

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowanie mojemu Promotorowi, Panu Profesorowi dr inż. Janowi Kaczmarkowi za łaskawe przyjęcie mnie w poczet swoich doktorantów, za cenne wskazówki przy podjęciu tematu, troskliwą opiekę podczas prowadzenia badań i życzliwe rady przy opracowywaniu wyników.

Składam również podziękowanie wszystkim współpracownikom z W.S.I. w Lublinie, którzy okazali mi pomoc przy wykonywaniu niniejszej pracy, a szczególnie Panu docentowi mgr inż. Sewerynowi Bobińskiemu, kierownikowi Zespołu Obróbki Skrawaniem i Obrabiarek.

Ponadto wdzięczny jestem Panu Dziekanowi doc.dr inż. Adamowi Siemieńcowi i Radzie Wydziału Maszyn Górniczych i Hutniczych A.G.H. za umożliwienie mi kontynuowania niniejszej pracy.

# S p i s t r e ś c i.

	str.
Spis ważniejszych oznaczeń .....	4
Wprowadzenie .....	6
 <b>I. CEL I ZAKRES PRACY</b>	
1.1. Cel pracy .....	8
1.2. Zakres pracy .....	8
 <b>II. ANALIZA WSTEPNA</b>	
2.1. Aktualny stan zagadnienia .....	9
2.2. Przegląd wibratorów .....	11
2.3. Model urządzenia wibracyjnego .....	15
2.4. Dane techniczne urządzenia .....	18
2.5. Wyznaczenie amplitudy drgań .....	19
2.6. Współczynnik tłumienia .....	20
2.7. Kinematyka i dynamika ruchu wibratora .....	25
2.8. Moc potrzebna do napędu wibratora .....	31
2.9. Wnioski do badań własnych .....	33
 <b>III. BADANIA WŁASNE</b>	
3.1. Cel i zakres badań .....	34
3.2. Metodyka i technika pomiarów .....	36
3.3. Ustalenie bezpiecznego zakresu pracy wibratora .....	46
3.4. Wyniki badań własności fizykalnych i użytkowych warstwy wierzchniej .....	59
3.5. Analiza wyników badań .....	100
 <b>IV. WNIOSKI</b>	
4.1. Wnioski o charakterze poznawczym .....	106
4.2. Wnioski o charakterze praktycznym .....	108
4.3. Proponowane kierunki dalszych badań .....	110
Literatura .....	112
Załącznik do pracy (rys.1 <sub>Z</sub> - 130 <sub>Z</sub> ) w oddzielnej teczce.	

### 1.5. Spis ważniejszych oznaczeń.

- A - amplituda drgań, m,  
t - czas obróbki, s,  
T - okres drgań, s,  
 $\omega$  - częstość kątowna drgań, rad/s,  
 $\nu$  - częstotliwość drgań, 1/s,  
B - siła bezwładności, N,  
G - siła ciężkości, ciężar, N,  
P - siła wymuszająca, N,  
 $P_0$  - amplituda siły wymuszającej, N,  
 $P_t$  - siła tłumiąca, N,  
c - siła sprężystości, N/m,  
 $E_j$  - moduł wydłużenia sprężystego Younga, N/m<sup>2</sup>,  
 $G_k$  - moduł sprężystości postaciowej (Kirchhoffa), N/m<sup>2</sup>,  
M - masa, kg,  
g - przyspieszenie ziemskie, 9,8/ m/s<sup>2</sup>,  
K - współczynnik podrzutu (wielkość bezwymiarowa) oznacza stosunek przyspieszenia wibratora do przyspieszenia ziemskiego,  
 $\nu_w$  - częstotliwość drgań własnych, 1/s,  
 $\rho$  - odległość środka masy wirującej (ciężarka) od osi obrotu, m,  
R, r - promienie, m,  
D, d - średnice, m,  
 $\Delta l$  - odkształcenie wywołane działaniem siły, m,  
i - liczba zwojów sprężyny lub liczba krążków gumowych,  
 $v_y$  - prędkość kulek w kierunku pionowym, m/s,  
 $a_y$  - przyspieszenie kulek w kierunku pionowym, m/s<sup>2</sup>,  
 $s_y$  - droga kulek w kierunku pionowym, m,  
y - wychylenie wibratora, m,

- $\dot{y}$  - prędkość wibratora, m/s,  
 $\ddot{y}$  - przyspieszenie wibratora, m/s<sup>2</sup>,  
m - stosunek czasu swobodnego lotu kulek do okresu drgań wibratora (wielkość bezwymiarowa),  
 $\psi$  - kąt przesunięcia fazowego, stopnie lub rad,  
k<sub>2</sub> - współczynnik tłumienia od wsadu kulek, kg/s,  
k<sub>1</sub> - współczynnik tłumienia wibratora, kg/s  
E<sub>z</sub> - energia zderzenia kulek z pojemnikiem, kg.m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>,  
E<sub>k</sub> - energia kinetyczna uzyskana przez kulki w czasie ruchu wraz z pojemnikiem, kg.m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>,  
ΔL - praca tłumienia pochodząca od ruchu kulek, przypadająca na jeden cykl drgań, kg.m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>,  
N - moc, W,  
N<sub>s</sub> - moc silnika napędowego, W,  
N<sub>obl.śr.</sub> - średnia moc obliczeniowa, potrzebna do napędu wibratora, W,  
η - sprawność,  
Δ<sub>st</sub> - ugięcie statyczne sprężyny, m,  
ww - warstwa wierzchnia,  
ε<sub>w</sub> - grubość warstwy wierzchniej, m,  
C - krzywizna próbki,  $\frac{1}{m}$ ,  
M<sub>w</sub> - masa wibratora bez ciężarków, kg,  
M<sub>c</sub> - masa ciężarków, kg,  
M<sub>k</sub> - masa kulek, kg,  
M - masa wibratora łącznie z ciężarkami, kg,  
ω<sub>w</sub> - częstość kątowna drgań własnych, rad/s,  
ΔG(t) - ubytek wagowy próbki po czasie t,  $\frac{uN}{\text{min}}$ ,  
l - odległość między podporami, m,  
γ - ciężar właściwy,  $\frac{N}{m^3}$ ,  
σ - naprężenie,  $\frac{N}{m^2}$   
f - ugięcie próbki, m,  
Δ<sub>g</sub> - ubytek próbki między kolejnymi dwoma pomiarami, m,  
ε<sub>o</sub> - grubość próbki przed trawieniem, m,  
ξ - bezwymiarowy współczynnik tłumienia,  
ε<sub>1</sub> - głębokość warstwy wierzchniej (oznacza odległość rozpatrywanego punktu od powierzchni obrobionej) - oznaczenie umowne.

## Wprowadzenie.

Jakość użytkowa wyrobów w dużej mierze zależy od metody wytwarzania. Na podstawie licznych badań stwierdzono, że obok dokładności wymiarowo-kształtowej części maszyn, o ich trwałości eksploatacyjnej decyduje również stan warstwy wierzchniej uzyskanej w czasie obróbki.

Fizykalne cechy zewnętrznej strefy, stykającej się bezpośrednio z otaczającym ośrodkiem, mają duży wpływ na właściwości użytkowe przedmiotów.

Głównym zadaniem obróbki powierzchniowej zgniotem za pomocą luźnych kulek metodą wibracyjną jest uzyskanie takiego stanu warstwy wierzchniej, który wpływa na wzmocnienie wyrobu, a głównie na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej.

Zaczątkami pęknięć zmęczeniowych są makro i mikro szczeliny, w których koncentrują się cyklicznie naprężenia, doprowadzające z czasem do zniszczenia elementów narażonych na obciążenia zmienne. Niekorzystne działania wywołują naprężenia własne rozciągające, a pozytywny wpływ mają naprężenia ściskające, które można uzyskać poprzez obróbkę powierzchniową zgniotem. Naprężenia tego rodzaju wpływają na lepsze wykorzystanie więzi międzycząsteczkowej. Przy zgniocie tworzą się takie dyslokacje, które stawiają opór przemieszczeniom, jakie mogą zachodzić w krystalitach, zwiększając przez to wytrzymałość materiałów.

Obróbka powierzchniowa zgniotem metodą wibracyjną polega na wykorzystaniu plastycznych właściwości metali bez naruszania

ciągłości włókien. Zasada tej obróbki polega na wprowadzaniu w ruch drgający harmoniczny o określonej amplitudzie i częstotliwości pojemnika przytwierdzonego do wibratora. W pojemniku mocowane są przedmioty obrabiane, pokryte pewną warstwą luźnych kulek. Maksymalne przyśpieszenia pojemnika są znacznie większe od przyśpieszenia ziemskiego, w wyniku czego luźne kulki nie przylegają do przedmiotu obrabianego lecz są "zawieszane" w przestrzeni i okresowo zderzają się z powierzchnią obrabianą. Energia zderzenia zamienia się na energię odkształceń plastycznych, a częściowo na energię cieplną i odkształcenia sprężyste.

Aby uzyskać zamierzone wielkości odkształceń plastycznych, należy określić takie parametry technologiczne jak: częstotliwość drgań, amplitudę, średnicę kulki i czas obróbki. Parametry te mają istotny wpływ na: topografię mikrotwardości, stereometrię warstwy wierzchniej, wielkość naprężeń własnych i strukturę metalograficzną.

Powszechnie stosowaną dotychczas metodą obróbki, zbliżoną do obróbki wibracyjnej, jest tzw. "śrutowanie", polegające na "bombardowaniu" powierzchni luźnym śrutem, wprowadzonym w ruch za pomocą strumienia powietrza, grawitacyjnie, lub za pomocą urządzeń mechanicznych. Metodą tą można uzyskać zamierzone odkształcenia plastyczne, ale występuje znaczne pogorszenie własności stereometrycznych warstwy wierzchniej, podczas gdy przy obróbce wibracyjnej za pomocą luźnych kulek, można uzyskać zamierzony zgniot przy jednoczesnej poprawie stereometrii ww.

## I. CEL I ZAKRES - PRACY.

### 1.1. Cel pracy.

Badanie wpływu obróbki powierzchniowej zgniotem za pomocą luźnych kulek metodą wibracyjną na stan i własności użytkowe warstwy wierzchniej.

### 1.2. Zakres pracy.

- a. Ustalenie racjonalnego zakresu pracy urządzenia wibracyjnego.
- b. Zbadanie wpływu częstotliwości, amplitudy, masy kulki i czasu obróbki na stan i własności użytkowe warstwy wierzchniej stali 55.
- c. Ustalenie wpływu zawartości węgla w stali konstrukcyjnej poddanej zgniotowi przy ustalonych parametrach obróbki na niektóre własności warstwy wierzchniej.
- d. Badania rozpoznawcze warstwy wierzchniej materiałów różnych, takich jak: stal SW9, SW18, NC6, ŻH15, 50HS; żeliwo ZI15, ZcC3510; brąz BA1032; mosiądz M60; miedź M<sub>1</sub>; stop tytanu WT3; stop aluminium PA10 poddanych obróbce zgniotem przy ustalonych parametrach obróbki.

## II. ANALIZA WSTEPNA.

### 2.1. Aktualny stan zagadnienia.

Zagadnienie obróbki mechanicznej, w wyniku której otrzymuje się polepszenie własności użytkowych warstwy wierzchniej, jest szeroko omawiane w literaturze krajowej i zagranicznej [9], [14], [25], [26], [38], [46], [52], ale na temat metody wibracyjnej wzmiankuje tylko autor pracy [38]. W pracy tej podjęte jest - między innymi - zagadnienie ogólnej klasyfikacji obróbki zgniotem. Proponowany jest podział według kinematyki ruchów względnych narzędzia i przedmiotu obrabianego oraz sposobu wywierania nacisku, powodującego zgniot. Takie pojęcia jak "zgniot powierzchniowy", "wzmacnianie mechaniczne", "nagniatanie" - określane są jedną nazwą - dogniatanie (D). Poszczególne odmiany kinematyczne też są szczegółowo określane. Np. obróbka wibracyjna określona jest symbolem ( $DUK_w$ ), co oznacza: dogniatanie udarowe kulkami metodą wibracyjną (kulkowanie wibracyjne). W niniejszej pracy przyjęto nazwę "obróbka powierzchniowa zgniotem", za autorem wcześniejszej publikacji [14], ale klasyfikacja i nazewnictwo podane w publikacji [38] wydaje się bardziej ścisłe i prawdopodobnie będzie ogólnie przyjęte.

Dynamiczny rozwój różnych odmian obróbki zgniotem wymaga prowadzenia badań nad optymalizacją parametrów technologicznych obróbki pod kątem uzyskania poprawnych wskaźników stereometrycznych, fizykalnych i użytkowych warstwy wierzchniej.

Dużą pomocą przy prowadzeniu badań w tym zakresie jest określenie, uporządkowanie i sklasyfikowanie podstawowych pojęć dotyczących warstwy wierzchniej ujętych w pracy [21] i [42].

Odnosnie wyników badań nad wpływem różnych odmian obróbki powierzchniowej zgniotem na własności warstwy wierzchniej, istnieje obecnie zgodny pogląd, że uzyskane naprężenia ściskające (zgo -



dnie z modelem zimnym [22]) oddziaływują korzystnie na zmęczeniowość [22] [25] [26] [30]. Nie ma natomiast zgodności wyników badań dotyczących zależności pomiędzy stanem naprężeń w warstwie wierzchniej a ścieralnością. Mało jest też zbadany wpływ zgniotu na zmianę struktury metalograficznej.

W obróbce powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną, źródłem ruchu względnego narzędzia (wsadu kulek) i przedmiotu obrabianego jest wibrator. Istotną rolę spełnia tutaj dobór typu wibratora, od czego zależy z kolei zakres możliwych do uzyskania parametrów ruchu, jak też zapotrzebowanie mocy układu napędowego. Doświadczenia z tego zakresu mogą być przydatne przy stosowaniu obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną na skalę przemysłową. Racjonalny dobór wielkości konstrukcyjnych wibratora i optymalizacja parametrów technologicznych stworzy możliwość takiego prowadzenia procesu obróbki, który zapewni uzyskanie zamierzonego efektu.

Już obecnie w przemyśle lotniczym stosowane jest wzmacnianie metodą wibracyjną elementów nośnych, posiadających skomplikowaną konfigurację. W takich przypadkach, luźne kulki posiadające własności materiału sypkiego, umożliwiają nanoszenie zgniotu, co z kolei pozwala na przedłużenie ресурсu obrabianych elementów i zwiększenie bezpieczeństwa lotu.

Na temat obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną brak jest opracowań o charakterze poznawczym i praktycznym. Wydaje się więc celowe prowadzenie badań w tym zakresie, a szczególnie:

1. Ustalenie zależności energetycznych i konstrukcyjnych urządzenia wibracyjnego, mając szczególnie na uwadze sprawność energetyczną, trwałość eksploatacyjną i niezawodność działania wibratora.
2. Prowadzenie doświadczeń nad wpływem parametrów technologicznych obróbki na własności fizykalne i użytkowe warstwy wierzchniej.

## 2.2. Przegląd wibratorów.

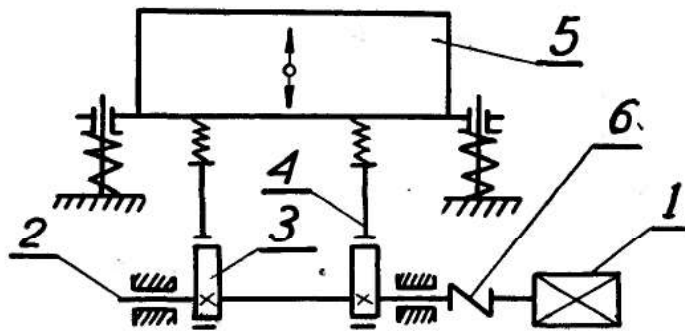
Narzędziem roboczym w obróbce powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną są luźne kulki. Aby zachodził proces obróbki, musi istnieć ruch względny przedmiotu obrabianego i narzędzia [20]. Zródłem ruchu jest wibrator. Drgania harmoniczne wibratora wprawiają w ruch luźne kulki, które okresowo zderzają się z przedmiotami obrabianymi przymocowanymi do pojemnika. Od energii zderzenia zależy efekt obróbki. Wibrator musi się więc cechować dostatecznie dużą siłą wymuszającą, aby można było uzyskać zalecane amplitudy i częstotliwości drgań. Parametry te zależą od mocy i konstrukcji wibratora. W zależności od sposobu uzyskiwania siły wymuszającej, wibratory można podzielić na następujące grupy:

- wibratory mimośrodowe
- wibratory bezwładnościowe
- wibratory elektromagnetyczne
- wibratory ciśnieniowe.

### Wibratory mimośrodowe.

Wibratory mimośrodowe cechują się stałą amplitudą drgań niezależną od częstotliwości i obciążenia, dzięki czemu mogą pracować w warunkach rezonansu [7]. Stosowane są przy małych częstotliwościach drgań (rzędu 30 Hz) i dużych amplitudach.

Ze względu na to, że wibratory tego typu pracują w warunkach rezonansu, moc układu napędowego w czasie pracy jest stosunkowo mała. Podczas uruchamiania wymagany jest natomiast duży moment rozruchowy i z tej racji pomiędzy silnikiem a wibratorem umieszczone są koła zamachowe, które są wysprzęglane po uruchomieniu wibratora.



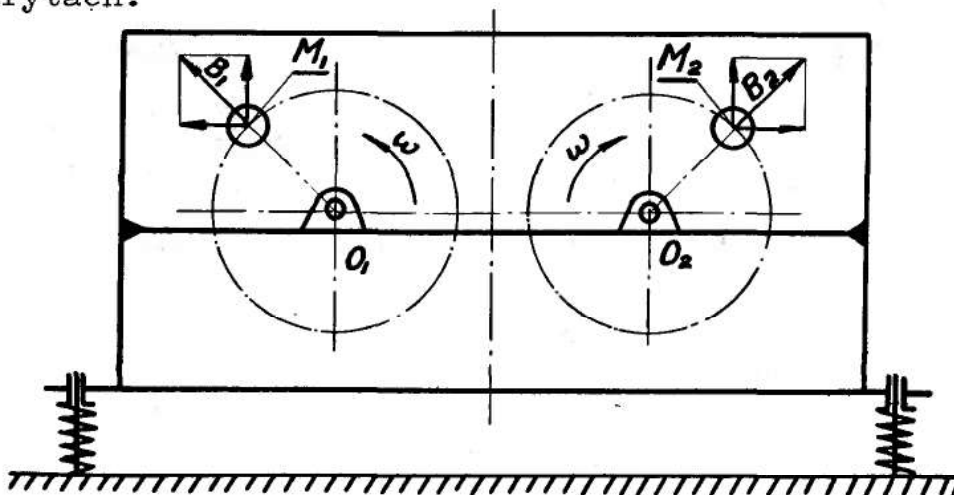
Rys.1.

Schemat wibratora mimośrodowego.

Wibrator mimośrodowy przedstawiony jest schematycznie na rys.1. Napęd z silnika elektrycznego 1 przenoszony jest na wał mimośrodowy 2, na którym umiejscowione są mimośrodowo 3 współpracujące z łącznikami 4. Połączenie łączników 4 z pojemnikiem 5 jest sprężyste.

#### Wibratory bezwładnościowe.

Wibratory bezwładnościowe wykonywane są jako jedno i dwumasowe. W wibratorach dwumasowych (rys.2) kierunek siły wymuszającej jest stały, a amplituda zależy od prędkości kątowej, wielkości wirujących mas i promienia ich niewyważenia. Wibratory bezwładnościowe mogą pracować w częstotliwościach podrezonansowych i pozarezonansowych. Cechują się dużą siłą wymuszającą przy małych gabarytach.



Rys.2.

Schemat wibratora bezwładnościowego.

Na rys.2 przedstawiony jest schemat działania wibratora bezwładnościowego dwumasowego, w którym siłę bezwładności mas wirujących można opisać równaniami

$$B_1 = \omega^2 \cdot g \cdot M_1$$

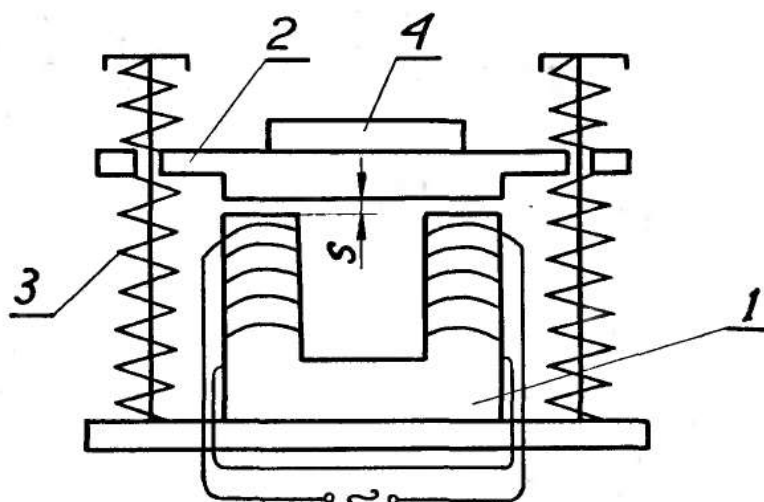
$$B_2 = \omega^2 \cdot g \cdot M_2$$

Masy  $M_1$  i  $M_2$  obracają się w przeciwnych kierunkach z jednakową prędkością kątową. Składowe poziome siły bezwładności znoszą się, a pionowe są sinusoidalnie zmienne. Siłę pionową można opisać równaniem:

$$P(t) = P_0 \sin \omega t$$

Wibratory elektromagnetyczne.

Wibratory elektromagnetyczne [7] należą do grupy wibratorów reakcyjnych. Na rys.3 przedstawiony jest schemat ideowy takiego wibratora. Żwora elektromagnesu 2 przyciągana jest przez elektromagnes 1 i odpychana sprężynami 3.



Rys.3.

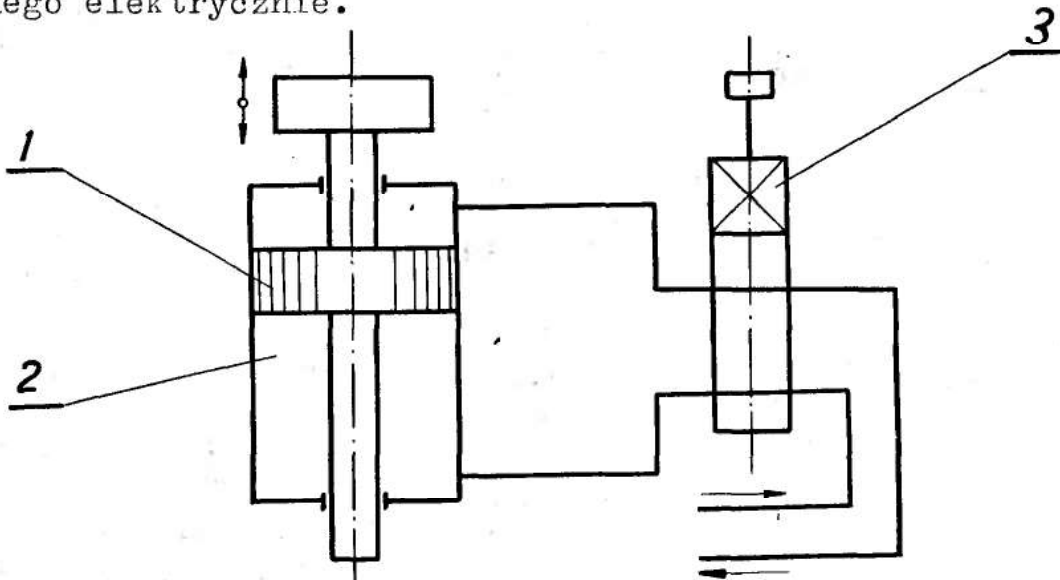
Schemat wibratora elektromagnetycznego.

W tego typu wibratorach częstotliwość drgań jest dwa razy większa od częstotliwości natężenia prądu przepływającego w uzwojeniu 1. Przy zastosowaniu prostownika selenowego częstotliwość drgań moż-

na zmniejszyć o połowę. Za pomocą szczeliny *s*, sprężyn *3* i masy *4* dostraja się układ do rezonansu. Wibratory elektromagnetyczne są wrażliwe na zmiany obciążenia i łatwo wytrącają się z rezonansu. Siła wymuszająca jest mała w porównaniu z wibratorami bezwładnościowymi.

#### Wibratory ciśnieniowe.

Na rys.4 przedstawiony jest schemat ideowy wibratora hydraulicznego [4]. Do cylindra *2* doprowadzana jest ciecz raz z jednej, raz z drugiej strony w zależności od położenia rozrządu *3* sterowanego elektrycznie.



Rys.4.

Schemat wibratora hydraulicznego.

Pod wpływem impulsów zmieniającego się ciśnienia tłok *1* wykonuje drgania. Wibratory hydrauliczne są kłopotliwe w eksploatacji ze względu na zmieniającą się amplitudę i częstotliwość pod wpływem "zarastania" szczelin w rozrządzie hydraulicznym.

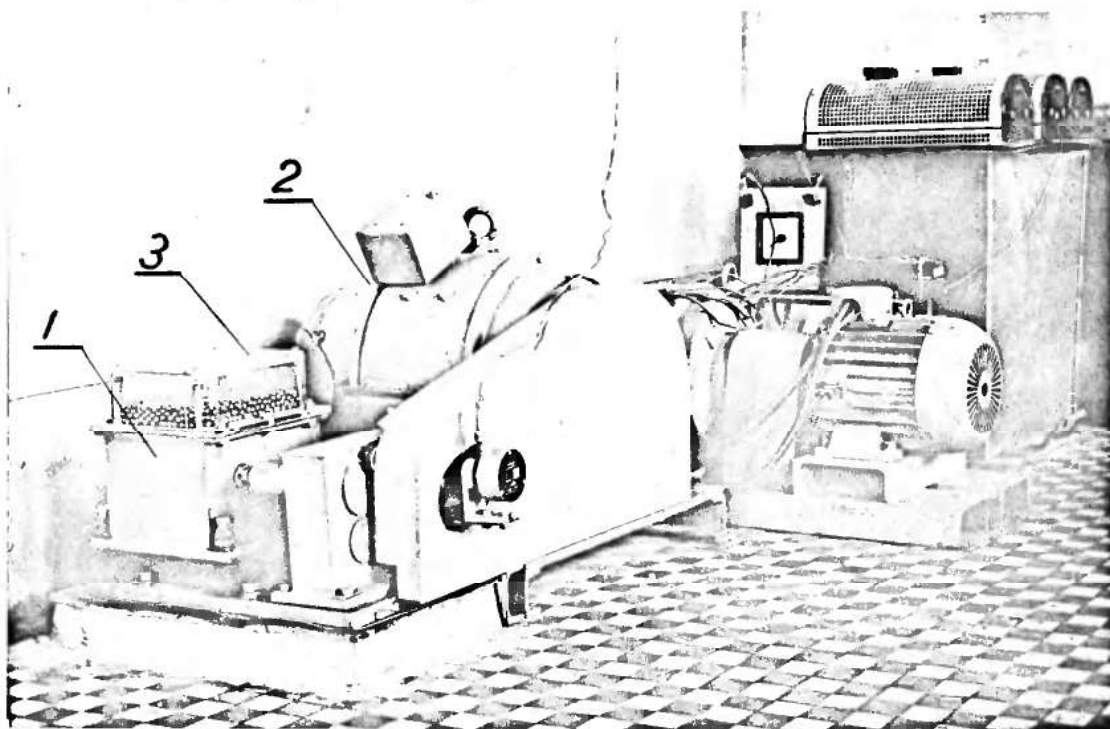
#### 2.2. Wybór typu wibratora.

Przy wyborze typu wibratora na model do badań kierowano się programem przewidzianych doświadczeń i możliwością rozpowszechnienia obróbki powierzchniowej zgniotem na skalę przemysłową. Z poś-

ród omówionych typów wibratorów najprostszą konstrukcję posiada wibrator bezwładnościowy dwumasowy. Cechuje się on dużą siłą wymuszającą, małymi gabarytami przy stosunkowo dużej mocy oraz dużym zakresem regulacji amplitudy i częstotliwości. Model takiego wibratora wykonano dostosowując jego wielkość do gabarytów przewidzianych do badań próbek.

### 2.3. Model urządzenia wibracyjnego.

Na rys.5 przedstawiony jest widok ogólny urządzenia wibracyjnego. Wibrator 1 napędzany jest silnikiem prądu stałego 2. Do wibratora przytwierdzony jest pojemnik 3, w którym mocowane są przedmioty obrabiane, pokryte luźnymi kulkami.



Rys.5.

Ogólny widok urządzenia wibracyjnego.

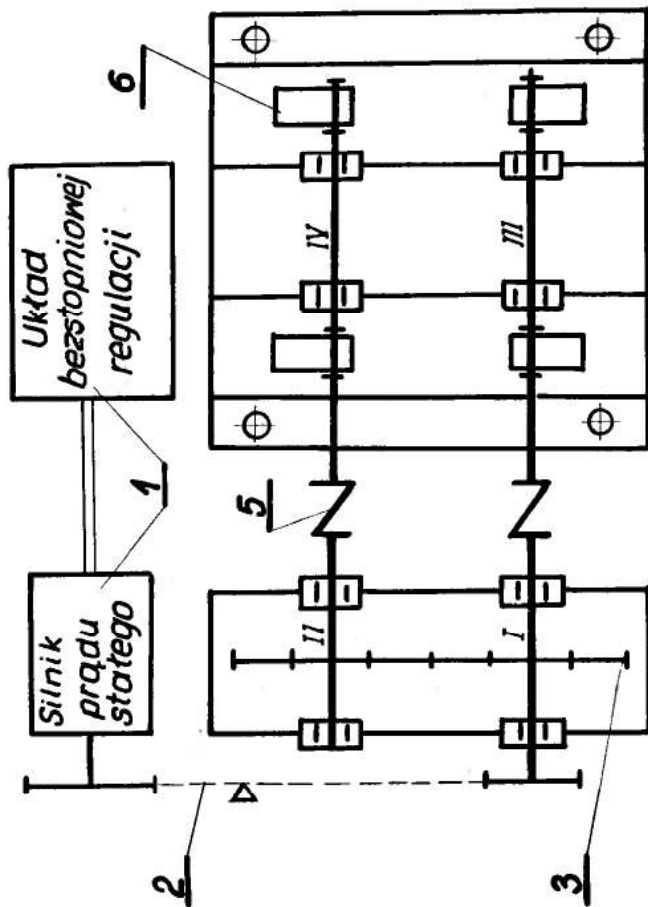
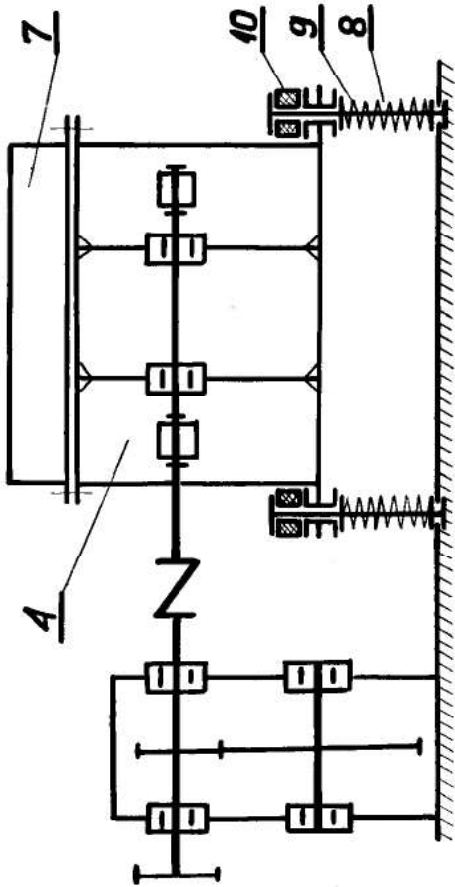
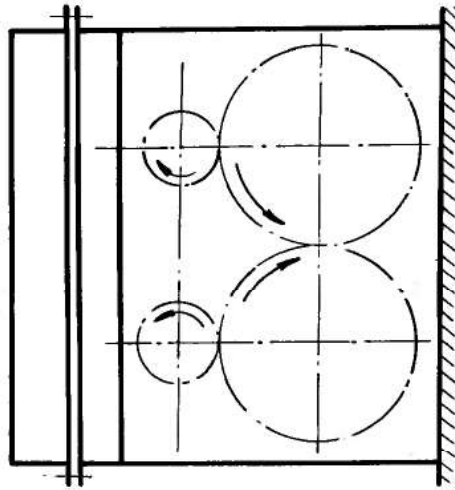
Na rys.6 przedstawiony jest schemat modelu urządzenia wibracyjnego. Źródłem napędu jest układ elektryczny 1 o bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej. Moment obrotowy z silnika elektrycznego przenoszony jest za pomocą przekładni pasowej 2 na przekładnię zębatą 3, przekazującą napęd na wałki I i II, obracające się



w przeciwnych kierunkach. Wałki I i II połączone są sprzęgłami elastycznymi z wałkami III i IV (umiejscowionymi w wibratorze), na których umocowane są niewyważone masy 6. W górnej części wibratora umiejscowiony jest pojemnik z przedmiotami obrabianymi 7. Ruch pionowy pojemnika zapewnia jednokierunkowe działanie sił wymuszających wibratora oraz cztery prowadnice 8, na które nałożone są amortyzatory 10 i sprężyny 9.

Napięcie wstępne sprężyn i amortyzatorów może być regulowane za pomocą śrub będących zakończeniem prowadnic. Amortyzatory 10 wykonane są z krążków gumowych. Zadaniem ich jest tłumienie układu drgającego. Tłumiące zadanie amortyzatorów wpływa na zwiększenie poboru mocy przez układ napędowy, ale jest to niezbędne ze względu na niebezpieczeństwo zniszczenia urządzenia podczas przechodzenia przez zakres częstotliwości rezonansowych. Koła pośredniczące (większe) w skrzynce przekładniowej wykonano z tekstolitu. Wpłynęło to na zmniejszenie hałasu przy dużych obrotach.

Podczas wstępnych badań rozpoznawczych stwierdzono, że wibrator dwumasowy ma skłonność do samocentrowania. Na połączenie skrzynki przekładniowej z wibratorem doskonale nadają się "węże" gumowe, wciśnięte na łączone wałki. Takie połączenie w porównaniu ze sprzęgłami przegubowymi, które zastosowano w pierwotnej wersji rozwiązania, okazało się bardziej bezpieczne i trwałe. Wystąpiło też mniejsze natężenie hałasu.



Rys. 6. Schemat kinematyczny urządzenia wibracyjnego.



2.4. Dane techniczne urządzenia.

1. Wymiary gabarytowe wibratora 245 x 160 x 245, mm,
2. Wymiary przestrzeni roboczej pojemnika 180 x 180 x 60, mm,
3. Masa wibratora bez kulek, przedmiotów obrabianych i ciężarków 25,75, kg,
4. Masa wsadu  $1 \div 4$ , kg,
5. Stała sprężystości  $c = 650$ , kN/m,
6. Częstotliwości drgań wymuszonych przyjęte do badań:  
 $\nu = 40, 50, 60, 70, 80, 1/s$ ,
7. Wielkości mas niewyważonych poszczególnych zestawów ciężarków, kg,

I.	-	1,02
II	-	1,38
III	-	1,56
IV	-	1,80
V	-	2,04
VI	-	3,00

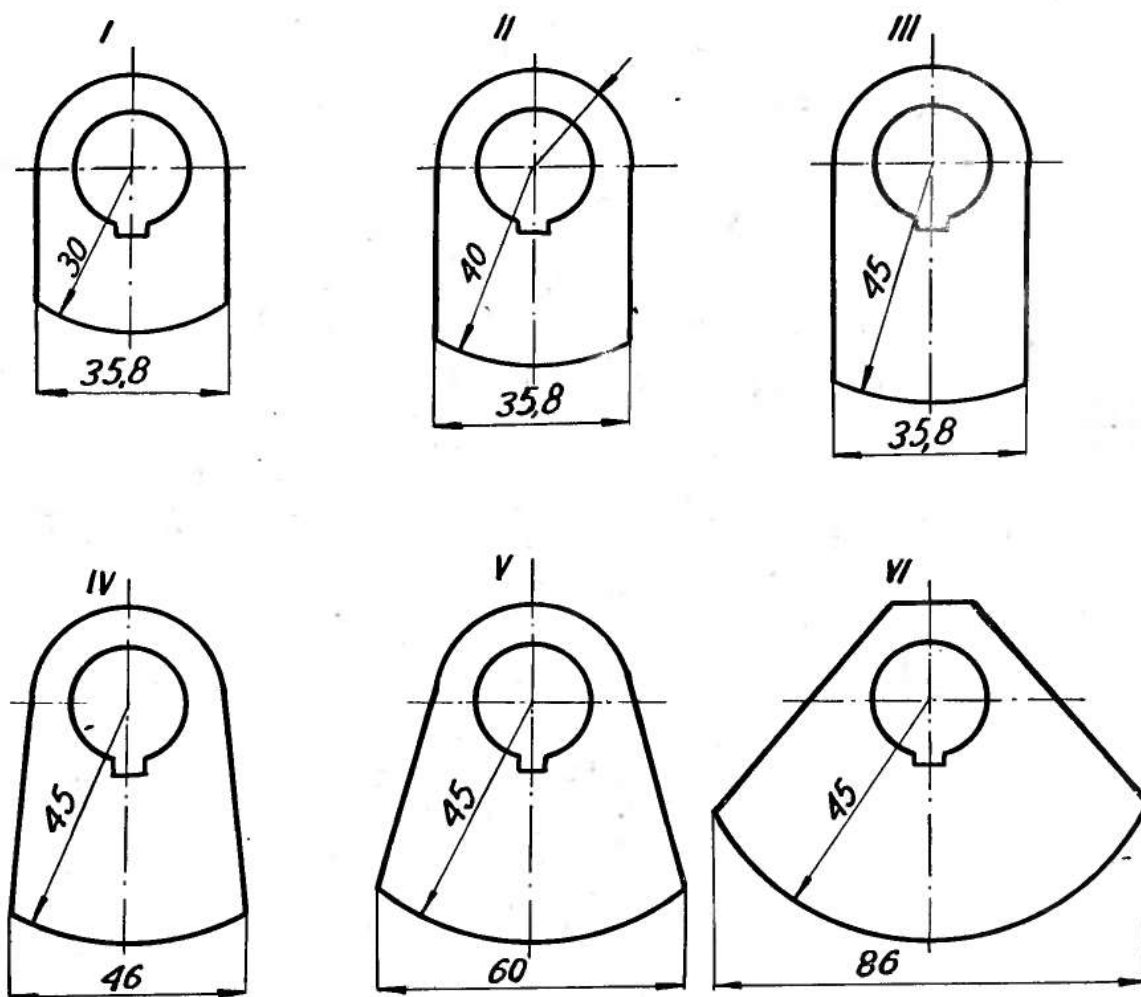
8. Promienie niewyważenia poszczególnych zestawów ciężarków, m,

I	-	0,0092
II	-	0,0153
III	-	0,0182
IV	-	0,0191
V	-	0,0202
VI	-	0,01685

Promienie niewyważenia obliczano z zależności:

$$g = \frac{M_s}{F}, \text{ m,} \quad /3/$$

W przyjętym do badań modelu wibratora, zmianę wielkości amplitudy przy ustalonej częstotliwości, dokonywano poprzez wymianę zestawu ciężarków, różniących się między sobą kształtem, masą i odległością promienia niewyważenia. Na rys.7 przedstawiono kształty i wymiary poszczególnych zestawów.



Rys.7.

Kształty i wymiary ciężarków.

## 2.5. Wyznaczenie amplitudy drgań.

Wibrator bezwładnościowy wprawiany jest w ruch drgający okresowo zmienną siłą pochodzącą od niewyważonych wirujących mas. Ruch harmoniczny tłumiony jest siłami tarcia zewnętrznego i wewnętrznego oraz wsadem kulek.

Celem ustalenia wpływu tłumienia układu drgającego wsadem kulek i określenia zapotrzebowania mocy układu napędowego do pokonania tych oporów przeprowadzono oddzielnie analizę ruchu wibratora i wsadu kulek.

Na podstawie przeglądu literatury z zakresu obróbki wibracyjnej za pomocą luźnego ścierniwa [34], [51] i wstępnych badań roz-

poznawczych stwierdzono, że wsad kulek ma bardzo mały wpływ na wielkość amplitudy drgań wymuszonych. Do wyznaczenia wielkości amplitudy drgań stosowano zależność, w której nie jest uwzględniony wpływ tłumienia [51].

$$(M_w + M_c)\ddot{y} + cy = M_c \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \sin\omega t \quad /4/$$

gdzie:  $M_w$  - masa wibratora

$M_c$  - masa ciężarków

$\rho$  - promień niewyważenia ciężarków

$\ddot{y}$  - przyspieszenie w kierunku pionowym

$y$  - droga w kierunku pionowym

Po podzieleniu obu stron równania /4/ przez  $M_c + M_w$  otrzymuje się równanie

$$\ddot{y} + \frac{c}{M_c + M_w} \cdot y = \frac{M_c}{M_c + M_w} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \sin\omega t$$

gdzie:  $\frac{c}{M_c + M_w} = \omega_w^2$  - jest częstotliwością drgań własnych wibratora.

$$\ddot{y} + \omega_w^2 \cdot y = \frac{M_c}{M_c + M_w} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \sin\omega t$$

Jest to równanie różniczkowe niejednorodne drugiego rzędu, którego rozwiązanie dla ruchu ustalonego można przedstawić w postaci:

$$y = \frac{M_c}{M_w + M_c} \cdot \rho \cdot \frac{1}{\frac{\omega}{\omega_w} - 1} \cdot \sin\omega t \quad /5/$$

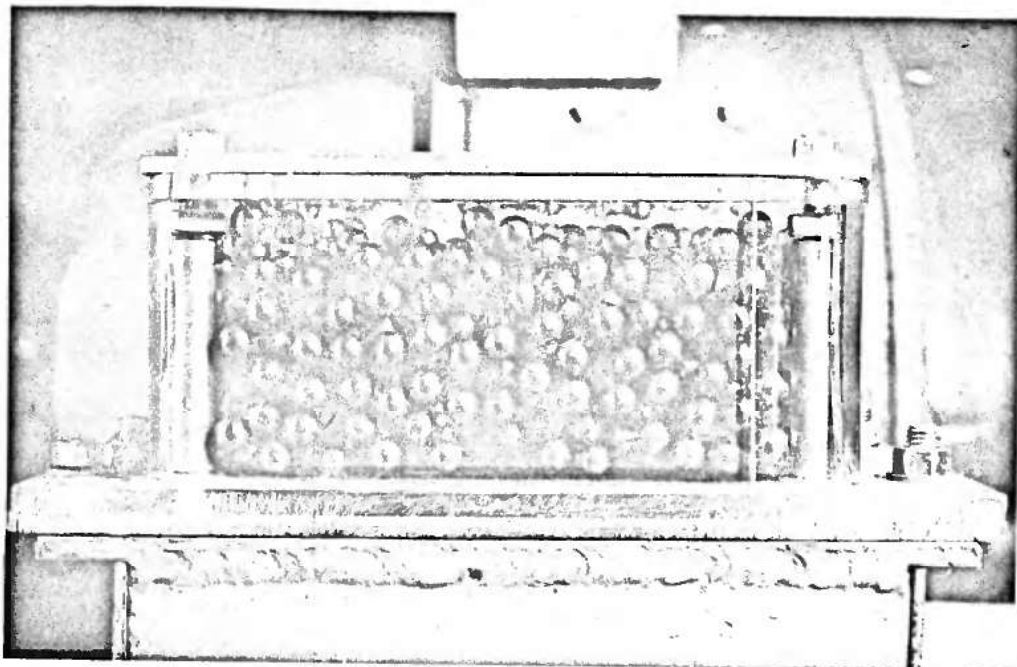
gdzie:  $\frac{M_c}{M_w + M_c} \cdot \rho \cdot \frac{1}{\frac{\omega}{\omega_w} - 1}$  - jest amplitudą drgań

## 2.6. Współczynnik tłumienia od kulek.

Jeżeli luźne kulki potraktuje się jako materiał sypki, składający się z oddzielnych elementów, to kinematykę i dynamikę ruchu całego wsadu można określić na podstawie analizy ruchu pojedynczej kulki. Podobne zagadnienie występuje przy transportowaniu

materiałów sypkich metodą wibracyjną [7] z tą różnicą, że odbicie kulek od pojemnika jest sprężyste, a odbicie materiału transportowanego od rynny raczej plastyczne. Przy transportowaniu materiałów sypkich wsad podrzucony do góry (rzut ukośny) znajduje się w swobodnym locie przez pewien okres, a rynna w tym czasie wykonuje określoną ilość drgań. Znając czas swobodnego lotu materiału, można określić ilość jego zderzeń z rynną i wyznaczyć współczynnik tłumienia, a następnie zapotrzebowanie mocy układu napędowego.

Podczas obróbki powierzchniowej zgmiotem metodą wibracyjną, wsad w całej swojej masie, jak i pojedyncze jego elementy charakteryzują się bardzo sprężystym odbiciem. Ruch kulek zależy od energii i kierunku zderzenia się ich z otaczającym ośrodkiem i jest chaotyczny. Położenie kulek podczas obróbki przedstawione jest na rysunku 8.



Rys.8.  
Położenie kulek podczas obróbki.

Jak widać z rys.8 kulki wypełniają prawie równomiernie cały pojemnik, a drgające przedmioty zderzają się z pewną ilością wsadu podczas każdego cyklu drgań.

Na podstawie wstępnych badań rozpoznawczych stwierdzono, że występuje pewna analogia pomiędzy zjawiskami zachodzącymi podczas transportowania materiałów sypkich metodą wibracyjną, a obróbką wibracyjną za pomocą luźnych kulek. Przy wyznaczaniu współczynnika tłumienia od wsadu wzorowano się na modelu matematycznym, opisującym transport wibracyjny materiałów sypkich [7].

W wymienionej publikacji na wstępie wyznaczony jest tak zwany współczynnik podrzutu  $K$  określający stosunek wielkości amplitudy przyśpieszenia występującego w ruchu harmonicznym do przyśpieszenia ziemskiego, oraz współczynnik  $m$  określający stosunek czasu swobodnego lotu wsadu do okresu drgań rynny. Przy wyznaczaniu współczynnika podrzutu autor pracy [7] zakłada, że w chwili (określonej czasem  $t_2$ ) odrywania się wsadu od podłoża drgającego, jego ciężar jest równoważony siłą bezwładności i nacisk na rynnę jest równy zeru

$$M \cdot g = M \omega^2 \cdot A \cdot \sin \omega t \quad /6/$$

skąd czas, w którym następuje odrywanie się wsadu od rynny wynosi:

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{A \omega^2}{g} \quad /7/$$

Stosunek amplitudy przyśpieszenia ruchu drgającego  $A \omega^2$  do przyśpieszenia ziemskiego  $g$  jest współczynnikiem podrzutu:

$$K = \frac{A \omega^2}{g} \quad /8/$$

Zależność pomiędzy współczynnikiem podrzutu  $K$  a współczynnikiem  $m$  można wyznaczyć przyrównując przyśpieszenie, jakie otrzymał wsad w chwili odrywania się ( $a_y$ ) od rynny

$$a_y = g$$

Po dwukrotnym scałkowaniu względem czasu i wyznaczeniu stałych całkowania z warunków brzegowych zależność  $K = f(m)$  przedstawia równanie:

$$K = \sqrt{\left(\frac{2\pi^2 m^2 + \cos 2\pi m - 1}{2\pi m - \sin 2\pi m}\right)^2 + 1} \quad /9/$$

oraz

$$m = \frac{t_3 - t_2}{T} \quad /10/$$

gdzie:

$t_2$  - czas w którym materiał odrywa się od rynny

$t_3$  - czas w którym materiał kończy swój swobodny lot.

