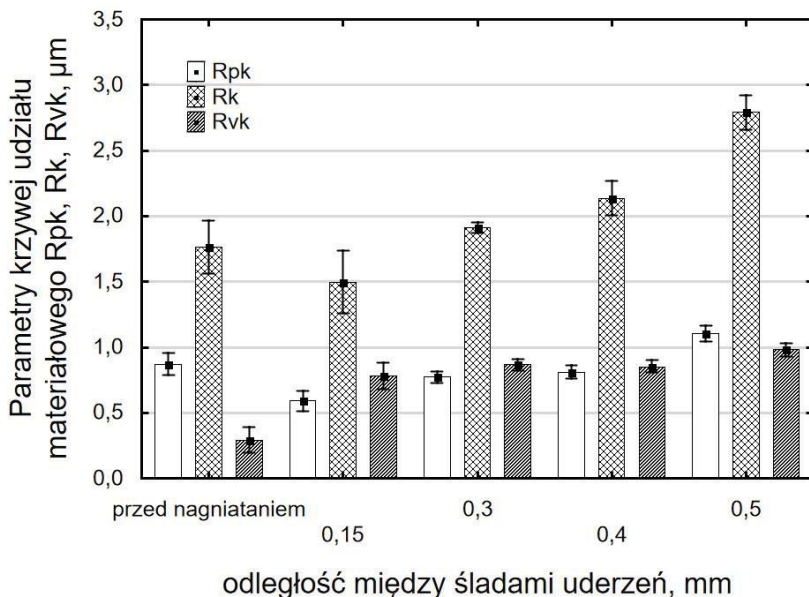
wzniesień mikronierówności powierzchni w procesie nagniatania impulsowego świadczy zmniejszenie wartości stosunku zredukowanej wysokości wzniesień chropowatości Rpk do głębokości rdzenia chropowatości Rk . Dla powierzchni frezowanej wartość tego stosunku wynosi około 0,5, natomiast dla powierzchni nagniatanej waha się w granicach od 0,26 do 0,4 [188]. Należy się spodziewać, że zmniejszenie ilorazu Rpk/Rk wpłynie korzystnie na proces docierania współpracujących ślizgowo lub tocznie elementów maszyn.



Rys. 3.11. Wpływ średnicy kulki nagniatającej na parametry krzywej udziału materiałowego stopu Inconel 718 ($E_u = 180 \text{ mJ}$, $a_s = 0,3 \text{ mm}$) [188]

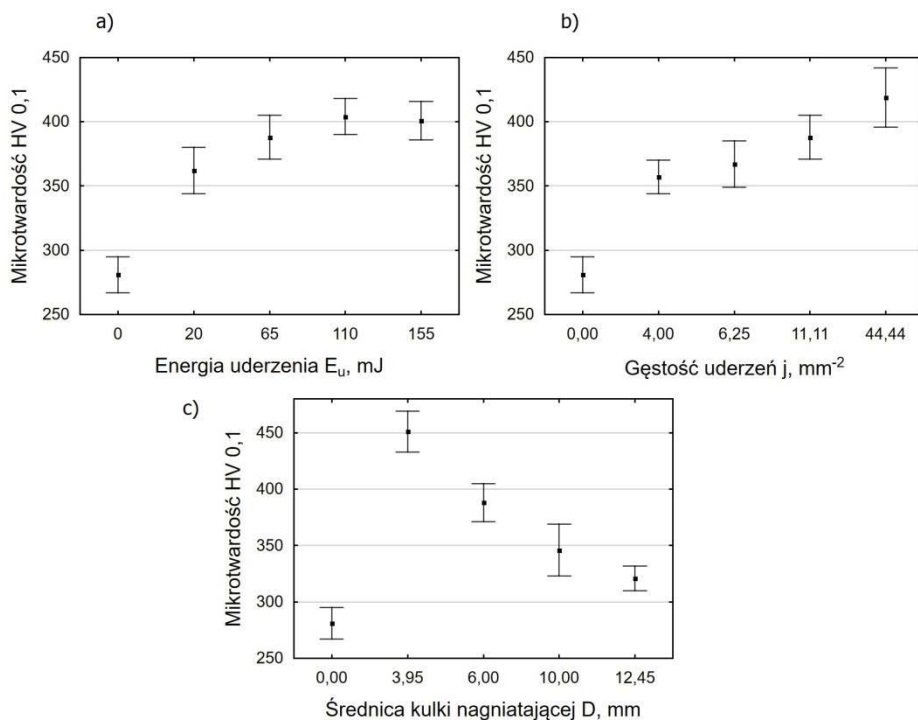
Wartości parametrów krzywej udziału materiałowego po obróbce NDSI zależą również od odległości między śladami uderzeń kulki nagniatającej a_s (rys. 3.12). Ze wzrostem odległości a_s w procesie nagniatania impulsowego stopu Inconel 718 widoczny jest wzrost, chociaż w różnym stopniu, wartości parametrów krzywej udziału materiałowego. W największym stopniu zwiększa się głębokość rdzenia Rk , a w najmniejszym zredukowana głębokość wgłębień chropowatości Rvk . Zwiększenie odległości a_s od 0,15 mm do 0,5 mm powoduje wzrost parametru Rk o około 90%, natomiast parametr Rvk zwiększył się tylko o około 25% (wzrost parametru Rpk wyniósł około 45%). Zmiany parametrów krzywej udziału materiałowego wskutek wzrostu odległości a_s są niekorzystne ze względu na odporność na zużycie wskutek tarcia. Znaczny wzrost parametru Rpk wydłuża czas docierania a duży wzrost parametru Rk wpływa na zmniejszenie obciążalności współpracujących elementów po okresie dotarcia. Natomiast

niewielki wzrost parametru Rvk świadczy o małym zwiększeniu zdolności utrzymania oleju przez powierzchnię.



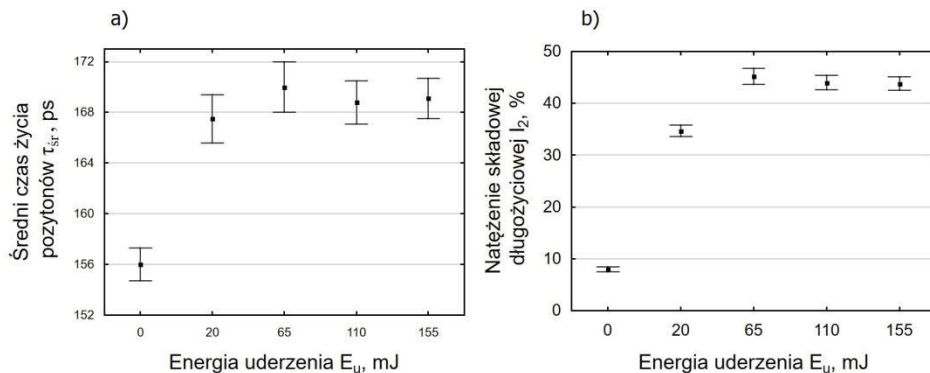
Rys. 3.12. Wpływ odległości między śladami uderzeń na parametry krzywej udziału materiałowego stopu Inconel 718 ($E_u = 180$ mJ, $D_k = 6$ mm) [188]

Wpływ parametrów nagniatania impulsowego na mikrotwardość stali nierdzewnej 1.4541 (EN), mierzona na obrobionej powierzchni, przedstawiono na rys. 3.13. Widoczne są znaczne różnice przyrostu mikrotwardości próbek nagniatanych w stosunku do nienagniatanych, który w zależności od parametrów nagniatania waha się od około 15% do około 60%. Ze wzrostem energii uderzenia E_u w zakresie od 20 mJ do 110 mJ następuje zwiększenie mikrotwardości, natomiast dalsze zwiększanie energii uderzenia nie wpływa znacząco na mikrotwardość. Również ze wzrostem gęstości uderzeń j (liczba uderzeń na jednostkę powierzchni) zwiększa się mikrotwardość, przy czym w zakresie większych wartości parametru j wzrost ten jest mniejszy. W największym stopniu na mikrotwardość, w badanym zakresie parametrów technologicznych, wpływa średnica kulki nagniatającej. Zwiększenie średnicy kulki prowadzi do zmniejszenia mikrotwardości. Im mniejsza średnica kulki tym większa jest krzywizna elementu nagniatającego, a zatem element ten oddziałuje na mniejszą powierzchnię obrabianego przedmiotu, powodując, przy stałej energii uderzenia, większy zgniot materiału [164].



Rys. 3.13. Wpływ parametrów nagniatania impulsowego na mikrotwardość powierzchniową stali nierdzewnej 1.4541 (EN): a) zmienna energia uderzenia ($j = 11 \text{ mm}^{-2}$, $D = 6 \text{ mm}$), b) zmienna gęstość uderzeń ($E_u = 65 \text{ mJ}$, $D = 6 \text{ mm}$), c) zmienna średnica kulki nagniatającej ($E_u = 65 \text{ mJ}$, $j = 11 \text{ mm}^{-2}$) [164]

Zmiany stanu WW przedmiotów ze stali nierdzewnej 1.4541 (EN) mogą być badane przy wykorzystaniu anihilacji pozytonów. Na rys. 3.14a przedstawiono zależność średniego czasu życia pozytonów od energii uderzenia. Widoczny jest wyraźny wzrost średniego czasu życia pozytonów w WW próbek nagniatanych impulsowo (7,4 ÷ 9,0%) w porównaniu z próbkami nienagniatanymi oraz, chociaż w mniejszym stopniu, między próbkami nagniatanymi z energią uderzenia równą 20 mJ i 65 mJ. Natomiast wzrost energii uderzenia powyżej 65 mJ nie wpływa na średni czas życia pozytonów. Wzrost średniego czasu życia wskazuje na zwiększenie się rozmiarów defektów struktury krystalicznej wskutek nagniatania. Wpływ energii uderzenia na natężenie składowej długożyciowej pozytonów, w przypadku rozkładu widma na dwie składowe o czasach życia 150 ps i ok. 190 ps, przedstawiono na rys. 3.14b. Towarzyszący początkowemu zwiększaniu energii uderzenia wzrost natężenia składowej długożyciowej może świadczyć o zwiększeniu liczby dużych defektów [164].

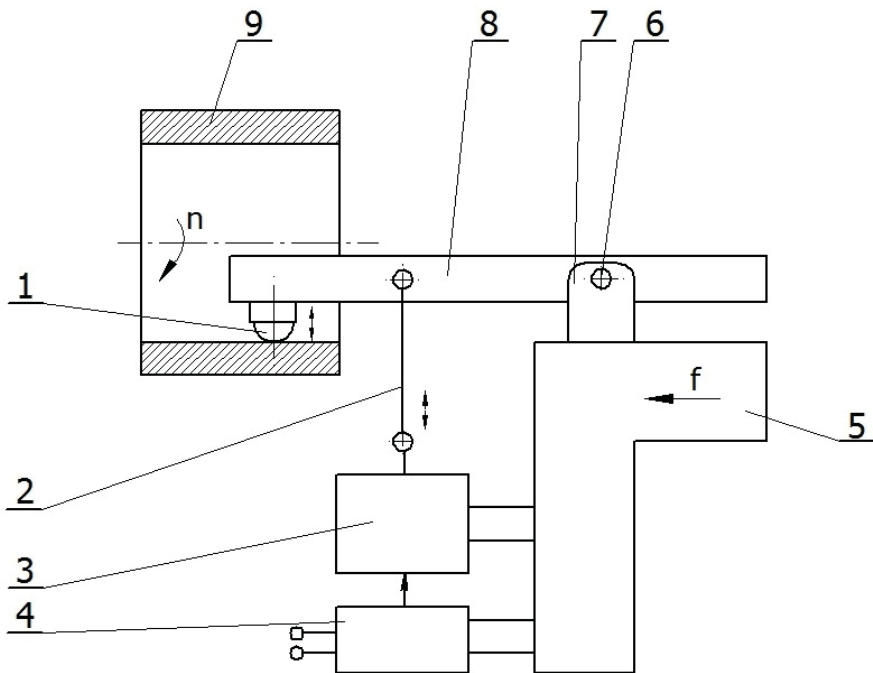


Rys. 3.14. Wpływ energii uderzenia elementu nagniatającego na średni czas życia pozytonów (a) oraz natężenie składowej długożyciowej (b), parametry stałe: $j = 11 \text{ mm}^{-2}$, $D = 6 \text{ mm}$ [164]

Urządzenia krzywkowe do nagniatania impulsowego umożliwiają uzyskanie dużej energii uderzenia, co pozwala na nagniatanie materiałów o dużej twardości. Duża powtarzalność wymiarów powstających wskutek uderzeń elementu nagniatającego odcisków oraz odległości między tymi odciskami, w powiązaniu z łatwością sterowania parametrami technologicznymi, umożliwia dokładne określenie rozmieszczenia odcisków na obrabianej powierzchni, a także stopnia pokrycia tej powierzchni odciskami. Natomiast ujemną stroną tego sposobu nagniatania jest stosunkowo mała wydajność.

3.1.3. Elektromagnetyczne, piezoelektryczne i pneumatyczne nagniatanie impulsowe

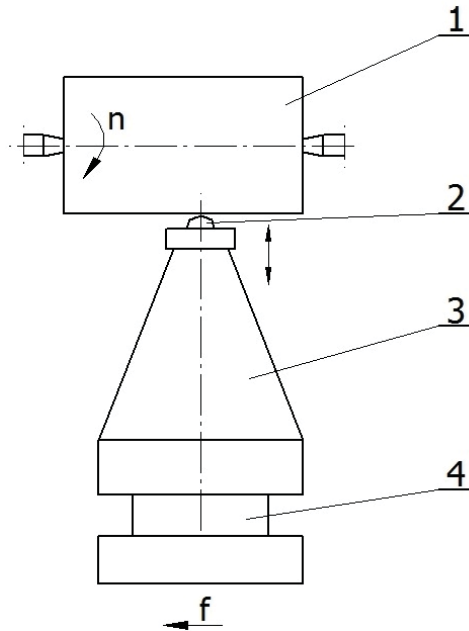
Nagniatanie impulsowe może być przeprowadzone za pomocą narzędzi z napędem elektromagnetycznym. Zasadę pracy urządzenia, w którym element nagniatający wprawiany jest w ruch za pomocą impulsów elektromagnetycznych, przedstawiono na rys. 3.15. Zamocowany na dźwigni 8 element nagniatający 1 uderza w powierzchnię przedmiotu obrabianego 9 wskutek ruchów wahliwych tej dźwigni, która osadzona jest na sworzniu 6 umiejscowionym we wsporniku 7. Ruchy dźwigni 8 wymuszone są przez elektromagnes 3, który połączony jest z dźwignią za pomocą cięgna 2. Elektromagnes pracuje w sposób nieciągły, uruchamiany jest pod wpływem impulsów przekazywanych przez układ zasilająco-sterujący 4. Wspornik 7, elektromagnes 3 oraz układ zasilająco-sterujący 4 przytwierdzone są do korpusu 5.



Rys. 3.15. Schemat elektromagnetycznego urządzenia do nagniatania impulsowego: 1 – element nagniatający, 2 – ciężno, 3 – elektromagnes, 4 – układ zasilająco – sterujący, 5 – korpus, 6 – sworzeń, 7 – wspornik, 8 – dźwignia, 9 – przedmiot obrabiany [62]

Urządzenie do nagniatania impulsowego przystosowane jest do pracy na tokarce [62]. Zamocowany w uchwycie przedmiot obrabiany wykonuje ruch obrotowy, natomiast urządzenie, którego korpus mocuje się w imaku narzędziowym, przemieszcza się ruchem posuwowym. Możliwa jest obróbka zewnętrznych oraz wewnętrznych powierzchni walcowych oraz, przez skrócenie górnego suportu, powierzchni stożkowych. Możliwość regulacji parametrów technologicznych, takich jak prędkość obrotowa przedmiotu, posuw, energia uderzenia, częstotliwość impulsów pozwala na zmianę średnicy oraz rozmieszczenia odcisków elementu nagniatającego na obrabianej powierzchni.

Nagniatanie impulsowe wałka za pomocą nagniataka piezoelektrycznego przedstawiono schematycznie na rys. 3.16. Element nagniatający 2 zamocowany na koncentratorze drgań 3 przetwornika piezoelektrycznego 4 uderza w powierzchnię przedmiotu obrabianego 1. Obróbka nagniataniem realizowana jest na tokarce. Połączenie ruchu obrotowego wałka (n) z ruchem posuwowym zamocowanego w imaku narzędziowym nagniataka (f) umożliwi pokrycie całej powierzchni walcowej przedmiotu obrabianego 1 śladami uderzeń elementu nagniatającego 2.



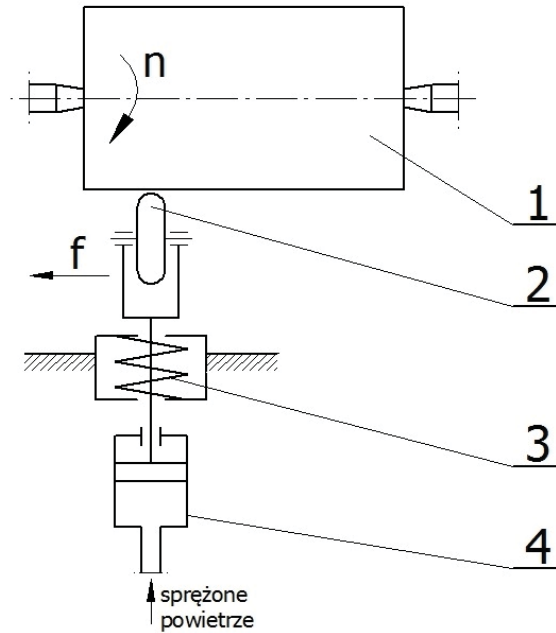
Rys. 3.16. Schemat piezoelektrycznego urządzenia do nagniatania impulsowego: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – element nagniatający, 3 – koncentrator drgań, 4 – przetwornik piezoelektryczny [5]

Korzystny wpływ piezoelektrycznego nagniatania impulsowego na właściwości warstwy wierzchniej ulepszonej cieplnie stali C45 uzyskano przy zastosowaniu diamentowego elementu nagniatającego o promieniu czaszy kulistej 0,2 mm, amplitudzie drgań narzędzia 12 μm i częstotliwości drgań nagniataka w granicach (5,3 \div 16) kHz. Uzyskano wzrost mikrotwardości WW o około 70 HV0,02, a głębokość warstwy utwardzonej – do 400 μm [5].

Stosując nagniatanie impulsowe można uzyskać umocnienie WW stali w stanie ulepszonym cieplnie. Po nagniataniu impulsowym za pomocą urządzenia piezoelektrycznego (częstotliwość drgań narzędzia – około 15 kHz, amplituda drgań – około 30 μm) próbek ze stali C45 w stanie dostarczonym z huty i ulepszonym cieplnie uzyskano:

- dla stali w stanie dostawy: maksymalny wzrost twardości $\Delta\text{HV}0,5$ – o około 85%, a głębokość warstwy utwardzonej g_H wynosiła około 55 μm ,
- dla stali ulepszonej cieplnie: $\Delta\text{HV}0,5$ – o około 45%, g_H – około 35 μm [162].

Nagniatanie impulsowe za pomocą urządzenia pneumatycznego pokazano schematycznie na rys. 3.17. Obrabiany przedmiot 1, w kształcie wałka, wykonuje ruch obrotowy z prędkością n , a elementem nagniatającym jest krążek 2. Sprężyna 3 oddziałuje na krążek 2 z określoną siłą, a pneumatyczny zespół uderzeniowy 4 w sposób impulsowy oddziałuje na element nagniatający. Krążek nagniatający, wraz z zespołem uderzeniowym, wykonuje ruch posuwowy f w kierunku równoległym do osi wałka.



Rys. 3.17. Schemat pneumatycznego urządzenia do nagniatania impulsowego: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – krążek nagniatający, 3 – sprężyna wspomagająca, 4 – pneumatyczny zespół uderzeniowy [102]

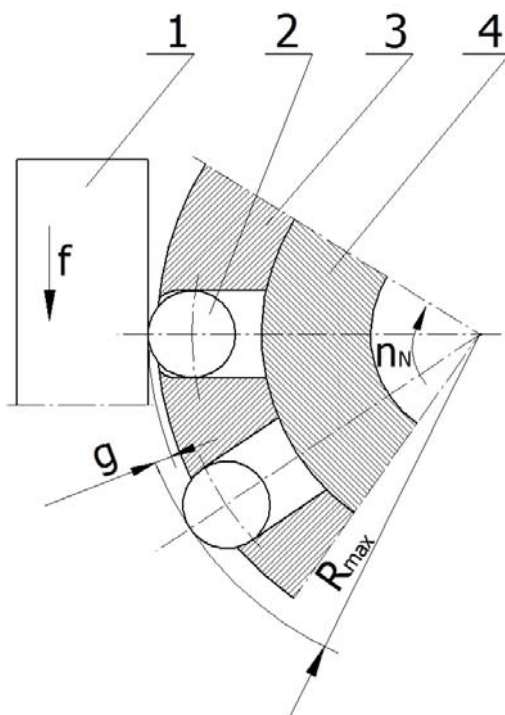
Nagniatanie impulsowe za pomocą urządzenia pneumatycznego umożliwia umocnienie materiału na dużej głębokości. Promienie krążka nagniatającego są, na ogół, większe niż nagniataka trzpieniowego, co pozwala na zwiększenie posuwu, a tym samym wydajności nagniatania.

3.2. Nagniatanie odśrodkowe

3.2.1. Kinematyka i parametry nagniatania odśrodkowego

Nagniatanie odśrodkowe (NDSO), które jest jedną z odmian nagniatania dynamicznego skoncentrowanego, polega na uderzaniu w obrabianą powierzchnię elementami nagniatającymi rozmieszczonymi w promieniowych otworach osady obracającej się głowicy (rys. 3.18). Na korpusie głowicy 4 zamocowany jest pierścień 3 z rozmieszczonymi promieniowo otworami, w których znajdują się kulki nagniatające 2. Na obwodzie pierścienia średnica otworów jest mniejsza od średnicy kulek, co zabezpiecza kulki przed wypadaniem. W części prowadzącej kulki mogą swobodnie przemieszczać się wzdłuż osi otworów. Po wprawieniu głowicy w ruch obrotowy z prędkością n_N kulki 2 pod wpływem siły odśrodkowej uderzają w powierzchnię przedmiotu 1, który wykonuje ruch posuwowy f (ruch ten może wykonywać też głowica). Odległość osi głowicy od

obrabaney powierzchni jest mniejsza od maksymalnego promienia głowicy (z uwzględnieniem wysuniętej kulki o wartość dosuwu g . Po uderzeniu kulki odbijają się od przedmiotu obrabianego wskutek sprężystych właściwości materiału.



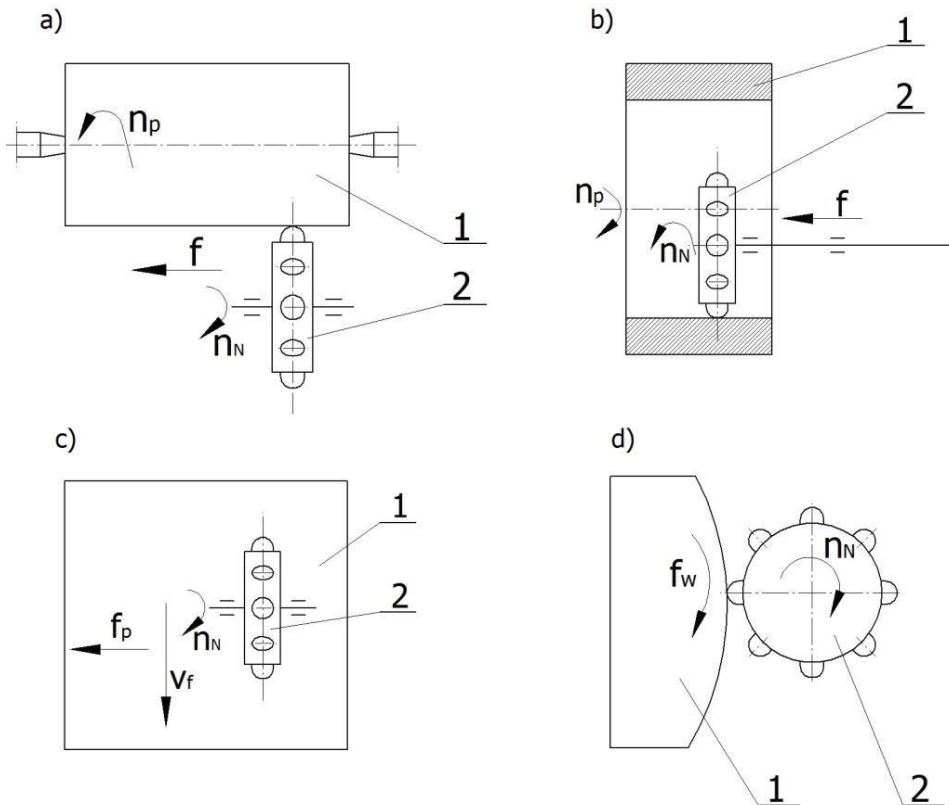
Rys. 3.18. Zasada nagniatania odśrodkowego: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – kulka nagniatająca, 3 – obsada (pierścień), 4 – korpus głowicy

Kinematykę nagniatania odśrodkowego przedmiotów o różnym kształcie przedstawiono na rys. 3.19. Główny ruch nagniatania wykonuje głowica 2, która obraca się z prędkością n_N . Nagniatanie odśrodkowe wałków (rys. 3.19a) i otworów walcowych (rys. 3.19b) może być przeprowadzone na tokarce przy użyciu dodatkowego urządzenia, które nadaje głowicy ruch obrotowy. Nagniatany przedmiot 1 wykonuje również ruch obrotowy, ale ze znacznie mniejszą prędkością niż głowica. Kierunek ruchu obrotowego przedmiotu powinien być przeciwny do ruchu głowicy. Ruch posuwowy f zwykle wykonuje głowica. Stosowane parametry technologiczne nagniatania odśrodkowego na ogół zawarte są w zakresie [126, 152]:

- prędkość obwodowa głowicy $v_o = (500 \div 2400)$ m/min (im twardszy obrabiany materiał tym większa prędkość obwodowa),
- posuw na obrót $f_r = (0,02 \div 0,2)$ mm,
- dosuw $g = (0,05 \div 0,5)$ mm,

- prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego $v_p = (6 \div 90) \text{ m/min}$,
- gęstość uderzeń $j = (12 \div 30) \text{ min}^{-1}$,
- liczba przejść $i = (1 \div 3)$.

Parametry nagniatania odśrodkowego dobierane są w zależności od właściwości materiału obrabianego, średnicy kulek nagniatających, chropowatości powierzchni przed nagniataniem i po nagniataniu, stopnia umocnienia WW.



Rys. 3.19. Schemat nagniatania odśrodkowego: a) wałka, b) otworu, c) płaszczyzny, d) powierzchni o złożonym kształcie (1 – przedmiot obrabiany, 2 – głowica nagniatająca)

Prędkość obrotową przedmiotu nagniatanego można obliczyć ze znanej zależności:

$$n_P = \frac{1000 v_P}{\pi D_P}, \text{min}^{-1}, \quad (3.1)$$

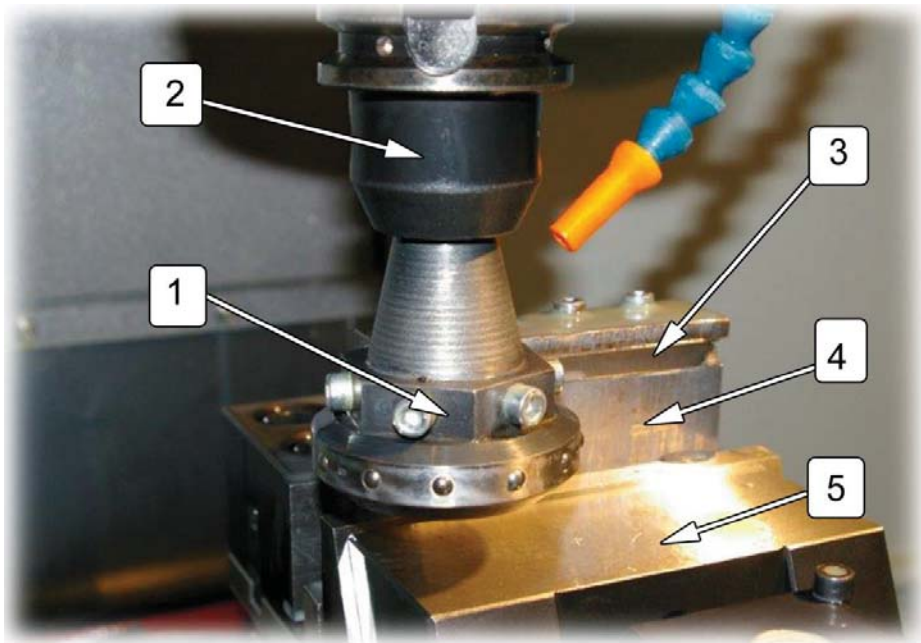
gdzie: v_P – prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego, m/min,
 D_P – średnica nagniatanego przedmiotu, mm.

Na podstawie parametrów technologicznych można wyznaczyć gęstość uderzeń kulek nagniatających:

$$j = \frac{1000 v_o z_k}{\pi^2 D_N D_P f_r n_P}, \text{mm}^{-2}, \quad (3.2)$$

gdzie: v_o – prędkość obwodowa głowicy, m/min,
 z_k – liczba kulek nagniatających,
 D_N – średnica głowicy, mm,
 f_r – posuw na obrót nagniatanego przedmiotu, mm,
pozostałe oznaczenia – jak we wzorze (3.1).

Nagniatanie odśrodkowe płaszczyzn (rys. 3.19c) może być przeprowadzone na szlifierce do płaszczyzn lub na frezarce wyposażonej w szybkoobrotowe wrzeciono. Na rys. 3.20 przedstawiono widok stanowiska przygotowanego do nagniatania odśrodkowego płaszczyzn na centrum obróbkowym pionowym. Głowica nagniatająca 1 jest zamocowana we wrzecionie 2, a przedmiot obrabiany 3 zamocowano w specjalnym uchwycie 4, zamocowanym w imadle 5, posadowionym na stole obrabiarki, który wykonuje ruch posuwowy wzdłużny z prędkością v_f oraz przesuw poprzeczny f_p .



Rys. 3.20. Stanowisko do nagniatania odśrodkowego płaszczyzn: 1 – głowica nagniatająca, 2 – wrzeciono, 3 – przedmiot, 4 – uchwyt, 5 – imadło

Odległość między śladami uderzeń kulek nagniatających, w kierunku wzdłużnym, można wyznaczyć z zależności:

$$a_s = \frac{v_o}{n_g z_k}, mm, \quad (3.3)$$

gdzie: n_g – prędkość obrotowa głowicy, 1/min,
pozostałe oznaczenia – jak we wzorze (3.2).

Odległość między śladami uderzeń w kierunku poprzecznym jest równa przesuwowi f_p , zatem gęstość uderzeń można obliczyć ze wzoru:

$$j = \frac{1}{a_s f_p}, mm^{-2}. \quad (3.4)$$

Powierzchnie o złożonym kształcie mogą być nagniatane odśrodkowo na frezarkach sterowanych numerycznie (rys. 3.19d). Głowica nagniatająca 2 prowadzona jest w określonej odległości od powierzchni obrabianej, zapewniającej zachowanie przyjętego dosuwu. Po kolejnych przejściach następuje przesuw poprzeczny (w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku). Wymiary głowicy nagniatającej należy dobierać z uwzględnieniem promieni krzywizny obra-

bianej powierzchni. Przykładem nagniatania odśrodkowego złożonych powierzchni kształtowych może być obróbka wykończeniowa tłoczników blach karoseryjnych [217].

Kinematykę nagniatania odśrodkowego powierzchni walcowej zewnętrznej (wałka) oraz wewnętrznej (otworu) przedstawiono na rys. 3.21. Kulka nagniatająca 2 porusza się z prędkością obwodową obsady v_o , a kierunek wektora tej prędkości jest styczny do okręgu, po którym porusza się środek kulki. Uderzenie kulki w powierzchnię obrabianą przedmiotu 3 następuje w pewnej odległości od płaszczyzny wyznaczonej przez osie głowicy i przedmiotu. Prędkość obwodową v_o można rozłożyć na prędkość normalną v_n oraz styczną v_t do powierzchni obrabianej. Prędkość v_o można wyznaczyć ze znanej zależności:

$$v_o = \frac{\pi R_N n_N}{500}, \frac{m}{min}, \quad (3.5)$$

gdzie: R_N – promień okręgu, po którym poruszają się środki kulek nagniatających, mm,

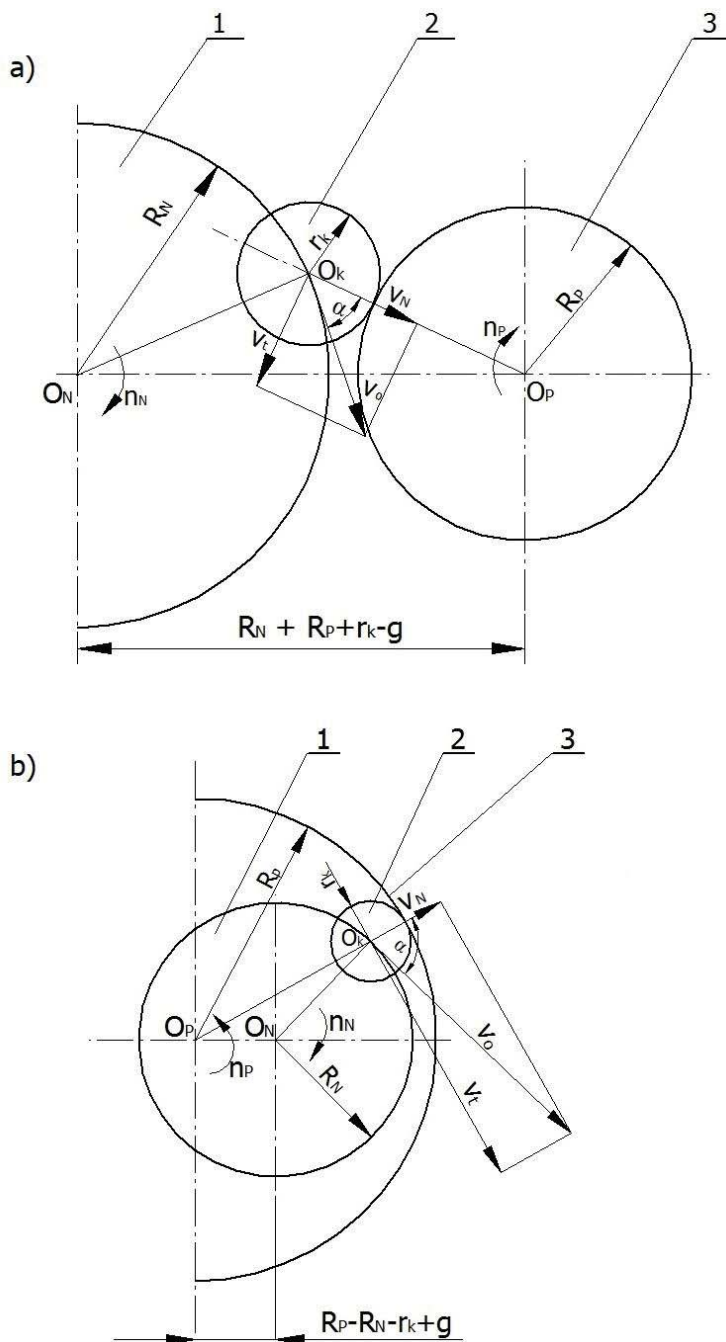
n_N – prędkość obrotowa głowicy nagniatającej, 1/min.

Efekty nagniatania (głównie stopień umocnienia WW oraz ściskające naprężenia własne) w decydującym stopniu zależą od prędkości normalnej kulki v_n , którą można obliczyć z zależności:

$$v_n = v_o \cos \alpha, \quad (3.6)$$

gdzie: v_o – prędkość obwodowa kulki nagniatającej,

α – kąt uderzenia kulki w obrabianą powierzchnię.



Rys. 3.21. Rozkład prędkości kulki nagniatącej podczas nagniatania odśrodkowego powierzchni walcowej zewnętrznej (a) oraz wewnętrznej (b): 1 – głowica nagniatająca, 2 – kulka, 3 – przedmiot obrabiany

W oparciu o zależności geometryczne przedstawione na rys. 3.21a można obliczyć kąt uderzenia kulki w obrabianą powierzchnię podczas nagniatania odśrodkowego wałka:

$$\cos \alpha = \sqrt{\frac{g(2R_N + 2R_P + 2r_k - g)(2R_N - g)(2R_P - 2r_k - g)}{4R_N^2(R_P + r_k)^2}}, \quad (3.7)$$

gdzie: R_N – promień okręgu, po którym porusza się środek kulki przed uderzeniem,

R_P – promień przedmiotu obrabianego,

r_k – promień kulki nagniatającej,

g – dosuw głowicy do przedmiotu obrabianego.

Podobnie, na podstawie rys. 3.21b można wyznaczyć zależność na obliczanie kąta uderzenia kulki w powierzchnię walcową wewnętrzną:

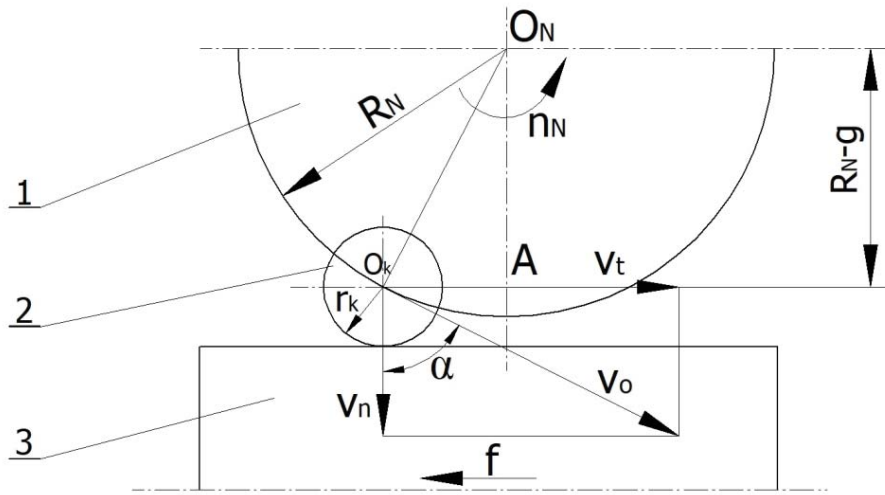
$$\cos \alpha = \sqrt{\frac{g(2R_P - 2r_k + g)(2R_N - g)(2R_P - 2R_N - 2r_k + g)}{4R_N^2(R_P - r_k)^2}}, \quad (3.8)$$

oznaczenia – jak we wzorze (3.7).

Rozkład prędkości obwodowej kulki v_0 na składową normalną v_n i styczną v_t podczas nagniatania odśrodkowego powierzchni płaskiej przedstawiono na rys. 3.22. Po przeanalizowaniu występujących zależności geometrycznych, wzór na kąt uderzenia kulki można napisać w postaci:

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{R_N - g}{R_N}\right)^2}, \quad (3.9)$$

oznaczenia – jak we wzorze (3.7).



Rys. 3.22. Rozkład prędkości kulki nagniatącej podczas nagniatania odśrodkowego powierzchni płaskiej: 1 – głowica nagniatająca, 2 – kulka, 3 – przedmiot obrabiany

W powyższych wzorach nie uwzględniono występującego w procesie nagniatania odśrodkowego tarcia. Pominięto też prędkość przedmiotu obrabianego jako wielkość dużo mniejszą w porównaniu z prędkością kulki.

Energia uderzenia kulki nagniatącej w obrabiany materiał jest równa jej energii kinetycznej i wynosi:

$$E_u = \frac{mv_n^2}{2}, \quad (3.10)$$

gdzie: m – masa uderzającej kulki,

v_n – prędkość kulki w kierunku normalnym do obrabianej powierzchni.

Po uderzeniu kulka odbija się od obrabianego materiału z prędkością v_n' , mniejszą od prędkości uderzenia. Zmniejszenie prędkości zależy od współczynnika restytucji dla danego materiału obrabianego i materiału kulki (wzór (1.2)). Energię wpływającą na odkształcenie plastyczne materiału można wyrazić jako:

$$E_{op} = \frac{mv_n^2}{2}(1 - R^2), \quad (3.11)$$

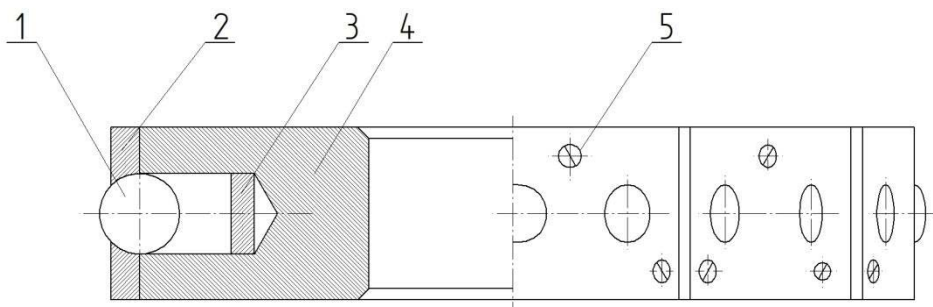
gdzie: R – współczynnik restytucji,

pozostałe oznaczenia – jak we wzorze (3.10).

3.2.2. Narzędzia do nagniatania odśrodkowego

W charakterze elementów nagniatających w obróbce NDSO stosowane są głównie kulki, rzadziej – krążki lub wałeczki (często używane są elementy łożysk tocznych). Elementy te osadzone są w głowicach w taki sposób, aby miały możliwość ruchu w kierunku promieniowym, a jednocześnie były zabezpieczone przed wypadaniem. Ze względu na budowę głowice nagniatające można podzielić na jednorzędowe i wielorzędowe.

Przykład głowicy jednorzędowej przedstawiono na rys. 3.23. W korpusie 4, który ma kształt tarczy z otworem osiowym, służącym do zamocowania na trzpieniu, wykonane zostały otwory promieniowe, w których umieszczane są kulki nagniatające 1. Średnice otworów promieniowych tak zostały dobrane, aby kulki mogły luźno przemieszczać się wzdłuż ich osi. Na dnie otworów umieszczono wkładki amortyzujące 3. Kulki zabezpieczono przed wypadaniem za pomocą segmentów pierścieniowych 2, które zamocowano na obwodzie korpusu głowicy za pomocą wkrętów 5.



Rys. 3.23. Jednorzędowa głowica do nagniatania odśrodkowego: 1 – kulka nagniatająca, 2 – segment pierścieniowy, 3 – wkładka amortyzująca, 4 – korpus, 5 – wkręt

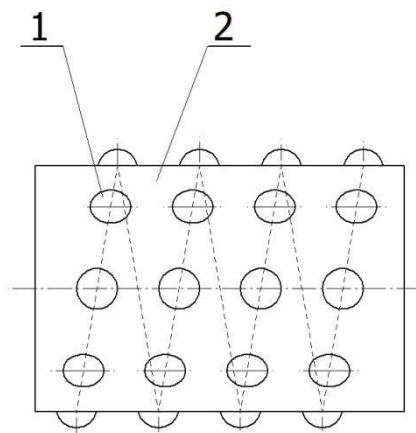
Głowica nagniatająca powinna być wykonana bardzo dokładnie. Szczególnie ważne jest zachowanie jednakowej odległości wszystkich kulek od osi głowicy w czasie ruchu obrotowego, co umożliwia uzyskanie jednakowego dosuwu kulek do przedmiotu obrabianego (przyjmuje się, że maksymalne bicie kulek nie powinno przekraczać 0,01 mm [153])¹. Przed przystąpieniem do nagniatania głowica powinna być wyważona dynamicznie.

