



POLITECHNIKA
GDAŃSKA



ALICJA STANISŁAWSKA

MECHANIKA KONTAKTU W CHARAKTERYZOWANIU MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH

GDAŃSK 2023

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielawicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Michał Wasilczuk

RECENZENCI

Agata Dudek

Marcin Kot

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2023

ISBN 978-83-7348-896-0

Spis treści

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	5
1. WSTĘP.....	9
2. CEL PRACY.....	11
3. TEORETYCZNE PODSTAWY MECHANIKI KONTAKTU.....	12
3.1. Model Hertza dla systemu kulistego wgłębnika dociskanego do płaskiej próbki....	12
3.2. Modele uwzględniające siły adhezji pomiędzy kulą i podłożem	16
3.3. Modele dla płaskich powierzchni uwzględniające ich chropowatość	22
3.4. Wgłębnik stożkowy i inne wgłębniki posiadające kąt wierzchołkowy	26
4. Pomiar twardości	32
4.1. Twardość Meyera	32
4.2. Twardość Brinella.....	33
4.3. Twardość Martensa	35
4.4. Twardość Vickersa	36
4.5. Twardość Knoopa	38
4.6. Twardość Rockwella.....	39
5. Test indentacji.....	41
5.1. Naprężenia i odkształcenia w materiale podczas testu indentacji	45
5.2. Efekt <i>pile up</i>	50
5.3. Wyznaczanie twardości i sztywności w materiale	52
5.4. Efekt skali i wyznaczenie gęstości dyslokacji.....	59
5.5. Pełzanie materiału i wyznaczenie mobilności dyslokacji	62
5.6. Wyznaczanie współczynnika umocnienia odkształceniowego materiału	66
5.7. Wyznaczanie naprężeń własnych	68
5.8. Wyznaczanie krytycznego współczynnika intensywności naprężeń.....	72
5.9. Dynamiczny test indentacji	78
5.10. Test zarysowania.....	83
6. Przykłady badań własnych w charakterystyce materiałów inżynierskich	87
6.1. Właściwości mechaniczne bakteryjnej nanocelulozy.....	87
6.2. Charakteryzowanie szlifowanej warstwy wierzchniej stali C45	94
6.3. Wyznaczanie naprężeń własnych w laserowo obrabianych cięgnach podwozia samolotu	100
6.4. Charakteryzowanie warstw Al_2O_3 wytwarzanych metodą <i>micro-arc oxidation</i> (MAO) pod kątem ich odporności na obciążenia kawitacyjne.....	105
6.5. Charakteryzowanie kompozytowych powłok typu nanościianki węglowe–polidopamina–polizwitterion.....	112
7. PODSUMOWANIE	117
BIBLIOGRAFIA	119