Ze względu na to, że badania modelu urządzenia wibracyjnego przeprowadzono w dużym zakresie regulacji częstotliwości i amplitud, zależność 9 zaprogramowano na maszynę matematyczną i sporządzono tablice  $K = f(m)$  dla  $m$  przyjmującego wartości  $3 \div 23$  stopniowane w 0.01.

Wprawianie w ruch kulek oraz okresowe zderzanie się ich z układem drgającym pochłania pewną ilość energii dostarczonej do urządzenia wibracyjnego. Energia ta zamieniana jest na odkształcenia plastyczne i sprężyste, a częściowo na energię cieplną. Na podstawie wstępnych badań rozpoznawczych, przeprowadzonych na modelu urządzenia wibracyjnego stwierdzono, że moc wynikła z tłumienia wsadem kulek zawiera się w granicach  $10 \div 15 \%$ , co w porównaniu z mocą pobieraną na ten cel przy transportowaniu materiałów sypkich stanowi małą wartość.

W modelu matematycznym podanym w pracy [7] współczynnik tłumienia od transportowanego materiału obliczany jest z porównania pracy tłumienia ( $\Delta L$ ) od wsadu z pracą tłumienia wiskotycznego ruchu drgającego w czasie jednego cyklu. Praca tłumienia od wsadu jest sumą energii zderzenia ( $E_z$ ), energii kinetycznej ( $E_k$ ) i energii potencjalnej ( $E_{pr}$  i  $E_{pl}$ ) podzielonych przez liczbę cykli drgań w czasie których zachodzi jeden cykl ruchu materiału ( $p$ )

$$\Delta L = \frac{1}{p} (E_z + E_k + E_{pr} + E_{pl}) \quad /11/$$

Praca tłumienia wiskotycznego w czasie jednego cyklu drgań określona jest zależnością:

$$L = 2\pi^2 \sqrt{A^2} \cdot k_2 \quad /12/$$

Z wzorów /11/ i /12/ otrzymuje się zależność:

$$k_2 = \frac{\Delta L_1}{2\pi^2 \sqrt{A^2}} \quad /13/$$

W obróbce powierzchniowej zgniotem, na pracę tłumienia składa się tylko energia zderzenia i energia kinetyczna, gdyż wsad w czasie obróbki nie jest transportowany na wyższy poziom. Występuje też inna ilość zderzeń ( $p$ ) wsadu z drgającym podłożem.

Na podstawie pomiarów mocy podczas wstępnych badań rozpoznawczych stwierdzono, że istnieje zgodność wyników obliczonych z pomierzonymi dla  $p = 2$ .

Przy założeniu, że ruch kulek w obróbce wibracyjnej odbywa się tylko w kierunku pionowym, energię zderzenia określono z zależności:

$$E_z = \frac{1}{2} M_k \cdot \Delta v_y^2 \quad /14/$$

gdzie:

$\Delta v_y$  - jest różnicą prędkości kulek i pojemnika przy wzajemnym ich zderzaniu się ( $t_3$ )

Po odpowiednim przekształceniu, zależność /14/ przyjmuje postać:

$$E_z = \frac{1}{2} \left(\frac{m}{\sqrt{y}}\right)^2 \cdot M_k \cdot g^2 + \frac{M_k \cdot A \cdot g}{2K} \left[ \sqrt{K^2 - 1} (1 - \cos 2\pi m) + \sin 2\pi m \right]^2 - 2\pi m \frac{M_k \cdot g \cdot A}{K} \left[ \sqrt{K^2 - 1} (1 - \cos 2\pi m) + \sin 2\pi m \right] \quad /15/$$

Energię kinetyczną, jaką uzyskuje wsad w czasie ruchu wraz z pojemnikiem określono, zakładając że prędkość wsadu w chwili podrzutu i upadku jest jednakowa [7] i równa się prędkości pojemnika w tym momencie ( $t_2$  i  $t_3$ )

$$E_k = \frac{1}{2} M_k \left[ \frac{dy}{dt} (t_2) - \frac{dy}{dt} (t_3) \right]^2 \quad /16/$$

Po odpowiednim przekształceniu, energię tę wyraża zależność:

$$E_z = \frac{M_k \cdot g \cdot A}{2K} \left[ \sqrt{K^2 - 1} (1 - \cos 2\pi m) + \sin 2\pi m \right]^2 \quad /16^a/$$

Znając współczynnik tłumienia  $k_2$ , który ujmuje zależność /13/, można określić tę część mocy układu napędowego, która tracona jest na tłumienie ruchu wsadem kulek. Całkowity współczynnik tłumienia urządzenia wibracyjnego ( $k$ ) jest sumą współczynnika tłumienia od wsadu ( $k_2$ ) i samego wibratora ( $k_1$ ).

$$k = k_1 + k_2 \quad /16^b/$$

Za pracą [7] współczynnik  $k_1$  można wyznaczyć z zależności:

$$k_1 \sim \mathcal{R} \cdot \nu \cdot M \quad /16^c/$$

Współczynnik  $k_1$  zależy od tarcia wewnętrznego, tarcia zewnętrznego (między innymi w prowadnicach), tłumienia przez amortyzatory, oporów powietrza i innych czynników. Wyznaczenie na drodze analitycznej tych zależności jest bardzo trudne.

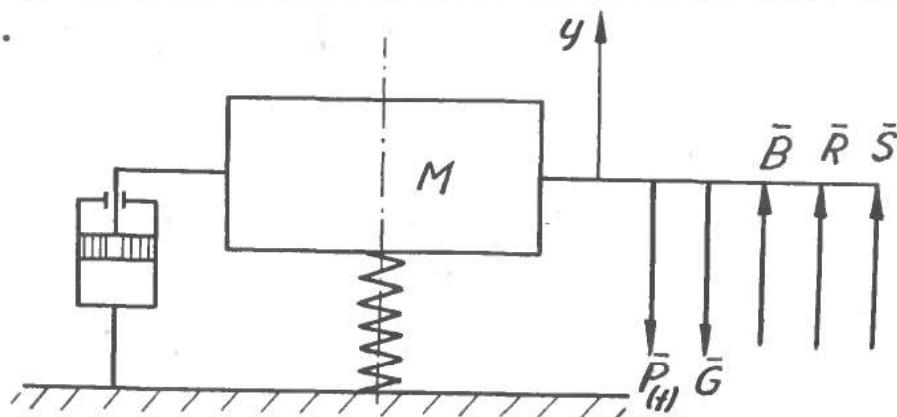
Autor pracy [7] dla urządzeń do transportu wibracyjnego, proponuje przyjmowanie bezwymiarowego współczynnika tłumienia  $\mathcal{R} \sim 0,2$ . W przyjętym do badań modelu urządzenia wibracyjnego uzyskano zgodność obliczeń z pomiarami dla  $\mathcal{R} \sim 0,86$ .

## 2.7. Kinematyka i dynamika ruchu wibratora.

Celem określenia wielkości konstrukcyjnych i zależności energetycznych wibratora, przeprowadzono analizę dynamiczną urządzenia wibracyjnego.

Przy potraktowaniu wibratora jako masy skupionej w jednym punkcie, wprawianej w ruch siłą wymuszającą, pochodzącą od nieważonych wirujących mas, można zbudować ogólnie przyjęty model drgań wymuszonych tłumionych [7], [32], [48], [54], [57], [58].

Na rys.9 przedstawiony jest schemat przyjętego do rozważań modelu.



Rys.9. Schemat modelu wibratora.



Na układ przedstawiony na rys.9 działają następujące siły:

$$P(t) = P_0 \sin \omega t \quad - \text{ siła wymuszająca}$$

$$B = \frac{d^2 y}{dt^2} \cdot M \quad - \text{ siła bezwładności}$$

$$S = c(\Delta l + y) \quad - \text{ siła sprężystości}$$

$$R = \frac{dy}{dt} \cdot k \quad - \text{ siła tłumiąca}$$

$$G = c \cdot \Delta l \quad - \text{ siła ciężkości}$$

Równanie różniczkowe ruchu opisuje wzór:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} \cdot M + \frac{dy}{dt} \cdot k + c(\Delta l + y) = P_0 \sin \omega t + \Delta l \cdot c$$

Po uproszczeniu:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} \cdot M + \frac{dy}{dt} \cdot k + cy = P_0 \sin \omega t \quad /17/$$

Całką szczególną równania /17/ w ruchu ustalonym będzie:

$$y = A \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad /18/$$

Po zróżniczkowaniu względem czasu otrzymuje się:

$$\frac{dy}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad /19/$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -A \omega^2 \sin(\omega t - \varphi)$$

Po podstawieniu tych wartości do równania /17/ otrzymuje się:

$$\begin{aligned} & -AM\omega^2 \sin(\omega t - \varphi) + A \cdot k \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - \varphi) + A \cdot c \cdot \sin(\omega t - \varphi) - \\ & - P_0 \sin \omega t = 0 \quad /20/ \end{aligned}$$

Kąt  $\omega t$  jest zmienny w czasie. Dla konkretnych wartości tego kąta, równanie /20/ przyjmuje postać:

$$\text{np. dla } \omega t = \frac{\pi}{2}$$

$$-A \cdot M \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi + A \cdot K \cdot \omega \cdot \sin \varphi + c \cdot A \cdot \cos \varphi - P_0 = 0 \quad /21/$$

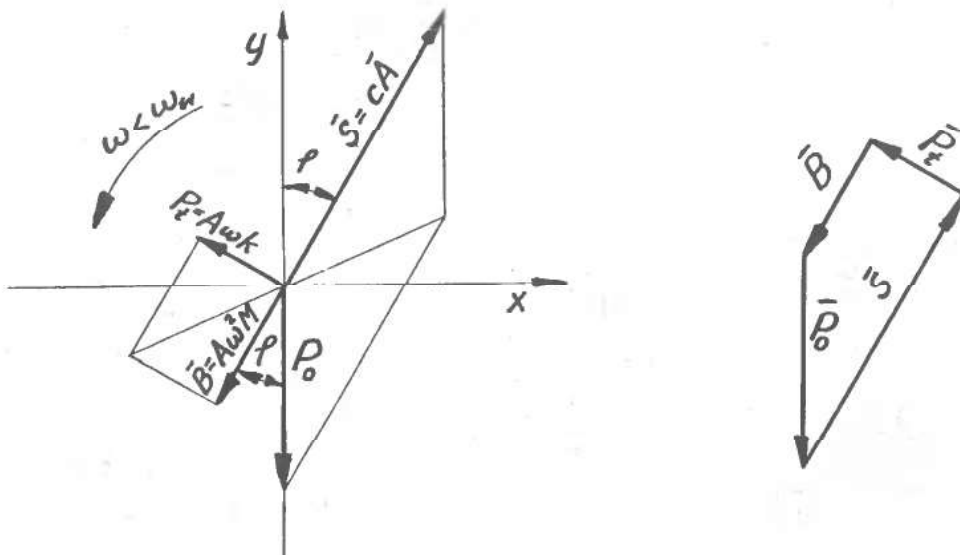
$$\text{dla } \omega t = \pi$$

$$-A.M.\omega^2.\sin\psi - A.k.\omega.\cos\psi + c.A.\sin\psi = 0 \quad /22/$$

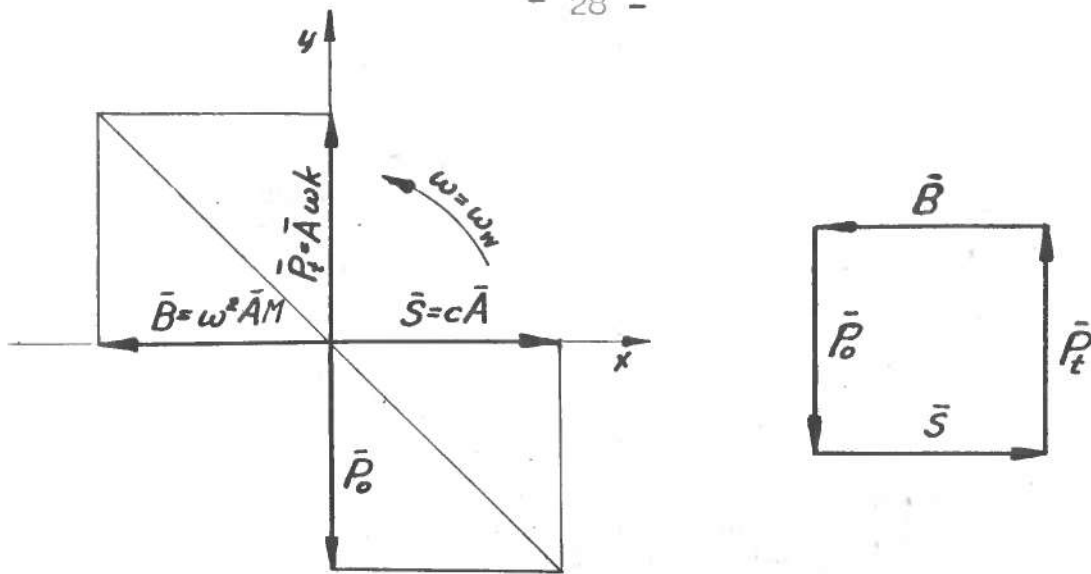
gdzie:

- $\omega^2.A.M$  - siła bezwładności
- $c.A$  - siła ugięcia sprężyn
- $\omega A.k$  - siła tłumiąca

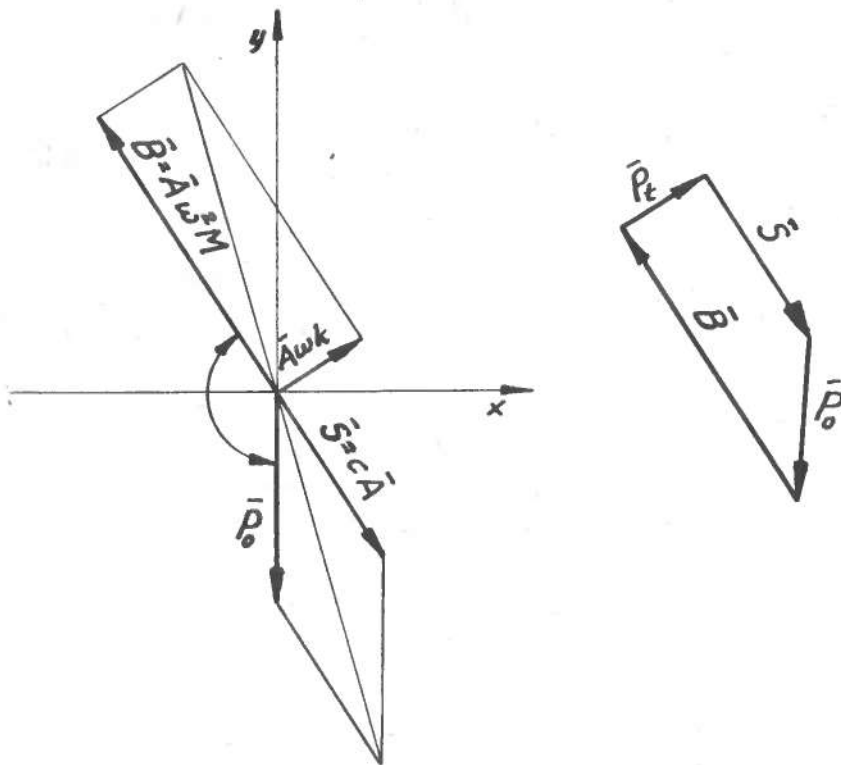
Drgania wymuszone tłumione można przedstawić graficznie [7], [32], [54], [57], [58] w postaci wykresu wektorowego. Na rys.10 przedstawiony jest układ sił dla częstotliwości podrezonansowych. Na rys.11 przedstawiony jest przypadek, w którym częstotliwość drgań własnych równa się częstotliwości drgań wymuszonych, a na rys.12 przypadek, gdy częstotliwość siły wymuszającej jest większa od częstotliwości drgań własnych.



Rys.10. Rozkład sił przy drganiach z częstotliwością podrezonansową.



Rys.11. Rozkład sił przy drganiach z częstotliwością rezonansową.



Rys.12. Rozkład sił bezwładności przy częstotliwościach pozarezonansowych.

Jak widać z rys.10 dla częstotliwości podrezonansowych siła bezwładności jest opóźniona względem siły wymuszającej o kąt  $\varphi$ . Siła ugięcia sprężyn ma ten sam kierunek co siła bezwładności lecz przeciwny zwrot (opóźniona jest o kąt  $\pi$ ). Siła tłumiąca jest prostopadła do siły bezwładności i opóźniona względem niej o kąt  $\frac{\pi}{2}$ .

W przypadku rezonansu (rys.11), tj. dla  $\omega = \omega_w$  siła wymuszająca ma ten sam kierunek co siła tłumienia, ale przeciwny zwrot, a siła bezwładności jest równa i przeciwnie skierowana do siły napięcia sprężyn. Tłumienie zabezpiecza układ przed nadmiernym wzrostem amplitudy i zniszczeniem układu. W przypadku gdy częstotliwość siły wymuszającej jest większa (rys.12) od częstotliwości drgań własnych ( $\omega > \omega_w$ ), siła bezwładności ma ten sam kierunek co siła sprężystości i jest opóźniona względem siły wymuszającej o kąt przesunięcia  $\psi$ .

Z układu równań /21/ i /22/ można wyliczyć kąt przesunięcia fazowego  $\psi$  i amplitudę drgań.

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega \cdot k}{c - \omega^2 M} \quad /23/$$

$$A = \frac{P_0}{\sqrt{(c - \omega^2 M)^2 + \omega^2 k^2}} \quad /24/$$

Po podstawieniu do równania /23/ i /24/ zależności wyrażenia na stałą sprężystości w postaci

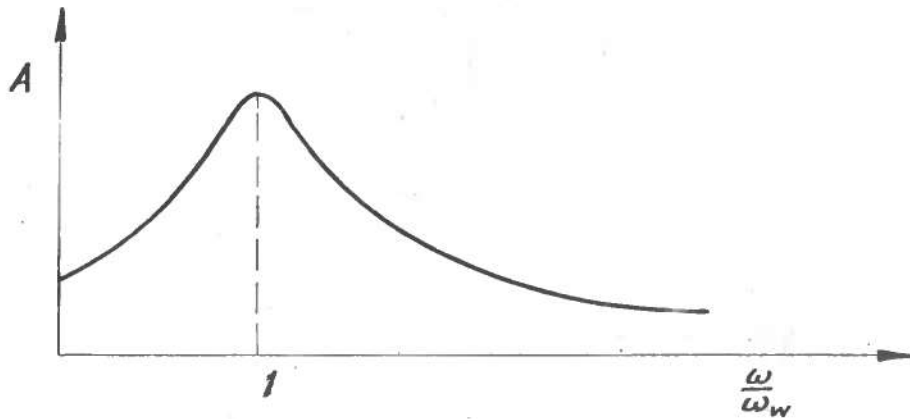
$$c = \omega_w^2 \cdot M \quad /25/$$

otrzymuje się wzory

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega k}{c \cdot (1 - \frac{\omega^2}{\omega_w^2})} \quad /26/$$

$$A = \frac{P_0}{c \cdot \sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_w})^2]^2 + (\frac{\omega}{\omega_w})^2 \cdot \frac{k^2}{Mc}}} \quad /27/$$

Zmianę wielkości amplitudy w zależności od stosunku  $\frac{\omega}{\omega_w}$  przedstawiono na rys.13.



Rys.13. Wykres zależności amplitudy drgań od stosunku  $\frac{\omega}{\omega_w}$ .

Jak widać z rys.13, przy przechodzeniu układu przez rezonans może nastąpić nadmierny wzrost amplitudy. Celem uniknięcia takiego zjawiska, w urządzeniu zastosowano amortyzatory gumowe.

Przy ustalonej częstotliwości siły wymuszającej, o zakresie przedziału pracy wibratora decyduje stała sprężystości układu zawieszenia i wielkości mas drgających.

Przy założonej masie  $M$ , wysoką częstotliwość drgań własnych można osiągnąć przez dobranie dużej stałej sprężystości, uzyskując pracę wibratora w częstotliwościach podrezonansowych i odwrotnie, przyjmując miękkie sprężyny o małej stałej sprężystości uzyskuje się pracę wibratora powyżej rezonansu. Częstotliwość drgań własnych oblicza się z zależności

$$\omega_w^2 = 4\pi^2 \nu_w^2 = \frac{c}{M}$$

lub

$$\omega_w = 2\pi \nu_w = \sqrt{\frac{c}{M}}$$

Przy znajomości wielkości ugięcia statycznego można korzystać z zależności

$$\nu_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta_{st}}} \quad . \quad /28/$$

Model urządzenia wibracyjnego przewidziany jest do pracy poza-rezonansowej.

2.8. Moc układu napędowego.

O wielkości poboru mocy przez wibrator decyduje wartość siły wymuszającej i prędkość liniowa. Moc chwilową określa wyrażenie: [57]

$$N = P \cdot v \quad /29/$$

gdzie:

$$P = M_c \cdot \omega^2 \cdot g \cdot \sin \omega t \quad - \text{ siła chwilowa}$$

$$M_c \omega^2 \cdot g = P_0 \quad - \text{ amplituda siły wymuszającej}$$

$$v = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad - \text{ prędkość chwilowa}$$

$$A \omega = V_0 \quad - \text{ amplituda prędkości}$$

Po podstawieniu tych wyrażen do wzoru /29/ oraz uwzględnieniu zależności /24/ i odpowiednim przekształceniu, moc chwilowa wyniesie:

$$N = \frac{1}{2} \frac{M_c^2 \cdot \omega^5 \cdot g^2}{\sqrt{(c - \omega^2 M)^2 + \omega^2 k^2}} [\sin(2\omega t - \varphi) + \sin \varphi]$$

W wyrażeniu tym moc chwilowa składa się z mocy stałej

$$N_s = \frac{M_c^2 \omega^5 \cdot g^2}{\sqrt{(c - \omega^2 M)^2 + \omega^2 k^2}} \cdot \sin \varphi \quad /30/$$

i mocy zmiennej

$$N_z = \frac{M_c^2 \omega^5 \cdot g^2}{\sqrt{(c - \omega^2 M)^2 + \omega^2 k^2}} [\sin(2\omega t - \varphi)] \quad /31/$$

Moc chwilowa  $N$  oscyluje z częstotliwością  $2\omega$

i amplitudą  $\frac{1}{2} \frac{M_c^2 \cdot \omega^5 \cdot g^2}{\sqrt{(c - \omega^2 M)^2 + \omega^2 k^2}}$  dookoła

średniej wielkości  $N_{\text{sr}} = \frac{1}{2} \frac{M_c^2 \omega^5 \cdot g^2}{\sqrt{(c - \omega^2 M)^2 + \omega^2 k^2}} \cdot \sin \varphi$

Wartość  $\sin \varphi$  można obliczyć z zależności /23/

$$N_{\text{sr}} = \frac{1}{2} \frac{M_c^2 \omega^5 g^2}{\sqrt{(c - \omega^2 M)^2 + \omega^2 k^2}} \cdot \frac{\omega \cdot k}{\sqrt{(c - \omega^2 M)^2 + \omega^2 k^2}}$$

po przekształceniu

$$N_{\text{śr}} = \frac{1}{2} \frac{M_c^2 \omega^6 \cdot g^2 \cdot k}{(c - \omega^2 M)^2 + \omega^2 k^2} \quad /32/$$

gdzie:

$M = M_c + M_w$  - całkowita masa wibratora równa się sumie masy ciężarków i samego wibratora

Wzór ten po przekształceniu można doprowadzić do postaci [57]

$$N = \frac{\frac{M_c}{M} \cdot g^2 \cdot h \cdot \omega_w^2 \alpha^6}{(1 - \alpha^2)^2 + \alpha^2 \cdot 4 \gamma^2} \quad , \quad W, \quad /32^a/$$

gdzie

$$\alpha = \frac{\omega}{\omega_w}$$

$$h = \frac{k}{2M}$$

$$\gamma = \frac{k}{2M\omega_w}$$

$k$  - jest zastępczym współczynnikiem tłumienia wiskotycznego. W obliczeniach modelu urządzenia wibracyjnego wielkość  $k$  wyznaczono z zależności  $/16^b/$ .

## 2.9. Wnioski do badań własnych.

Na podstawie wstępnego przeglądu zagadnień związanych z obróbką powierzchniową zgniotem za pomocą luźnych kulek metodą wibracyjną, można wyodrębnić następujące problemy, które powinny być uwzględnione podczas prowadzenia doświadczeń:

1. Zagadnienia konstruktorskie, sprowadzające się głównie do ustalenia bezpiecznego zakresu pracy urządzenia wibracyjnego przy uwzględnieniu sprawności energetycznej i wymagań obróbkowych.
2. Zbadanie stanu fizykalnego i własności użytkowych warstwy wierzchniej po obróbce zgniotem.
3. Określenie zakresu zmienności i ustalenie wytycznych odnośnie racjonalnego doboru parametrów technologicznych obróbki powierzchniowej zgniotem.



### III. BADANIA WŁASNE.

#### 3.1. Cel i program badań.

Celem badań było określenie stanu i własności użytkowych warstwy wierzchniej materiałów poddanych obróbce powierzchniowej zgniotem za pomocą luźnych kulek metodą wibracyjną.

Ustalenie wpływu warunków obróbki na stan i własności użytkowe warstwy wierzchniej umożliwiłoby opracowanie zaleceń dotyczących racjonalnego doboru parametrów technologicznych obróbki, a badania rozpoznawcze materiałów różnych na określenie ich podatności na zgniot powierzchniowy.

Zakresem pracy objęto:

- a. Ustalenie bezpiecznego zakresu pracy wibratora
- b. Określenie chropowatości i nośności powierzchni
- c. Badanie struktury metalograficznej i mikrotwardości
- d. Badanie wielkości i rozkładu naprężeń własnych
- e. Badanie ścieralności
- f. Określenie wpływu obróbki zgniotem na wytrzymałość zmęczeniową.

Badanie wpływu parametrów technologicznych na własności stereometryczne, fizykalne i użytkowe warstwy wierzchniej przeprowadzono na stali 55, natomiast podatność materiałów różnych na zgniot powierzchniowy<sup>owy</sup> badano przy ustalonych parametrach obróbki.

Czynniki, których wpływ zmieniano i przedział ich zmienności.

W zakresie zmiennych parametrów obróbki-stal 55:

- a. Amplituda  $A$  - 0,6; 1,0; 1,45; 1,4; 1,65; 2 mm
- b. Częstotliwość  $\dot{V}$  - 30; 40; 50; 60; 70; 80;  $\frac{1}{s}$
- c. Czas obróbki  $t$  - 5; 15; 25; 35 min.
- d. Średnica kulki  $\phi_k$  - 3,2; 6,3; 8,7; 12; 15 mm.

W zakresie badań rozpoznawczych nad podatnością materiałów różnych na zgniot powierzchniowy:

- a. stop tytanu WT3
- b. mosiądz M60
- c. miedź M1
- d. stop aluminium PA10
- e. żeliwo szare Z115
- f. żeliwo ciągliwe ZcC3510
- g. stal łożyskowa ŁH15
- h. stal resorowa 50HS
- i. Stal szybko tnąca SW9
- j. stal szybko tnąca SW18
- k. stal NC6.

W zakresie badań rozpoznawczych nad wpływem procentowej zawartości węgla na zgniot powierzchniowy:

stale - 15; 25; 35; 45; 55.

Wielkości mierzone:

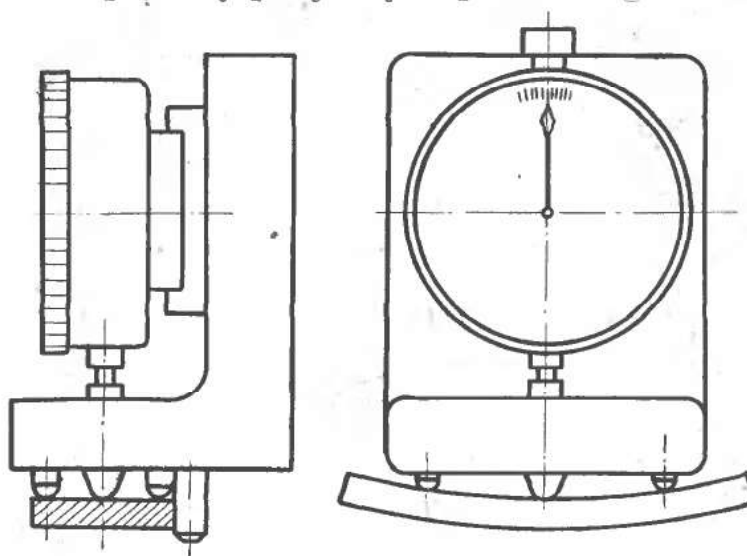
- a. naprężenia własne
- b. struktura metalograficzna
- c. mikrotwardość
- d. chropowatość powierzchni
- e. nośność powierzchni
- f. ścieralność
- g. zmęczeniowość.

### 3.2. Metodyka i technika przeprowadzenia pomiarów.

Badania przeprowadzono na modelu urządzenia wibracyjnego, przedstawionym na rys.5. W pojemniku roboczym mocowano jednocześnie 12 próbek, które pokrywano wsadem kulek o grubości około 20 mm. Przed przystąpieniem do docelowych doświadczeń, przeprowadzono badania rozpoznawcze, podczas których stwierdzono, że pozytywne wyniki obróbki można uzyskać tylko przy intensywnym ruchu kulek. Aby zaistniały takie warunki, wibrator musi posiadać dostatecznie dużą amplitudę drgań. Doświadczalnie ustalono, że minimalna amplituda wynosi 0,5 mm. Poniżej tej wartości w czasie obróbki występuje zderzanie się kulek z przedmiotem obrabianym stale w tym samym miejscu, powodując lokalne utwardzenia powierzchni.

Podczas doświadczeń stosowano kulki łożyskowe, produkowane przez Kraśnicką Fabrykę Wyrobów Metalowych.

Wstępną ocenę intensywności obróbki dokonywano za pomocą pomiaru strzałki ugięcia próbki przed i po obróbce zgniotem. Pomiaru dokonywano za pomocą przyrządu pokazanego na rys.14 [52].



Rys.14. Przyrząd do pomiaru strzałki ugięcia próbek.

Stereometrię warstwy wierzchniej po obróbce zgniotem określano na podstawie wykresu otrzymanego na profilografii firmy Taylor-Hobson.

Ze względu na to, że długości odcinków pomiarowych przy obróbce zgniotem nie są dotychczas znormalizowane, tak dobrano ich długości (2,5 i 4 mm), by były one najbardziej charakterystyczne dla danego typu obróbki, to znaczy by obejmowały zalecaną ilość nierówności.

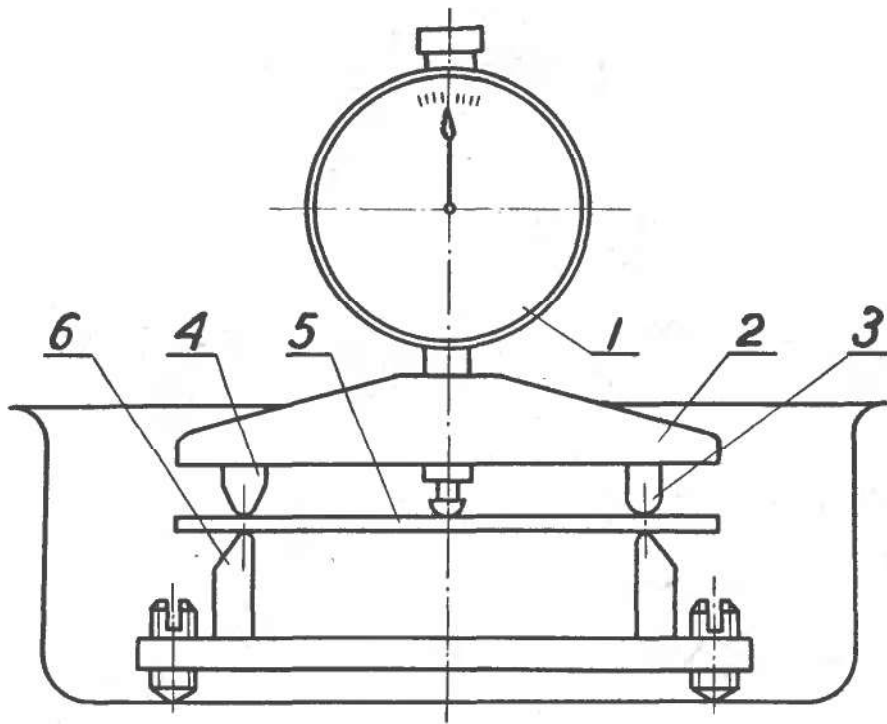
Strukturę metalograficzną określano na mikroskopie Neophot 2.

Podczas przygotowywania zglądów do badań mikrotwardości i obserwacji metalograficznych zwracano szczególną uwagę na to, by nie wystąpiło przypalenie względnie utwardzenie podczas obróbki. Próbki cięte były piłką ręczną i po wstępnym opiłowaniu inkludowane żywicą epoksydową w oprawkach stalowych. Zarówno zglądy skośne jak i prostopadłe szlifowano na papierze ściernym, który w postaci krążków przytwierdzany był do tarczy wprawianej w ruch obrotowy. W czasie polerowania do strefy obróbki doprowadzany był obfity strumień wody. W miarę zmniejszania się wysokości nierówności polerowanych próbek, stosowano papier o coraz drobniejszym nasypie. Ostateczne polerowanie przeprowadzono za pomocą tlenku glinu na polerce wibracyjnej.

Pomiary mikrotwardości przeprowadzono na mikroskopie Neophot 2 głowicą Hanemana.

Podczas badania naprężeń własnych pomiaru odkształcenia próbek w czasie trawienia dokonywano przyrządem czujnikowym pokazanym na rys. 15.

Przedstawiony na rys. 15 przyrząd składa się z czujnika mikro-nowego 1, umiejscowionego w oprawce 2, wykonanej ze stopu aluminium. Do dolnej części oprawki przymocowane są winidurowe podpory 3 i 4 spoczywające bezpośrednio na badanej próbce 5, która



Rys. 15. Przyrząd czujnikowy do pomiaru odkształceń próbki podczas trawienia.

leży na wsporniku winidurowym 6 o regulowanej wysokości. Rozstaw podpór wynosi 89 mm [24].

Do trawienia próbek stosowano wodne roztwory odczynników chemicznych ujętych w tablicy VIII.

Tablica VIII.

Rodzaj materiału	Rodzaj odczynnika	Procent stężenia
Stale i żeliwa	$\text{HNO}_3$	3,7
miedź, brąz, mosiądz	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$	10
stop tytanu	HF	8
stop aluminium	NaOH	20

W czasie trawienia temperatura kąpeli utrzymywana była w granicach  $290 - 292^\circ\text{K}$ .

Pomiary ugięcia próbek w czasie trawienia przeprowadzano w sposób ciągły (bez wyjmowania próbek z kąpeli). Powodowało to niejednakową intensywność trawienia w czasie. Aby uzyskać poprawne

wyniki odnośnie  $\Delta G(t) = f(C)$ , sporządzono wykresy intensywności trawienia (rys. 35<sub>z</sub>- 38<sub>z</sub>) [12]. Do sporządzenia wykresów użyto próbek wykonanych w takich samych warunkach jak próbki przeznaczone do docelowych badań. W zależności od wielkości ugięcia wywołanego zgniotem powierzchniowym, próbki podzielono na cztery grupy, przyjmując w każdej grupie po 12 - 16 sztuk. Powierzchnie nie podlegające trawieniu zabezpieczono kwasoodpornym lakierem. Jedną, przypadkowo wybraną próbkę z danej grupy, umiejscawiano w przyrządzie do pomiaru ugięcia (rys.14) w zależności od grubości strawionej warstwy. Pozostałe próbki z tej grupy trawiono zespołowo w innym pojemniku przy zachowaniu takich samych warunków jak przy trawieniu próbki, na której dokonywano pomiarów  $\Delta G(t) = f(C)$ . Po pewnym czasie (w początkowej fazie trawienia przyjmowano mniejsze odstępy czasu niż w fazie końcowej) wyjmowano próbki w przypadkowej kolejności z pojemnika do trawienia zespołowego i po usunięciu produktów trawienia - ważono. Ze względu na to, że warunki trawienia indywidualnego i zespołowego były zbliżone, prawdopodobieństwo ubytków wagowych próbek, a więc i grubość strawionej ww też była zbliżona. Do wyznaczenia wielkości naprężeń korzystano z wykresów intensywności trawienia i ubytek liniowy wyznaczano z zależności

$$g_w(t) = \frac{\Delta G(t) \cdot t}{b \cdot l \cdot \gamma}, \text{ m,} \quad /33/$$

gdzie:

b - szerokość próbki, m,

l - długość próbki, m,

$\gamma$  - ciężar właściwy,  $\frac{N}{m^3}$ ,

t - czas trawienia, min,

$g_w(t)$  - grubość strawionej warstwy po czasie t, m,

$\Delta G(t)$  - ubytek wagowy próbki po czasie t,  $\frac{mN}{min}$ ,

Przy określaniu naprężeń własnych stosowano wzory Wejsmanna i

Phillipsa za autorem pracy [24] dla próbek c jednociosowym stanie naprężeń.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad /34/$$

gdzie:

$$\sigma_1 = \frac{E_j \cdot g_n^2}{6} \cdot \frac{dC}{dg} \quad /35/$$

$$\sigma_2 = \frac{-\sum_{x=1}^{n-1} \sigma_x \cdot \Delta g}{g_{n-1}} \quad /36/$$

$$\sigma_3 = \frac{E_j \cdot g_{n-1}}{2} (C_0 - C_{n-1}) \quad /37/$$

Oznaczenia:

$\sigma$  - naprężenia całkowite,  $\frac{N}{m^2}$ ,

$\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3$  - naprężenia w kolejnych warstwach, usuwanych w czasie trawienia,  $\frac{N}{m^2}$ ,

$E_j$  - moduł sprężystości Younga,  $\frac{N}{m^2}$ ,

$g$  - grubość próbki, m,

$C$  - krzywizna próbki,  $\frac{1}{m}$ ,

Krzywiznę próbki określano z zależności [24] :

$$C = \frac{1}{r} = \frac{8f}{l^2}$$

gdzie:

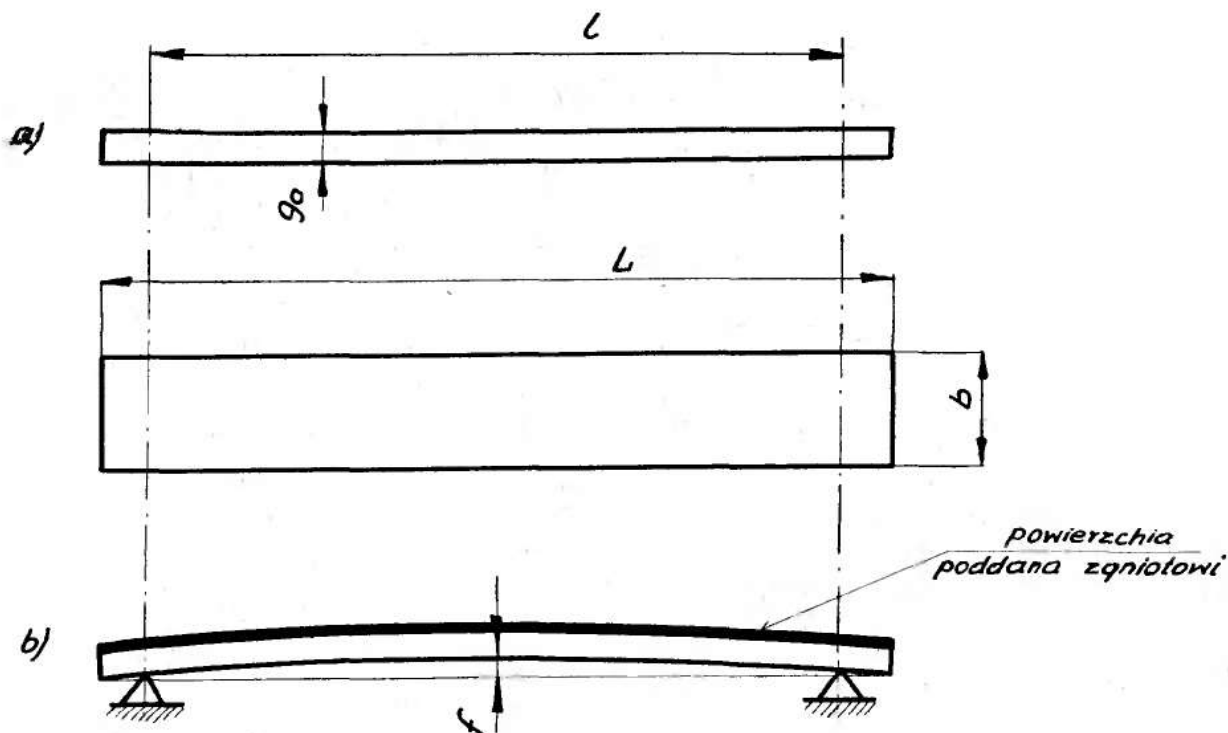
$r$  - promień krzywizny próbki, m,

$l$  - odległość między podporami, m,

$f$  - ugięcie próbki, m,

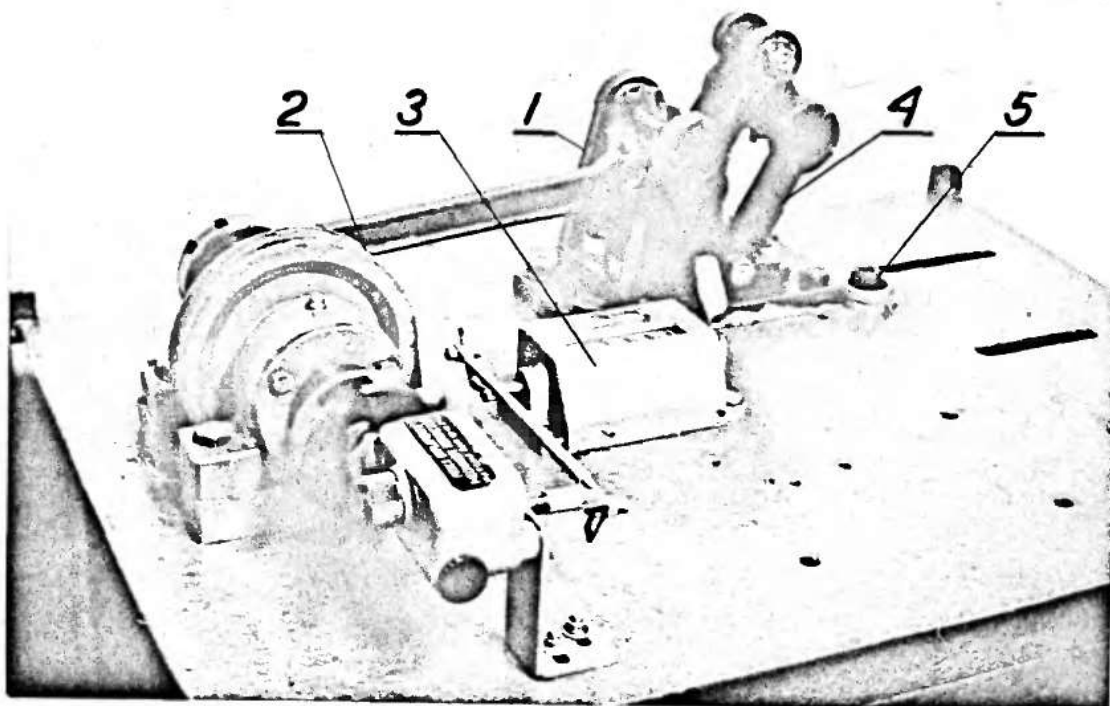
Pomiary ugięcia próbek w czasie trawienia dokonywane były z dokładnością 1  $\mu$ m. Trawienie bezprądowe i określanie ubytków w oparciu o sporządzone wykresy intensywności trawienia, przy dokładnym pomiarze ugięcia próbek umożliwiły uzyskanie poprawnych wyników.

Wymiary i kształt próbek przed i po obróbce zgniotem przedstawiono na rys.16.



Rys.16. Kształt próbki przed obróbką zgniotem (rys.a) i po obróbce zgniotem (rys.b).

Badania wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie przeprowadzono na urządzeniu zapewniającym czyste zginanie próbek. Ogólny widok stanowiska badawczego przedstawiony jest na rysunku 17.



rys.17. Urządzenie do badania wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie [3].



W urządzeniu 1, wykonanym w oparciu o patent [3] mocowana jest badana próbka. Napęd z silnika (niewidocznego na rysunku) przenoszony jest przekładnią pasową 2 na urządzenie zginające próbkę. Licznik 3 zlicza ilość cykli przegięć. Po złamaniu się próbki układ napędowy zostaje wyłączony przez opadnięcie dźwigni 4 na przycisk elektryczny 5.

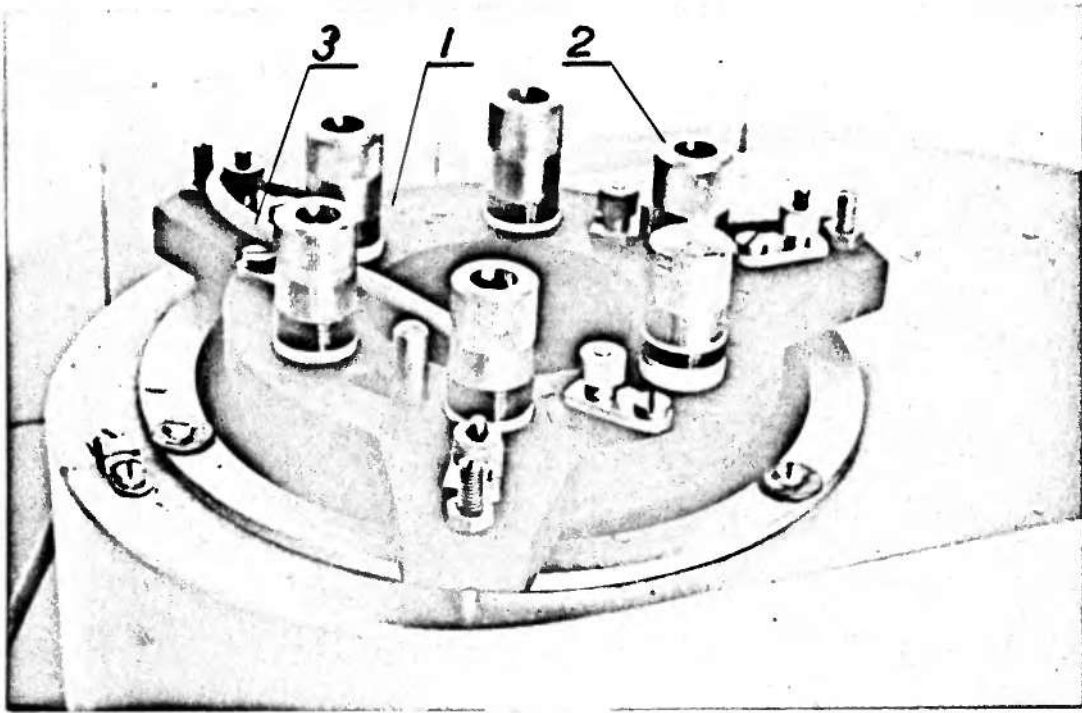
Badania wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie miały charakter porównawczy celem ujawnienia wpływu naprężeń własnych po obróbce zgniotem na zmęczeniowość. Doświadczalnie ustalono wielkość amplitudy wychylenia tak, by uzyskać dostatecznie dużą ilość przegięć próbki, po czym układ regulacji został zablokowany i badania prowadzono w jednakowych warunkach. Miarą porównawczą wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie była ilość przegięć próbki do chwili jej złamania.

