

# WYZNACZANIE NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH ZA POMOCĄ METODY RENTGENOGRAFICZNEJ W MATERIAŁACH TRUDNOSKRAWALNYCH

Joanna KRAJEWSKA-ŚPIEWAK, Józef GAWLIK

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono sposób powstawania materiałów polikrystalicznych oraz rozwój defektów i ich wpływ na właściwości poszczególnych materiałów. Jedną ze zmian właściwości materiałów wywołaną zewnętrznym obciążeniem materiału (np. obróbką mechaniczną) są naprężenia własne. W artykule przedstawiono ich podział oraz wpływ na właściwości mechaniczne, fizyczne oraz chemiczne. Przybliżona została metoda dyfrakcji rentgenowskiej służąca do pomiaru naprężeń własnych.

**Słowa kluczowe:** dyfrakcja rentgenowska, krystalografia, naprężenia własne

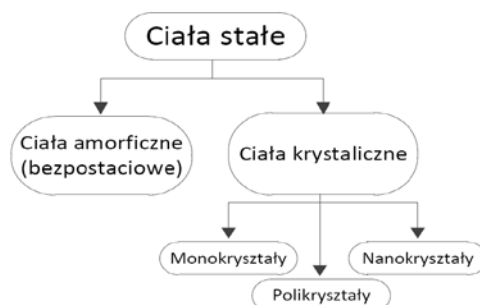
## 1. Podstawy krystalografii

Występujące w przyrodzie materiały różnią się między sobą ułożeniem występujących w nich atomów czyli stanem skupienia. Można wyróżnić trzy podstawowe stany skupienia: gaz, ciecz i ciało stałe, których rozmieszczenie atomów przedstawiono na rys. 1.

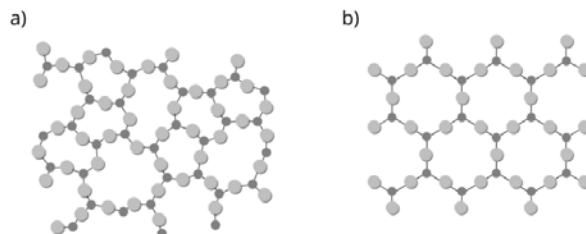


Rys. 1. Podstawowe stany skupienia [4]

Ciała stałe można podzielić w zależności od ułożonych w nich cząstek (rys. 2).



Rys. 2. Podział ciał stałych

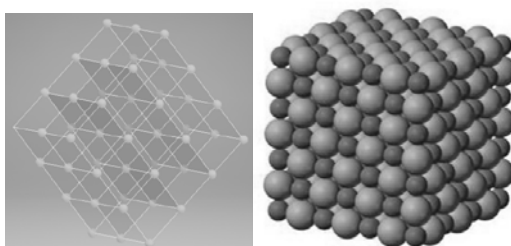


Rys. 3. Budowa ciała: a) amorficznych b) polikrystalicznych

Jeśli cząstki rozmieszczone są w sposób nieregularny ma się wówczas do czynienia z ciałami amorficznymi (rys.3a). Uporządkowane (regularne) rozmieszczenie cząstek jest charakterystyczną cechą materiałów polikrystalicznych (rys.3b).

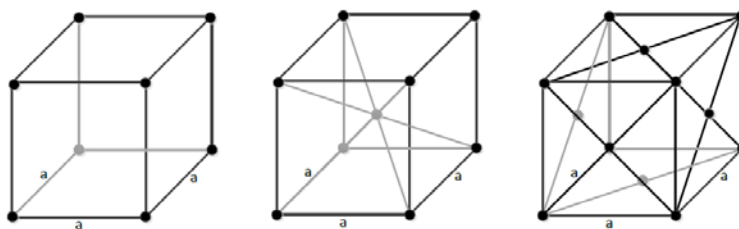
### 1.1. Budowa materiałów polikrystalicznych

Materiały polikrystaliczne zbudowane są z wielu **kryształów (ziaren, krystalitów)** bezpośrednio do siebie przylegających. Budowa wewnętrzna kryształu polega na powtarzaniu się w trójwymiarowej przestrzeni jego elementów składowych (atomów, jonów, cząsteczek) według ściśle określonego schematu, którym jest **sieć przestrzenna** (rys. 4a). Po wypełnieniu sieci przestrzennej pewną konfiguracją **atomów** otrzymuje się **sieć krystaliczną** (rys. 4b).