Znane są różne rozwiązania konstrukcyjne głowic do nagniatania odśrodkowego, np. ze stałym separatorem kulek, z gniazdami indywidualnymi [126]. Zwiększenie siły oddziaływania kulek na obrabianą powierzchnię można uzyskać poprzez wykorzystanie ciśnienia hydrostatycznego cieczy smarująco-

¹ Dokładność dosuwu zależy też od błędów wymiarów lub położenia przedmiotu obrabianego (np. bicie lub stożkowatość nagniatanego wałka).

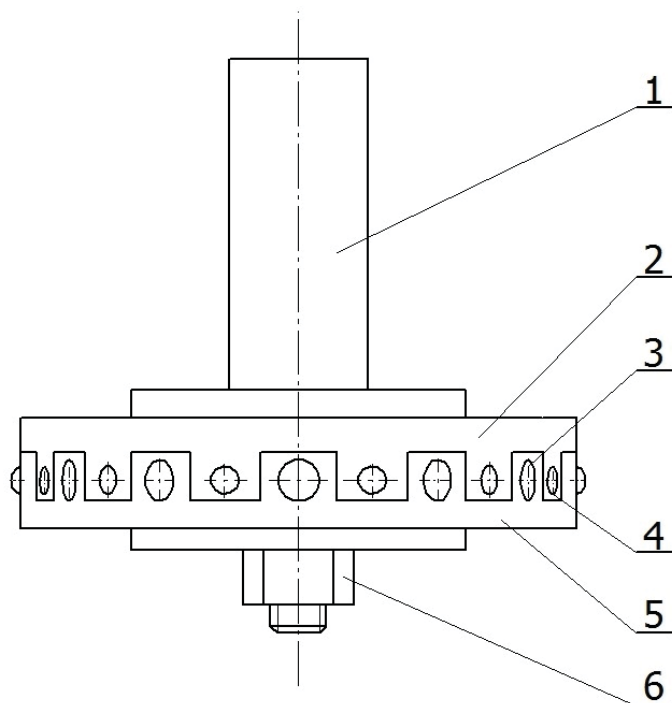
chłodzącej, doprowadzonej do wnętrza głowicy i wywierającej ciśnienie na kulki nagniatające [154].

Głowicę wielorzędową przedstawiono schematycznie na rys. 3.24. Kulki nagniatające 1 rozmieszczone są na obwodzie obsady 2 wzdłuż linii śrubowej. Głowica taka umożliwi znaczne zwiększenie wydajności obróbki, gdyż jednocześnie nagniatana jest powierzchnia o szerokości równej długości głowicy.



Rys. 3.24. Schemat wielorzędowej głowicy do nagniatania odśrodkowego:
1 – kulka nagniatająca, 2 – obsada

Właściwości WW przedmiotów obrobionych nagniataniem odśrodkowym zależą, między innymi, od średnicy kulek nagniatających. Opracowana została głowica dwutarczowa do nagniatania odśrodkowego kulkami o różnej średnicy, którą schematycznie przedstawiono na rys. 3.25. Głowica składa się z dwóch tarcz, górnej 2 i dolnej 5, które wzajemnie się zazębiają. W występach tarcz wykonane zostały promieniowe otwory, w których znajdują się kulki 3 i 4, przy czym średnice kulek 3 w tarczy dolnej różnią się od średnic kulek 4 w tarczy górnej. Tarcze, wraz z kulkami, osadzone są na trzpieniu 1 i zamocowane za pomocą nakrętki 6. Wymiary otworów w części zabezpieczającej kulki przed wypadaniem powinny być tak dobrane, aby w czasie ruchu obrotowego głowicy odległości najbardziej wysuniętych punktów kulek od osi głowicy były jednakowe [190].



Rys. 3.25. Schemat głowicy dwutarczowej do nagniatania odśrodkowego: 1 – trzpień, 2 – tarcza górna, 3 – kulka tarczy dolnej, 4 – kulka tarczy górnej, 5 – tarcza dolna, 6 – nakrętka mocująca [190]

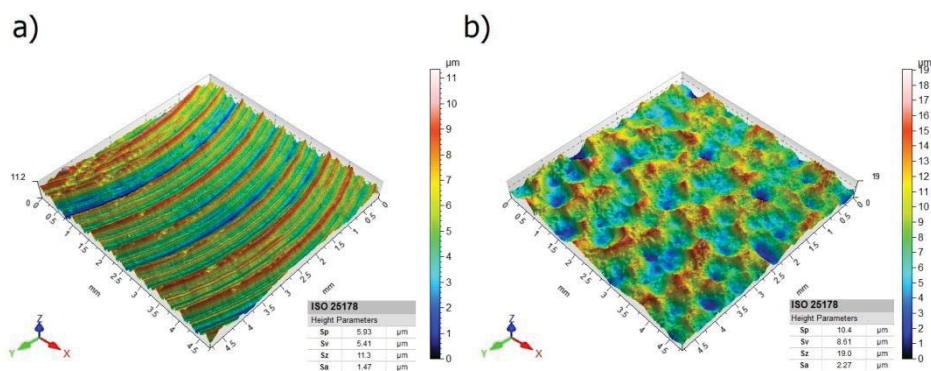
Głowica dwutarczowa umożliwia jednoczesne nagniatanie odśrodkowe kulkami o różnej średnicy. Różna energia uderzenia oraz różny promień krzywizny kulek wpływa na ukształtowanie korzystniejszego, ze względu na właściwości użytkowe, rozkładu mikrotwardości i naprężeń własnych w WW nagniatanych przedmiotów. Krótki czas wymiany tarcz umożliwia szybki dobór zestawów kulek o różnej średnicy.

Ze względu na sposób mocowania, głowice do nagniatania odśrodkowego można podzielić na nasadzane (rys. 3.23) oraz trzpieniowe (rys. 3.25).

3.2.3. Właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów po nagniataniu odśrodkowym

Najczęściej, jako obróbkę poprzedzającą nagniatanie odśrodkowe, stosuje się frezowanie, toczenie i szlifowanie. Pozytywne rezultaty otrzymano również poddając obróbce NDSO powierzchnie po cięciu laserem. Od wyboru sposobu obróbki poprzedzającej zależy dokładność wymiarowo-kształtowa obrobionych przedmiotów oraz stan ich warstwy wierzchniej.

Chropowość powierzchni przedmiotów po nagniataniu odśrodkowym zależy od rodzaju materiału obrabianego, chropowości po obróbce poprzedzającej nagniatanie jak i od warunków technologicznych nagniatania. Topografię powierzchni po frezowaniu oraz po nagniataniu odśrodkowym przedstawiono na rys. 3.26. Na powierzchni frezowanej widoczne są łukowe ślady po przejściu ostrzy frezu walcowo-czołowego (rys. 3.26a), natomiast po nagniataniu odśrodkowym ukształtowana została SGP zbliżona do punktowej, z wydłużonymi wgłębieniami, które powstały wskutek uderzeń kulek nagniatających pod pewnym kątem względem normalnej do obrabianej powierzchni (rys. 3.26b).



Rys. 3.26. Topografia powierzchni przedmiotów ze stali C45: a) po frezowaniu ($f_z = 0,1$ mm/ostrze, $v_c = 120$ m/min), b) po nagniataniu odśrodkowym ($v_o = 528$ m/min, $v_f = 3648$ mm/min, $f_p = 0,08$ mm, $g = 0,5$ mm, $i = 1$)

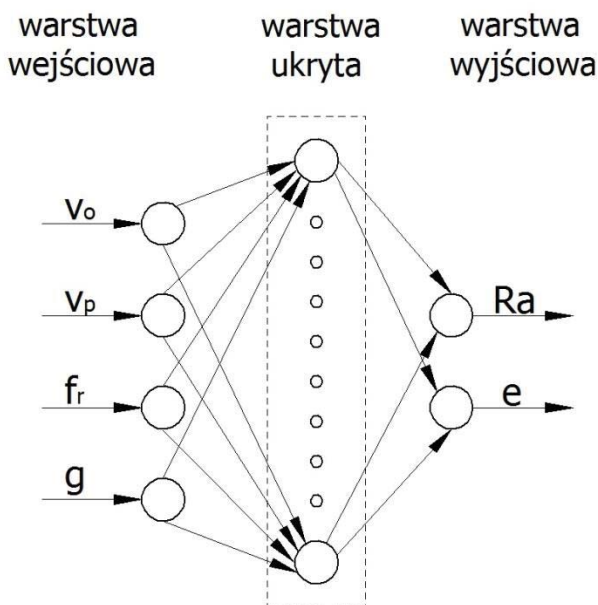
Stosując w procesie NDSO optymalne parametry technologiczne można uzyskać znaczne zmniejszenie chropowości powierzchni. Po nagniataniu odśrodkowym wałków ze stali C45 i 40H obrobionych toczeniem, o chropowości Ra równej około $10 \mu\text{m}$, otrzymano ponad 16-krotne zmniejszenie wartości parametru Ra. Najmniejszą chropowość powierzchni dla stali 40H otrzymano przy zastosowaniu większych wartości parametrów nagniatania niż dla stali C45 [153].

Zależności między parametrami technologicznymi nagniatania a właściwościami WW są, na ogół, funkcjami nieliniowymi. Do modelowania tego procesu z powodzeniem mogą być stosowane sztuczne sieci neuronowe (SSN). Sieć taka jest modelem symulowanym na komputerze za pomocą odpowiednich programów. Sztuczne sieci neuronowe składają się z neuronów, których pierwowzorem są komórki nerwowe ludzkiego mózgu. Neurony rozmieszczone są w warstwach, spośród których wyróżnia się:

- warstwę wejściową, która odbiera sygnały kierowane do sieci,
- warstwę wyjściową, która emituje odpowiedzi na te sygnały,
- warstwy ukryte (jedna lub kilka), położone między warstwą wejściową a wyjściową.

Główną zaletą sztucznych sieci neuronowych jest to, że nie wymagają programowania, natomiast mają zdolność uczenia się na podstawie dostarczonych przykładów [148, 218].

Przykładowo, schemat sztucznej sieci neuronowej do modelowania nagniatania odśrodkowego wałka przedstawiono na rys. 3.27. Warstwa wejściowa składa się z czterech neuronów, odpowiadających prędkości obwodowej głowicy v_o , prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego v_p , posuwowi f_r oraz dosuwowi g . Warstwa wyjściowa posiada dwa neurony, które odpowiadają parametrowi chropowatości powierzchni obrobionej Ra oraz stopniowi umocnienia warstwy wierzchniej e . Warstwa ukryta, w tym przypadku, zawiera dziesięć neuronów [174].



Rys. 3.27. Schemat sztucznej sieci neuronowej do modelowania nagniatania odśrodkowego wałka [174]

Opracowanie modelu nagniatania odśrodkowego z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych obejmuje czynności:

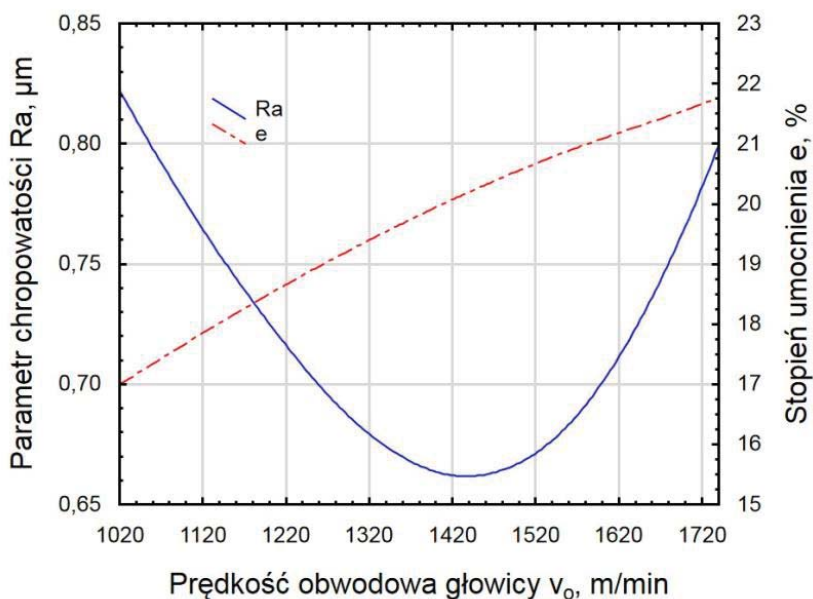
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych w celu uzyskania przykładów umożliwiających uzyskanie wartości czynników wyjściowych dla określonego zestawu czynników wejściowych procesu,
- dobór architektury SSN,
- trening i testowanie SSN.

Uzyskany drogą doświadczalną zbiór wartości czynników wyjściowych odpowiadających określonym zestawom czynników wejściowych służy do „wytrenowania” SSN.

Po wytrenowaniu SSN powstaje model wielowymiarowy, który odzwierciedla wpływ czynników wejściowych (parametrów technologicznych nagniatania odśrodkowego wałka) na parametry wyjściowe (właściwości WW). Zależności czynników wyjściowych od wejściowych można przedstawić graficznie w postaci wykresów dwu- i trójwymiarowych [74, 174, 175].

Wpływ parametrów nagniatania odśrodkowego na parametr Ra chropowatości powierzchni oraz stopień umocnienia warstwy wierzchniej wałka ze stali C45 o średnicy 56 mm przedstawiono na rys. 3.28 ÷ 3.30 [74]. Nagniatanie przeprowadzono na tokarce, stosując specjalną przystawkę wyposażoną w głowicę o średnicy 157 mm z kulkami ze stali łożyskowej o średnicy 7,938 mm.

Ze wzrostem prędkości obwodowej głowicy następuje zwiększanie się zarówno energii uderzenia jak i gęstości uderzeń kulek nagniatających w obrabianą powierzchnię, co powoduje wzrost stopnia umocnienia WW w całym badanym zakresie prędkości v_0 , przy czym w miarę zwiększania v_0 dynamika tego wzrostu słabnie. Dla prędkości obwodowej 1700 m/min stopień umocnienia

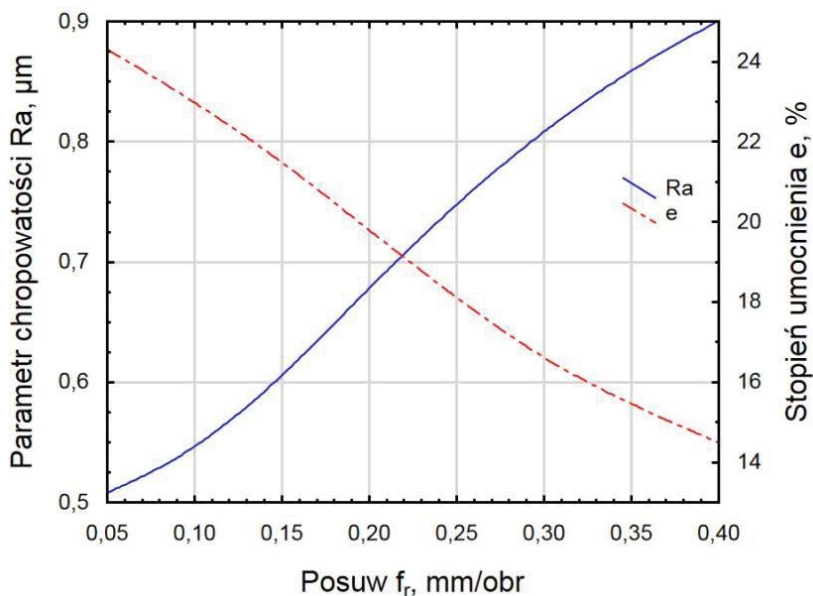


Rys. 3.28. Wpływ prędkości obwodowej głowicy nagniatającej na chropowatość powierzchni i stopień umocnienia WW obrabianego przedmiotu ze stali C45 ($f_r = 0,2$ mm/obr, $n_p = 80$ obr/min) [74]

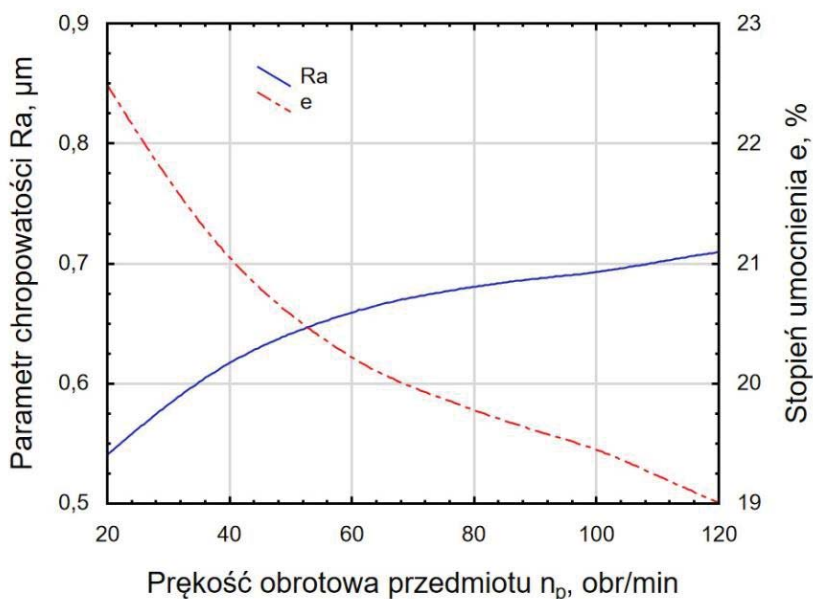
WW przekracza 21%. Prędkość obwodowa głowicy wpływa też na chropowatość obrabianej powierzchni. W zakresie małych wartości prędkości obwodowej decydujący wpływ na chropowatość ma proces odkształceń plastycznych i zmniejszanie wysokości wzniesień, czego efektem jest zmniejszanie parametru

Ra chropowości, natomiast w zakresie większych wartości v_0 widoczny jest wzrost parametru Ra w miarę zwiększania prędkości obwodowej, gdyż w większym stopniu na chropowość powierzchni wpływa głębokość wgłębień w związku z rosnącą energią uderzenia poruszających się z większą prędkością kulek (rys. 3.28).

Wzrostowi zarówno posuwu jak i prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego towarzyszy zmniejszenie gęstości uderzeń kulek w obrabianą powierzchnię. Zwiększenie odległości między śladami uderzeń prowadzi do wzrostu głębokości powstających odcisków, co przejawia się wzrostem parametru Ra chropowości powierzchni. Zmniejszenie gęstości uderzeń powoduje też mniejszą koncentrację odkształceń plastycznych, co wpływa na mniejszy wzrost mikro-twardości w odniesieniu do mikro-twardości przed nagniataniem, a tym samym, na zmniejszenie stopnia umocnienia WW (rys. 3.29 i 3.30).



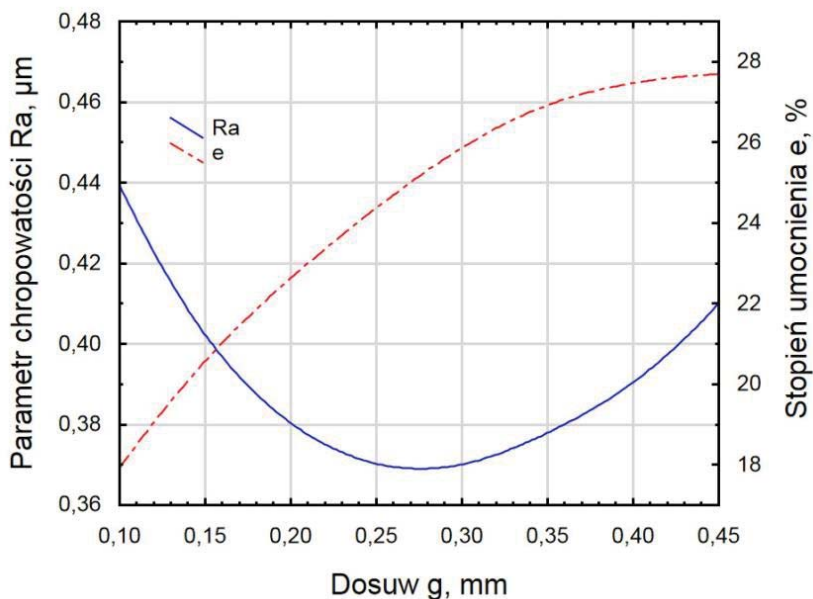
Rys. 3.29. Wpływ posuwu na chropowość powierzchni i stopień umocnienia WW obrabianego przedmiotu ze stali C45 ($v_0 = 1380$ m/min, $n_p = 80$ obr/min) [74]



Rys. 3.30. Wpływ prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego na chropowatość powierzchni i stopień umocnienia WW obrabianego przedmiotu ze stali C45 ($v_0 = 1380 \text{ m/min}$, $f_r = 0,2 \text{ mm/obr}$) [74]

Wykresy obrazujące wpływ prędkości obwodowej głowicy, posuwu i prędkości obrotowej przedmiotu na parametr chropowatości Ra i stopień umocnienia WW dla stopu tytanu Ti6Al4V mają podobny charakter jak dla stali C45 [174, 175]. Na rys. 3.31 przedstawiono wpływ dosuwu kulek nagniatających do przedmiotu obrabianego na chropowatość powierzchni i stopień umocnienia WW. Zwiększanie dosuwu g do około $(0,25 \div 0,3) \text{ mm}$ powoduje zmniejszanie parametru Ra , co można tłumaczyć zmniejszaniem wpływu bicia kulek na równomierność śladów uderzeń na obrabianej powierzchni. Dalszy wzrost dosuwu wpływa na zwiększanie parametru Ra , co może być związane z „wybijaniem” większych wgłębień i większym tarciem między kulkami a obrabianym przedmiotem. Stopień umocnienia WW przedmiotu zwiększa się w miarę wzrostu dosuwu [174].

Korzystne zmiany stanu WW w wyniku nagniatania odśrodkowego można osiągnąć również dla żeliwa. Po obróbce NDSO płaskich powierzchni przedmiotów żeliwnych o chropowatości $Ra = (3,3 \div 3,5) \mu\text{m}$ następuje zmniejszenie chropowatości do $Ra = (0,55 \div 1,1) \mu\text{m}$. Wzrasta też mikrotwardość WW o $(30 \div 40)\%$ (mikrotwardość rdzenia wynosi około $275 \text{ HV}_{0,1}$), a głębokość utwardzenia WW sięga $(0,8 \div 1,0) \text{ mm}$. Przy nadmiernym zgnioście WW mogą wystąpić wykruszenia i łuszczenie powierzchni [9].



Rys. 3.31. Wpływ dosuwu na chropowatość powierzchni i stopień umocnienia WW obrabianego przedmiotu ze stopu tytanu Ti6Al4V ($v_0 = 1740$ m/min, $f_r = 0,2$ mm/obr, $i = 1$) [174]

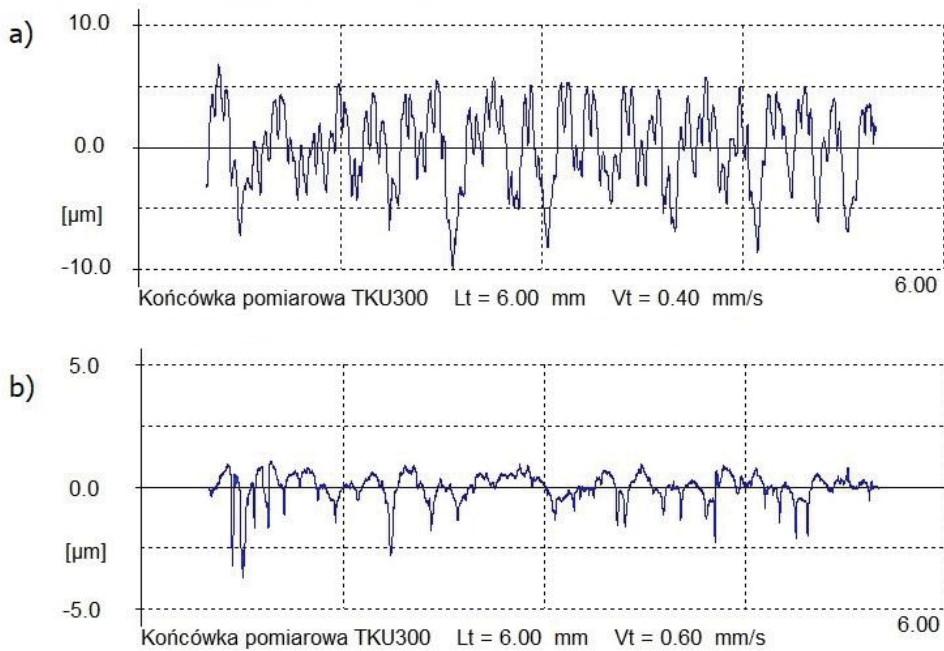
W obróbce NDSO zwykle stosowane są ciecze obróbkowe, takie jak olej maszynowy, mieszanina oleju z naftą, emulsja olejowo-wodna. Na zmniejszenie chropowatości powierzchni oraz zwiększenie stopnia umocnienia WW wpływają dodatki grafitu oraz dwusiarczku molibdenu do cieczy obróbkowej. Również lepsze efekty stosowania nagniatania odśrodkowego osiąga się przy stosowaniu podawania cieczy obróbkowej przez głowicę nagniatającą w porównaniu z zewnętrznym podawaniem cieczy [152].

Ze względu na chropowatość powierzchni, w obróbce nagniataniem odśrodkowym przedmiotów z żeliwa szarego zalecane jest stosowanie małych prędkości obwodowych głowicy (v_0 – około 600 m/min przy dosuwie $g = 0,1$ mm). Na powierzchni obrobionej NDSO z małą prędkością obwodową nie występują mikropęknięcia, które są zauważalne przy wzroście prędkości v_0 [55].

Nagniatanie odśrodkowe może być stosowane jako obróbka wykończeniowa przedmiotów wyciętych laserem. Powierzchnia po cięciu laserem charakteryzuje się zróżnicowaną strukturą geometryczną w zależności od odległości od krawędzi przecięcia tej powierzchni z powierzchnią przedmiotu, w którą „wchodzi” promień lasera. Chropowatość powierzchni w strefie „wyjścia” promieni lasera jest, na ogół, większa niż w strefie „wejścia”.

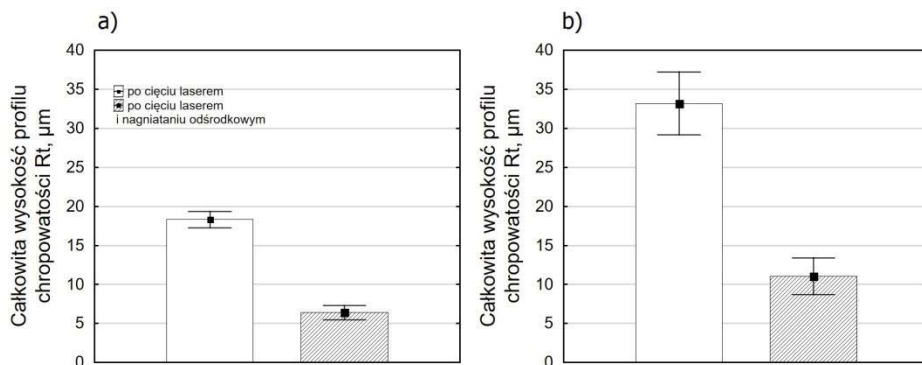
SGP po cięciu laserem ukształtowana jest w postaci prążków równoległych do promieni lasera, które charakteryzują się występowaniem „stromych” wzniesień oraz wgłębień. Podczas nagniatania odśrodkowego następuje zmniejszenie

wysokości chropowatości powierzchni oraz wyraźne zaokrąglenie i „spłaszczenie” wzniesień mikronierówności [139]. Na rys. 3.32 przedstawiono przykładowe profilogramy powierzchni po cięciu laserem oraz po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym.



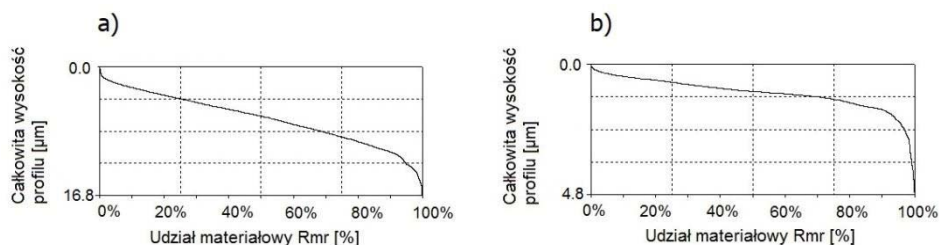
Rys. 3.32. Profilogramy powierzchni: a) po cięciu laserem, b) po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym (materiał: stal C45, parametry nagniatania: $v_0 = 1142$ m/min, $f_w = 0,08$ mm/kulka, $f_p = 0,08$ mm, $g = 0,5$ mm, $i = 1$)

Wpływ nagniatania odśrodkowego na całkowitą wysokość profilu chropowatości Rt przedstawiono na rys. 3.33. Po cięciu laserem całkowita wysokość profilu chropowatości Rt w strefie wyjścia promienia lasera jest o około 80% większa niż w strefie wejścia. Po nagniataniu odśrodkowym parametr Rt , zarówno w strefie wejścia jak i wyjścia promienia lasera, około 3-krotnie zmniejsza się [191].



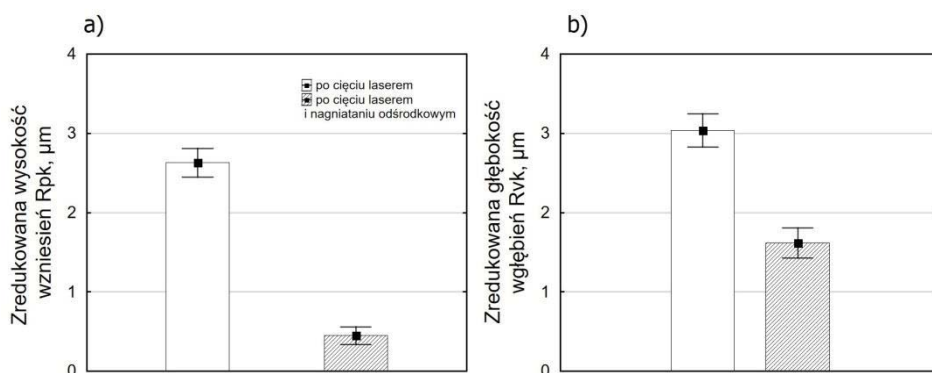
Rys. 3.33. Wpływ nagniatania odśrodkowego powierzchni po cięciu laserem na całkowitą wysokość profilu chropowatości R_t w strefie wejścia (a) i strefie wyjścia (b) promieni lasera (materiał obrabiany - stal C45, parametry nagniatania: $v_0 = 1142$ m/min, $f_w = 0,08$ mm/kulka, $f_p = 0,08$ mm, $g = 0,5$ mm) [191]

Nagniatanie odśrodkowe powierzchni po cięciu laserem wpływa też na kształt krzywej udziału materiałowego (rys. 3.34). Po cięciu laserem krzywa Abbott'a – Firestone'a ma charakter degresywno-progresywny, co świadczy o „ostrych” wzniesieniach mikronierówności (rys. 3.34a). Nagniatanie odśrodkowe powierzchni po cięciu laserem powoduje przekształcenie tej krzywej w progresywną (rys. 3.34b), co jest korzystne ze względu na trwałość eksploatacyjną obrabianych przedmiotów.



Rys. 3.34. Krzywa udziału materiałowego powierzchni: a) po cięciu laserem, b) po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym (materiał: stal C45, parametry nagniatania: $v_0 = 1142$ m/min, $f_w = 0,08$ mm/kulka, $f_p = 0,08$ mm, $g = 0,5$ mm, $i = 1$)

Po nagniataniu odśrodkowym powierzchni po cięciu laserem następuje znaczne zmniejszenie parametrów krzywej udziału materiałowego, przy czym, w znacznie większym stopniu zmniejsza się zredukowana wysokość wzniesień R_{pk} (około 6-krotnie) niż zredukowana głębokość wgłębień R_{vk} (około 2-krotnie), co dla strefy wejścia promienia lasera przedstawiono na rys. 3.35. Podobne zależności można zaobserwować również dla strefy wyjścia promienia lasera [191].



Rys. 3.35. Wpływ nagniatania odśrodkowego powierzchni po cięciu laserem na zredukowaną wysokość wzniesień (a) i zredukowaną głębokość wgłębień (b) profilu chropowatości w strefie wejścia promieni lasera (materiał obrabiany - stal C45, parametry nagniatania: $v_0 = 1142$ m/min, $f_w = 0,08$ mm/kulka, $f_p = 0,08$ mm, $g = 0,5$ mm) [191]

Podczas cięcia laserem stali C45 pod powierzchnią przecięcia, wskutek dużego wzrostu temperatury a następnie szybkiego schłodzenia, powstaje strefa wpływu ciepła (SWC), w której następują przemiany strukturalne materiału. W SWC następuje przemiana struktury ferrytyczno-perlitycznej w strukturę martenzytyczną. Głębokość SWC może przekraczać 0,3 mm. Przemiany strukturalne powodują wzrost mikrotwardości, która w pobliżu powierzchni może osiągnąć około 560 HV_{0,05}, a w miarę oddalania się od powierzchni w głąb materiału zmniejsza się (mikrotwardość rdzenia jest równa około 200 HV_{0,05}). Po nagniataniu odśrodkowym na głębokości przekraczającej 60 μm następuje dalszy wzrost mikrotwardości (o około 8%), a powstającą po nagniataniu strukturę należy określić jako martenzyt drobnoziarnisty [141].

Stopień umocnienia oraz głębokość warstwy utwardzonej w wyniku nagniatania odśrodkowego powierzchni po cięciu laserem zależy od materiału obrabianego i parametrów technologicznych nagniatania. Dla stali C45 stopień umocnienia e waha się od kilku do kilkunastu procent, a głębokość warstwy utwardzonej g_H zwykle mieści się w granicach (10 ÷ 75) μm. Ze wzrostem prędkości obwodowej głowicy następuje wzrost zarówno stopnia umocnienia e jak i głębokości warstwy utwardzonej g_H , natomiast ze wzrostem posuwu wzdłużnego i poprzecznego zmniejsza się e oraz g_H [138, 139].

Po nagniataniu odśrodkowym powierzchni bezpośrednio po cięciu laserem stali C45 wartość parametru chropowatości Ra , na ogół, nie jest mniejsza od 1 μm. W celu zmniejszenia chropowatości powierzchni po cięciu laserem można zastosować frezowanie a następnie nagniatanie odśrodkowe. Można wówczas osiągnąć wartość parametru Ra w granicach (0,4 ÷ 0,7) μm [142]. Usunięcie prążków ukształtowanych podczas cięcia laserem wymaga sfrezowania warstwy

materiału o grubości około 0,1 mm, a zatem o taką wartość zmniejszy się grubość warstwy utwardzonej wskutek cięcia laserem [140].

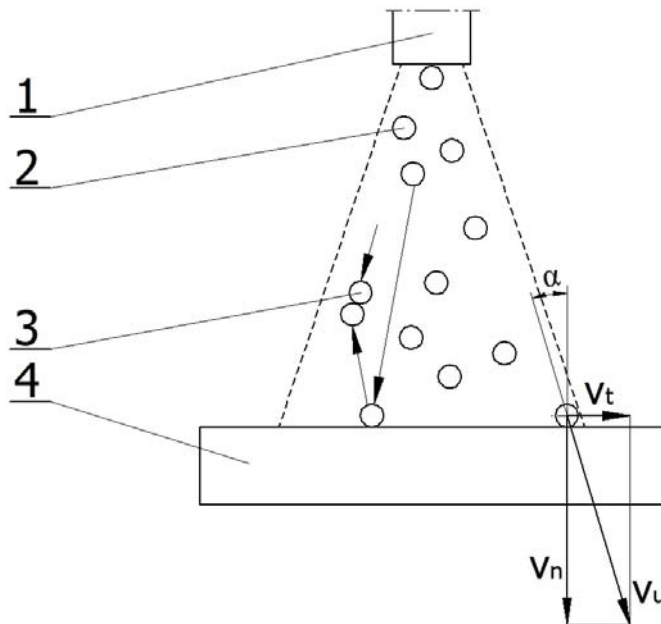
Usunięcie cienkiej warstwy materiału, najczęściej metodą frezowania lub szlifowania, umożliwia też zwiększenie dokładności przedmiotów wyciętych laserem. Nagniatanie odśrodkowe powierzchni po cięciu laserem i usunięciu cienkiej warstwy materiału metodami obróbki wiórowej lub ścierniej może wpłynąć na niewielkie zwiększenie chropowatości, ale powoduje wzrost mikro-twardości WW oraz, co jest bardzo ważne ze względu na właściwości eksploatacyjne wytwarzanych przedmiotów, powoduje ukształtowanie ściskających naprężeń własnych (po cięciu laserem w warstwie wierzchniej przedmiotów zwykle są rozciągające naprężenia własne).

4. NAGNIATANIE ROZPROSZONE

4.1. Nagniatanie strumieniowe

Nagniatanie dynamiczne, rozproszone, strumieniowe (NDRS), krócej nazywane nagniataniem strumieniowym, polega na umacnianiu warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu za pomocą strumienia elementów nagniatających. Proces nagniatania strumieniowego przedstawiono schematycznie na rys. 4.1. Wyrzucane z urządzenia do NDRS 1 elementy nagniatające 2, np. kulki, poruszają się z dużą prędkością, około $(50 \div 150)$ m/s, uderzając w powierzchnię przedmiotu obrabianego 4. Strumień tych kulek charakteryzuje się pewnym rozproszeniem, a w związku z tym, uderzają one w powierzchnię obrabianego przedmiotu pod różnym kątem uderzenia α , który został określony jako kąt między normalną do obrabianej powierzchni a torem elementów nagniatających. Prędkość elementu w chwili uderzenia w obrabianą powierzchnię v_u można rozłożyć na składową normalną v_n oraz składową styczną v_t . Z rys. 4.1 wynika zależność:

$$v_n = v_u \cos \alpha. \quad (4.1)$$



Rys. 4.1. Schemat ruchu elementu nagniatającego w procesie nagniatania strumieniowego:
1 – dysza urządzenia nagniatającego, 2 – kulka uderzająca w powierzchnię obrabianą,
3 – kulka zderzająca się z inną kulką, 4 – przedmiot obrabiany

Energię uderzenia elementu nagniatającego w obrabiany materiał można obliczyć z zależności (3.10), a energię zużytą na odkształcenia plastyczne – z zależności (3.11). Proces nagniatania strumieniowego charakteryzuje się tym, że część elementów nagniatających (kulka 3 na rys. 4.1), po wyrzuceniu przez urządzenie nagniatające, wytraca część swojej energii kinetycznej wskutek zderzeń z elementami odbitymi od obrabianej powierzchni, co prowadzi do zmniejszenia prędkości i kierunku ruchu tych elementów.

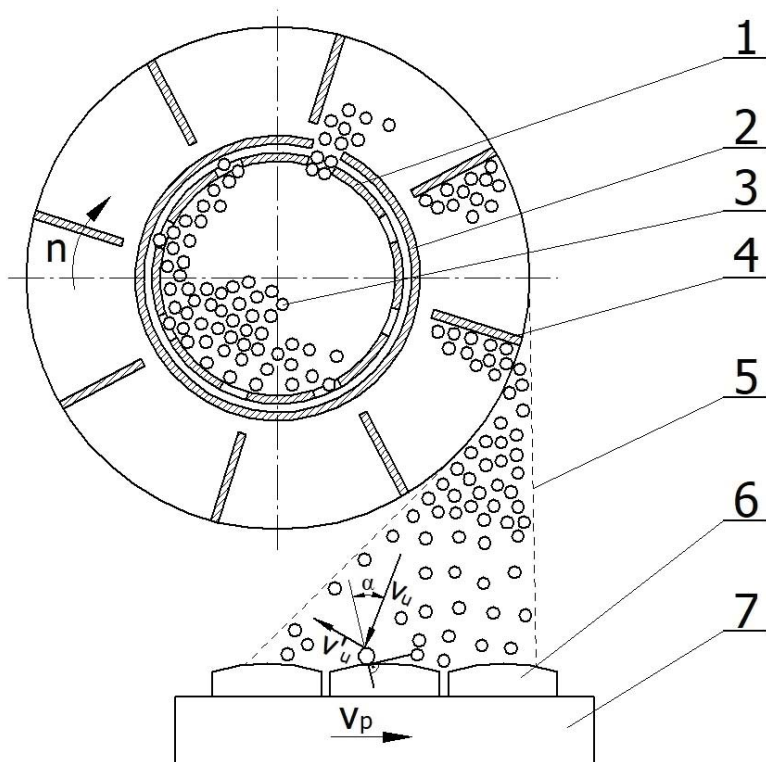
Zaletą nagniatania strumieniowego jest możliwość obróbki umacniającej powierzchni o złożonym kształcie. W obróbce tej stosowane są elementy nagniatające o małych wymiarach, co umożliwia nagniatanie wgłębień o małych promieniach krzywizny. Jednakże w przypadku wzrostu kąta uderzenia α następuje zmniejszenie wartości składowej normalnej v_n prędkości uderzenia, a tym samym zmniejszenie odkształceń plastycznych WW obrabianego przedmiotu.

W zależności od konstrukcji urządzeń nagniatających, nagniatanie strumieniowe można podzielić na [102]:

- wirnikowe,
- pneumatyczne.

4.1.1. Nagniatanie strumieniowe wirnikowe

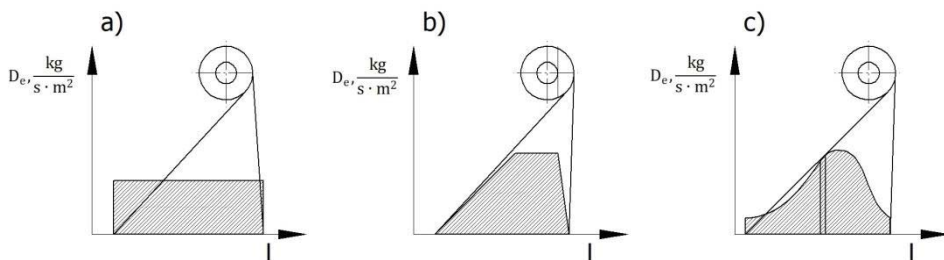
W wielu publikacjach nagniatanie strumieniowe wirnikowe nazywane jest śrutowaniem, gdyż jako medium obróbkowe w tym procesie zwykle używany jest śrut. Zasadę pracy urządzenia do nagniatania strumieniowego wirnikowego przedstawiono na rys. 4.2. Do wnętrza wirnika 1 poprzez lej doprowadzający wprowadzane są elementy nagniatające 3. Przez otwory rozdzielcze w wirniku i tulei regulacyjnej 2 elementy nagniatające podawane są do strefy działania wirujących łopatek rzutowych 4, które nadają odpowiednią prędkość elementom nagniatającym. Prędkość wyrzucanych elementów nagniatających jest w przybliżeniu (1,3 ÷ 1,4) razy większa od prędkości obwodowej wirnika [126]. Elementy nagniatające uderzają w powierzchnię przedmiotu obrabianego 6 pod kątem α z prędkością v_u , po czym odbijają się z prędkością v_u' , mniejszą od prędkości uderzenia, przy czym wartość tego zmniejszenia zależy od współczynnika restytucji. Przedmioty obrabiane 6 posadowione są na taśmociągu 7, który przemieszcza się z prędkością v_p .



Rys. 4.2. Zasada pracy urządzenia wirnikowego do nagniatania strumieniowego: 1 – wirnik, 2 – tuleja regulacyjna, 3 – element nagniatający, 4 – łopatką rzutową, 5 – strumień elementów nagniatających, 6 – przedmiot obrabiany, 7 – taśmociąg

Po wyrzuceniu z urządzenia wirnikowego następuje uformowanie elementów nagniatających w postaci strumienia 5, którego przekrój zwiększa się w miarę zwiększania odległości od wirnika. Rozkład gęstości elementów nagniatających w strumieniu oraz wielkość pola rozrzutu zależy od parametrów technologicznych i kształtu łopatek rzutowych. Rozróżnia się następujące typowe rozkłady gęstości padania elementów nagniatających D_e [149]:

- doskonały (idealny) – rys. 4.3a,
- trapezowy, teoretycznie osiągalny (pożądany) – rys. 4.3b,
- dzwonowy (rzeczywisty) – rys. 4.3c.