Badano próbki poddane zgniotowi przy różnych parametrach obróbki, oraz nie poddane obróbce a wykonane z tego samego materiału i identycznych warunkach.

Przeprowadzono też fragmentaryczne badania nad wpływem obróbki zgniotem na wytrzymałość materiałów różnych.

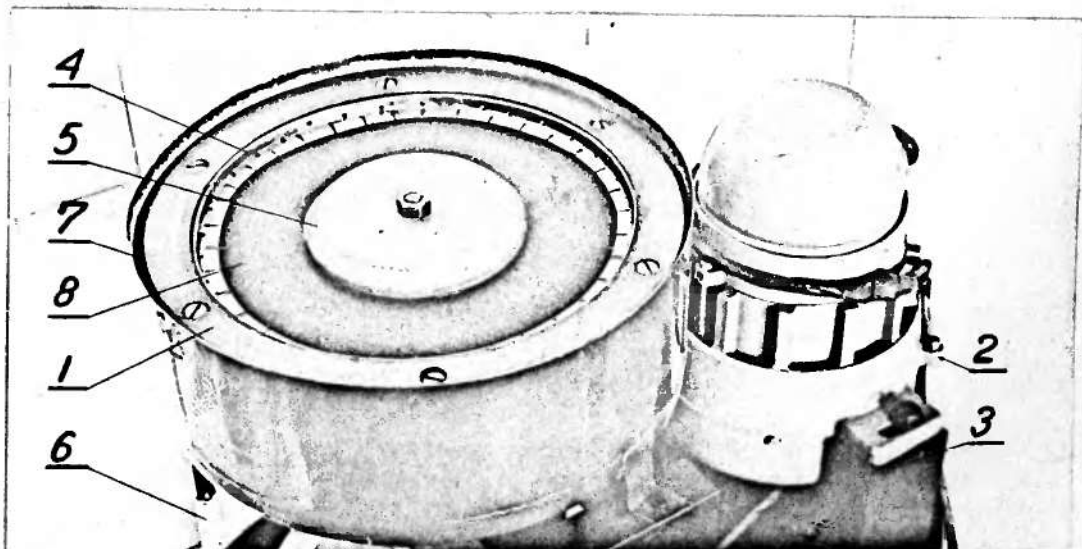
Badania ścieralności prowadzono na urządzeniu, którego zasada działania polega na ścieraniu próbek płaskich o ziarna umocowane (papier ścierny).

Na rys. 18 przedstawiony jest widok urządzenia badawczego. W górnej części urządzenia znajduje się głowica 1 z widocznymi sześcioma obciążnikami 2, dociskającymi badane próbki do papieru ściernego. Przewodem 3 doprowadzany jest do strefy ścierania strumień wodny.



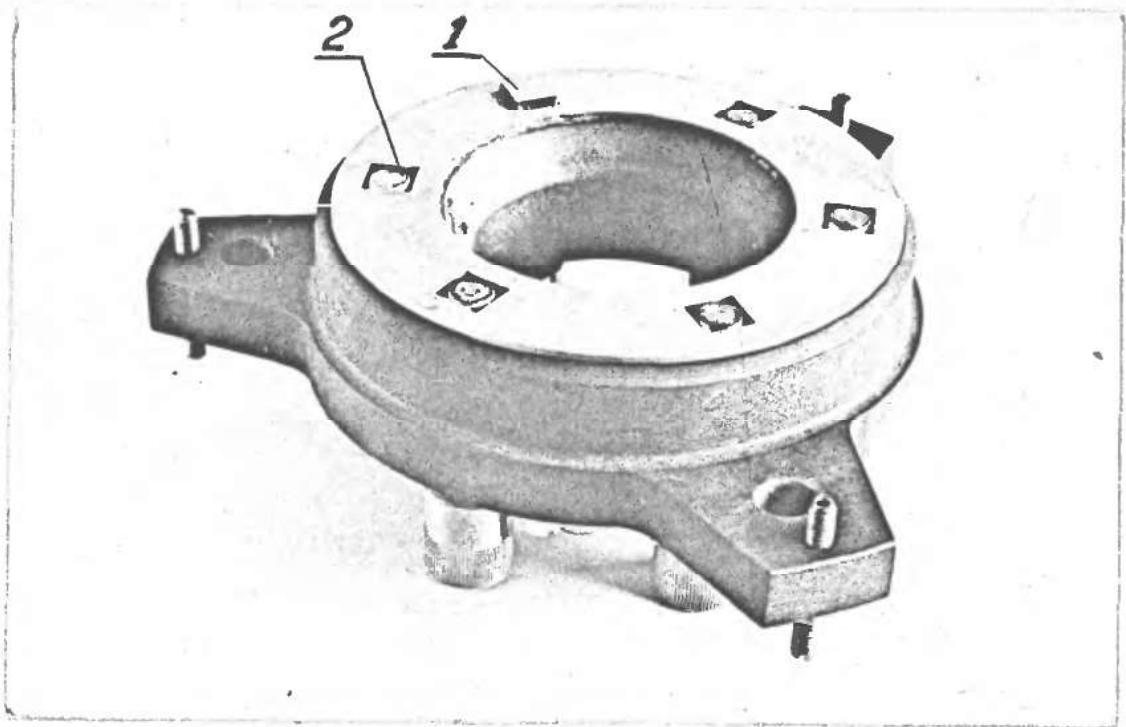
Rys. 18. Widok urządzenia do badania ścieralności.

Na rys. 19 przedstawiono urządzenie przy zdjętej obudowie i głowicy. Tarcza 1 otrzymuje napęd od silnika 2 poprzez pasek klinowy 3. W górnej części tarczy mocowany jest papier ścierny 8 sprężystym pierścieniem 4 i nakładką 5. Przewodem 6 odprowadzana jest zużyta woda ze zbiornika 7. W pierścieniu dociskowym 4 i tarczy 1 powiercone są otworki do odprowadzania wody ze strefy ścierania do zbiornika 7.



Rys. 19. Urządzenie do badania ścieralności przy zdjętej obudowie.

Na rys.20 przedstawiona jest głowica z widoczną próbką 1 i obciążnikami 2.



Rys.20. Głowica.

Podczas badania ścieralności, w strefę ścierania doprowadzono obfity strumień wody celem wypłukiwania i usuwania produktów ścierania. Nacisk jednostkowy na próbkę wynosił  $0,02 \text{ GN/m}^2$ , a szybkość ruchu względnego próbki i papieru ściernego  $v = 192 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ . Czas pojedynczej próby przyjęto 15 min. Celem łatwiejszego ustalenia wpływu parametrów technologicznych na ścieralność, jednocześnie badano 6 próbek (odpowiadało to największemu zakresowi zmian badanego parametru technologicznego).

Podczas doświadczeń stosowano papier ścierny o nasypie węgla krzemu (SiC) o numerze ziarna 12 (100). Ruch względny próbek i papieru odbywał się po tym samym torze. Po każdej próbie (15 min) próbki ważono na wadze analitycznej i przy ponownym zakładaniu w głowicę przemieszczano na nowe stanowiska (ruchem okrężnym) przy jednoczesnym obrocie próbek wokół własnej osi.

### Przygotowanie próbek.

Próbki, na których przeprowadzono doświadczenia nad wpływem parametrów technologicznych (stal 55) na zgniot powierzchniowy, wykonane były z jednego arkusza blachy o grubości 12 mm. Wymiary próbek po obróbce miały: 4 x 15 x 100 mm. Podczas obróbki skrawaniem, naddatek obróbkowy usuwany był równomiernie z obydwu stron. Z powodu braku blach o odpowiednich grubościach, niektóre próbki (miedź, brąz, tytan) wykonano z prętów pryzmatycznych.

W każdym jednak wypadku zachowany był naddatek na obróbkę skrawaniem minimum 4 mm na stronę. Próbki poszczególnych gatunków materiałów wykonywano z jednej partii zgodnie z atestami hutniczymi. Po obróbce skrawaniem próbki poddano wyżarzaniu i odpężaniu zgodnie z tablicą II.

Tablica II.

Rodzaj materiału	Temper. wyżarz. , °K ,	Sposób chłodzenia	Temper. odpuszczania , °K ,	Czas odpężania , godz. ,
Stale i żeliwo	932	powietrze	512	12
brąz i mosiądz	932	powietrze	512	12
miedź	872	woda	-	-
stop tytanu	1132	powiet.	512	20
stop aluminium	temp. przes. 772	woda	temp. starz. 442	20

Tak przygotowane próbki poddano obróbce powierzchniowej zgniotem.

### 3.3. Ustalenie zakresu pracy urządzenia wibracyjnego.

#### Określenie wielkości amplitud.

Badania urządzenia wibracyjnego obejmowały głównie określenie bezpiecznego zakresu pracy wibratora oraz ustalenie wytycznych odnośnie racjonalnego doboru parametrów ruchu drgającego urządzenia. Doświadczenia z tego zakresu mogą być przydatne przy konstruowaniu podobnego typu urządzeń. Pomiar, przeprowadzone na rzeczywistym modelu umożliwiły porównanie wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi.

Jak już wspomniano w cz.2.2 i 2.7. wibratory mogą pracować przy częstotliwościach przedrezonansowych, rezonansowych i pozarezonansowych. Przyjęty do badań model urządzenia wibracyjnego (opisany w cz.2.3.- rys.5 i 6) przewidziany jest do pracy przy częstotliwościach pozarezonansowych. Obliczenia częstotliwości rezonansowych przeprowadzono w oparciu o zależność /28/:

$$\nu_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{M_c + M_w}}, \frac{1}{s},$$

Wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy III.

Tabela III.

Zestaw ciężarków	I	II	III	IV	V	VI
Obliczone częstotliwości drgań własnych	24,76	27,71	24,56	24,36	24,33	24,94

Pomiary dokonane za pomocą wzbudnika drgań potwierdziły wyniki obliczeń.

Przy określaniu wielkości amplitud, porównanie zgodności wyników obliczeń z wynikami pomiarów przeprowadzono tylko dla częstotliwości pozarezonansowych (pracy modelu urządzenia przy częstotliwościach przedrezonansowych nie brano pod uwagę ze względu na małą energię ruchu drgającego, a praca w częstotliwościach rezonansowych groziła zniszczeniem układu). Wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy IV.

Tablica IV.

Często- tliwość- si $\nu, \frac{1}{s}$	Obliczone wartości amplitud $A, m$ , dla zestawu ciężarków III-VI			
	III	IV	V	VI
40	0,001521	0,001843	0,00220	0,00270
50	0,001272	0,001540	0,001847	0,00247
60	0,001188	0,001416	0,001697	0,002082
70	0,001113	0,001349	0,001617	0,001984
80	0,001050	0,001289	0,001570	0,001924

Obliczone amplitudy sprawdzono na rzeczywistym urządzeniu. Pomia-  
ry wykonano za pomocą tasto grafu, odczytując wyniki z wykresów wy-  
konanych na woskowym papierze. Tak pomierzone amplitudy sprawdzono  
dodatkowo za pomocą "klina" odpowiednio wycechowanego i przytwier-  
dzonego do wibratora. Wyniki pomiarów zestawiono w tablicy V.

Tablica V.

Często- tliwość- ci $\nu, \frac{1}{s}$	Pomierzone wielkości amplitud $A, m$ , dla zestawu się- żarków III-VI oraz procentowa wielkość błędu w sto- sunku do wartości obliczonych (tablica III)							
	III		IV		V		VI	
	A	% bł.	A	% bł.	A	% bł.	A	% bł.
40	0,00147	-3,7	0,0018	-2,4	0,00210	-4,6	0,00265	-1,9
50	0,00125	-1,6	0,0016	+3,9	0,00130	-2,6	0,00250	+1,8
60	0,00120	+2,6	0,0015	+5,9	0,00170	+0,17	0,00215	+4,2
70	0,00115	+3,6	0,0014	+3,7	0,00165	+2,0	0,00200	+1,0
80	0,00110	+1,0	0,0013	+0,9	0,00160	+1,9	0,00195	-1,1

Wpływ wielkości amplitudy na pobór mocy (wielkości obliczone i  
pomierzone) przedstawia wykres 26.

Jak widać z tablicy IV i V, wielkości obliczone różnią się nieznacznie od pomierzonych.

Przy małych częstotliwościach drgań, obliczone amplitudy są mniejsze od pomierzonych. Przy dużych częstotliwościach sytuacja jest odwrotna.

W tablicy V zestawiony jest rozrzut wyników, uzyskanych z obliczeń i pomiarów. Największy błąd nie przekracza 6 %. Przeciętny błąd waha się w granicach  $\sim 2,4\%$  tak, że wyniki obliczeń można uznać za poprawne.

Zmiany wielkości amplitudy dokonywano przez wymianę ciężarków, które różniły się między sobą wielkością wirujących mas oraz promieniem ich niewyważenia. Przy przyjętym zestawie ciężarków amplituda zależy od częstotliwości drgań. Największe amplitudy występują przy częstotliwościach bliskich rezonansowym (rys.13), a w miarę oddalania się od tego zakresu - maleją.

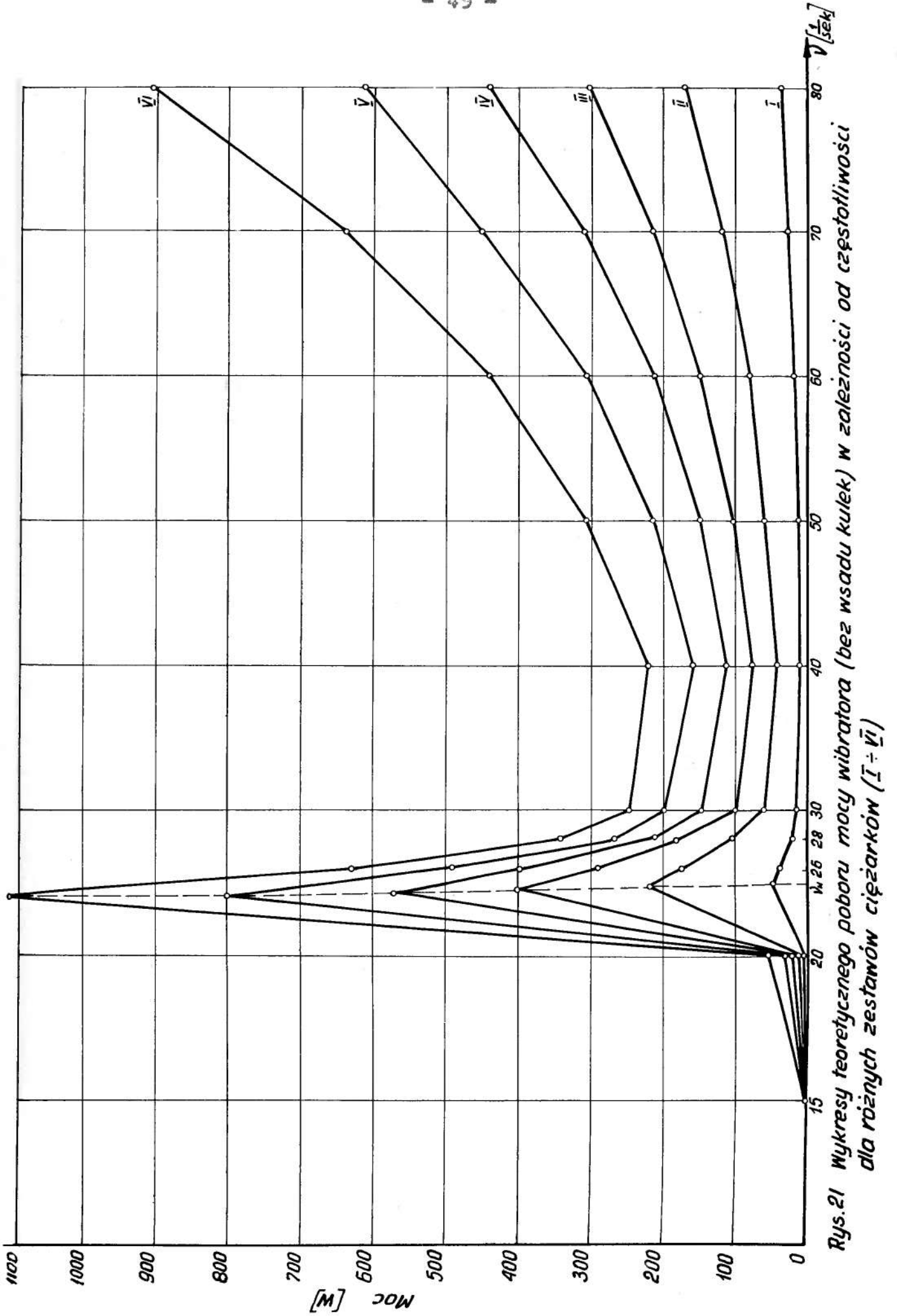
Jak już wspomniano w cz. 2.5. - podczas obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną, prawidłowy proces obróbki może przebiegać dopiero po przekroczeniu pewnej wielkości amplitudy. Przy zbyt małych amplitudach (poniżej 0,5 mm) nie występuje ruch chaotyczny kulek. Wsad tylko w nieznacznym stopniu zwiększa swoją objętość (nie wypełnia całego pojemnika), a poszczególne kulki nie przemieszczają się względem przedmiotu obrabianego i zderzają się z powierzchnią obrabianą zawsze w tym samym miejscu. Powoduje to lokalne utwardzenia materiału, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Przy amplitudach powyżej 0,5 mm występuje już częściowy ruch chaotyczny, co wpływa na to, że miejsca poszczególnych zderzeń kulek z powierzchnią obrabianą są przypadkowe i utwardzenie powierzchniowe jest równomierne.

Określenie zapotrzebowania mocy układu napędowego  
i ustalenie bezpiecznego przedziału pracy urządzenia.

Przy określaniu mocy układu napędowego dla poszczególnych zestawów ciężarków, rozgraniczono moc pobieraną przez sam wibrator od mocy, pobieranej przez wsad kulek. Moc pobieraną do napędu wibratora obliczono z zależności /32<sup>a</sup>/

$$N = \frac{M_c^2 \cdot g^2 \cdot h \cdot \omega_w^2 \cdot \alpha^6}{(1 - \alpha^2)^2 + \alpha^2 \cdot 4 \gamma^2} \cdot W ,$$

Wyniki obliczeń zestawiono na wykresach 21,23,24,25 i 27.



Rys. 21 Wykresy teoretycznego poboru mocy wibratora (bez wsadu kulek) w zależności od częstotliwości dla różnych zestawów ciężarków (I - VI)



Wykres przedstawiony na rys.21 sporządzony jest na podstawie wyników, uzyskanych z obliczeń (dla przyjętego do badań modelu urządzenia wibracyjnego). Wyniki te nie są sprawdzone pomiarami w całym zakresie częstotliwości ze względu na zjawisko rezonansu, w którym układ mógłby ulec zniszczeniu. Jak widać z rys.21 przy częstotliwościach przedrezonansowych pobór mocy przez układ napędowy jest bardzo mały. Energia ruchu drgającego w tym przedziale jest niewystarczająca do prowadzenia obróbki powierzchniowej zgniotem. Przy częstotliwościach rezonansowych występuje największy pobór mocy. W zakresie tym też nie można prowadzić obróbki ze względu na nadmierny wzrost amplitudy i niebezpieczeństwo zniszczenia urządzenia. Po przejściu przez ten zakres następuje nagły spadek poboru mocy, który dla  $\nu = 40 \frac{1}{s}$  przyjmuje wartość minimalną. Przy dalszym zwiększaniu częstotliwości obserwuje się, początkowo powolny, a następnie bardzo intensywny przyrost poboru mocy.

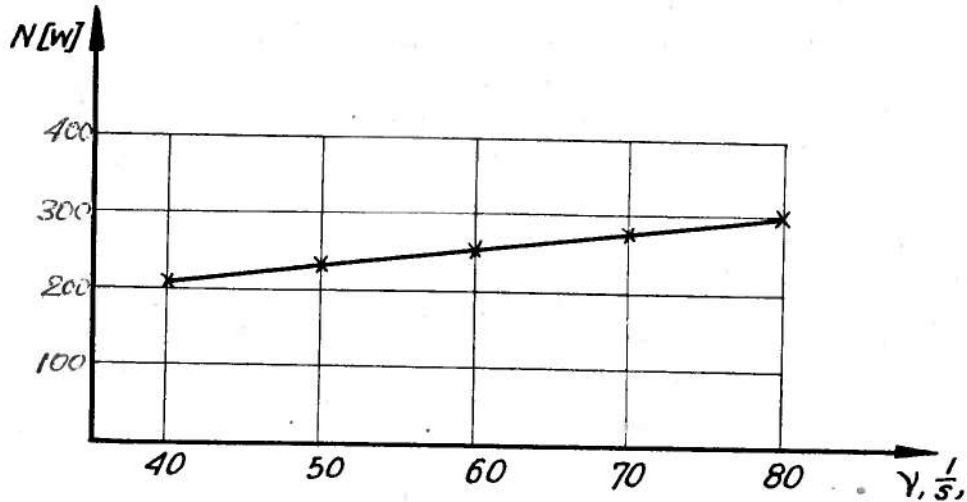
Częstotliwości  $40, \frac{1}{s} \div 70, \frac{1}{s}$ , wydają się najbardziej odpowiednie do pracy urządzenia wibracyjnego. Przy częstotliwościach mniejszych od  $40, \frac{1}{s}$ , praca modelu urządzenia jest niestabilna i układ ma tendencje do wytrącania się z równowagi i wzrostu amplitudy. Przy częstotliwościach większych od  $70, \frac{1}{s}$ , występuje nadmierne przeciążenie elementów wibratora siłami odśrodkowymi od wirujących, niewyważonych mas ( $13050 \text{ N} \approx 1350 \text{ kg}$ ).

Drgania harmoniczne, wywołane okresowo zmienną siłą wymuszającą, cechują się bardzo dużymi przyśpieszeniami (dla  $\nu = 80 \frac{1}{s}$  przy VI-tym zestawie ciężarków, przyśpieszenie to przekracza czterdziestkrotnie przyśpieszenie ziemskie). Przy dużych częstotliwościach wzrasta też natężenie hałasu (zmniejszenie częstotliwości drgań z  $80, \frac{1}{s}$ , do  $60, \frac{1}{s}$ , wpływa na zmniejszenie hałasu o 8 decybeli.)

Za uznaniem przedziału częstotliwości  $40 \div 70, \frac{1}{s}$ , jako bezpiecznych dla urządzenia wibracyjnego, przemawiają więc względy wytrzymałościowe, energetyczne i BHP, a dodatkowym argumentem jest dostateczna intensywność zgniotu, uzyskana przy tych częstotliwościach.

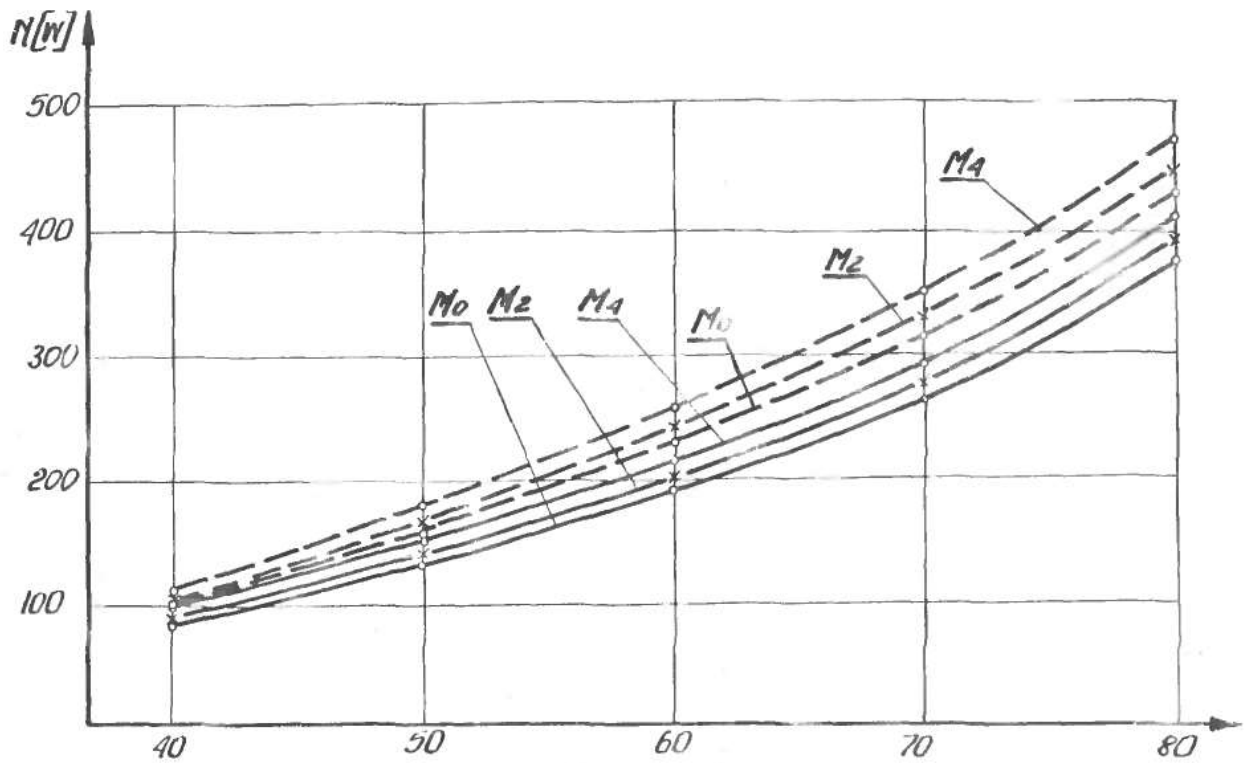
Celem porównania obliczonych teoretycznie wartości poboru mocy w zależności od zmiennych parametrów obróbki dla bezpiecznego zakresu pracy urządzenia, przeprowadzono pomiary rzeczywistego poboru mocy przez układ napędowy. Pomiarów dokonano uniwersalnymi

przyrządami elektrycznymi klasy 0,5. Mierzono moc doprowadzoną do silnika prądu stałego, uwzględniając straty biegu jałowego (rys.22) oraz sprawność mechaniczną  $\eta_v = 0,876$ .

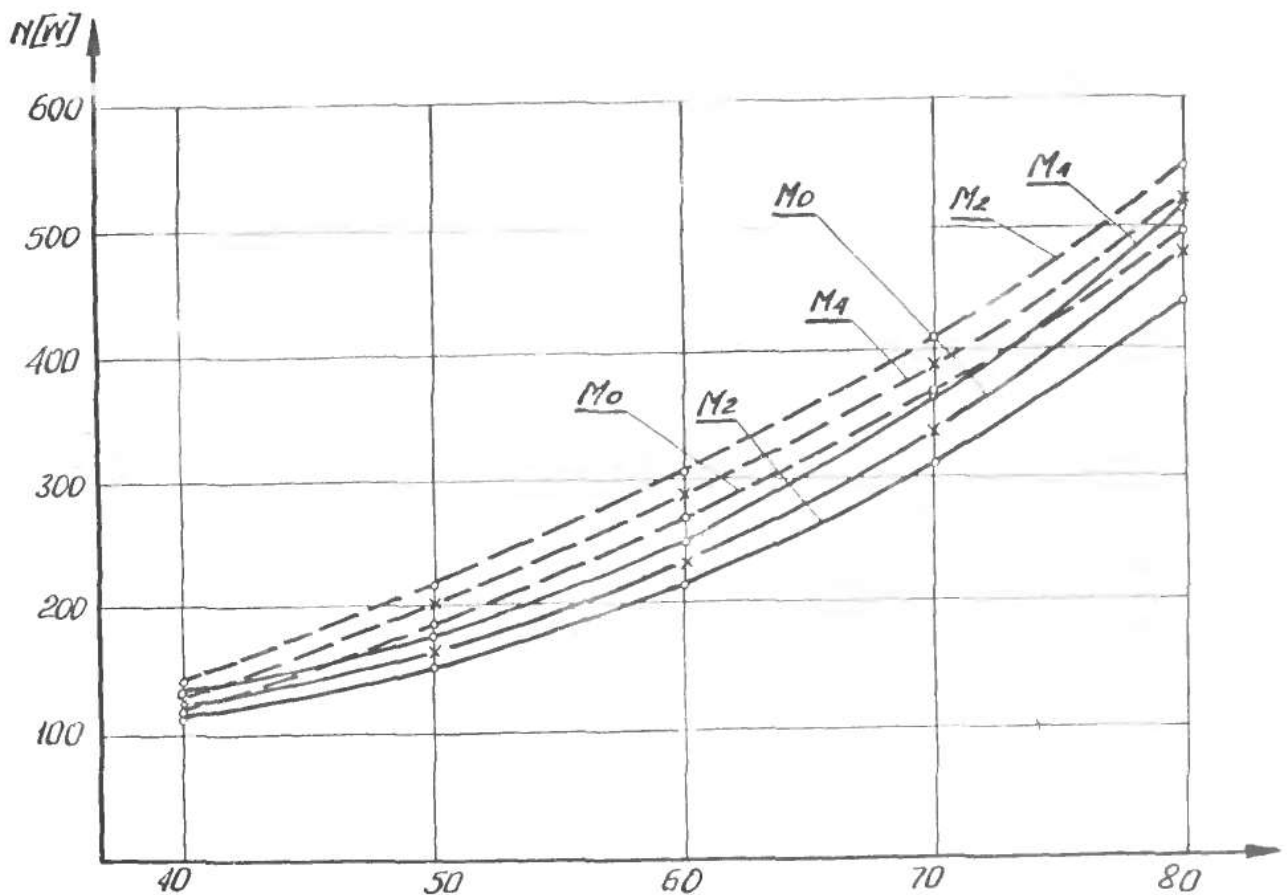


Rys.22. Wykres strat mocy biegu jałowego silnika.

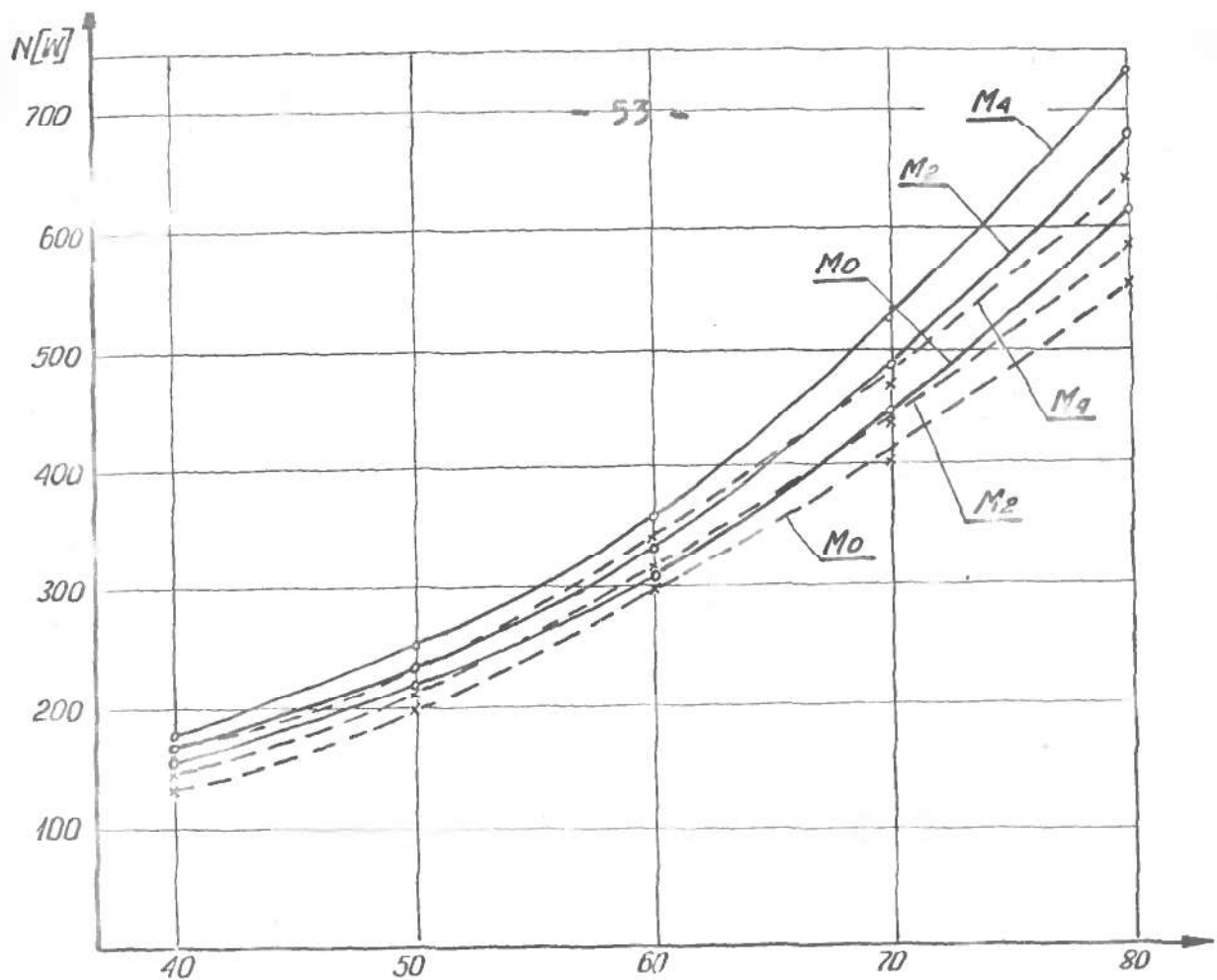
Wyniki pomiarów poboru mocy, w zależności od zmiennych parametrów technologicznych, przedstawiono graficznie na wykresach: 23, 24, 25, 26 i 27. Na wykresach tych przedstawiono równocześnie wielkość poboru mocy przez wsad kulek. Linie z odnośnikiem  $M_0$  oznaczają pobór mocy przez sam wibrator. Linie z odnośnikiem  $M_2$  oznaczają, że podczas badań pojemnik wypełniony był wsadem kulek, wynoszącym 2 kg, a linie z odnośnikiem  $M_4$  - że wsad wynosił 4 kg. Badania prowadzone były przy zmianie obciążenia stopniowanym co 1 kg, ale dla przejrzystości rysunków nie umieszczono na nich linii dla pośrednich wartości. Obliczenia masy pobieranej przez wsad kulek przeprowadzono w oparciu o rozważania, ujęte w części 2.6.



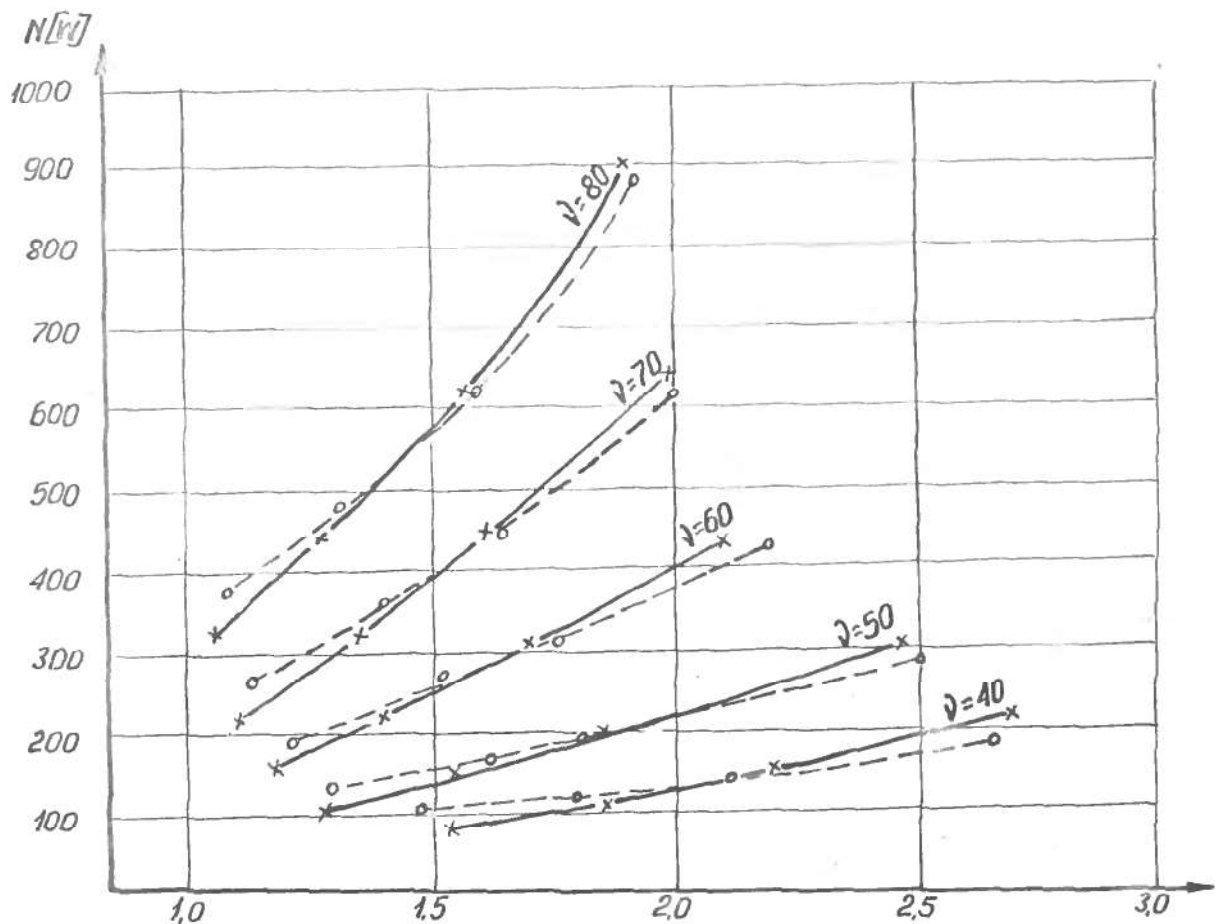
Rys.23 Wykresy teoretycznego(—) i rzeczywistego(---) poboru mocy wibratora w zależności od częstotliwości i masy kulek dla ciężarków III



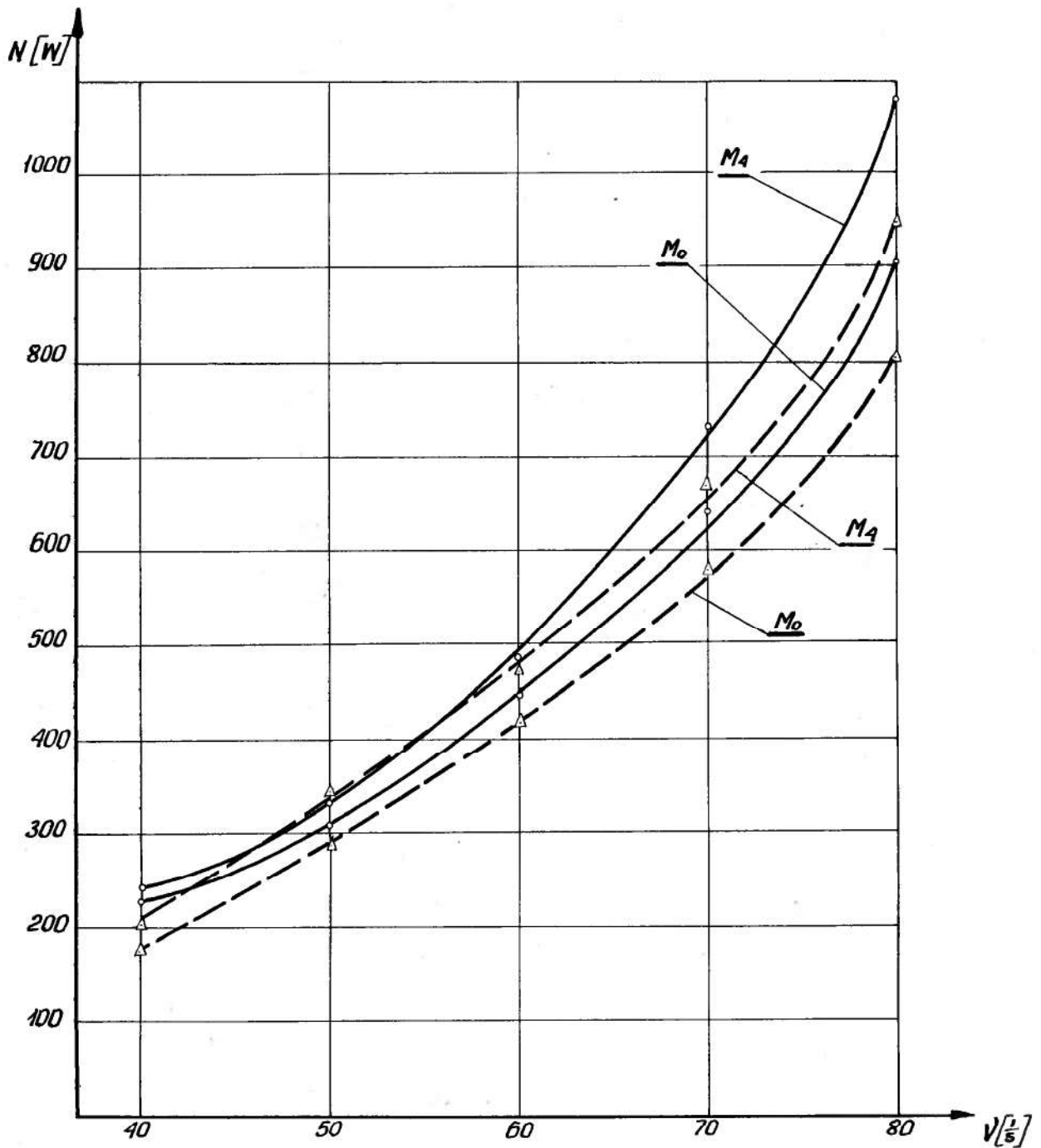
Rys.24 Wykresy teoretycznego(—) i rzeczywistego(---) poboru mocy wibratora w zależności od częstotliwości i masy kulek dla ciężarków IV



Rys.25 Wykresy teoretycznego (—) i rzeczywistego (---) poboru mocy wibratora w zależności od częstotliwości i masy kulek dla ciężarków  $\bar{v}$



Rys.26 Wykresy teoretycznego (—) i rzeczywistego (---) poboru mocy wibratora w zależności od amplitudy dla ustalonych częstotliwości.



Rys.27 Wykresy teoretycznego (—) i rzeczywistego (---) poboru mocy wibratora w zależności od częstotliwości i masy kulek dla ciężarków  $\bar{v}$

Obliczenie mocy pobieranej przez wsad kulek polegało głównie na określeniu energii zderzenia się wsadu z drgającym pojemnikiem i wyznaczeniu zastępczego współczynnika tłumienia. Mając wyznaczony współczynnik tłumienia, można obliczyć moc pobieraną przez wsad kulek (wzór 32<sup>a</sup>). Zgodnie z zależnością /13/, współczynnik tłumienia od wsadu wynosi:

$$k_2 = \frac{\Delta L_2}{2\pi^2 \sqrt{A^2}}, \text{ kg/s,}$$

Pracę tłumienia obliczono z zależności:

$$\Delta L = \frac{1}{2}(E_z + E_k), \text{ J,}$$

Przy obliczaniu energii zderzenia  $E_z$  i  $E_k$  maksymalizowano te funkcje, przyjmując przypadek dla którego  $\cos 2\pi m = 1$ . Przy takim założeniu zależności /15/ i /16/ przyjmowały postać:

$$E_z = \frac{1}{2} \left(\frac{m}{V}\right)^2 \cdot M_k \cdot g^2 + \frac{M_k \cdot g \cdot A}{2K} \left(\sqrt{K^2 - 1} + 1\right)^2 - 2\pi m \cdot \frac{M_k \cdot g \cdot A}{K} \left(\sqrt{K^2 - 1} + 1\right)$$

$$E_k = \frac{M_k \cdot g \cdot A}{2K} \left(\sqrt{K^2 - 1} + 1\right), \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$$

Współczynnik tłumienia od wsadu kulek ( $k_2$ ) w zależności od częstotliwości drgań dla poszczególnych zestawów ciężarków zestawiono w tabelicy VI.

Tablica VI.

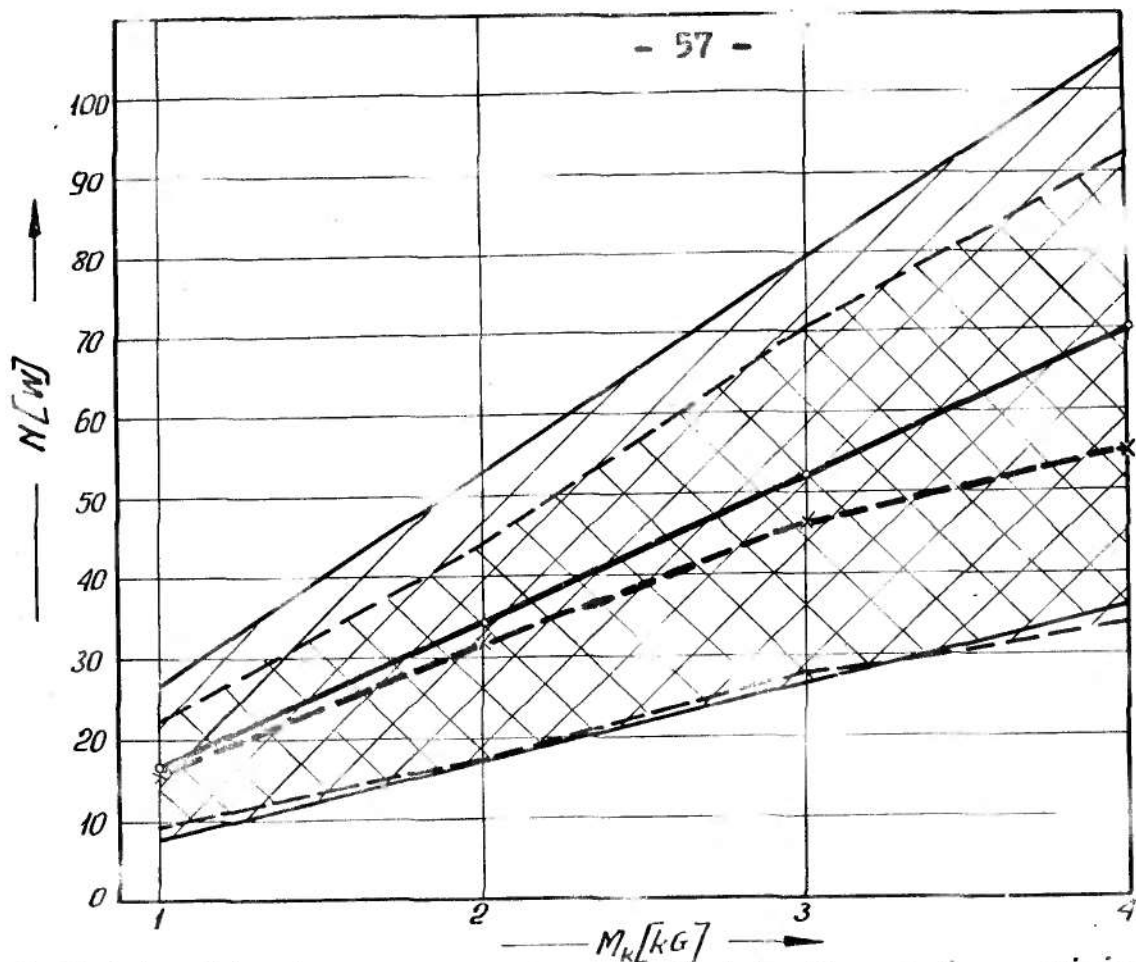
Częstotliwość $\nu, \frac{1}{s},$	Obliczone wartości współczynników tłumienia od wsadu kulek $k_2, \text{kg/s,}$ dla zest.			
	III	IV	V	VI
40	47,5	49,7	39,2	43,6
50	60	53,2	56,9	56,4
60	66,2	58,9	62,7	61,6
70	70,2	76,3	73,5	74,7
80	75,5	86,3	83	104,4

Tak obliczony współczynnik tłumienia  $k_2$  jest częścią składową (wzór 16<sup>b</sup>) ogólnego zastępczego współczynnika tłumienia. Znajomość proporcji pomiędzy oporami tłumienia samego wibratora i wibratora obciążonego wsadem, pozwala na określenie przyrostu zapotrzebowania mocy układu napędowego pod wpływem dodatkowego obciążenia wsadem kulek. Obliczenia wykazują, że pobór mocy jest proporcjonalny do masy wsadu. Wyniki pomiarów są nieco rozbieżne od obliczonych i wykazują zależność mniej niż proporcjonalną. Wielkości pomierzone i obliczone przedstawiono wykreślnie na rys.28.