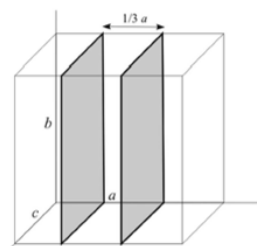
Rys. 4. Przykład a) sieci przestrzennej b) sieć krystaliczna

Sieć krystaliczną tworzą równoległościany opisane przez wektory  $a$ ,  $b$ ,  $c$  nazywane **komórkami elementarnymi**. Wyróżnia się 7 typów komórek elementarnych, jednak do podstawowych zalicza się komórkę prymitywną, przestrzennie centrowaną oraz ściennie centrowaną (rys.5).



Rys. 5. Przykłady komórek elementarnych a) prymitywna b) przestrzennie centrowana (bcc) c) ściennie centrowana (fcc)

Zakłada się, że każda komórka elementarna składa się z równomiernie rozmieszczonych atomów. W zależności od materiału atomy mogą być rozmieszczone na każdym wierzchołku oraz na każdej powierzchni. Komórki elementarne tworzą tzw. **przestrzeń krystaliczną**. Pomiędzy przestrzenią krystaliczną występują atomy rodzin metalu w postaci rodzin równoległych płaszczyzn nazywanych **płaszczyznami krystalicznymi** (rys. 6).



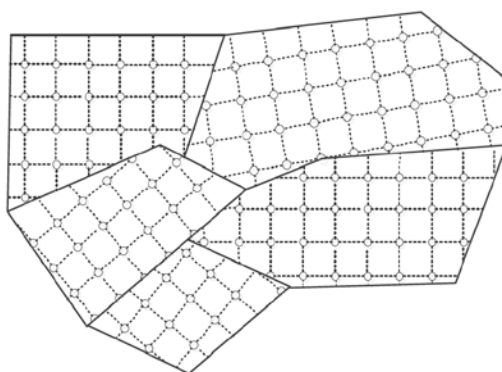
Rys. 6. Płaszczyzny krystalograficzne

Płaszczyzny krystalograficzne są zestawem równoległych, równo rozmieszczonych płaszczyzn rozciągających się w całym kryształ. Odległości „d” pomiędzy płaszczyznami są badane przez Prawo Bragga. Płaszczyzny te pomagają opisać strukturę krystalograficzną.

## 2. Defekty sieci krystalicznej

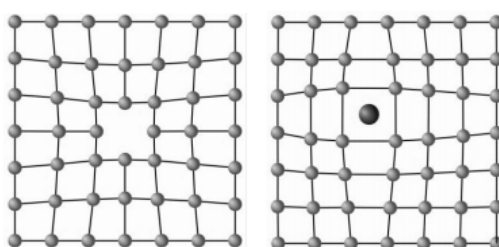
### 2.1. Defekty punktowe, liniowe i powierzchniowe

Tworzenie materiałów polikrystalicznych polega na formowaniu się pojedynczych ziaren. Ziarna rosną do momentu zetknięcia się z otaczającymi ich ziarnami. W trakcie formowania się materiałów polikrystalicznych rozwijają się defekty sieci krystalicznej. Dzięki występującym defektom materiały polikrystaliczne cechują odmienne właściwości, a co za tym idzie możliwość różnych zastosowań tych materiałów. Na rys.7 przedstawiono strukturę materiałów polikrystalicznych.



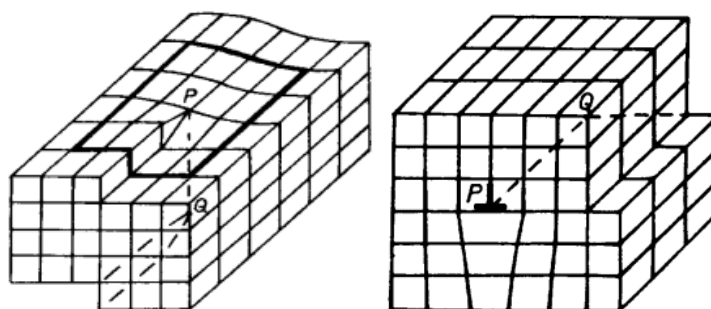
Rys. 7. Struktura materiału polikrystalicznego