Streszczenie w języku polskim.....	128
Streszczenie w języku angielskim.....	129

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a – promień kontaktu lub wielkość geometryczna
- a_c – promień kontaktu uwzględniający siły adhezji
- a_{pz} – promień strefy uplastycznionej
- \bar{a} – promień kontaktu kuli i podłoża uwzględniający siły adhezji
- A – powierzchnia styku kontaktujących się ciał lub powierzchnia plastycznie odkształconego odcisku, lub pole przekroju poprzecznego ścieżki w teście zarysowania
- A_a – całkowita oczekiwana powierzchnia kontaktu lub rzeczywista powierzchnia kontaktu
- A_p – pole powierzchni odcisku rzutowane na powierzchnię materiału
- A_s – powierzchnia boczna wgłębnika odpowiadająca jego maksymalnemu przemieszczeniu
- \bar{A} – pole kontaktu kuli i podłoża uwzględniające siły adhezji
- b – wielkość wektora Burgersa
- c – długość pęknięć w szkłe lub wielkość geometryczna
- C – współczynnik ograniczenia (*constrain factor*)
- C_e, C_p – stała zależna od materiału i kształtu wgłębnika
- d – średnica kulistej czaszy odcisku
- D – średnica kulistego wgłębnika
- $erfc(z)$ – dopełniająca funkcja błędu
- E – sztywność, moduł sprężystości podłużnej
- E', E^*, E_r – zredukowany moduł sprężystości podłużnej
- f – współczynnik określający stosunek wielkości promienia strefy uplastycznionej do promienia kontaktu
- $F_n(h)$ – funkcja statystyczna dopasowania gaussowskiego rozkładu nierówności
- $F_n(\lambda)$ – funkcja statystyczna dopasowująca rozkład chropowatości do rozkładu Gaussa
- G – moduł sprężystości poprzecznej
- G^* – zespolony moduł sprężystości poprzecznej
- G' – rzeczywista składowa zespolonego modułu sprężystości poprzecznej
- G'' – urojona składowa zespolonego modułu sprężystości poprzecznej
- h – znormalizowana odległość pomiędzy płaszczyznami lub przemieszczenie wgłębnika, lub wysokość grzbietu w efekcie *pile up*
- h_0 – odległość, w której występują naprężenia wynikające z potencjału Lennarda-Jonesa, lub maksymalne przemieszczenie wgłębnika
- h_a – głębokość, dla której wgłębnik utracił kontakt z materiałem
- h_c – głębokość kontaktu odpowiadająca promieniowi kontaktu
- h_i – początkowa penetracja wgłębnika przy obciążeniu P_i
- h_i' – początkowa penetracja wgłębnika uzyskana przez ekstrapolację
- h_{max} – maksymalne przemieszczenie wgłębnika
- h_r – głębokość odcisku w jego osi po zdjęciu obciążenia
- h_x – dodatkowa głębokość przemieszczenia wgłębnika
- h' – średni kwadrat odchyłeń od linii średniej chropowatej powierzchni

$h(c)$	– dystans pomiędzy kontaktującymi się ciałami
$h(c)^D$	– dystans pomiędzy kontaktującymi się ciałami z uwzględnieniem naprężeń Dugdale'a
$h(c)^H$	– dystans pomiędzy kontaktującymi się ciałami wg Hertza
H	– twardość
H_0	– twardość makroskopowa
H_{fr}	– twardość spowodowana tarciem sieci krystalicznej
H_{ISE}	– twardość z efektem skali
H_{ss}	– twardość spowodowana umocnieniem roztworowym
k	– stała w równaniu Meyera lub współczynnik kalibrujący, lub stała sprężyny
$K_v(z)$	– zmodyfikowana funkcja Bessela drugiego rodzaju
l	– wielkość geometryczna
L_0	– obciążenie wgłębnika, które powoduje jego przemieszczenie h_c w szkle bez naprężeń własnych
L_c	– krytyczne obciążenie w teście zarysowania powodujące delaminację powłoki
L_t	– obciążenie wgłębnika, które powoduje jego przemieszczenie h_c w szkle z naprężeniami własnymi
m	– współczynnik równy a/c lub stała zależna od materiału i kształtu wgłębnika
M	– współczynnik Taylora
n	– oczekiwana liczba kontaktów chropowatej powierzchni z płaską powierzchnią lub stała w równaniu Meyera, lub współczynnik kalibrujący, lub liczba pęknięć promieniowych
N	– liczba nierówności na powierzchni
p	– ciśnienie wywierane przez kulisty wgłębnik
p_0	– naciski w osi symetrii układu
p_{av}	– średnie naciski
p_m	– średnie naciski wywierane przez wgłębnik
$p(r)$	– profil rozkładu nacisków
$p(r)^H$	– profil rozkładu nacisków wg Hertza
$p(r)^D$	– profil rozkładu nacisków spowodowany naprężeniami Dugdale'a P – obciążenie wgłębnika lub obciążenie wgłębnika, dla którego powstają pęknięcia w szkle bez naprężeń własnych o długości c
P_c	– siła potrzebna do pokonania sił adhezji lub krytyczne obciążenie, dla którego występuje przejście między odkształceniem sprężystym i plastycznym
P_i	– minimalne obciążenie wgłębnika w początkowej fazie obciążania
P_t	– obciążenie większe od obciążenia krytycznego P_c
P^*	– obciążenie, dla którego powstają pęknięcia w szkle z naprężeniami własnymi o długości c
\bar{P}	– pole kuli uwzględniające siły adhezji
R	– promień wgłębnika kulistego lub promień zaokrąglenia wierzchołka nierówności, lub promień zaokrąglenia wierzchołka ostrego wgłębnika
R^2	– współczynnik korelacji Pearsona
R_e	– granica plastyczności materiału
S	– sztywność kontaktu
t	– czas lub grubość powłoki
$u(r)$	– profil ugięcia