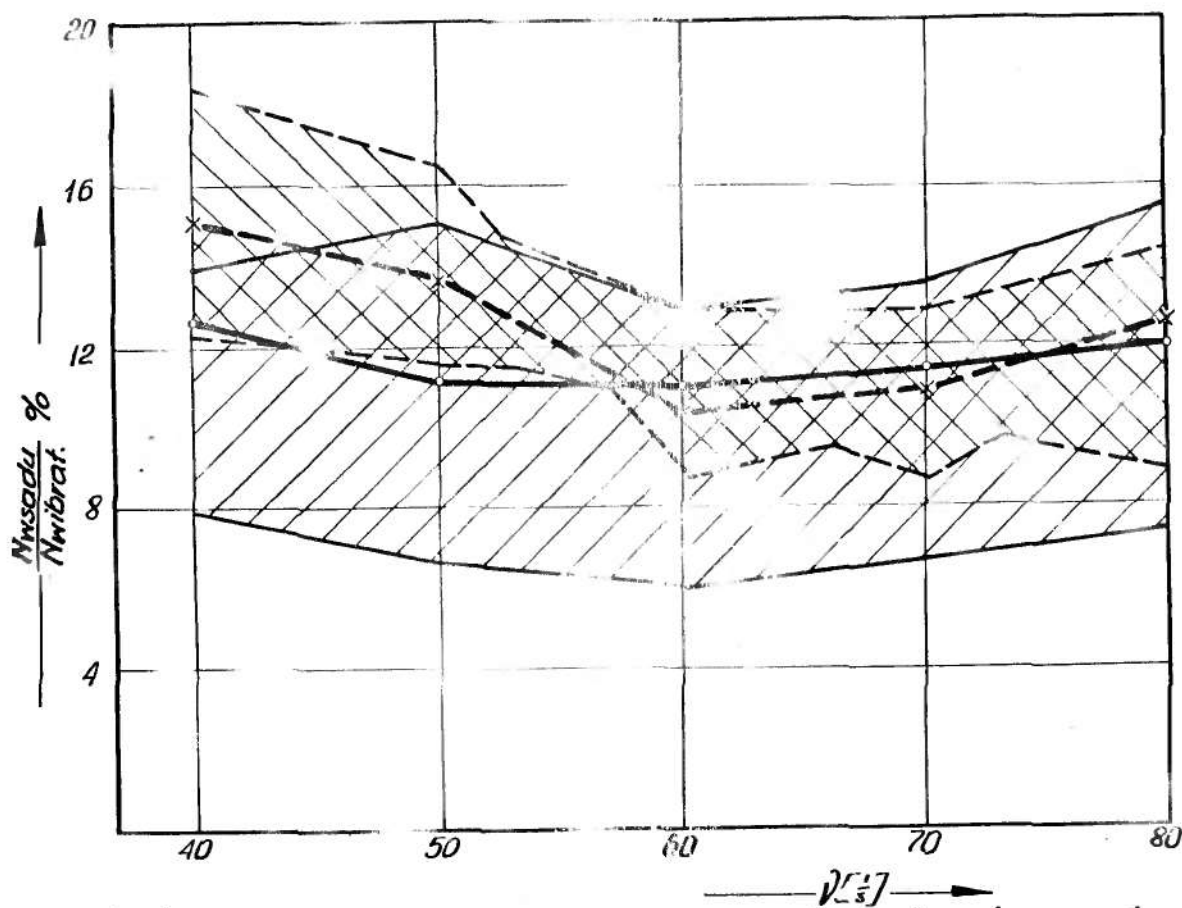
Przy ustalaniu ilości wsadu kulek kierowano się głównie skutkami obróbki. Intensywność obróbki mierzono wielkością ugięcia próbek. Stwierdzono, że największe ugięcia próbek występowały przy grubości wsadu wynoszącej 20 mm. Nie bez znaczenia jest też wysokość pojemnika. W czasie pracy wsad zwiększa swoją objętość i nógół równomiernie wypełnia cały pojemnik (rys.8.) Wysokość pojemnika ma decydujący wpływ na "rozrzedzenie" wsadu, a więc na ilość zderzeń pomiędzy powierzchnią obrabianą a luźnymi kulkami. Stosunek wysokości pojemnika do wysokości wsadu kształtował się w przybliżeniu jak  $\frac{3}{1}$ . Zależność ta może być jedną z wytycznych przy projektowaniu urządzeń wibracyjnych.

Moc, pobierana przez wsad kulek w odniesieniu do mocy, pobieranej przez sam wibrator, może być uważana za jeden ze wskaźników ekonomicznego wykorzystania mocy urządzenia wibracyjnego. Wskaźnik ten jest stosunkowo niski. Można go polepszyć głównie przez zmniejszenie mocy traconej na wprawianie w ruch samego wibratora. Moc pobierana przez wibrator jest proporcjonalna do jego masy (wzór 32<sup>b</sup>), a ta może być zmniejszona przez zastosowanie elementów konstrukcyjnych, posiadających dużą wytrzymałość przy małym ciężarze właściwym (stopy aluminium).

Podczas doświadczeń badano wpływ częstotliwości na stosunek poboru mocy przez wsad kulek w odniesieniu do mocy pobieranej



Rys.28 Zależność poboru mocy od wsadu kulek dla zestawu ciężarków III ÷ IV i częstotliwości  $\nu = 70 \text{ s}^{-1}$   
 — wielkości obliczone, - - - wielkości pomierzone



Rys.29 Wykres poboru mocy przez wsad kulek (wyrażonej procentowo w odniesieniu do mocy pobieranej przez wibrator) w zależności od częstotliwości dla zestawu ciężarków III ÷ IV i masy wsadu  $M = 3 \text{ kg}$   
 — wielkości obliczone, - - - wielkości pomierzone



przez wibrator. Wyniki przedstawiono wykreslnie na rys.29. Jak widać z rysunku, najkorzystniejszy (największy) stosunek poboru mocy przez wsad, w odniesieniu do mocy pobieranej przez wibrator, zachodzi przy małych i dużych częstotliwościach (40 i  $80, \frac{1}{3}$ ). Procentowy udział mocy pobieranej przez wsad kulek w odniesieniu do mocy, pobieranej przez wibrator, kształtuje się w granicach 12% (dla grubości wsadu  $\sim 20$  mm), a zmiana tej proporcji pod wpływem zmian częstotliwości jest rzędu kilku procent. Z powyższych spostrzeżeń wynika, że jeżeli podczas ustalania zakresu pracy wibratora zostanie pominięty wpływ częstotliwości na maksymalizację poboru mocy przez wsad, nie wpłynie to w istotny sposób na ogólną sprawność energetyczną. Większą uwagę należy zwrócić na zmniejszenie masy wibratora.

Podczas doświadczeń próbki obrabiane były jednostronnie, ale przeprowadzono wstępne badania rozpoznawcze nad jednoczesną obróbką dwustronną. W tym celu wsad kulek umiejscowiono w dolnej części pojemnika, a próbki umocowano (po końcach) na pewnej wysokości. Przylegały one szczelnie do siebie powierzchniami bocznymi. Na próbki zasypano drugi wsad kulek. W czasie obróbki występowało obustronne zderzanie się próbek z wsadem. W trakcie obróbki próbki nie wyginały się, co świadczyło, że zgniot powierzchniowy наносzony był jednakowo z obu stron. Dalsze zwiększenie wydajności obróbki można uzyskać przez zamocowanie dodatkowej partii próbek w dolnej i górnej części pojemnika (obrabiać dodatkowo dwie powierzchnie).

Spostrzeżenia te mogą być przydatne w praktyce przemysłowej. Wydaje się na przykład, że od razu z dwu stron jednocześnie można by obrobić listwy wałka skrętnego nowouruchamionego samochodu dostawczego **W Fabryce Samochodów Ciężarowych w Lublinie.**

### 3.4. Wyniki badań własności fizykalnych i użytkowych warstwy wierzchniej.

#### Własności stereometryczne warstwy wierzchniej.

Badania stereometryczne warstwy wierzchniej przeprowadzono głównie w zakresie wpływu parametrów technologicznych obróbki na chropowatość i nośność powierzchni. Chropowatość powierzchni określano za pomocą wysokości nierówności ( $R_z$ ) i średniego arytmetycznego odchylenia profilu od linii średniej ( $R_a$ ). Nośność powierzchni wyznaczono na podstawie profilogramów chropowatości.

Doświadczenia z tego zakresu prowadzono na próbkach wykonanych ze stali 55 (wyż. i odpr.). Wyniki pomiarów nierówności powierzchni zestawiono na rys. 30 ÷ 33. Przeprowadzono też badania porównawcze nad wpływem obróbki powierzchniowej zgniotem na chropowatość i nośność powierzchni dla materiałów różnych. Wyniki pomiarów chropowatości zestawiono na rys. 34. Krzywe nośności dla stali 55 (zmienne parametry technologiczne) i dla materiałów różnych (ustalone parametry technologiczne) zawarte są w załączniku do pracy (rys. 95<sub>z</sub> ÷ 130<sub>z</sub>). Wykresy te wyjątkowo wykonane są dla pojedynczych próbek. Wszystkie pozostałe są średnimi z trzech pomiarów. Na podstawie krzywych nośności sporządzono wykresy gradientów nośności ( $U_{50}$ ), które ujęte są na rys. 35 ÷ 40.

Na rys. 41<sup>a</sup> przedstawiony jest profilogram powierzchni szlifowanej, a dla porównania na rys. (41<sup>b</sup>) przedstawiono profilogram powierzchni obrobionej zgniotem (takie profilogramy posłużyły do wyznaczenia  $R_z$ , a następnie krzywych nośności i wykresów gradientów nośności). Na powierzchni obrobionej zgniotem obserwuje się stosunkowo duże odległości pomiędzy wzniesieniami i wgłębieniami profilu.

Przewidziany normą (dla danej klasy chropowatości) odcinek pomiarowy okazał się zbyt krótki dla obróbki powierzchniowej zgniotem. Chcąc zachować przewidzianą normą zalecaną ilość wzniesień i wgłębień, typowych dla danego profilu, przyjęto odcinki pomiarowe wynoszące 2,5 i 4 mm.

Profilogramy sporządzone dla powierzchni obrobionej zgniotem wykazują zupełnie inny zarys profilu powierzchni w porównaniu z powierzchnią wyjściową (np. szlifowaną). Na przyjętym odcinku pomiarowym występuje znacznie mniejsza ilość nierówności. Mniejsze są też maksymalne wysokości nierówności  $R_{max}$ . Poszczególne wzniesienia i wklęsłości powierzchni są zaokrąglone, co świadczy o tym, że w trakcie obróbki występowało płynięcie materiału zarówno w kierunku rdzenia próbki (niwelowanie wzniesień) jak i w kierunku powierzchni obrobionej (niwelowanie wklęsłości). Ostre krawędzie zarysu profilu, będące wynikiem zadrapań, zarysowań i wyrwań powstałych podczas obróbki ubytkowej, ulegają tu zaokrągleniu. Jednocześnie obserwuje się (przy zachowaniu dostatecznej czystości w czasie obróbki) zwiększenie zdolności odblaskowej powierzchni obrobionej zgniotem, w porównaniu do powierzchni obrobionej skrawaniem. Na to zjawisko mogą mieć wpływ mikronierówności powierzchni, które nie są dotychczas dostatecznie zbadane i nie objęte normami. Wiąże się to z pojęciem niejednorodności budowy materii, defektami sieciowymi i odkształceniami plastycznymi materiałów o budowie krystalicznej. Na zdolność odblaskową powierzchni może mieć więc wpływ nieciągłość budowy powierzchni i wynika z tego mikronierówności.

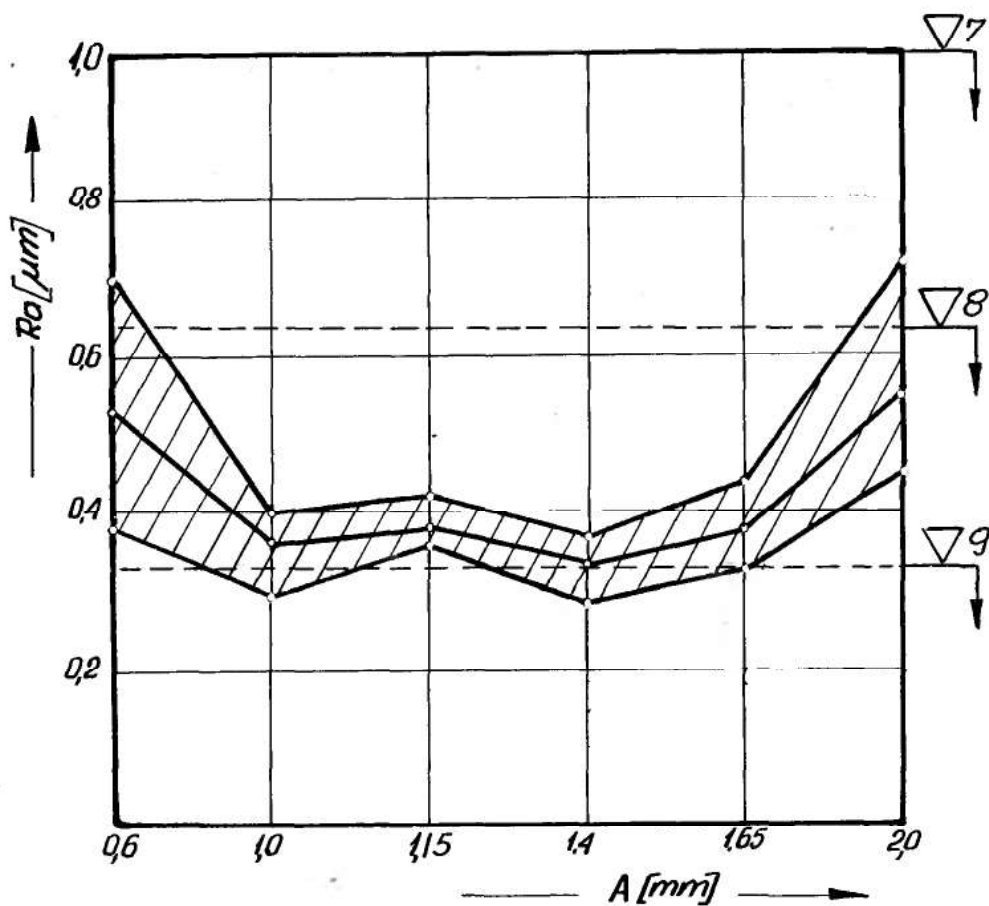
Jak już wspomniano, podczas obróbki powierzchniowej zgniotem ukształtowanie się zupełnie nowa chropowatość powierzchni. W miejsce ostrych, nierównomiernych i zagęszczonych nierówności, pojawiają się bardziej łagodne, ale też nierównomierne, jak i niesymetryczne wklęsłości i wypukłości, a odległości między nimi są znacznie większe. Na niektórych próbkach można zaobserwować miejscowe zagłębienie-

nia. Może to mieć związek z występowaniem miękkich stref na powierzchni obrobionej. Przypuszczenia te potwierdzają badania metalograficzne.

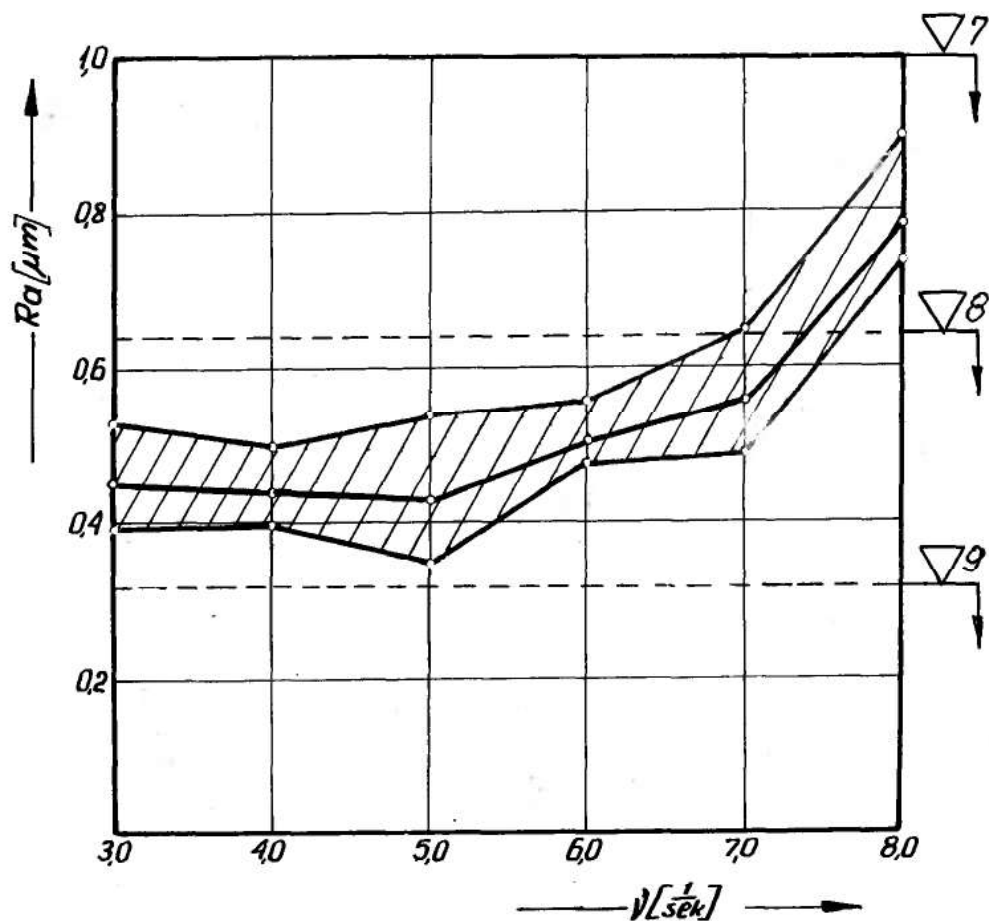
Podczas obserwacji mikrostruktury metalograficznej stwierdzono np., że próbki ze stali 55 posiadały strukturę pasmową. Niejednorodność mikrostruktury metalograficznej powierzchni, poddanej obróbce powierzchniowej zgniotem za pomocą luźnych kulek metodą wibracyjną może mieć wpływ na nierównomierne płynięcie materiału podczas formowania się nowej struktury stereometrycznej warstwy wierzchniej. Zjawisko miejscowego "wybijania" wgłębień w strefach bardziej miękkich jest częściowo rekompensowane polepszeniem się jednorodności mezotwardości ww, gdyż miejsca bardziej miękkie podlegają intensywniejszemu zgniotowi.

Obróbka powierzchniowa zgniotem wpływa na ogół na polepszenie chropowatości powierzchni w odniesieniu do powierzchni otrzymanej z obróbki poprzedzającej średnio o jedną klasę. Nierówności powierzchni nie są tutaj usuwane, lecz "rozgniatane". Przy stromych nierównościach (obserwuje się to przy szlifowaniu materiałów miękkich) może wystąpić zjawisko zawijania, a następnie rozgniatania i rozwałcowywania na powierzchni obrobionej. Na zglądach metalograficznych jest to widoczne i może sugerować (błędnie), że w czasie obróbki stosowane były nadmiernie intensywne parametry technologiczne. Zjawiska tego nie obserwuje się na powierzchniach posiadających mniej strome nierówności.

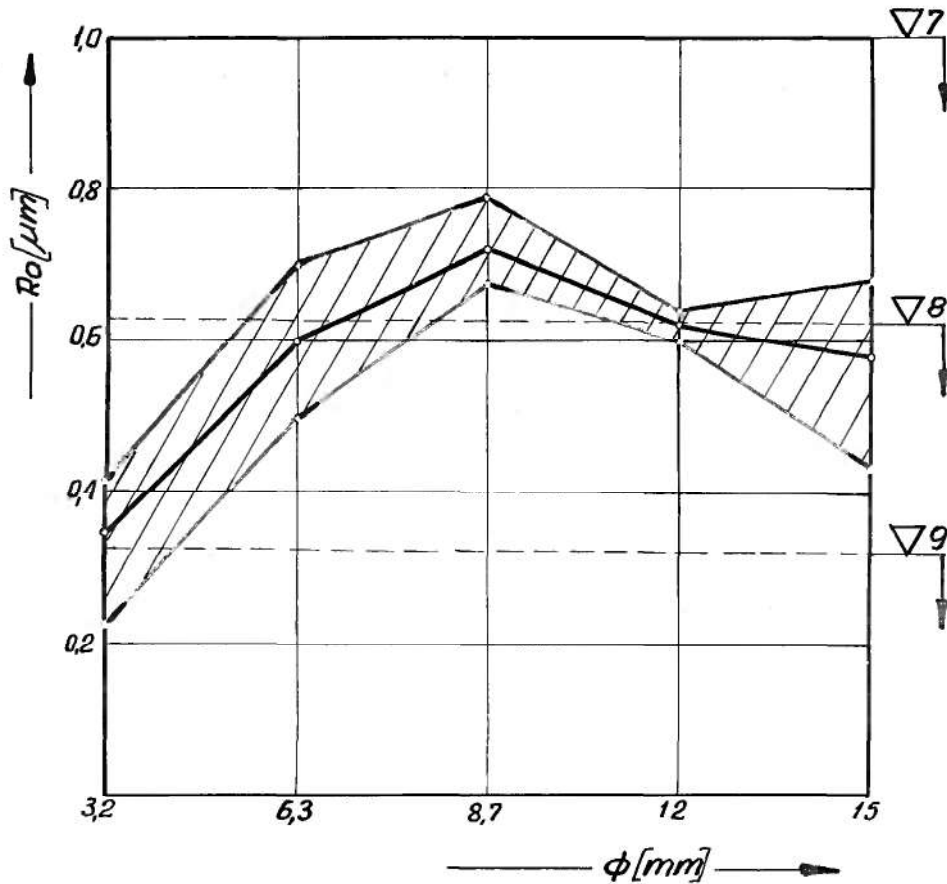
Z tego względu nie zaleca się stosowania obróbki poprzedzającej jako szlifowania, gdyż ślady powstające na powierzchni po frezowaniu, struganiu, skrobaniu - okazują się bardziej korzystne z punktu widzenia ukonstytuowania się nowej chropowatości w trakcie obróbki zgniotem. Na rys. 30 ÷ 33 przedstawiony jest wpływ parametrów technologicznych na chropowatość powierzchni wyrażonej wskaźnikiem  $R_a$ . Zależność  $R_a$  od amplitudy ujmuje rys.30. Największa wartość  $R_a$  wy-



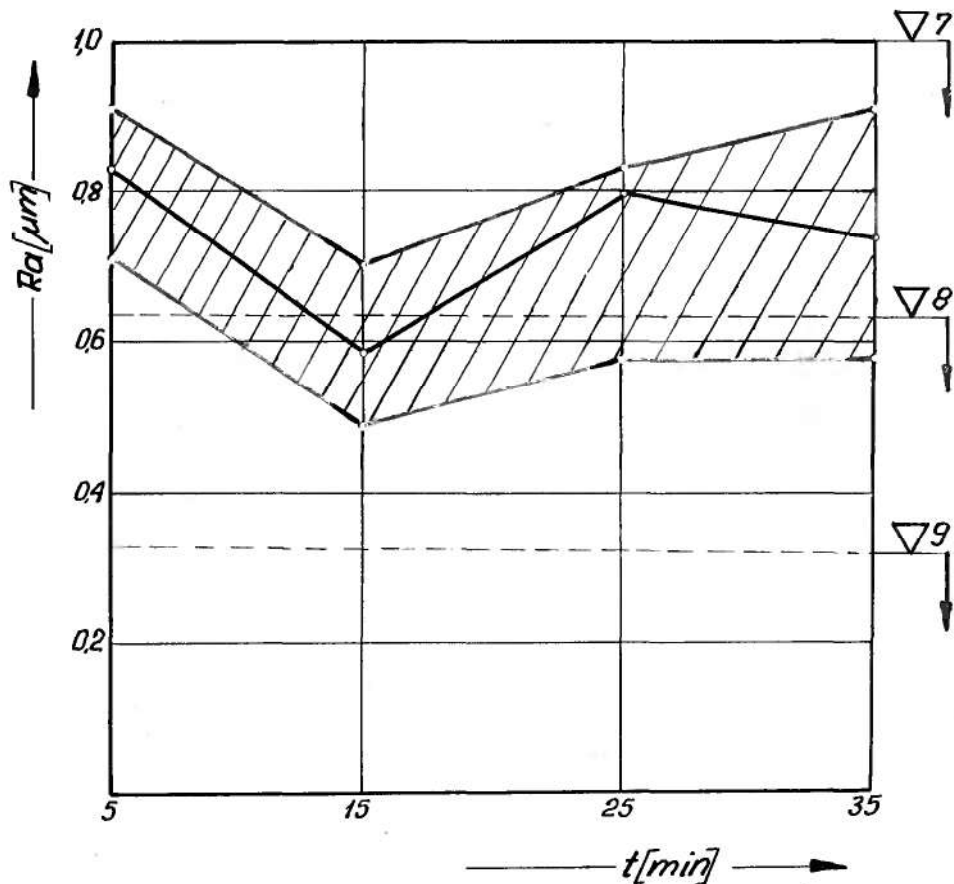
Rys.30 Wpływ amplitudy na chropowatość powierzchni  
Mater. stal 55 (wyż. odpr.) War. obr.:  $\phi_k = 5 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ .



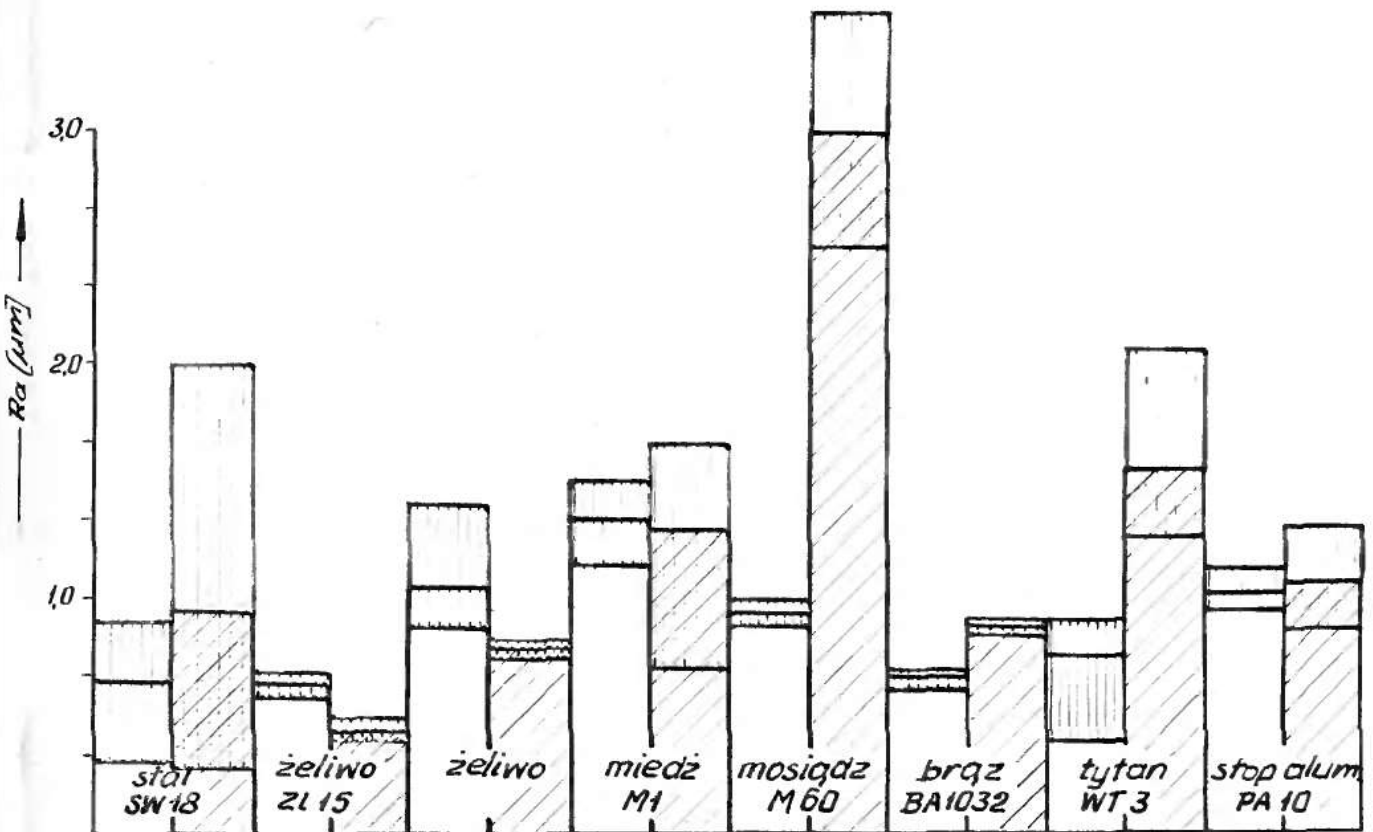
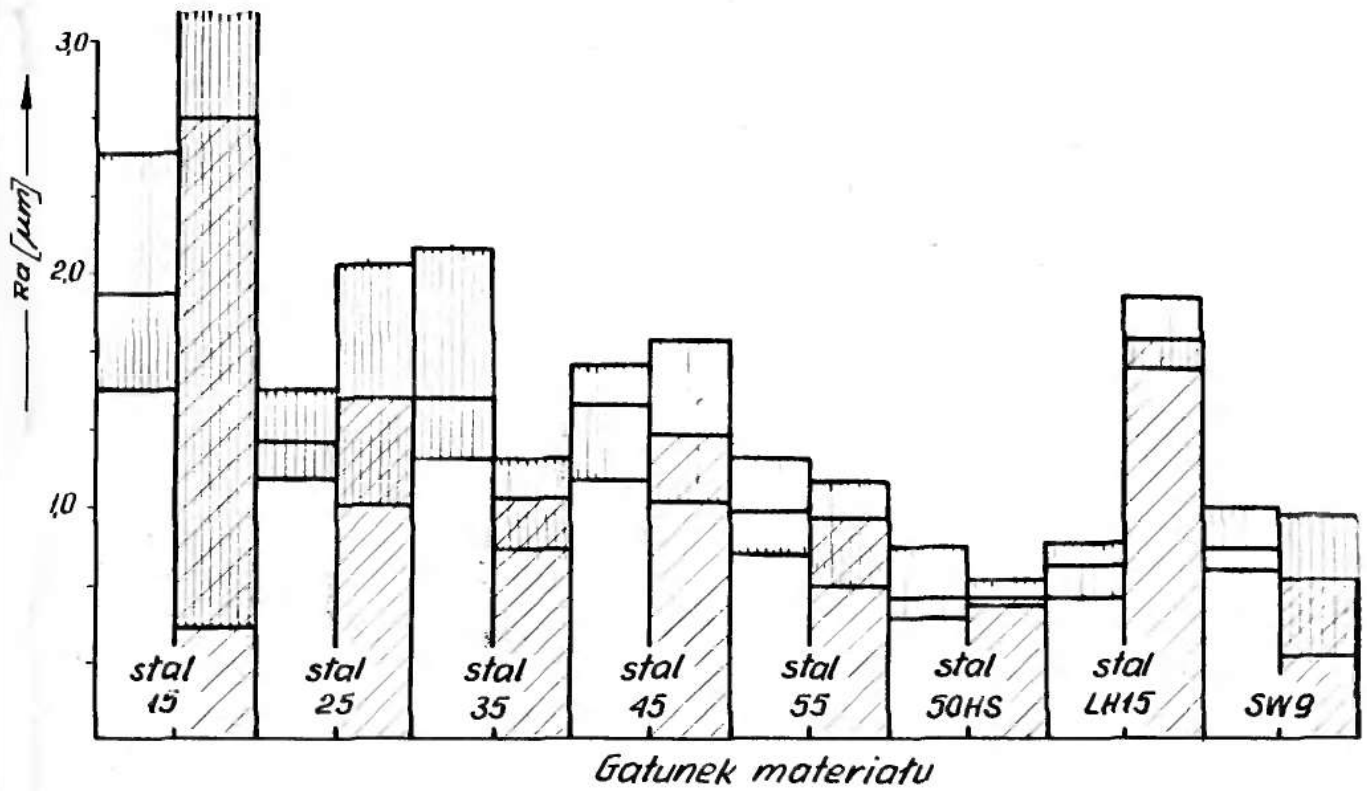
Rys.31 Wpływ częstotliwości na chropowatość powierzchni  
Mater.: stal 55 (wyż. i odpr.) War. obr.:  $\phi_k = 5 \text{ mm}$ ,  $A = 2 \text{ mm}$ ,  $v_{70}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ .



Rys.32 Wpływ średnicy kulki na chropowatość powierzchni. Mater: stal 55 (wyż. i odpr.) War. obróbki:  $A=2\text{ mm}$ ,  $v=70\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $t=20\text{ min}$



Rys.33 Wpływ czasu obróbki na chropowatość powierzchni. Mater: stal 55 (wyż. i odpr.) War. obróbki:  $\phi_k=8.7\text{ mm}$ ,  $v=70\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $A=2\text{ mm}$



Bys.34 Porównanie chropowatości powierzchni różnych materiałów poddanych i nie poddanych zgniotowi. War.obróbki:  $\phi_k = 6.3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ .  $A = 2,15 \text{ mm}$ .

- - materiały poddane zgniotowi
- ▨ - materiał przed obróbką zgniotem
- ▤ - rozrzut wyników

stępuje przy małych (0,6 mm) i dużych (2 mm) amplitudach. W zakresie średnich wielkości (1 ÷ 1,65) obserwuje się najmniejsze wartości  $R_a$ . Duże nierówności przy małych amplitudach można tłumaczyć tym, że nie występuje tu jeszcze ruch chaotyczny kulek, niezbędny do równomiernej obróbki powierzchni, co sprzyja powstawaniu miejscowych zagłębień. Ze wzrostem amplitudy wzrasta ruch chaotyczny kulek a powierzchnia jest obrabiana bardziej równomiernie. W przedziale dużych amplitud (1,65 ÷ 2 mm) występuje nadmierne zderzanie się materiału obrabianego z kulkami, co wpływa na powstawanie miejscowych zagłębień w bardziej miękkich strefach.

Na rys.31 przedstawiony jest wpływ częstotliwości na  $R_a$ . Dla małych częstotliwości (40 ÷ 50,  $\frac{1}{s}$ ) uzyskuje się najmniejszą wartość  $R_a$ . W przedziale 50 ÷ 80 następuje pogorszenie się  $R_a$ , przy czym największy przyrost  $R_a$  obserwuje się w przedziale 70 ÷ 80,  $\frac{1}{s}$ .

Częstotliwość drgań w bardzo istotny sposób wpływa na energię zderzania się wsadu z powierzchnią obrobioną. Dla badanego materiału (stal 55 wyż. i odpr.) dostateczną energię zderzenia (ze względu na chropowatość obrobionej powierzchni) uzyskuje się dla częstotliwości 40 ÷ 50,  $\frac{1}{s}$ . Przy większych częstotliwościach nadmierna energia zderzenia się powierzchni obrabianej z wsadem powoduje miejscowe zagłębienia i pogorszenie  $R_a$ .

Na rys.32 przedstawiony jest wpływ średnicy kulki na  $R_a$ . Najkorzystniejsza wartość  $R_a$  jest dla  $\phi_k = 3,2$  mm. Ze wzrostem średnicy kulki pogarsza się  $R_a$  i dla  $\phi_k = 8,7$  mm przyjmuje największą wartość. Przy dalszym zwiększaniu średnicy kulki obserwuje się zmniejszanie  $R_a$ . Wydaje się, że kształt krzywej zależy tu od energii zderzania się kulek z powierzchnią obrabianą. Przy małych średnicach kulek energia ich zderzania się z powierzchnią obrabianą jest jeszcze zbyt mała na ukształtowanie się nowej chropowatości powierzchni. Wygładzane są tu nierówności z poprzedniej obróbki, a zagłębienia z racji niejednorodności mikrostruktury metalograficz-



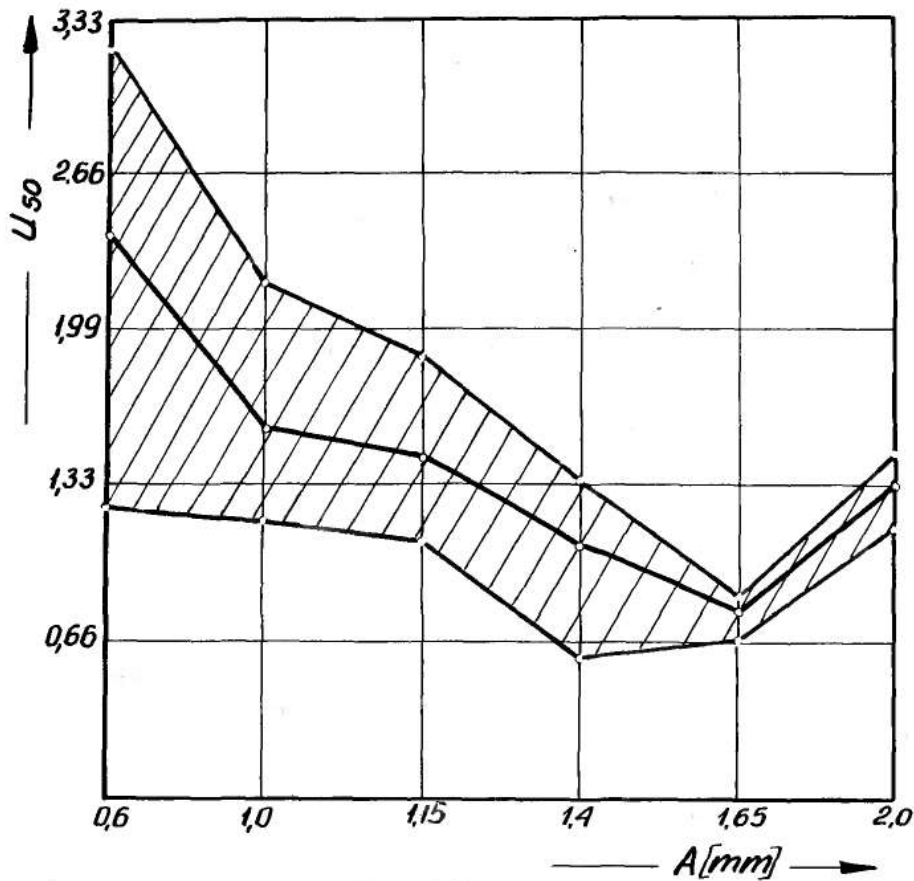
nej jeszcze nie powstają. Ilość zderzeń poszczególnych elementów wsadu z powierzchnią obrabianą jest znacznie większa w porównaniu z wsadem posiadającym duże kulki. Ze wzrostem średnicy kulek energia ich zderzania się z powierzchnią obrabianą wzrasta. Następuje "wyciskanie" materiału ze stref bardziej miękkich. Dla średnicy kulki  $\varnothing_{12} \div \varnothing_{15}$  następuje dalszy wzrost energii zderzania się kulek z powierzchnią, ale na skutek równoczesnego zwiększenia się średnicy kulek, obserwuje się poprawę  $R_a$ .

Na rys.33 przedstawiony jest wpływ czasu obróbki na  $R_a$ . Najmniejsza wartość  $R_a$  występuje dla  $t \approx 10$  minut. Dla małego czasu obróbki (5 min.) nie następuje jeszcze całkowite ukształtowanie się nowych nierówności. Najkorzystniejszą wartość  $R_a$  uzyskuje się dla czasu  $8 \div 12$  min. Dalsze przedłużenie czasu obróbki pogarsza chropowatość powierzchni na skutek pojawiania się miejscowych zagłębień w strefach bardziej miękkich.

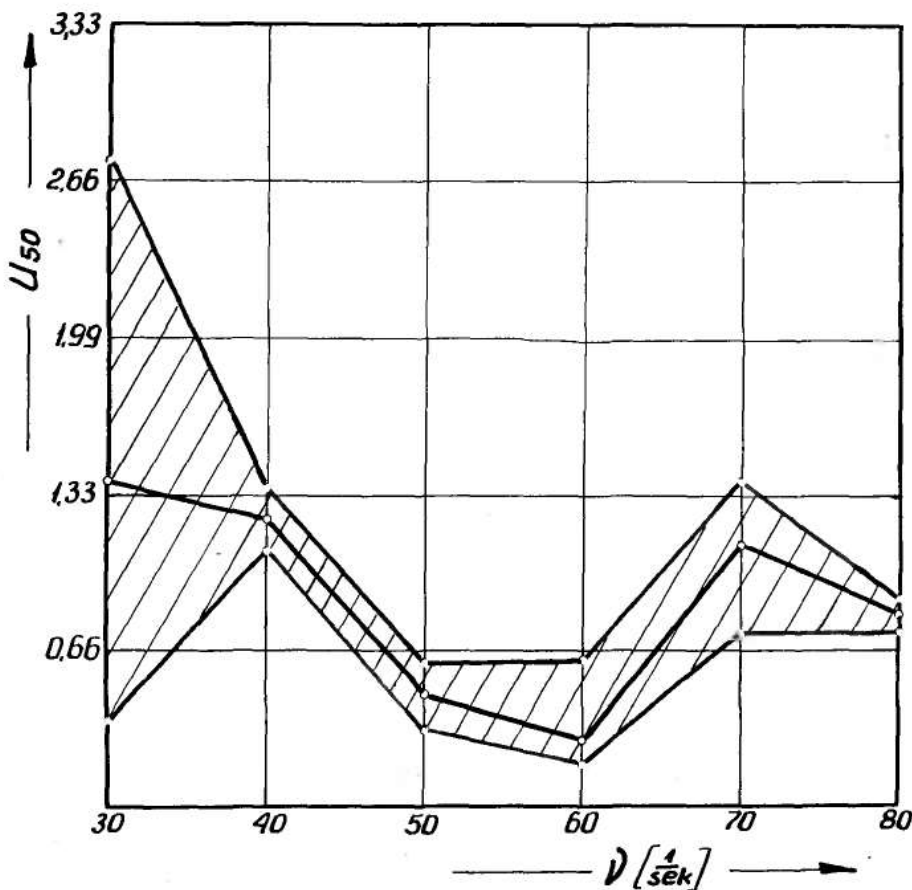
Na rys.34 zestawione jest porównanie chropowatości powierzchni obrobionej i nie obrobionej zgniotem dla materiałów różnych. Próbkę posiadały różną chropowatość obróbki poprzedzającej. Przy próbkach obrobionych wstępnie niezbyt dokładnie (stal 15,25,ŁH15) wystąpiło wyraźne polepszenie  $R_a$ . Przy próbkach bardzo starannie obrabianych wstępnie, nie następowało polepszenie  $R_a$ . Największą poprawę  $R_a$  obserwuje się na próbkach z mosiądzu, brązu i stopu tytanu (obróbka poprzedzająca - frezowanie).

Ogólnie można stwierdzić, że po obróbce zgniotem następuje poprawa chropowatości powierzchni przynajmniej o jedną klasę, przy powierzchniach obrobionych wstępnie w klasie  $5 \div 7$ . Przy powierzchniach obrobionych wstępnie w klasie  $8 \div 9$  nie występuje poprawa chropowatości.

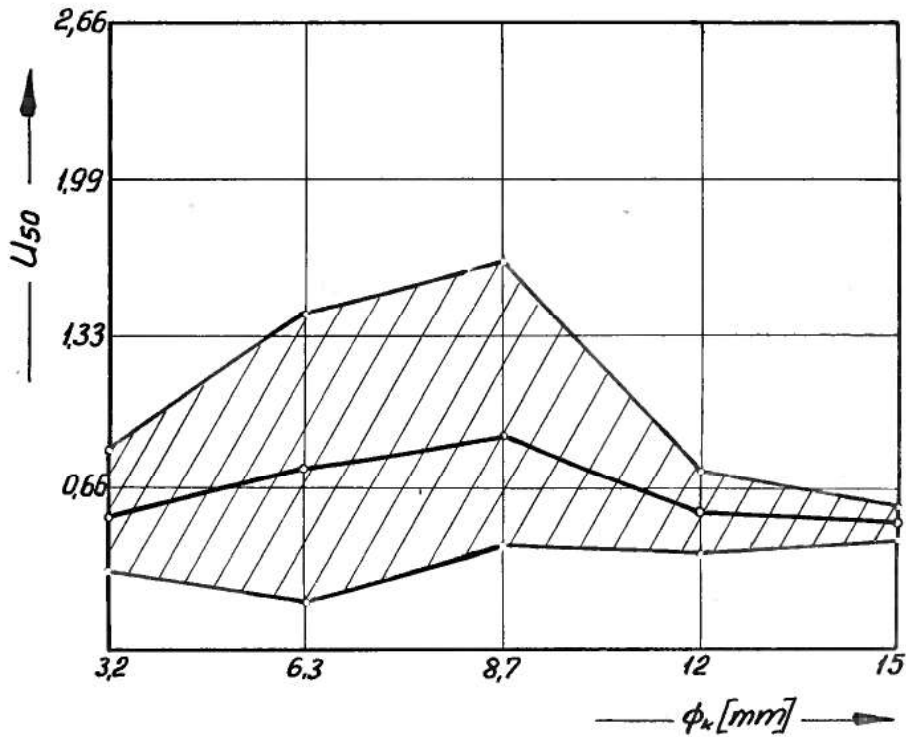
Na rys.35  $\div$  38 przedstawiono zależność gradientu nośności ( $U_{50}$ ) od zmiennych parametrów technologicznych, a na rys.39 zależność  $U_{50}$  od zawartości węgla w stali konstrukcyjnej.