Rodzaj występujących defektów ma wpływ na cechy ciał krystalicznych. Ogólnie, defekty można podzielić na defekty: punktowe, liniowe oraz powierzchniowe. Defekty punktowe powstają w wyniku drgań sieci o amplitudzie wzrastającej z temperaturą, które powodują wypadanie pewnej liczby atomów ze swoich położeń równowagi [1]. Temperatura jest główną przyczyną powstawania defektów punktowych, które mają wpływ między innymi na przewodnictwo elektryczne oraz na szybkość dyfuzji atomów w sieci. Jednym z najpopularniejszych defektów punktowych są wakanse (rys.8a), które charakteryzuje brak atomów w położeniu węzłowym. Defekty punktowe mogą również występować w postaci dodatkowych atomów poza pozycją węzłową (rys.8b). Czasami zdarza się, że w komórce elementarnej występuje atom obcego pierwiastka – innego od podstawowych atomów w sieci.



Rys. 8. Defekty punktowe: a) wakanse b) obcy atom w pozycji międzywęzłowej sieci [7]

Kolejny rodzaj defektów wpływa na plastyczność materiału i są to defekty liniowe. Idealny układ atomów ulega odchyleniu w postaci linii, a jego zakres obejmuje nawet kilka tysięcy sąsiednich atomów. Zalicza się do nich defekty krawędziowe, śrubowe oraz mieszane. Gdy następuje przemieszczenie pewnej części kryształu wokół tzw. linii dyslokacji śrubowej występują dyslokacje śrubowe. Rys. 9a przedstawia przykład dyslokacji śrubowej.



Rys. 9. Schemat a) dyslokacji śrubowej b) dyslokacji krawędziowej, gdzie PQ – krawędź dyslokacji

W momencie w którym struktura kryształu zostaje zmieniona przez utworzenie dodatkowej płaszczyzny ma się do czynienia z dyslokacjami krawędziowymi (rys. 9b).

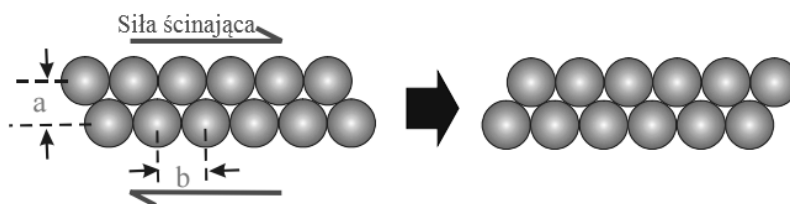
## 2.2. Umocnienie odkształceniowe

Materiały trudnoskrawalne cechuje zdolność do umocnienia. W skutek przyłożonych sił zewnętrznych objętość materiału ulega zmianie, zmniejszają się odległości międzycząsteczkowe, które tym samym blokują ruch dyslokacji. W celu dalszego ruchu dyslokacji potrzebne jest większe obciążenie zewnętrzne zwane umocnieniem odkształceniowym.

## 3. Odkształcenia plastyczne

Materiał poddany obciążeniom zewnętrznym ulega deformacji w wyniku czego zniekształcona zostaje jego struktura krystalograficzna. Wskutek oddziaływania obciążenia większego od granicy sprężystości w materiale dochodzi do powstawania nieodwracalnych odkształceń plastycznych. Odkształcenia te skutkują zmianą położenia kryształów względem siebie. W ciałach polikrystalicznych odkształcenia plastyczne przebiegają w sposób nierównomierny.

Jeśli podczas obciążenia zewnętrznego, na materiał oddziałuje siła wystarczająco duża aby przesunąć jedną płaszczyznę sieciową względem płaszczyzny sąsiedniej o minimum jedną stałą sieci wówczas występuje zjawisko zwane poślizgiem (rys.10).



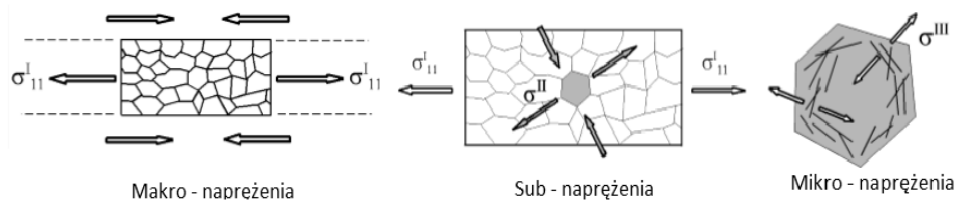
Rys. 10. Zjawisko poślizgu

Zmianom mikrostruktury towarzyszy powstawanie naprężeń własnych, wywołanych nierównomiernym (w czasie i przekroju) odkształceniem materiału [5].