Rys. 4.3. Typowe rozkłady gęstości padania elementów nagniatających D_e w funkcji długości powierzchni obrabianej l (opis w tekście)

Do nagniatania strumieniowego wirnikowego, jako medium obróbkowe, najczęściej stosuje się śrut stalowy cięty z drutu oraz śrut stalowy kulisty, o wymiarze umownym (0,2 ÷ 2) mm. Prędkość śrutu wyrzucanego z wirnika zwykle mieści się w zakresie (40 ÷ 100) m/s. Średnice wirników są dość duże, zwykle rzędu kilkuset milimetrów, a stosowane prędkości obrotowe wynoszą od 1500 obr/min do 3500 obr/min. Wydajność urządzeń wirnikowych może osiągnąć 1100 kg/min [102].

Warunki technologiczne nagniatania zależą od wymiarów przedmiotu obrabianego. W tabeli 4.1 podano zalecane wartości wymiarów śrutu oraz strzałki ugięcia płytki kontrolnej Almena w zależności od grubości nagniatanego przedmiotu.

Tabela 4.1. Zalecane wymiary śrutu oraz intensywności nagniatania dynamicznego dla przedmiotów nagniatanych o różnej grubości [35, 102]

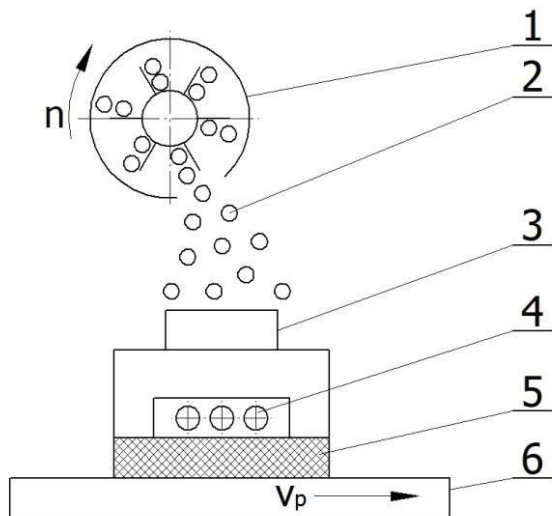
Grubość nagniatanego przedmiotu, mm	Średni wymiar śrutu, mm	Typ płytki kontrolnej Almena	Strzałka ugięcia płytki kontrolnej Almena, mm
1,6	0,4	N	0,30
3,2	0,4 ÷ 0,6	A	0,20
9,5	0,6 ÷ 0,9	A	0,45
16,0	0,9 ÷ 1,2	C	0,18
22,0 i więcej	1,2 ÷ 1,5	C	0,25

Nagniatanie strumieniowe wirnikowe części maszyn zwykle odbywa się w ruchu ciągłym. Przedmioty obrabiane, które nagniatane są tylko z jednej strony (np. resory), umieszcza się na taśmociągu przesuwającym się pod urządzeniem wirnikowym. W przypadku nagniatania części wymagających obróbki umacniającej z obydwu stron, umieszcza się je na przesuwającym się taśmociągu w taki sposób, aby obrabiane powierzchnie usytuowane były pionowo, natomiast urządzenia wirnikowe rozmieszcza się z obydwu stron taśmociągu w położeniu zapewniającym nagniatanie wszystkich powierzchni przewidzianych do obróbki umacniającej [157].

Obróbkę umacniającą części maszyn można przeprowadzić w systemie satelitarnym. Stanowisko do satelitarnego nagniatania strumieniowego składa się z obracającego się wokół osi pionowej stołu oraz wirników rozmieszczonych nad tym stołem. Stół wyposażony jest w podesty do mocowania obrabianych przedmiotów, które również obracają się wokół swoich osi. Zatem przedmioty wykonują ruch obrotowy (wraz z podestami), a ponadto ruch obiegowy wokół osi stołu, co zapewnia równomierne nagniatanie ich powierzchni. Przykładem części, które mogą być nagniatane tą metodą, są części przekładni dla przemysłu motoryzacyjnego [131].

Podczas nagniatania strumieniowego wirnikowego części osiowosymetrycznych (np. wałków, sprężyn) przedmioty obrabiane powinny być wprawiane w ruch obrotowy w celu równomiernego umocnienia ich na całej powierzchni. Obróbkę taką można zrealizować na stanowisku wyposażonym w dwa obracające się wały, wykonujące jednocześnie prostoliniowy ruch wzdłuż osi, na których umieszcza się nagniatane przedmioty [126].

Obróbka nagniataniem strumieniowym wirnikowym może być przeprowadzona na stanowisku umożliwiającym podgrzewanie obrabianych przedmiotów (rys. 4.4). Wirnik 1 obraca się z prędkością n wyrzucając elementy nagniatające 2. Przedmiot obrabiany 3, który jest podgrzewany za pomocą elementów grzejnych 4, posadowiony jest na taśmociągu 6, przemieszczającym się pod wirnikiem z prędkością v_p . Taśmociąg powinien być zabezpieczony przed nagrzewaniem za pomocą warstwy izolacyjnej 5. Nagniatanie w podwyższonej temperaturze umożliwia zwiększenie odkształceń plastycznych WW obrabianych przedmiotów [44].

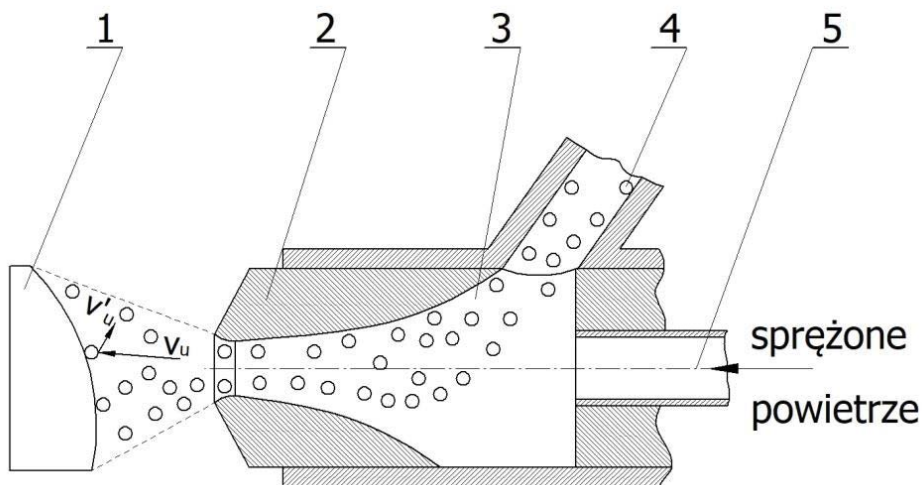


Rys. 4.4. Schemat urządzenia wirnikowego do nagniatania strumieniowego w podwyższonej temperaturze: 1 – wirnik, 2 – elementy nagniatające, 3 – obrabiany przedmiot, 4 – element grzejny, 5 – warstwa izolacyjna, 6 – taśmociąg [44]

Urządzenia wirnikowe do nagniatania strumieniowego charakteryzują się dużą wydajnością, ekonomicznością i stabilnością procesu umocnienia. Możliwość zmiany prędkości obrotowej wirnika pozwala na dobór odpowiedniej prędkości wyrzucanych elementów nagniatających, a tym samym (przy znanej granulacji i masie właściwej tych elementów) określenie energii uderzenia. Regulowana prędkość przesuwu taśmociągu z nagniatanymi przedmiotami oraz możliwość ustalenia masy wyrzucanych elementów w jednostce czasu (przy znanej średniej masie pojedynczego elementu) umożliwiają dobór gęstości uderzeń na jednostkę powierzchni oraz czasu obróbki. Znaczne wymiary urządzeń wirnikowych do obróbki NDRS umożliwiają nagniatanie przedmiotów o dużej masie.

4.1.2. Nagniatanie strumieniowe pneumatyczne

Nagniatanie strumieniowe pneumatyczne jest jednym z najczęściej stosowanych sposobów nagniatania. Często używaną nazwą jest też pneumokulowanie, a w przypadku stosowania, jako medium obróbkowego, kulek szklanych – mikrokulowanie. W urządzeniach pneumatycznych do nagniatania strumieniowego odpowiednią prędkość elementom nagniatającym nadaje strumień sprężonego powietrza. Zasadę działania takich urządzeń przedstawiono schematycznie na rys. 4.5. Elementy nagniatające 4 wsypywane są do komory 3, skąd strumieniem sprężonego powietrza, doprowadzonym przewodem 5, wyrzucane są przez dyszę 2 w kierunku obrabianego przedmiotu 1, w który uderzają z prędkością v_u .



Rys. 4.5. Zasada pracy urządzenia pneumatycznego do nagniatania strumieniowego: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – dysza, 3 – komora, 4 – elementy nagniatające
5 – przewód doprowadzający sprężone powietrze

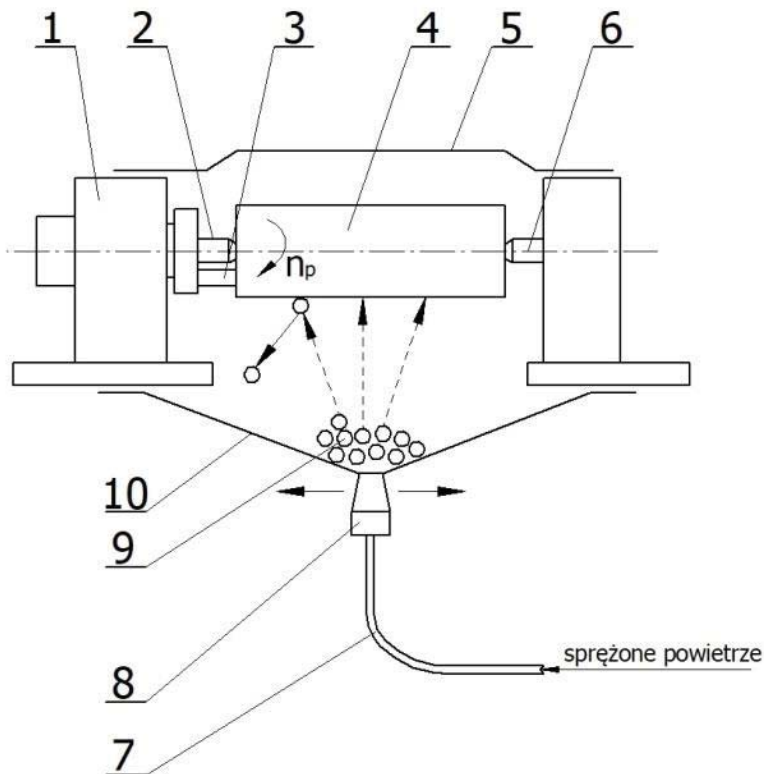
Jako medium obróbkowe, w procesie pneumatycznego nagniatania strumieniowego, stosuje się głównie kulki stalowe oraz szklane. Średnica kulek stalo-

wych (najczęściej ze stali łożyskowej) zazwyczaj mieści się w zakresie (1 ÷ 4) mm, a kulek szklanych (ze szkła sodowo-wapniowego) w granicach (50 ÷ 400) μm [81]. Prędkości początkowe nadawane elementom nagniatającym są mniejsze niż w urządzeniach wirnikowych i wynoszą (5 ÷ 20) m/s [78]. Ciśnienie sprężonego powietrza przyjmowane jest na poziomie kilku dziesiątych MPa, a czas obróbki – od kilkudziesięciu sekund do kilkunastu minut [79, 122].

Urządzenia do nagniatania strumieniowego pneumatycznego można podzielić na stacjonarne, które stanowią zdecydowaną większość, oraz przenośne (mobilne).

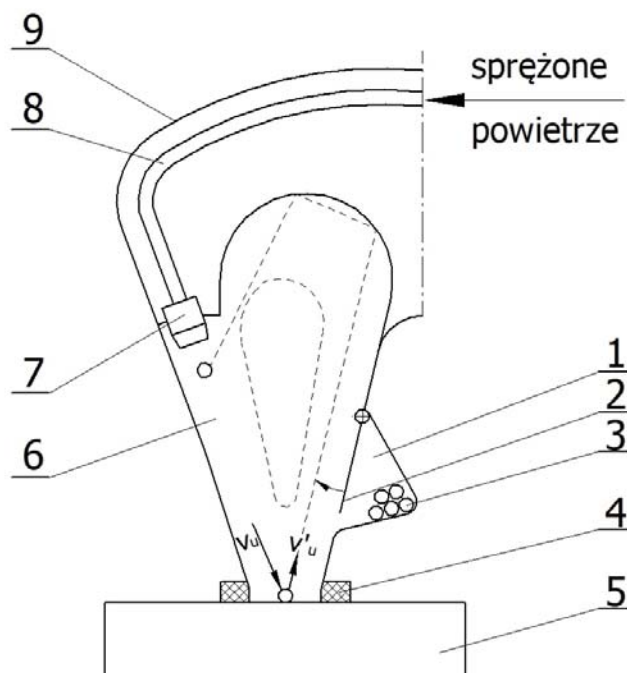
Przykładem urządzenia stacjonarnego jest urządzenie do nagniatania wałków, które schematycznie przedstawiono na rys. 4.6. Zamocowany w kłach 2 i 6 nagniatany przedmiot 4, który wykonuje ruch obrotowy z prędkością n_p , jest napędzany przez zespół napędowy 1 za pośrednictwem zabieraka 3. W dolnej części urządzenia umieszczona jest wanna opadowa 10, w której znajdują się kulki nagniatające 9. W najniższym punkcie wanny zamocowana jest dysza eżektorowa 8, do której sprężone powietrze doprowadzone jest przewodem 7. Dostające się do dyszy kulki są przyspieszane i wyrzucane w kierunku obrabianego przedmiotu. Po odbiciu od przedmiotu kulki opadają na dno wanny, która jest ukształtowana tak, aby kulki wpadały do dyszy. Osłona 5 zabezpiecza operatora przed uderzeniem przez odbite kulki i rozpraszaniem się kulek na zewnątrz urządzenia. Zespół wanna – dysza wykonuje ruchy posuwisto – zwrotne w kierunku równoległym do osi wałka, co w połączeniu z ruchem obrotowym wałka zapewnia równomierne pokrycie całej obrabianej powierzchni odciskami powstającymi wskutek uderzeń.

Dość szeroko stosowane są manualne urządzenia stacjonarne do pneumatycznego nagniatania strumieniowego. W urządzeniach tych do strefy oddziaływania kulek nagniatających operator ręcznie wprowadza obrabiane przedmioty, odpowiednio nimi manipulując podczas nagniatania. Osłony, w postaci gumowych fartuchów, zabezpieczają operatora przed uderzeniami odbitych kulek. Urządzenia te charakteryzują się dużą uniwersalnością ze względu na możliwość nagniatania przedmiotów o różnym kształcie.



Rys. 4.6. Schemat pneumatycznego urządzenia do nagniatania strumieniowego: 1 – zespół napędowy, 2, 6 – kły, 3 – zabierak, 4 – przedmiot obrabiany, 5 – osłona, 7 – przewód, 8 – dysza eżektorowa, 9 – kulki nagniatające, 10 – wanna opadowa [78]

Zasadę działania przenośnego urządzenia do pneumatycznego nagniatania strumieniowego przedstawiono na rys. 4.7. Głowicę 9 urządzenia, która zakończona jest uszczelką 4, dociska się do powierzchni przedmiotu obrabianego 5. Po otwarciu zasłony 2 kulki nagniatające 3 wysypują się z magazynu 1 i wpadają do kanału roboczego 6, gdzie są przyspieszane przez strumień sprężonego powietrza, które przewodem 8 doprowadzone jest do dyszy 7. Po uderzeniu, kulki odbijają się od powierzchni obrabianej, następnie odbijają się od powierzchni wewnętrznych komory roboczej i wpadają do kanału roboczego, gdzie są ponownie przyspieszane.



Rys. 4.7. Schemat przenośnego urządzenia pneumatycznego do nagniatania strumieniowego:
 1 – magazyn kulek, 2 – zasłona, 3 – kulka, 4 – uszczelka, 5 – przedmiot obrabiany, 6 – kanał roboczy, 7 – dysza, 8 – przewód, 9 – głowica [78]

Uwidocznione na rys. 4.7 urządzenie służy do ręcznego nagniatania strumieniowego niewielkich powierzchni. Zwykle, jako elementy nagniatające stosowane są kulki o średnicy rzędu $(2 \div 3)$ mm. Urządzenie to może służyć do nagniatania uzupełniającego przedmiotów, które były nagniatane na urządzeniach stacjonarnych, w miejscach trudnodostępnych albo zasłoniętych uchwytami.

Podobnie jak na urządzeniach pneumatycznych, nagniatanie strumieniowe może być przeprowadzone na urządzeniach, w których nośnikiem kulek nagniatających nie jest sprężone powietrze, ale strumień oleju (nagniatanie taką metodą nazywane jest hydrokulkowaniem). Zaletą tej metody jest zmniejszenie tarcia między materiałem a zagłębiającą się w ten materiał kulką, natomiast wadą – konieczność zapewnienia dużej szczelności komory, w której odbywa się nagniatanie [78].

4.1.3. Właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów nagniatanych strumieniowo

Elementy nagniatające stosowane do nagniatania strumieniowego na urządzeniach wirnikowych mają stosunkowo małe wymiary, a podczas nagniatania uderzają w obrabiane przedmioty ze znaczną prędkością. W tych warunkach następuje „wchodzenie” tych elementów w obrabiany materiał na dużą głębokość, czego skutkiem jest duża chropowatość obrabianej powierzchni. W przypadku nagniatania śrutem ciętym z drutu następuje pogorszenie chropowatości powierzchni z powodu małych promieni zaokrąglenia krawędzi powstających wskutek przecięcia.

Chropowatość powierzchni dla wybranych materiałów po nagniataniu strumieniowym przedstawiono w tabeli 4.2. Jako medium obróbkowe stosowano śrut stalowy kulisty o frakcji nominalnej 0,425 mm. Urządzenie wirnikowe nadawało elementom nagniatającym prędkość liniową równą 77 m/s. Obróbką poprzedzającą nagniatanie było frezowanie. Po nagniataniu strumieniowym nastąpił kilkukrotny wzrost chropowatości powierzchni. Widoczna jest zależność chropowatości powierzchni od twardości materiału; im materiał jest twardszy tym mniejsze wgłębienia „wybijane” są przez uderzające elementy nagniatające i mniejsza jest chropowatość powierzchni.

Tabela 4.2. Wpływ nagniatania strumieniowego na urządzeniach wirnikowych na chropowatość powierzchni obrabianych przedmiotów

Materiał obrabiany	Twardość HV1	Chropowatość powierzchni przed nagniataniem Ra, μm	Chropowatość powierzchni po nagniataniu Ra, μm
Stop aluminium 4046	82	2,00 ÷ 2,55	10,1 ÷ 11,8
Stop aluminium 7075	167	0,58 ÷ 0,74	5,0 ÷ 6,4
Stal C45	208	1,41 ÷ 1,68	5,9 ÷ 7,2
Stop tytanu Ti6Al4V	345	0,96 ÷ 1,27	1,9 ÷ 2,8

Mniejszą chropowatość powierzchni uzyskuje się po nagniataniu strumieniowym na urządzeniach pneumatycznych, co wiąże się z mniejszą prędkością elementów nagniatających. Chropowatość powierzchni po nagniataniu zwiększa się wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza. Przykładowo, w procesie nagniatania stali S25C o twardości 176 HV kulkami o średnicy 0,1 mm zwiększenie ciśnienia powietrza z 0,3 MPa do 0,8 MPa spowodowało wzrost chropowatości powierzchni z $R_z = 12 \mu\text{m}$ do $R_z = 23 \mu\text{m}$ [43]. Korzystniejsze ze względu na chropowatość powierzchni jest stosowanie mniejszego ciśnienia powietrza; po

nagniataniu strumieniowym stali C45 ulepszonej cieplnie do twardości ($27 \div 29$) HRC kulkami o średnicy 3 mm, przy ciśnieniu powietrza 0,15 MPa, chropowatość wynosiła $Ra = 0,75 \mu\text{m}$, a przy ciśnieniu 0,3 MPa – $Ra = 0,85 \mu\text{m}$ [114]. Bardzo małą chropowatość powierzchni można uzyskać po pneumatycznym nagniataniu strumieniowym mikrokulkami szklanymi. Nagniatanie strumieniowe stali X38CrMoV5-1 o twardości 52 HRC i chropowatości $Rz = 0,5 \mu\text{m}$ kulkami szklanymi o średnicy ($20 \div 30$) μm wpłynęło na zmniejszenie chropowatości powierzchni do $Rz = 0,4 \mu\text{m}$ gdy ciśnienie powietrza wynosiło 0,15 MPa. Natomiast wzrost ciśnienia do 0,6 MPa spowodował zwiększenie chropowatości do $Rz = 1,2 \mu\text{m}$ [46].

Chropowatość powierzchni zwiększa się również ze wzrostem intensywności nagniatania, na przykład, czterokrotne zwiększenie intensywności nagniatania stopu magnezu AZ80 kulkami szklanymi o średnicy ($300 \div 400$) μm wpłynęło na zwiększenie parametru Ra o około 170% [211]. Chropowatość powierzchni stopu tytanu Ti-6Al-4V po nagniataniu strumieniowym z intensywnością 0,2 mmA wynosi 1,172 μm , a z intensywnością 0,4 mmA – 2,107 μm (chropowatość przed nagniataniem – 0,562 μm) [166].

Wzrost twardości warstwy wierzchniej po obróbce NDRS zależy głównie od warunków technologicznych nagniatania oraz rodzaju materiału obrabianego. Typowy rozkład mikrotwardości WW charakteryzuje się występowaniem wartości maksymalnej mikrotwardości w pobliżu powierzchni przedmiotu oraz zmniejszaniem się mikrotwardości w głąb materiału do mikrotwardości rdzenia na głębokości g_H .

Przykładowo, w tabeli 4.3 podano mikrotwardość rdzenia i mikrotwardość maksymalną oraz głębokość warstwy utwardzonej dla wybranych materiałów po nagniataniu strumieniowym. Przedstawione wyniki pochodzą z prac badawczych przeprowadzonych w różnych ośrodkach, z zastosowaniem różnych warunków technologicznych, co utrudnia ich porównywanie. Niemniej dają one ogólną informację na temat umocnienia WW w procesie nagniatania strumieniowego. Stopień umocnienia WW waha się w granicach od 4% do 35%, a głębokość warstwy utwardzonej od 0,1 mm do 0,28 mm (dla poszczególnych materiałów po nagniataniu w określonych warunkach technologicznych).

Tabela 4.3. Wpływ nagniatania strumieniowego na mikrotwardość WW obrabianych przedmiotów

Materiał obrabiany	Medium nagniatające	Warunki technologiczne	Mikrotwardość rdzenia	Mikrotwardość maksymalna WW	Głębokość warstwy utwardzonej g_H , mm	Źródło
Stop magnezu AZ80	Kulki szklane (300 ÷ 400) μm	$f_N = 0,15 \text{ mm}$	72 HV0,0 4	97 HV0,04	0,125	[211]
Stop tytanu Ti-2,5Cu	Kulki 0,8 mm	$f_A = 0,20 \text{ mm}$, $K_o = 100\%$	250 HV0,1	360 HV0,1	0,28	[86]
Stop tytanu Ti-10V-2Fe-3Al	śrut kulisty 0,36 mm	$f_A = 0,20 \text{ mm}$	400 HV0,2	419 HV0,2	0,15	[22]
Stop Ti-47Al-1,5Nb-1Mn-0,2Si-0,5B	Kulki ceramiczne 0,5 mm	$f_A = 0,40 \text{ mm}$	400 HV0,1	570 HV0,1	0,13	[43]
Stop tytanu Ti-6Al-4V	śrut kulisty 0,36 mm	$f_A = 0,20 \text{ mm}$	420 HV0,0 5	460 HV0,05	0,25	[100]
Stal austenityczna 1.4539	śrut stalowy 0,8 mm	$p = 0,5 \text{ MPa}$, $t = 6 \text{ min}$, $f_A = 0,25 \text{ mm}$, $K_o = 100\%$	200 HV0,0 5	390 HV0,05	0,28	[108]
Oznaczenia: f_N , f_A – odkształcenia płytek kontrolnych Almena typu, odpowiednio, N oraz A, p – ciśnienie powietrza, t – czas nagniatania, K_o – stopień pokrycia.						

Mikrotwardość warstwy wierzchniej zwiększa się wraz ze wzrostem ciśnienia powietrza, co potwierdzają badania [87], według których w procesie nagniatania strumieniowego stali niestopowej AISI 1050 zwiększenie ciśnienia z 0,35 MPa do 0,55 MPa spowodowało zwiększenie mikrotwardości WW o około 9%.

Wpływ ciśnienia powietrza na mikrotwardość w większym stopniu uwidocznił się w przypadku nagniatania połączeń spawanych austenitycznej stali nierdzewnej ANSI 304. Dwukrotne zwiększenie ciśnienia powietrza spowodowało wzrost mikrotwardości o 60% [213].

Na mikrotwardość warstwy wierzchniej wpływa też stopień pokrycia nagniatanej powierzchni. Zwiększenie stopnia pokrycia ze 100% do 1500% umożliwiło uzyskanie mikrotwardości WW większej o około 43%, a głębokości warstwy utwardzonej o 53% [87].

Wpływ średnicy elementów nagniatających na głębokość warstwy utwardzonej można przedstawić na podstawie badań nagniatania strumieniowego brązu fosforowego C5191 o twardości 100 HV. Po nagniataniu na urządzeniu pneumatycznym o średnicy dyszy 5 mm (ciśnienie powietrza – 0,2 MPa, odległość dyszy od przedmiotu obrabianego – 300 mm) kulkami szklanymi o średnicach 0,09 mm, 0,27 mm oraz 0,39 mm uzyskano głębokość warstwy utwardzonej równą odpowiednio 0,10 mm, 0,20 mm i 0,25 mm. Natomiast mikrotwardość maksymalna po nagniataniu różniła się w niewielkim zakresie i wynosiła od 230 HV dla kulek $\Phi 0,09$ mm do 250 HV dla kulek $\Phi 0,39$ mm [150].

Natomiast wzrost czasu nagniatania wpływa głównie na zwiększenie mikrotwardości WW, co można zaobserwować na przykładzie nagniatania strumieniowego stali nierdzewnej 316L stalowymi kulkami o średnicy (1 ÷ 2) mm. Mikrotwardość maksymalna, która po nagniataniu w czasie 5 minut wynosiła 395 HV_{0,025}, po wydłużeniu czasu do 25 minut wzrosła do 495 HV_{0,025} (mikrotwardość rdzenia wynosiła około 290 HV_{0,025}). Wzrost głębokości warstwy utwardzonej był nieznaczny [8].

Utwardzenie warstwy wierzchniej uzyskuje się też po nagniataniu strumieniowym kompozytu aluminium wzmocnianego grafenem. Po nagniataniu z intensywnością 0,25 mmA kompozytu o twardości 42 HV nastąpił wzrost twardości WW do 75 HV (po nagniataniu w identycznych warunkach kompozytu o twardości 30 HV twardość WW wzrosła do 62 HV) [212].

Bardzo ważną cechą warstwy wierzchniej jest wartość i rozkład naprężeń własnych. Naprężenia te mają duży wpływ na wytrzymałość zmęczeniową elementów maszyn. Po nagniataniu strumieniowym, podobnie jak po innych sposobach nagniatania, w warstwie wierzchniej obrabianych przedmiotów ukształtowane są naprężenia własne ściskające (ujemne), które wpływają korzystnie na wytrzymałość zmęczeniową. Rozkład naprężeń własnych można opisać za pomocą następujących wielkości: ściskających naprężeń własnych o maksymalnej wartości bezwzględnej σ_{wm} , ściskających naprężeń własnych na zerowej głębokości σ_{wp} oraz głębokości występowania ściskających naprężeń własnych g_{σ} i odległości od powierzchni naprężeń o maksymalnej wartości bezwzględnej $g_{\sigma m}$ (rys. 2.6).

W tabeli 4.4 przedstawiono wartości σ_{wm} , σ_{wp} , g_{σ} i $g_{\sigma m}$ dla rozkładów naprężeń własnych w WW wybranych przedmiotów poddanych nagniataniu strumie-

niowemu. Podane wartości dotyczą wartości różnych materiałów obrabianych, mediów nagniatających oraz warunków technologicznych nagniatania (zostały opracowane na podstawie badań prowadzonych przez różnych autorów), a zatem, są one trudne do porównywania, natomiast dają ogólny obraz rozkładu naprężeń własnych ukształtowanych w procesie nagniatania strumieniowego.

Tabela 4.4. Wpływ nagniatania strumieniowego na naprężenia własne w WW obrabianych przedmiotów

Materiał obrabiany	Medium nagniatające	Warunki technologiczne	σ_{wm} , MPa	σ_{wp} , MPa	g_{σ} , mm	$g_{\sigma m}$, mm	Źródło
Stal 20Cr	śrut lany 0,8 mm	$p = 0,4$ MPa, $K_o = 300\%$, $f_A = 0,40$ mm	-932	-740	0,34	0,16	[158]
Stop aluminium 2024	Kulki stalowe 0,8 mm	$f_A = 0,20$ mm	-336	-248	0,50	0,17	[156]
Stop tytanu Ti6Al4V		$p = 0,6$ MPa, $K_o = 200\%$, $f_A = 0,18$ mm	-740	-630	0,15	0,02	[132]
Stal 42CrMo4	Śrut stalowy	$t = 30$ s, $l_d = 150$ mm	-543	-300	0,53	0,12	[122]
Stop aluminium 7050-T7451	Kulki szklane 0,4 mm	$p = 0,2$ MPa, $K_o = 120\%$, $l_d = 200$ mm	-443	-270	0,40	0,08	[17]
Oznaczenia: σ_{wm} – ściskające naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej, g_{σ} – głębokość występowania ściskających naprężeń własnych, σ_{wp} – ściskające naprężenia własne dla $g_{\sigma} = 0$, $g_{\sigma m}$ – odległość od powierzchni naprężeń o maksymalnej wartości bezwzględnej, l_d – odległość nagniatanej powierzchni od dyszy wylotowej, pozostałe – jak w tabeli 4.3.							

Z przedstawionych wskaźników rozkładu naprężeń własnych wynika, że po nagniataniu strumieniowym w WW obrabianych przedmiotów konstytuowane są ściskające naprężenia własne o dość dużych wartościach bezwzględnych, sięgających 1000 MPa, występujące na znacznej głębokości, przekraczającej 0,5 mm. Należy jednak zauważyć, że w zależności od materiału obrabianego i warunków technologicznych wartości poszczególnych wskaźników znacznie się różnią. Ściskające naprężenia własne na zerowej głębokości są o (15 ÷ 45)% mniejsze od naprężeń o maksymalnej wartości bezwzględnej.

Wartości bezwzględne ściskających naprężeń własnych zmniejszają się ze wzrostem granicy plastyczności nagniatanego materiału. Po nagniataniu stru-

mieniowym kulkami stalowymi o średnicy 0,80 mm stopu aluminium 2024 o granicy plastyczności 360 MPa i 420 MPa uzyskano wartości wskaźnika σ_{wm} , odpowiednio, -336 MPa i -194 MPa [156].

Ściskające naprężenia własne zwiększają się, co do wartości bezwzględnej, ze wzrostem intensywności nagniatania. Przykładowo, po nagniataniu strumieniowym stopu magnezu AZ80 kulkami szklanymi o średnicy (0,3 ÷ 0,4) mm z intensywnością $f_N = 0,04$ mm naprężenia σ_{wm} wynosiły -44 MPa, a gdy intensywność f_N została zwiększona do 0,4 mm, to naprężenia σ_{wm} osiągnęły wartość -98 MPa [210].

Na rozkład naprężeń własnych po nagniataniu strumieniowym wpływa prędkość elementów nagniatających. Zwiększenie prędkości elementów nagniatających z 34 m/s do 76 m/s w procesie nagniatania strumieniowego stopu niklu Inconel 718 spowodowało zwiększenie głębokości zalegania ściskających naprężeń własnych z 0,11 mm do 0,21 mm, natomiast wartość σ_{wm} pozostała na zbliżonym poziomie (około -1000 MPa) [57].

Głębokość zalegania ściskających naprężeń własnych zależy też od stopnia pokrycia obrabianej powierzchni odciskami uderzających elementów nagniatających. Przykładowo, po nagniataniu strumieniowym śrutem stalowym z intensywnością $f_A = 0,20$ mm stali 0Cr13Ni8Mo2Al ściskające naprężenia własne występowały na głębokości $g_\sigma = 0,17$ mm, gdy stopień pokrycia $K_o = 100\%$, natomiast zwiększenie stopnia pokrycia do $K_o = 200\%$ spowodowało wzrost głębokości g_σ do 0,21 mm [33].

Nagniatanie strumieniowe wpływa korzystnie na rozkład naprężeń własnych w stali nawęglanej. Po nagniataniu strumieniowym z intensywnością $f_A = 0,45$ mm i stopniem pokrycia $K_o = 120\%$ stali 20CrMnTi nawęglonej na głębokość (0,95 ÷ 0,98) mm nastąpił znaczny wzrost, co do wartości bezwzględnej, ściskających naprężeń własnych (przed nagniataniem σ_{wm} wynosiło około -370 MPa, a po nagniataniu około -850 MPa) [34].

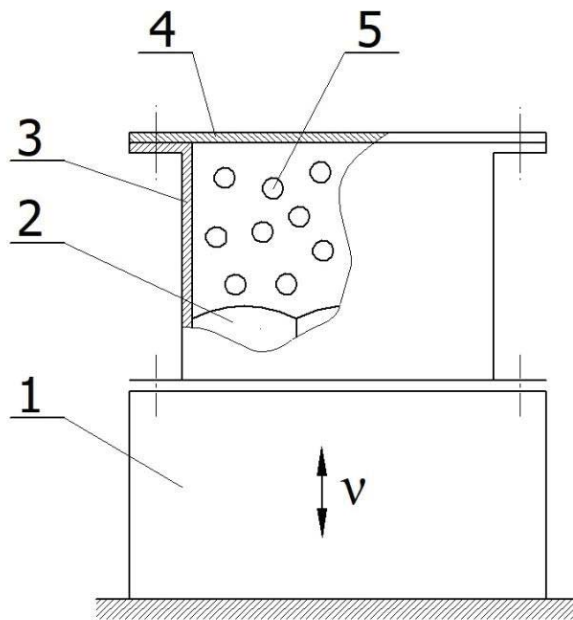
Do określania rozkładu naprężeń własnych w przedmiotach nagniatanych strumieniowo, oprócz metod doświadczalnych, stosowane są metody analizy numerycznej. Wyniki obliczeń numerycznych wskazują, że ze wzrostem zarówno średnicy elementu nagniatającego, w granicach (0,3 ÷ 1,0) mm, jak i prędkości uderzenia, w zakresie od 40 m/s do 100 m/s, następuje wyraźny (około 2 – krotny) wzrost głębokości zalegania ściskających naprężeń własnych [42]. Potwierdzono dużą zbieżność rozkładu naprężeń własnych określonego doświadczalnie z rozkładem otrzymanym metodą obliczeń numerycznych [26]. Według [53] wartości naprężeń własnych określone w oparciu o analizę numeryczną są około 30% mniejsze od wartości naprężeń uzyskanych metodą badań doświadczalnych.

4.2. Nagniatanie wibracyjne

Nagniatanie wibracyjne (NDRW) jest drugą, obok nagniatania strumieniowego, odmianą nagniatania dynamicznego rozproszonego. W procesie NDRW odkształcenie plastyczne warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów, a tym samym jej umocnienie, następuje wskutek uderzeń elementów nagniatających w obrabianą powierzchnię pod wpływem drgań komory roboczej, w której te elementy oraz obrabiane przedmioty się znajdują. Zwykle przedmioty obrabiane są zamocowane wewnątrz komory roboczej i wykonują ruch drgający razem z komorą. Rzadziej, na przykład podczas obróbki części bardzo drobnych, przedmioty przemieszczają się podobnie jak elementy nagniatające wewnątrz komory roboczej.

4.2.1. Kinematyka oraz warunki technologiczne nagniatania wibracyjnego

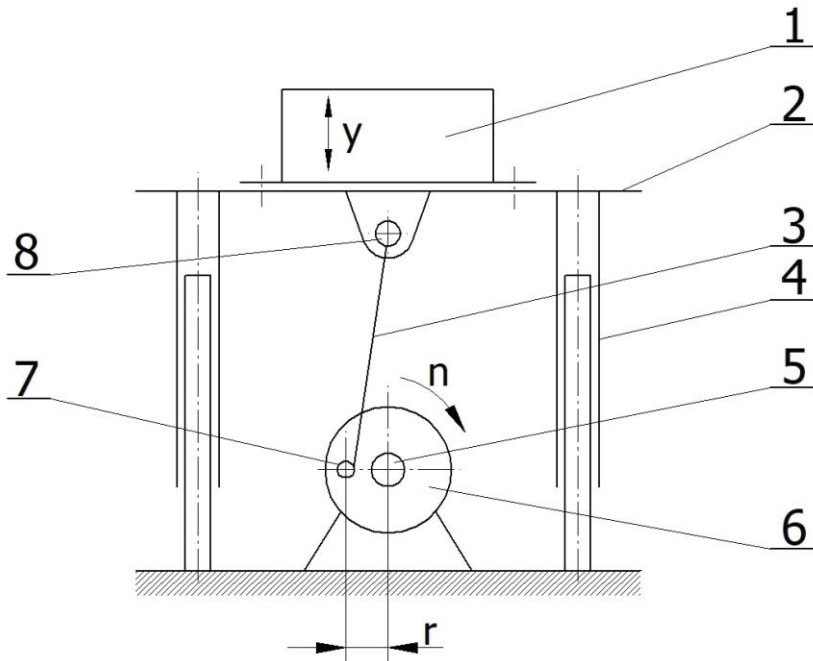
Nagniatanie wibracyjne przedstawiono schematycznie na rys. 4.8. Komora robocza 3 zamocowana jest na wibratorze 1, który wprawia ją w ruch drgający z częstotliwością v . Do dna komory roboczej przytwierdzone są obrabiane przedmioty 2. Elementy nagniatające (najczęściej kulki) 5 wsypywane są luźno do komory roboczej, pokrywa górna 4 zabezpiecza je przed wypadaniem. Ruch drgający wibratora powoduje zderzanie się elementów nagniatających z obrabianymi przedmiotami, czego efektem jest umocnienie warstwy wierzchniej tych przedmiotów. Elementy nagniatające zderzają się nie tylko z obrabianymi przedmiotami ale również wzajemnie ze sobą, a także ze ściankami komory roboczej i pokrywą, co powoduje, że poszczególne elementy nagniatające uderzają w obrabiane przedmioty (zwykle o złożonym kształcie) z różną prędkością, a tym samym różną energią, oraz pod różnym kątem, a rozmieszczenie odcisków powstających wskutek uderzeń jest przypadkowe.



Rys. 4.8. Schemat nagniatania wibracyjnego: 1 – wibrator, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – komora robocza, 4 – pokrywa górna, 5 – element nagniatający

Urządzenia wprawiające komory robocze w ruch drgający, nazywane wibratorami, można podzielić ze względu na kierunki ruchów składowych oraz ze względu na zasadę działania. W zależności od liczby kierunków ruchów składowych komory roboczej rozróżnia się urządzenia wibracyjne o ruchu jednokierunkowym, płaskim i przestrzennym [88]. Natomiast ze względu na zasadę działania rozróżnia się wibratory mechaniczne, elektromagnetyczne, pneumatyczne, hydrauliczne [97]. Do nagniatania wibracyjnego najczęściej stosuje się wibratory mechaniczne, które można podzielić na kinematyczne i dynamiczne [97].

W wibratorach mechanicznych kinematycznych (rys. 4.9) zwykle stosowany jest mechanizm korbowy. Wał 5, otrzymujący napęd od silnika, wykonuje ruch obrotowy z prędkością n . Wraz z wałem obraca się osadzona na nim tarcza 6, na której w odległości r od osi znajduje się czop 7. Na czopie osadzony jest obrotowo jeden koniec korbowodu 3, którego drugi koniec połączony jest wahliwie z czopem 8, związanym ze stołem 2. Prowadnice 4 umożliwiają ruch posuwisto-zwrotny stołu wraz z zamocowaną na nim komorą roboczą 1 tylko w kierunku osi y .



Rys. 4.9. Schemat urządzenia do nagięcia z wibratorem kinematycznym: 1 – komora robocza, 2 – stół, 3 – korbowód, 4 – prowadnica, 5 – wał, 6 – tarcza, 7 – sworzeń tarczy, 8 – sworzeń stołu

Stanowisko do nagięcia wibracyjnego przedstawiono na rys. 4.10. Napęd z silnika elektrycznego 1 poprzez przekładnię pasową 2 przekazywany jest na wał wibratora, na którym zamocowane jest koło zamachowe. Mechanizm korbowy 5 umożliwia bezstopniową zmianę amplitudy drgań wibratora. Prowadnice 6 pozwalają tylko na jednokierunkowy ruch stołu 4 wraz z zamocowaną na nim komorą roboczą 3.

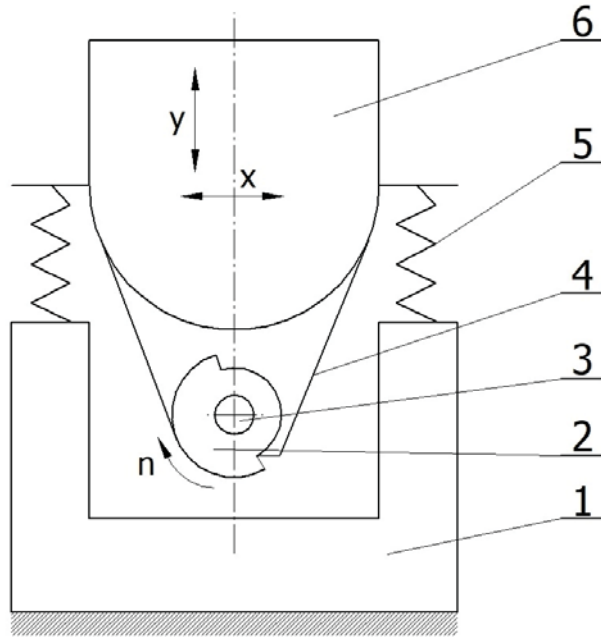


Rys. 4.10. Stanowisko do nagniatania wibracyjnego: 1 – silnik elektryczny, 2 – przekładnia pasowa, 3 – komora robocza, 4 – stół, 5 – mechanizm korbowy, 6 – prowadnica pionowa

W wibratorach mechanicznych dynamicznych, nazywanych też bezwładnościowymi lub inercyjnymi, siła wymuszająca drgania pochodzi od obracającej się masy niewyważonej. Na rys. 4.11 przedstawiono zasadę pracy urządzenia do nagniatania wibracyjnego z wibratorem o ruchu płaskim. Element o niewyważonej masie 2 jest zamocowany na wale 3, obracającym się z prędkością n . Wał 3 jest łożyskowany w korpusie 4. Korpus wraz z połączoną z nim komorą roboczą 6 posadowiony jest za pośrednictwem sprężyn 5 na podstawie 1.