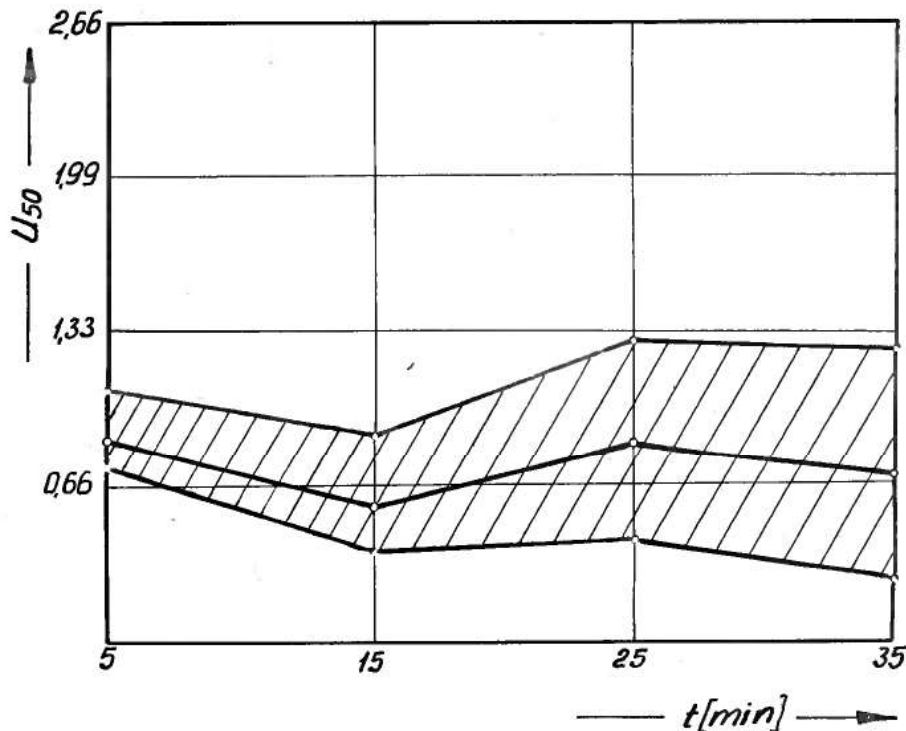
Rys.35 Wykres gradientu nośności w zależności od amplitudy  
Mater.: stal 55(wyż. i odpr.) War. obr.:  $\phi_k = 5\text{mm}$ ,  $\nu = 70 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 20\text{min}$



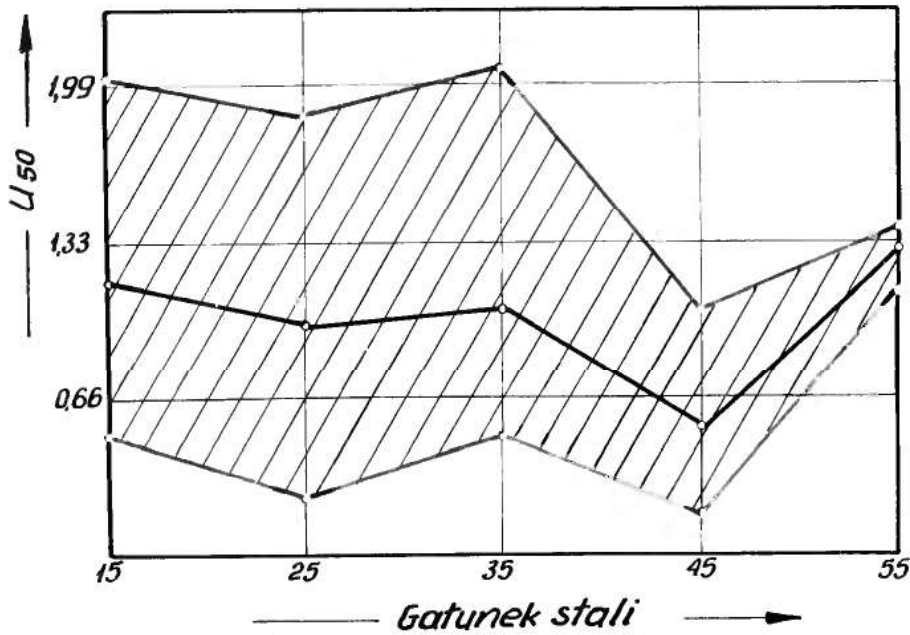
Rys.36 Wykres gradientu nośności w zależności od częstotliwości  
Mater.: stal 55(wyż. i odpr.) War. obr.:  $\phi_k = 5\text{mm}$ ,  $t = 20\text{min}$ ,  $A = 20\text{mm}$   
 $\nu = 70$



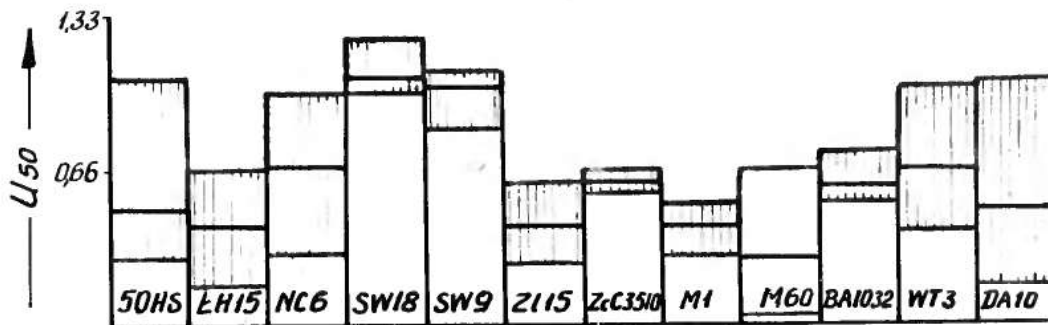
Rys.37 Wykres gradientu nośności w zależności od średnicy kulki  
Mater.: stal 55(wyż. odpr.) War. obr.:  $A=2\text{ mm}$ ,  $v=70\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t=20\text{ min}$ .



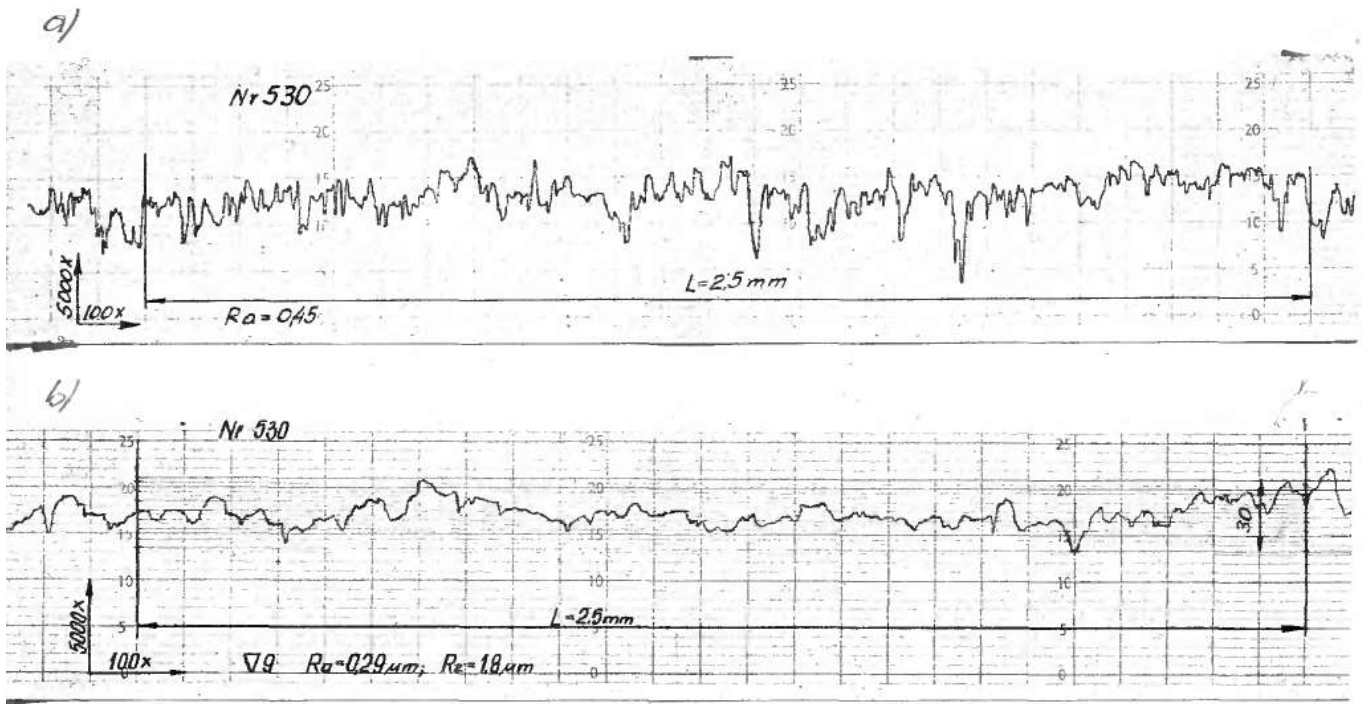
Rys.38 Wykres gradientu nośności w zależności od czasu obróbki  
Mater.: stal 55(wyż. i odpr.) War. obr.:  $\phi_k=8,7\text{ mm}$ ,  $v=70\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2\text{ mm}$



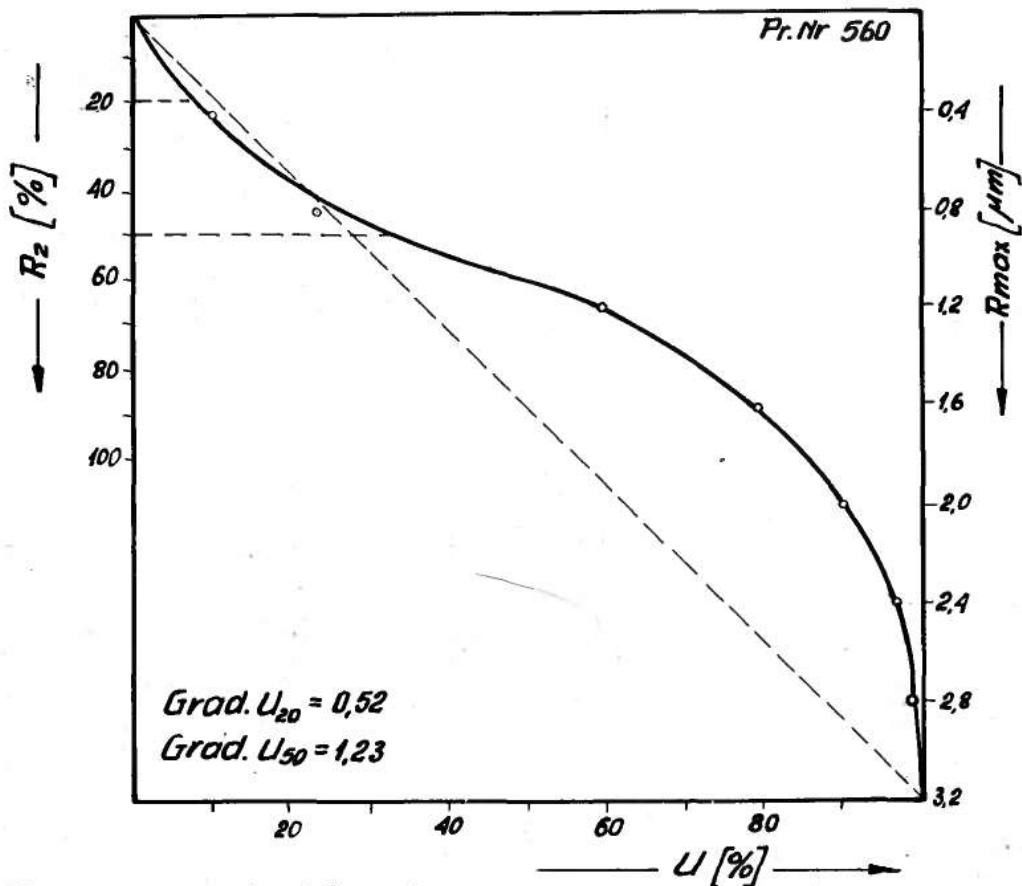
Rys.39 Wykres gradientu nośności dla różnych gat. stali (wyż. i odpr.)  
War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



Rys.40 Porównanie gradientu nośności dla różnych materiałów  
Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



Rys. 41



Rys. 42 Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $A_1 = 0,6 \text{ mm}$   
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 20 \text{ min}$

Na rys.35 przedstawiono zależność  $U_{50} = f(A)$ . Jak widać z wykresu, ze wzrostem amplitudy następuje spadek gradientu nośności. Najmniejsza wartość  $U_{50}$  jest dla 1,65 mm, a następnie wzrasta. Na podstawie obserwacji profilogramów stwierdza się, że wzrostowi wielkości amplitud towarzyszy wzrost długości fali nierówności powierzchni.

Linie przenikania się kulistych wgłębień ("kraterów") mają coraz mniejszy udział nośny powierzchni. Dla amplitudy 2 mm może występować bardziej równomierne "rozgniatanie" nierówności, co z kolei wpływa na poprawę  $U_{50}$ . Zmiana częstotliwości drgań ma podobny wpływ na  $U_{50}$  jak zmiana amplitudy. Zmiana średnicy kulki i czasu obróbki nie ma istotnego wpływu na wielkość  $U_{50}$ . Podobnie zmiana gatunku stali (rys.39) nie ma wyraźnego wpływu na  $U_{50}$ . Występuje wprawdzie spadek  $U_{50}$  dla stali 45, ale może to być przyczyną niejednorodności struktury i odwęglenia powierzchni, co sprzyjało powstawaniu ostrych wypływek w strefach bardziej miękkich.

Przy porównaniu gradientów nośności dla materiałów różnych można stwierdzić, że przyjmują one większe wartości dla materiałów twardych. Stosowane tu były w czasie obróbki jednakowe parametry technologiczne, które dla materiałów miękkich były nadbyt intensywne i powodowały nadmierne "płynięcie" materiału w strefach o bardziej miękkiej strukturze (powstawały "kratery").

Na rys.42 (oraz na rys.95<sub>Z</sub> ÷ 130<sub>Z</sub> w załączniku do pracy) przedstawione są krzywe nośności powierzchni obrobionej zgniotem. Na ogół dla wszystkich zmiennych parametrów technologicznych i dla wszystkich materiałów krzywe mają charakter degresywno-progresywny. Wydaje się, że taki kształt krzywych jest wynikiem tego, że podczas obróbki powierzchniowej zgniotem zachodzi zderzanie się powierzchni płaskiej ze sferyczną, w wyniku czego na powierzchni obrabianej powstają miejscowe zagłębienia ("kratery"). Pomimo, że krawędzie tych "kraterów" są zaokrąglone, to początkowo udział noś-

ny powierzchni jest stosunkowo mały, a następnie szybko wzrasta i krzywa o charakterze degresywnym staje się progresywną.

### Struktura metalograficzna.

Badanie struktury metalograficznej miało głównie na celu ujawnienie ewentualnych zmian, zachodzących w warstwie wierzchniej pod wpływem obróbki powierzchniowej zgniotem. Obserwacje prowadzono na mikroskopie optycznym przy powiększeniu 400 x. Zgłady wykonane były prostopadle do powierzchni obrabianej. Szlify wykonane na próbkach z miedzi i żeliwa miały tak duże ziarna, że wystarczyło powiększenie 250 razy.

W badanych materiałach nie stwierdzono przemian fazowych pod wpływem obróbki zgniotem. Zmiana parametrów technologicznych nie spowodowała też istotnych zmian struktury metalograficznej. Wystąpiło jedynie w niektórych przypadkach większe rozdrobnienie ziarn pod wpływem bardziej intensywnej obróbki technologicznej. W niektórych przypadkach wystąpiła częściowa anizotropowość struktury. Jeden z ciekawszych zgładów z zakresu badania wpływu parametrów technologicznych przedstawiono na rys.43.

Obróbkę powierzchniową zgniotem za pomocą luźnych kulek metodą wibracyjną można uznać za bezkierunkową (punktową), w związku z czym struktura metalograficzna nie powinna wykazywać anizotropowości. Na niektórych zgładach można było jednak zauważyć wyraźne ukierunkowanie struktury. Mogło to być przyczyną tego, że badane próbki (stal 55) wykazywały przed obróbką wibracyjną strukturę pasmową. Nadmierne miejscowe obciążenia, wywołane nadmiernymi parametrami obróbki wpływały na "wyciskanie" wgłębień w strefach bardziej miękkich.

Włóknistą strukturę zaobserwowano głównie na narożach próbek (rys.41<sub>2</sub>, w załączn.), które w czasie obróbki nie przylegały do siebie, w związku z czym występowało ich zaokrąglenie. Niektóre



*Trawiono nitałem  
Powiększenie 500x  
Próbka nr 420*

*Rys.43 Mikrostruktura warstwy wierzchniej z odciskami  
mikrotwardości dla  $\nu=50$ . Materiał: stal 55 (wyz. i odpr.)  
po obróbce zgniotem. War. obróbki:  $\phi_k=8,7\text{mm}$ ,  $A=215\text{mm}$ ,  $t=20\text{min}$*



próbki wykonane ze stali konstrukcyjnej (rys.42<sub>z</sub> i 44<sub>z</sub> w załącz.) podczas obróbki cieplnej uległy odwęgleniu.

W praktyce przemysłowej często spotykamy się z takim zjawiskiem. Strefy odwęglone są bardzo niekorzystne z punktu widzenia wytrzymałości zmęczeniowej, ale miejsca takie podczas obróbki powierzchniowej metodą wibracyjną wykazują większą podatność na zgniot, a ziarna są bardziej rozdrobnione. Pod wpływem obróbki zgniotem następuje "ujednorodnienie" warstwy wierzchniej.

Na rys.42<sub>z</sub> (w załącz.) widoczne jest oderwanie się cienkiej zewnętrznej warstewki od powierzchni obrabianej. Przyczyną tego mogły być nierówności z obróbki poprzedzającej, które nie zostały wgniecione w materiał, lecz pozawijane, rozwalcowane i oderwane od powierzchni obrabianej. Nie należy się tu raczej dopatrywać nadmiernego zgniotu powierzchniowego, gdyż identyczne warunki obróbki, stosowane do materiałów innych nie spowodowały wystąpienia podobnego zjawiska.

Na próbkach wykonanych ze stali NC6, SW9, SW10 i 1H15 (rys.45<sub>z</sub> do 48<sub>z</sub> w zał.) nie wystąpiły żadne zauważalne zmiany struktury metalograficznej. Próbki te posiadały bardzo drobnoziarnistą i jednorodną strukturę, w związku z czym nie było w nich uprzywilejowanych miejsc i kierunków do "płynięcia" materiału.

W próbce ze stali 50HS (rys.49<sub>z</sub> w załącz.) wystąpiło nieznaczne rozdrobnienie struktury. Na próbkach z żeliwa szarego, ciągliwego i stopy aluminium (rys.50<sub>z</sub> - 52<sub>z</sub> w załącz.) nie zaobserwowano zmian mikrostruktury po obróbce zgniotem. Na zglądzie wykonanym z próbki miedzianej (rys.53<sub>z</sub> w zał.) widoczne są bardzo duże, ale nie zdeformowane krystality. Jedynie na granicy ziarn widoczne są skłonności do zaklinowywania się poszczególnych ziarn. Na próbkach z brązu (rys.54<sub>z</sub> w załącz.) i mosiądzu (rys.55<sub>z</sub> w załącz.) wystąpiło "płynięcie" w warstwie zewnętrznej. Widoczne są zdeformowane krystality, a w cienkiej zewnętrznej warstewce widoczna jest nie-

ciągłość struktury. Niektóre ziarna są jak gdyby wyciśnięte z podłoża.

Próbka wykonana ze stopu tytanu cechuje się drobnoziarnistą strukturą. Wpływ zgniotu ujawnia się tutaj częściowym ukierunkowaniem struktury. W warstwach głębiej położonych ziarna są wydłużone w kierunku prostopadłym do powierzchni, a w warstwie powierzchniowej przyjmują kierunek równoległy do powierzchni.

Dokonane spostrzeżenia pozwalają wysunąć wniosek, że podczas obróbki powierzchniowej zgniotem nie zachodzą przemiany fazowe. Występuje natomiast nieznaczne rozdrobnienie struktury. W materiałach o niejednorodnej mezotwardości może wystąpić zjawisko ukierunkowania struktury. Występuje to też w narożach próbek, które w czasie obróbki uległy zaokrągleniu.

#### Mikrotwardość.

Badania mikrotwardości miały głównie na celu ustalenie wpływu parametrów technologicznych obróbki powierzchniowej zgniotem na utwardzenie warstwy wierzchniej. Badano też zmiany mikrotwardości materiałów różnych przy ustalonych parametrach technologicznych.

Zmiana mikrotwardości zachodząca podczas odkształceń plastycznych na zimno wiąże się z tzw. samoumacnianiem się materiałów. Własności te posiadają tylko metale, które pod wpływem obróbki plastycznej na zimno zmieniają swoje własności mechaniczne.

Samoumacnianie się materiałów podczas odkształceń plastycznych wpływa na zwiększenie ich wytrzymałości powierzchniowej i objętościowej. Cechy tej np. nie posiadają tworzywa sztuczne, w których zwężenie przekroju wpływa na wzrost naprężeń, co przy braku zdolności do samoumacniania się prowadzi do dalszego intensywnego ich "płynięcia".

Wzrost mikrotwardości w obróbce powierzchniowej zgniotem zależy w dużej mierze od rodzaju materiału obrabianego, stosowanej

metody obróbki i przyjętych parametrów technologicznych. Materiały plastyczne wykazują większą podatność na utwardzenie. Przy rozpatrywaniu metod obróbki należy odnotować stosunkowo duży stopień utwardzania w metodzie naporowej przy zastosowaniu dużych obciążeń jednostkowych.

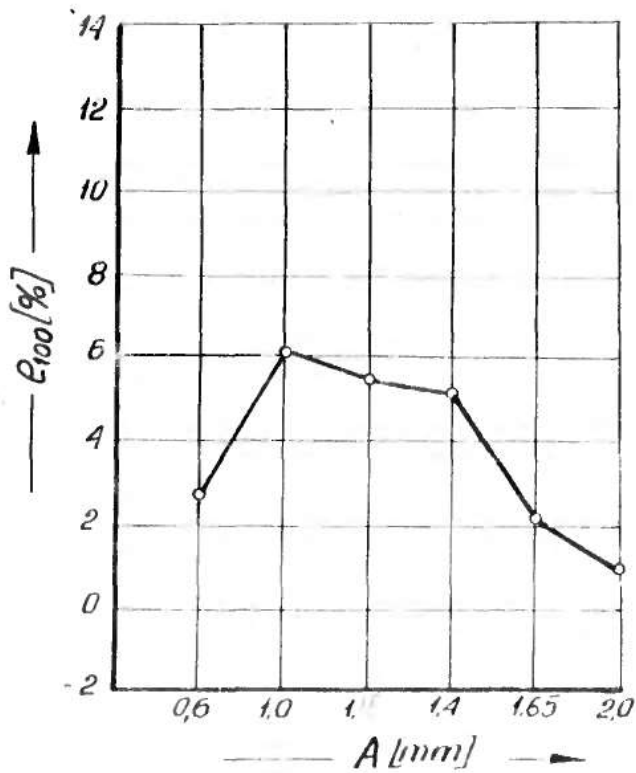
Doświadczenia nad ustaleniem wpływu obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną, prowadzone były na próbkach w stanie zmiękczonej. Wyniki doświadczeń dla poszczególnych parametrów technologicznych (stal 55) i materiałów różnych, ujęte są na rys. 57<sub>Z</sub> ÷ 94<sub>Z</sub> w załączniku do pracy.

Jak już wspomniano, niektóre próbki posiadały warstwę wierzchnią częściowo odwęgloną, a niektóre (stal 55) miały strukturę pasmową. Utrudniało to właściwą ocenę stopnia ich utwardzenia.

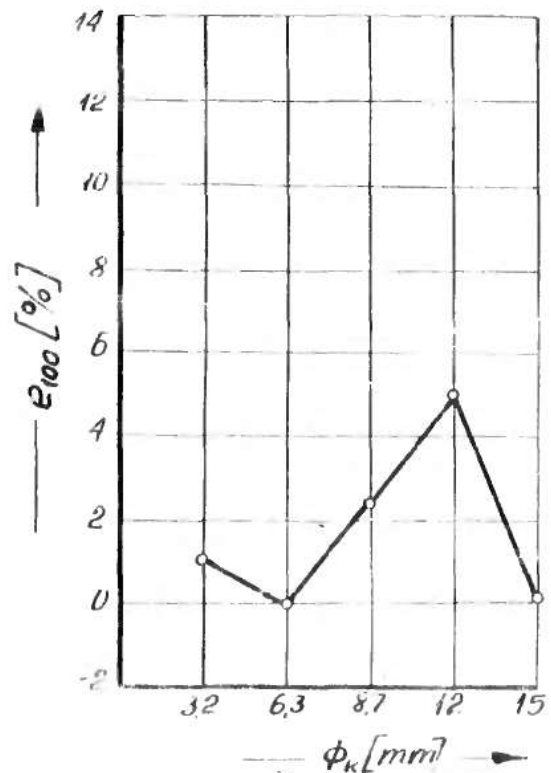
Najbardziej miarodajne wyniki uzyskano podczas doświadczeń nad próbkami, posiadającymi jednakową strukturę w warstwie wierzchniej i rdzeniu materiału (miedź, mosiądz, stop aluminium, stal SW18 i tp.). We wszystkich jednak przypadkach przyrost mikrotwardości pod wpływem obróbki powierzchniowej zgniotem był stosunkowo mały. Może się to wiązać z występowaniem pewnych specyficznych właściwości obróbki powierzchniowej zgniotem, a między innymi tym, że kontakt przedmiotu obrabianego z narzędziem jest okresowy. Czas wzajemnego oddziaływania (występowania sił) jest bardzo krótki. Odkształcenia plastyczne zachodzą pod wpływem sił impulsowych za pomocą narzędzia (kulki), posiadającego stosunkowo dużą krzywiznę. Kolejne zetknięcia przedmiotu obrabianego i narzędzia są przypadkowe, nie określone łańcuchem kinematycznym obrabiarki (odkształcenia plastyczne nie są ukierunkowane), jak to ma miejsce przy krążkowaniu, kulkowaniu naporowym, wałkowaniu i tp.

Wielkość wyłężenia materiału i warunki, w jakich ono zachodzi może mieć wpływ na stopień utwardzenia się warstwy wierzchniej.

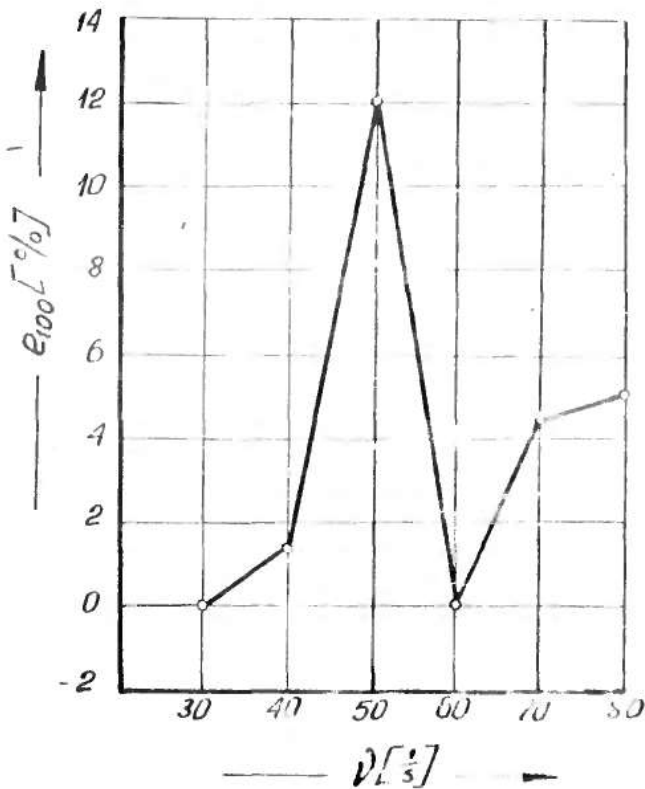
Celem łatwiejszego porównania wyników, uzyskanych podczas do-



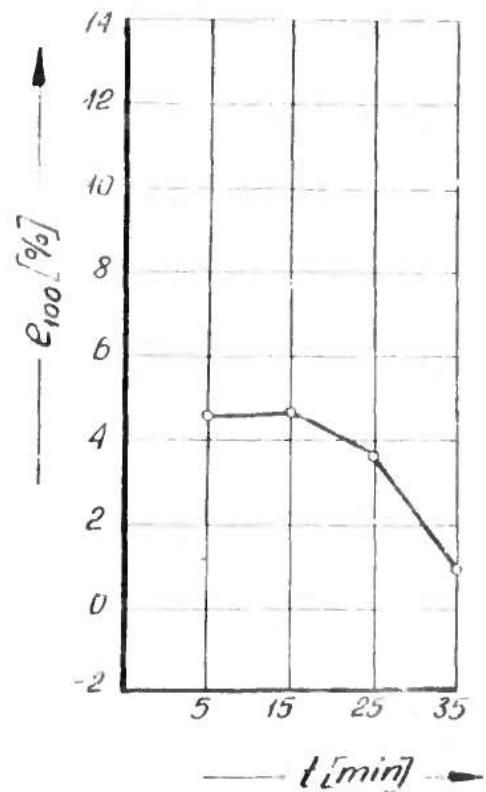
War. obr.:  $\phi_k = 5 \text{ mm}$ ,  $\nu = 70 \frac{1}{s}$ ,  $t = 20 \text{ min}$



War. obr.:  $\nu = 70 \frac{1}{s}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ ,  $A = 2 \text{ mm}$

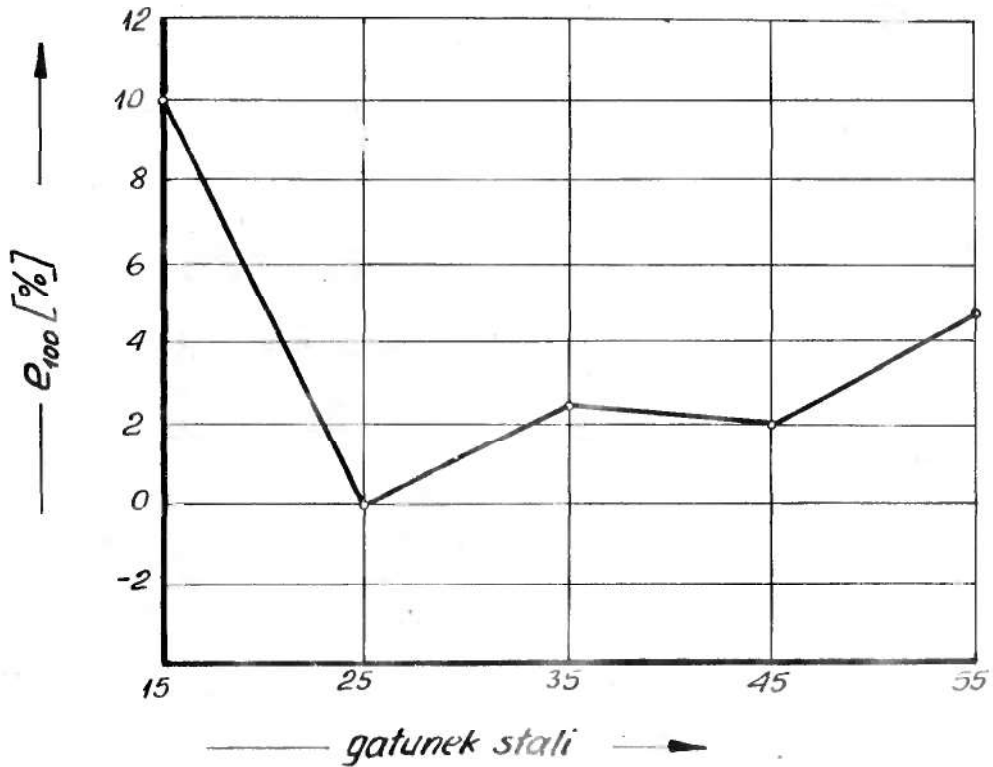


War. obr.:  $\phi_k = 8.7 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$

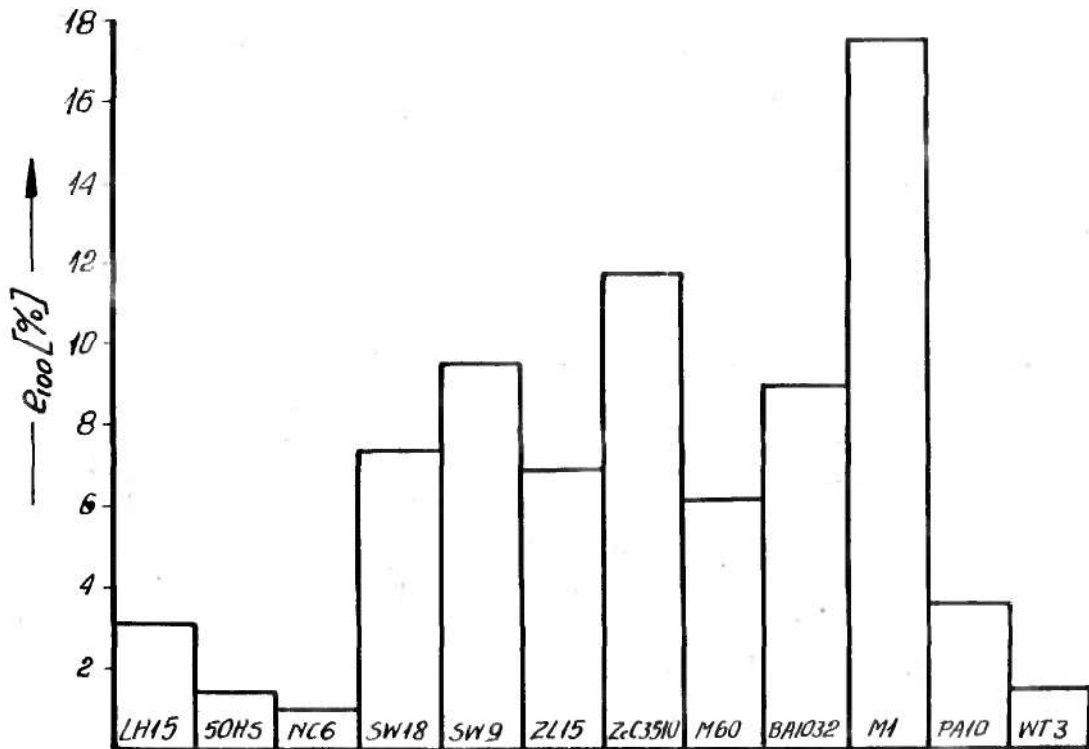


War. obr.:  $\phi_k = 8.7 \text{ mm}$ ,  $\nu = 70 \frac{1}{s}$ ,  $A = 2 \text{ mm}$

Rys. 44 Wpływ parametrów technologicznych ( $A$  - amplitudy,  $\phi_k$  - średnicy kulki,  $\nu$  - częstotliwości,  $t$  - czasu obróbki) na intensywność zgniotu.  
Materiał: stal 55 (wyżarzona i odprężana)  
( $E_{100}$  - oznacza intensywność zgniotu w odległości  $100 \mu\text{m}$  od pow. obrab.)



Rys.45 Wykres intensywności zgniotu dla różnych gatunków stali (wyż. i o. br.)  
Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



Rys.46 Porównanie intensywności zgniotu dla różnych materiałów.  
Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$   
( $E_{100}$  - oznacza intensywność zgniotu w odległości  $100 \mu\text{m}$  od pow. obrab)

świadczeń, sporządzono wykresy intensywności zgniotu (rys.44,45, 46) wykonane w oparciu o zależność podaną w pracy [21]

$$e = \frac{H_D - H_{Do}}{H_{Do}}$$

gdzie:

$H_D$  - mezotwardość w danym punkcie

$H_{Do}$  - mezotwardość nieodkształconego materiału

Dla wszystkich przypadków rozpatrywano mezotwardość w odległości 100  $\mu\text{m}$  w odniesieniu do materiału nieutwardzonego (oznaczenie  $e_{100}$ ). Największą intensywność zgniotu stwierdzono w próbkach wykonanych z miedzi ( $\sim 18\%$ ). Stosunkowo dużą intensywnością zgniotu cechują się też stale SW18, SW9, żeliwo, brąz i mosiądz (8 ÷ 10 %). W pozostałych materiałach jest ona rzędu kilku procent.

Na rys.44 przedstawiony jest wpływ parametrów technologicznych na zgniot. Przy zmianie wielkości amplitud, najkorzystniejszy przyrost mikrotwardości występuje dla średnich ich wartości. Stosunkowo małą intensywność zgniotu uzyskuje się przy zaniżonych amplitudach. Może to wynikać z małej energii zderzania się wsadu kulek z powierzchnią obrabianą. Górne wartości amplitud mogły wpływać na rozluźnienie struktury warstwy wierzchniej. Podobne oddziaływanie (w sensie energii zderzenia) na intensywność zgniotu zachodzi przy zmianie średnicy kulki. Przy małych i dużych średnicach kulek zgniot jest mniej intensywny (zaniżone wartości dla  $\phi = 6,3$  są raczej przyczyną rozrzutu wyników z przyczyn materiałowych, obróbki cieplnej, pomiarów i tp.)

Przy badaniu wpływu częstotliwości zaobserwowano wzrost intensywności zgniotu ze wzrostem częstotliwości (dużą wartość dla  $\nu = 50$  i małą dla  $\nu = 60$ , też należy raczej tłumaczyć rozrzutem wyników). Przy określaniu wpływu czasu obróbki okazało się, że najkorzystniejszy zgniot zachodzi dla czasu 5 ÷ 15 minut. Dalsze zwiększanie czasu obróbki powoduje zmniejszenie intensywności zgniotu. Może to być

przyczyną rozluźnienia się struktury (na rozpatrywanej głębokości 100  $\mu\text{m}$ ). Ogólnie można stwierdzić, że obróbka powierzchniowa zgniotem powoduje nieznaczny (kilku do kilkunastu procent) wzrost mikro-twardości warstwy wierzchniej w odniesieniu do rdzenia materiału. Zwiększenie energii zderzenia (bardziej intensywne parametry technologiczne obróbki) wpływa nieznacznie na zwiększenie się głębokości zalegania warstwy utwardzonej przy jednoczesnym spadku mikro-twardości w strefie zewnętrznej.

### Naprężenia własne.

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń z zakresu ustalania wpływu poszczególnych parametrów technologicznych ( $A, V, \phi, t$ ) na wielkość i rozkład naprężeń przedstawione są na wykresach rys. 1<sub>Z</sub> ÷ 21<sub>Z</sub> (w załączn), zaś na rys. 22<sub>Z</sub> ÷ 34<sub>Z</sub> (w załączniku) zestawione są wyniki dla materiałów różnych.

We wszystkich przypadkach rozkład ten jest typowy dla modelu zimnego [22], [31]. Jak już wspomniano w części [32] badania przeprowadzono na próbkach wyżarzonych rekrytalizacyjnie, celem wyeliminowania ewentualnych naprężeń, pochodzących z poprzedzającej obróbki. Dla upewnienia się, czy naprężenia zostały usunięte całkowicie, trawiono kilka losowo wybranych próbek. Wyniki wypadły pozytywnie, to znaczy, nie stwierdzono zjawiska odkształcania się próbek w czasie trawienia.

Do badania wpływu obróbki na rozkład naprężeń, stosowano jednostronne utwardzanie próbek, w wyniku czego wyginały się one w tę stronę, z której naniesiono zgniot. Jest to zgodne z modelem zimnym [22]. Autor pracy [31] tłumaczy to tym, że odkształceniom plastycznym towarzyszy zmniejszenie gęstości i zmniejszenie ciężaru właściwego, a w następstwie - zwiększenie objętości właściwej obrabianego materiału. Ten wzrost objętości występuje na stosunkowo małej głębokości, a przeciwdziałają się temu siły międzycząsteczkowe rdzenia ma-

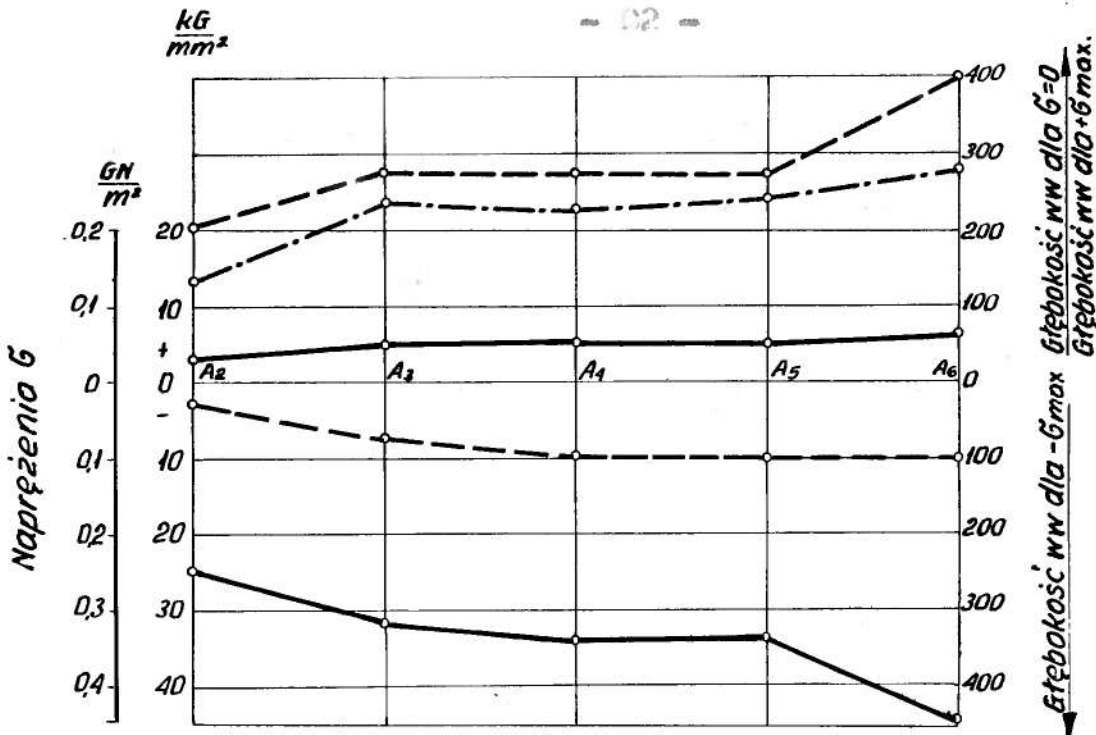
teriału, w wyniku czego w warstwie zewnętrznej pojawiają się naprężenia ściskające, a głębiej rozciągające. Pod wpływem takiego stanu próbka płaska wygina się w kierunku powierzchni obrabianej, co z kolei powoduje pojawienie się naprężeń ściskających po jej wklęsłej stronie.

Warstwa, w której zachodzą odkształcenia plastyczne podczas obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną, jest stosunkowo cienka w porównaniu z grubością próbki. Ma to wpływ na rozkład naprężeń własnych. Naprężenia rozciągające (od sił spójności), przeciwdziałające przyrostowi wydłużenia warstwy odkształconej plastycznie, rozkładają się na dużej głębokości próbki, w związku z czym ich wartość bezwzględna jest znacznie mniejsza od wartości naprężeń ściskających, które zalegają na małej głębokości.

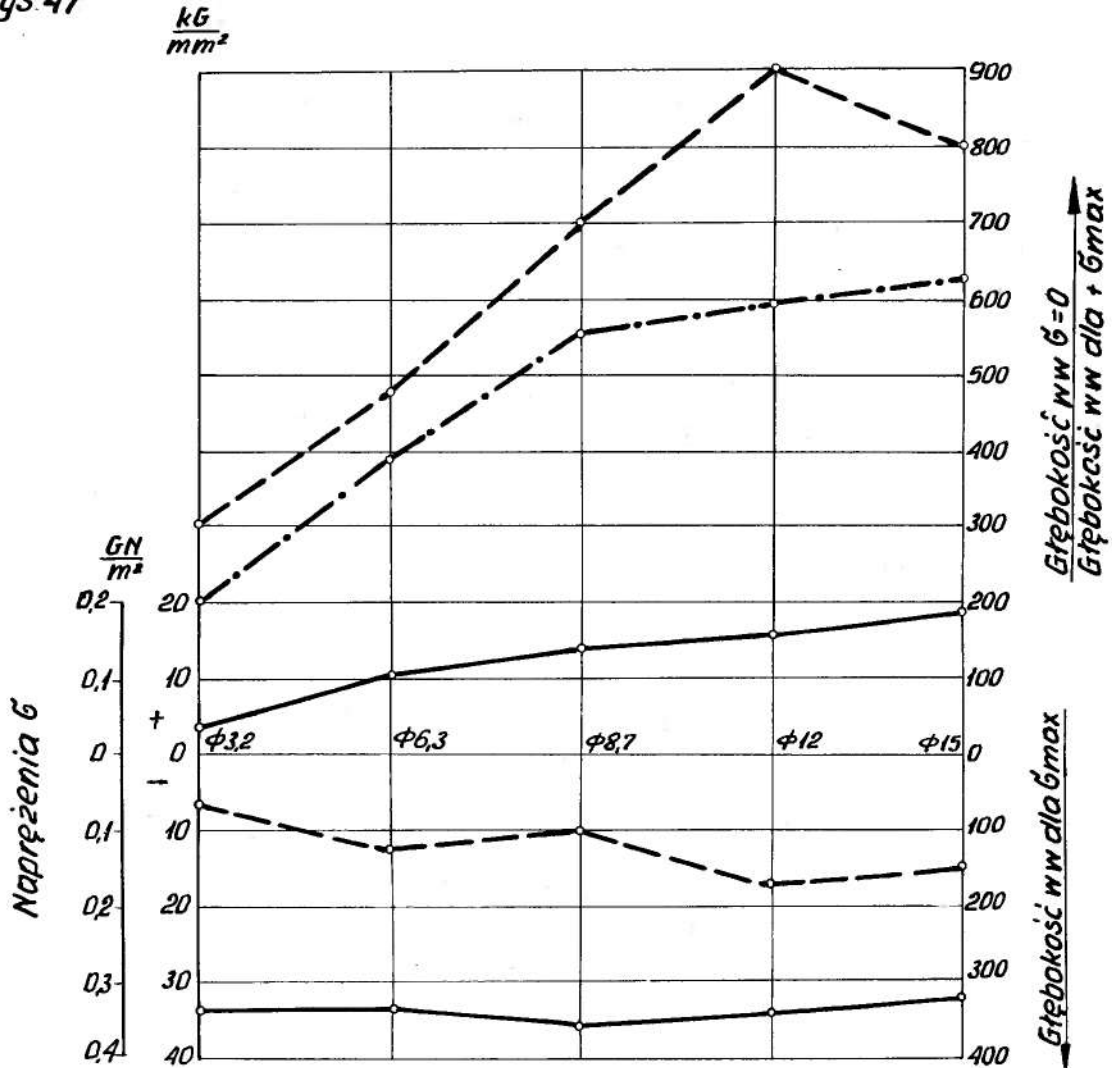
Na rozkład naprężeń bardzo duży wpływ mają parametry technologiczne obróbki. Na rys. 1<sub>Z</sub> ÷ 6<sub>Z</sub> (w załączniku do pracy) przedstawiony jest rozkład naprężeń w stali 55 (wyż. i odpr.) dla zmiennych amplitud. Wyniki są średnimi pomiarów z trzech próbek. Pola zakreskowane oznaczają rozrzut wyników. Na wykresach nie są oznaczone wszystkie punkty pomiarowe ze względu na przejrzystość rysunków. Kształt krzywych rozkładu naprężeń jest podobny dla wszystkich zmiennych wielkości amplitud (jak też innych parametrów technologicznych, a także materiałów różnych). Na ogół wszędzie obserwuje się (rys. 1<sub>Z</sub> ÷ 32<sub>Z</sub> w załączniku), że maksymalne ujemne naprężenia występują dopiero na pewnej głębokości, a w strefie przypowierzchniowej przyjmują mniejsze wartości.