U_p	– energia odkształcenia plastycznego materiału w teście indentacji
U_s	– energia odkształcenia sprężystego materiału w teście indentacji
U_t	– całkowita energia odkształcenia materiału w teście indentacji
V	– objętość materiału
w_{el}	– energia odkształcenia sprężystego na jednostkę objętości
W	– praca wykonana na utratę przyczepności powłoki z podłożem
W_{el}	– całkowita energia odkształcenia sprężystego
x	– współczynnik umocnienia
z	– wysokość nierówności chropowatej powierzchni
z_0	– odległość pomiędzy wgłębnikiem i podłożem, dla której oddziałują siły adhezji
α	– współczynnik uwzględniający siły adhezji lub połówkowy kąt wierzchołkowy ostrego wgłębnika, lub parametr określający wpływ chropowatości na wynik pomiaru w teście indentacji, lub współczynnik zależny od struktury dyslokacyjnej
α'	– połówkowy kąt wierzchołkowy odcisku po zdjęciu obciążenia
β	– średni promień wierzchołków stykających się chropowatych powierzchni lub kąt pomiędzy wgłębnikiem i powierzchnią materiału
γ	– energia powierzchniowa na jednostkę powierzchni kontaktu
δ	– przemieszczenie wgłębnika kulistego
δ_c	– krytyczna głębokość penetracji przy rozerwaniu połączenia adhezyjnego
$\bar{\delta}$	– przemieszczenie kuli w podłożu uwzględniające siły adhezji
$\Delta\gamma$	– praca potrzebna do pokonania sił adhezji
ϵ	– odkształcenie lub stała zależna od kształtu wgłębnika w metodzie Olivera–Pharra
$\dot{\epsilon}$	– prędkość pełzania
η	– powierzchniowa gęstość nierówności chropowatej powierzchni lub lepkość
η^*	– lepkość zespolona
η'	– składnik rzeczywisty lepkości zespolonej
η''	– składnik urojony lepkości zespolonej
θ	– kąt pomiędzy wgłębnikiem i powierzchnią materiału
λ	– współczynnik uwzględniający siły adhezji lub parametr filmu olejowego Stribecka, lub współczynnik tłumienia
μ	– parametr Tabora
μ_c	– współczynnik tarcia wgłębnika z podłożem w teście zarysowania
ν	– współczynnik Poissona
ρ_{GDN}	– gęstość geometrycznie niezbędnych dyslokacji
ρ_{SSD}	– gęstość dyslokacji w materiale
σ	– odchylenie standardowe rozkładu nierówności chropowatej powierzchni
σ_0	– maksymalne naprężenie wynikające z potencjału Lennarda-Jonesa
σ_F	– naprężenia płynięcia
σ_R	– naprężenia własne
σ_s	– maksymalna wysokość nierówności chropowatej powierzchni
σ_{th}	– teoretyczne naprężenie wynikające z potencjału Lennarda-Jonesa
v	– średnia prędkość przemieszczania się dyslokacji
φ	– przesunięcie fazowe między siłą i przemieszczeniem
$\Phi(z)dz$	– prawdopodobieństwo, że wysokość nierówności zawiera się w przedziale