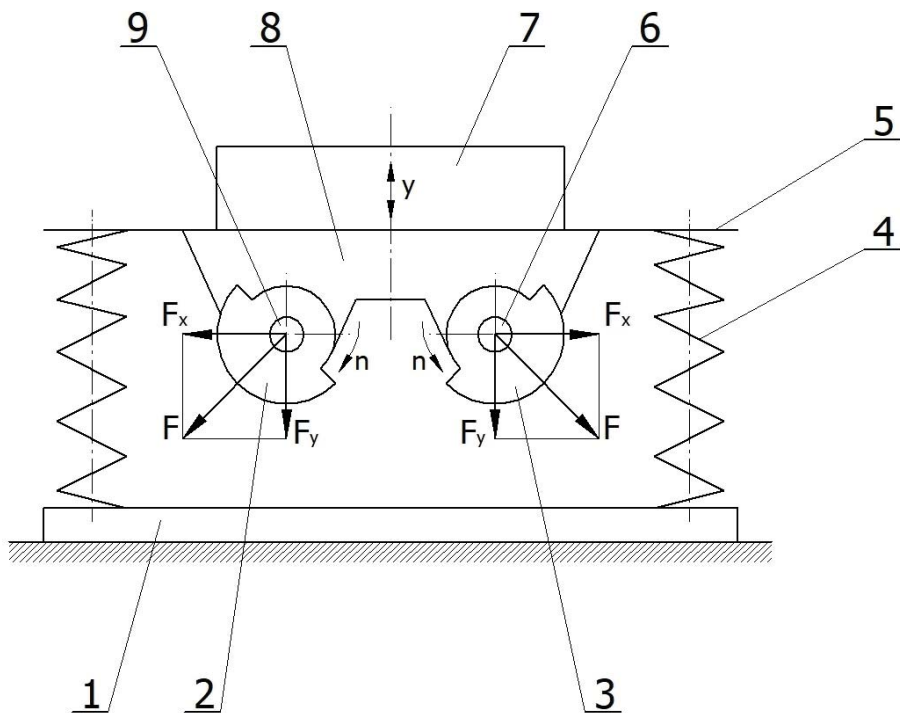
Obracający się wał wraz z elementem o niewyważonej masie jest źródłem wirującej siły wymuszającej F , której wartości składowe F_x i F_y zmieniają się w zależności od kąta położenia niewyważonej masy. Zmiany wartości sił działających w kierunku x oraz y powodują przemieszczenia komory roboczej w płaszczyźnie prostopadłej do osi obracającego się wału.

Urządzenia z wibratorem o ruchu płaskim stosowane są głównie w celu poprawy chropowatości powierzchni, usuwania rdzy, zużytych powłok itp. Znajdujące się w komorze roboczej przedmioty obrabiane oraz elementy medium obróbkowego (kształtki ściernie, kulki, stożki, wałeczki metalowe, kulki porcelanowe) wskutek drgań tej komory zderzają się ze sobą pod różnymi kątami. Podczas uderzenia elementów nagniatających w obrabiane przedmioty występuje składowa prędkości prostopadła do obrabianej powierzchni, powodująca odkształcenie (umocnienie) warstwy wierzchniej obrabianego materiału.



Rys. 4.11. Schemat urządzenia do nagniatania z wibratorem dynamicznym o ruchu płaskim:
 1 – podstawa, 2 – element o niewyważonej masie, 3 – wał, 4 – korpus,
 5 – sprężyna, 6 – komora robocza

Do nagniatania przeważnie stosowane są wibratory dynamiczne o ruchu jednokierunkowym. Zasadę pracy takiego wibratora przedstawiono schematycznie na przykładzie tzw. wibratora dwuwałowego (rys. 4.12). Wały 6 i 9, które ułożyskowane są w korpusie 8, obracają się w przeciwnych kierunkach z jednakową prędkością n . Wraz z wałami obracają się elementy o niewyważonej masie 2 i 3. Elementy te ustawione są symetrycznie względem siebie, co powoduje, że składowe F_x siły wymuszającej F w każdym położeniu tych elementów mają jednakową wartość ale przeciwne zwroty. Wobec równoważenia się składowych F_x , na korpus 8 oddziałują tylko składowe F_y . Wartość oraz zwrot sił F_y zmienia się wraz ze zmianą położenia mas niewyważonych, co powoduje przemieszczanie się korpusu 8 w kierunku osi y . Z korpusem połączony jest stół 5, na którym osadzona jest komora robocza 7. Korpus wraz ze stołem połączony jest z podstawą 1 za pomocą sprężyn 4. Podstawa 1 jest trwale związana z podłożem.



Rys. 4.12. Schemat urządzenia do nagięcia z wibratorem dynamicznym o ruchu jednokierunkowym: 1 – podstawa, 2, 3 – elementy o niewyważonej masie, 4 – sprężyna, 5 – stół, 6, 9 – wały, 7 – komora robocza, 8 – korpus

Jednokierunkowe drgania korpusu urządzenia wibracyjnego są przenoszone na połączoną z tym urządzeniem komorę roboczą. Znajdujące się w komorze przedmioty obrabiane zwykle są przytwierdzone do podłogi komory. Poruszające się pod wpływem drgań komory elementy nagiatające uderzają w obrabiane przedmioty zwykle z większą siłą niż w przypadku wibratorów o ruchu płaskim.

Wały wibratorów dynamicznych mogą być ze stałą lub nastawialną masą niewyważoną [97]. Na wałach z nastawialną masą niewyważoną osadzone są dwa elementy o niewyważonej masie, których wzajemne położenie można zmieniać poprzez obrót wokół osi wału, co wpływa na wartość niewyważenia [187].

Drgania wibratorów elektromagnetycznych są wymuszone przez zmienne siły elektromagnesu, który zasilany jest zmiennym prądem elektrycznym. Zwykle zwora połączona jest z korpusem elektromagnesu, który jest sprężysto posadowiony na podłożu. Charakterystykę sprężyn łączących rdzeń ze zworą dobiera się w taki sposób, aby możliwe były drgania z częstotliwością rezonansową [97]. Poprzez zmianę napięcia zasilania można zmieniać amplitudę drgań wibratora.

Wibratory elektromagnetyczne nie wymagają smarowania, a ze względu na brak elementów trących charakteryzuje je małe zużycie.

Źródłem siły wymuszającej drgania w wibratorach pneumatycznych może być ruch elementu o niewyważonej masie albo ruch kuli lub rolki po pierścieniowej bieżni, wzbudzony strumieniem sprężonego powietrza. Główną zaletą wibratorów pneumatycznych jest możliwość regulacji częstotliwości drgań oraz siły wymuszającej, natomiast wadą jest duże zużycie energii i duży hałas [97]. Natomiast cichą pracą charakteryzują się wibratory hydrauliczne, w których czynnikiem wzbudzającym drgania jest strumień cieczy.

Do nagniatania wibracyjnego w charakterze medium obróbkowego najczęściej stosowane są kulki stalowe o średnicy (4 ÷ 10) mm. Ze względu na dostępność i małą chropowatość powierzchni duże zastosowanie mają kulki łożyskowe. Mogą też być używane kulki z węglików spiekanych (rzadziej ze stali szybkotnącej), które charakteryzują się większą masą właściwą i odpornością na wyższą temperaturę.

Wyniki nagniatania wibracyjnego w dużym stopniu zależą od parametrów technologicznych, do których zalicza się:

- kształt, materiał i wymiary elementów nagniatających,
- amplitudę drgań wibratora,
- częstotliwość drgań wibratora,
- wysokość „wsadu” elementów nagniatających,
- czas nagniatania.

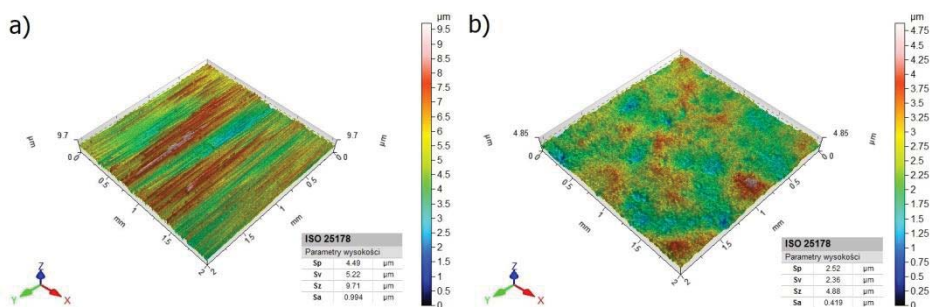
Parametry nagniatania wibracyjnego mogą zmieniać się w szerokim zakresie. Amplituda i częstotliwość drgań zależy od konstrukcji wibratora. Na wibratorach kinematycznych stosowane są większe amplitudy drgań (od kilku do kilkudziesięciu milimetrów) a mniejsze częstotliwości (od 5 Hz do 50 Hz). Natomiast nagniatanie wibracyjne na wibratorach dynamicznych prowadzone jest przy mniejszych amplitudach i większych częstotliwościach. Wysokość „wsadu” elementów nagniatających, którą należy rozumieć jako odległość od górnej powierzchni nagniatanych przedmiotów (zamocowanych do dolnej płyty komory roboczej) do górnej powierzchni wsypanych elementów nagniatających, wynosi zwykle kilkadziesiąt milimetrów. Czas nagniatania przyjmowany jest od kilku do kilkudziesięciu minut.

Parametry technologiczne nagniatania wibracyjnego powinny być tak dobrane, aby maksymalne przyspieszenie komory roboczej było znacznie większe od przyspieszenia ziemskiego. Spełnienie tego warunku umożliwia „odrywanie się” elementów nagniatających od dolnej powierzchni komory i następnie zderzenie się tych elementów z obrabianymi przedmiotami. Podczas NDRW wsad luźnych elementów nagniatających powinien wypełniać całą przestrzeń komory roboczej, co zapewnia równomierność pokrycia śladami uderzeń całej obrabianej powierzchni.

4.2.2. Właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów nagniatanych wibracyjnie

Elementami nagniatającymi w nagniataniu wibracyjnym są, na ogół, stalowe kulki o małej chropowatości powierzchni i o większej, w porównaniu z nagniataniem strumieniowym, średnicy, a zatem, również masie. Natomiast prędkość uderzenia elementów nagniatających w obrabianą powierzchnię podczas nagniatania wibracyjnego jest mniejsza niż w nagniataniu strumieniowym. Różnice te mają pewien wpływ na kształtowaną w procesie nagniatania warstwę wierzchnią obrabianych przedmiotów.

Na rys. 4.13 przedstawiono topografię powierzchni stali 30HGSA po nagniataniu wibracyjnym (b) oraz, dla porównania, po poprzedzającym je szlifowaniu (a). Na powierzchni szlifowanej widoczne są wyraźne, wzdłużne ślady przemieszczających się ziaren ściernicy, natomiast na powierzchni nagniatanej można zauważyć wgłębienia spowodowane uderzeniami elementów nagniatających, w sposób nieuporządkowany rozmieszczone na obrabianej powierzchni. W wyniku nagniatania uzyskano ponad dwukrotne zmniejszenie wysokości chropowatości powierzchni.



Rys. 4.13. Topografia powierzchni stali 30HGSA po szlifowaniu (a) oraz po nagniataniu wibracyjnym (b) [189]

Znaczny wpływ na właściwości warstwy wierzchniej mają parametry technologiczne NDRW. Wpływ parametrów nagniatania wibracyjnego na parametr R_a chropowatości powierzchni oraz stopień umocnienia WW można przedstawić na podstawie badań przeprowadzonych na stali 30HGSA ulepszonej cieplnie do twardości $(36 \div 38)$ HRC [183]. Badania przeprowadzono według planu statycznego zdeterminowanego rotatabilnego drugiego rzędu [70, 123]. Jako parametry zmienne procesu przyjęto amplitudę oraz częstotliwość drgań wibratora, średnicę kulek (elementów nagniatających) oraz czas nagniatania. W badaniach parametru R_a funkcję obiektu badań otrzymano w następującej postaci [183]:

$$Ra = 1,576u_{R1} - 0,211u_{R2}a - 0,036u_{R3}v + 0,069u_{R4}D - 0,0028u_{R5}t + 0,0068u_{R6}a^2 - 0,0024u_{R7}D^2 + 0,00022u_{R8}t^2 + 0,0026u_{R9}av + 0,0012u_{R10}vD - 0,0013u_{R11}vt, \mu m, (4.2)$$

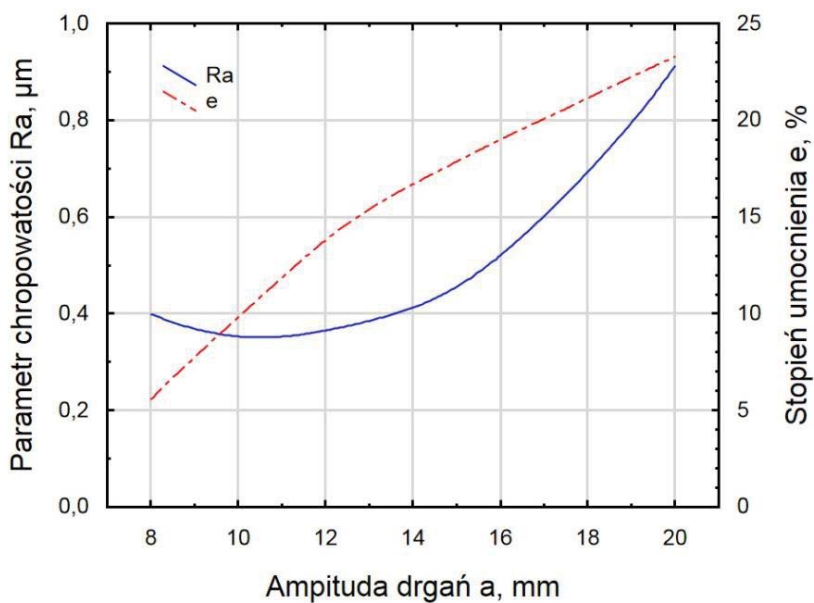
gdzie: Ra , μm – średnia rzędnych profilu chropowatości; a , mm – amplituda drgań wibratora; v , Hz – częstotliwość drgań wibratora; D , mm – średnica elementów nagniatających; t , min – czas nagniatania; współczynniki: $u_{R1} = 1\mu m$, $u_{R2} = 1 \mu m/mm$, $u_{R3} = 1 \mu m/s$, $u_{R4} = 1 \mu m/mm$, $u_{R5} = 1 \mu m/min$, $u_{R6} = 1 \mu m/mm^2$, $u_{R7} = 1 \mu m/mm^2$, $u_{R8} = 1 \mu m/min^2$, $u_{R9} = 1 \mu m/s/mm$, $u_{R10} = 1 \mu m/s/mm$, $u_{R11} = 1 \mu m/s/min$.

Natomiast w badaniach stopnia umocnienia warstwy wierzchniej obliczona funkcja obiektu badań ma postać [183]:

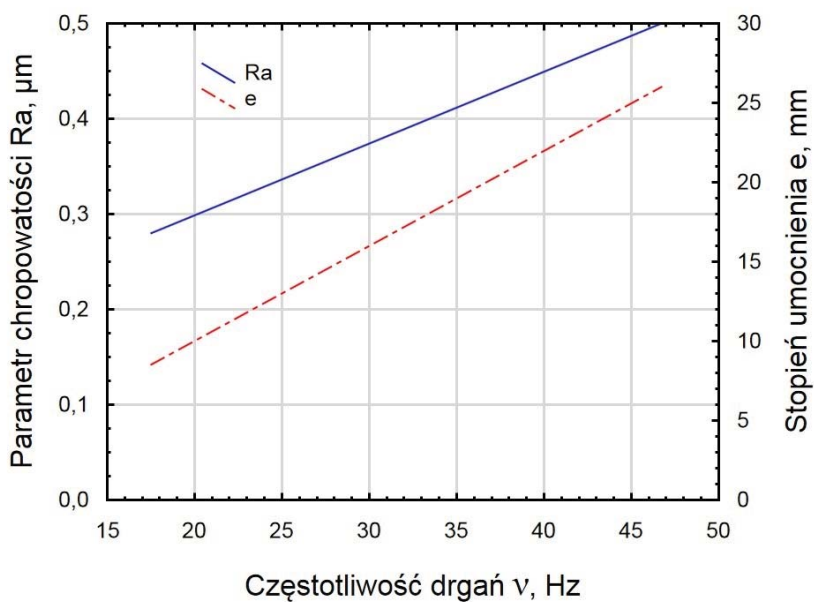
$$e = -99,33u_{e1} + 4,45u_{e2}a + 2,01u_{e3}v + 5,12u_{e4}D + 1,29u_{e5}t - 0,054u_{e6}a^2 - 0,218u_{e7}D^2 - 0,010u_{e8}t^2 - 0,059u_{e9}av - 0,029u_{e10}vD - 0,019u_{e11}vt, \% (4.3)$$

gdzie: e , $\%$ – stopień umocnienia WW; współczynniki: $u_{e1} = 1\%$, $u_{e2} = 1 \%/mm$, $u_{e3} = 1 \%/s$, $u_{e4} = 1 \%/mm$, $u_{e5} = 1 \%/min$, $u_{e6} = 1 \%/mm^2$, $u_{e7} = 1 \%/mm^2$, $u_{e8} = 1 \%/min^2$, $u_{e9} = 1 \%/s/mm$, $u_{e10} = 1 \%/s/mm$, $u_{e11} = 1 \%/s/min$, pozostałe oznaczenia – jak we wzorze (4.1).

Na rys. 4.14 – 4.17 pokazano jednoparametryczne przekroje funkcji (4.2) i (4.3). Z przedstawionych wykresów wynika, że parametry technologiczne NDRW mają wpływ zarówno na chropowatość powierzchni jak i stopień umocnienia warstwy wierzchniej.



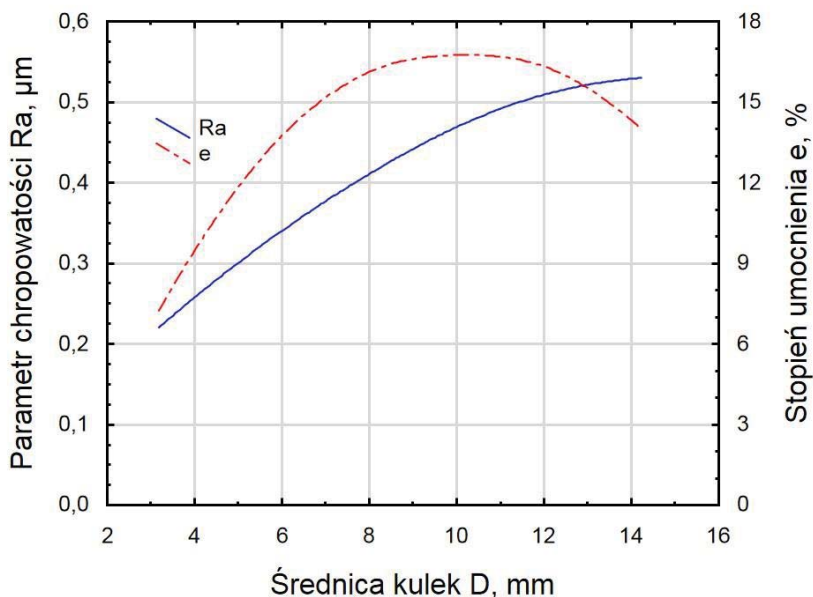
Rys. 4.14. Wpływ amplitudy drgań wibratora na chropowość powierzchni oraz stopień umocnienia WW ($\nu = 24,8$ Hz; $D = 8,702$ mm; $t = 21$ min) [183]



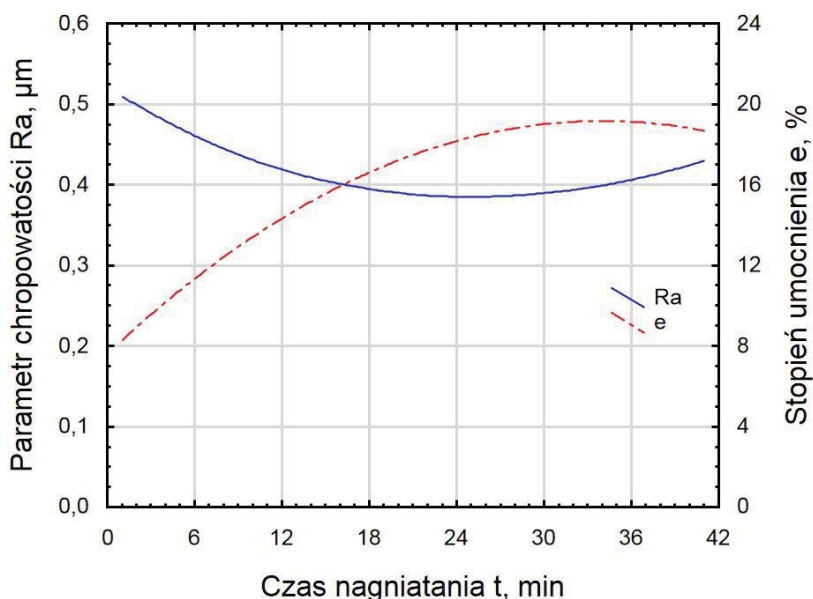
Rys. 4.15. Wpływ częstotliwości drgań wibratora na chropowość powierzchni oraz stopień umocnienia WW ($a = 14$ mm; $D = 8,702$ mm; $t = 21$ min) [183]

Ze wzrostem amplitudy drgań wibratora zwiększa się średnia rzędnych profilu chropowatości R_a (rys. 4.14), co można wyjaśnić wzrostem energii uderzenia elementów nagniatających w obrabiane przedmioty i „wybijaniem” większych wgłębień w obrabianej powierzchni. W zakresie małych wartości amplitudy widoczne jest zmniejszanie się parametru R_a w miarę wzrostu amplitudy, co można wytłumaczyć w taki sposób, że nagniatanie z małą energią uderzenia nie wyrównuje mikronierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej nagniatanie. Zwiększająca się ze wzrostem amplitudy energia uderzenia wpływa też na wzrost stopnia umocnienia warstwy wierzchniej [183].

Ze wzrostem częstotliwości drgań następuje zwiększenie energii uderzenia ale również gęstości uderzeń w jednostce czasu nagniatania, czym można tłumaczyć zwiększenie stopnia umocnienia WW (rys. 4.15). Wzrost chropowatości powierzchni świadczy o tym, że decydujący wpływ na chropowatość ma energia uderzenia [183].



Rys. 4.16. Wpływ średnicy kulek nagniatających na chropowatość powierzchni oraz stopień umocnienia WW ($a = 14$ mm, $\nu = 24,8$ Hz; $t = 21$ min) [183]



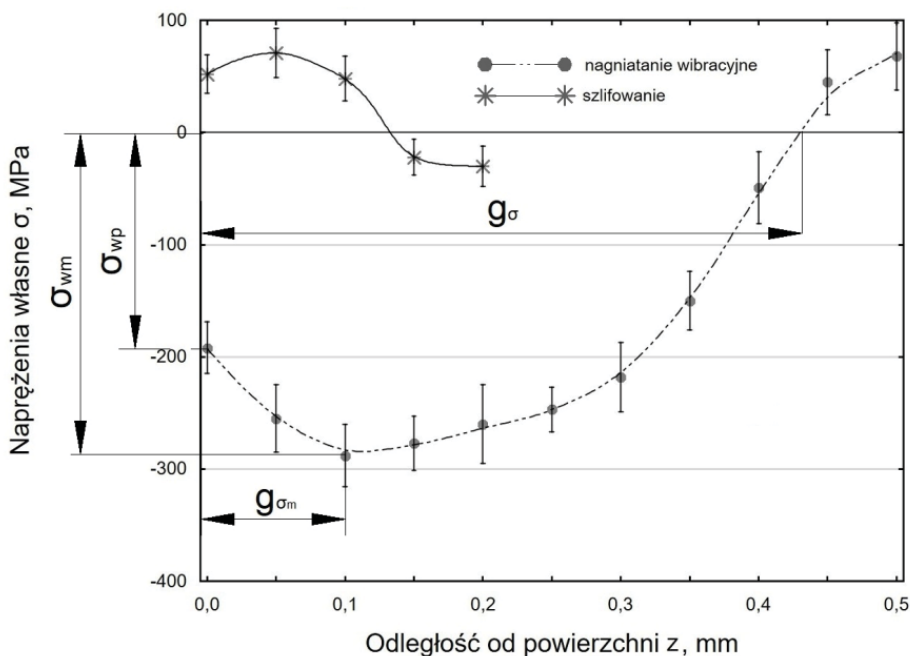
Rys. 4.17. Wpływ czasu nagniatania na chropowatość powierzchni oraz stopień umocnienia WW ($a = 14 \text{ mm}$, $\nu = 32,1 \text{ Hz}$; $D = 5,953 \text{ mm}$) [183]

Ze wzrostem średnicy kulek zwiększa się energia uderzenia i promień krzywizny elementu oddziałującego na obrabianą powierzchnię, natomiast zmniejsza się gęstość uderzeń. Z rys. 4.16 wynika, że zwiększanie średnicy kulek nagniatających przyczynia się do wzrostu parametru Ra, co świadczy o tym, że decydujący wpływ ma energia uderzenia i gęstość uderzeń. Natomiast krzywa obrazująca wpływ średnicy kulek na stopień umocnienia WW charakteryzuje się występowaniem wartości maksymalnej, z czego wynika, że w przypadku stosowania mniejszych kulek czynnikiem decydującym o umocnieniu WW jest energia uderzenia, natomiast dla większych kulek zwiększa się rola gęstości uderzeń i promienia krzywizny elementu nagniatającego [183].

Ze wzrostem czasu nagniatania (rys. 4.17) następuje zmniejszanie chropowatości powierzchni, natomiast stopień umocnienia WW zwiększa się, co można uzasadnić zwiększającą się gęstością uderzeń. W miarę wydłużania czasu obróbki następuje stan nasycenia i zmiany zarówno parametru Ra jak i stopnia umocnienia WW są niewielkie [183].

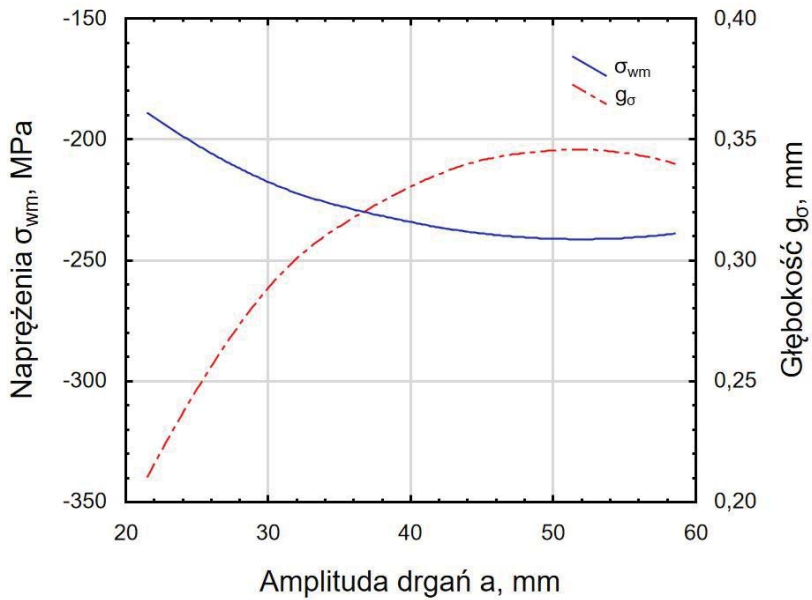
Po nagniataniu w warstwie wierzchniej obrabianych przedmiotów kształtowane są ścisające naprężenia własne. Rozkład naprężeń własnych w próbkach ze stali C45 po NDRW przedstawiono na rys. 4.18 (dla porównania zamieszczono też rozkład naprężeń własnych po szlifowaniu, które poprzedzało nagniatanie vibracyjne). Stosowano następujące parametry nagniatania: amplituda drgań wibratora $a = 58 \text{ mm}$, częstotliwość drgań $\nu = 7 \text{ Hz}$, średnica kulek $D = 6 \text{ mm}$,

czas nagniatania $t = 15$ min. Przedstawiony wykres obrazuje typowy rozkład naprężeń własnych po nagniataniu (naprężenia mierzono metodą mechaniczną). W warstwie wierzchniej występują ściskające naprężenia własne, które na głębokości g_{σ} przechodzą w naprężenia rozciągające. Maksymalne, co do wartości bezwzględnej, ściskające naprężenia własne σ_{wm} występują w odległości $g_{\sigma m}$ od nagniatanej powierzchni. Naprężenia własne bezpośrednio pod powierzchnią σ_{wp} mają mniejszą wartość (bezwzględną) od wartości maksymalnej tych naprężeń. Przed nagniataniem w próbkach występowały niewielkie rozciągające naprężenia własne, które zostały ukształtowane podczas szlifowania.

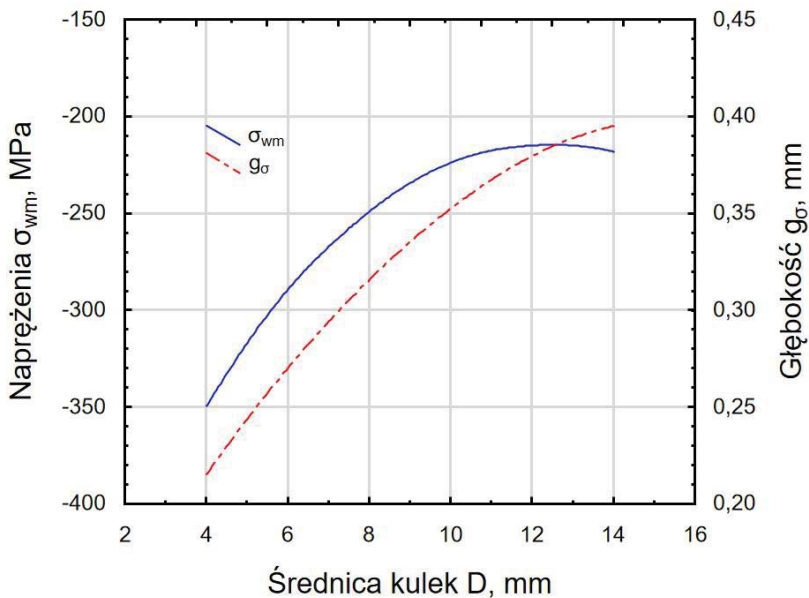


Rys. 4.18. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stali C45 po nagniataniu wibracyjnym

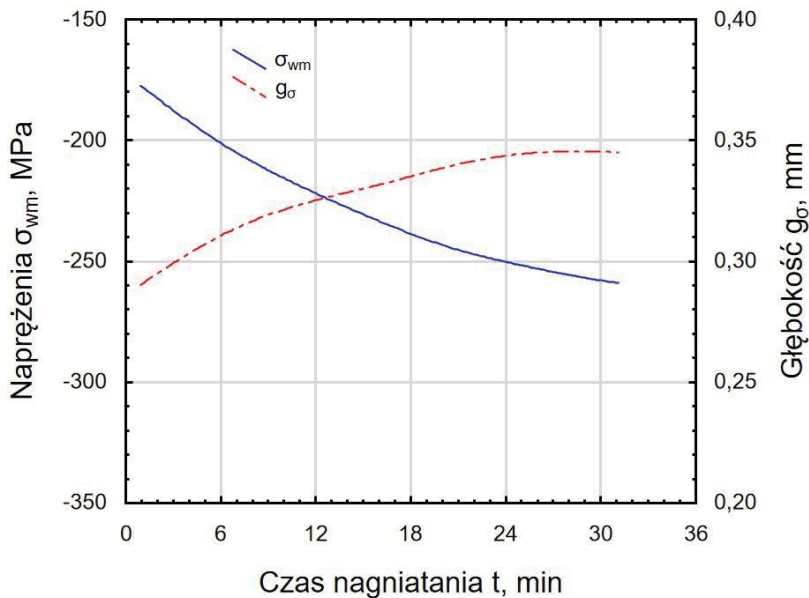
Wpływ parametrów nagniatania wibracyjnego na rozkład naprężeń własnych w WW stopu tytanu Ti6Al2Mo2Cr (według norm rosyjskich WT3-1) przedstawiono na rys 4.19 ÷ 4.21. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi rozkład naprężeń własnych są ściskające naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej σ_{wm} oraz głębokość występowania ściskających naprężeń własnych g_{σ} . Jako zmienne parametry nagniatania wibracyjnego przyjęto amplitudę drgań wibratora, średnicę kulek nagniatających i czas nagniatania (nie zmieniano częstotliwości drgań wibratora) [186].



Rys. 4.19. Wpływ amplitudy drgań wibratora na ściskające naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej σ_{wm} oraz głębokość występowania ściskających naprężeń własnych g_σ ($\nu = 7$ Hz; $D = 9$ mm; $t = 16$ min) [186]



Rys. 4.20. Wpływ średnicy kulek nagniatających na ściskające naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej σ_{wm} oraz głębokość występowania ściskających naprężeń własnych g_σ ($a = 40$ mm, $\nu = 7$ Hz; $t = 16$ min) [186]



Rys. 4.21. Wpływ czasu nagniatania na ściskające naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej σ_{wm} oraz głębokość występowania ściskających naprężeń własnych g_σ ($a = 40$ mm, $\nu = 7$ Hz; $D = 9$ mm) [186]

Maksymalne, co do wartości bezwzględnej, naprężenia własne wyraźnie zwiększają się ze wzrostem amplitudy drgań (rys. 4.19) jak i czasu nagniatania (rys. 4.21). Zatem wartość bezwzględna naprężeń σ_{wm} wzrasta w miarę zwiększania energii uderzenia, zależnej od amplitudy drgań, jak i od gęstości uderzeń, zależnej od czasu nagniatania. Ze wzrostem średnicy kulek wartość bezwzględna σ_{wm} zmniejsza się (rys. 4.20) (mimo wzrostu energii uderzenia), co można uzasadnić mniejszą liczbą uderzeń na jednostkę powierzchni w jednostce czasu i wzrostem promienia krzywizny elementu nagniatającego.

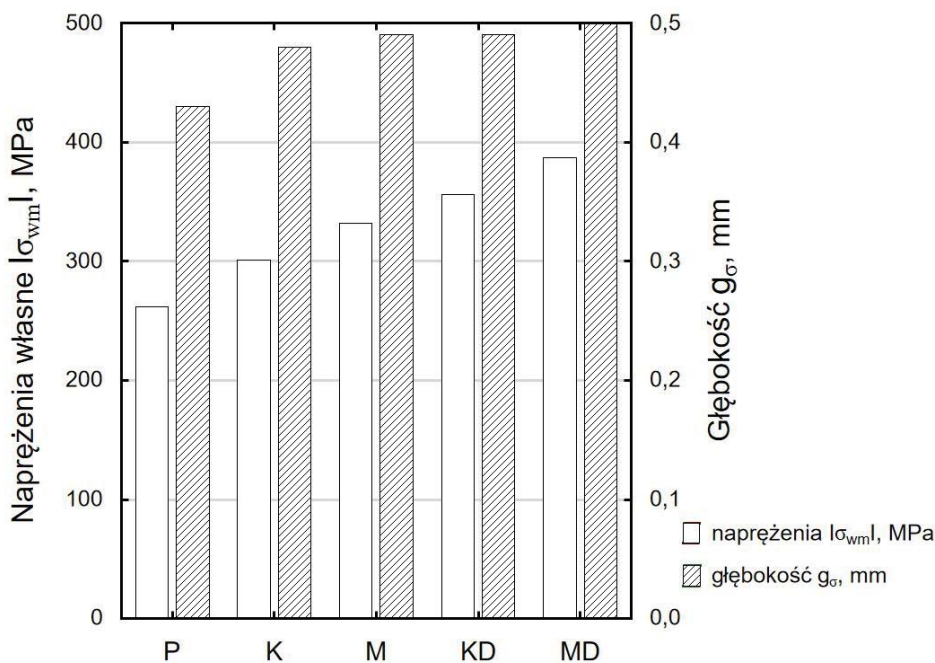
Głębokość występowania ściskających naprężeń własnych g_σ zwiększa się ze wzrostem wszystkich analizowanych parametrów NDRW. W największym stopniu na głębokość g_σ wpływa średnica kulek, a w najmniejszym – czas nagniatania.

Dynamika zmian zarówno naprężeń σ_{wm} jak i głębokości g_σ jest większa w zakresie małych wartości parametrów nagniatania wibracyjnego.

Podczas nagniatania wibracyjnego ściskające naprężenia własne kształtowane są również w warstwie wierzchniej innych materiałów. Po NDRW stopu aluminium EN AW – 2024 otrzymano ściskające naprężenia własne, których wartości bezwzględne były mniejsze w porównaniu z naprężeniami własnymi w stopie tytanu Ti6Al2Mo2Cr (σ_{wm} zmieniało się w granicach od -40 MPa do

-130 MPa, w zależności od parametrów technologicznych nagniatania). Natomiast głębokość występowania ściskających naprężeń własnych g_{σ} jest większa w porównaniu ze stopem tytanu i wynosi $(0,32 \div 0,70)$ mm. Ściskające naprężenia własne bezpośrednio pod obrabianą powierzchnią σ_{wp} są mniejsze, co do wartości bezwzględnej, od naprężeń σ_{wm} o $(20 \div 50)\%$. Naprężenia σ_{wm} występują na głębokości $g_{\sigma m} = (0,1 \div 0,3)$ mm [177].

Naprężenia własne po nagniataniu wibracyjnym zależą też od ośrodka, w którym obróbka jest prowadzona. Na rys. 4.22 przedstawiono wpływ cieczy obróbkowej na ściskające naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej (σ_{wm}) oraz na głębokość występowania ściskających naprężeń własnych (g_{σ}). Nagniatanie próbek ze stali C45 prowadzono w środowisku następujących cieczy powierzchniowo aktywnych: 10 – procentowego roztworu kauczuku w benzenie oraz 5 – procentowego roztworu polimetakrylanu metylu w benzenie. W celu otrzymania wolnych rodników przygotowano roztwory poddano procesowi destrukcji na dezintegratorze ultradźwiękowym (moc na koncentratorze – 320 W, czas trwania procesu – 10 min).

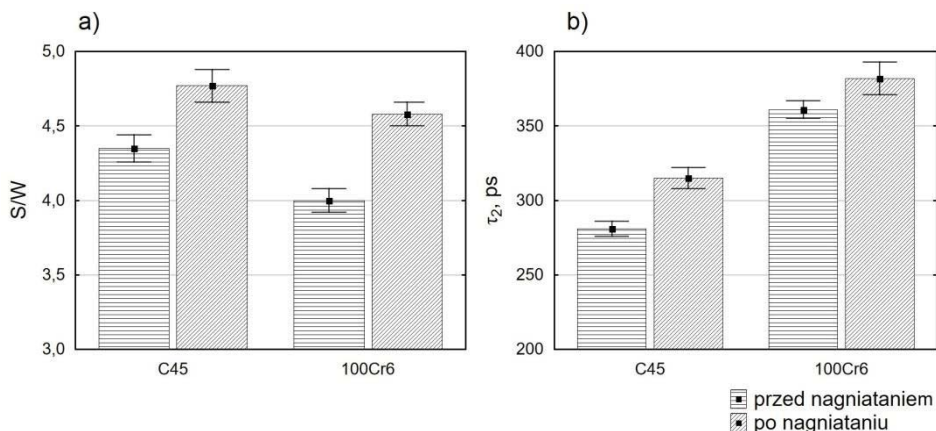


Rys. 4.22. Wpływ cieczy powierzchniowo aktywnych na maksymalną wartość bezwzględną oraz głębokość zalegania ściskających naprężeń własnych po nagniataniu wibracyjnym stali C45 (P – powietrze, K – roztwór kauczuku, M – roztwór polimetakrylanu metylu, KD – roztwór kauczuku poddany destrukcji, MD – roztwór polimetakrylanu metylu poddany destrukcji)

Widoczny jest wzrost wartości bezwzględnej ściskających naprężeń σ_{wm} w warstwie wierzchniej próbek nagniatanych w ośrodkach powierzchniowo aktywnych w porównaniu z próbkami nagniatanymi w powietrzu („na sucho”). W przypadku roztworu kauczuku wzrost ten wyniósł 15%, a dla roztworu poli-metakrylanu metylu – 27%. Zastosowanie cieczy powierzchniowo aktywnych poddanych procesowi destrukcji mechanicznej powoduje dalsze zwiększanie naprężeń $|\sigma_{wm}|$. Obecność cieczy powierzchniowo aktywnych w strefie nagniatania wibracyjnego wpływa też na niewielkie zwiększenie głębokości występowania ściskających naprężeń własnych [118].

4.2.3. Badania efektów nagniatania wibracyjnego technikami anihilacyjnymi

Nagniatanie wibracyjne wpływa na wartości parametrów charakteryzujących przebieg anihilacji pozytonów. Wyniki badań wpływu nagniatania wibracyjnego stali C45 oraz 100Cr6 na wskaźnik S/W, wyrażający stosunek liczby zliczeń kwantów promieniowania gamma w części centralnej do liczby zliczeń w częściach skrzydłowych krzywej rozkładu kątownego oraz na średni czas życia pozytonów τ_2 pochodzący od anihilacji pozytonów spuląpkowanych w skupiskach defektów (podrozdział 2.6) przedstawiono na rys. 4.23.



Rys. 4.23. Wpływ nagniatania wibracyjnego stali C45 i 100Cr6 na wskaźnik S/W (a) oraz średni czas życia pozytonów (b) [205]

Nagniatanie wibracyjne kulkami o średnicy 6 mm w czasie 10 minut spowodowało zwiększenie wskaźnika S/W o około 10% dla stali C45 oraz o 15% dla stali 100Cr6. Świadczy to o większej gęstości defektów struktury krystalicznej w warstwie wierzchniej nagniatanych próbek. Wskutek nagniatania nastąpiło też zwiększenie średniego czasu życia pozytonów τ_2 (składowej długożyciowej), które wyniosło około 12% dla stali C45 i 6% dla stali 100Cr6. Na podstawie

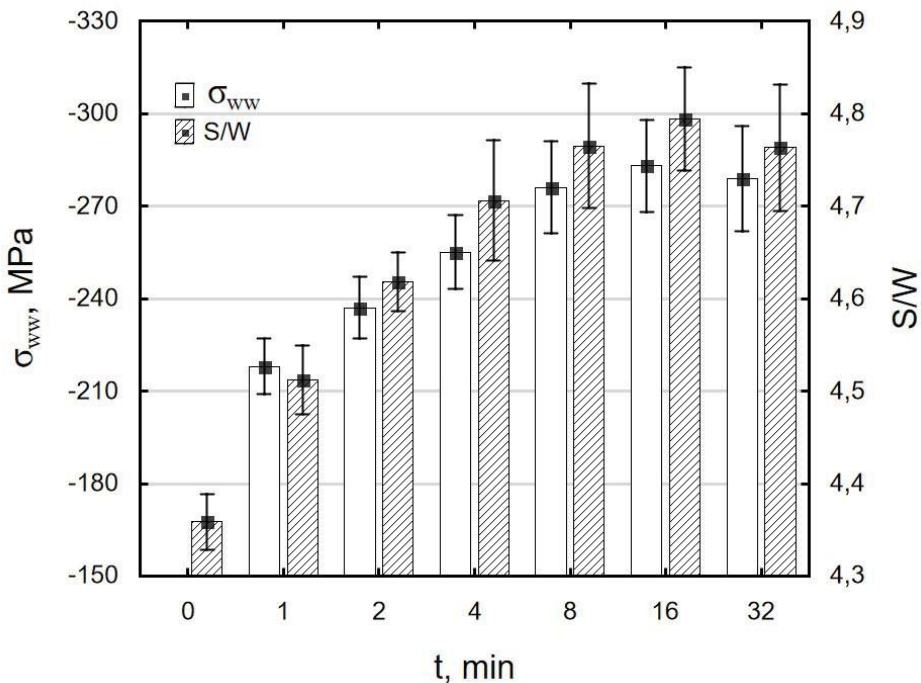
zmian wskaźnika τ_2 można przypuszczać, że nagniatanie powoduje wzrost rozmiarów defektów struktury krystalicznej w WW badanych stali [205].

Na rys. 4.24 przedstawiono wpływ czasu nagniatania wibracyjnego stali C45 w stanie wyżarzonym na wskaźnik S/W anihilacji pozytonów i średnią ważoną naprężeń własnych σ_{ww} , którą wprowadzono ze względu na zmniejszanie się liczby anihilujących pozytonów w miarę wzrostu odległości od powierzchni. Warstwę materiału, do której przenikają pozytony (o grubości dziesiątych milimetra), podzielono umownie na n stref o jednakowej grubości. Średnią ważoną naprężeń własnych wyrażono jako:

$$\sigma_{ww} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma_{wi}}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (4.4)$$

gdzie: N_i – liczba pozytonów anihilujących w i -tej strefie,

σ_{wi} – wartość średnia naprężeń własnych w i -tej strefie.