Zwiększenie intensywności parametrów technologicznych powoduje narastanie tych różnic przy jednoczesnym zwiększaniu się głębokości zalegania maksymalnych naprężeń. Podobne zjawisko obserwuje się przy porównaniu wyników otrzymanych przy badaniu materiałów różnych z tym, że w materiałach mniej plastycznych uzyskuje się w wyniku obróbki powierzchniowej zgniotem dużo większe naprężenia niż w ma-

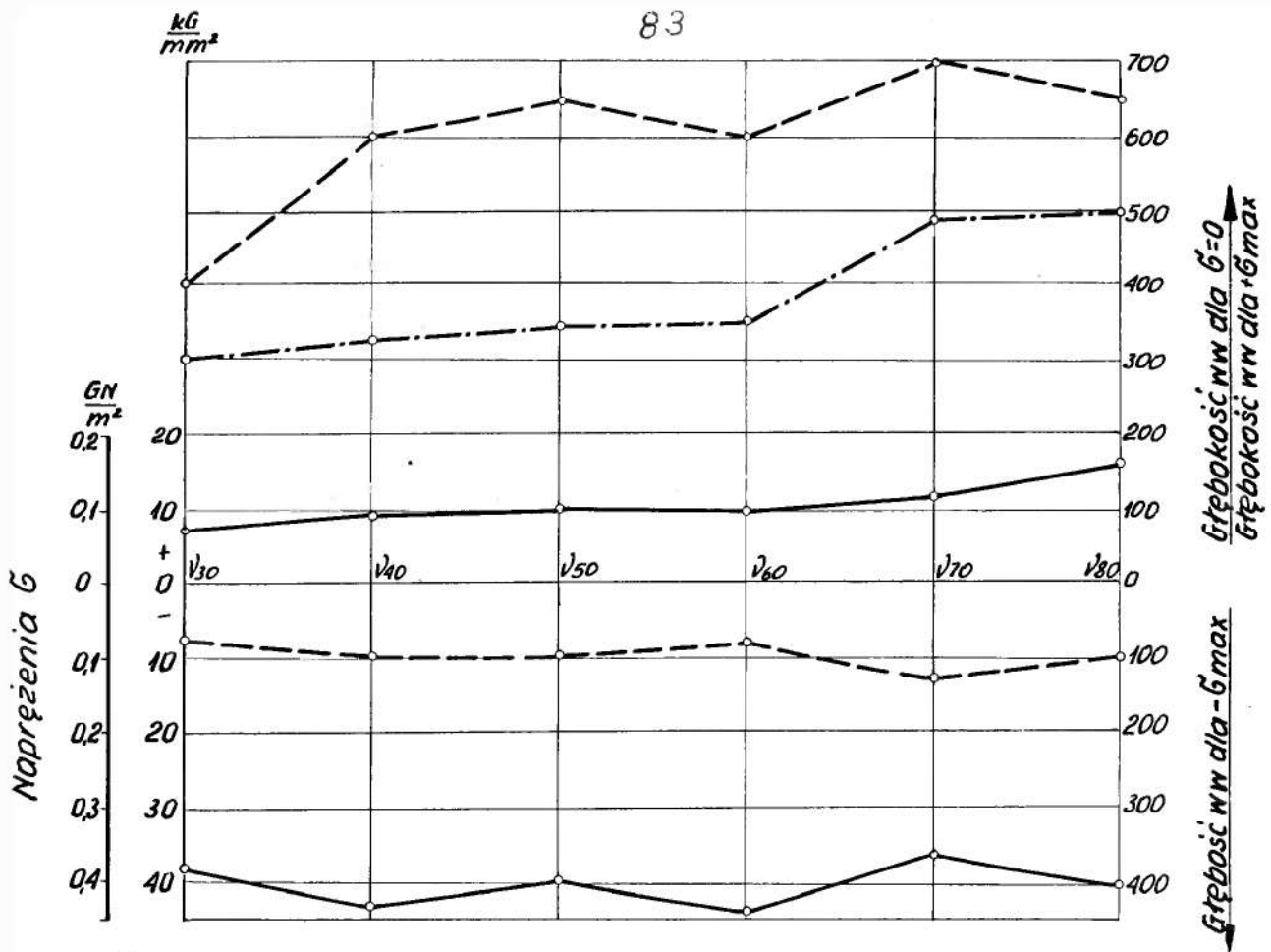




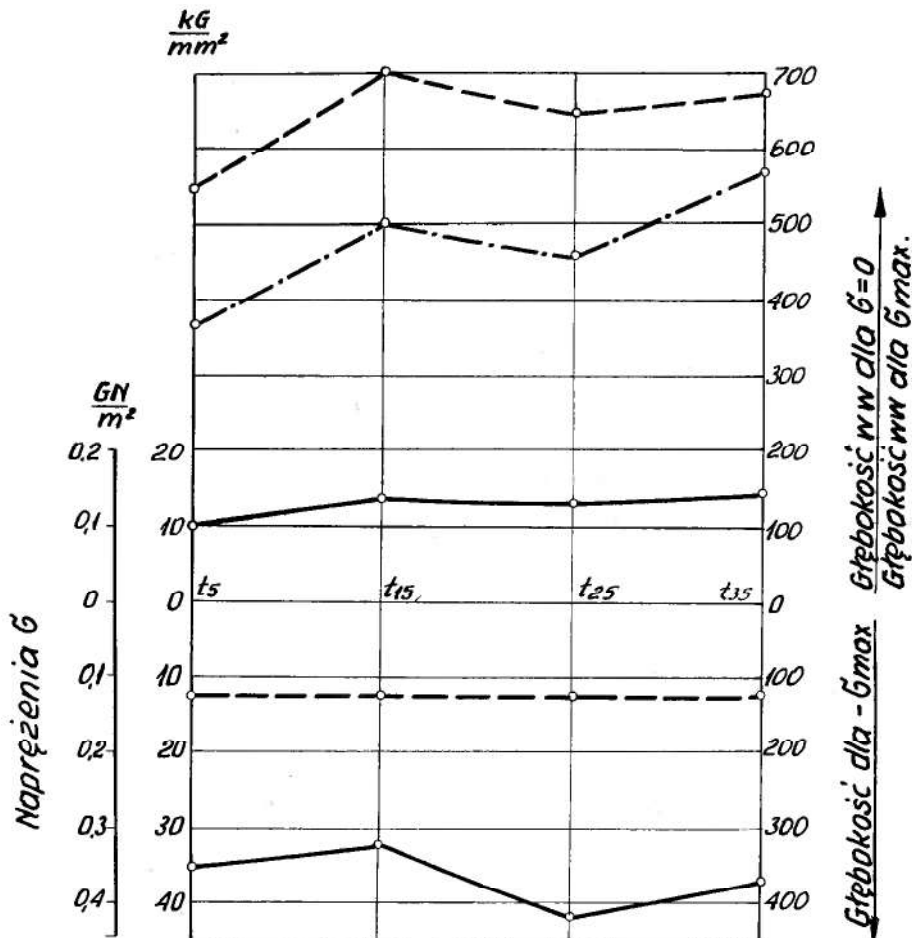
Rys. 47



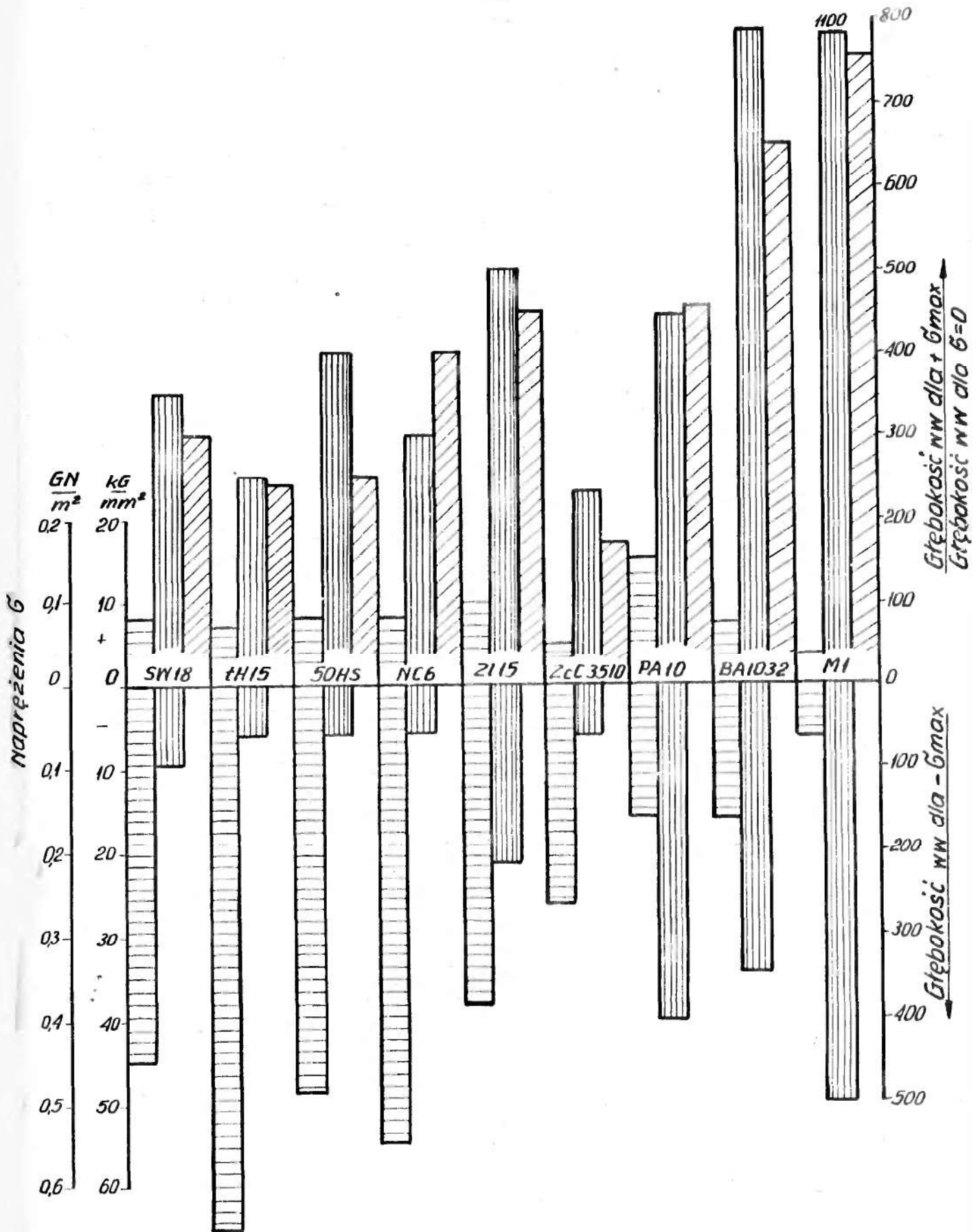
Rys. 48 Wykres wartości liczbowych naprężeń ( $-\sigma_{max}; +\sigma_{max}; \sigma=0$ ) i głębokości ich zalegania dla zmiennej amplitudy (rys. 47) i średnicy kulki (rys. 49).  
 Oznaczenia: — naprężenia ( $-\sigma_{max}; +\sigma_{max}$ ), - - - głębokość zalegania naprężeń ( $-\sigma_{max}; +\sigma_{max}$ ), ···· głębokość zalegania naprężeń ( $\sigma=0$ )



Rys. 49



Rys. 50 Wykres wartości liczbowych naprężeń ( $-\sigma_{max}$ ,  $+\sigma_{max}$ ,  $\sigma=0$ ) i głębokości ich zalegania dla zmiennej częstotliwości (rys. 49) i czasu obróbki (rys. 50).  
 Oznaczenia: — naprężenia ( $-\sigma_{max}$ ,  $+\sigma_{max}$ ); --- głębokość zalegania naprężeń ( $\sigma=0$ ); -.-.- głębokość zalegania naprężeń ( $+\sigma_{max}$ )



Rys.51 Porównanie wartości liczbowych naprężeń ( $-\sigma_{max}$ ;  $+\sigma_{max}$ ;  $\sigma=0$ ) i głębokości ich zalegania dla materiałów różnych. Warunki obróbki  $\phi_k = 6,3\text{ mm}$ ,  $v = 60\frac{m}{s}$ ,  $t = 10\text{ min}$ ,  $A = 2,15\text{ mm}$ .  
 Oznaczenie: naprężenia ( $-\sigma_{max}$ ;  $+\sigma_{max}$ ) głębokość zalegania naprężeń ( $-\sigma_{max}$ ;  $+\sigma_{max}$ ) głębokość zalegania naprężeń ( $\sigma=0$ )

teriałach ciągliwych, ale zalegają one na mniejszej głębokości.

Celem łatwiejszego porównania wyników sporządzono wykresy, na których ujęte są wartości i głębokości zalegania maksymalnych (dodatnich i ujemnych) naprężeń oraz głębokość, na której zmieniają one znak. Wpływ parametrów technologicznych ujmuje rys.47 ÷ 50, a na rys.51 przedstawione są wyniki dla materiałów różnych.

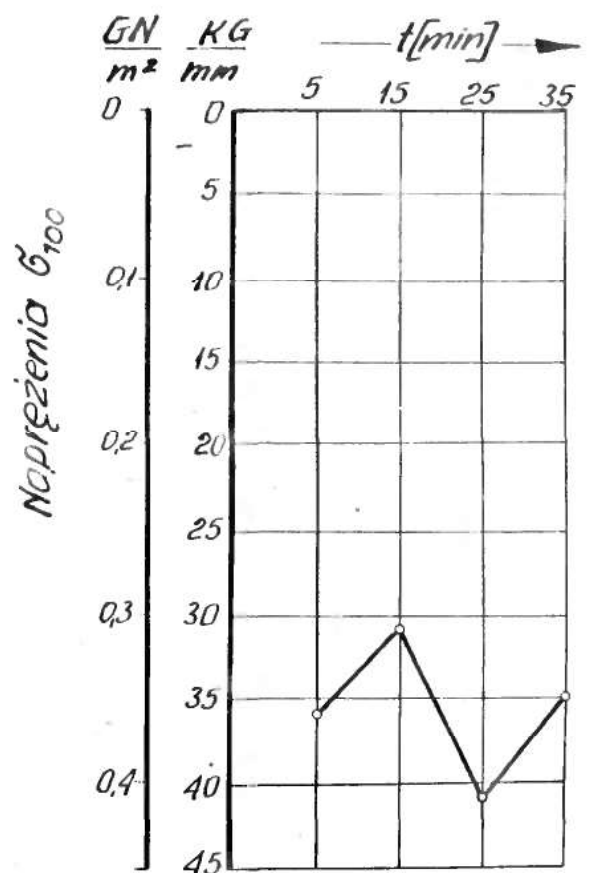
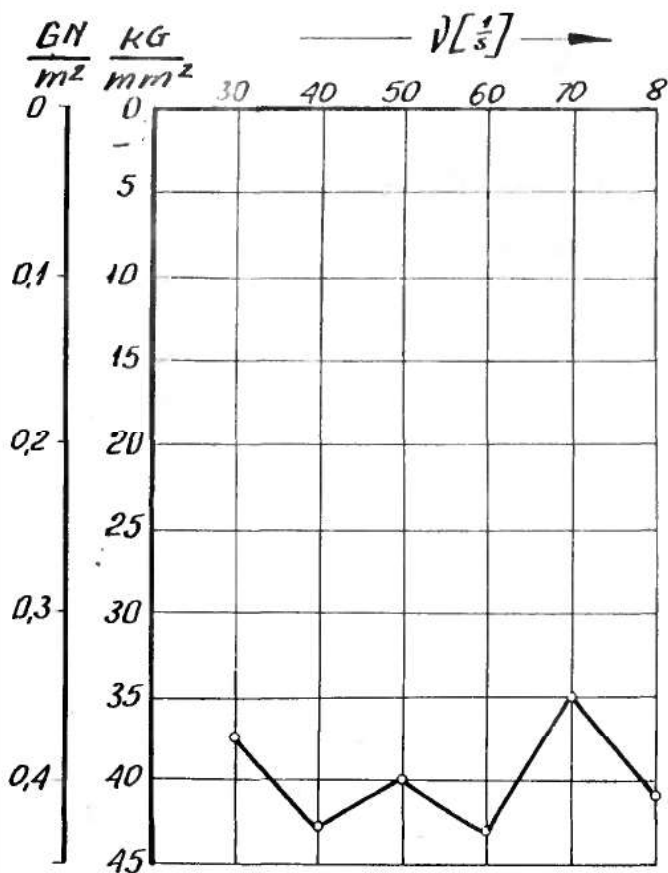
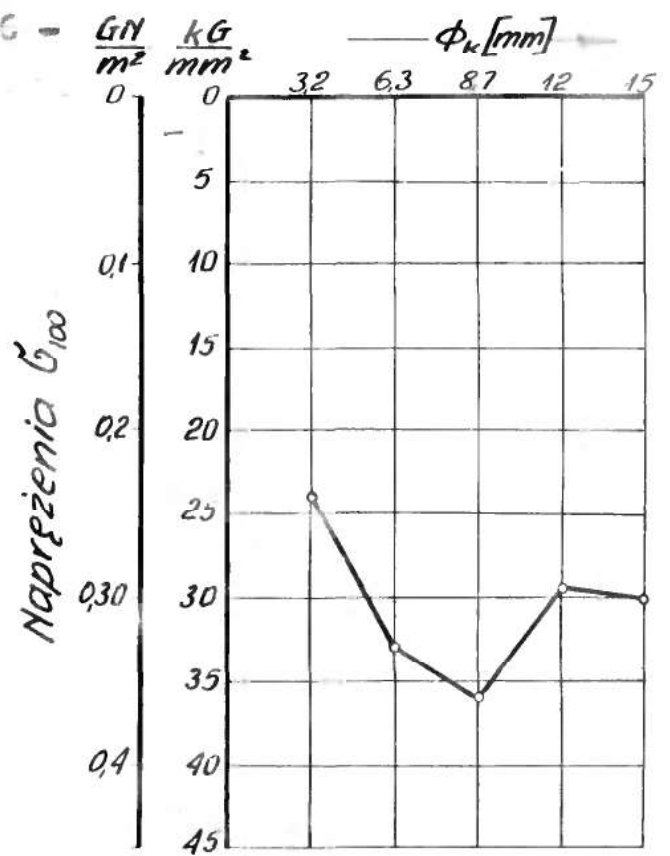
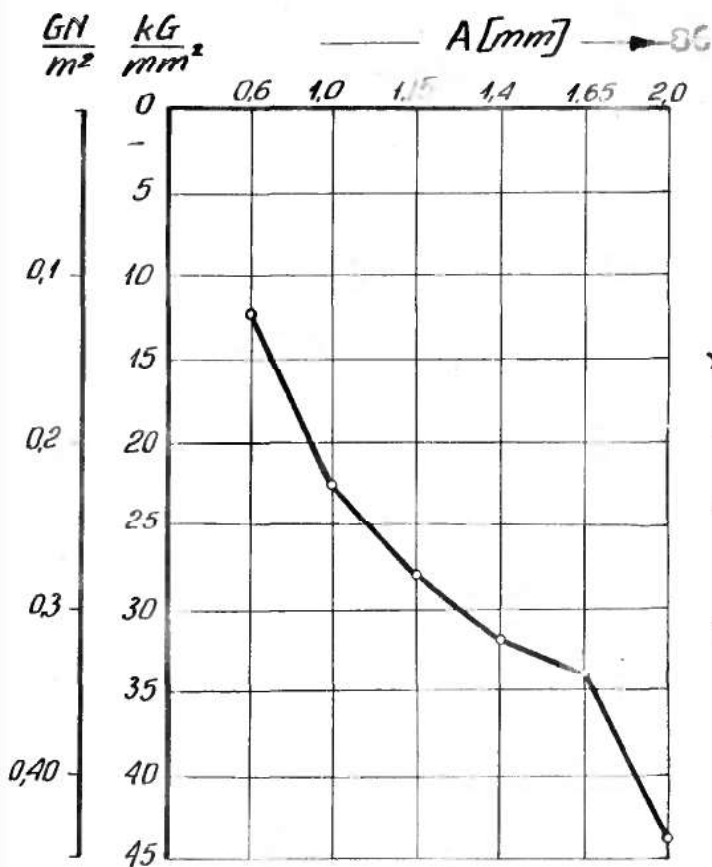
Zmiana wielkości amplitudy (od wartości 0,6 mm do 2 mm - rys.47) wpływa na bardzo duży (około 80 %) wzrost maksymalnych ujemnych naprężeń. Maksymalne dodatnie naprężenia wznoszą się nieznacznie (kilka procent). Zwiększanie amplitudy wpływa na wzrost wartości bezwzględnej naprężeń i głębokości ich zalegania. Chcąc uzyskać w wyniku obróbki zaniżone maksymalne ujemne wartości naprężeń przy małym ich spadku przy powierzchni, należy stosować małe amplitudy. Zwiększenie amplitudy wpływa na wzrost wartości naprężeń i głębokości ich zalegania przy występowaniu tendencji spadkowej naprężeń w warstwie przypowierzchniowej.

Przy zmianie średnicy kulki (rys.48) maksymalne ujemne naprężenia osiąga się dla średnicy  $\phi_k = 8,7$  mm. Dla mniejszych średnic wartość naprężeń nieznacznie maleje, a głębokość ich zalegania jest dużo mniejsza. Najbardziej korzystny rozkład uzyskuje się dla średnicy kulki  $\phi 6,3 \div \phi 8,7$ .

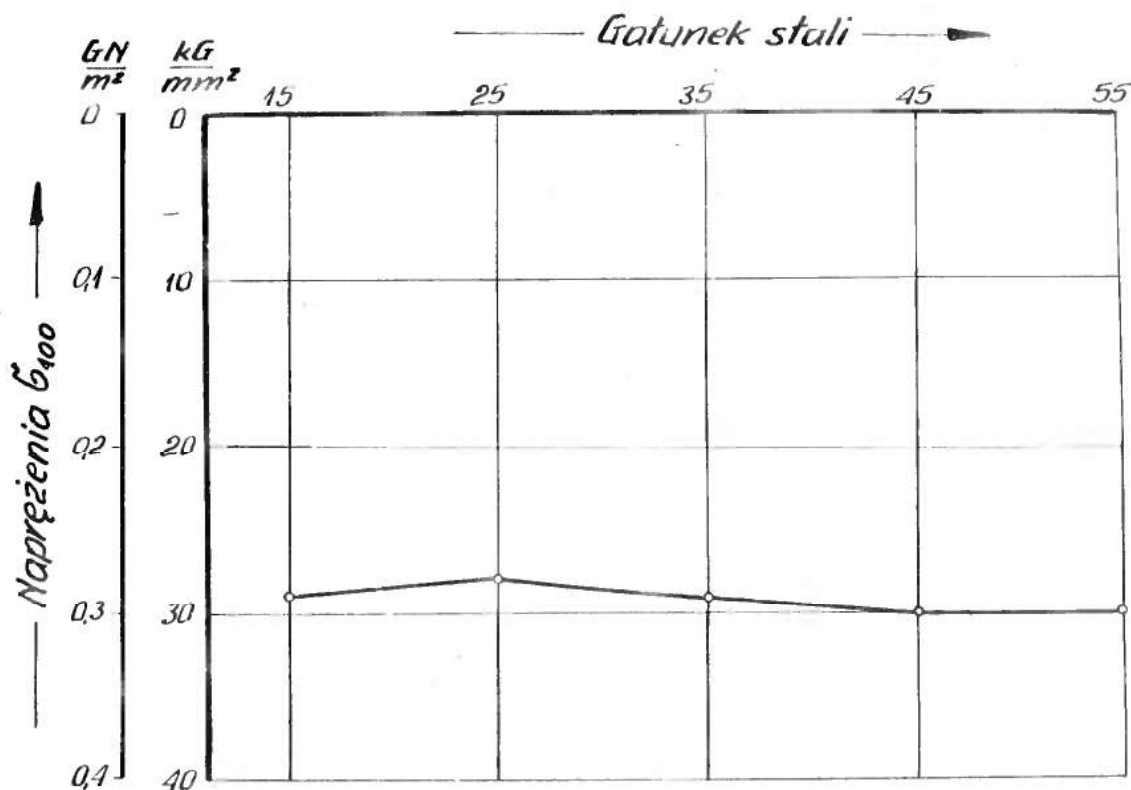
Przy badaniu wpływu częstotliwości (rys.49), najkorzystniejszym zakresem wydaje się być przedział  $40 \div 70 \frac{1}{s}$ .

Zmiana czasu obróbki nie ma istotnego wpływu na wielkość naprężeń, natomiast zwiększa się częściowo głębokość ich zalegania. Wydaje się, że czas 5 - 15 minut jest najbardziej wskazany z punktu widzenia uzyskanych wielkości naprężeń i ich rozkładu.

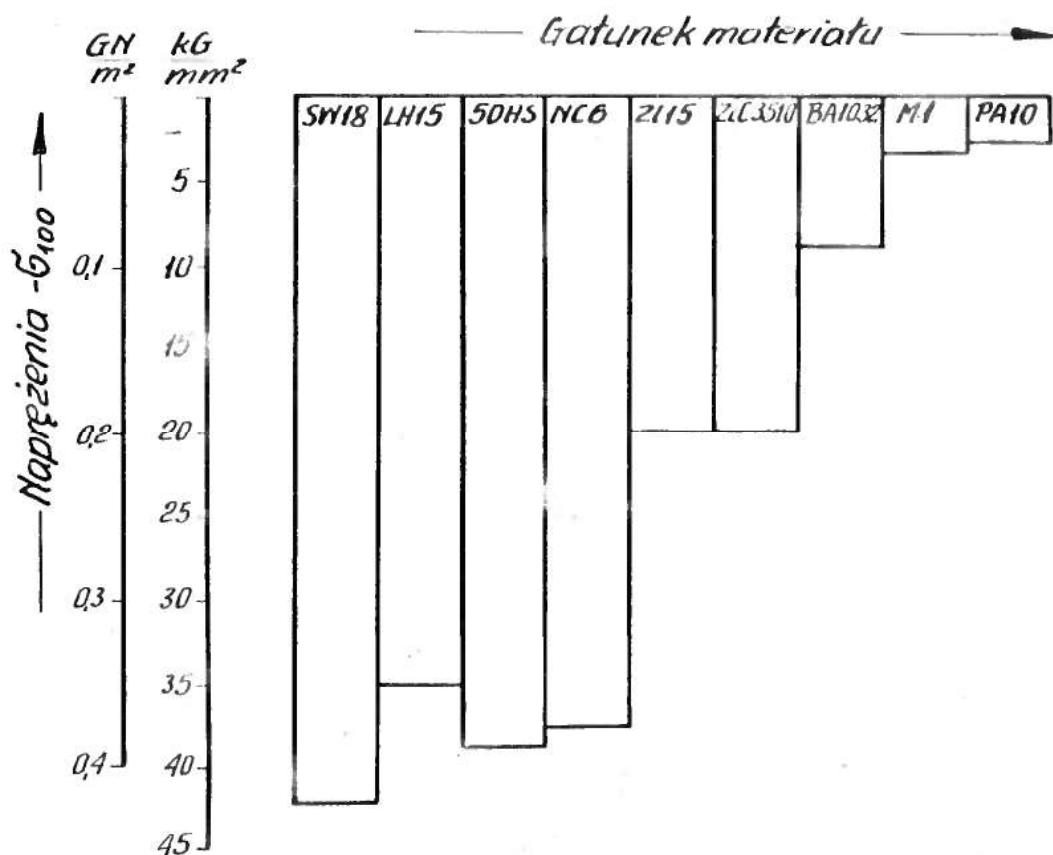
Na rys.51 przedstawione są wyniki dla materiałów różnych. Jak już wspomniano, w materiałach mniej podatnych na zgniot (stal SW18, ŻH15, 50HS, NC6) obserwuje się duże wartości naprężeń przy małych głębokościach ich zalegania. Natomiast w materiałach plastycznych,



Rys. 52 Zależność naprężeń własnych  $\sigma_{100}$  (określonych w odległości 100  $\mu\text{m}$  od powierzchni obrabianej) w zależności od parametrów technologicznych obróbki ( $A$  - amplitudy,  $\phi_k$  - średnicy kulki,  $\nu$  - częstotliwości,  $t$  - czasu obróbki). Mater. obr. stal 55 (wyż i oopr.)



Rys. 53 Wykres naprężeń własnych  $G_{100}$  dla różnych gatunków stali



Rys. 54 Porównanie naprężeń własnych  $G_{100}$  (określonych w odległości  $100 \mu\text{m}$  od powierzchni) dla materiałów różnych. Warunki obróbki  $\phi_x = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{s}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$ .

takich jak miedź, mosiądz, stop aluminium, obserwuje się małe wartości naprężeń przy dużej głębokości zalegania. Na rys.52 i 53 widzimy wartości naprężeń ściskających dla określonej głębokości warstwy wierzchniej. Dla wszystkich przypadków przyjęto głębokość 100 $\mu$ m

Największe zmiany  $\sigma_{100}$  obserwuje się przy zmianie amplitudy. Z jej wzrostem występuje stały wzrost wielkości  $\sigma_{100}$ . Średnica kulki przyjmuje wartości optymalne dla  $\phi_k = 8,7$  mm. Zmiana częstotliwości i czasu obróbki nie ma istotnego wpływu

Rozpatrując całościowo wszystkie parametry obróbki można stwierdzić, że zadawalające wartości  $\sigma_{100}$  uzyskuje się przy średnich wartościach parametrów technologicznych.

Na rys.53 zestawione są wyniki, uzyskane przy badaniu wpływu gatunku stali na  $\sigma_{100}$ . Ze wzrostem zawartości węgla obserwuje się nieznaczny przyrost naprężeń na głębokości 100  $\mu$ m.

Materiały różne (rys.54) wykazują większe wartości naprężeń w przypadku mniejszej ich plastyczności.

Ogólnie należy stwierdzić, że na wartość bezwzględną naprężeń, uzyskanych podczas obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną, istotny wpływ wywiera rodzaj i stan obrabianego materiału, natomiast głębokość ich zalegania i rozkład uzależniony jest w większym stopniu od parametrów technologicznych obróbki.

### Scieralność.

Jak już wspomniano w cz.3.2. podczas doświadczeń próbki poddane były ścieraniu o ziarna umocowane (papier ścierny). Scieranie odbywało się w obfitym strumieniu wody. Zużywanie się powierzchni próbek zachodziło najprawdopodobniej na skutek mechanicznego zaczepiania się nierówności badanej powierzchni o ziarna papieru ściernego. Chropowatości powierzchni zamieniane były na mikrowiórki, a następnie usuwane ze strefy ścierania wraz ze strumieniem bieżącej wody.

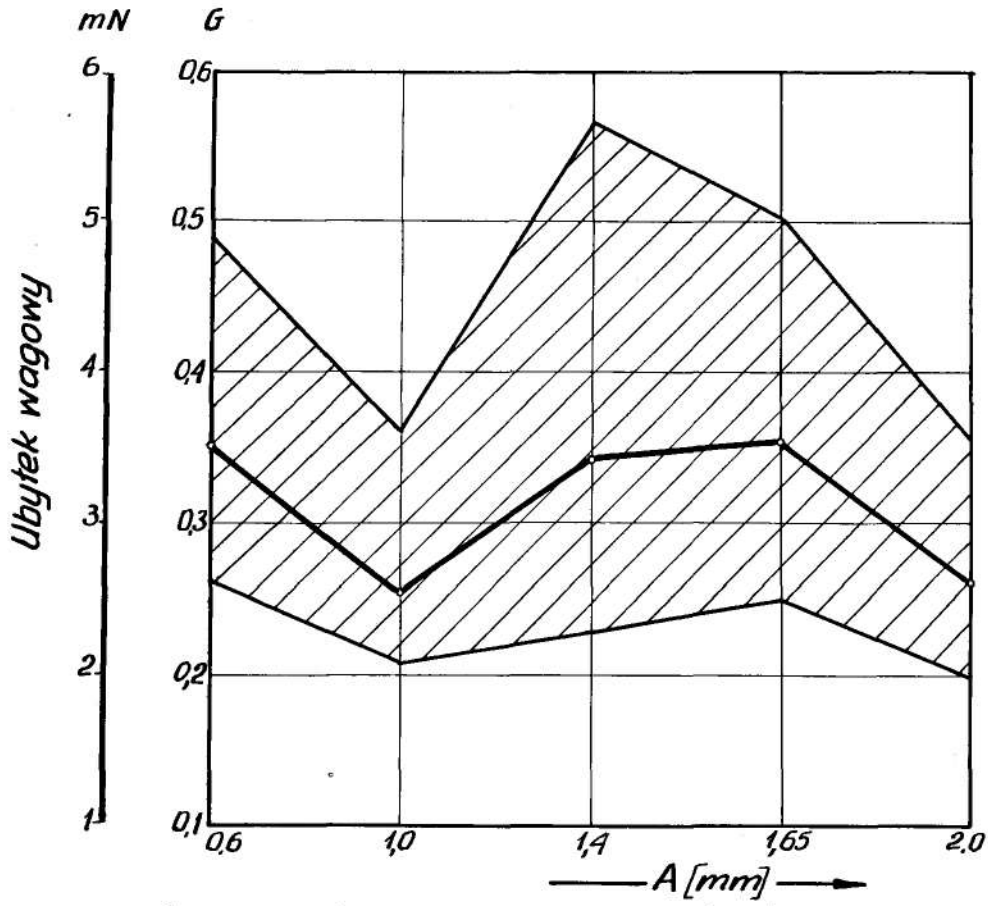
W praktyce zużycie poprzez mikroskrawanie może zachodzić w pojazdach mechanicznych z napędem gąsienicowym.

Przyjęta metoda badań wyklucza raczej występowanie takich odmian zużycia jak: szczepianie, utlenianie, zużycie cieplne czy też zmęczeniowe. Wstępna chropowatość powierzchni uzyskana w czasie obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną nie miała istotnego znaczenia na proces zużycia, gdyż w czasie ścierania bardzo szybko pojawiała się nowa chropowatość powierzchni.

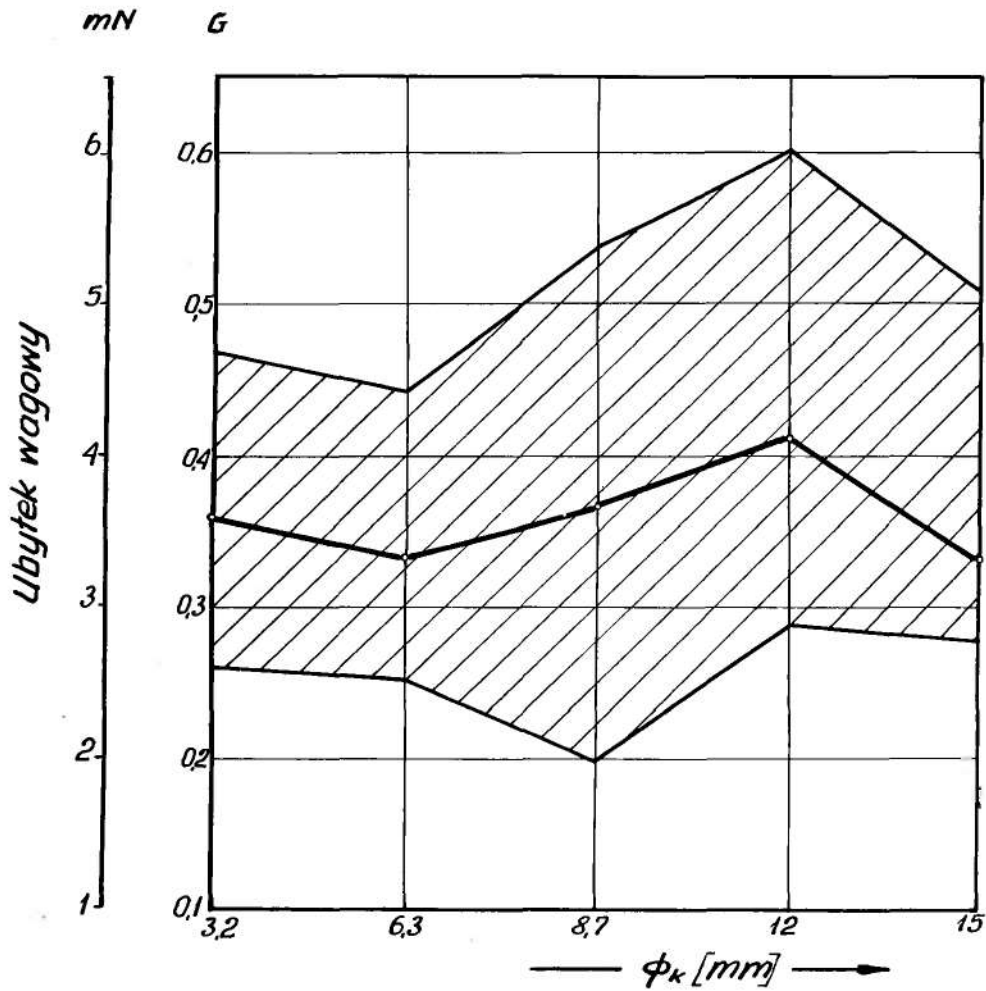
Na proces zużywania się próbek mogły mieć jedynie wpływ naprężenia własne i zgniot, uzyskane podczas obróbki powierzchniowej zgniotem. Badania opublikowane w pracy [18] pozwalają stwierdzić, że naprężenia ściskające utrudniają odrywanie się cząsteczek od materiału w wyniku tarcia. Dotychczas nie wyjaśniony jest natomiast wpływ zgniotu, którego oddziaływanie może być przeciwne do oddziaływania naprężeń.

Podczas doświadczeń nad wpływem parametrów technologicznych na scieralność, nie uzyskano jednoznacznych wyników. I tak na rys.55 ujęta jest zależność ubytków wagowych ścieranych próbek od zmiennej amplitudy. Najmniejsze ubytki wystąpiły dla  $A = 1,0$  i  $2,0$  mm. Na rys.56 uwidoczniiony jest wpływ średnicy kulki. Najmniejsze ubytki wystąpiły dla  $\phi_k = 6,3$  i  $\phi_k = 15$  mm. Zależność scieralności od częstotliwości wskazuje rys.57. Minimum zużycia wystąpiło przy

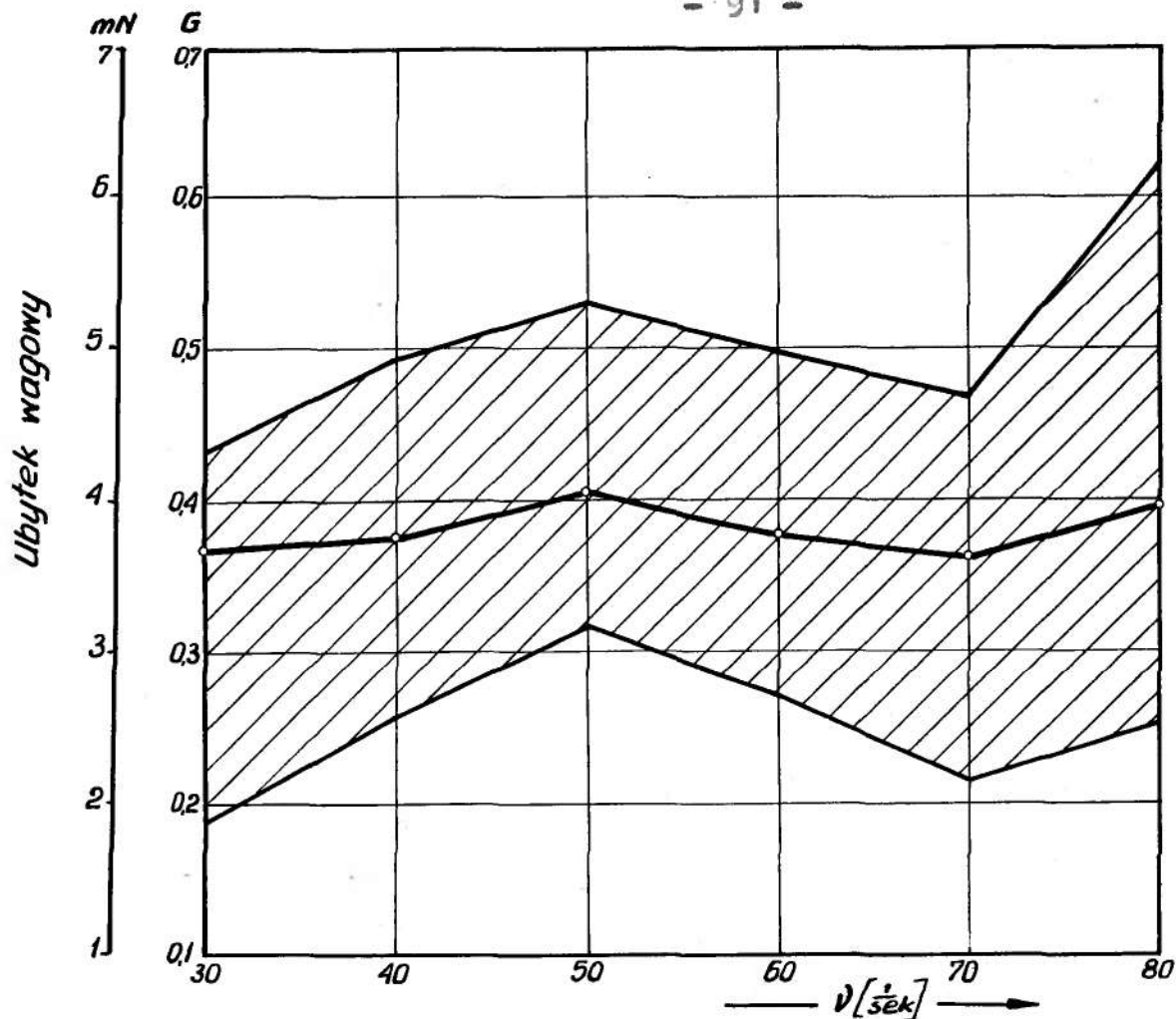




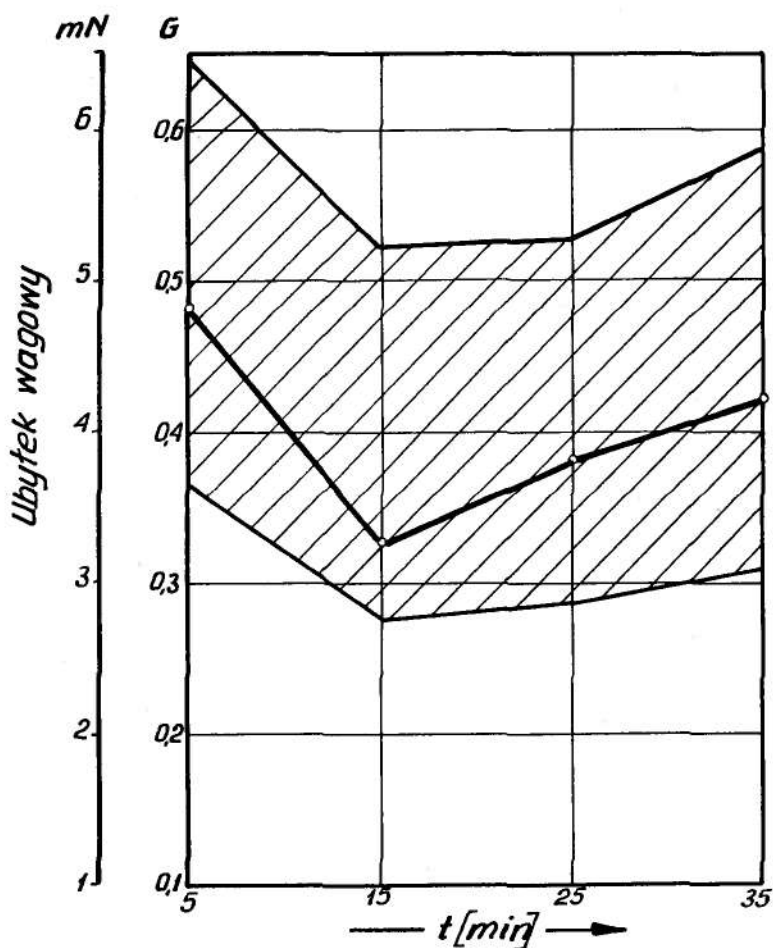
Rys.55 Wpływ amplitudy na ścieralność stali 55



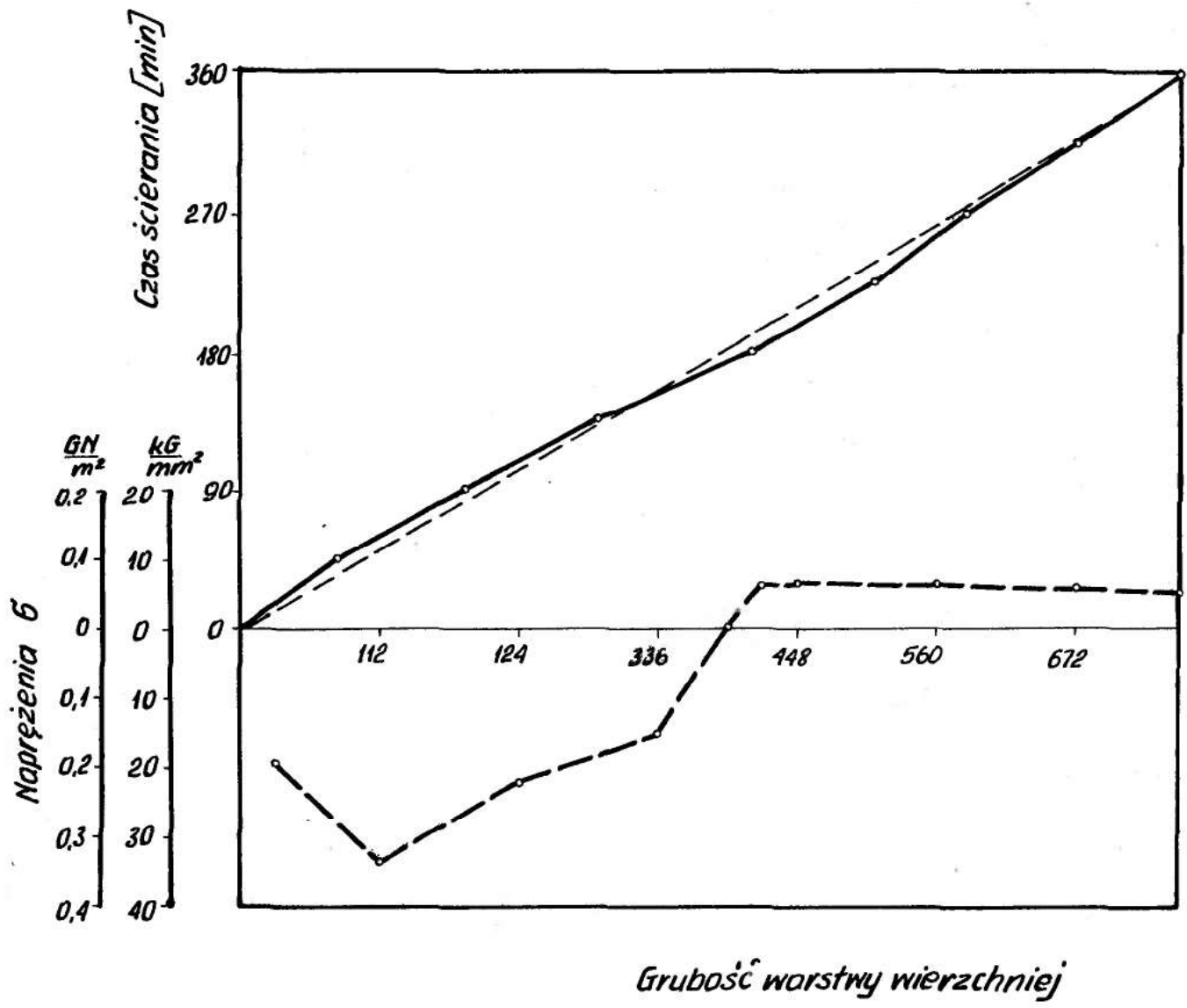
Rys.56 Wpływ średnicy kulki na ścieralność stali 55



Rys.57. Wpływ częstotliwości na ścieralność stali 55



Rys.58 Wpływ czasu obróbki na ścieralność stali 55



Rys.59 Zależność ubytku liniowego warstwy wierzchniej od czasu ścierania (linia ciągła) oraz wykres wielkości naprężeń dla tych ubytków liniowych (linia kreskowa)

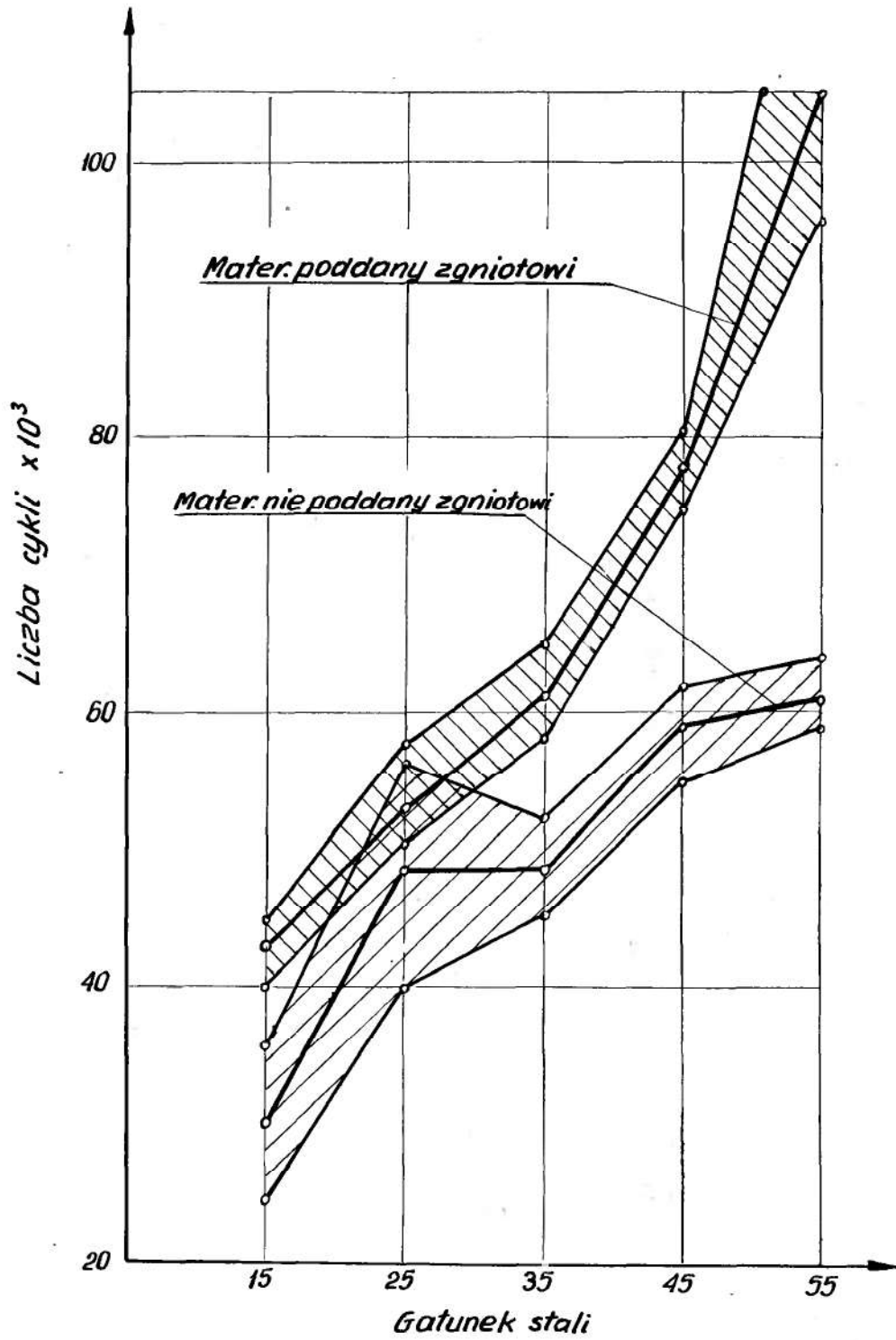
$\nu = 30 \frac{1}{s}$  i  $70 \frac{1}{s}$ . Przy zmiennym czasie obróbki najmniejsze zużycie wystąpiło dla  $t = 5$  min (rys.58). Na podstawie otrzymanych wyników nie można wyciągnąć ogólnych wniosków odnośnie wpływu parametrów technologicznych na ścieralność.