### 3.1. Naprężenia własne

Obróbka mechaniczna powoduje zmiany w sieci strukturalnej, polegające na zmianie rozmieszczenia atomów, które przyczyniają się do zmiany własności fizycznych, mechanicznych oraz chemicznych obrabianego przedmiotu. Jedną z właściwości mechanicznych nabytą podczas obróbki są naprężenia własne. Naprężenia te pozostają w materiale po usunięciu zewnętrznego obciążenia oddziałującego na obrabiany materiał. Przyczyną powstawania naprężeń są niejednorodne zmiany kształtu ciała spowodowane trwałymi odkształceniami. W wyniku obciążenia zewnętrznego w strukturze krystalicznej dochodzi do przesunięcia się części sieci w stosunku do reszty. W wyniku zjawiska dyslokacji zostaje zaburzona ciągłość uporządkowania, która prowadzi do powstawania pola naprężeń własnych.

Naprężenia własne można podzielić ze względu na obszar występowania w którym się równoważą. Tym samym dzieli się je na naprężenia: makro, sub-naprężenia oraz mikro naprężenia lub adekwatnie na naprężenia: I, II oraz III typu (rys.11).



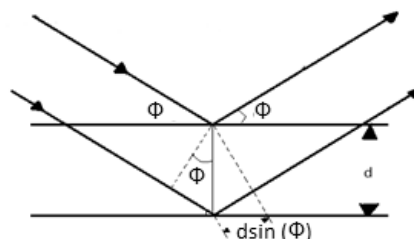
Rys. 11. Podział naprężeń [6]

Występujące naprężenia własne wpływają przede wszystkim na takie właściwości jak: podatność materiału na korozję, obrabialność materiału oraz na właściwości mechaniczne materiału. Większość zjawisk zachodzących w materiale podczas obróbki występuje na niewielkich głębokościach (biorąc pod uwagę powierzchnię obrabianego przedmiotu), przez co naprężenia własne zlokalizowane są głównie w warstwie wierzchniej lub w warstwach sąsiednich. Zwykle wartość bezwzględna naprężeń własnych jest wyższa w pobliżu warstwy wierzchniej i zmniejsza się w głąb materiału obrabianego.

Dalsza część artykułu (oraz przeprowadzone badania) skupiają się na określeniu naprężeń I typu (makro naprężeń), które mają ogromny wpływ na właściwości mechaniczne materiałów obrabianych (twardość, wytrzymałość, odporność materiału na zużycie itp.).

#### 4. Rentgenograficzny pomiar naprężeń

Jedną z nieniszczących metod pomiaru naprężeń jest metoda dyfrakcji rentgenowskiej. Metoda ta wykorzystuje zjawisko dyfrakcji, polegające na zmianie kierunku rozchodzenia się fali na krawędziach przeszkód oraz w ich pobliżu.



Rys. 12. Odbicie promieni rentgenowskich

Odbicie promieni rentgenowskich od pojedynczej płaszczyzny atomów jest o wiele za słabe aby móc je zarejestrować doświadczalnie. Jednak w momencie odbicia od dwóch, trzech i kilkuset następnymi równoległymi płaszczyznami krystalograficznymi, odbite promienie rentgenowskie nałożą się na siebie w zgodnej fazie, a sumaryczna fala odbita będzie na tyle silna, że spowoduje wyraźny mierzalny efekt nazywany często odbiciem interferencyjnym lub odbiciem Bragga (rys.12). Warunki jakie muszą zostać spełnione w celu wygenerowania tego efektu zostały określone przez Bragga i noszą nazwę Prawa Bragga [3].

$$2d\sin(\Phi) = n\lambda \quad (1)$$

gdzie:

d - odległość pomiędzy sąsiednimi płaszczyznami atomowymi,

$\Phi$  - kąt dyfrakcji,

$\lambda$  - długość fali promieniowania rentgenowskiego,

n - liczba naturalna.