Rys. 4.24. Wpływ czasu nagniatania wibracyjnego stali C45 na wartość wskaźnika S/W oraz średnią ważoną naprężeń własnych [209]

Z przedstawionego na rys. 4.24 wykresu wynika, że w zakresie mniejszych wartości czasu nagniatania (do około 8 minut) wartość wskaźnika S/W wyraźnie zwiększa się w miarę wzrostu czasu nagniatania, natomiast dla większych war-

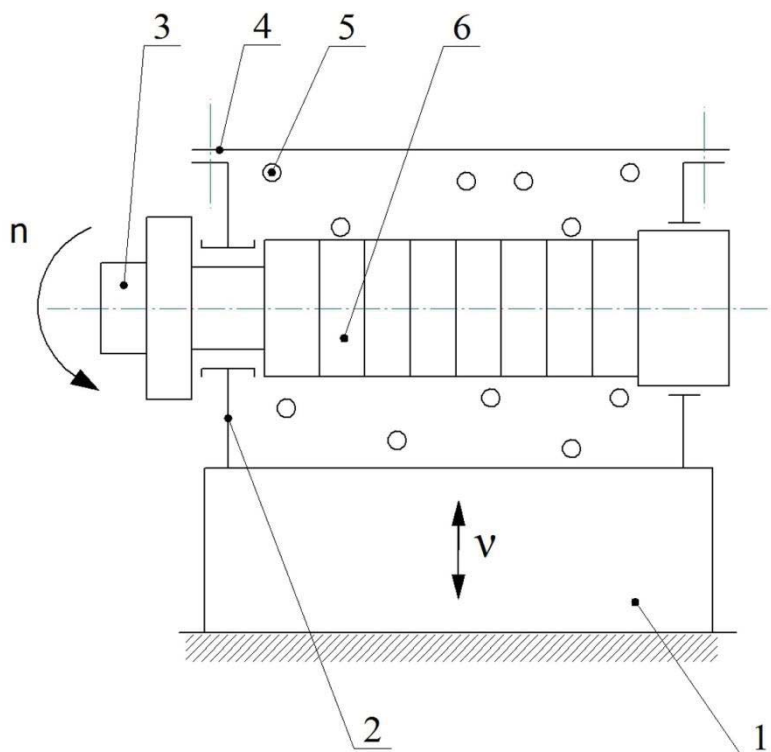
tości czasu ustala się na poziomie około 4,75. Podobnie wzrost czasu nagniatania wpływa na średnią ważoną naprężeń własnych, która dla większych wartości czasu stabilizuje się na poziomie około -280 MPa.

Wzrost czasu nagniatania wpływa też na średni czas życia pozytonów oraz natężenie składowej długożyciowej. Z zależności tych wynika, że w czasie nagniatania może następować przemieszczanie się defektów struktury krystalicznej w głąb materiału [208].

Technikami anihilacyjnymi można oceniać skutki nagniatania również innych materiałów, np. stali C15, stopu aluminium EN AW-7075, stopu tytanu Ti6Al2Mo2Cr, natomiast metoda ta nie jest skuteczna w przypadku nagniatania wibracyjnego stali 16MnCr5 nawęglanej [207, 208].

4.2.4. Nagniatanie wibracyjno-rotacyjne

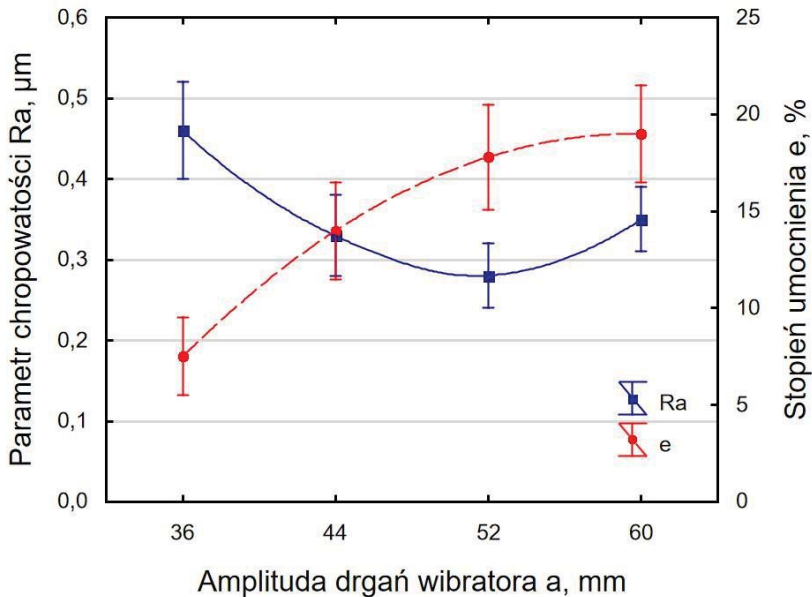
Nagniatanie dynamiczne przedmiotów wymagających umocnienia warstwy wierzchniej na całym obwodzie może być przeprowadzone metodą wibracyjno-rotacyjną, która schematycznie została przedstawiona na rys. 4.25. Nagniatane



Rys. 4.25. Schemat nagniatania wibracyjno-rotacyjnego: 1 – wibrator, 2 – komora robocza, 3 – trzpień obrotowy, 4 – pokrywa, 5 – element nagniatający, 6 – obrabiany przedmiot

przedmioty 6 mocowane są na obracającym się z prędkością n trzpieniu 3, który ułożyskowany jest w ściankach komory roboczej 2. Komora robocza wprawiana jest w ruch drgający z częstotliwością v przez wibrator 1. Po zdjęciu pokrywy 4 do komory roboczej wsypywane są elementy nagniatające 5. Wskutek drgań komory roboczej elementy nagniatające 5 zderzają się z zewnętrznymi powierzchniami obrabianych przedmiotów 6. Równomierność nagniatania na całej powierzchni przedmiotów zapewnia ruch obrotowy trzpienia.

Wpływ amplitudy drgań wibratora na chropowatość powierzchni oraz stopień umocnienia WW próbek ze stopu tytanu Ti6Al2Mo2Cr nagniatanych metodą wibracyjno-rotacyjną kulkami stalowymi o średnicy 6 mm w czasie 10 minut przedstawiono na rys. 4.26. Próbki w kształcie pierścieni mocowano na trzpieniu, który w czasie nagniatania obracał się z prędkością 2 obr/min [206].



Rys. 4.26. Wpływ amplitudy drgań wibratora na chropowatość powierzchni oraz stopień umocnienia WW próbek ze stopu tytanu Ti6Al2Mo2Cr po nagniataniu wibracyjno-rotacyjnym [206]

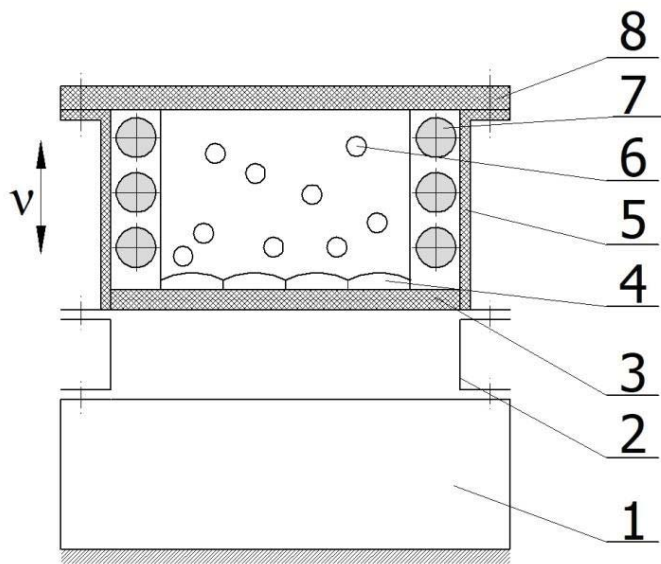
W wyniku nagniatania wibracyjno-rotacyjnego uzyskano ponad dwukrotne zmniejszenie chropowatości powierzchni (przed nagniataniem parametr $R_a = 0,88 \div 1,23 \mu\text{m}$). O chropowatości powierzchni po nagniataniu wibracyjno-rotacyjnym decydują dwa czynniki: wyrównywanie mikronierówności po obróbce poprzedzającej oraz wgłębienia powstające wskutek uderzeń elementów nagniatających. W zakresie mniejszych wartości amplitudy większe znaczenie ma pierwszy z wymienionych czynników, a w miarę wzrostu amplitudy zwiększa się znaczenie drugiego czynnika. Korzystnie na chropowatość powierzchni

wpływa też zmieniający się kąt uderzenia elementów nagniatających w obrabianą powierzchnię wskutek ruchu obrotowego obrabianych przedmiotów. Wzrost energii uderzenia, towarzyszący zwiększaniu amplitudy drgań, wpływa na wzrost stopnia umocnienia WW obrabianych przedmiotów.

Efekt wyrównywania mikronierówności i wygładzania powierzchni bardziej jest widoczny podczas nagniatania wibracyjno-rotacyjnego materiałów o większej twardości, gdy odciski uderzających kulek są mniejsze. Po 20 minutach nagniatania stali w stanie zahartowanym uzyskano chropowatość powierzchni $Ra = (0,06 \div 0,11) \mu\text{m}$, przy czym na wartość tej chropowatości nie miała znaczącego wpływu chropowatość przed nagniataniem, zmieniająca się w granicach $Ra = (0,2 \div 1,03) \mu\text{m}$ [202].

4.2.5. Nagniatanie wibracyjne w podwyższonej temperaturze

Umocnienie warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów można zwiększyć poprzez przeprowadzenie tej obróbki w podwyższonej temperaturze [115]. Schemat stanowiska do nagniatania wibracyjnego w podwyższonej temperaturze przedstawiono na rys. 4.27.



Rys. 4.27. Schemat nagniatania wibracyjnego w podwyższonej temperaturze: 1 – wibrator, 2 – wspornik, 3 – warstwa izolacyjna, 4 – nagniatany przedmiot, 5 – komora robocza, 6 – element nagniatający, 7 – element grzejny, 8 – pokrywa górną

Do nagrzewania komory roboczej 5 zastosowano elementy grzejne 7, które zamontowano w ściankach bocznych tej komory. W celu zabezpieczenia wibratora 1 przed nagrzewaniem się, komorę połączono z wibratorem za pomocą

wsporników 2, a ponadto wprowadzono warstwę izolacyjną 3. Warstwę izolacyjną zastosowano również w ściankach komory oraz w pokrywie 8 w celu zmniejszenia strat ciepła. Wzrost temperatury obrabianych przedmiotów 4 wpływa na ich uplastycznienie i wzrost umocnienia warstwy wierzchniej wskutek uderzeń elementów nagniatających 6. Stanowisko wyposażone jest w automatyczny układ sterujący, który umożliwia utrzymanie wymaganej temperatury w komorze roboczej.

Wpływ temperatury nagniatania na wybrane właściwości warstwy wierzchniej można podać na przykładzie próbek ze stali C45. Próbki te po nagniataniu w temperaturze 340°C kulkami o średnicy 12,3 mm wykonanymi ze stali szybkokotnącej HS18-1 charakteryzowały się większym stopniem umocnienia WW ale mniejszymi, co do wartości bezwzględnej, ściskającymi naprężeniami własnymi, w porównaniu do próbek nagniatanych w temperaturze 20°C [115].

4.3. Kontrolowane nagniatanie dynamiczne rozproszone

4.3.1. Metoda kontrolowanego nagniatania dynamicznego rozproszonego

Podczas nagniatania zarówno strumieniowego jak i wibracyjnego elementy nagniatające uderzają nie tylko w obrabiany przedmiot, ale również w ścianki ograniczające przestrzeń obróbkową, a także zderzają się ze sobą, wytracając część energii. W wyniku tych zderzeń następuje zmiana prędkości i kierunku ruchu poszczególnych elementów nagniatających. W tych warunkach elementy nagniatające w chwili uderzenia w obrabianą powierzchnię mają różną (nieznaną) prędkość, a zatem różna jest energia uderzenia. Nieznany jest również tor, po którym poruszają się poszczególne elementy nagniatające. Wynika stąd, że nie można określić położenia odcisków na obrabianej powierzchni spowodowanych uderzeniami poszczególnych elementów nagniatających. W początkowej fazie obróbki odległości pomiędzy sąsiednimi odciskami są większe od ich wymiarów (w przypadku jednocześnie uderzających elementów nagniatających w kształcie kuli, odległość między odciskami jest nie mniejsza od średnicy tej kuli). Kolejność powstawania odcisków jest przypadkowa. Ze wzrostem czasu nagniatania odciski zagęszczają się, pokrywając całą nagniataną powierzchnię.

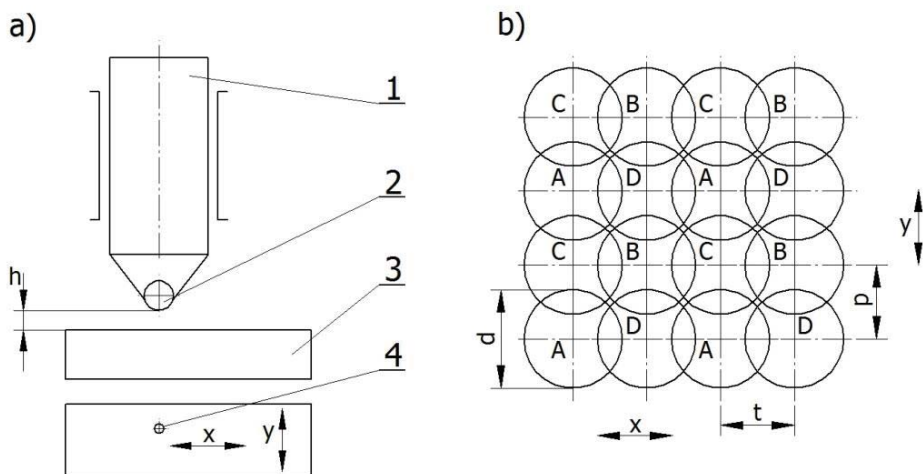
Kontrolowane nagniatanie dynamiczne rozproszone (KNDR)² umożliwia przeprowadzenie nagniatania rozproszonego przy znanej energii uderzenia elementów nagniatających w obrabianą powierzchnię oraz topografii odcisków powstających podczas tych uderzeń [199, 192].

Przebieg procesu kontrolowanego nagniatania rozproszonego przedstawiono na rys. 4.28. Suwak 1, który jest zakończony kulką 2, uderza w obrabiany przedmiot 3. Energię uderzenia można łatwo obliczyć znając masę suwaka wraz

² Nazywane także fizycznym modelowaniem dynamicznego nagniatania rozproszonego (FMDNR).

z kulka oraz wysokość h , z jakiej suwak spada na obrabianą powierzchnię. W wyniku uderzenia na obrabianej powierzchni powstają odciski 4. Obrabiany przedmiot przemieszcza się w kierunku osi x oraz y , przy czym prędkości tych ruchów są tak dobierane w stosunku do częstotliwości uderzeń suwaka, aby w pierwszej fazie obróbki odległości między środkami odcisków były większe od ich średnicy. W kolejnych fazach następuje zagęszczanie odcisków tak, aby pokryły całą obrabianą powierzchnię (może być pokrycie wielokrotne). Przykładową kolejność nanoszenia odcisków pokazano na rys. 4.28b. W pierwszej fazie powstają odciski oznaczone literą „A”. Odległości między środkami sąsiednich odcisków „A” są krotnością podziałki p oraz t . W kolejnych fazach następuje nanoszenie odcisków oznaczonych literami „B”, „C” oraz „D”. Gęstość uderzeń można wyznaczyć z zależności:

$$j = \frac{1}{pt} \quad (4.5)$$



Rys. 4.28. Schemat kontrolowanego nagniatania dynamicznego rozproszonego: a) kinematyka, b) kolejność nanoszenia odcisków (1 – suwak, 2 – kulka nagniatająca, 3 – obrabiany przedmiot, 4 – odcisk)

W obróbce nagniataniem dynamicznym rozproszonym (strumieniowym i wi-bracyjnym) ze względu na „nieuporządkowany” charakter ruchu elementów nagniatających, efekty nagniatania (właściwości WW, cechy użytkowe obrabia-nych przedmiotów) ocenia się tylko w funkcji parametrów urządzeń technolo-gicznych, takich jak prędkość obrotowa wirnika, ciśnienie powietrza, amplituda i częstotliwość drgań wibratora itp. Kontrolowane nagniatanie dynamiczne roz-proszone umożliwia przeprowadzenie obróbki w warunkach odpowiadających warunkom nagniatania dynamicznego rozproszonego, ale z zachowaniem kon-troli ruchu elementów nagniatających. Zatem zastosowanie KNDR pozwala na

ocenę efektów nagniatania w funkcji takich parametrów procesu jak energia uderzenia czy gęstość uderzeń elementów nagniatających [169, 196, 201, 203].

4.3.2. Wpływ energii uderzenia i gęstości uderzeń na chropowatość powierzchni

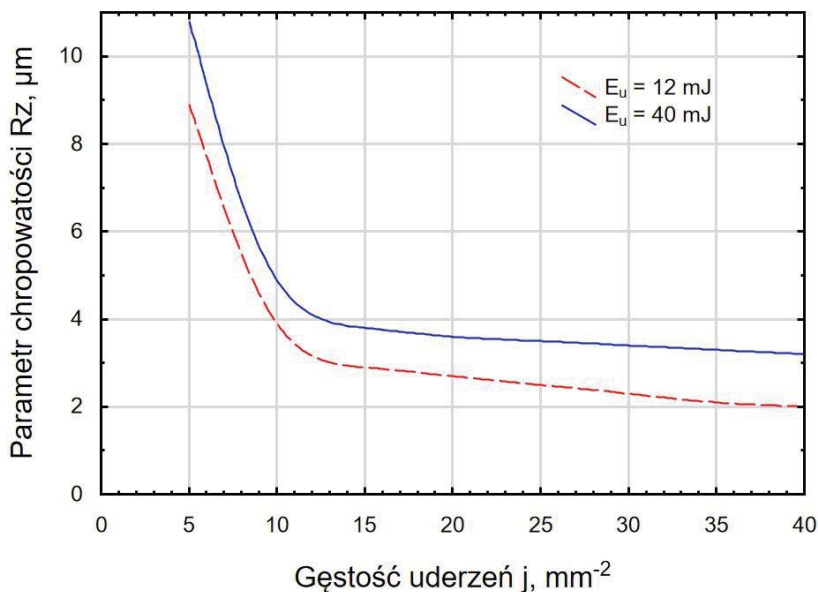
Największa wysokość profilu chropowatości Rz po kontrolowanym nagniataniu dynamicznym rozproszonym jest znacznie mniejsza od głębokości pojedynczego odcisku, powstającego na obrabianej powierzchni po uderzeniu elementem nagniatającym z energią równą energii uderzenia stosowanej podczas nagniatania. Parametr chropowatości Rz zmniejsza się w miarę zwiększania stopnia pokrycia K_o , przy czym w zakresie większych wartości K_o zmiany Rz są mniejsze [169, 172, 173].

Różnice między wartością parametru Rz a głębokością pojedynczego odcisku można uzasadnić następująco:

- 1) ze wzrostem stopnia pokrycia zwiększa się twardość warstwy wierzchniej obrabianego materiału, co wpływa na zmniejszenie głębokości „wybijanych” odcisków,
- 2) znaczna część energii uderzających elementów nagniatających zużywana jest na wyrównywanie wzniesień mikronierówności powstających na obrabianej powierzchni wskutek wcześniejszych uderzeń elementu nagniatającego [169, 172, 173].

Stopień pokrycia powierzchni związany jest z gęstością uderzeń elementu nagniatającego (wzór (2.1) w rozdziale 2). Na rys. 4.29 przedstawiono wpływ gęstości uderzeń na największą wysokość profilu chropowatości Rz dla dwóch wartości energii uderzenia. Widoczne jest zmniejszanie się parametru Rz ze wzrostem gęstości uderzeń, a także większe wartości tego parametru dla większej energii uderzenia [169].

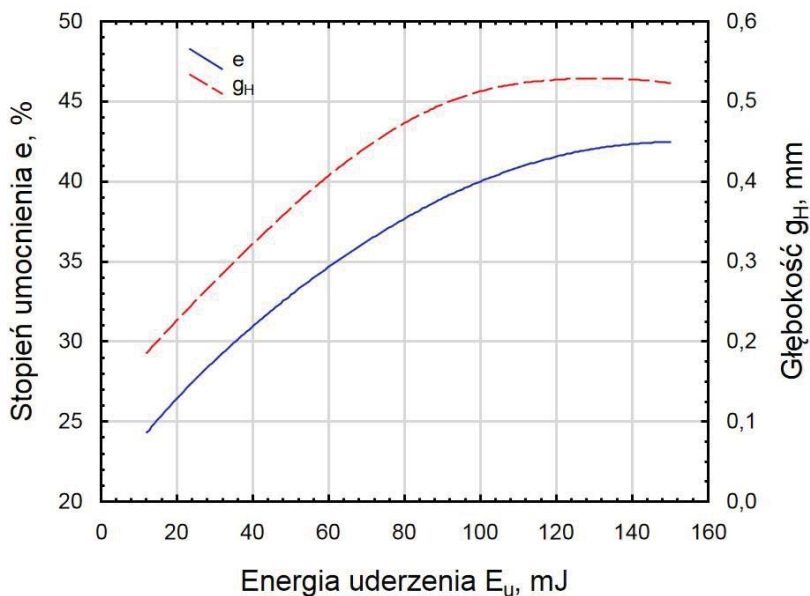
Na chropowatość powierzchni wpływa też ośrodek, w którym prowadzona jest obróbka nagniataniem. Zastosowanie w procesie kontrolowanego nagniatania rozproszonego stali C45 cieczy obróbkowej, zawierającej 70% nafty i 30% oleju wpłynęło na zwiększenie parametru Rz o (15 ÷ 25)% w stosunku do nagniatania „na sucho”. Można to wyjaśnić zmniejszeniem tarcia między kulką nagniatającą a obrabianym materiałem (materiał przemieszcza się stycznie do powierzchni uderzającej kulki), co ułatwia zagłębianie się kulki w obrabiany materiał. Może też nastąpić „uplastycznienie” materiału wskutek oddziaływania powierzchniowo aktywnego cieczy obróbkowej [185].



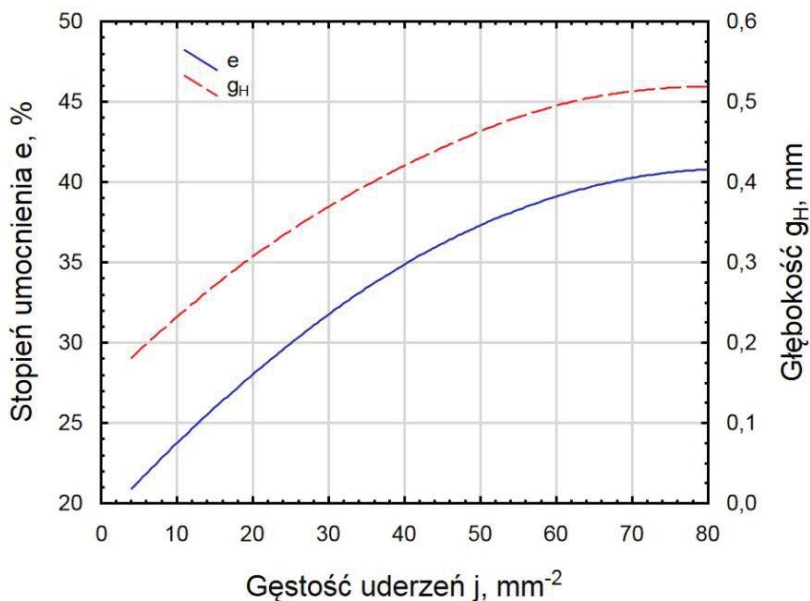
Rys. 4.29. Wpływ gęstości uderzeń na największą wysokość profilu chropowatości R_z (materiał obrabiany – stal C45, średnica kulki nagniatającej $D = 6 \text{ mm}$) [169]

4.3.3. Wpływ energii uderzenia i gęstości uderzeń na mikrotwardość oraz naprężenia własne

Na podstawie badań doświadczalnych wpływu parametrów kontrolowanego nagniatania dynamicznego rozproszonego na wskaźniki rozkładu mikrotwardości WW próbek ze stali C45 opracowane zostały funkcje regresji, których jedno-parametryczne przekroje pokazano na rys. 4.30 i 4.31 [201]. W wyniku KNDR uzyskano duży stopień umocnienia WW, w granicach od 21% do 42%, jak i głębokość warstwy utwardzonej (do około 0,5 mm). Zwiększanie energii uderzenia a także gęstości uderzeń wpływa na wzrost obydwu wskaźników rozkładu mikrotwardości WW. Wzrost ten jest wyraźnie większy w zakresie mniejszych wartości parametrów KNDR. Świadczyć to może o wystąpieniu stanu nasycenia gęstości dyslokacji w WW obrabianych próbek.

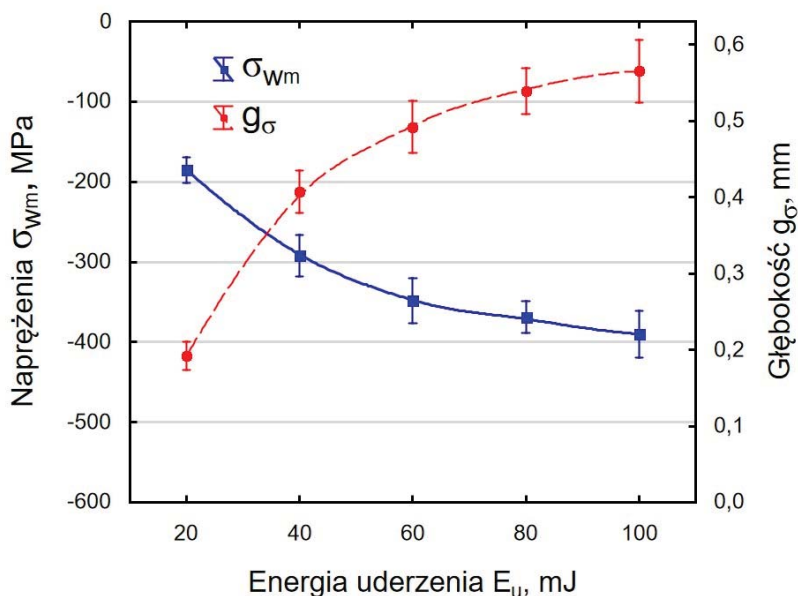


Rys. 4.30. Wpływ energii uderzenia na stopień umocnienia WW oraz głębokość warstwy utwardzonej po KNDR (materiał obrabiany – stal C45, średnica kulki nagniatącej $D = 5,589$ mm, gęstość uderzeń $j = 52$ mm⁻²) [201]

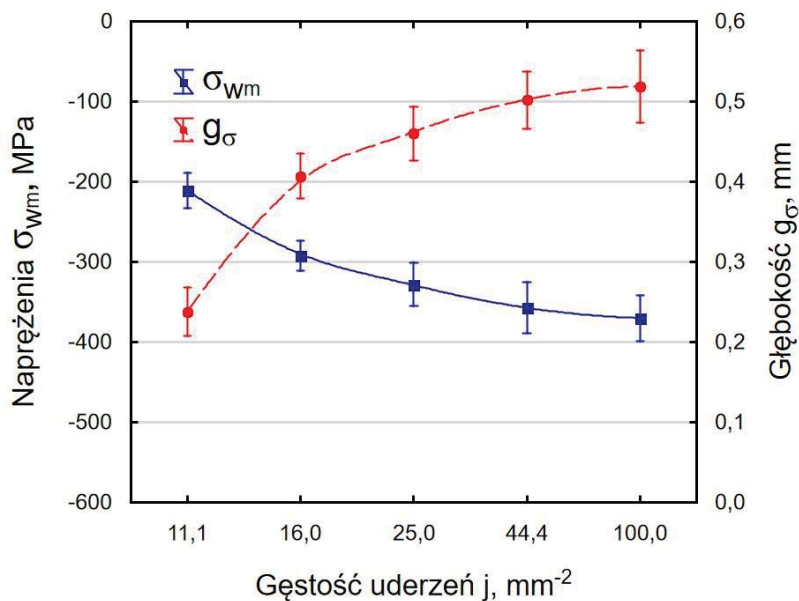


Rys. 4.31. Wpływ gęstości uderzeń na stopień umocnienia WW oraz głębokość warstwy utwardzonej po KNDR (materiał obrabiany – stal C45, średnica kulki nagniatącej $D = 5,589$ mm, energia uderzenia $E_u = 80$ mJ) [201]

Wpływ parametrów kontrolowanego nagniatania dynamicznego rozproszonego stopu tytanu Ti6Al4V na ściskające naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej σ_{wm} oraz głębokość występowania ściskających naprężeń własnych g_σ przedstawiono na rys. 4.32 oraz 4.33. W większym stopniu na zmiany rozkładu naprężeń własnych wpływa energia uderzenia niż gęstość uderzeń. Skutkiem zwiększenia energii uderzenia o 400% był wzrost bezwzględnej wartości naprężeń σ_{wm} o 111% i głębokości g_σ o 200%, podczas gdy wzrost gęstości uderzeń o 801% spowodował zwiększenie $|\sigma_{wm}|$ o 74% i g_σ o 117%. Podobnie jak w przypadku wskaźników rozkładu mikrotworzości, zwiększenie energii uderzenia i gęstości uderzeń w zakresie mniejszych wartości tych wskaźników bardziej wpływa na wzrost $|\sigma_{wm}|$ oraz g_σ niż w zakresie większych ich wartości [203].



Rys. 4.32. Wpływ energii uderzenia na naprężenia własne o maksymalnej wartości bezwzględnej oraz głębokość występowania ściskających naprężeń własnych po KNDR (materiał obrabiany – stop tytanu Ti6Al4V, średnica kulki nagniatającej $D = 6$ mm, gęstość uderzeń $j = 16$ mm⁻²) [203]



Rys. 4.33. Wpływ gęstości uderzeń na naprężenia własne o największej wartości bezwzględnej oraz głębokość występowania ściskających naprężeń własnych po KNDR (materiał obrabiany – stop tytanu Ti6Al4V, średnica kulki nagniatającej $D = 6$ mm, energia uderzenia $E_u = 40$ mJ) [203]

Wykresy obrazujące wpływ gęstości uderzeń na naprężenia σ_{wm} i głębokość g_{σ} (rys. 4.32) mają kształt podobny do wykresów przedstawiających wpływ czasu nagniatania wibracyjnego na te wskaźniki rozkładu naprężeń własnych (rys. 4.21), co potwierdza powiązanie czasu nagniatania z gęstością uderzeń.

5. SZCZOTKOWANIE NAGNIATAJĄCE

Szczotkowaniem nazywany jest sposób obróbki polegający na oddziaływaniu obracającej się z dużą prędkością szczotki na obrabianą powierzchnię. Do podstawowych zastosowań obróbki szczotkowaniem można zaliczyć oczyszczanie powierzchni przedmiotów (np. usuwanie produktów korozji czy starych powłok malarskich), usuwanie zadziorów, zaokrąglanie krawędzi, nadawanie określonych właściwości dekoracyjnych, a także kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej przedmiotów.

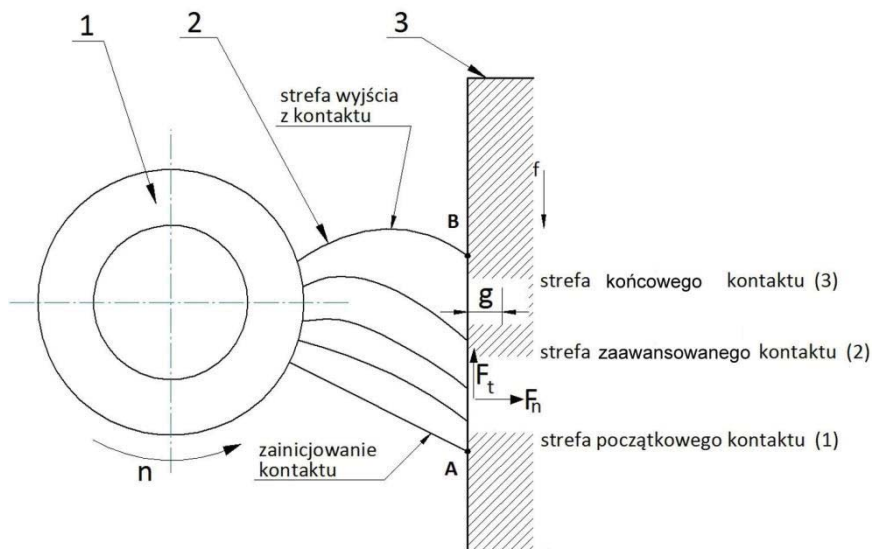
Szczotkowaniem nagniatającym (NDSz) jest szczotkowanie, którego celem jest osiągnięcie efektów typowych dla obróbki nagniataniem, takich jak wymagana chropowatość powierzchni, utwardzenie WW, ukonstytuowanie ściskających naprężeń własnych. NDSz jest sposobem nagniatania dynamicznego, gdyż włókna szczotki uderzają w obrabianą powierzchnię. Jednakże NDSz nie odpowiada w pełni zarówno warunkom nagniatania skoncentrowanego (włókna mogą w czasie obróbki zmieniać swoje położenie), jak i rozproszonego (elementy nagniatające w postaci włókien są połączone z korpusem narzędzia). Ponadto podczas szczotkowania następuje usuwanie pewnej objętości materiału. Przykładowo, w wyniku szczotkowania powierzchni próbki ze stali S235JR o wymiarach 15 mm x 100 mm za pomocą szczotki z włóknami stalowymi o średnicy 0,3 mm ubytek masy materiału próbki wyniósł od 3 mg do 260 mg, w zależności od parametrów technologicznych szczotkowania [179].

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione czynniki uznano, że szczotkowanie nagniatające należy zakwalifikować jako odrębny sposób nagniatania dynamicznego, nie mieszczący się w obszarze nagniatania skoncentrowanego ani rozproszonego.

5.1. Kinematyka i parametry szczotkowania

Kinematykę szczotkowania płaskiej powierzchni przedstawiono na rys. 5.1. Szczotka, składająca się z korpusu 1 i włókien 2, obraca się wokół własnej osi z prędkością n , natomiast przedmiot obrabiany 3 wykonuje ruch posuwowy f w kierunku stycznym do obracającej się szczotki. Odległość osi szczotki od obrabianej powierzchni jest mniejsza od promienia szczotki o wartość dosuwu g . W punkcie A następuje zainicjowanie kontaktu włókien szczotki z przedmiotem, natomiast w punkcie B następuje wyjście z obszaru kontaktu. W obszarze kontaktu włókien szczotki z obrabianym przedmiotem wyróżnia się trzy strefy [143]:

- początkowego kontaktu,
- zaawansowanego kontaktu,
- końcowego kontaktu.



Rys. 5.1. Kinematyka obróbki szczotkowaniem: 1 – korpus szczotki, 2 – włókno, 3 – przedmiot obrabiany [143]

Uderzenie włókien szczotki w obrabianą powierzchnię następuje w miejscu pierwszego kontaktu (punkt A). W miarę obrotu szczotki zwiększa się ugięcie włókien, co powoduje wzrost sił oddziaływania szczotki na obrabiany przedmiot. Siły te osiągają największą wartość w strefie zaawansowanego kontaktu. W strefie końcowego kontaktu zmniejsza się ugięcie włókien, a tym samym sił oddziałujących na przedmiot obrabiany. Siłę, z jaką szczotka oddziałuje na obrabiany przedmiot można rozłożyć na dwie składowe: normalną F_n i styczną F_t . Skutkiem występowania tych sił są odkształcenia warstwy wierzchniej przedmiotu, a w konsekwencji utwardzenie tej warstwy.

W obszarze kontaktu włókien szczotki z obrabianym przedmiotem występuje intensywne tarcie, które powoduje wydzielanie się dużej ilości ciepła, wskutek czego znacznie wzrasta temperatura (na wzrost temperatury wpływa też ciepło związane z odkształceniami warstwy wierzchniej). W wysokiej temperaturze mogą wystąpić przemiany strukturalne WW.

Efekty obróbki szczotkowaniem w dużym stopniu zależą od parametrów technologicznych, do których należy zaliczyć:

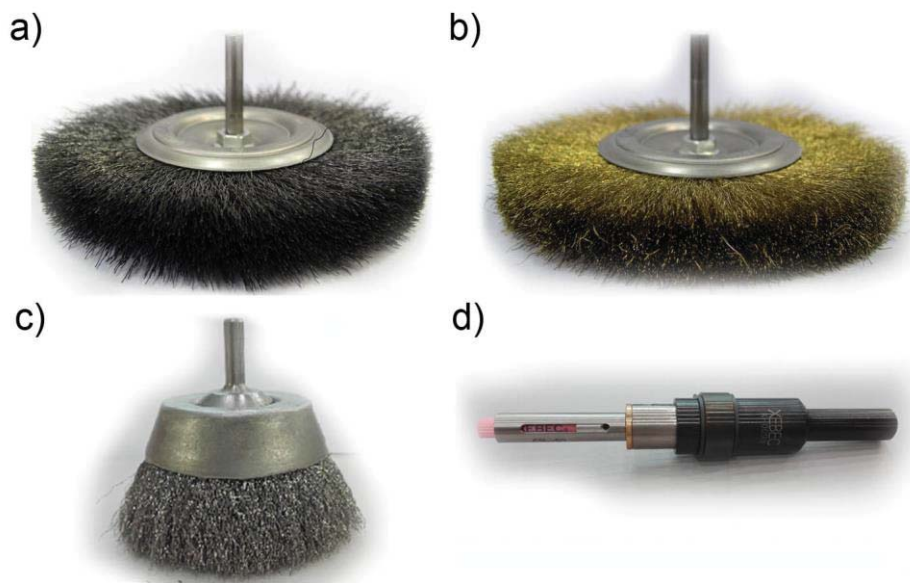
- prędkość obwodową v_o ,
- posuw f ,
- dosuw g .

Dobór parametrów szczotkowania związany jest z rodzajem materiału obrabianego oraz celem stosowania obróbki szczotkowaniem (oczyszczenie powierzchni, umocnienie WW, zmniejszenie chropowatości powierzchni, nadanie właściwości dekoracyjnych itp.)

5.2. Narzędzia i technologia szczotkowania

Narzędzia do szczotkowania (szczotki) charakteryzują się dużą różnorodnością. Ze względu na kinematykę obróbki rozróżnia się szczotki o ruchu obrotowym oraz o ruchu posuwisto-zwrotnym. W obróbce maszynowej stosowane są szczotki o ruchu obrotowym i one będą przedmiotem dalszej klasyfikacji.

Ze względu na konstrukcję, szczotki dzieli się na walcowe (rys. 5.2 a, b) i czołowe (rys. 5.2 c, d). Szczotki walcowe mają włókna rozmieszczone promieniowo na obwodzie korpusu w kształcie walca lub tulei, a w czasie pracy oś szczotki jest równoległa do obrabianej powierzchni. Natomiast w szczotkach czołowych włókna rozmieszczone są na powierzchni czołowej korpusu w kształcie tarczy, a ich kierunek jest równoległy do osi szczotki. W czasie pracy oś szczotki jest, na ogół, prostopadła do obrabianej powierzchni.



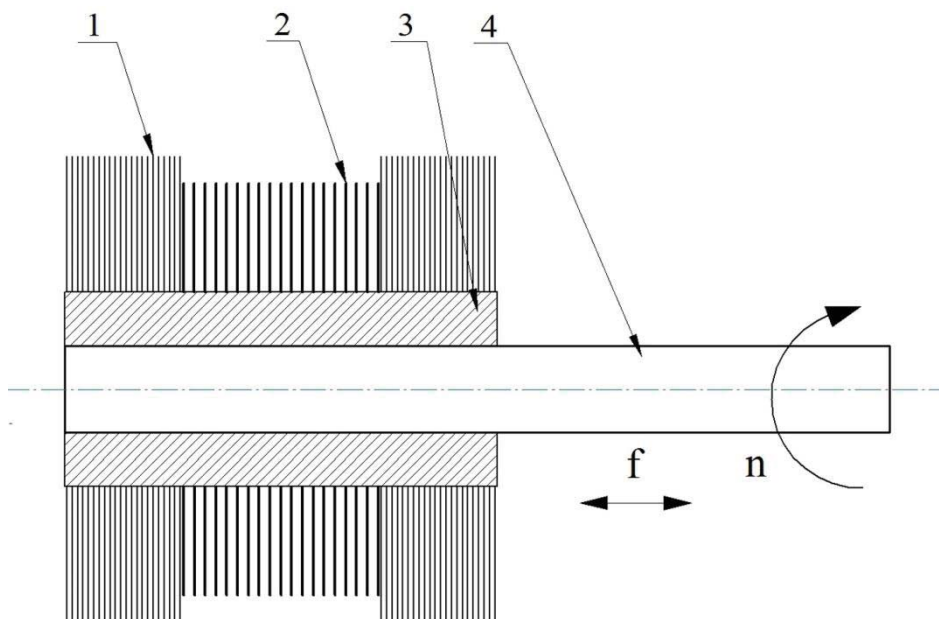
Rys. 5.2. Rodzaje szczotek: a) walcowa z włóknami stalowymi, b) walcowa z włóknami mosiężnymi, c) czołowa z włóknami stalowymi, d) czołowa z włóknami ceramicznymi

Biorąc pod uwagę materiał włókna, można wyróżnić szczotki z włóknami metalowymi i ceramicznymi. Włókna metalowe najczęściej wytwarzane są z drutu stalowego oraz mosiężnego. W szczotkach ceramicznych pęki włókien składają z wielu włókien o bardzo małej średnicy, co zapewnia im dużą elastyczność. Włókna ceramiczne mocowane są w uchwycie kompensacyjnym, wyposażonym w wymienne sprężyny, co rozszerza ich możliwości obróbkowe.

Do wielkości charakteryzujących właściwości szczotki zalicza się:

- rodzaj i średnicę szczotki,
- rodzaj materiału włókien,
- średnicę i długość włókien (w szczotkach ceramicznych – wysunięcie z plastikowej tulei).

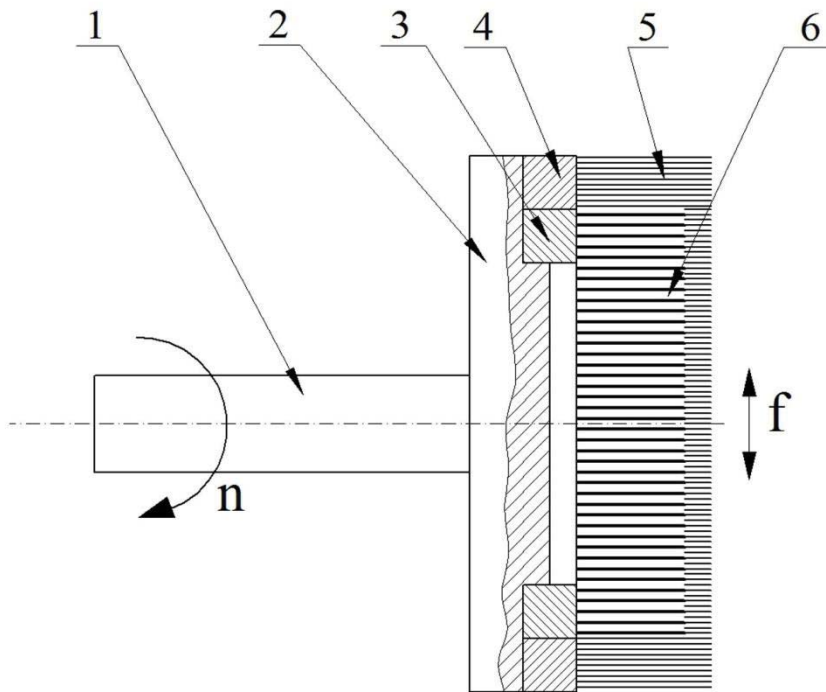
Energia, z jaką włókna uderzają w obrabiany przedmiot, zależy od sztywności włókien, średnicy szczotki oraz prędkości obrotowej szczotki. Ze wzrostem energii uderzenia zwiększa się skuteczność usuwania zadziorów oraz powłok, wzrasta też stopień umocnienia WW obrabianych przedmiotów, ale pogarsza się chropowatość obrobionej powierzchni [95]. Do obróbki wykończeniowej przedmiotów mogą być stosowane szczotki umacniająco-wygładzające (rys. 5.3 ÷ 5.5).