Na rys.59 pokazany jest wykres, na którym można porównać wpływ stanu naprężeń własnych na ścieralność. Na rysunku tym zestawiona jest zależność ubytków liniowych próbek od czasu ich ścierania. Odstępy czasu dla każdej próby były jednakowe. Na tym wykresie naniesiono też rozkład wielkości naprężeń w zależności od grubości ww. Przy porównaniu obu wykresów dla przyjętej głębokości ww można stwierdzić występowanie nieznacznie mniejszych ubytków w strefie, gdzie zalegają naprężenia ściskające (krzywa ścierania w tym zakresie ma kształt regresywny). Wyniki te są częściowo zgodne z wynikami ujętymi w pracy [18] i [19], pomimo, że badania w obydwu przypadkach prowadzone były w odmiennych warunkach. Uzyskane wyniki nie pozwalają na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków odnośnie wpływu obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną na ścieralność.

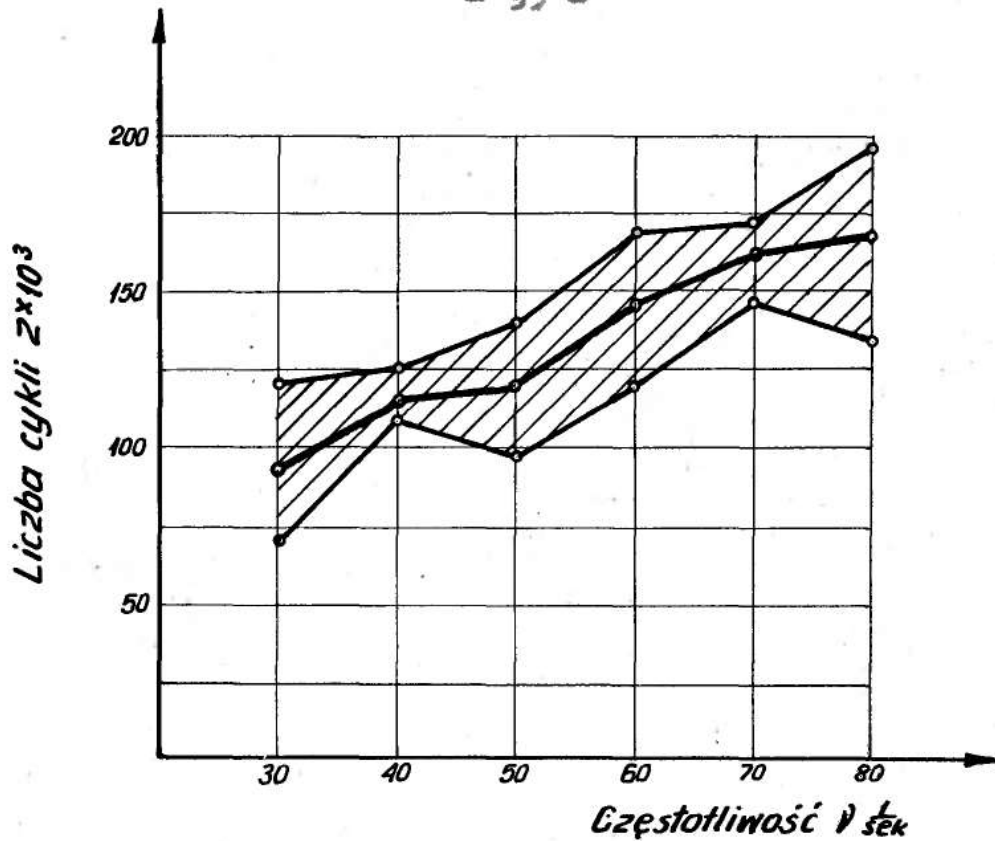
#### Zmęczeniowość.

Wytrzymałość zmęczeniowa jest jedną z ważniejszych właściwości użytkowych warstwy wierzchniej. Zależna jest ona w znacznym stopniu od własności stereometrycznych i fizykalnych, uzyskanych w czasie obróbki.

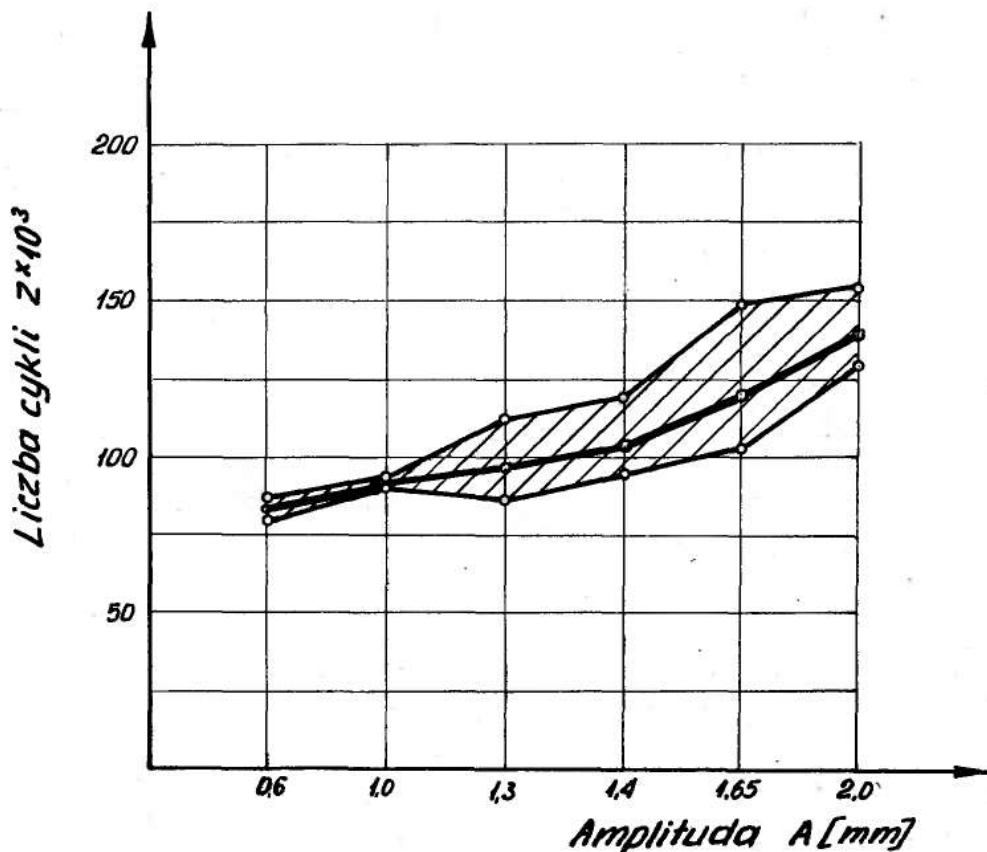
Na ogół powierzchnia po obróbce wiórowej i ściernej posiada ostre zagłębienia. W czasie obróbki zgniotem metodą wibracyjną, ulegają one złagodzeniu. Występuje też zmniejszenie wysokości nierówności  $R_z$ . Przy obciążeniach zmiennych, wszelkiego rodzaju zagłębienia, znajdujące się na powierzchni są koncentratorami naprężeń. Nierówności, jakie uzyskuje się po obróbce powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną, cechują się dużymi promieniami zaokrąglenia,



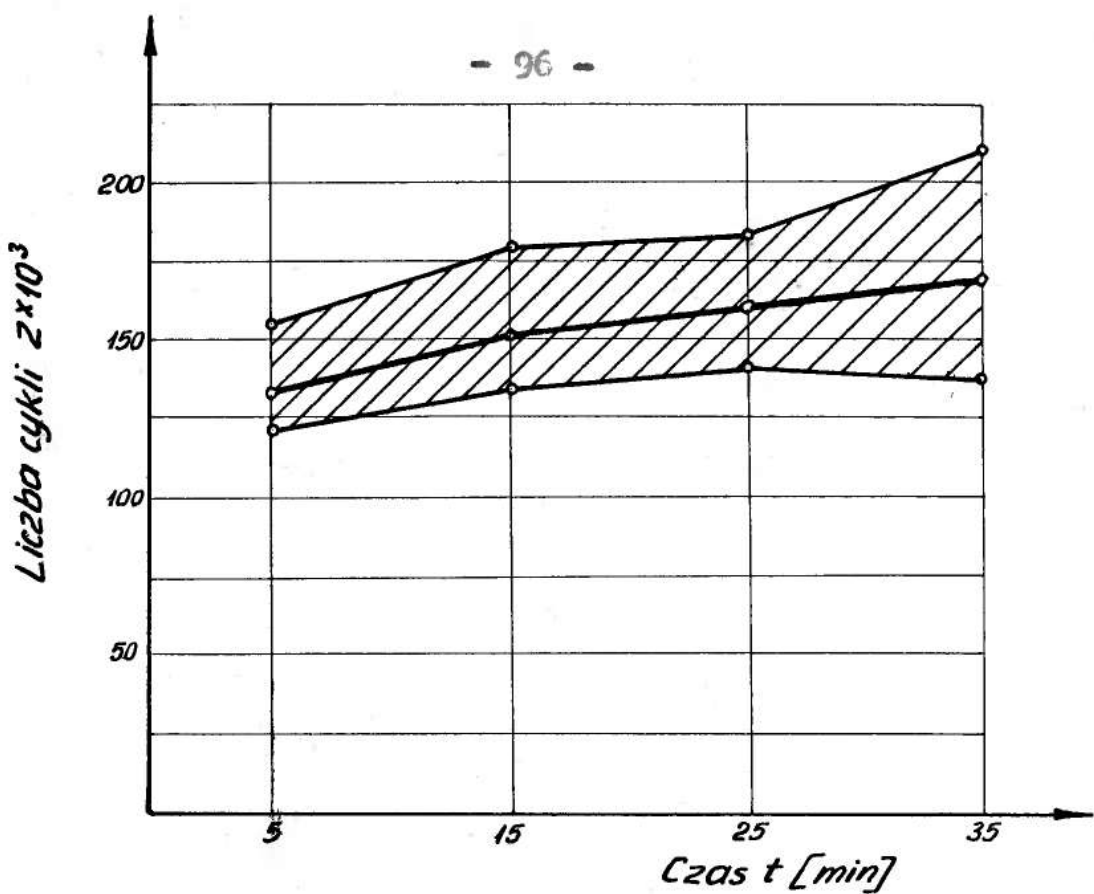
Rys.60 Wpływ zawartości węgla w stali konstrukcyjnej (wyż. i odpr.) poddanej i nie poddanej zgniotowi na wytrzymałość zmęczeniową. War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



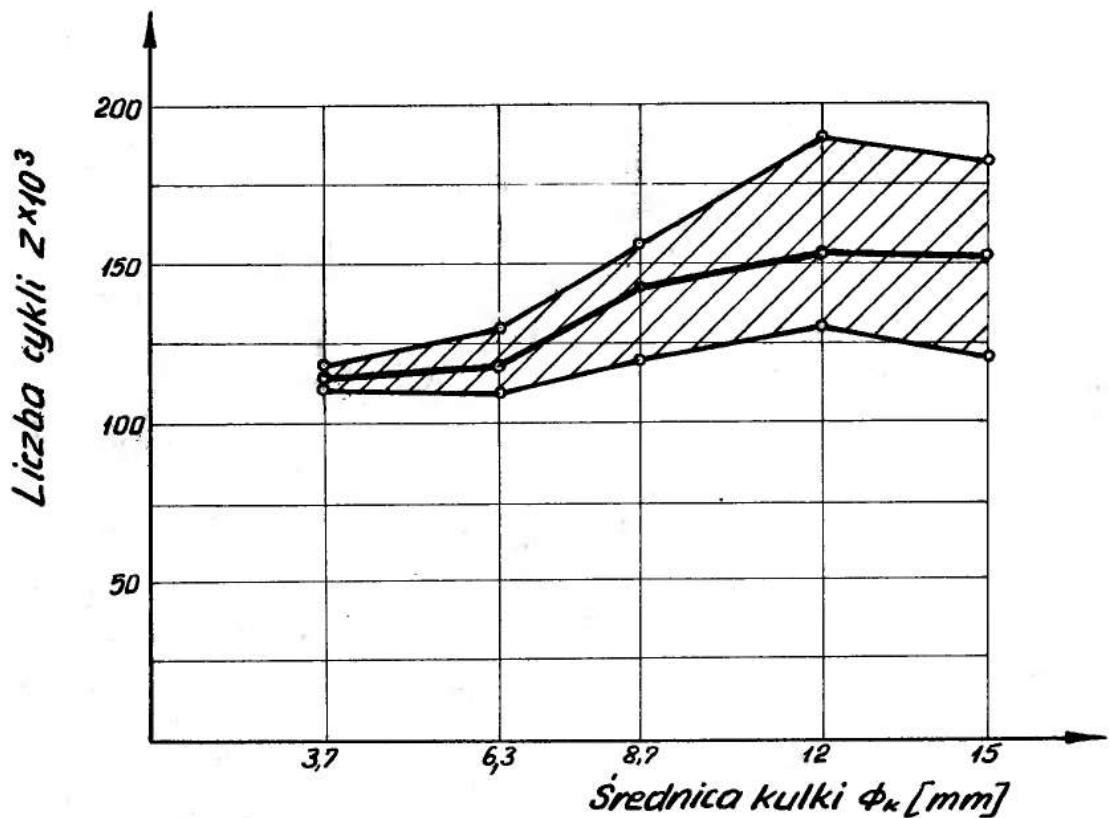
Rys. 61 Wpływ częstotliwości na wytrzymałość zmęczeniową stali 55 (wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem. War. obróbki:  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$   
 $A_{30} = 3$ ;  $A_{40} = 2,65$ ;  $A_{50} = 2,5$ ;  $A_{60} = 2,15$ ;  $A_{70} = 2,0$ ;  $A_{80} = 1,9 \text{ mm}$ .



Rys. 62 Wpływ amplitudy na wytrzymałość zmęczeniową stali 55 (wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem. War. obróbki:  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$   
 $t = 20 \text{ min}$ ,  $\nu = 70 \frac{1}{s}$



Rys.63 Wpływ czasu obróbki zgniotem na wytrzymałość zmęczeniową stali 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A = 2 \text{ mm}$



Rys.64 Wpływ średnicy kulki na wytrzymałość zmęczeniową stali 55 (wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem. Warunki obróbki:  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ ,  $A = 2 \text{ mm}$

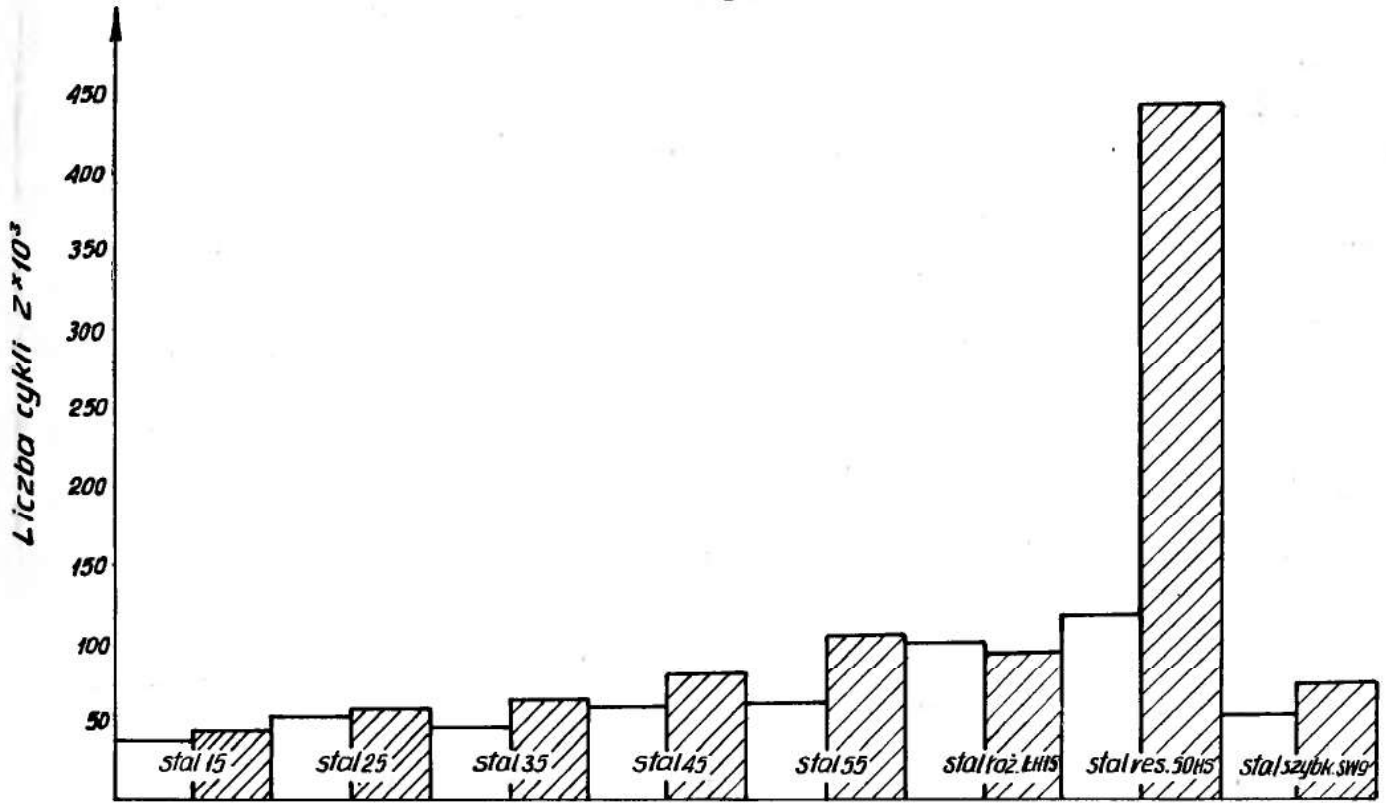
dzięki czemu występuje mniejsze działanie karbu. Ma to szczególne znaczenie w takich przedmiotach, w których już z przyczyn ich konstrukcyjnego ukształtowania występują miejsca o zwiększonej koncentracji naprężeń. Niejednorodność struktury metalograficznej też może być przyczyną nadwyżki miejscowych naprężeń. Szczególnie niekorzystne - ze względu na wytrzymałość zmęczeniową - są miejsca odwęglone. Jak już wcześniej wspomniano, strefy o mniejszej plastyczności podczas obróbki powierzchniowej zgniotem za pomocą luźnych kulek metodą wibracyjną, ulegają intensywniejszemu zgniotowi, dzięki czemu materiał staje się bardziej jednorodny, co z kolei wpływa na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej.

Koncentracja naprężeń, z przyczyn strukturalnych i stereometrycznych, może być znacznie zniwelowana przy występowaniu ujemnych naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Taki stan naprężeń uzyskuje się po obróbce powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną.

Poprawa własności stereometrycznych i korzystny rozkład naprężeń są szczególnie przydatne przy wzmacnianiu materiałów kolorowych i ich stopów, gdzie bardzo często jest to jedyny możliwy do uzyskania sposób.

Na rys. 60 ÷ 65 zestawiono wykreślnie wyniki badań nad ustaleniem wpływu obróbki powierzchniowej zgniotem na wytrzymałość zmęczeniową. Doświadczenia z tego zakresu wypadły najbardziej efektywnie. Otrzymane wyniki są jednoznaczne i zachęcające do praktycznego rozpowszechnienia obróbki powierzchniowej zgniotem na skalę przemysłową. Na rys. 60 pokazany jest wpływ zawartości węgla w stalach konstrukcyjnych (15, 25, 35, 45, 55), poddanych i nie poddanych zgniotowi na wytrzymałość zmęczeniową. Ze wzrostem zawartości węgla w stali, występuje wzrost wytrzymałości zmęczeniowej, ale są tu bardzo wyraźne różnice pomiędzy próbkami utwardzonymi i nie utwardzonymi powierzchniowo. Próbki z naniesionym zgniotem powierzchniowym mają znacznie większy przyrost wytrzymałości zmęczeniowej.





Rys. 65 Porównanie wytrzymałości zmęczeniowej różnych materiałów (wyż. i odpr.) poddanych i nie poddanych obróbce powierzchniowej zgniotem. War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$   
▨ - materiał poddany zgniotowi  
□ - materiał nie poddany zgniotowi

Na rys.61 ujęty jest wpływ częstotliwości. Ze wzrostem częstotliwości występuje wzrost wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie. Na rys.62 uwidoczniony jest wpływ amplitudy. Również i w tym przypadku występuje wzrost liczby przegięć wraz ze zwiększaniem się amplitudy. Na rys.63 i 64 pokazany jest wpływ średnicy kulki i czasu obróbki. Ze wzrostem czasu obróbki obserwuje się ciągły wzrost wytrzymałości, ale w mniejszym stopniu niż to miało miejsce poprzednio. Przy zmianie średnicy kulki, największe przyrosty wytrzymałości zmęczeniowej wystąpiły dla średnich wielkości kulek. Nieznaczny spadek wytrzymałości dla średnicy  $\phi_k = 15$  mm, może być spowodowany nadmiernym zgniotem i rozluźnieniem struktury warstwy wierzchniej.

Celem porównania wpływu obróbki zgniotem na wzrost wytrzymałości zmęczeniowej materiałów różnych, przeprowadzono doświadczenia na próbkach poddanych i nie poddanych zgniotowi (rys.65). Na ogół we wszystkich materiałach obserwuje się większą ilość cykli przegięć dla materiałów utwardzonych zgniotem. Największy przyrost wystąpił dla stali resorowej, z czego należy wnioskować, że jest ona szczególnie podatna na umocnienie przez zgniot. Duży przyrost obserwuje się też w stopie tytanu WT3. Jedynie w stali łożyskowej wystąpił nieznaczny spadek wytrzymałości zmęczeniowej, z czego wynika, że tego gatunku stali nie należy poddawać zgniotowi powierzchniowemu.

Ogólnie można stwierdzić, że zgniot powierzchniowy wpływa bardzo korzystnie na przyrost wytrzymałości zmęczeniowej i jest tym większy, im bardziej intensywne parametry technologiczne stosowane są w czasie obróbki.

### 3.5. Analiza wyników badań.

Analiza obejmuje:

- wytyczne do konstrukcji i eksploatacji urządzenia wibracyjnego,
- dobór parametrów technologicznych obróbki,
- zmiany fizykalne i użytkowe warstwy wierzchniej.

Efekty jakościowe i ilościowe obróbki powierzchniowej zgniotem zależą w dużej mierze od typu zastosowanego wibratora. W modelu urządzenia wibracyjnego na którym przeprowadzono badania, stosowano wibrator bezwładnościowy dwumasowy, opisany w części 2.4. Biorąc pod uwagę prostotę konstrukcji, niezawodność działania i dużą trwałość mechanizmów, należy stwierdzić, że wibratory tego typu nadają się do obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną.

Omówienie niektórych szczegółów konstrukcyjnych wibratora i spostrzeżeń eksploatacyjnych, dokonanych w czasie doświadczeń, może być pomocne przy rozpowszechnianiu obróbki wibracyjnej na skalę przemysłową.

Pojemnik roboczy narażony jest na ciągłe zderzanie się z wsadem kulek, w związku z czym musi być wykonany z materiałów odpornych na tak ciężkie warunki pracy. Części metalowe ulegają nadmiernym odkształceniom plastycznym, deformacjom i łuszczeniu się warstwy wierzchniej. Bardzo dobre wyniki uzyskano przy wykonaniu pojemnika roboczego z winiduru. Posiada on jednak stosunkowo niskie własności wytrzymałościowe, w związku z czym konstrukcja pojemnika powinna być wzmocniona (ze strony zewnętrznej) częściami metalowymi.

Na podstawie analizy dynamiki ruchu urządzenia wibracyjnego, opisanego w cz.2, należy stwierdzić, że sprawność energetyczna układu zależy od masy pojemnika roboczego i wibratora, wprawia-

nych w drgający ruch harmoniczny. Podzespoły te należy w maksymalnym stopniu wykonywać z materiałów posiadających mały ciężar właściwy przy dużej wytrzymałości doraźnej.

W czasie obróbki powierzchniowej zgniotem występuje bardzo intensywny hałas, który jest szkodliwy dla obsługi. Można go częściowo wyeliminować poprzez obudowanie pojemnika dźwiękochłonnymi materiałami. Wskazane jest też prowadzenie (ze względu na BHP) procesu obróbki w pomieszczeniach wydzielonych.

W przypadku usytuowania urządzenia w sąsiedztwie innych maszyn, wibrator powinien być zainstalowany na oddzielnym fundamencie tak zaprojektowanym, by jego drgania nie przenosiły się poprzez podłoże na otoczenie.

Podczas obróbki powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną, miejsca, w których następuje zderzanie się luźnych kulek z powierzchnią obrabianą - są przypadkowe. Ruch narzędzia (wsadu kulek) względem przedmiotu obrabianego nie opisuje ściśle określonego toru, wymuszonego łańcuchem kinematycznym obrabiarki, lecz jest ruchem prawdopodobnym, zależnym częściowo od parametrów technologicznych. Na podstawie doświadczeń stwierdzono, że im bardziej chaotyczny jest ruch kulek w czasie obróbki, tym bardziej równomierny zgniot uzyskuje się na powierzchni obrobionej. Chaotyczny ruch kulek występuje dopiero wówczas, gdy układ drgający posiada dostatecznie dużą amplitudę.

Na podstawie badań rozpoznawczych stwierdzono, że minimalna wielkość amplitudy wynosi  $\sim 0,5$  mm. Przy amplitudach mniejszych efekt obróbki jest niekorzystny z punktu widzenia stereometrii, oraz własności użytkowych warstwy wierzchniej.

Dobre efekty obróbkowe i małe zapotrzebowanie mocy uzyskuje się przy stosowaniu amplitud w granicach  $1 \div 3$  mm.

Bilans energetyczny układu napędowego, natężenie hałasu, bezpieczeństwo pracy i uzyskany w wyniku obróbki stan warstwy wierzchniej zależne są w bardzo istotny sposób od stosowanych częstotliwości drgań. Przeprowadzona poprzednio oddzielna analiza wymienionych zagadnień pozwala na uznanie za racjonalny przedział częstotliwości drgań  $\dot{V} = 40 \div 70 \frac{1}{s}$ .

Na ogół wibratory bezwładnościowe pracują przy częstotliwościach pozarezonansowych. Przechodzenie układu przez częstotliwości rezonansowe jest niebezpieczne, w związku z czym powinny one być zaopatrzone w amortyzatory odbojowe, tłumiące drgania w tym zakresie. Pogarsza się przez to wprawdzie sprawność energetyczna urządzenia, ale jest to konieczne z punktu widzenia BHP.

Układ napędowy urządzenia wibracyjnego, na którym prowadzono doświadczenia, posiadał bezstopniowy zakres regulacji prędkości obrotowej, ale przeprowadzono też próby bezpośredniego uruchamiania go na maksymalne obroty. Wyniki wypadły pozytywnie, z czego można wyciągnąć wniosek, że do napędu może być stosowany silnik indukcyjny klatkowy podłączony bezpośrednio do sieci, zgodnie z obowiązującymi ogólnie przepisami.

Wibrator bezwładnościowy dwumasowy ma skłonność do samocentrowania, w związku z czym do przenoszenia napędu ze skrzynki redukcyjnej na wibrator, można stosować sprzęgła elastyczne gumowe, nie powodujące hałasu oraz nie przenoszące drgań z wibratora na pozostałe podzespoły urządzenia. Są one bezpieczne przy stosowaniu nawet bardzo dużych częstotliwości drgań.

W czasie doświadczeń - jako narzędzie - stosowano kulki żelazkowe. Okazało się, że kulki o małych wymiarach powodowały mniejszy hałas od dużych, ale te ostatnie miały większy wpływ na intensywność zgniotu oraz były mniej wrażliwe na wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia. Może to mieć istotne znaczenie przy

stosowaniu obróbki wibracyjnej na skalę przemysłową. Kulki o średnicy około 8 mm wydają się być najbardziej odpowiednie do obróbki wszystkich rodzajów materiałów.

Zgodnie z danymi z literatury [52], największy zgniot powierzchniowy występuje podczas pierwszego kontaktu narzędzia (kulki) z przedmiotem obrabianym. Dalsze zderzenia nie powodują już tak intensywnego utwardzenia, natomiast może wystąpić zjawisko nadmiernego zgniotu, ujawniające się - między innymi - łuszczeniem się warstwy wierzchniej. Zjawisko takie jest niekorzystne.

Na podstawie doświadczeń ustalono, że dostatecznie dobry stan warstwy wierzchniej uzyskuje się przy czasie obróbki rzędu  $5 \div 10$  min. Czas obróbki ma wpływ na koszt jednostkowy wyrobu i dlatego nie należy go zwiększać poza wymienione granice.

Stereometria warstwy wierzchniej po obróbce powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną cechuje się pozytywnymi wskaźnikami. Uzyskuje się poprawę Rz i Ra. Wykres chropowatości powierzchni wykonany na przyrządzie Taylor Hobson posiada znacznie mniejszą ilość wgłębień i wzniesień w stosunku do powierzchni szlifowanej (na obranym odcinku pomiarowym). Nierówności mają łagodne przejścia. Krzywe nośności powierzchni mają przeważnie charakter degresywno-progresywny. Jest to wynikiem tego, że na powierzchni obrobionej powstają odciski kulek w postaci czaszy. Krawędzie przenikających się wklęsłości wykazują stosunkowo mały udział nośny powierzchni, który jednak szybko powiększa się i krzywa nośności o charakterze degresywno-progresywnym przechodzi w krzywą progresywną. Wgłębienia po kulkach mają opływowy kształt, co korzystnie wpływa na wytrzymałość zmęczeniową.

Obróbka powierzchniowa zgniotem jest bezkierunkowa i nie wykazuje uprzywilejowanych kierunków z punktu widzenia użytkowego ww.

W zakresie zmienianych parametrów obróbki podczas doświadczeń nie wystąpiły zauważalne zmiany struktury metalograficznej. W niektórych przypadkach wystąpiło nieznaczne rozdrobnienie struktury oraz wydłużenie pojedynczych ziarn, ale miało to miejsce na krawędziach próbek. Według danych z literatury [25] w innych odmianach obróbki można bardzo łatwo wywołać nadmierny zgniot, ujawniający się skłonnością do łuszczenia się ww. Ma to niekorzystny wpływ na własności użytkowe ww.

W obróbce wibracyjnej nadmierny zgniot może wystąpić przy stosowaniu nadzbyt długiego czasu obróbki.

Przy ustalaniu optymalnych parametrów technologicznych wskazane jest określenie drogą prób zalecanego czasu obróbki dla danego materiału. Można tego dokonać przez zastosowanie tak zwanych płytek Almena, używanych np. przy śrutowaniu. Są to wzorcowe płytki, które pod wpływem obróbki wyginają się, co może być miarą wstępnej oceny intensywności zgniotu.

W czasie obróbki wibracyjnej występuje zjawisko utwardzania ww. Zależy ono jest od rodzaju obrabianego materiału i parametrów technologicznych. Utwardzenie to występuje na stosunkowo małej głębokości i bardzo intensywnie spada w głąb ww. W niektórych przypadkach można było jednak zaobserwować spadek mikro-twardości na małych głębokościach ww. W pracy z zakresu obróbki śrutowaniem [52] oraz w pracy na temat wykańczającej obróbki rotacyjnej [25] są sugestie, że może to być przyczyną nadmiernego zgniotu.

Podczas doświadczeń nad ustaleniem rozkładu naprężeń w ww stwierdzono, że we wszystkich materiałach i przy całym zakresie zmian parametrów technologicznych, występują naprężenia ściskające zgodnie z modelem zimnym.

Na sporządzonych wykresach można zaobserwować, że największa wartość naprężeń nie występuje przy samej powierzchni lecz na pewnej głębokości. Gdyby w czasie obróbki występowała wysoka temperatura, to można by to wytłumaczyć tzw. modelem cieplnym, ale jak stwierdzono, średnia temperatura przedmiotu podnosiła się zaledwie i kilkanaście stopni, co wyklucza takie rozumowanie. Niektórzy badacze przypuszczają [25], że maksymalny zgniot występuje dopiero na pewnej głębokości ww, w związku z czym naprężenia mogą też mieć podobny rozkład. Nie wykluczony jest również wpływ niedoskonałości przyrządów pomiarowych oraz nierówności na powierzchni badanej.

Przy ustalaniu wpływu obróbki na własności użytkowe warstwy wierzchnie stwierdzono, że naprężenia ściskające powodują znaczne podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie. Im bardziej intensywne parametry technologiczne stosowane były podczas doświadczeń, tym lepsze wyniki otrzymywano w tym zakresie. Największy wzrost wytrzymałości zmęczeniowej wystąpił w stali resorowej 50HS.

Przy ustalaniu wpływu obróbki powierzchniowej zgniotem na ścieralność, stosowano metodę polegającą na ścieraniu próbek o tzw. ziarna umocowane (papier ścierny). Do strefy ścierania doprowadzany był strumień wody. Ścieranie tego rodzaju można zakwalifikować do mikroskrawania [25]. Ze względu na to, że próbki przed obróbką zgniotem poddane były wyżarzaniu, ulegały intensywnemu zużyciu.

Na podstawie bardzo dużej ilości prób starano się ustalić wpływ naprężeń własnych na ścieralność. Po przeanalizowaniu otrzymanych wyników stwierdzono nieznacznie mniejsze zużycie przy naprężeniach ściskających w porównaniu z zużyciem przy występowaniu naprężeń rozciągających.



#### IV. W N I O S K I

Na podstawie otrzymanych wyników badań i przeglądu literatury z zakresu tematu można wysunąć niżej sformułowane wnioski.

##### 4.1. Wnioski o charakterze poznawczym.

1. Analiza doświadczeń i porównanie ich z informacjami bibliograficznymi pozwala stwierdzić, że obróbka powierzchniowa zgniotem ma bardzo istotny wpływ na własności stereometryczne, fizykalne i użytkowe warstwy wierzchniej.

Do ważniejszych spostrzeżeń można zaliczyć, między innymi, ujawnienie współzależności pomiędzy strukturą metalograficzną a uzyskaną chropowatością powierzchni. Nowo uformowane w czasie obróbki nierówności zależą w dużej mierze od jednorodności struktury metalograficznej. W przypadku występowania stref bardziej podatnych na zgniot (pasmowość), powstają miejscowe zagłębienia w warstwie wierzchniej. Przez odpowiedni dobór parametrów technologicznych można wyeliminować zjawisko "wybijania" wklęsłości.

Podczas badania naprężeń własnych stwierdzono, że rozkład ich jest zgodny z tzw. modelem "zimnym". We wszystkich rozpatrywanych przypadkach maksymalne wartości naprężeń ściskających nie występują jednak bezpośrednio na powierzchni obrabianej lecz na pewnej głębokości. Potwierdza to przypuszczenie [25], że podczas niektórych odmian obróbki zgniotem (przy braku naprężeń stycznych), maksymalne odkształcenia plastyczne zachodzą nie bezpośrednio na powierzchni obrabianej, lecz na pewnej głębokości, przy zaistnieniu odpowiedniego wytężenia materiału. Rozumowanie to ma potwierdzenie w publikacjach dotyczących wytrzymałości materiałów. Na przykład autor pracy [59] podaje między innymi wzór użytkowy na obliczenie tak zwanych naprężeń kontaktowych, występujących przy wzajemnym docisku powierzchni kulistej i płaskiej.

Z podanych zależności wynika, że maksymalny stan wytężenia materiału zachodzi nie bezpośrednio na powierzchni, lecz na pewnej głębokości, z czego można wyciągnąć wniosek, że maksymalne odkształcenia plastyczne też występują w pewnej odległości od miejsca styku narzędzia (kulki) i przedmiotu obrabianego.

Przeprowadzone badania pozwoliły też na rozszerzenie informacji o wpływie obróbki powierzchniowej zgniotem na strukturę metalograficzną i mikrotwardość różnych gatunków stali, żeliwa oraz stopów metali kolorowych.

2. Podczas obróbki wibracyjnej przedmioty obrabiane przytwierdzone są do pojemnika i drgają ruchem harmonicznym razem z wibratorem. Istota obróbki polega na okresowym zderzaniu się tych przedmiotów z wsadem luźnych kulek pokrywających powierzchnię obrabianą. Na podstawie doświadczeń stwierdzono, że przy zbyt małych amplitudach drgań wibratora (poniżej 0,5 mm) wsad jest nieruchomy. Jedynie kulki przylegające bezpośrednio do ośrodka drgającego wykazują nieznaczny ruch w kierunku pionowym. Obróbka prowadzona w takich warunkach sprzyja powstawaniu miejscowych zagłębień, co jest wynikiem tego, że zderzanie się kulek i przedmiotu obrabianego zachodzi zawsze w tym samym miejscu.

Gdy amplituda drgań pojemnika przekroczy wartość  $0,6 \pm 1$  mm, zaczyna się pojawiać ruch chaotyczny kulek. Tor poszczególnych elementów wsadu jest podobny do drogi cząsteczki podczas tzw. ruchów Browna w ośrodku gazowym (jest zupełnie przypadkowy i zachodzi we wszystkich kierunkach). Wsad zwiększa swoją objętość i równomiernie wypełnia cały pojemnik. Z chwilą wystąpienia chaotycznego ruchu kulek, powierzchnia obrabiana jest równomiernie, w związku z czym zanikają lokalne utwardzenia i następuje poprawa własności stereometrycznych warstwy wierzchniej.

#### 4.2. Wnioski o charakterze praktycznym.

Przeprowadzone badania pozwoliły na ustalenie zależności pomiędzy stanem fizykalnym a własnościami użytkowymi warstwy wierzchniej.

1. Otrzymane w wyniku obróbki naprężenia ściskające wpływają na bardzo wydatne zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej. Wzrost ten jest tym większy, im bardziej intensywne parametry technologiczne stosowane są w czasie obróbki. Stwierdzono też, że największy przyrost wytrzymałości zmęczeniowej występuje przy materiałach sprężystych, takich jak stal 50HS. Nasuwa się przez to wniosek, że obróbka wibracyjna może mieć szerokie zastosowanie przy wzmacnianiu mechanicznym płaskich resorów i listew wałka skrętnego (stosowanego w nowych rozwiązaniach pojazdów mechanicznych).
2. W trakcie doświadczeń stwierdzono, że wibratory bezwładnościowe dwumasowe w pełni nadają się do stosowania w obróbce powierzchniowej zgniotem metodą wibracyjną. Cechują się one prostotą konstrukcji, niezawodnością działania i zapewniają uzyskanie wysokich przyspieszeń w czasie obróbki.
3. Przy stosowaniu wibratorów bezwładnościowych zalecana jest praca urządzenia przy częstotliwościach pozarezonansowych. Przy projektowaniu układów zawieszenia należy tak dobrać stałą sprężystości, by częstotliwości rezonansowe nie wypadły zbyt wysokie ( $\nu_w = 15 \div 30, \frac{1}{s}$ ). Ze względu na sprawność energetyczną układu napędowego i bezpieczeństwo pracy, wskazane jest ograniczenie górnego zakresu częstotliwości do  $70, \frac{1}{s}$ .

Pódczas uruchamiania urządzenia, przechodzenie przez zakres częstotliwości rezonansowych powinno być dostatecznie szybkie, aby nie dopuścić do nadmiernego wzrostu amplitudy. Do napędu

mniejszych jednostek można stosować silniki klatkowe indukcyjne podłączone bezpośrednio do sieci.

4. Celem poprawy sprawności energetycznej układu napędowego, należy dążyć do konstruowania wibratorów o małym ciężarze własnym w stosunku do uzyskiwanych wielkości sił wymuszających.
5. Po przeanalizowaniu wpływu wielkości kulki na własności warstwy wierzchniej oraz uwzględnieniu zanieczyszczania się wsadu produktami odpadowymi, można stwierdzić, że średnica 8 mm jest najbardziej odpowiednia do wszystkich gatunków materiałów.
6. Najkorzystniejszy zgniot powierzchniowy uzyskuje się przy pokrywaniu przedmiotów obrabianych warstwą kulek o grubości  $\sim 20$  mm i wysokości pojemnika  $\sim 60$  mm.
7. Dobre wskaźniki użytkowe i fizyczne warstwy wierzchniej uzyskuje się przy czasie obróbki  $5 \div 10$  minut i amplitudzie drgań wibratora rzędu  $1 \div 3$  mm.
8. W czasie obróbki powierzchniowej zgniotem powstaje na ogół zupełnie nowa chropowatość powierzchni. Nierówności z obróbki poprzedzającej mogą ulec albo wgnieceniu albo rozwalcowaniu na powierzchni. To ostatnie zjawisko może zaistnieć przy zbyt stromych nierównościach (pow. szlifowane) i jest niekorzystne. Z tego względu, jako obróbkę poprzedzającą, należy stosować frezowanie, struganie, skrobanie itp. Takie powierzchnie wyjściowe mają mniej strome nierówności.

#### 4.3. Proponowane kierunki dalszych badań.

Wyniki badań i sformułowane wnioski końcowe oraz wzrastające zainteresowanie ze strony przemysłu obróbką powierzchniową zgniotem pozwalają wysunąć następujące propozycje odnośnie dalszych badań związanych z zakresem tematu.

Kierunek teoretyczno poznawczy.

- a. Opracowanie nieniszczącej metody określania intensywności zgniotu. Przewidywana droga - wykorzystanie ewentualnych zmian oporu elektrycznego, magnetycznego, przewodnictwa cieplnego lub zmiany własności sprężystych warstwy wierzchniej poddanej zgniotowi. Przewidywany efekt - możliwość określenia intensywności zgniotu w warunkach produkcyjnych i ułatwienie racjonalnego doboru parametrów technologicznych obróbki.
- b. Badanie efektywności zgniotu w podwyższonych temperaturach. Przewidywane zastosowanie praktyczne - wzmacnianie mechaniczne łopatek turbin i innych elementów maszyn pracujących w podwyższonych temperaturach.
- c. Prowadzenie badań nad wytrzymałością zmęczeniową w warunkach korozji naprężeniowej. Należy przypuszczać, że naprężenia ścis-kające utrudniają przenikanie czynnika korodującego w głąb materiału poddanego zmiennym obciążeniom.

Kierunek konstrukcyjny.

- a. Prowadzenie badań nad wyciszaniem hałasu towarzyszącego procesowi obróbki. Przewidywana droga - zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych, budowa specjalnej kabiny itp.
- b. Opracowanie sposobu oczyszczania kulek od produktów odpadowych powstających w czasie obróbki (bez konieczności okresowego mycia kulek). Przewidywany sposób - przedmuch powietrza (odpowiednia instalacja nawiewowo-wyciągowa).
- c. Zbudowanie urządzenia wibracyjno-rotacyjnego i przeprowadzenie badań rozpoznawczych. Należy przypuszczać, że jednoczesny ruch obrotowy i drgający umożliwi równomierną obróbkę przedmiotów o skomplikowanej konfiguracji. Ewentualny dodatek do wsadu niewielkiej ilości materiałów ściernych może polepszyć gładkość obrabianej powierzchni.

Kierunek technologiczny.

- a. Przeprowadzenie doświadczeń przy zastosowaniu kulek szklanych zamiast metalowych. Przewidywany cel - przez dodanie cieczy trawiącej do wsadu wystąpi możliwość równoczesnego prowadzenia procesu obróbki zgniotem i usuwania zgorzeliny.
- b. Zbadanie możliwości równoczesnego prowadzenia obróbki powierzchniowej zgniotem i obróbki pokryciowej przez dodanie do wsadu sproszkowanych metali, takich jak miedź, aluminium lub kadm.
- c. Wskazane jest przeprowadzenie badań nad powierzchniowym utwardzaniem narzędzi (po hartowaniu) wykonanym ze stali szybkotnącej. Przewidywany efekt - zamiana austenitu szczątkowego w martenzyt i zwiększenie twardości narzędzi.



L i t e r a t u r a .