Przy czym długość fali ( $\lambda$ ) musi spełniać poniższy warunek:

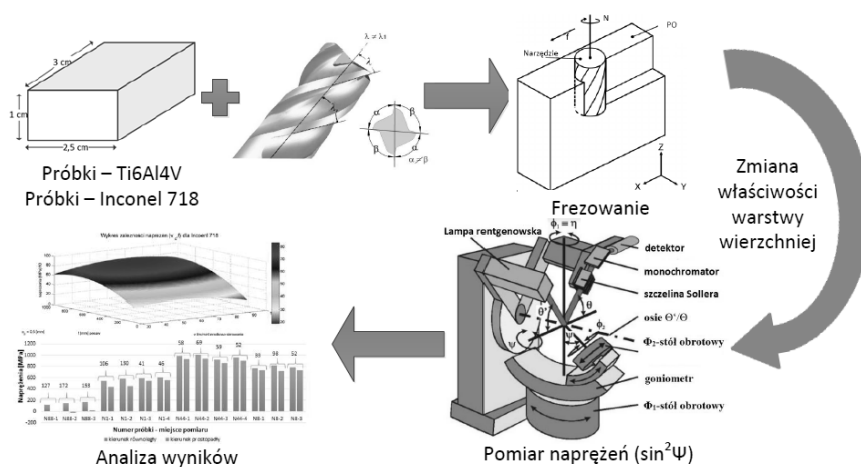
$$\lambda \leq 2d_{\max} \quad (2)$$

gdzie:  $d_{\max}$  oznacza największą odległość między sąsiadującymi płaszczyznami sieciowymi badanego kryształu.

W materiałach istnieje wiele krystalitów, wśród których zawsze znajdują się orientacje spełniające warunek (1) dla określonych grup płaszczyzn sieciowych [2].

## 5. Przedstawienie pomiaru za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej – otrzymane wyniki

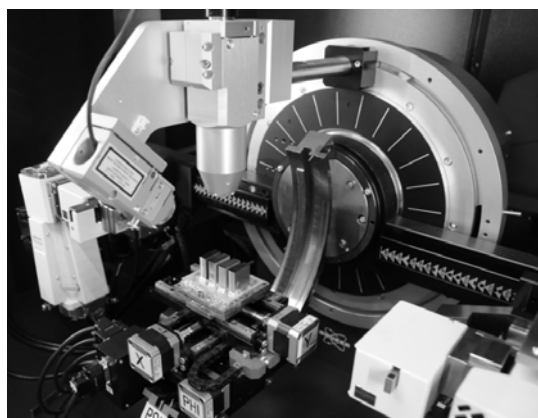
Badaniom naprężeń poddano próbki wykonane ze stopu Ti6Al4V oraz Inconel 718. Próbkę poddano wcześniej frezowaniu współbieżnemu (przy różnych parametrach skrawania) w wyniku którego zmianom uległa nie tylko warstwa wierzchnia ale również sieć krystaliczna. Rys.13 przedstawia schemat przeprowadzonych badań.



Rys. 13. Schemat przeprowadzonych badań

Naprężenia własne zostały określone przez pomiar odkształceń sieci krystalicznej dla wybranej rodziny płaszczyzn sieciowych (hkl).

Badania prowadzono za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego (Rys.14) wykorzystującego monochromatyczne promieniowanie lampy o anodzie kobaltowej ( $\lambda = 1,79026 \text{ [\AA]}$ ) i mocy 1400 [W]. Naprężenia były mierzone w 4 punktach próbki dla jednej powierzchni. W wyniku czego otrzymano 59 wartości naprężeń dla 15 próbek (na próbce nr T8 dokonano pomiaru w 3 punktach).



Rys. 14. Dyfraktometr firmy Brukers

Otrzymane wyniki z pomiaru naprężeń wykorzystano do wygenerowania modelu matematycznego. W tym celu uwzględniono trzy czynniki wejściowe, którym były trzy zmienne parametry skrawania: prędkość skrawania ( $v_c$ ), posuw ( $f$ ), głębokość skrawania ( $a_p$ ). Przyjęte różne parametry skrawania umożliwiły weryfikację wpływu poszczególnych sekwencji parametrów na otrzymane wartości naprężeń.

Na podstawie przyjętych parametrów wejściowych oraz wyjściowych wyznaczona została funkcja obiektu badań w postaci wielomianu drugiego stopnia z interakcjami dla trzech zmiennych wielkości wejściowych. Równanie 3 przedstawia otrzymany wielomian.

$$F(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (3)$$

gdzie:

$x_1$  – prędkość skrawania,

$x_2$  – posuw,

$x_3$  – głębokość skrawania.

Otrzymane wartości współczynników  $b$  (dla próbek wykonanych z Ti6Al4V oraz z Inconelu 718) zestawiono w tabeli 1.