Rys. 5.3. Walcowa szczotka umacniająco - wygładzająca: 1 – sekcja wygładzająca, 2 – sekcja umacniająca, 3 – tuleja, 4 – trzpień [182]

Walcowa szczotka umacniająco-wygładzająca (rys. 5.3) składa się z trzpienia 4, służącego do zamocowania szczotki w uchwycie maszyny technologicznej, zamocowanej na trzpieniu tulei 3 oraz rozmieszczonych na obwodzie tulei włókien. W zależności od wymiarów włókien, wyodrębnia się sekcję umacniającą 2 i wygładzającą 1. Włókna sekcji umacniającej mają większą średnicę od włókien wygładzających, zatem, uderzają w obrabianą powierzchnię z większą energią, powodując większe umocnienie WW (również skuteczniej usuwają zadziorzy

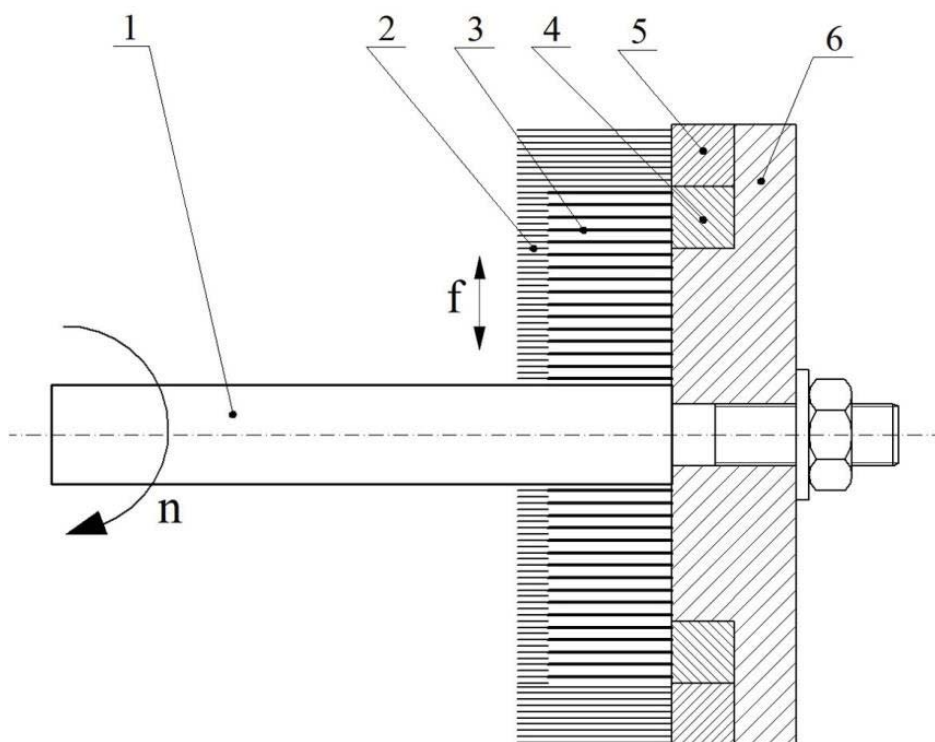
oraz zanieczyszczenia z obrabianej powierzchni). Włókna sekcji wygładzającej, które mają mniejszą średnicę i są gęściej rozmieszczone, powodują wyrównywanie mikronierówności powierzchni (również tych, które powstały wskutek uderzeń włókien sekcji umacniającej). Sekcje wygładzające rozmieszczone są po obydwu stronach sekcji umacniającej, dzięki temu, niezależnie od kierunku ruchu posuwowego f wzdłuż osi szczotki, włókna sekcji wygładzającej wpływają na zmniejszenie chropowatości powierzchni po przejściu sekcji umacniającej. Włókna sekcji wygładzającej mają większą długość od włókien sekcji umacniającej, gdyż średnica szczotki w części wygładzającej w większym stopniu zmniejsza się w czasie ruchu obrotowego w stosunku do średnicy spoczynkowej niż w części umacniającej. Szczotka walcowa może być stosowna do obróbki powierzchni walcowych (zewnątrznych i wewnętrznych), płaszczyzn, a także powierzchni kształtowych.



Rys. 5.4. Czołowa szczotka umacniająco - wygładzająca: 1 – trzpień, 2 – korpus, 3 – pierścień wewnętrzny, 4 – pierścień zewnętrzny, 5 – sekcja wygładzająca, 6 – sekcja umacniająca [180]

Czołowa szczotka umacniająco – wygładzająca (rys. 5.4) składa się z trzpień 1, połączonego z korpusem 2, na którym zamocowane są pierścienie: wewnętrzny 3 i zewnętrzny 4. Na czołowej powierzchni pierścienia wewnętrznego rozmieszczone są włókna sekcji umacniającej 6, a na czołowej powierzchni pierścienia zewnętrznego – włókna sekcji wygładzającej 5. Podczas pracy szczotka

wykonuje ruch obrotowy n . Działająca na włókna siła odśrodkowa powoduje ich odchylenie od osi w kierunku zewnętrznym. Włókna wygładzające odchylane są w większym stopniu niż umacniające ze względu na ich mniejszą średnicę. Końce wszystkich włókien powinny znajdować się w jednej płaszczyźnie, prostopadłej do osi szczotki, dlatego długość włókien wygładzających jest większa od długości włókien umacniających. Szczotki tego typu przeznaczone są do obróbki wykończeniowej płaszczyzn i powierzchni o dużym promieniu krzywizny, położonych na zewnątrz obrabianego przedmiotu (mogą też być stosowane do usuwania zadziorów).

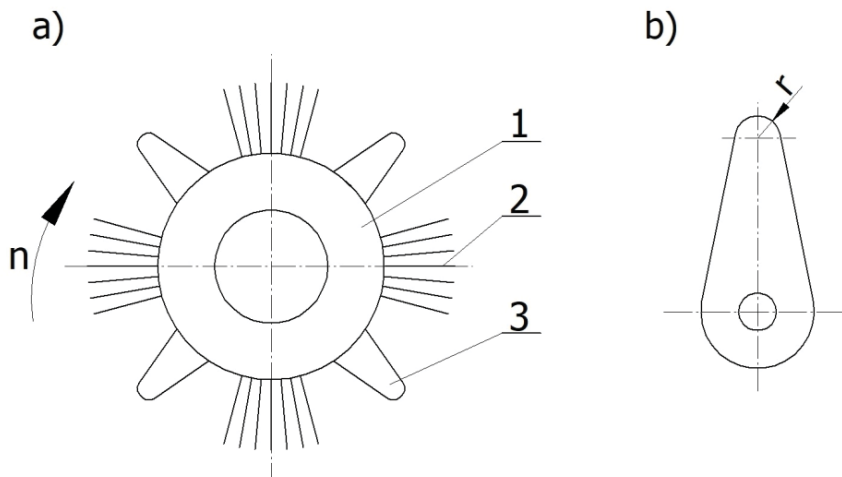


Rys. 5.5. Szczotka umacniająco – wygładzająca do krawędzi i powierzchni wewnętrznych:
 1 – trzpień, 2 – sekcja wygładzająca, 3 – sekcja umacniająca, 4 – pierścień wewnętrzny, 5 – pierścień zewnętrzny, 6 – korpus [181]

Szczotka umacniająco – wygładzająca do krawędzi i powierzchni wewnętrznych (rys. 5.5) różni się od szczotki czołowej do powierzchni zewnętrznych kierunkiem ułożenia włókien. Usytuowanie pierścieni 4 i 5 wraz z włóknami sekcji umacniającej 3 oraz sekcji wygładzającej 2 po tej samej stronie korpusu 6 co trzpień 1 umożliwia obróbkę wykończeniową powierzchni i krawędzi o ogra-

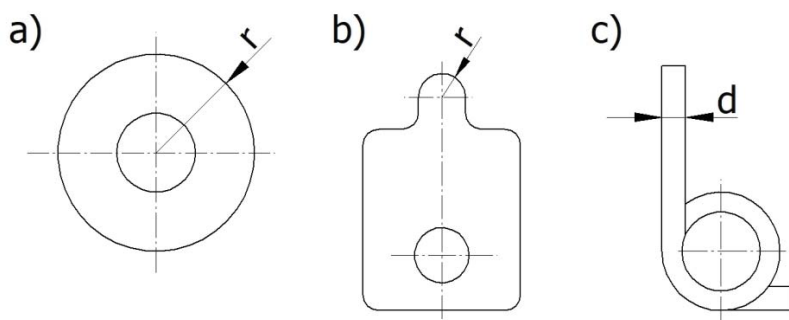
niczonym dostępie w przedmiotach o złożonym kształcie (np. w odlewach korpusów).

Do obróbki wykończeniowej powierzchni przedmiotów mogą być stosowane szczotki oczyszczająco-umacniające, których budowę przedstawiono na rys. 5.6. Szczotka zbudowana jest z korpusu 1 w kształcie tulei z otworem służącym do zamocowania na trzpieniu wprowadzonym w ruch obrotowy przez maszynę technologiczną, włókien oczyszczających 2 oraz elementów udarowych 3 [136].



Rys. 5.6. Szczotka oczyszczająco – umacniająca: a) schemat szczotki, b) kształt elementu udarowego (1 – korpus, 2 – włókna oczyszczające, 3 – element udarowy) [136]

Elementy udarowe mają znacznie większą masę od włókien oczyszczających, a zatem uderzają w obrabianą powierzchnię z większą energią, powodując zgniot warstwy wierzchniej. W przypadku obróbki powierzchni skorodowanej powodują rozbitcie znajdujących się na powierzchni warstw tlenków, przez co są one skuteczniej usuwane przez włókna oczyszczające. Przykładowe kształty elementów udarowych pokazano na rys. 5.7



Rys. 5.7. Rodzaje elementów udarowych: a) krążkowy, b) płytkowy, c) drutowy [121]

Do szcztokowania zwykle używane są maszyny technologiczne do obróbki skrawaniem. Prędkości obrotowe szcztokki wynoszą, na ogół, kilka tysięcy obrotów na minutę, zatem należy dobierać maszyny o takiej prędkości obrotowej wrzeciona. Powierzchnie płaskie mogą być szcztokowane na szlifierkach do płaszczyzn lub pionowych centrach obróbkowych, a powierzchnie wałków i otwory cylindryczne – na szlifierkach do wałków i otworów oraz na tokarkach z dodatkowym napędem ruchu obrotowego szcztokki. Do szcztokowania powierzchni kształtowych mogą być stosowane obrabiarki sterowane numerycznie.

Do szcztokowania nagiatającego stosowane są szcztokki z włóknami metalowymi, w postaci drutu z takich materiałów jak: mosiądz, fosforobraz, stal o twardości w stanie dostawy, stal hartowana, stal nierdzewna, stal mosiądzowana. Druty te mogą być gładkie albo faliste, o średnicy (0,05 ÷ 1,2) mm i długości kilkudziesięciu milimetrów [95]. Szcztokki z włóknami ceramicznymi używane są raczej do oczyszczania i zmniejszania chropowatości powierzchni. Włókna wykonane z materiałów ceramicznych (np. tlenku glinu i lepiszcza epoksydowego) mają bardzo małą średnicę, nawet mniejszą niż 10 µm. Średnice szcztok ceramicznych są rzędu kilku – kilkudziesięciu milimetrów, a wysunięcia włókien z tulei szcztokki – około (5 ÷ 10) mm [66, 90].

Prędkość obwodowa szcztokki wynosi od kilkuset do kilku tysięcy metrów na minutę, prędkość ruchu posuwowego – od kilkudziesięciu do kilku tysięcy milimetrów na minutę.

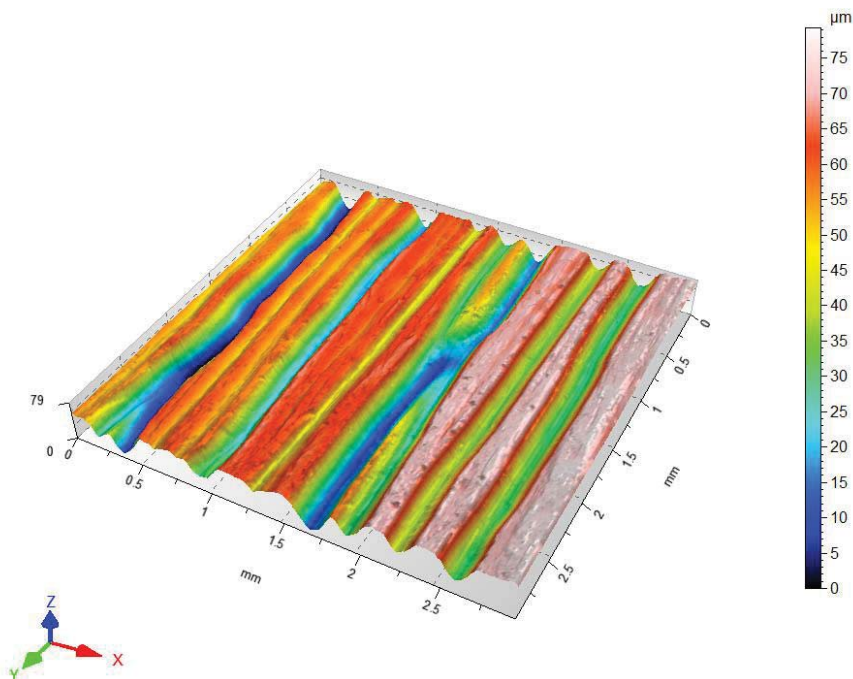
Dosuw szcztok ceramicznych przyjmowany jest około 0,5 mm, natomiast dosuw szcztok z włóknami metalowymi jest większy, rzędu kilku milimetrów. Pomiar dosuwu szcztokki typowymi metodami są zwykle mało dokładne, na co składa się kilka przyczyn, a mianowicie:

- różne długości poszczególnych włókien w szcztokce,
- zmiana długości włókien, zwłaszcza falistych, pod wpływem siły odśrodkowej, związanej z ruchem obrotowym szcztokki,
- odchylenie się włókien na skutek oporów powietrza oraz oporów cieczy obróbkowej, które powoduje zmniejszanie średnicy szcztokki walcowej i długości szcztokki czołowej.

Efektywność oddziaływania szcztokki na obrabiany przedmiot można ocenić na podstawie pomiaru średnicy dynamicznej, czyli średnicy szcztokki obracającej się wokół własnej osi. Pomiar polega na przesuwanie obracającej się szcztokki w kierunku próbki zamocowanej w siłomierzu, którym mierzy się siłę oddziaływania szcztokki na próbkę. Po osiągnięciu założonej wartości siły następuje wyłączenie przesuwa szcztokki. Tak określona odległość osi szcztokki od powierzchni obrabianej jest równa połowie średnicy dynamicznej szcztokki [93, 178].

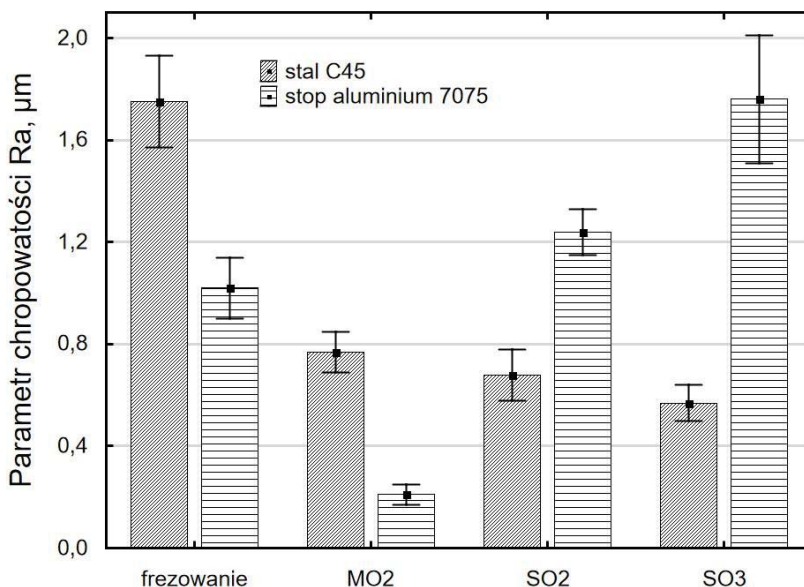
5.3. Wpływ szczotkowania nagniatającego na właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów

Chropowatość powierzchni po nagniataniu szczotkującym zależy od wielu czynników i wartości parametrów chropowatości mogą zmieniać się w bardzo szerokim zakresie. Uderzając w obrabianą powierzchnię z dużą prędkością włókna szczotki mogą powodować zmniejszenie a nawet całkowite usunięcie mikronierówności, które pozostały po obróbce poprzedzającej szczotkowanie, a także mogą powodować powstanie wgłębień zwiększających chropowatość powierzchni. Topografię powierzchni stopu magnezu AZ31 po szczotkowaniu nagniatającym szczotką walcową z włóknami stalowymi o średnicy 0,3 mm, z prędkością obwodową $v_o = 422$ m/min oraz prędkością posuwu $v_f = 370$ mm/min przedstawiono na rys. 5.8. Uderzające ze znaczną prędkością włókna szczotki w powierzchnię materiału o małej twardości (62HV0,5) spowodowały całkowite usunięcie struktury geometrycznej po frezowaniu, które było obróbką poprzedzającą szczotkowanie. Widoczne podłużne wgłębienia w obrabianym materiale są efektem odkształceń plastycznych wskutek uderzeń włókien szczotki a także mikroskrawania materiału przez ostre krawędzie końców włókien (w miarę zużywania się włókien może następować ich samoostrzenie).



Rys. 5.8. Topografia powierzchni stopu magnezu AZ31 po szczotkowaniu nagniatającym szczotką walcową

Chropowość powierzchni po szczotkowaniu zależy od właściwości materiału obrabianego oraz rodzaju szczotki (rys. 5.9). Po szczotkowaniu nagniatającym szczotkami walcowymi z prędkością obwodową $v_o = 1689$ m/min i prędkością posuwu $v_f = 140$ mm/min stali C45 uzyskano parametr chropowości $Ra = (0,57 \div 0,77)$ μm , a po szczotkowaniu stopu aluminium 7075-T651 – $Ra = (0,21 \div 1,76)$ μm , w zależności od rodzaju włókien szczotki (ciecz obróbkowa – emulsja). Przed szczotkowaniem próbki były frezowane. Stosowano szczotki z trzema rodzajami włókien: mosiężne o średnicy 0,2 mm (M02) oraz stalowe o średnicach 0,2 mm (S02) i 0,3 mm (S03). W przypadku szczotkowania stali, która jest materiałem o większej twardości (255 HB), dominującym czynnikiem w procesie kształtowania struktury geometrycznej powierzchni jest usuwanie i „zgniatanie” mikronierówności po obróbce poprzedzającej. Natomiast w procesie kształtowania SGP podczas szczotkowania stopu aluminium 7075-T651 (twardość 172 HB) widoczny jest zarówno mechanizm „wygładzania” istniejących mikronierówności jak i tworzenia się wgłębień. Po obróbce szczotkami o mniejszej średnicy drutu (mniejsza sztywność) widoczne jest zmniejszenie parametru Ra , natomiast obróbka szczotką o średnicy drutu 0,3 mm spowodowała zwiększenie chropowości powierzchni [176].

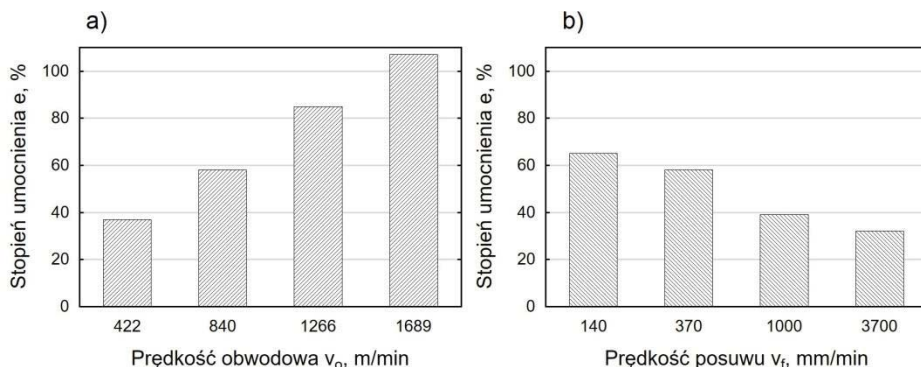


Rys. 5.9. Wpływ materiału obrabianego i średnicy włókna szczotki na chropowość obrabianej powierzchni (M02 włókna z mosiądzu o średnicy 0,2 mm, S02 i S03 – włókna stalowe o średnicy odpowiednio 0,2 mm i 0,3 mm) [176]

Po szczotkowaniu stopów magnezu AZ91HP i AZ31 wyżej wymienionymi szczotkami można zauważyć, że ze wzrostem sztywności włókien szczotki zwiększa się chropowatość obrabianej powierzchni (podobnie jak dla stopu aluminium). Parametr Ra chropowatości powierzchni obrabianej szczotką z włóknami stalowymi o średnicy 0,3 mm jest o około 60% większy w porównaniu z parametrem Ra powierzchni obrabianej szczotką z włóknami mosiężnymi o średnicy 0,2 mm [94].

Chropowatość powierzchni po szczotkowaniu „na sucho” jest około (80 ÷ 90)% większa od chropowatości po szczotkowaniu w środowisku cieczy obróbkowej. Podczas szczotkowania wydzielą się dużo ciepła, w związku z tym wzrasta temperatura i następuje uplastycznienie materiału, co sprzyja „wybijaniu” większych wgłębień przez uderzające włókna szczotki. Obecność cieczy wpływa na obniżenie temperatury obrabianego materiału, a tym samym na zmniejszenie chropowatości powierzchni [94, 176].

Szczotkowanie nagniatające powoduje znaczny wzrost mikrotwardości warstwy wierzchniej. Na rys. 5.10 przedstawiono wpływ parametrów NDSz szczotką z włóknami stalowymi o średnicy 0,3 mm na stopień umocnienia WW stopu aluminium 7075. Ze wzrostem prędkości obwodowej szczotki zwiększa się energia uderzenia włókien w obrabiany materiał, co powoduje wzrost stopnia umocnienia WW, który dla prędkości $v_o = 1689$ m/min przekracza wartość 100%. Natomiast zwiększenie prędkości posuwu wiąże się z mniejszą liczbą uderzeń włókien na jednostkę powierzchni, a w rezultacie mniejszym stopniem umocnienia WW [92].

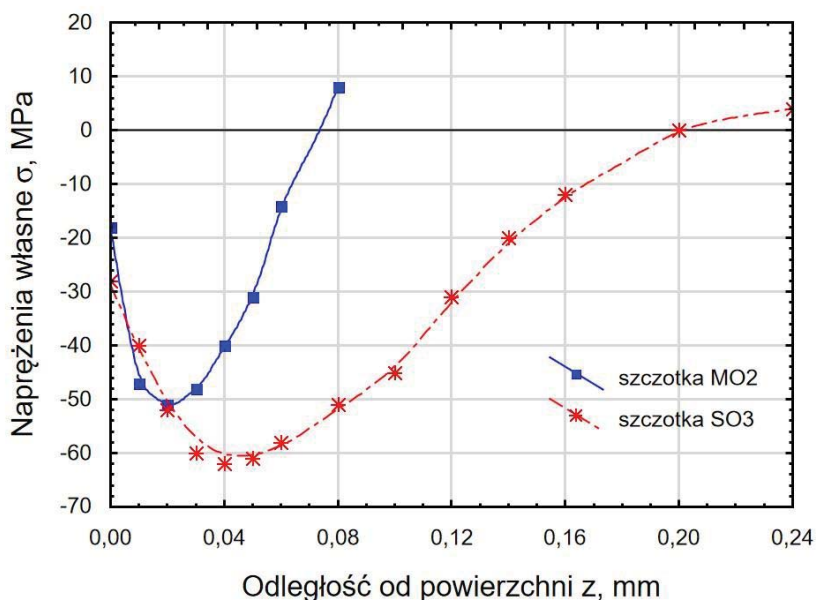


Rys. 5.10. Stopień umocnienia WW po szczotkowaniu nagniatającym stopu aluminium 7075 w zależności od: a) prędkości obwodowej szczotki, b) prędkości posuwu [92]

Głębokość warstwy utwardzonej po szczotkowaniu w dużym stopniu zależy od rodzaju materiału obrabianego, parametrów technologicznych, liczby przejść [28, 95]. Przykładowo, po szczotkowaniu stopu magnezu AZ31 szczotką z włóknami mosiężnymi o średnicy 0,2 mm z prędkością obwodową 1266 m/min głębokość warstwy utwardzonej wynosi (0,02 ÷ 0,03) mm, a szczotką

z włóknami stalowymi o średnicy 0,3 mm – około 0,3 mm [95]. Znacznie większą głębokość warstwy utwardzonej uzyskano po szczotkowaniu stali nierdzewnej AISI304 szczotką z włóknami stalowymi, która wynosiła około 0,5 mm [28].

Po szczotkowaniu nagniatającym, zarówno „na sucho” jak i w środowisku cieczy obróbkowej, w warstwie wierzchniej obrabianych przedmiotów kształtowane są ściskające naprężenia własne. Na rys. 5.11 przedstawiono rozkład naprężeń własnych w WW stopu aluminium 7075-T651 po szczotkowaniu „na sucho” z prędkością obwodową $v_o = 1266$ m/min i prędkością posuwu $v_f = 370$ mm/min [91].



Rys. 5.11. Rozkład naprężeń własnych w WW przedmiotów ze stopu aluminium 7075T651 po szczotkowaniu nagniatającym (M02 – szczotka z włóknami mosiężnymi o średnicy 0,2 mm, S03 – szczotka z włóknami stalowymi o średnicy 0,3 mm) [91]

Ściskające naprężenia własne w WW stopów aluminium i magnezu po szczotkowaniu nagniatającym zalegają na stosunkowo niewielkiej głębokości, która wynosi około $g_\sigma = (0,08 \div 0,20)$ mm, a ich wartość dochodzi do $\sigma_{wm} = (-23)$ MPa \div (-62) MPa. W pobliżu powierzchni naprężenia te zmniejszają się do $\sigma_{wp} = (-2)$ MPa \div (-30) MPa [91, 95]. Kilkakrotnie większe, co do wartości bezwzględnej, ściskające naprężenia własne ukształtowane zostały w wyniku obróbki NDSz w WW stali nierdzewnej AISI304 (naprężenia σ_{wm} przekroczyły (-500) MPa, a głębokość g_σ wyniosła około 0,55 mm) [28].

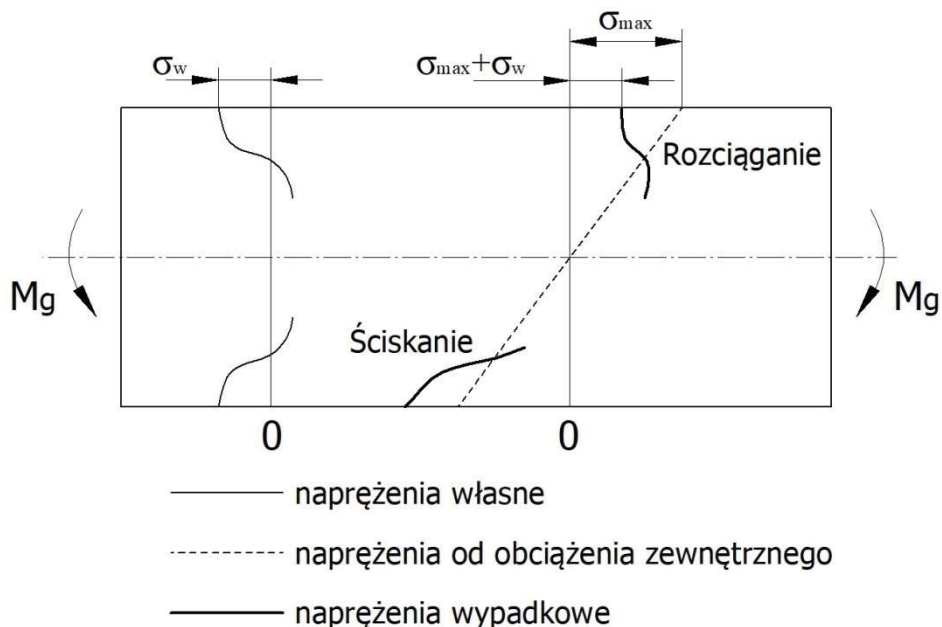
6. WPLYW NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE ELEMENTÓW MASZYN

6.1. Wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa

W procesie wytwarzania elementów maszyn operacja nagniatania dynamicznego najczęściej wprowadzana jest w celu zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej tych elementów. Wytrzymałością zmęczeniową lub granicą zmęczenia nazywana jest największa wartość naprężenia, zmieniającego się okresowo w czasie, która nie powoduje zniszczenia badanego elementu (próbki) po osiągnięciu umownej, granicznej liczby cykli. Wytrzymałość zmęczeniowa tak określona jest tzw. praktyczną granicą zmęczenia [58]. Natomiast trwałość zmęczeniowa wyrażana jest poprzez liczbę cykli okresowo zmiennych obciążeń, po której następuje zniszczenie badanego elementu lub próbki. Rzadziej trwałość ta wyrażana jest jako czas eksploatacji elementów.

Wzrost wytrzymałości zmęczeniowej elementów poddanych obróbce nagniataniem głównie jest związany ze zmniejszeniem naprężeń rozciągających pochodzących od obciążeń zewnętrznych przez ściskające naprężenia własne ukształtowane w warstwie wierzchniej tych elementów podczas nagniatania. Na rys. 6.1 przedstawiono redukcję naprężeń rozciągających w WW elementu poddanego zmiennym obciążeniom zginającym o maksymalnej wartości naprężeń rozciągających σ_{max} o wartość ściskających naprężeń własnych σ_w . Wzrost bezwzględnej wartości naprężeń ściskających, na ogół, nie ma istotnego znaczenia, gdyż wytrzymałość stopów metali na ściskanie jest znacznie większa od wytrzymałości na rozciąganie.

W przypadku zginania, przy odpowiednim rozkładzie naprężeń własnych, naprężenia rozciągające w całym przekroju próbki nie powinny przekraczać wartości σ_{max} . Natomiast w próbkach poddanych zmiennym obciążeniom rozciągającym naprężenia rozciągające na głębokości występowania ściskających naprężeń własnych ulegają zmniejszeniu, a w warstwach głębiej położonych – zwiększeniu [159].



Rys. 6.1. Wpływ naprężeń własnych ukształtowanych przez nagniatanie dynamiczne na naprężenia wypadkowe w elemencie obciążonym momentem gnącym

Duży wpływ na wytrzymałość zmęczeniową ma również głębokość zgniotu spowodowanego ND. Właściwości WW powinny być tak ukształtowane, aby nastąpiło przesunięcie punktu powstawania ogniska zmęczeniowego z powierzchni w głąb materiału w celu odsunięcia go od koncentratorów naprężeń na powierzchni przedmiotu [126].

Wpływ chropowatości powierzchni na wytrzymałość zmęczeniową związany jest z działaniem mikronierówności w charakterze karbów, na których następuje koncentracja naprężeń. Większy wpływ wysokości chropowatości powierzchni na wytrzymałość zmęczeniową zaobserwowano w przypadku stopów metali o większej wytrzymałości na rozciąganie [40].

Na podstawie licznych badań można stwierdzić, że na wzrost wytrzymałości zmęczeniowej wpływa nagniatanie strumieniowe (NDRS). Wzrost wytrzymałości zmęczeniowej elementów wykonanych z różnych materiałów wskutek nagniatania strumieniowego przedstawiono w tabeli 6.1.

We wszystkich przypadkach nagniatania strumieniowego nastąpił wzrost wytrzymałości zmęczeniowej, chociaż jego wartości są bardzo zróżnicowane (od 12% do 75%), co związane jest z różnymi właściwościami obrabianych materiałów oraz elementów nagniatających, a także dużą rozpiętością wartości stosowanych parametrów technologicznych.

Tabela 6.1. Wpływ nagniatania strumieniowego na wzrost wytrzymałości zmęczeniowej na podstawie danych literaturowych

Materiał obrabiany	Medium nagniatające	Warunki technologiczne	Procentowy wzrost wytrzymałości zmęczeniowej	Źródło
Stal H10N7K9M5Pr	Kulki stalowe 3 mm	$p = 0,45$ MPa, $t = 10$ min	20%	[63]
Stal H10N7K9M5Pr	Kulki szklane (100 ÷ 150) μm	$l_d = 250$ mm, $t = 60$ s	21%	[63]
Stal 18H2N4MAZ	Kulki szklane (55 ÷ 100) μm	$l_d = 80$ mm, $t = 40$ s	28%	[63]
Stop tytanu Ti6Al2Mo2Cr (WT3-1)	Kulki szklane (40 ÷ 150) μm	$l_d = 150$ mm, $t = 30$ s	50%	[63]
Stal sprężynowa 50 HF	Kulki stalowe (1,5 ÷ 2,5) mm	$p = (0,15 \div 0,25)$ MPa, $t = 2,6$ min, $f_A = (0,27 \div 0,75)$ mm	(12 ÷ 40)%	[215]
Stop magnezu AZ80	Kulki z Ce-ZrO ₂ (600 ÷ 800) μm	$f_N = 0,1$ mm	75%	[211]

Oznaczenia – jak w tabelach 4.3 i 4.4.

Trwałość zmęczeniowa zależy od intensywności nagniatania strumieniowego. Największą trwałość zmęczeniową próbek ze stopu magnezu AZ80 uzyskano po nagniataniu kulkami szklanymi o średnicy (300 ÷ 400) μm , z intensywnością $f_N = (0,10 \div 0,20)$ mm, a w stosunku do próbek nienagniatanych trwałość ta wzrosła kilkadziesiąt razy. Natomiast granica zmęczenia próbek nagniatanych z intensywnością $f_N = 0,15$ mm zwiększyła się o 60%. Podobną zależność otrzymano dla stopu Ti-10V-2Fe-3Al nagniatanego strumieniowo śrutem stałym ze zmienną intensywnością (od $f_A = 0,03$ mm do $f_A = 0,50$ mm). Największą trwałość zmęczeniową uzyskano dla intensywności nagniatania $f_A = 0,2$ mm [22].

Trwałość zmęczeniową można zwiększyć również poprzez wzrost stopnia pokrycia nagniatanej powierzchni odciskami uderzających kulek. Zwiększenie stopnia pokrycia próbek ze stali 0Cr13Ni8Mo2Al nagniatanych kulkami stało-

wymi o średnicy 0,50 mm, z intensywnością $f_A = 0,20$ mm, ze 100% do 200% spowodowało wzrost trwałości zmęczeniowej o 74%. Natomiast identyczne zwiększenie stopnia pokrycia tej stali nagniatanej kulkami szklanymi o średnicy 0,35 mm z intensywnością $f_A = 0,15$ mm pozwoliło uzyskać trwałość zmęczeniową o 98% większą [33].

Wytrzymałość zmęczeniowa zależy też od czasu nagniatania. Przykładowo, efektem nagniatania strumieniowego stali H10N7K9M5Pr przy ciśnieniu powietrza 0,12 MPa w czasie 15 minut był wzrost wytrzymałości zmęczeniowej o 11,5%. Natomiast zwiększenie czasu nagniatania przy ciśnieniu powietrza 0,18 MPa wpłynęło niekorzystnie na wytrzymałość zmęczeniową [215].

Nagniatanie strumieniowe korzystnie wpływa też na wytrzymałość zmęczeniową stopu tytanu Ti6Al4V po nawęglaniu plazmowym. Nagniatanie kulkami stalowymi o twardości 950 HV i średnicy 70 μm , przy ciśnieniu powietrza 0,3 MPa, w czasie 8 sekund (stopień pokrycia 200%) spowodowało zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej o około 20% [151]. Korzystny wpływ nagniatania strumieniowego kulkami z tlenku cyrkonu o średnicy 500 μm zauważono dla próbek odlewanych ze stopu Ti6Al4V [27].

Efekty nagniatania strumieniowego można zwiększyć poprzez przeprowadzenie tej obróbki w podwyższonej temperaturze. Po nagniataniu stali AISI 4140 kulistym śrutem stalowym o średnicy 0,43 mm, przy ciśnieniu powietrza 0,12 MPa i stopniu pokrycia 98%, w temperaturze 290 °C, otrzymano wytrzymałość zmęczeniową o 20% większą w porównaniu z nagniataniem w temperaturze 20°C [160].

Korzystny wpływ nagniatania strumieniowego widoczny jest również w powiązaniu z innymi sposobami obróbki. Badania trwałości zmęczeniowej próbek ze stopu tytanu TB6, które poddane zostały czterem strategiom obróbki wykończeniowej, a mianowicie:

- frezowaniu,
 - frezowaniu i polerowaniu,
 - frezowaniu, polerowaniu i nagniataniu strumieniowemu,
 - frezowaniu, polerowaniu, nagniataniu strumieniowemu i polerowaniu,
- wykazały, że największą trwałość zmęczeniową uzyskano dla ostatniej z wymienionych strategii [167].

Nagniatanie strumieniowe może być z powodzeniem stosowane w celu zwiększania trwałości zmęczeniowej elementów ze stopów niklu. W wyniku nagniatania na urządzeniu pneumatycznym kulkami o średnicy (0,36 ÷ 0,59) mm, uderzającymi z energią od 0,06 mJ do 1,1 mJ w powierzchnię obrabianych próbek ze stopu niklu Inconel 718 uzyskano (2 ÷ 20)-krotny wzrost ich trwałości zmęczeniowej, w zależności od warunków technologicznych obróbki [57].

Korzystny wpływ nagniatania dynamicznego na wytrzymałość zmęczeniową stwierdzono również dla stopów metali otrzymanych metodą technik przyrostowych. Próbki ze stopu AlSi10Mg, otrzymane metodą selektywnego przetapiania

wiązką lasera (SLM), poddano nagniataniu strumieniowemu kulkami stalowymi i ceramicznymi, a następnie, polerowaniu. Wytrzymałość zmęczeniowa tak przygotowanych próbek była znacząco większa od wytrzymałości próbek nienagniatanych [155].

Nagniatanie dynamiczne może też być stosowane jako wykończeniowa obróbka elementów z powłokami chromowymi. Badania przeprowadzono na próbkach ze stali 41Cr4 chromowanych, które nagniatano strumieniowo kulkami o średnicy 1,5 mm w czasie 40 minut, stosując ciśnienie powietrza 0,4 MPa, wykazały, że wytrzymałość zmęczeniowa próbek nagniatanych była o (12 ÷ 21)% większa od wytrzymałości próbek nienagniatanych [25].

Wytwarzane ze stopów tytanu implanty mogą być pokrywane powłokami biofunkcjonalnymi w celu poprawy integracji tych implantów z tkanką ludzką. Powłoki te mogą wpływać na zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej implantów. Wykazano, że zastosowanie nagniatania dynamicznego, jako obróbki poprzedzającej elektrolityczne utlenianie plazmowe, powoduje kilkudziesięcioprocentowy wzrost wytrzymałości zmęczeniowej [6].

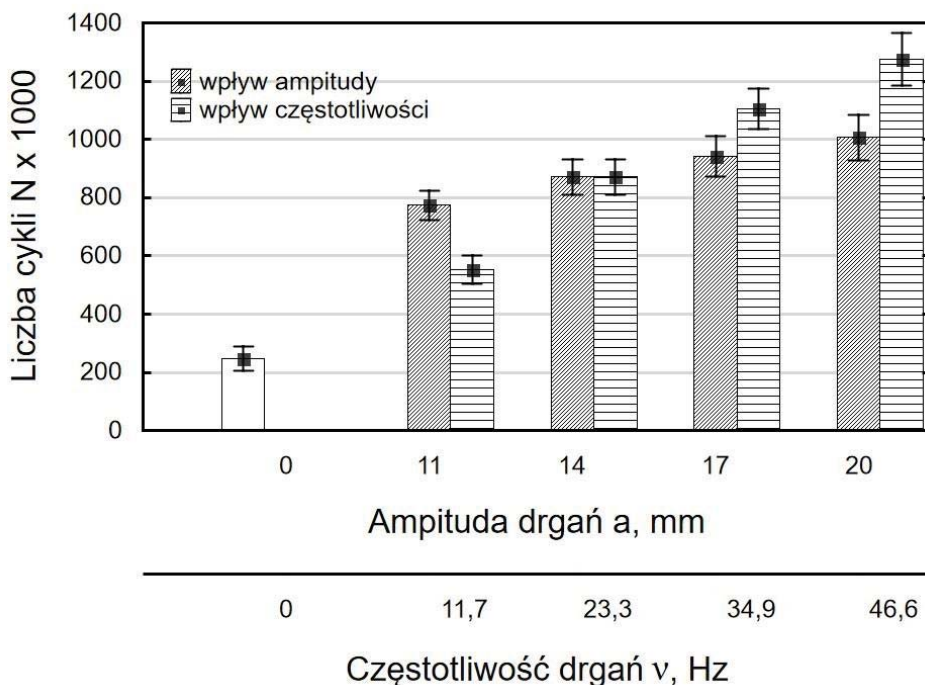
Z badań wpływu NDRS na wytrzymałość zmęczeniową elementów wcześniej poddanych implantacji jonów wynika, że otrzymuje się pozytywne rezultaty, chociaż w różnym stopniu dla różnych materiałów. Po nagniataniu strumieniowym kulkami szklanymi o średnicy (55 ÷ 100) μm , z intensywnością $f_N = 0,125 \text{ mm}$, w czasie 40 sekund, próbek, do których warstwy wierzchniej wcześniej implantowano jony azotu, wzrost wytrzymałości zmęczeniowej uzyskano dla stali EI961SzAŻ (10%), stopu tytanu Ti6Al2Mo2Cr (24%), stali 18H2N4MAŻ (13%) oraz dla stali 2H13 (4%) [84].

Ważnym obszarem zastosowań NDRS jest obróbka złączy spawanych. Potwierdzone to zostało doświadczalnie na przykładzie złącza spawanego ze stali 12H18N10T (polskim odpowiednikiem tej stali jest 1H18N10T), które nagniatano strumieniowo kulkami szklanymi o średnicy 100 μm , stosując ciśnienie powietrza (0,35 ÷ 0,4) MPa, w czasie 4 minut. Uzyskano duży wzrost wytrzymałości zmęczeniowej, wynoszący około 50% [83].

W celu zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej elementów maszyn można zastosować również nagniatanie wibracyjne (NDRW). W procesie NDRW używane są zwykle elementy nagniatające o większych wymiarach niż w nagniataniu strumieniowym, co ogranicza możliwości obróbki powierzchni o małym promieniu krzywizny. Również wymiary obrabianych przedmiotów są ograniczone wymiarami komory roboczej.