	$\langle z, z+dz \rangle$
$\Phi^*(s)$	– znormalizowany rozkład nierówności zgodny z rozkładem Gaussa
χ	– stała zależna od kształtu wgłębniaka
Ψ	– indeks opisujący odkształcenia sprężysto-plastyczne w kontakcie nierówności
ω	– częstotliwość

1. WSTĘP

Na przestrzeni wieków rozwój cywilizacyjny ludzkości był związany z poszukiwaniem coraz lepszych materiałów pozwalających wygrywać bitwy, podnosić komfort życia bądź umożliwiać eksplorację nieznanych dotąd obszarów. Jednak dopiero od początku ubiegłego wieku można zaobserwować gwałtowny rozwój w tym obszarze, związany z wytwarzaniem nowych i doskonaleniem technik produkcji dotychczas znanych materiałów. Ten gwałtowny postęp związany z nowymi materiałami spowodował także konieczność poszukiwania metod badawczych umożliwiających coraz bardziej dogłębne badania właściwości nowo opracowywanych, wytwarzanych i przetwarzanych materiałów. Jeszcze sto lat temu do scharakteryzowania właściwości mechanicznych materiałów wystarczyła próba rozciągania czy badanie twardości materiału. Te metody są stosowane również obecnie, jednak coraz wyższe wymagania stawiane nowym materiałom przez konstruktorów spowodowały konieczność poszukiwania nowych metod badawczych pozwalających na bardziej dokładne i szczegółowe określanie ich właściwości mechanicznych. Aktualne wymagania dotyczą też wyznaczania właściwości mechanicznych nie tylko w skali makro, ale też – ze względu na rozwój nanomateriałów, a także technik związanych z osadzaniem cienkich warstw i powłok – w skali mikro- i nanometrycznej. Może się wydawać, że zagadnienia te dotyczą tylko precyzyjnych układów elektronicznych, jednak również inżynierowie projektujący znacznie większe konstrukcje, np. mosty, chcą wiedzieć, jakie właściwości ma zaprawa cementowa w strefie przyległej do kruszywa, obejmującej obszar szerokości kilkudziesięciu mikrometrów, właściwości mechaniczne tej strefy decydują bowiem o właściwościach mechanicznych całej betonowej konstrukcji. Znajomość właściwości materiałów stosowanych na różnego rodzaju konstrukcje inżynierskie jest niezbędna do właściwego doboru tych materiałów przez konstruktorów i technologów. Jedną z nowoczesnych technik wyznaczania właściwości mechanicznych różnych grup materiałów inżynierskich jest metoda indentacji polegająca na wciskaniu diamentowego węgelnika w badany materiał. Metoda wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów oparta na teście indentacji umożliwia wyznaczanie wielu przydatnych właściwości mechanicznych materiałów zaliczanych do różnych grup materiałów inżynierskich. Może ona służyć do określania właściwości materiałów w skali zarówno makro-, mikro-, jak i nanoskopowej. Pozwala wyznaczyć np. twardość materiału i jego sztywność (moduł Younga), a w przypadku materiałów kruchych, jak ceramika bądź twarde metale i stopy, umożliwia wyznaczanie krytycznego współczynnika intensywności naprężeń. Za pomocą tej metody w przypadku metali i stopów można określać nie tylko wartości naprężeń własnych zarówno I, II, jak i III rodzaju, ale również ich charakter (znak). Test indentacji umożliwia także badanie prędkości pełzania różnych materiałów i wyznaczanie gęstości dyslokacji w materiałach metalowych oraz ich ruchliwości. Te właściwości materiału można badać przy stosowaniu obciążeń zarówno statycznych,

jak i dynamicznych. Podstawy teoretyczne dla testu indentacji z użyciem sferycznego wgłębnika sformułował po raz pierwszy pod koniec dziewiętnastego wieku Heinrich Hertz [1, 2], a w późniejszych badaniach, dla wgłębnika w kształcie stożka, rozwinął je szkocki matematyk Ian Naismith Sneddon [3, 4].