Tab.1. Poszczególne wartości wsp.  $b_n$  otrzymane z modelu matematycznego

Współczynnik	Wartość (Ti6Al4V)	Wartości (Inconel 718)
$b_1$	-1121,23977968714	-311,463953494004
$b_2$	6,14812922095151	1,79450726856332
$b_3$	0,875844897533793	1,64543266145682
$b_4$	1213,81802549616	1194,87425408757
$b_5$	0,00403064401352080	0,00384800384800385
$b_6$	-0,365259740259741	18,5335497835498
$b_7$	-0,396689497716888	-0,649691358024691
$b_8$	-0,0640581610748693	-0,105765282918352
$b_9$	-0,000583827456513847	-0,000972733118772361
$b_{10}$	-811,222439005028	-1444,10244873243

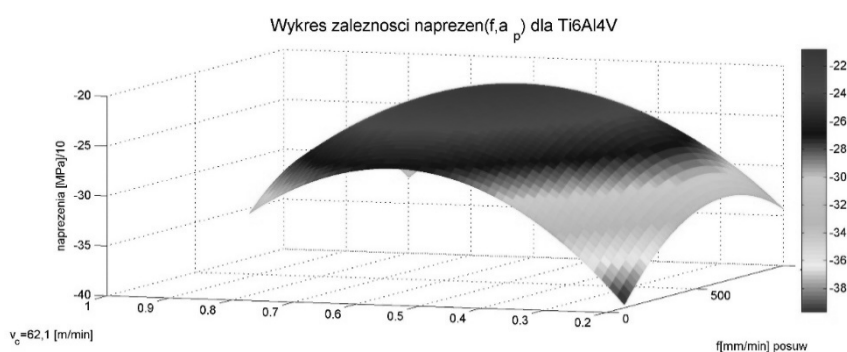
Przyjmując:  $x_1 = v_c$ ,  $x_2 = f$ ,  $x_3 = a_p$ , otrzymujemy równanie 4.



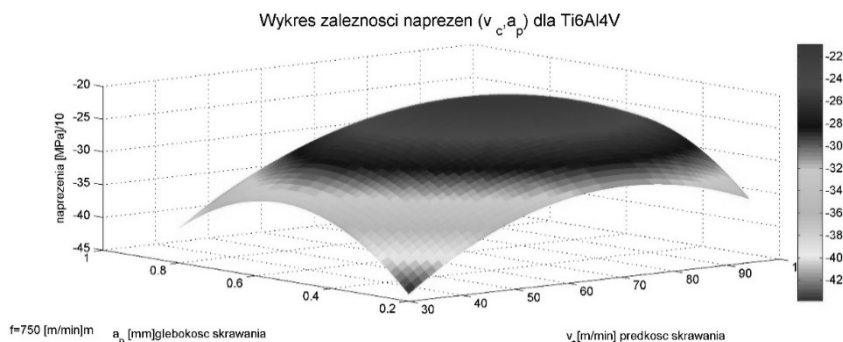
$$F(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

$$F(v_c, f, a_p) = (-1121,23977968714) + 6,14812922095151 * v_c + 0,875844897533793 * f + 1213,81802549616 * a_p + 0,00403064401352080 * v_c^2 + (-0,365259740259741 * f^2) + (0,396689497716888 * a_p^2) + (0,0640581610748693 * v_c * f) + (0,000583827456513847 * v_c * a_p) + (-811,222439005028 * f * a_p) \quad (4)$$

Rysunki (rys.15, rys.16, rys. 17) przedstawiają zależności pomiędzy otrzymanymi wartościami naprężeń mierzonych w kierunku prostopadłym do obrabianej powierzchni od zastosowanych parametrów skrawania dla próbek wykonanych ze stopu tytanu.

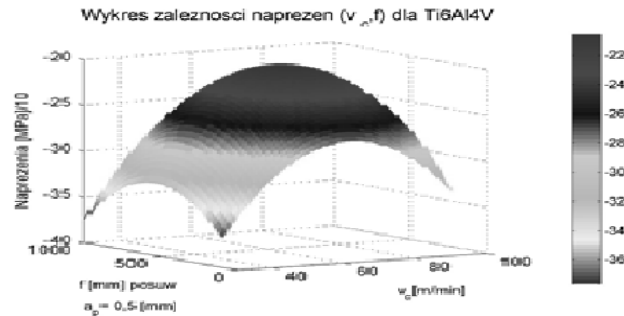


Rys. 15. Wykres zależności wartości naprężeń mierzonych w kierunku prostopadłym do obrabianej powierzchni od parametrów skrawania ( $f, a_p$ ) przy stałej  $v_c = 62,1$  [m/min] dla próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V