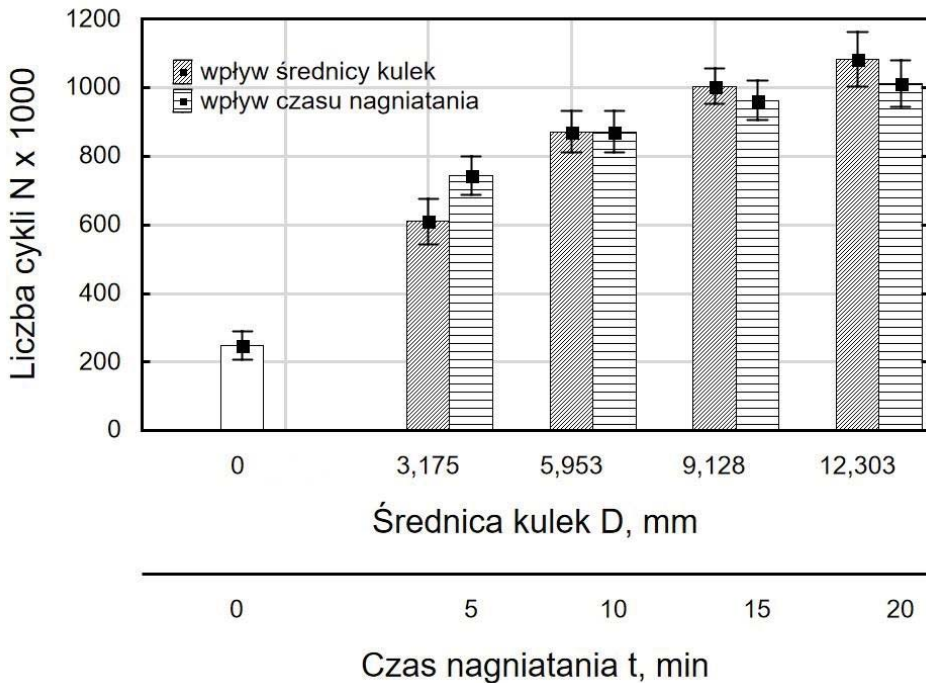
Na rys. 6.2 i 6.3 przedstawiono wpływ parametrów nagniatania wibracyjnego na trwałość zmęczeniową próbek ze stopu tytanu Ti6Al4V. Badania przeprowadzono na próbkach w kształcie płytki prostopadłościowej z przewężeniem w części środkowej. Nagniatanie wibracyjne próbek (obustronne) wykonano na urządzeniu z wibratorem kinematycznym, którego schemat pokazano na rys. 4.9 w podrozdziale 4.2.1. Po nagniataniu próbki były poddawane cyklicznym, obu-

stronnym, symetrycznym obciążeniem zginającym na urządzeniu, którego schemat uwidocznił na rys. 2.10 w podrozdziale 2.7.1. Miarą trwałości zmęczeniowej była liczba cykli przegięć do zniszczenia próbki. Trwałość zmęczeniową próbek nagniatanych porównywano z trwałością próbek nienagniatanych (zerowe wartości poszczególnych parametrów na wykresach).



Rys. 6.2. Wpływ amplitudy oraz częstotliwości drgań wibratora na trwałość zmęczeniową próbek ze stopu tytanu Ti6Al4V ($D = 6,953$ mm, $t = 10$ min) [170]

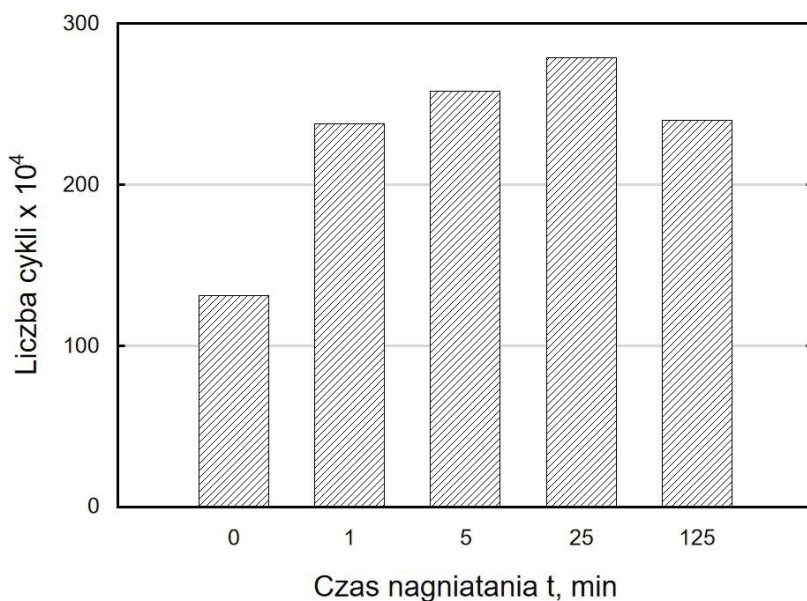
Widoczny jest wyraźny wzrost trwałości zmęczeniowej po nagniataniu wibracyjnym, który, w zależności od wartości parametrów technologicznych, waha się w od 120% do 415%. Wzrost wartości wszystkich badanych parametrów NDRW, mianowicie amplitudy i częstotliwości drgań wibratora, średnicy kulek oraz czasu nagniatania, powoduje zwiększenie trwałości zmęczeniowej badanych próbek. Dynamika wzrostu trwałości jest większa w zakresie mniejszych wartości parametrów, co świadczy o zbliżaniu się do pewnego stopnia nasycenia dla większych wartości parametrów [170].



Rys. 6.3. Wpływ średnicy kulek i czasu nagniatania wibracyjnego na trwałość zmęczeniową próbek ze stopu tytanu Ti6Al4V ($v = 23,3$ Hz, $a = 14$ mm) [170]

Zmiany poszczególnych parametrów NDRW można powiązać ze zmianami energii uderzenia oraz gęstości uderzeń, które mają wpływ na właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów. Trwałość zmęczeniowa w dużym stopniu zależy od rozkładu naprężeń własnych. Bezwzględna wartość ściskających naprężeń własnych zwiększa się ze wzrostem parametrów NDRW (podrozdział 4.2.2), co potwierdza występowanie współzależności rozkładu naprężeń własnych w WW elementów maszyn z odpornością tych elementów na zużycie zmęczeniowe.

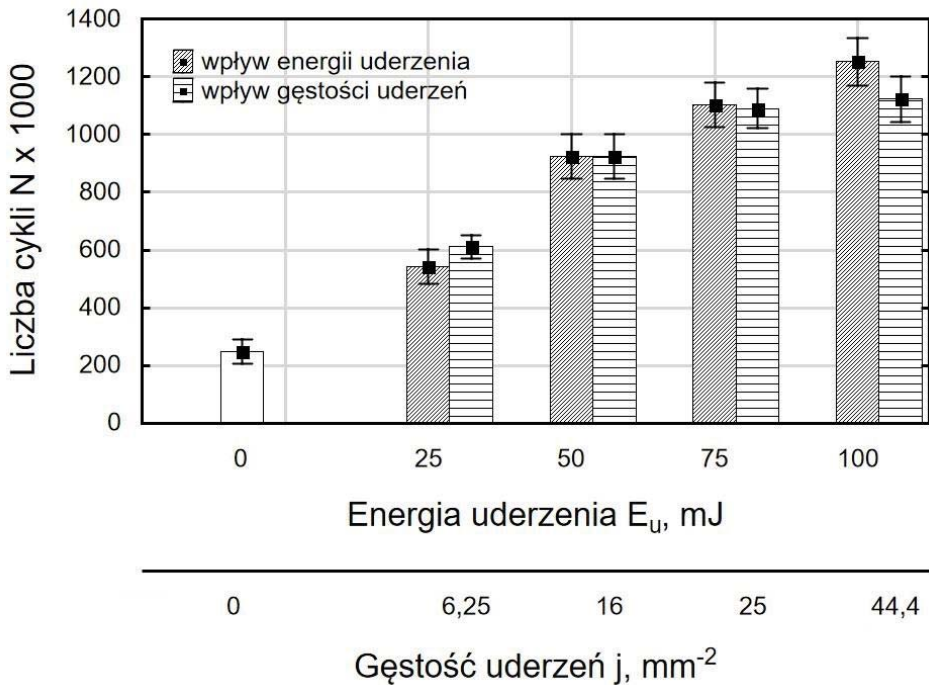
Niecelowe jest nadmierne wydłużanie czasu nagniatania. Badania przeprowadzone na próbkach ze stopu tytanu WT 22 (oznaczenie rosyjskie), które zostały poddane nagniataniu wibracyjnemu z dużą częstotliwością drgań (60Hz) na stanowisku wyposażonym w wibrator bezwładnościowy, wykazały, że największą trwałość zmęczeniową można uzyskać dla próbek nagniatanych w czasie 25 minut. Zwiększenie czasu nagniatania do 125 minut spowodowało zmniejszenie trwałości zmęczeniowej o około 14% (rys. 6.4) [119].



Rys. 6.4. Wpływ wydłużonego czasu nagniatania wibracyjnego próbek ze stopu tytanu WT 22 na trwałość zmęczeniową [119]

Wpływ warunków nagniatania dynamicznego na trwałość zmęczeniową może być analizowany w funkcji parametrów technologicznych, przeważnie związanych z parametrami pracy urządzeń do nagniatania, takich jak ciśnienie powietrza i odległość dyszy od obrabianej powierzchni w przypadku nagniatania strumieniowego oraz amplituda i częstotliwość drgań stołu wibratora podczas nagniatania wibracyjnego. Zastosowanie kontrolowanego nagniatania dynamicznego rozproszonego (KNDR) umożliwia ilościową analizę trwałości zmęczeniowej, podobnie jak właściwości warstwy wierzchniej, w funkcji parametrów procesu NDR, takich jak energia uderzenia oraz gęstość uderzeń. Wpływ energii uderzenia i gęstości uderzeń próbek ze stopu tytanu Ti6Al4V obrobionych metodą KNDR na trwałość zmęczeniową (próbki obustronnie, cyklicznie zginano) przedstawiono na rys. 6.5 [197].

Wzrost zarówno energii uderzenia jak i gęstości uderzeń elementu nagniatającego powoduje poprawę trwałości zmęczeniowej próbek obrobionych metodą KNDR. W stosunku do próbek nienagniatanych trwałość zmęczeniowa próbek nagniatanych była większa, w zależności od parametrów KNDR, od 124% do 406%. W badanym zakresie parametrów KNDR w większym stopniu na trwałość zmęczeniową wpływa energia uderzenia niż gęstość uderzeń (przy 4-krotnym wzroście energii uderzenia nastąpił wzrost trwałości zmęczeniowej o 126%, natomiast 7,5-krotne zwiększenie gęstości uderzeń spowodowało zwiększenie tej trwałości o 81%) [197].



Rys. 6.5. Wpływ energii uderzenia i gęstości uderzeń na trwałość zmęczeniową próbek ze stopu tytanu Ti6Al4V obrobionych kontrolowanym nagniataniem dynamicznym rozproszonym (średnica kulki nagniatającej – 6 mm) [197]

Porównując otrzymane wyniki z wynikami badań trwałości zmęczeniowej próbek nagniatanych wibracyjnie można zauważyć, że na trwałość zmęczeniową w większym stopniu wpływa amplituda drgań niż czas nagniatania. Zatem, widoczny jest związek między amplitudą drgań a energią uderzenia oraz między czasem nagniatania a gęstością uderzeń. W największym stopniu na trwałość zmęczeniową wpływa częstotliwość drgań wibratora, gdyż zwiększeniu częstotliwości towarzyszy wzrost zarówno energii uderzenia jak i gęstości uderzeń.

Wytrzymałość zmęczeniową elementów maszyn można zwiększyć również poprzez szcztokowanie. Przykładowo, próbki ze stali nierdzewnej AISI 304 poddane obróbce szcztokowaniem szcztką walcową o średnicy włókna 0,1 mm wykazywały wytrzymałość zmęczeniową o około 27% większą w porównaniu z próbkami nieszcztkowanymi [28].

Z wyników badań doświadczalnych prowadzonych, na ogół, na próbkach można wnioskować o korzystnym wpływie dynamicznego nagniatania rozproszonego na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową. Wyniki te potwierdzone zostały badaniami przeprowadzonymi na konkretnych elementach. Jako przykłady takich elementów można wymienić:

- dyski kompresora silnika lotniczego [129],

- elementy układu zawieszenia pojazdów mechanicznych (pióra resorów, listwy wałków skrętnych) [117],
- dźwignie drążka układu kierowniczego samochodu, koła zębate, sprężyny zaworowe, korbowody do agregatów prądotwórczych, bębny kół samolotów, wały korbowe, żerdzie wiertel górniczych [105],
- zęby sprężynowe kultywatora [146],
- zestawy kołowe pojazdów szynowych [54],
- odlewane korpusy żeliwne [161].

Z podanych wyżej przykładów wynika, że nagniatanie dynamiczne, jako obróbka zwiększająca wytrzymałość zmęczeniową, jest stosowane głównie w przemyśle samochodowym i lotniczym, a ponadto jako obróbka umacniająca elementów maszyn rolniczych, pojazdów szynowych i narzędzi górniczych.

6.2. Zużycie tribologiczne

Zużywanie tribologiczne współpracujących elementów jest to wywołany tarcie proces zmian zachodzących w warstwie wierzchniej tych elementów, których skutkiem jest ubytek masy lub trwałe odkształcenia powierzchni. Zużywanie to występuje zawsze przy tarcu suchym i mieszanym, niekiedy może też występować w przypadku tarcia płynnego. Zużycie jest skutkiem procesu zużycia [71].

Zużycie jest jedną z głównych przyczyn zmniejszania trwałości elementów maszyn, dlatego przeciwdziałać zużyciu należy na etapie konstruowania, technologii i eksploatacji maszyn. Do technologicznych sposobów przeciwdziałania zużyciu można zaliczyć obróbkę cieplną i cieplno – chemiczną, nanoszenie powłok i pokryć, fizyczne i chemiczne metody tworzenia powłok z fazy gazowej, implantację jonów, a także nagniatanie [71].

Odporność na zużycie zależy od właściwości warstwy wierzchniej elementów pary tarczej, a w szczególności od kształtu i wysokości mikronierówności powierzchni, stopnia umocnienia WW i rozkładu naprężeń własnych [126, 145]. Czynnikiem wpływającym na zużycie jest nośność materiałowa profilu chropowatości ze względu na jej wpływ na wyężenie WW, a tym samym na możliwość pojawienia się lokalnych odkształceń trwałych lub pęknięć [20]. Zwiększenie mikrotwardości WW oraz ukształtowanie ściskających naprężeń własnych wpływa na uodpornienie współpracujących elementów na zużywanie się [145]. Ze wzrostem zgniotu zwiększa się swobodna energia powierzchniowa, czego efektem jest zmniejszenie statycznego kąta zwilżania powierzchni, np. próbek stalowych olejem [165]. Poprawa zwilżalności zwiększa skuteczność smarowania i może przyczynić się do zwiększenia odporności na zużycie i zacieranie.

Wzrost odporności na zużycie współpracujących ze sobą elementów maszyn można uzyskać w wyniku poddania tych elementów różnym sposobom nagniatania dynamicznego. Przykładowo, badania wpływu nagniatania impulsowego

na łączne zużycie wężła tribologicznego, składającego się z panewki wykonanej z brązu B101 i czopa ze stali 40HM, smarowanego zanurzeniowo w oleju, umożliwiły optymalizację stopnia pokrycia powierzchni odciskami elementu nagniatającego oraz parametrów pracy pary kinematycznej. Najmniejsze zużycie, wynoszące 88 μm , uzyskano dla powierzchni panewki, której stopień pokrycia był równy 25,9% [62].

Uzyskano też zmniejszenie zużycia wskutek nagniatania impulsowego powierzchni wewnętrznych próbek w kształcie pierścieni wykonanych ze stali C45 w stanie normalizowanym. Parę trącą stanowił wycinek pierścienia badanej próbki oraz walcowa przeciwpróbka, a strefa tarcia była w sposób ciągły smarowana olejem silnikowym. Oceniane metodą wagową zużycie próbek nagniatanych było o (40 ÷ 60)% mniejsze od zużycia próbek nienagniatanych [216].

Korzystny wpływ na współpracę pary trącej w środowisku oleju mają rowki i wgłębienia ukształtowane na powierzchniach elementów trących. Stosując nagniatanie można uzyskać różny kształt i układ wgłębień [31]. We wgłębieniach na powierzchniach trących, nazywanych „kieszeniami smarowymi”, utrzymuje się olej podczas tarcia, przez co poprawiane są warunki smarowania (należy też uwzględnić wzrost nacisków jednostkowych spowodowany zmniejszeniem pola kontaktu). Ponadto na dnie wgłębień mogą gromadzić się produkty zużycia, co zmniejsza niebezpieczeństwo uszkodzenia współpracujących powierzchni. Efektem wprowadzenia wgłębień jest zwiększenie odporności na zużycie oraz na zatarcie [30, 65]. Skuteczność oddziaływania „kieszeni smarowych” stwierdzono również w przypadku smarowania olejem zanieczyszczonym cząstkami Al_2O_3 [135].

Odporność na zużycie zależy też od warunków technologicznych nagniatania odśrodkowego (NDSO). Badania przeprowadzone na próbkach z żeliwa 150 wykazały, że w wyniku nagniatania odśrodkowego próbek w kształcie walca uzyskano zmniejszenie zużycia liniowego, które wynosiło od 23% do 65%, w zależności od parametrów technologicznych nagniatania i używanej cieczy obróbkowej (olej z różnymi dodatkami) [152].

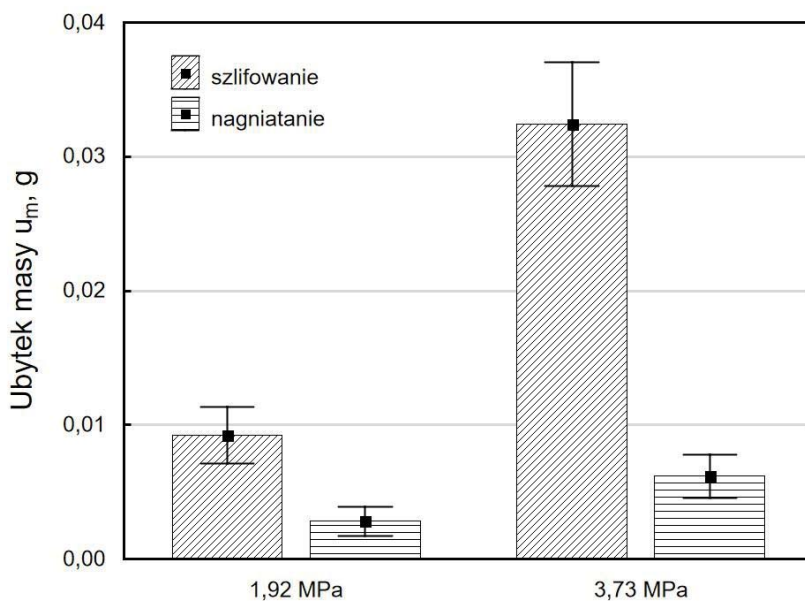
Również nagniatanie strumieniowe (NDRS) może być z powodzeniem stosowane jako obróbka zwiększająca odporność na zużycie. Po nagniataniu metodą pneumatyczną śrutem ze spiekanych węglików wolframu o średnicy 0,9 mm, stosując ciśnienie powietrza 0,3 MPa, próbek ze stali 40HM azotowanych gazowo (efektywna grubość warstwy azotowanej była równa 0,15 mm) nastąpiło znaczne zmniejszenie zużycia w stosunku do próbek nienagniatanych, po 100-u minutach tarcia zużycie liniowe próbek nagniatanych było o około 50% mniejsze od zużycia próbek nienagniatanych przy nacisku jednostkowym 200 MPa i około 55% – przy nacisku 400 MPa [106].

Odporność na zużycie stopu tytanu Ti6Al4V można zmniejszyć stosując nagniatanie strumieniowe oraz nawęglanie plazmowe. W wyniku nagniatania na urządzeniu pneumatycznym kulkami o średnicy 70 μm , uderzającymi w obra-

bianą powierzchnię z prędkością 170 m/s, uzyskano zmniejszenie zużycia badanych próbek o 17%, wskutek nawęglania plazmowego zmniejszenie zużycia było równe 46%, a po nawęglaniu i nagniataniu – 53% [151].

Nagniatanie dynamiczne wpływa też na odporność na zatarcie. Po nagniataniu wibracyjnym próbek ze stali C45 uzyskano niewielki wzrost drogi tarcia do wystąpienia zatarcia, wynoszący około 13% w stosunku do próbek szlifowanych. Natomiast bardzo korzystne pod względem odporności na zatarcie okazało się nagniatanie wibracyjne kulkami stalowymi w roztworze tiosiarczanu sodu (uzyskano ponad 2-krotny wzrost drogi tarcia) [115].

Wpływ nagniatania wibracyjno-rotacyjnego, charakteryzującego się połączeniem ruchu wibracyjnego komory roboczej z ruchem obrotowym przedmiotu obrabianego, na zużycie masowe obrabianych próbek przedstawiono na rys. 6.6. Próbki ze stali C45 w kształcie pierścieni nagniatano kulkami stalowymi o średnicy 6 mm, w czasie 20 minut, przy amplitudzie drgań wibratora 60 mm i prędkości obrotowej przedmiotu 1,5 obr/min na stanowisku pokazanym na rys. 4.25. Zużycie próbek badano na stanowisku przedstawionym na rys. 2.12, stosując do smarowania olej HIPOL GL4. Próbki zużywano przy nacisku 1,92 MPa oraz 3,73 MPa [198].

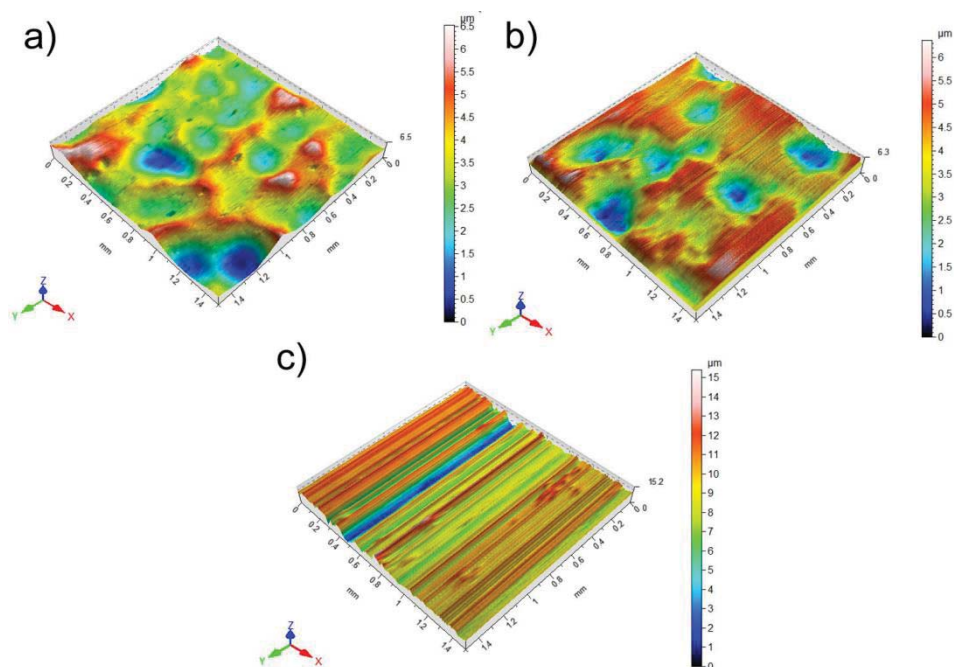


Rys. 6.6. Wpływ nacisku na zużycie próbek szlifowanych i nagniatanych wibracyjno-rotacyjnie [198]

Widoczne jest wyraźnie mniejsze zużycie próbek nagniatanych w porównaniu ze szlifowanymi, co jest związane ze zmniejszeniem chropowatości po-

wierzchni po nagniataniu oraz ukształtowaniem ściskających naprężeń własnych [198]. Zwiększenie nacisku przeciwpróbki na próbkę z 1,92 MPa do 3,73 MPa spowodowało znaczący wzrost zużycia, szczególnie widoczny w przypadku próbek szlifowanych (ponad 3-krotny).

Na rys. 6.7 przedstawiono topografię powierzchni próbek po nagniataniu wi-
bracyjno-rotacyjnym oraz po nagniataniu i zużywaniu. Na powierzchni nagniatanej widoczne są wgłębienia po uderzeniach kulek nagniatających, które mogą pełnić funkcję „kieszni smarowych”. Na powierzchniach nagniatanych i zuży-
wanych widoczne są ślady współpracy z przeciwpróbką, przy czym zużywanie przy nacisku 1,92 MPa nie doprowadziło do całkowitego usunięcia z powierzchni próbki wgłębień po nagniataniu.



Rys. 6.7. Topografia powierzchni próbek po nagniataniu wibracyjno-rotacyjnym (a) oraz po nagniataniu wibracyjno-rotacyjnym i zużywaniu przy nacisku 1,92 MPa (b) i 3,73 MPa (c) [198]

Jednym z rodzajów zużycia tribologicznego jest fretting. Zużycie frettingowe następuje wskutek niszczenia warstw wierzchnich stykających się elementów wykonujących względem siebie oscylacyjne mikroprzemieszczenia, spowodowane drganiami lub ruchami roboczymi zespołu maszynowego, w którego skład te elementy wchodzi. Proces niszczenia następuje wskutek szczepiania i odrywania cząstek materiału warstwy wierzchniej elementu oraz utleniania i odrywania cząstek tlenków [71].

Zwiększenie odporności elementów maszyn na fretting można uzyskać w wyniku przeprowadzenia nagniatania dynamicznego stykających się powierzchni tych elementów. Przykładowo, kilkukrotne zwiększenie trwałości elementów pracujących w warunkach zużywania frettingowego w wyniku nagniatania strumieniowego uzyskano dla stopu tytanu Ti6Al4V [75]. Zauważono, że wskutek frettingu następuje relaksacja ściskających naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek ze stopu Ti6Al4V, ukształtowanych w procesie nagniatania dynamicznego [89].

Korzystny wpływ nagniatania strumieniowego próbek ze stopu Ti6Al4V na zużycie poprzez fretting następuje przy frettingu długotrwałym, natomiast przy frettingu krótkotrwałym zaobserwowano wzrost zużycia frettingowego. Określono optymalną ze względu na fretting intensywność nagniatania dynamicznego, która wynosiła $f_A = 0,3$ mm [166].

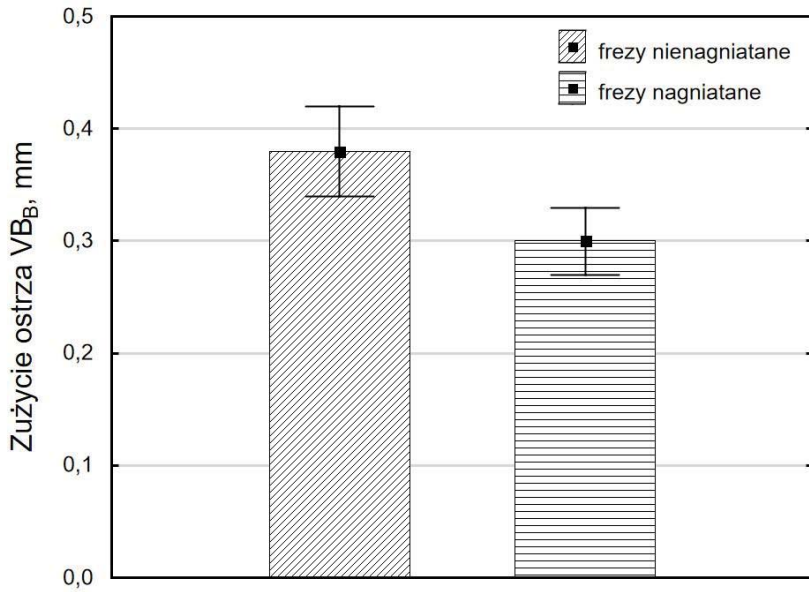
Jako praktyczny przykład zastosowania nagniatania do zwiększania odporności na fretting można podać nagniatanie strumieniowe otworu łożyskowego korbowodu, przeprowadzone kulistym śrutem stalowym o średnicy $(0,5 \div 0,8)$ mm w czasie 6 minut, przy ciśnieniu powietrza $(0,59 \div 0,69)$ MPa [102].

6.3. Zużycie i trwałość narzędzi

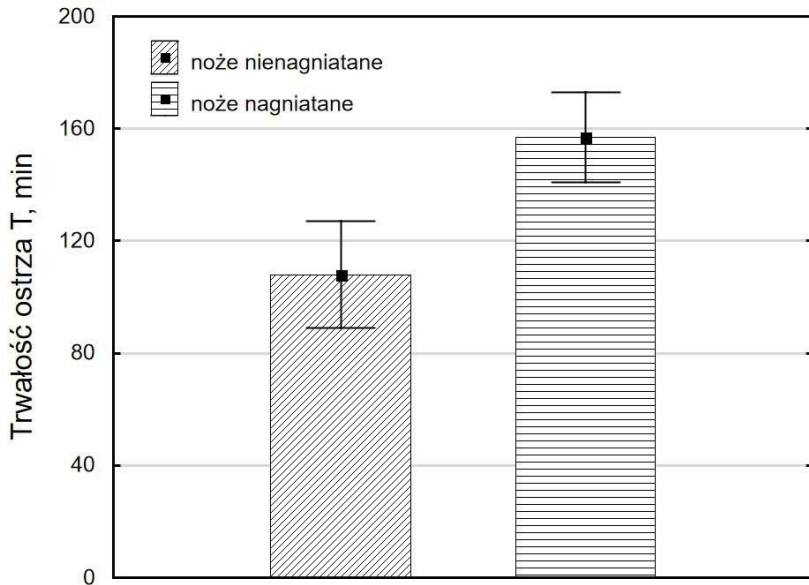
Zużywanie ostrzy narzędzi skrawających jest procesem złożonym, może mieć charakter zarówno tribologiczny jak i wytrzymałościowy. Ostrze skrawa w wysokiej, zmiennej temperaturze, obciążone jest zmiennymi siłami, naciski działające na ostrze wielokrotnie przekraczają naciski stosowane w budowie maszyn. Proces tribologicznego zużywania się ostrza może następować wskutek ścierania mechanicznego, zużywania adhezyjnego i dyfuzyjnego, utleniania. Zużycie może też nastąpić wskutek przekroczenia wytrzymałości doraźnej lub zmęczeniowej. Zmniejszenie zużycia ostrza narzędzi można uzyskać poddając powierzchnie robocze tych narzędzi nagniataniu dynamicznemu.

Na rys. 6.8 przedstawiono wpływ nagniatania wibracyjno-rotacyjnego frezów walcowych ze stali szybko tnącej na zużycie ostrza po frezowaniu stali 14HG. Mierzono średnią szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia VB_B po 150 minutach skrawania. Zużycie frezów nagniatanych było o 21% mniejsze niż frezów nienagniatanych [171].

Uzyskano też wzrost trwałości ostrza kształtowych noży tokarskich w wyniku nagniatania wibracyjnego, który wyniósł około 40% (rys. 6.9). Wzrost ten można tłumaczyć zwiększeniem mikrotwardości warstwy wierzchniej oraz zmniejszeniem chropowatości powierzchni [184].



Rys. 6.8. Wpływ nagniatania wibracyjno-rotacyjnego na zużycie ostrza frezów walcowych [171]



Rys. 6.9. Wpływ nagniatania wibracyjnego na trwałość ostrza kształtowych noży tokarskich [184]

Nagniataniem dynamicznym można zwiększyć również trwałość narzędzi o ostrzach z węglików spiekanych. Po nagniataniu strumieniowym ze znacznym ciśnieniem powietrza, wynoszącym $(0,5 \div 0,8)$ MPa, w czasie $(1 \div 4)$ minut płytek z węglików spiekanych, które zostały użyte do toczenia stali, uzyskano $(2 \div 5)$ -krotne zwiększenie trwałości ostrza. Wzrost trwałości ostrza, chociaż mniejszy, uzyskano również po nagniataniu impulsowym [13].

Nagniatanie strumieniowe jest efektywnym sposobem zwiększania trwałości narzędzi do obróbki plastycznej, co wykazano na przykładzie matrycy do kucia na gorąco, wykonanej ze stali 5CrNiMo. Matrycę nagniatano kulistym śrutem stalowym, stosując zmienne parametry technologiczne. Zaleca się następujące wartości parametrów nagniatania: średnica kulek $D = (0,4 \div 0,6)$ mm, prędkość kulek $v = (50 \div 75)$ m/s, stopień pokrycia $K_o = (100 \div 150)$ %. Eksperymentalnie stwierdzono, że po nagniataniu nastąpiło zmniejszenie zużycia masowego matrycy o 54% w przypadku nie używania smaru i o 63% gdy stosowano smar grafitowy [50].

6.4. Korozja

Stopniowe niszczenie materiału wskutek korozji jest wywołane działaniem środowiska chemicznego (korozja chemiczna) lub przepływem prądu elektrycznego powstałego w wyniku zetknięcia się powierzchni metalu lub stopu z roztworami wodnymi (korozja elektrochemiczna). Korozja może zachodzić w następstwie działania, oprócz środowiska chemicznego lub elektrochemicznego, również innych czynników, np. naprężeń wywołanych zewnętrznymi obciążeniami mechanicznymi (korozja naprężeniowa), naprężeń powstających wskutek obciążeń zmiennych (korozja zmęczeniowa), czy ścieranie przez inne ciało stałe (korozja cierna).

Na odporność korozyjną elementów maszyn ma wpływ, między innymi, proces ich wytwarzania. Wpływ nagniatania dynamicznego na odporność korozyjną obrabianych przedmiotów jest zagadnieniem dość złożonym. Korozja zależy zarówno od stanu powierzchni jak i zgniotu warstwy wierzchniej przedmiotów po nagniataniu.

Wzrost chropowatości powierzchni powoduje rozwinięcie powierzchni narażonej na oddziaływanie czynników korozyjnych. Na ogół po nagniataniu dynamicznym następuje zmniejszenie chropowatości powierzchni, ale możliwe jest również, w zależności od warunków technologicznych, zwiększenie chropowatości, np. po nagniataniu strumieniowym śrutem ciętym z drutu. Zaletą ND jest możliwość zmniejszenia albo całkowitego usunięcia wad powierzchniowych (mikropęknięcia, rysy itp.), w których rozwija się korozja. Panuje pogląd, że czynnikiem sprzyjającym korozji jest zgniot materiału. Poszczególne kryształy odkształcają się w różnym stopniu, a związku z tym, pojawia się różnica poten-

cjałów elektrycznych między nimi, co przyspiesza procesy korozyjne [126]. Zgniot materiału powoduje też wzrost podatności na nawodorowanie [102].

Niejednoznaczność wpływu nagniatania dynamicznego na odporność korozyjną obrabianych przedmiotów potwierdzają wyniki badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych.

Autorzy pracy [2], którzy badali wpływ nagniatania strumieniowego kulkami o średnicy ($125 \div 850$) μm na odporność korozyjną stali nierdzewnej 316L stwierdzili, że wskutek nagniatania nastąpiło zmniejszenie odporności korozyjnej. Również nagniatanie stopu magnezu AZ 31 kulkami ceramicznymi o średnicy 0,85 mm, z intensywnością $f_N = 0,042$ mm, zapewniające 100- procentowy stopień pokrycia, wpłynęło niekorzystnie na odporność korozyjną [96].

Skutkiem nagniatania dynamicznego może też być wzrost odporności korozyjnej nagniatanego przedmiotu. W pracy [128] podano wyniki badań korozji austenitycznej stali nierdzewnej 316L po szczotkowaniu nagniatającym szczotką walcową o średnicy 150 mm, z włóknami o średnicy 0,1 mm. Prędkość obrotową szczotki zmieniano w zakresie od 280 obr/min do 900 obr/min. Stwierdzono, że ND wpłynęło na poprawę odporności obrabianego stopu na korozję wżerową w wodzie morskiej.

Wzrost odporności na korozję uzyskano też dla połączeń spawanych stali austenitycznej 904L, które poddane zostały nagniataniu strumieniowemu kulkami o średnicy 0,8 mm w czasie 6 minut. Zauważono, że wskutek nagniatania powstaje warstwa pasywna, która blokuje rozwój korozji próbek badanych w 5-procentowym roztworze chlorku sodu [109].

Badania porównawcze korozji próbek ze stali C45 obrabianych różnymi sposobami omówiono w pracy [115]. Z badań tych wynika, że stopień skorodowania powierzchni po nagniataniu wibracyjno-rotacyjnym kulkami stalowymi uległ zmniejszeniu o 18% w porównaniu ze stopniem skorodowania powierzchni szlifowanej, a po nagniataniu kulkami szklanymi zmniejszenie stopnia skorodowania było równe 22%.

Nagniatanie dynamiczne wpływa też na wzrost wytrzymałości zmęczeniowej elementów narażonych na oddziaływanie środowiska korozyjnego. Przykładowo, nagniatanie strumieniowe próbek ze stali S235JR kulkami o średnicy ($0,5 \div 0,6$) mm, zapewniającym 150- procentowy stopień pokrycia, spowodowało wzrost wytrzymałości zmęczeniowej o 25% w stosunku do próbek nienagniatanych. Natomiast w przypadku próbek badanych w środowisku korozyjnym nagniatanie wpłynęło na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej o 12,5% w porównaniu z próbkami nienagniatanymi [102].

Również badania przeprowadzone na stali 50HS potwierdziły korzystny wpływ nagniatania dynamicznego na wytrzymałość zmęczeniową w warunkach oddziaływania ośrodka korozyjnego. Przygotowane do badań zmęczeniowych próbki nagniatano śrutem stalowym o średnicy 0,6 mm, przy ciśnieniu powietrza 0,45 MPa, w czasie 60 sekund, co zapewniało uzyskanie intensywności nagnia-

tania $f_A = 0,45$ mm i stopnia pokrycia ponad 100%. Stwierdzono, że szybkość korozji próbek nagniatanych była o 26% mniejsza od próbek szlifowanych, pomimo 5-krotnego wzrostu chropowatości powierzchni. Ponadto, oddziaływanie ośrodka korozyjnego na próbki nagniatane nie wpłynęło na obniżenie granicy wytrzymałości zmęczeniowej w porównaniu z próbkami nienagniatanymi [104].

6.5. Inne właściwości użytkowe nagniatania dynamicznego

Warstwa wierzchnia ukształtowana w procesie nagniatania dynamicznego może mieć wpływ również na inne, poza wymienionymi w podrozdziałach 6.1 ÷ 6.4, właściwości technologiczne oraz użytkowe obrabianych przedmiotów. Do właściwości tych można zaliczyć:

- korzystne oddziaływanie na kinetykę wzrostu warstwy azotowanej,
- zapobieganie mikropęknięciom szlifierskim,
- poprawę właściwości adhezyjnych powierzchni,
- uzyskanie efektów dekoracyjnych powierzchni.

Badania kinetyki wzrostu warstwy azotowanej przeprowadzono na próbkach ze stali 40HM ulepszonej cieplnie do twardości (29 ÷ 30) HRC. Przed azotowaniem gazowym część próbek poddano nagniataniu strumieniowemu przy ciśnieniu powietrza (0,35 ÷ 0,45) MPa w czasie 180 sekund. Wzrastająca wskutek ND gęstość defektów struktury krystalicznej ułatwia dyfuzję atomów azotu, co wpływa na przyspieszenie kinetyki wzrostu warstwy dyfuzyjnej i umocnienie warstwy wierzchniej [85].

Powstające wskutek szlifowania rozciągające naprężenia własne mogą być przyczyną wystąpienia mikropęknięć w WW obrabianego przedmiotu. Naprężenia te mogą być skompensowane przez ściskające naprężenia własne ukształtowane podczas, poprzedzającej szlifowanie, obróbki nagniataniem dynamicznym. Doświadczalnie potwierdzono, że w próbkach ze stali 15HN, które były nagniatane strumieniowo kulistym śrutem stalowym o średnicy (0,8 ÷ 1) mm a następnie szlifowane, powstały naprężenia własne ściskające lub niewielkie rozciągające [124].

Właściwości adhezyjne powierzchni mają wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych. Właściwości te zależą od sposobu i warunków technologicznych obróbki. Na podstawie badań wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych, wykonanych za pomocą kleju Epidian 5 z utwardzaczem PAC, próbek z blachy ze stali S235JR o grubości 2 mm, obrobionych różnymi sposobami, stwierdzono, że najlepsze rezultaty otrzymano dla próbek obrobionych piaskowaniem i śrutowaniem. Piaskowanie przeprowadzono za pomocą kulek z elektrokorundu 95A o ziarnistości 60, stosując ciśnienie powietrza 0,7 MPa. Natomiast do śrutowania używano śrutu ciętego z drutu stalowego o wymiarze 0,36 mm, uderzającego w obrabianą powierzchnię z prędkością 78 m/s, czas obróbki tak dobrano, aby zapewnić 100 procentowy stopień pokrycia [80].

Nagniatanie może być stosowane w celu uzyskania określonych właściwości dekoracyjnych wytwarzanych przedmiotów. Najczęściej stosowanym sposobem nagniatania w charakterze obróbki dekoracyjnej jest nagniatanie oscylacyjne, które z powodzeniem zastępuje polerowanie lub grawerowanie [126]. Szerokie możliwości kształtowania odcisków powstających na obrabianej powierzchni daje nagniatanie impulsowe (NDSI). Poza wgłębieniami sferycznymi można wygniatać, w zależności od kształtu elementu nagniatającego, odciski w kształcie kropli o różnej długości, elipsy i inne. Duże są też możliwości kształtowania wzajemnego układu odcisków. Można tworzyć struktury niestykające się, stykające się, nakładające się, siatkowe [31, 147]. Nagniataniem dynamicznym można kształtować różne powierzchnie pod względem ich estetyki, uzyskując różne ich walory dekoracyjne.

LITERATURA

1. Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni*. WNT, Warszawa 2008.
2. Ahmed A.A., Mhaede M., Basha M., Wollman M., Wagner M.: *The effect of shot peening parameters and hydroxyapatite coating on surface properties and corrosion behavior of medical grade AISI 316L stainless steel*. *Surface & Coatings Technology* 280 (2015), 347–358.
3. Almen J.O.: *Improving fatigue strength of machine parts*. *The Iron Age*. June 10 (1943), 65–69, 125.
4. Almen J.O.: *Peened surfaces improve endurance of machine parts*. *Metal Progress*. February (1943), 209–215.
5. Andrzejewski M., Wieczorowski K.: *Ocena niektórych własności fizycznych warstwy wierzchniej i ich wpływ na trwałość eksploatacyjną przedmiotów nagniatanych wibracyjnie*. Materiały III Konferencji N-T „Technologia obróbki przez nagniatanie”. AT-R Bydgoszcz, 1984, 5–13.
6. Apachitei I., Leoni A., Riemsdag A.C., Fratila – Apachitei L.E., Duszczyk J.: *Enhanced fatigue performance of Poros coated Ti6Al4V biomedical alloy*. *Applied Surface Science* 257 (2011), 6941–6944.
7. Arasimowicz A., Dmowska A., Nowicki B., Podolak-Lejtas A.: *Kompensacja negatywnych aspektów stanu warstwy wierzchniej przez obróbkę powierzchniową zgniotem elementów obrabianych elektroiskrowo*. [W:] Przybylski W. (red.): *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*. T. 3. Wyd. KTMiAP Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011, 292–306.
8. Azar V., Hashemi B., Yazdi M.R.: *The effect of shot peening on fatigue and corrosion behavior of 316L stainless steel in Ringer's solution*. *Surface & Coatings Technology* 204 (2010), 3546–3551.
9. Banaś G., Laber S., Laber A.: *Wpływ parametrów kulowania udarowego na własności warstwy wierzchniej żeliwa Zl25+Cu*. *Mechanik*. 12 (1975), 630–633.
10. Birger I.A.: *Ostatočnye napriazhenija*. Mašgiz, Moskva 1963.
11. Bławucki S., Zaleski K.: *Modelowanie odkształceń mikronierówności powierzchni wskutek uderzenia kulką*. *Przegląd Mechaniczny*. Vol. 75, 9 (2016), 30–33.
12. Bławucki S., Zaleski K.: *The effect of the aluminum alloy surface roughness on the restitution coefficient*. *Advances in Science and Technology Research Journal*. Vol. 9, No. 27, (2015), 66–71.
13. Bromberek F., Kozłowski M.: *Nagniatanie dynamiczne węglików spiekanych*. *Przegląd Mechaniczny*. 3 (1986), 26–27.
14. Buch A.: *Zastosowanie zgniotu powierzchniowego do podwyższenia wytrzymałości zmęczeniowej części maszyn*. *Biuletyn IMP*. Nr 4/30, (1962), 20–38.
15. Buckley D.H.: *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam – Oxford – New York 1981.
16. Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*. WNT, Warszawa 1995.
17. Carvalho A.L.M., Voorwald H.J.C.: *Influence of shot peening and hard chromium electroplating on the fatigue strength of 7050-T7451 aluminium alloy*. *International Journal of Fatigue*. 29 (2007), 1282–1291.

18. Champaigne J.: *History of shot peening specifications*. The Shot Peener Magazine. Vol. 20 (2006) 2, 12–38.
19. Chmielewski K., Grochała D., Olszak W.: *Wpływ strategii nagniatania narzędziami hydrostatycznymi po frezowaniu stali 42CrMo4 o twardości 35 HRC na chropowatość powierzchni*. Mechanik 8-9 (2012) 661, 479–486.
20. Czarnecki H.: *Nośność materiałowa profilu chropowatości w aspekcie wyężenia warstwy wierzchniej*. Tribologia 2 (2008), 117–125.
21. Dąbrowski J., Firkowski A., Gierzyńska-Dolna M.: *Ciecze obróbkowe do skrawania metali*. WNT, Warszawa 1988.
22. Drechsler A., Dorr T., Wagner L.: *Mechanical surface treatments on Ti-10V-2Fe-3Al for improved fatigue resistance*. Material Science and Engineering A 243 (1998), 217–220.
23. Dryzek J.: *Badania defektów sieci krystalicznej metodą anihilacji pozytonów*. Wyd. Instytutu Fizyki Jądrowej, Kraków 1994.
24. Dybiec C.: *Ocena efektów kulowania sprężyn zaworowych wykonanych ze stali 50HFA*. Biuletyn Instytutu Mechaniki Precyzyjnej 2/32 (1963), 72–81.
25. Dzierwa A.: *Kulowanie jako metoda poprawy wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów z powłokami chromowymi*. [W:] Przybylski W. (red.): *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*. T. 2. Wyd. KTMiAP Politechnika Gdańska, Gdańsk 2008, 241–248.
26. Evans R.W.: *Shot peening process: modelling, verification, and optimization*. *Materials Science and Technology*, August, 18 (2002), 831–839.
27. Ferri O.M., Ebel T., Borman R.: *High cycle fatigue behaviour of Ti-6Al-4V fabricated by metal injection moulding technology*. *Materials Science and Engineering A* 504 (2009), 107–113.
28. Fredj N.B., Nasr M.B., Rhouma A.B., Braham C., Sidhom H.: *Fatigue life improvements of the AISI stainless steel ground surfaces by wire brushing*. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol.13 (5) October (2004), 564–574.
29. Gabryszewski Z., Gronostajski J.: *Mechanika procesów obróbki plastycznej*. PWN, Warszawa 1991.
30. Galda L., Dzierwa A., Sep J., Pawlus P.: *the effect of oil pockets shape and distribution on seizure resistance in lubricated sliding*. *Tribology Letters* 37 (2010), 301–311.
31. Gałda L., Stadnicka D.: *Możliwości kształtowania regularnej mikrogeometrii czopów łożysk ślizgowych w procesie obróbki nagniataniem udarowym*. *Tribologia* 3 (2004), 111–119.
32. Gambin W., Kowalczyk K.: *Plastyczność metali*. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2003.
33. Gao Y.-K., Lu F., Yin Y.-F., Yao M.: *Effects of shot peening on fatigue properties of OCr13Ni8Mo2Al steel*. *Materials Science and Technology*. Vol. 19, March (2003), 372–374.
34. Gao Y.-K., Yang Q.-X., Zhao Y.-H., Lu F., Wu X.-R.: *Influence of carburization followed by shot peening on fatigue property of 20CrMnTi steel*. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 14 (5), October (2005), 591–595.
35. Gesell W.: *Bedeutung und Anwendung des Kugelstrahlens*. *Zeitschrift fuer Wirtschaftliche Fertigung* 67/11 (1972), 611–616.

36. Gorjunov Ju.V., Percov N.V., Summ B.D.: *Effekt Rebindera*. Izdatelstvo „Nauka”, Moskva 1966.
37. Gorohovskij G.A.: *Primenenie polimerov v obrabotke metallov, osnovyvyajuščeesja na principah fizyko – himičeskoj mehaniki*. [W:], Polimery v technologiczskich processah obrabotki metallov. „Naukova Dumka” Kiev 1977, 3–10.
38. Goworek T.: *Metoda anihilacji pozytonów w badaniach ciał stałych*. [W:], Subotowicz M. (red.): *Materiały doświadczalne w fizyce ciała stałego*. Wyd. UMCS Lublin 1976, 204–218.
39. Górecka R., Polański Z.: *Metrologia warstwy wierzchniej*. WNT, Warszawa 1983
40. Górski E.: *Obróbka gładkościowa*. WNT, Warszawa 1970.
41. Gryboś R.: *Teoria uderzenia w dyskretnych układach mechanicznych*. PWN, Warszawa 1969.
42. Guagliano M.: *Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach*. *Journal of Materials Processing Technology* 110 (2001), 277–286.
43. Harada Y., Fukuara K., Haga S.: *Influence of microshot peening on surface layer characteristics of structural steel*. *Journal of Materials Processing Technology*, 191 (2007), 297–301.
44. Harada Y., Mori K.: *Effect of processing temperature on warm shot peening of spring steel*. *Journal of Materials Processing Technology* 162-163 (2005), 498–503.
45. Hautojarvi P. (Ed.): *Positrons in solids*. Springer –Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, 1979.
46. Horsch Ch., Schulze V., Loehe D.: *Deburring and surface conditioning of micro milled structures by abrasive and non-abrasive micro-peening*. *Proceedings of the 9th International Conference on Shot Peening*. Paris, 2005, 191–196.
47. Hull D.: *Dyslokacje*. PWN, Warszawa 1982.
48. Jezierski J.: *Kulowanie odśrodkowe powierzchni wewnętrznych*. *Mechanik* 11 (1958), 539–544.
49. Jezierski J.: *Odśrodkowe kulowanie wałów i otworów*. *Mechanik* 11 (1958), 539–544.
50. Jia Z., Ji J.: *Influence analysis of shot peening on hot forging die*. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90 (2017), 1779–1787.
51. Kaczmarek J., Parol A.: *Badanie własności warstwy wierzchniej materiałów poddanych dogniataniu wibracyjnemu swobodnymi kulkami*. *Materiały Konferencji „Postępy w rozwoju badań z zakresu obróbki materiałów”*. Wyd. Politechniki Krakowskiej 1972, 27–49.
52. Kalinowski L.: *Fizyka metali*. PWN, Warszawa 1973.
53. Kamiński S., Kowalski M., Owsiański R., Łagoda T.: *Wpływ parametrów technologicznych procesu kulowania śrutem twardym na poziom naprężeń własnych*. *Mechanik* 11 (2016), 1710–1711.
54. Karwala K.: *Zastosowanie kulowania w technologii zestawów kołowych pojazdów szynowych*. *Inżynieria Powierzchni* 4 (2007), 57–61.
55. Kęsy M.: *Problemy kształtowania warstwy wierzchniej żeliwa szarego dynamicznymi metodami nagniatania*. *Inżynieria Materiałowa* 5 (2005), 755–757.

56. Klimas T.: Kulowanie części maszyn śrutem stalowym. *Przegląd Mechaniczny* 6 (1984), 25–26.
57. Klotz T., Delbergue D., Bocher P., Levesque M., Brochu M.: *Surface characteristics and fatigue behavior of shot peened Inconel 718*. *International Journal of Fatigue* 110 (2018), 10–21.
58. Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT, Warszawa 1978.
59. Kolman R.: *Mechaniczne wzmacnianie powierzchni części maszyn*. WNT, Warszawa 1965.
60. Kolman R.: *Nagniatanie czy dogniatanie?* *Mechanik* 7 (1971), 396.
61. Kolman R., Przybylski W., Kozłowski M.: *Terminologia i systematyka sposobów obróbki przez nagniatanie*. *Mechanik* 12 (1974), 706–707.
62. Korzyński M., Koszela W.: *Nagniatanie impulsowe powierzchni panewek w celu zmniejszenia zużycia tribologicznego*. [W:], Przybylski W. (red.): *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*. Wyd. KTMiAP Politechnika Gdańska, Gdańsk 2005, 185–190.
63. Korzyński M.: *Kulowanie strumieniowe kulkami szklanymi i łożyskowymi jako sposób poprawy wytrzymałości zmęczeniowej*. *ZN Politechniki Rzeszowskiej*, Nr 46, *Mechanika* z. 17 (1988), 25–31.
64. Korzyński M.: *Nagniatanie ślizgowe*. WNT, Warszawa 2007.
65. Koszela W., Gałda L., Dzierwa A., Pawlus P., Sęp J.: *Wpływ kieszeni smarowych na zatarcie pary ciernej stal – brąz*. *Tribologia* 3 (2009), 51–58.
66. Kowalski M., Kołodziej M.: *Analiza wpływu warunków szcztokowania na stan warstwy wierzchniej stopu magnezu AM60*. *Mechanik* 8-9 (2016), 1440–1441.
67. Kozłowski M.: *Stan obecny i zakres zastosowania obróbki przez nagniatanie*. *Mechanik* 1 (1976), 18–20.
68. Krzyś W., Życzkowski M.: *Sprężystość i plastyczność*. PWN, Warszawa 1962.
69. *Kronika techniki*. Wyd. „Kronika” – Marian B. Michalik, Warszawa 1992.
70. Kukiełka L.: *Podstawy badań inżynierskich*. PWN, Warszawa 2002.
71. Lawrowski Z.: *Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie*. PWN, Warszawa 1993.
72. Lihtman V.I., Rebinder P.A., Karpenko G.A.: *Vlijanie poverhnostno-aktivnoj sredy na processy deformacii metallov*. Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, Moskva 1954.
73. Lindemann J., Buque C., Appel F.: *Effect of shot peeling on fatigue performance of a lamellar titanium aluminida alloy*. *Acta Materialia* 54 (2006), 1155–1164.
74. Lipski J., Zaleski K.: *Modelling of surface layer past centrifugal burnishing*. The 2nd International Conference “Development of metal cutting”, Technical University of Košice 1998, 69–72.
75. Liu D., Tang B., Zhu X., Chen H., He J., Celis J.-P.: *Improvement of the fretting fatigue and fretting wear of Ti6Al4V by duplex surface modification*. *Surface and Coatings Technology*, 116–119 (1999), 234–238.
76. Loh N.H., Tam S.C.: *Statistical analyses of the effects of ball burnishing parameters on surface hardness*. *Wear* 129 (1989), 235–243.
77. Łunarski J., Cisek Z.: *Badania współczynnika restytucji w procesie kulowania stopów tytanu*. *ZN Politechniki Rzeszowskiej*, 83, *Mechanika* 29 (1991), 39–51.

78. Łunarski J.: *Możliwości technologiczne procesu pneumatyzacji. Mechanik* 2-3 (1989), 77–80.
79. Łunarski J.: *Problemy skuteczności pośredniego umacniania w procesie pneumatyzacji brył nieobrotowych. ZN Politechniki Rzeszowskiej*, 98, Mechanika 34 (1992), 47–56.
80. Łunarski J.: *Właściwości adhezyjne powierzchni stalowych po strumieniowym nagniataniu dynamicznym. ZN Politechniki Rzeszowskiej*, 130, Mechanika 43 (1994), 59–70.
81. Łunarski J.: *Właściwości fizyczne i użytkowe stopów tytanu po procesie nagniatania dynamicznego. Rozprawy 35. Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów* 1982.
82. Łunarski J.: *Wybrane zagadnienia teoretyczne procesu pneumatycznego kulowania dynamicznego. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń* 3-4 (1980), 3–11.
83. Łunarski J.: *Wytrzymałość zmęczeniowa doczołowych złączy spawanych ze stali 12H18N10T po pneumatyzacji. ZN Politechniki Rzeszowskiej*, 46, Mechanika 17 (1988), 77–87.
84. Łunarski J., Zielecki W.: *Ocena wytrzymałości zmęczeniowej stopów lotkowych po procesach implantacji i mikrokulowaniu. ZN Politechniki Rzeszowskiej*, 46, Mechanika 17 (1988), 109–118.
85. Łupicka O.: Ratajski J., Kukielka L.: *Rola warstwy wierzchniej, ukształtowanej w procesie nagniatania ślizgowego i kulowania, w kinetyce wzrostu warstwy azotowanej. Inżynieria Materiałowa* 5 (2005), 612–615.
86. Maawad E., Brokmeier H.-G., Wagner L., Sano Y., Genzel Ch.: *Investigation on the surface and near-surface characteristics of Ti-2.5Cu after various mechanical treatments. Surface & Coatings Technology* 205 (2011), 3644–3650.
87. Maleki E., Unal O., Kashyzadeh K.R.: *Effects of conventional, severe, over, and Re-shot-peening processes on the fatigue behavior of mild carbon steel. Surface & Coatings Technology* 344 (2018), 62–74.
88. Marciniak M., Stefko A., Szyrle W.: *Podstawy obróbki w wyłazarkach pojemnikowych. WNT, Warszawa* 1983.
89. Martinez S.A., Sathish S., Blodgett M.P., Mall S., Namjoshi S.: *Effects of fretting fatigue on the residual stress of shot peened Ti-6Al-4V samples. Materials Science and Engineering A* 399 (2005), 58–63.
90. Matuszak J., Zaleski K.: *Analiza sił w procesie obróbki krawędzi szczotkami ceramicznymi. ZN Politechniki Rzeszowskiej*, 295, Mechanika 89 (2017), 509–516.
91. Matuszak J., Zaleski K.: *Analysis of deburring effectiveness and Surface layer properties around edges of workpieces made of 7075 aluminium alloy. Aircraft Engineering and Aerospace Technology. Vol. 90, No. 3 (2018), 515–523.*
92. Matuszak J., Zaleski K.: *Badania właściwości warstwy wierzchniej po obróbce szczotkowaniem. [W:], Przybylski W. (red.): Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. T.3. Wyd. KTMiAP Politechnika Gdańska, Gdańsk* 2011, 307–318.
93. Matuszak J., Zaleski K.: *Dynamic diameter determination of circular brushes. Applied Mechanics and Materials* 791 (2015), 232–237.

94. Matuszak J., Zaleski K.: *Edge states after wire brushing of magnesium alloys*. Aircraft Engineering and Aerospace Technology. Vol. 86, No. 4 (2014), 328–335.
95. Matuszak J., Zaleski K.: *Usuwanie zadziorów po frezowaniu stopów aluminium i magnezu*. Politechnika Lubelska, Lublin 2016.
96. Mhaede M., Pastorek F., Hadzima B.: *Influence of shot peeling on corrosion properties of biocompatible magnesium alloy AZ31 coated by dicalcium phosphate dihydrate (DCPD)*. Materials Science and Engineering, C 39 (2014), 330–335.
97. Michalczyk J.: *Maszyny wibracyjne. Obliczenia dynamiczne, drgania, hałas*. WNT, Warszawa 1995.
98. Mises R.: *Mechanik der plastischen Formaenderung von Kristallen*. Zeitschrift fuer Angewandte Mathematik und Mechanik. Ingenieurwissenschaftliche Forschungsarbeiten. Band 8, Heft 3, Juni (1928), 161–185.
99. Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E.: *Przeróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne*. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1986.
100. Mueller C., Wagner L.: *Fatigue performance of light-weight alloys: Influence of shot peening and pre – corrosion*. Proceedings of the 9th International Conference on Shot Peening, Paris 2005, 288–295.
101. Muszyński J.: *Podwyższenie żywotności części maszyn poprzez kulowanie*. Mechanik 1 (1960), 23–26.
102. Nakonieczny A.: *Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna. Kulowanie*. Wyd. Instytutu Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 2002.
103. Nakonieczny A., Lamprecht E.: *Umacnianie uzębień nawęglanych kół zębatych metodą śrutowania*. Mechanik, 1 (1980), 21–22.
104. Nakonieczny A., Mońka G.: *Wpływ kulowania na wytrzymałość zmęczeniową stali sprężynowej po oddziaływaniu korozji*. Inżynieria Powierzchni 3 (2004), 14–19.
105. Nakonieczny A., Mońka G.: *Zastosowanie dynamicznej powierzchniowej obróbki plastycznej – kulowania w przemyśle obronnym*. Inżynieria Powierzchni 3 (2006), 3–11.
106. Nakonieczny A., Tacikowski J., Pokorska I., Mońka G.: *Możliwości umacniania warstw azotowanych metodą dynamicznej powierzchniowej obróbki plastycznej*. Inżynieria Materiałowa 6 (2008), 605–607.
107. Nakonieczny A.: *Umacnianie przez kulowanie*. Materiały Konferencji N-T „Wytwarzanie warstw powierzchniowych metali”, Rzeszów 1988, 154–161.
108. Nasiłowska B., Bogdanowicz Z., Brzeziński M., Mońka G., zasada D.: *Wpływ kulowania na strukturę, mikrotwardość i naprężenia własne stali austenitycznej 1.4539*. Biuletyn WAT. Vol. LXIV, Nr 2 (2015), 103–110.
109. Nasiłowska B., Bogdanowicz Z., Wojucki M.: *Shot peening effect on 904L welds corrosion resistance*. Journal of Constructional Steel research 115 (2015), 276–282.
110. Nowicki B., Podolak-Lejtas A.: *Investigations on the effect of combined EDM machining with burnishing process on the condition of the surface layer*. Advances in Manufacturing Science and Technology. Vol. 3, No. 4 (2008), 5–17.

111. Olejnik N.V., Kučin V.P., Lugovskoj A.L.: *Poverhnostnoe dinamičeskoe upročnenie detalej mašin*. Technika, Kiev 1984.
112. Ostapenko V.A., Lipsman D.L., Kulemin A.V., Maloletnev A.Ja.: *Sposob kontrolja drobneudarnogo upročnenija detalej*. Vestnik Mašinostroenienija 3 (1991), 55–56.
113. Ovseenko A.N., Maloletnev A.Ja., Ostapenko V.A., Kljušin A.R.: *Vlijanie drobestrurnogo i gidrodrobestrurnogo upročnienija na malociklovuju udarnuju ustalost vysokopročnoj stali*. Vestnik Mašinostroenienija, No 6 (1982), 35–37.
114. Pacana A.: *Chropowatość powierzchni otworów w stali 45 po pneumokulkowaniu*. ZN Politechniki Rzeszowskiej, 130, Mechanika 43 (1994), 49–54.
115. Parol A.: *Badanie wpływu obróbki umacniającej i gładkościowej na własności warstwy wierzchniej*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1988.
116. Parol A.: *Obróbka powierzchniowa dogniataniem*. Wyd. WSI Lublin 1977.
117. Parol A.: *Obróbka umacniająca elementów sprzężystych układu zawieszenia pojazdów mechanicznych*. ZN WSI w Lublinie, Mechanika (1975), 111–123.
118. Parol A., Zaleski K.: *Kulkowanie vibracyjne w wybranych roztworach polimerów*. Materiały IV Konferencji N-T „Technologia obróbki przez nagniatanie”. Bydgoszcz 1988, 67–74.
119. Parol A., Zaleski K.: *Podatność stopów tytanu na obróbkę nagniataniem*. [W:], Łunarski J. (red.): *Materiały Konferencji N-T „Wytwarzanie i zastosowanie elementów ze stopów tytanu”*, Rzeszów 1981, 117–121.
120. Parol A., Zaleski K.: *Stereometryczne własności warstwy wierzchniej stali 45 i stopu tytanu WT3-1 po kulkowaniu vibracyjnym*. Studia i materiały, t. 4, nr 1-2. Wyd. Gobi EN, Gorzów Wlkp. 1985, 561–571.
121. Perepička E.V.: *Očistno-upročnjajuščaja obrabotka izdelij ščetkami*. Mašinostroenie, Moskva 1989.
122. Piekarski R.: *Wyznaczanie naprężeń własnych w warstwie wierzchniej elementów maszyn ze stali 42CrMo4 poddanych kulowaniu strumieniowemu*. Mechanik 2 (2005), 102–106.
123. Polański Z.: *Metodyka badań doświadczalnych*. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1984.
124. Przybylski W.: *Metoda zapobiegania mikropęknięciom szlifierskim przez kompensację naprężeń technologicznych w warstwie wierzchniej*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 3-4 (1990), 39–55.
125. Przybylski W.: *Obróbka nagniataniem*. *Technologia i oprzyrządowanie*. WNT, Warszawa 1979.
126. Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. WNT, Warszawa 1987.
127. Pytko S., Pytko P.: *Napięcie powierzchniowe a efekt Rebintera*. Tribologia 3 (2007), 143–153.
128. Rhouma A.B., Braham C., Fitzpatrick M.E., Ledion J., Sidhom H.: *Effect of surface preparation on pitting resistance, residual stress, and corrosion cracking in austenitic stainless steel*. Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 10 (5) October (2001), 507–514.
129. Sahoo B., Satpathy R.K., Prasad K., Ahmad S., Kumar V.: *Effect of shot peening on low cycle fatigue life of compressor disc of a typical fighter class aeroengine*. Procedia Engineering 55 (2013), 144–148.
130. Saverin M.N.: *Drobestrurnyj naklep*. Mašgiz, Moskva 1955.

131. Schlatter A., Stoll H.J.: *Shot peening of gear components for the automotive industry*. [In:] Proceedings of the 9th International Conference on Shot Peening, Schulzę V, Nikulari A. (Ed.), Paris 2005, 42–47.
132. Schuh A., Holtzwarth U., Zeiler G., Kachler W., Goeske J., Knetsch T., Eigenmann B.: *Shot peening of a titanium alloy for medical implant applicatios with zirconia shot*. [In:] Proceedings of the 9th International Conference on Shot Peening, Schulzę V, Nikulari A. (Ed.), Paris 2005, 54–59.
133. Senczyk D.: *Badania składowych tensora naprężenia w technologicznej warstwie wierzchniej polikrystalicznych materiałów i części maszyn*. Tribologia 4 (1995), 327–334.
134. Senczyk D.: *Naprężenia własne. Wstęp do generowania, sterowania i wykorzystania*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1996.
135. Sep J., Pawlus P., Galda L.: *The effect of helical groove geometry on journal abrasive wear*. Archives of Civil and Mechanical Engineering. Vol. 13, 2, Jun (2013), 150–157.
136. Sep J.: *Wybrane właściwości warstwy wierzchniej po szczotkowaniu oczyszczającym – umacniającym*. ZN Politechniki Rzeszowskiej 83, Mechanika 29 (1991), 53–63.
137. Shchukin E.D.: *The influence of surface – active fluids on the mechanical properties of materials*. Advances in Colloid an Interface Science, 123-126 (2006), 33–37.
138. Skoczylas A., Zaleski K.: *Badania mikrotwardości warstwy wierzchniej stali C45 wycinanej laserem a następnie frezowanej nagniatanej odśrodkowo*. Mechanik 8-9 (2013) 711, 249–256.
139. Skoczylas A., Zaleski K.: *Badania właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu odśrodkowym przedmiotów wycinanych wiązką laserową*. [W:], Przybylski W. (red.); Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. T.3. Wyd. KTMiAP Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011, 319–330.
140. Skoczylas A., Zaleski K.: *Badania wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów ze stali C45 po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym oraz nagniataniu odśrodkowym*. Mechanik 8-9 (2016), 1088–1089.
141. Skoczylas A., Zaleski K., Szewczyk S.: *Wpływ nagniatania odśrodkowego na mikrotwardość i mikrostrukturę stali C45 po cięciu laserem*. Inżynieria Powierzchni 2 (2017), 17–21.
142. Skoczylas A., Zaleski K.: *Wpływ warunków nagniatania odśrodkowego na chropowatość powierzchni przedmiotów ze stali C45 wycinanych laserem*. Mechanik 8-9 (2014), 737, 517–524.
143. Stango R.J.: *Filamentary brushing tools for surface finishing applications*. Metal Finishing 100 (2002), 82–91.
144. Szulc S. (red.): *Nadawanie częściom maszyn własności eksploatacyjnych*. PWN, Warszawa 1970.
145. Szulc S., Stefko A.: *Obróbka powierzchniowa części maszyn. Podstawy fizyczne i wpływ na własności użytkowe*. WNT, Warszawa 1976.
146. Szyk M., Patyk R., Kukielka L.: *Computer modeling and simulation of the physical phenomena in shot peening process of cultivator tine*. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, Vol. 55/1 (2010), 106–109.

147. Świrad S., Dudek K.: *Nagniatanie jako obróbka dekoracyjna*. [W:], Przybylski W. (red.): *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*. T.2. Wyd. KTMiAP Politechnika Gdańska, Gdańsk 2008, 169–178.
148. Tadeusiewicz R.: *Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami*. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1998.
149. Toedtli S.: *Entwicklungsarbeiten an Schleuderstrahlenlagen*. Stahl u. Eisen, 98/7 (1978), 343–349.
150. Tosha K., Ueno Y., Iida K.: *Effect of shot peening on fatigue strength of phosphor bronze C5191*. The 7th International Conference on Shot Peening, Nakoneczny A. (Ed.), Warsaw 1999, 344–349.
151. Tsuji N., Tanaka S., Takasugi T.: *Effect of combined plasma – carburizing and shot peening on fatigue and wear properties of Ti-6Al-4V alloy*. Surface & Coatings Technology 203 (2009), 1400–1405.
152. Tubielewicz K.: *Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych*. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
153. Tubielewicz K.: *Wpływ parametrów kulowania odśrodkowego na wskaźniki chropowatości powierzchni*. Mechanik 2 (1974), 89–92.
154. Tubielewicz K.: *Wpływ parametrów kulowania odśrodkowego na wskaźniki umocnienia warstwy wierzchniej stali*. Mechanik 8 (1973), 415–419.
155. Uzan N.E., Ramati S., Shneck R., Frage N., Yeheskel O. : *On the effect of shot peening on fatigue resistance of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing using selective laser melting (AM – SLM)*. Additive Manufacturing 21 (2018), 458–464.
156. Wagner L.: *Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys*. Materials Science and Engineering A263 (1999).
157. Walz K.: *Oberflächenverfestigen, Kugelstrahlen, Shot Peening*. Anmerkungen – Maschinen – Strahlmittel. Draht, 32/8 (1981), 458–464.
158. Wang S., Li Y., Yao M., Wang R.: *Compressive residual stress introduced by shot peening*. Journal of Materials Processing Technology 73 (1998), 64–73.
159. Was G.S., Pelloux R.M.: *The effect of shot peening on the fatigue behavior of alloy 7075-T6*. Metallurgical Transactions A. Vol. 10A, May (1979), 656–658.
160. Wick A.: Schulze V., Voehringer O.: *Effects of warm peening on fatigue life and relaxation behaviour of residual stresses in AISI steel*. Materials Science and Engineering, A293 (2000), 191–197.
161. Wieczorowski K., Legutko S., Matusiak-Szaraniec A., Siecla R.: *Nagniatanie wibracyjne odlewanych korpusów żeliwnych*. [W:], Przybylski W. (red.): *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*. T.2. Wyd. KTMiAP Politechnika Gdańska, Gdańsk 2008, 143–150.
162. Wieczorowski K.: *Wpływ ulepszania cieplnego stali 45 na utwardzenie warstwy wierzchniej po nagniataniu wibracyjnym*. Materiały III Międzynarodowej Konferencji „Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej”. Gorzów Wlkp. – Lubniewice 1996, 437–441.
163. Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.: *Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli chropowatości i nie tylko*. Politechnika Poznańska, Poznań 2003.

164. Wiertel M., Zaleski K., Gorgol M., Skoczylas A., Zaleski R.: *Impact of impulse shot peeling parameters on properties of stainless steel surface*. Acta Physica Polonica A, No. 5, Vol. 132 (2017), 1611–1615.
165. Wojciechowski Ł.: *Wpływ stanu energetycznego warstwy wierzchniej na zwilżalność stali aktywnymi i nieaktywnymi substancjami smarującymi*. Tribologia 3 (2010), 251–261.
166. Yang Q., Zhou W., Niu Z., Zheng X., Wang Q., Fu X., Chen G., Li Z.: *Effect of different surface asperities and surface hardness induced by shot peening on the fretting wear behavior of Ti-6Al-4V*. Surface & Coatings Technology 349 (2018), 1098–1106.
167. Yao C., Wu D., Ma L., Tan L., Zhou Z., Zhang J.: *Surface integrity evolution and fatigue evaluation after milling mode, shot peening and polishing mode for TB6 titanium alloy*. Applied Surface Science 387 (2016), 1257–1264.
168. Zaleski K.: *A study on the properties of surface – active fluids using in burishing and shot peening processes*. Advances in Science and Technology Research Journal . Vol. 10/31 (2016), 235–239.
169. Zaleski K.: *Badania struktury geometrycznej powierzchni formowanej podczas fizycznego modelowania procesu nagniatania dynamicznego rozproszonego*. [W:], Przybylski W. (red.): Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. Wyd. KTMiAP Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005, 161–168.
170. Zaleski K.: *Badania wpływu parametrów nagniatania wibracyjnego na trwałość zmęczeniową elementów ze stopu tytanu*. Inżynieria Materiałowa 3 (2012), 215–218.
171. Zaleski K.: *Badanie możliwości nagniatania wibracyjnego części roboczej frezów walcowych*. [W:], Prace ITiEM Politechniki Lubelskiej, Materiały 27 Posiedzenia Sekcji Podstaw Technologii KBM PAN, Lublin 1980, 245–251.
172. Zaleski K.: *Kształtowanie chropowatości powierzchni w procesie nagniatania dynamicznego*. [W:], Materiały III Ogólnokrajowej Konferencji N-T „Postępy w technice wytwarzania maszyn”, Kraków 1999, 291–298.
173. Zaleski K.: *Kształtowanie wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów metalowych w procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2008.
174. Zaleski K., Lipski J.: *Modelowanie za pomocą sieci neuronowej odśrodkowego kulkowania stopu tytanu*. Przegląd Mechaniczny 12 (2006), 29–33.
175. Zaleski K., Lipski J.: *Zastosowanie sieci neuronowej do projektowania procesu technologicznego kulkowania odśrodkowego stopu tytanu*. [W:], Korzyński M. (red.): Wytwarzanie elementów maszyn ze stopów metali o specjalnych właściwościach. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów - Bystre 2001, 167–174.
176. Zaleski K., Matuszak J.: *Badania porównawcze obróbki krawędzi przedmiotów ze stopu aluminium 7075 i stali C45 metodą szczotkowania*. Technologia i Automatyzacja Montażu 2 (2013), 35–39.
177. Zaleski K., Matuszak J.: *Badania rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotów ze stopu aluminium po nagniataniu wibracyjnym*. Mechanik 11 (2014), 939, 331–339.
178. Zaleski K., Matuszak J.: *Sposób i urządzenie do określania średnicy dynamicznej szczotek walcowych*. Patent PL 226303 B1.

179. Zaleski K., Matuszak J.: *Struktura geometryczna powierzchni po obróbce szcietkowaniem*. [W:], Jonak J. (red.), zagadnienia pęknięcia i skrawania materiałów plastycznych. LTN Lublin 2008, 43–52.
180. Zaleski K., Matuszak J.: *Szczotka czołowa do usuwania zadziorów*. Patent PL 221608 B1.
181. Zaleski K., Matuszak J.: *Szczotka do usuwania zadziorów z krawędzi wewnętrznych*. Wzór użytkowy PL Ru. 069617.
182. Zaleski K., Matuszak J.: *Szczotka walcowa do usuwania zadziorów*. Patent PL 220516 B1.
183. Zaleski K.: *Modelowanie chropowatości powierzchni i stopnia umocnienia warstwy wierzchniej stali 30HGSA po nagniataniu wibracyjnym*. Mechanik 3 (2007), 194–198.
184. Zaleski K.: *Nagniatanie wibracyjne noży tokarskich kształtowych a ich własności eksploatacyjne*. [W:], Materiały Konferencji „Narzędzia skrawające i ściernie”, WSI Koszalin, GOBiEN Gorzów Wlkp. Lubniewice 1985, 90–96.
185. Zaleski K.: *Oddziaływanie cieczy obróbkowej na formowanie struktury geometrycznej powierzchni w procesie nagniatania dynamicznego rozproszonego*. Przegląd Mechaniczny 5S (2007), 169–172.
186. Zaleski K., Parol A.: *Wpływ parametrów nagniatania wibracyjnego na stan warstwy wierzchniej stopu tytanu WT3-1*. [W:], Materiały III Konferencji N-T „Wytwarzanie elementów maszyn ze stopów metali o specjalnych własnościach”, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 1985, 246–253.
187. Zaleski K., Skoczylas A., Bławucki S.: *Obróbka gładkościowa i umacniająca*. Politechnika Lubelska, Lublin 2017.
188. Zaleski K., Skoczylas A., Brzozowska M.: *The effect of the conditions of shot peening the Inconel 718 nickel alloy on the geometrical structure of the surface*. Advances in Science and Technology Research Journal . Vol. 11/1 June (2017), 205–211.
189. Zaleski K., Skoczylas A.: *Effect of vibration shot peening parameters upon shapes of bearing curves the Inconel 718 nickel alloy on the geometrical structure of alloy steel surface*. Advances in Science and Technology Research Journal . Vol. 9/25 March (2015), 20–26.
190. Zaleski K., Skoczylas A.: *Głowica do nagniatania odśrodkowego*. Patent PL 224681 B1.
191. Zaleski K., Skoczylas A.: *Struktura geometryczna powierzchni stali po cięciu laserem i nagniataniu odśrodkowym*. Przegląd Mechaniczny 6 (2015), 32–36.
192. Zaleski K.: *Sposób i urządzenie do fizycznego modelowania procesu nagniatania dynamicznego rozproszonego*. Patent PL 204685 B1.
193. Zaleski K.: *Sposób i urządzenie do pomiaru właściwości powierzchniowo aktywnych cieczy*. Patent PL 209517 B1.
194. Zaleski K.: *Sposób i urządzenie do szlifowania cienkich blach metalowych, zwłaszcza o właściwościach paramagnetycznych*. Patent PL 209068 B1.
195. Zaleski K.: *Stanowisko do badań właściwości powierzchniowo aktywnych cieczy obróbkowych*. Przegląd Mechaniczny 9S (2005), 55–57.
196. Zaleski K.: *Struktura geometryczna powierzchni stopu tytanu uformowana podczas fizycznego modelowania procesu nagniatania dynamicznego rozproszonego*. ZN Politechniki Rzeszowskiej 227, Mechanika 66 (2006), 243–249.

197. Zaleski K.: *The effect of shot peening on the fatigue life of parts made of titanium alloy Ti-6Al-4V*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 4/44 (2009), 65–71.
198. Zaleski K.: *The effect of vibratory and rotational shot peening and wear on fatigue life of steel*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 19/1 (2017), 102–107.
199. Zaleski K.: *Urządzenie do fizycznego modelowania procesu nagniatania dynamicznego rozproszonego*. Przegląd Mechaniczny 9S (2005), 253–256.
200. Zaleski K.: *Wpływ cieczy obróbkowej na wybrane właściwości warstwy wierzchniej ukształtowanej w procesie kulkowania*. Tribologia – Teoria i Praktyka, 5/215(2007), 157–167.
201. Zaleski K.: *Wpływ fizycznego modelowania procesu nagniatania dynamicznego rozproszonego na mikrotwardość warstwy wierzchniej stali C45*. Przegląd Mechaniczny 12S (2006), 156–159.
202. Zaleski K.: *Wpływ kulkowania wibracyjno-rotacyjnego na stan warstwy wierzchniej stali w stanie zahartowanym*. [W:], Świć A. (red.): Projektowanie i automatyzacja procesów produkcyjnych. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005, 13–18.
203. Zaleski K.: *Wpływ parametrów nagniatania dynamicznego rozproszonego na rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stopu tytanu*. Inżynieria Powierzchni 3 (2011), 48–52.
204. Zaleski K., Zaleski R.: *Badania warstwy wierzchniej stopu tytanu technikami wykorzystującymi anihilację pozytonów*. Inżynieria Materiałowa 5 (2009), 302–305.
205. Zaleski K., Zaleski R.: *Nieniszczące badania warstwy wierzchniej metodą wykorzystującą anihilację pozytonów*. Przegląd Mechaniczny 2 (2013), 37–40.
206. Zaleski K., Zyśko A.: *Impact of vibratory and rotational shot peening onto selected properties of titanium alloy surface layer*. Advances in Science and Technology Research Journal . Vol. 8/22 June (2014), 20–26.
207. Zaleski R., Gorgol M., Zaleski K.: *Positron annihilation lifetime study of steel surface modification by shot peening*. Physics Procedia 35 (2012), 92–97.
208. Zaleski R., Zaleski K., Gorgol M., Wiertel M.: *Positron annihilation study of aluminum, titanium and iron alloys surface after shot peening*. Applied Physics A – Materials Science & Processing 120 (2015), 551–559.
209. Zaleski R., Zaleski K.: *Positron annihilation in steel burnished by vibratory shot peening*. Acta Physica Polonica A, Vol. 110 No. 5 (2006), 739–746.
210. Zhang P., Lindemann J.: *Influence of shot peening on high cycle fatigue properties of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80*. Scripta Materialia, 52 (2005), 485–490.
211. Zhang P., Lindemann J., Leyens C.: *Shot peening on the high – strength wrought magnesium alloy AZ80 – Effect of peening media*. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010), 445–450.
212. Zhan K., Wu Y., Li J., Zhao B., Yan Y., Xie L., Ji V.: *Investigation on surface layer characteristics of shot peened grapheme reinforced Al composite by X – ray diffraction method*. Applied Surface Science 435 (2018), 1257–1264.
213. Zhiming L., Laimin S., Shejin Z., Zhidong T., Yazhou J.: *Effect of high energy shot peening pressure on the stress corrosion cracking of the weld joint of 304*

- austenitic stainless steel*. Materials Science & Engineering A 637 (2015), 170–174.
214. Zielecki W., Kielbasa J.: *Stan warstwy wierzchniej i zużycie tribologiczne stali C45 kulowanej impulsowo*. ZN Politechniki Rzeszowskiej 161, Mechanika 49 (1997), 97–109.
215. Zielecki W.: *Polepszanie właściwości zmęczeniowych stopów metali w procesie pneumokulkowania*. ZN Politechniki Rzeszowskiej, 69, Mechanika 22 (1990), 59–67.
216. Zielecki W.: *Wpływ kulkowania impulsowego otworów na wybrane własności warstwy wierzchniej* [W:], Łunarski J. (red.): Wytwarzanie elementów maszyn ze stopów metali o specjalnych własnościach. Materiały III Konferencji N-T . Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 1985, 239–245.
217. Znorko A., Skalski K., Wróblewski G.: *Dynamiczne nagniatanie powierzchni złożonych-modelowanie procesu*. Materiały VI Konferencji N-T „Technologia obróbki przez nagniatanie”, AT-R Bydgoszcz 1996, 211–220.
218. Żuranda J., Barski M., Jędruch W.: *Sztuczne sieci neuronowe*. PWN, Warszawa 1996.

NORMY

- Nor. 1. PN – 90/M – 81090. Śrut techniczny z drutu (wycofana).
- Nor. 2. PN – EN ISO 11124-4. Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Wymagania techniczne dotyczące metalowych ścierniw stosowanych w obróbce strumieniowo – ścierniej. Kulisty śrut z niskowęglowego staliwa.
- Nor. 3. PN – EN ISO 11124-3. Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Wymagania techniczne dotyczące metalowych ścierniw stosowanych w obróbce strumieniowo – ścierniej. Kulisty i ostrokątny śrut z wysokowęglowego staliwa.
- Nor. 4. PN – EN ISO 4287: 1999. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa.
- Nor. 5. PN – 87/M – 04256/02. Struktura geometryczna powierzchni – Chropowatość powierzchni – Terminologia ogólna.
- Nor. 6. PN – EN ISO 6507-1: 2007. Metale . Pomiar twardości sposobem Vickersa.
- Nor. 7. PN – EN ISO 4545-1: 2006. Metale . Pomiar twardości sposobem Knoop.

TECHNOLOGIA NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO

Streszczenie

Nagniatanie dynamiczne jest stosowane, głównie jako obróbka wykończeniowa elementów maszyn, w wielu zakładach przemysłowych. Najczęściej celem tej obróbki jest zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej obrabianych elementów, ale w wyniku jej zastosowania następuje poprawa również innych właściwości eksploatacyjnych. Zatem nagniatanie dynamiczne jest ważnym ogniwem w procesie wytwarzania elementów maszyn i wiedza na temat jego technologii może być przydatna w pracy inżynierów zajmujących się budową maszyn.

W książce ukazano rolę nagniatania dynamicznego w procesie wytwarzania elementów maszyn, rozwój tej technologii na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci oraz wyodrębniono różne jej sposoby i odmiany. Omówiono kształtowanie warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów w procesie nagniatania dynamicznego oraz scharakteryzowano elementy nagniatające i ciecze smarujące.

Skutki nagniatania dynamicznego mogą być oceniane różnymi metodami. Scharakteryzowano pomiary intensywności nagniatania dynamicznego za pomocą płytek kontrolnych Almena, sposób oceny stopnia pokrycia obrobionej powierzchni odciskami uderzających elementów nagniatających, metody badań struktury geometrycznej powierzchni i właściwości fizycznych warstwy wierzchniej. Omówiono też metody badań technikami wykorzystującymi anihilację pozytonów, a także przykładowe stanowiska do badań trwałości zmęczeniowej i odporności na zużycie tribologiczne.

Ze względu na sposób nagniatania dynamicznego wyodrębniono nagniatanie skoncentrowane, nagniatanie rozproszone oraz szcztokowanie nagniatające. W ramach nagniatania skoncentrowanego wyodrębniono nagniatanie impulsowe i odśrodkowe. Również nagniatanie rozproszone podzielono na dwie odmiany, a mianowicie na nagniatanie strumieniowe i wibracyjne. Scharakteryzowano też kontrolowane nagniatanie dynamiczne rozproszone, które umożliwia ocenę wpływu energii uderzenia i gęstości uderzeń elementów nagniatających w procesie nagniatania rozproszonego na skutki tego nagniatania. Omówiono kinematykę, narzędzia i parametry technologiczne poszczególnych sposobów i odmian nagniatania dynamicznego, urządzenia stosowane do tej obróbki, a także jej wpływ na właściwości warstwy wierzchniej nagniatanych przedmiotów.

Z punktu widzenia praktycznego najważniejszym efektem nagniatania dynamicznego jest poprawa właściwości użytkowych wytwarzanych przedmiotów. Podano przykłady zwiększenia wskutek nagniatania dynamicznego wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej, zużycia i trwałości narzędzi, odporności na zużycie tribologiczne i korozyjne.

SHOT PEENING TECHNOLOGY

Abstract

Shot peening technology is applied mainly as a method of finish machining of certain machine elements in numerous industrial companies. Typically, the aim of this process is to increase the fatigue life of the machined elements, but as a result other performance characteristics become improved as well. Therefore shot peening constitutes an important stage of the manufacturing of machine elements and the knowledge about it may prove helpful for engineers working in the field of mechanical engineering.

The book discusses the role of shot peening in the process of manufacturing machine elements and its development within the last decades and introduces different ways of performing it as well as its variants. Furthermore, forming of the surface layer of the workpiece in the process of shot peening is described. Additionally, the shot peening elements and lubricants are presented.

The results of shot peening can be assessed using various methods. The book describes as follows: shot peening intensity measured using Almen strip test, the method of assessing the level of coverage by the indentations left by shot peening elements on the surface, methods of assessing the structure of the geometric surface and the physical characteristics of the surface layer. Moreover, the research methods using positron annihilation, as well as exemplary laboratory stands used to research fatigue life and wear resistance are hither characterized.

Based on the technique of shot peening, the process is divided into three methods, mainly: uniform peening, random peening and brushing. Further on, uniform peening is split into impulse shot peening and centrifugal shot peening. Random shot peening is also divided into stream shot peening and vibratory shot peening. Apart from this, controlled random shot peening method is described, allowing for assessing the influence of impact energy and shot peening intensity on the results of shot peening. The kinematics, tools and technical parameters of each shot peening method are discussed. Moreover, the tools and machines used in this process and its influence on the characteristics of the formed surface layer are described.

From the practical point of view the most important effect of shot peening is improving the performance of the products. Examples of increasing resistance and fatigue life as a result of shot peening, wear and durability of tools as well as resistance to tribological and corrosional wear are also presented.