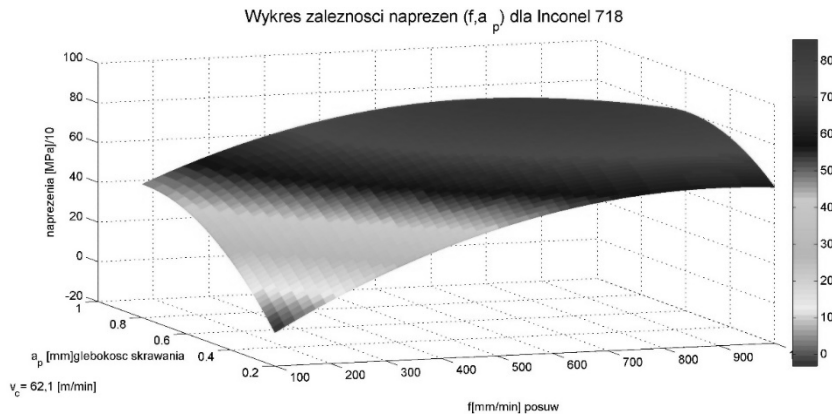


Rys. 16. Wykres zależności wartości naprężeń mierzonych w kierunku prostopadłym do obrabianej powierzchni od parametrów skrawania ( $v_c, a_p$ ) przy stałym  $f = 750$  [mm/min] dla próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V

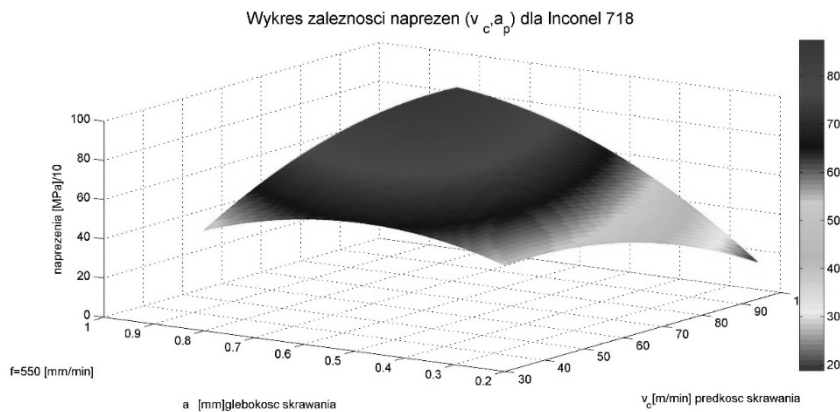
Rysunki (ry.18, rys. 19, rys.20) przedstawiają zależności otrzymanych wartości naprężeń mierzonych w kierunku prostopadłym do obrabianej powierzchni od zastosowanych parametrów skrawania dla próbek wykonanych ze stopu Inconel 718.



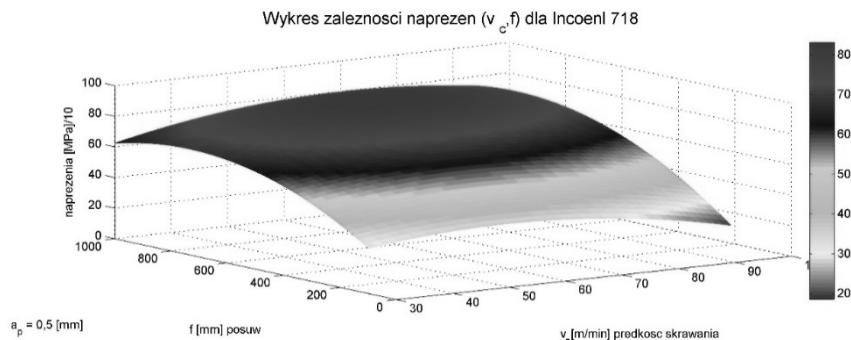
Rys. 17. Wykres zależności wartości naprężeń mierzonych w kierunku prostopadłym do obrabianej powierzchni od parametrów skrawania ( $v_c, f$ ) przy stałej  $a_p=0,5$  [mm] dla próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V



Rys. 18. Wykres zależności wartości naprężeń mierzonych w kierunku prostopadłym do obrabianej powierzchni od parametrów skrawania ( $f, a_p$ ) przy stałej  $v_c=62,1$  [m/min] dla próbek wykonanych ze stopu niklu – Inconel 718



Rys. 19. Wykres zależności wartości naprężeń mierzonych w kierunku prostopadłym do obrabianej powierzchni od parametrów skrawania ( $v_c, a_p$ ) przy stałym  $f=550$  [mm/min] dla próbek wykonanych ze stopu niklu - Inconel 718



Rys.20. Wykres zależności wartości naprężeń mierzonych w kierunku prostopadłym do obrabianej powierzchni od parametrów skrawania ( $v_c, f$ ) przy stałej  $a_p=0,5$  [mm] dla próbek wykonanych ze stopu niklu - Inconel 718

Z przeprowadzonych badań wynika, że wartości naprężeń własnych zależą od parametrów skrawania. Najniższe wartości naprężeń odnotowano dla najniższych głębokości skrawania ( $a_p=0,2$ mm) zarówno w przypadku obróbki próbek wykonanych ze stopu tytanu jak i ze stopu niklu.

## 6. Wnioski

Z modelu fizycznego wynika, że przy stałych wartościach posuwu dla próbek z Inconelu, najniższe naprężenia ( $\sigma_{\min}$ ) otrzymano przy najwyższych wartościach prędkości skrawania oraz przy najniższych wartościach głębokości skrawania. Najwyższe wartości naprężeń ( $\sigma_{\max}$ ) otrzymano przy najwyższych prędkościach skrawania oraz najwyższych wartościach głębokości skrawania. W przypadku próbek wykonanych z Ti6Al4V najniższe wartości ( $\sigma_{\min}$ ) naprężeń otrzymano dla najniższych prędkości skrawania oraz najniższych wartości głębokości skrawania. Naprężenia maksymalne ( $\sigma_{\max}$ ) otrzymano w trakcie obróbki z najwyższą prędkością skrawania oraz na najwyższej głębokości skrawania.

Ponadto wartości otrzymanych naprężeń różnią się w zależności od właściwości materiału. Zauważalna jest tendencja do naprężeń ściskających w próbkach wykonanych ze stopu tytanu oraz występowanie naprężeń rozciągających w próbkach wykonanych z Inconelu 718. Zmienny charakter naprężeń (ściskające/rozciągające) można wytłumaczyć różnymi właściwościami termicznymi stopów tytanu oraz niklu.

Znajomość mechanizmów powstawania naprężeń oraz znajomość charakteru oraz wartości naprężeń jest bardzo ważną wskazówką w szczególności w procesie planowania operacji obróbkowych. Wiedza na temat występujących naprężeń może posłużyć do kształtowania elementów o pożądanym stanie naprężeń w technologicznej warstwie wierzchniej.

## Literatura

1. Wawszczak R., Naprężenia własne w materiałach polikrystalicznych oraz ich zmienność podczas obróbki termicznej, Rozprawa doktorska, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, AGH, Kraków, 2012.
2. Krajewska-Śpiewak J., Identyfikacja właściwości warstwy wierzchniej materiałów trudnoskrawalnych, Rozprawa doktorska, Wydział Mechaniczny, PK, Kraków, 2016.

3. Mackiewicz S., Dyfraktometria rentgenowska w badaniach nieniszczących – nowe normy europejskie, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych, Popow 2005.
4. <http://kids.britannica.com/> 09.12.2016.
5. Butnicki S., Ćwiek J., Degórski A., Głowacka M., Hucińska J., Jankowski T., Królikowski Z., Krzysztofowicz T., Łabanowski J., Rynkiewicz S., Serbiński S., Stryjewski J., Zaczek Z., Metaloznawstwo- praca zbiorowa, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1996.
6. Wierzbowski K. Dyfrakcyjne wyznaczanie naprężeń wewnętrznych. <http://www.fij.agh.edu.pl/~wierzbowski/naprezenia.pdf>. 12.12. 2016.
7. Dobrzański L.A., Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, Warszawa, 2002.

Dr inż. Joanna KRAJEWSKA-ŚPIEWAK  
Prof. dr hab. inż. Józef GAWLIK  
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji  
Politechnika Krakowska  
Wydział Mechaniczny  
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków  
email: [jkspiewak@mech.pk.edu.pl](mailto:jkspiewak@mech.pk.edu.pl)  
[jgawlik@mech.pk.edu.pl](mailto:jgawlik@mech.pk.edu.pl)