- [1] Adamson A.W.: Chemia fizyczna powierzchni, PWN, Warszawa 1963
- [2] Birger J.A.: Ostateczne naprężenia, Maszgiz, Moskwa 1963.
- [3] Bułat A.: Urządzenie do badania zmęczeniowego próbek płaskich na zginanie, Patent JOS nr 56063.
- [4] Baranow W.N.: Eliktrohidrauliczeskije i gidrauliczeskije wibracjonnyje mechanizmy. Maszynostrojenije, Moskwa, 1966.
- [5] Buch A.: Zagadnienie wytrzymałości zmęczeniowej, PWN, Warszawa, 1964.
- [6] Chruszczow M.M.: Isliedowanije iznasziwanija metali, Babiczew A.M.: ANSSSR, Moskwa, 1960.
- [7] Czubak : Przenośniki wibracyjne "Śląsk", Katowice, 1964.
- [8] Czech W.: Zbadanie wpływu i ustalenie optymalnych warunków szlifowania wybranych gatunków stali na stan warstwy wierzchniej. Prace JOS. Sprawozdanie FIA-158/VII i FIA-158/VIII, Kraków, 1969.
- [9] Dybiec Cz., Siecla T.: Umacnianie metodą zgniotu. JMP, Warszawa, 1965.
- [10] Drozd M.S.: Głębina naklepanego słoja pri drobiestrujnoi obrabotce dietaliei. Wiestnik Maszynostrojenija, Nr 5, 1955.
- [11] Górski E.: Obróbka gładkościowa, WNT, Warszawa, 1963.
- [12] Hebda M.: Wybrane metody eksperymentalnej analizy naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Zeszyty Naukowe AGH, 1967.
- [13] Janecki J.: Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn, Heba M. WNT, Warszawa, 1969.
- [14] Jezierski : Obróbka powierzchniowa zgniotem. Przegląd Mechaniczny, Nr 17, 1967.

- [15] Jankowski E.: Materiały i wyroby ściernie. WNT, Warszawa, 1966.
- [16] Kaczmarek J.: Niektóre własności warstwy podpowierzchniowej obrobionej w warunkach zwiększonej wydajności skrawania. Czasopismo Techniczne, Czyżewicz A. Nr 9, 1958.
- [17] Kaczmarek J.: Problemy technologicznej jakości przedmiotów obrabianych. III Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna, listopad 1967 (Postępy w teorii i technice obróbki metali).
- [18] Kaczmarek K.: Badanie zależności zużycia ściernego niektórych gatunków stali od stanu naprężeń wymuszonych siłą zewnętrzną. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Kraków 1965.
- [19] Kaczmarek J.: Wpływ stanu naprężeń na ścieranie luźnym Summer-Brason K. ścierniwem. Przegląd Mechaniczny, Nr 13, 1964.
- [20] Kaczmarek J.: Podstawy skrawania metali, PWT, Warszawa, 1956.
- [21] Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej, WNT, Warszawa 1970.
- [22] Kaczmarek J.: Niektóre właściwości powierzchni i warstwy podpowierzchniowej konstrukcyjnej stali węglowej obrabianej strumieniowo-ściernie. Mechanik, Nr 11, 1958.
- [23] Katarzyński S.: Badanie własności mechanicznych metali. Kocańda S. Zakrzewski M. WNT, Warszawa, 1967.
- [24] Keller Cz.: Badanie nad wpływem warunków obróbki na rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stali hartowanej. Praca doktorska, Kraków, 1961.
- [25] Konowałow E.G.: Czistowaja i upraczniajuszczaja rotacyjna obrabotka powierzchnostiej, Mińsk, 1968.
- [26] Kolman R.: Mechaniczne wzmacnianie powierzchni części maszyn. WNT, Warszawa, 1965.



- [27] Kottriell A.Ch.: Dislokacji i plasticzeskoje tieczenije w kristałłach. GNTJ, Moskwa, 1958.
- [28] Kostieckij B.J., Koliesniczenko J.E. : Kacziestwo powierchnostii i trienije w maszinach. Tiechnika, Kijew, 1969.
- [29] Latour A.: Skrawalność metali i metody jej określania. WNT, Warszawa 1962.
- [30] Markowski S.: Naprężenia własne po obróbce skrawaniem. Mechanik nr 11, 1958.
- [31] Markowski S.: Badanie naprężeń własnych w węglkach spiekanych po obróbce szlifowaniem. Prace JOS, nr 2, 1959.
- [32] Mac Daff J.N., Curreri J.R.: Drgania w technice. PWT, Warszawa 1960.
- [33] Masłow E.N.: Osnovy tieorii szlifowanija mietałłow. Maszgiz, Moskwa, 1951.
- [34] Marciniak M.: Analiza dynamiki wygładzarek wibracyjnych i jej zastosowanie do wyboru optymalnych parametrów obróbki. Praca doktorska, Warszawa 1968.
- [35] Moszyński W: Wytrzymałość zmęczeniowa części maszyn. PWT, Warszawa, 1953.
- [36] Mitzshe K.: Ispitanije mietałłow, Moskwa, 1967.
- [37] Owsienko A.N.: Wybor optimalnoj tołszcziny obrazca pri opriedielenii ostatocznych napriazhenii w powierchnostnom słoje. Wiestnik Maszynostrojenija, 1956.
- [38] Polański Z.: Rozwój obróbki plastycznej dogniataniem. Mechanik, nr 11, 1969.
- [39] Polański Z.: Badanie warstwy wierzchniej wybranych materiałów stosowanych na narzędzia do obróbki plastycznej na zimno, kształtowane za pomocą drążenia elektroiskrowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, 1968.
- [40] Polański Z.: Praktyczne metody wyznaczania niektórych wzorów empirycznych. Pomiar i Automatyka, Kraków, nr 6, 1963.

- [41] Ponomarew S.D.: Współczesne metody obliczeń wytrzymałościowych w budowie maszyn, PWN, Warszawa 1957.
- [42] Praca zbiorowa: Nazewnictwo warstwy wierzchniej. Prace JCS. Materiały instruktażowe, 1968.
- [43] Parol A.: Szlifowanie metali taśmami ściernymi. Magazyn Technologa Przemysłu Lotniczego i Silnikowego, Nr 11, 1969.
- [44] Parol A.: Badanie wpływu obróbki powierzchniowej zgniotem za pomocą luźnych kulek metodą wibracyjną na stan naprężeń własnych stali 55. Zeszyty Naukowe WSI, Lublin 1971.
- [45] Przybylski: Badania wpływu nagniatania oraz szlifowania na niektóre własności warstwy wierzchniej obrabianych powierzchni ze stali 45. PNN, wydz.IV. Prace Ośrodka Gdańskiego w zakresie teorii i techniki skrawania oraz metrologii warsztatowej, 1968.
- [46] Przybylski W.: Obróbką elementów maszyn nagniataniem. Przegląd Mechaniczny, Nr 4, 1967.
- [47] Pełczyński T.: Wpływ stanu naprężeń na przejście materiałów w stan plastyczny. Przegląd Mechaniczny, Nr 6-7, 1951.
- [48] Piszczek K.: Drgania w budowie maszyn. PWN, Łódź-Warszawa-Kraków, 1965.  
Walczak J.
- [49] Skrzypiński A.: Badania stanu warstwy wierzchniej w płytkach wzorcowych. Praca doktorska, AGH, Kraków, 1969.
- [50] Solski P.: Zużycie ściernie metali. WNT, Warszawa 1968.
- [51] Stetko A.: Czynniki mechaniczne wpływające na przebieg obróbki wibracyjnej luźnym ziarnem ściernym. Praca doktorska, Warszawa 1967.
- [52] Sawierin M.M.: Drobiestrujnyj nakliop. Teorieteczeskoje osnovy i praktika primienienija. GNTI, Moskwa, 1955.

- [53] Cznejder J.G.: Kacziestwo powierchnostii i eksploatacijonnyje swojstwa dietaliej obrabotannyh dawlieniem. Stanki i instrument, Nr 1, 1967.
- [54] Timoszenko C.P.: Koliebanija w inzieniernum dielie. G.J.F. M.L., Moskwa, 1959.
- [55] Zachwieja T.: Badanie niektórych zależności technologicznych w celu optymalizacji warunków elektrochemiczno-ścierniej obróbki węglików spiekanych ściernicą diamentową. Praca doktorska, A.G.H., Kraków 1970.
- [56] Łukowski S.: Sprężyny. PWT, Warszawa 1954.
- [57] Ziemba S.: Analiza drgań. PWN, Warszawa, 1957.
- [58] Zawadzki J.: Mechanika. PWN. Warszawa-Wrocław 1962. Siuta.
- [59] Bielajew N.M.: Soprotiwlieniye materialow. GJTL Moskwa-Leningrad 1951.



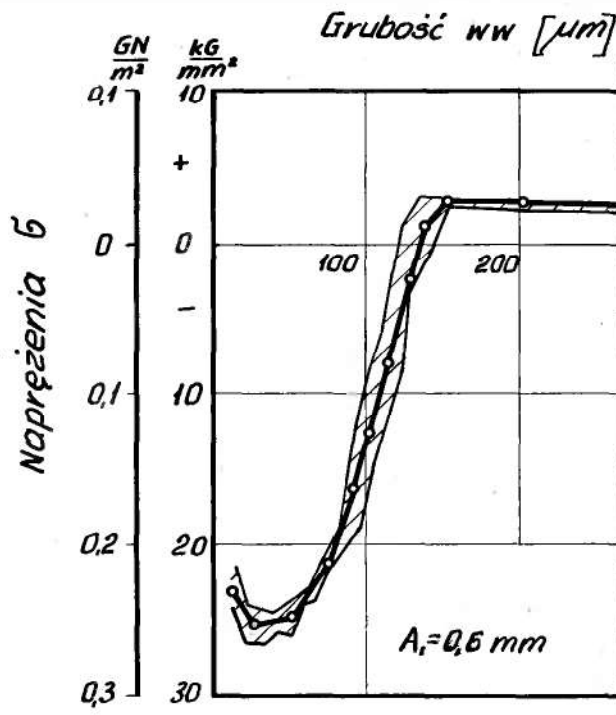
Mgr inż. Adolf Parol

Z A Ł A C Z N I K  
D O P R A C Y D O K T O R S K I E J

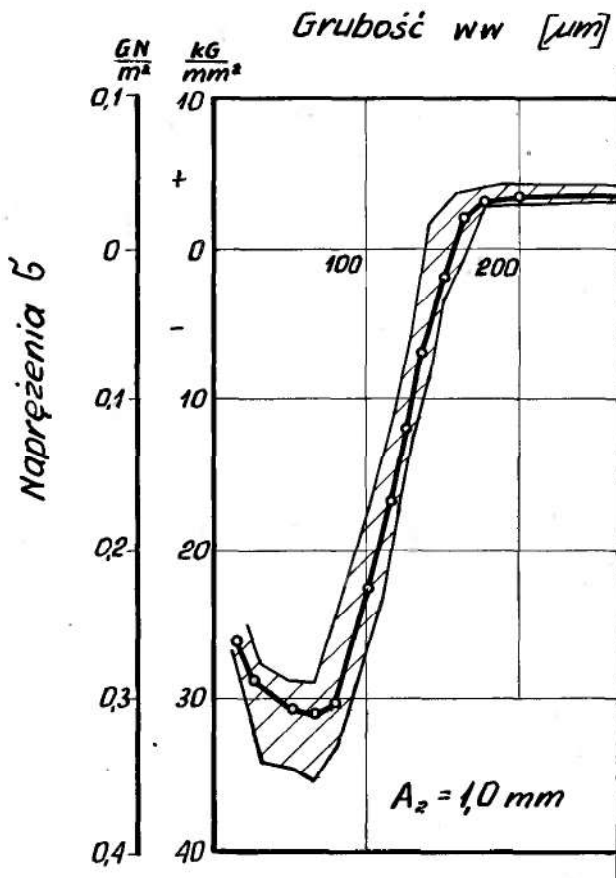
Kraków 1971.

## S p i s r y s u n k ó w

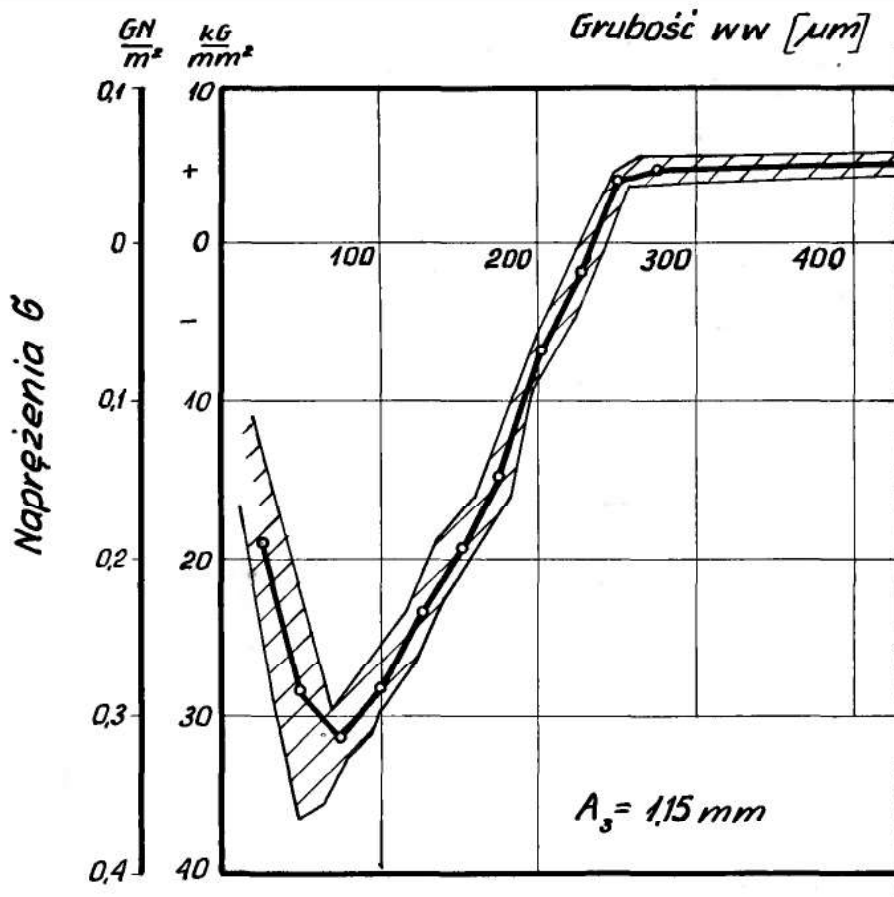
- Rys. 1<sub>z</sub> - 21<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej w stali 55 w zależności od zmiennych parametrów technologicznych.
- Rys. 22<sub>z</sub> - 31<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej w materiałach różnych.
- Rys. 35<sub>z</sub> - 38<sub>z</sub> Intensywność trawienia warstwy wierzchniej stali 55.
- Rys. 39<sub>z</sub> Krzywizna próbki w zależności od strawionej grubości warstwy wierzchniej.
- Rys. 40<sub>z</sub> - 56<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej materiałów różnych.
- Rys. 57<sub>z</sub> - 77<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości od głębokości warstwy wierzchniej w stali 55 w zależności od zmiennych parametrów technologicznych.
- Rys. 78<sub>z</sub> - 94<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości od głębokości warstwy wierzchniej w materiałach różnych.
- Rys. 95<sub>z</sub> - 114<sub>z</sub> Ćrzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem stali 55 w zależności od zmiennych parametrów obróbki.
- Rys. 115<sub>z</sub> - 130<sub>z</sub> Ćrzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem materiałów różnych.



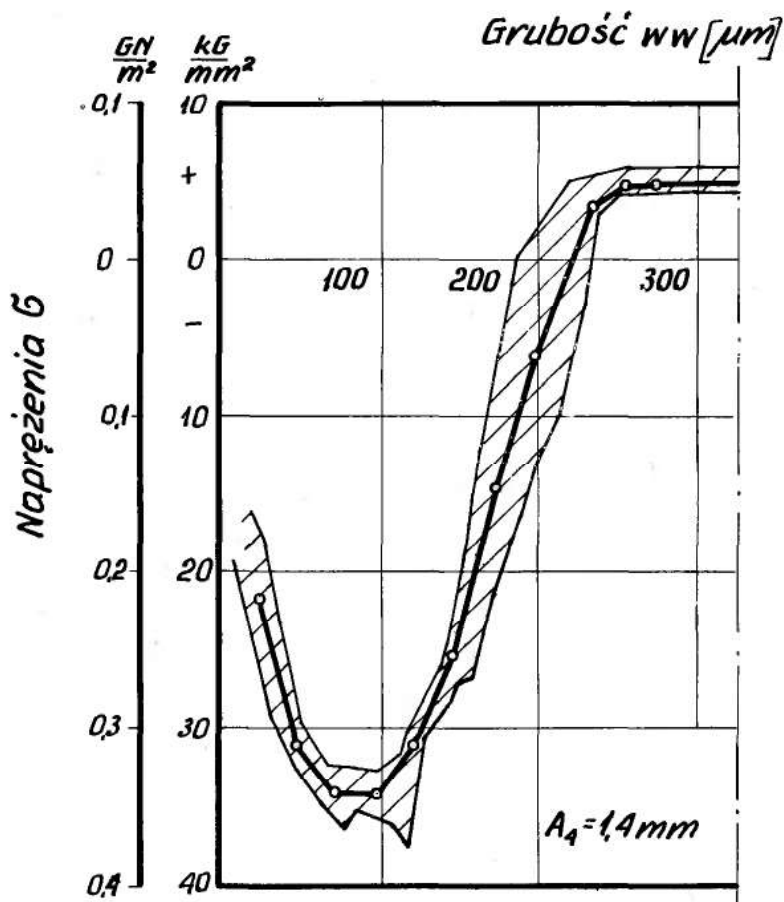
Rys. 1<sub>z</sub>



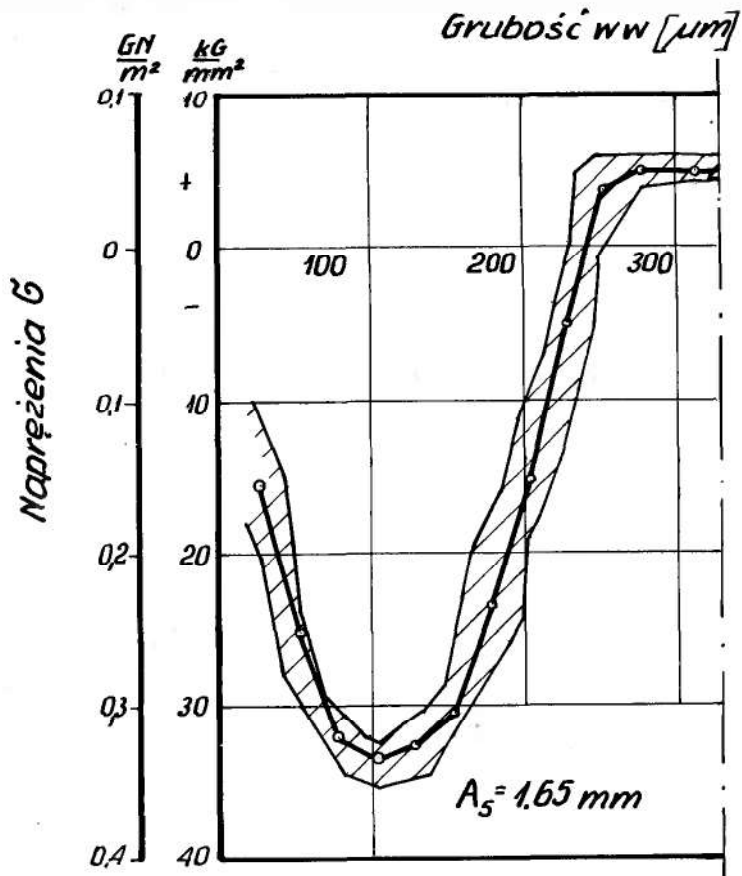
Rys. 2<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $A_1=0,6\text{mm}$  (rys. 1<sub>z</sub>) i dla  $A_2=1,0\text{mm}$  (rys. 2<sub>z</sub>). Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.)  
Warunki obróbki:  $\phi_k = 5\text{mm}$ ,  $v = 70\frac{1}{2}$ ;  $t = 20\text{min}$ .



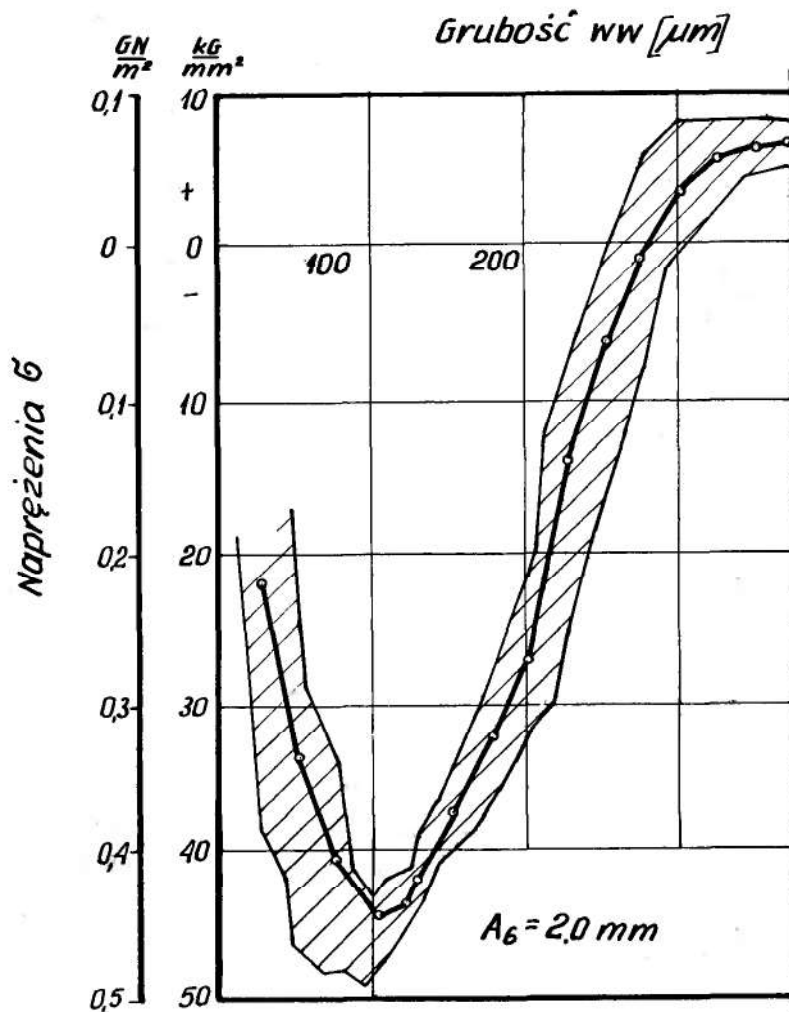
Rys. 3<sub>z</sub>



Rys. 4<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $A_3 = 1,15 \text{ mm}$  (rys. 3<sub>z</sub>) i dla  $A_4 = 1,4 \text{ mm}$  (rys. 4<sub>z</sub>). Mat.: stal 55 (wyz. i odpor). War. obr.:  $\phi_z = 5 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ .

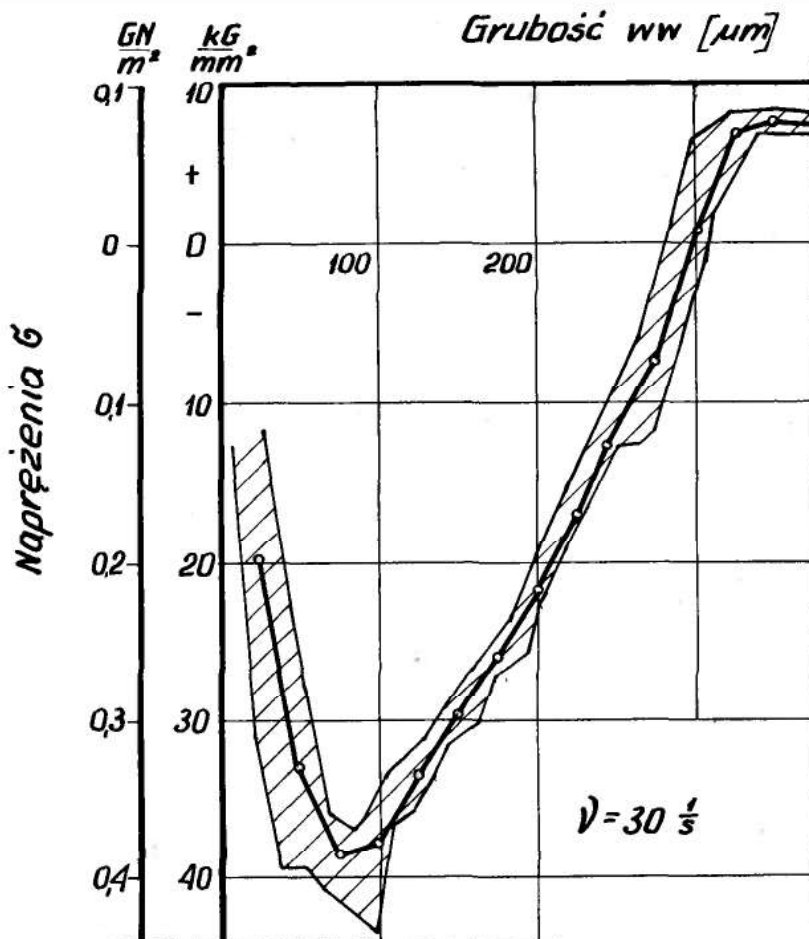


Rys. 5<sub>z</sub>

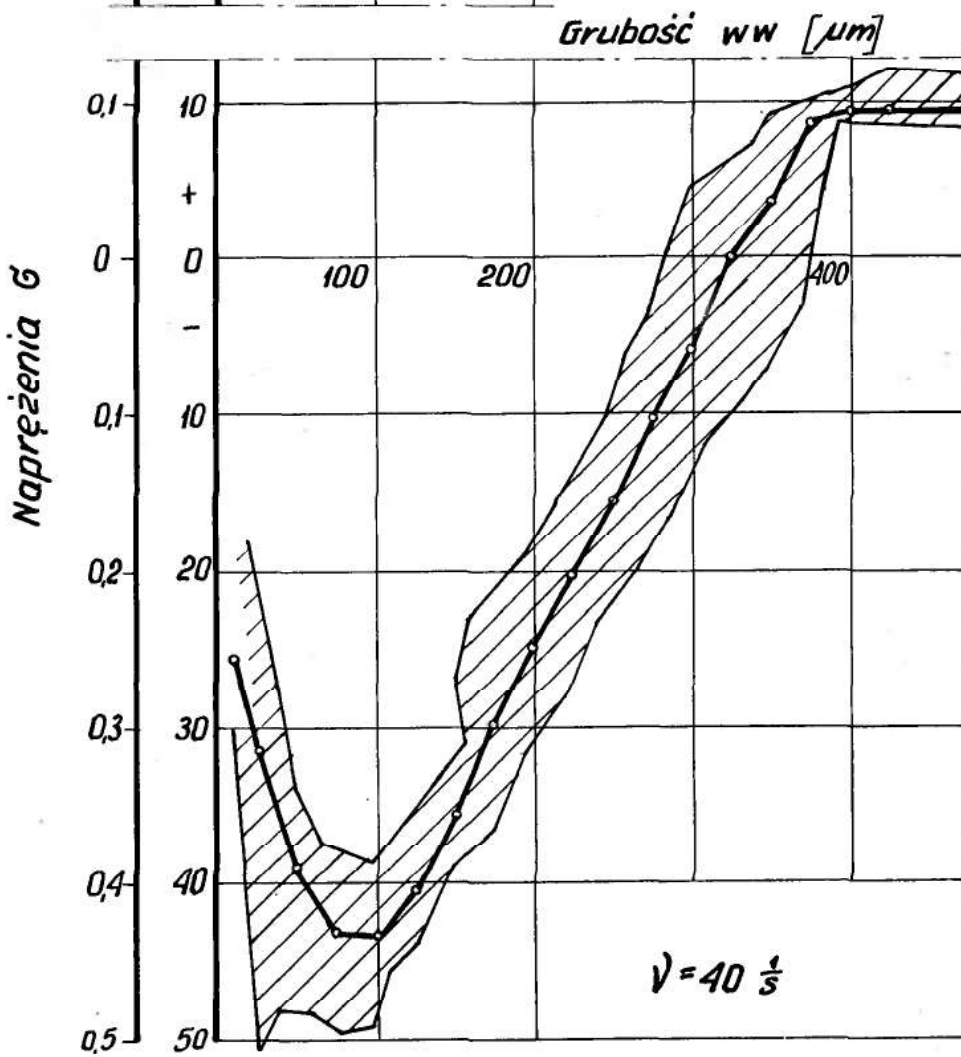


Rys. 6<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $A_5 = 1.65 \text{ mm}$  (rys. 5<sub>z</sub>) i dla  $A_6 = 2.0 \text{ mm}$  (rys. 6<sub>z</sub>). Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.)  
Warunki obróbki:  $\phi_k = 5 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \frac{1}{s}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ .

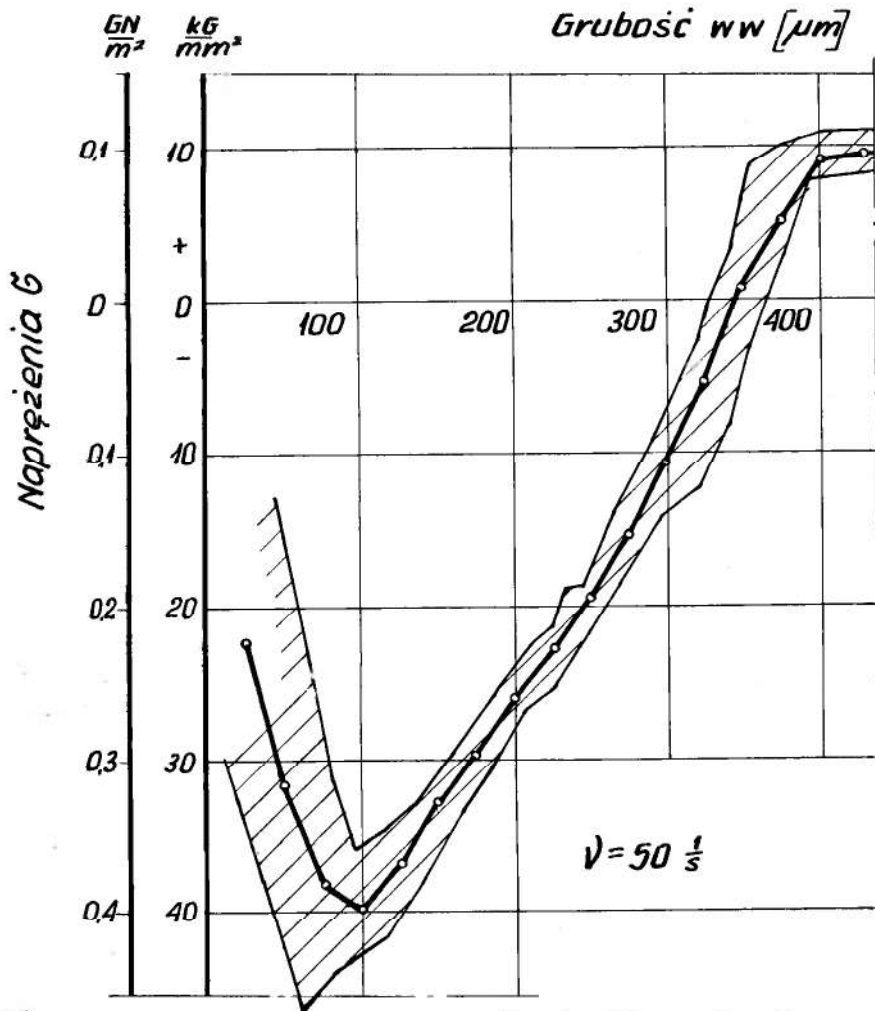




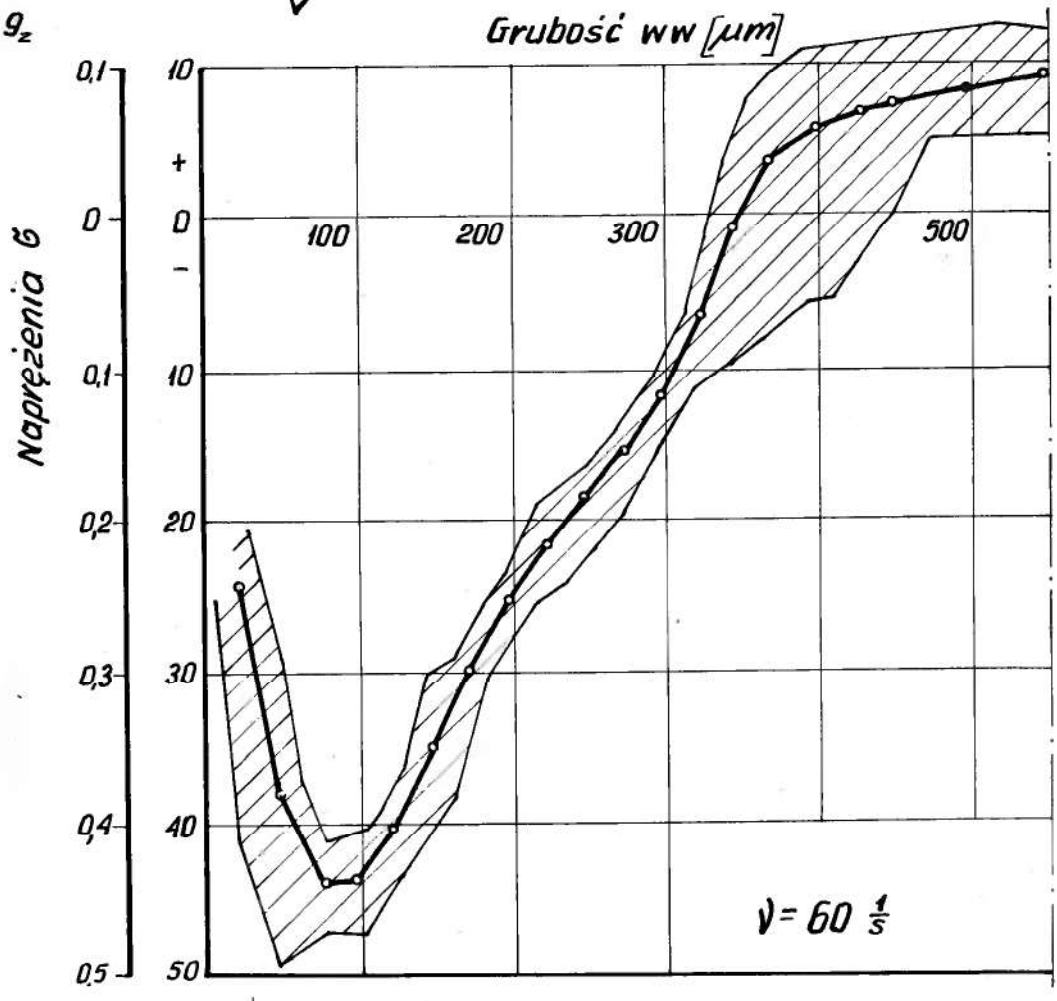
Rys. 7<sub>z</sub>



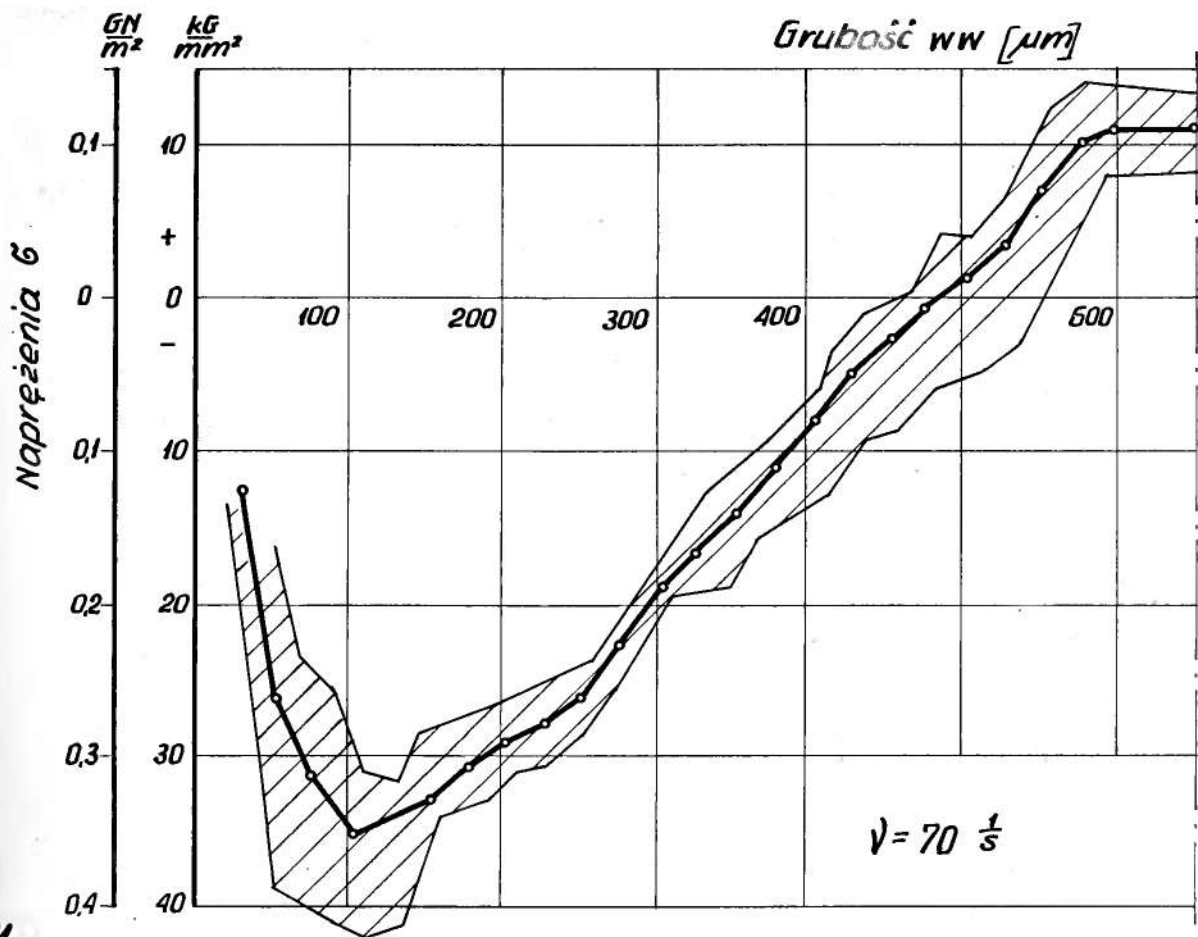
Rys. 8<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $v = 30 \frac{1}{3}$  (rys. 7<sub>z</sub>) i dla  $v = 40 \frac{1}{3}$  (rys. 8<sub>z</sub>). Mater.: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$



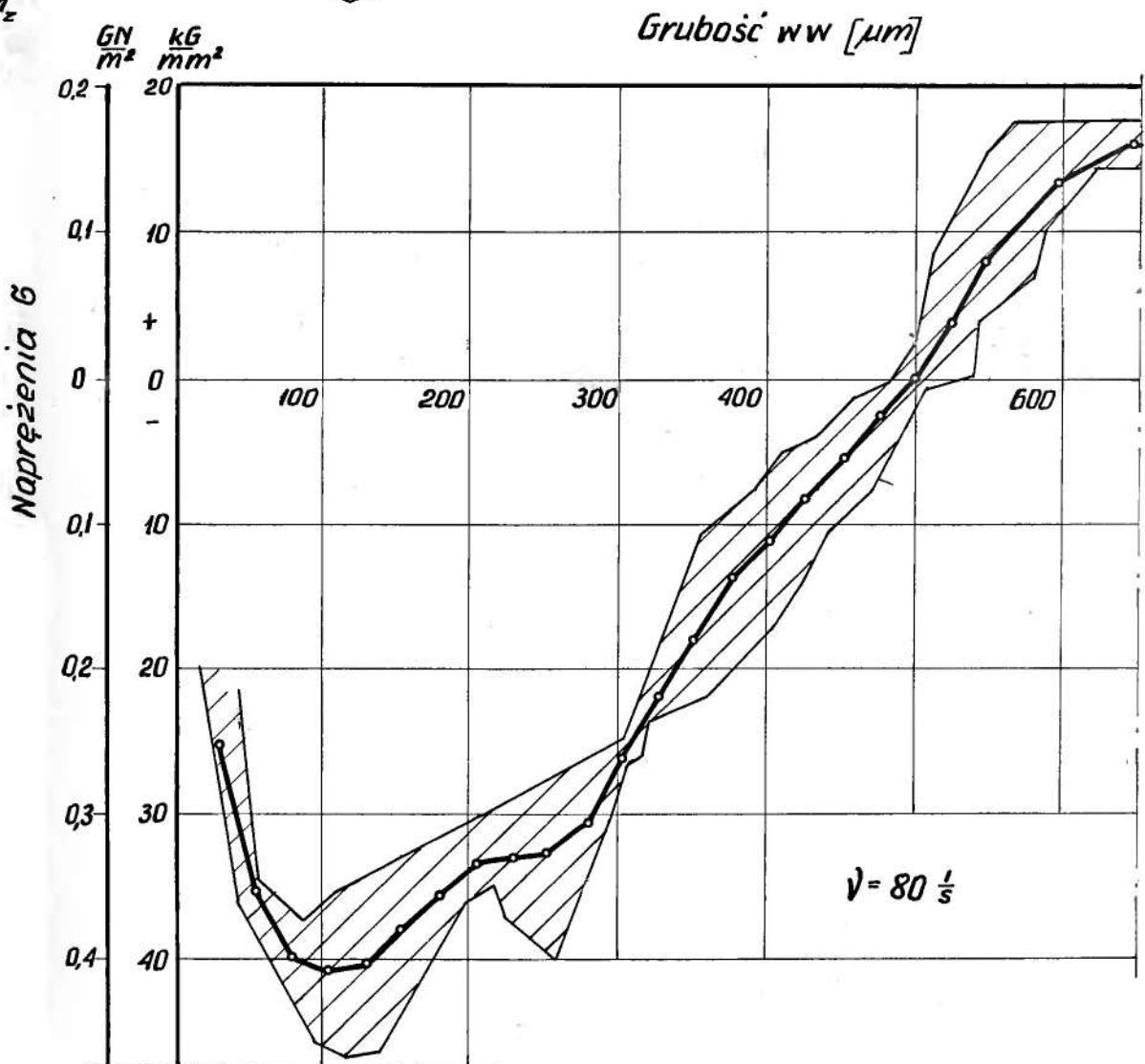
Rys. 9<sub>z</sub>



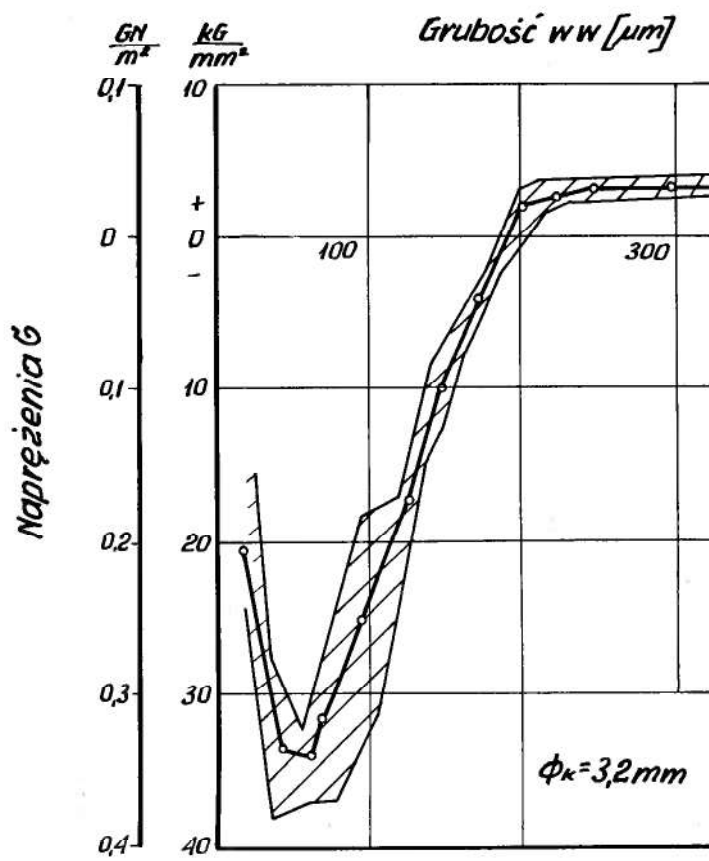
Rys. 10<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $v = 50 \frac{1}{3}$  (rys. 9<sub>z</sub>) i dla  $v = 60 \frac{1}{3}$  (rys. 10<sub>z</sub>). Mater.: stal 55 (wyz. i odpor.). War. obr.  $\phi_k = 8,7 mm$ ,  $t = 20 min.$



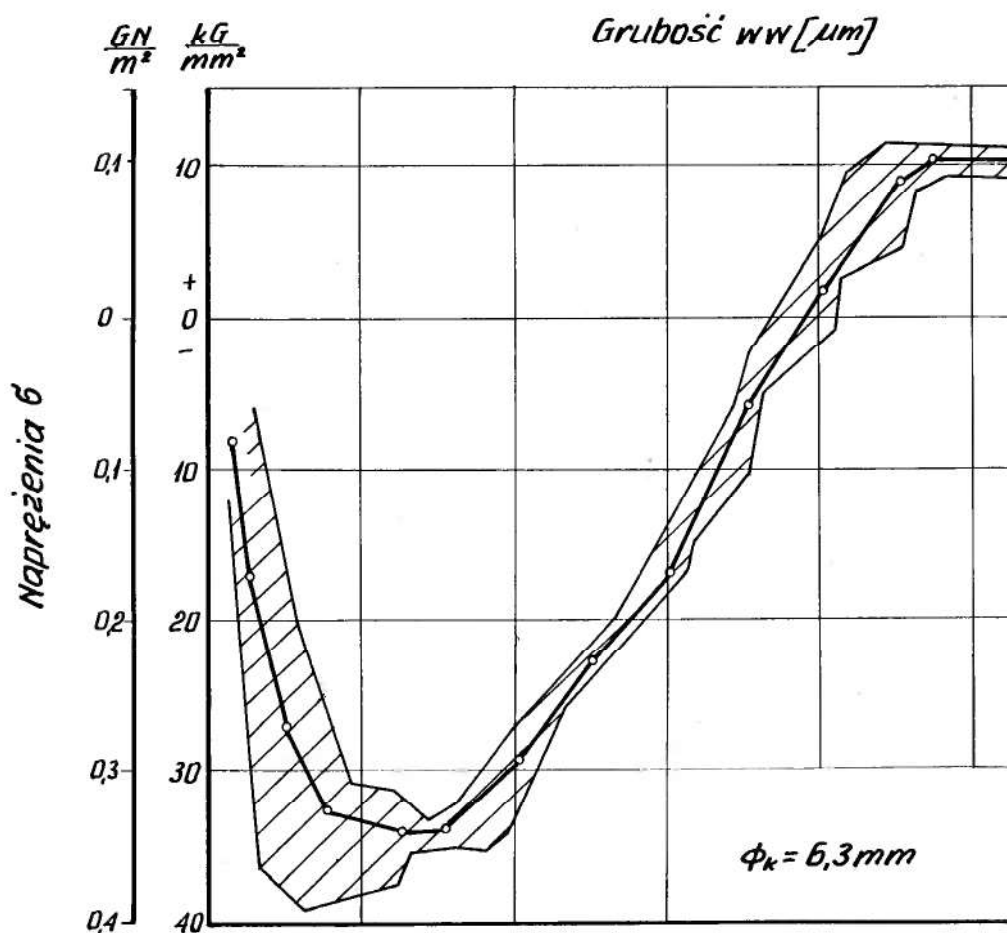
Rys. 11<sub>z</sub>



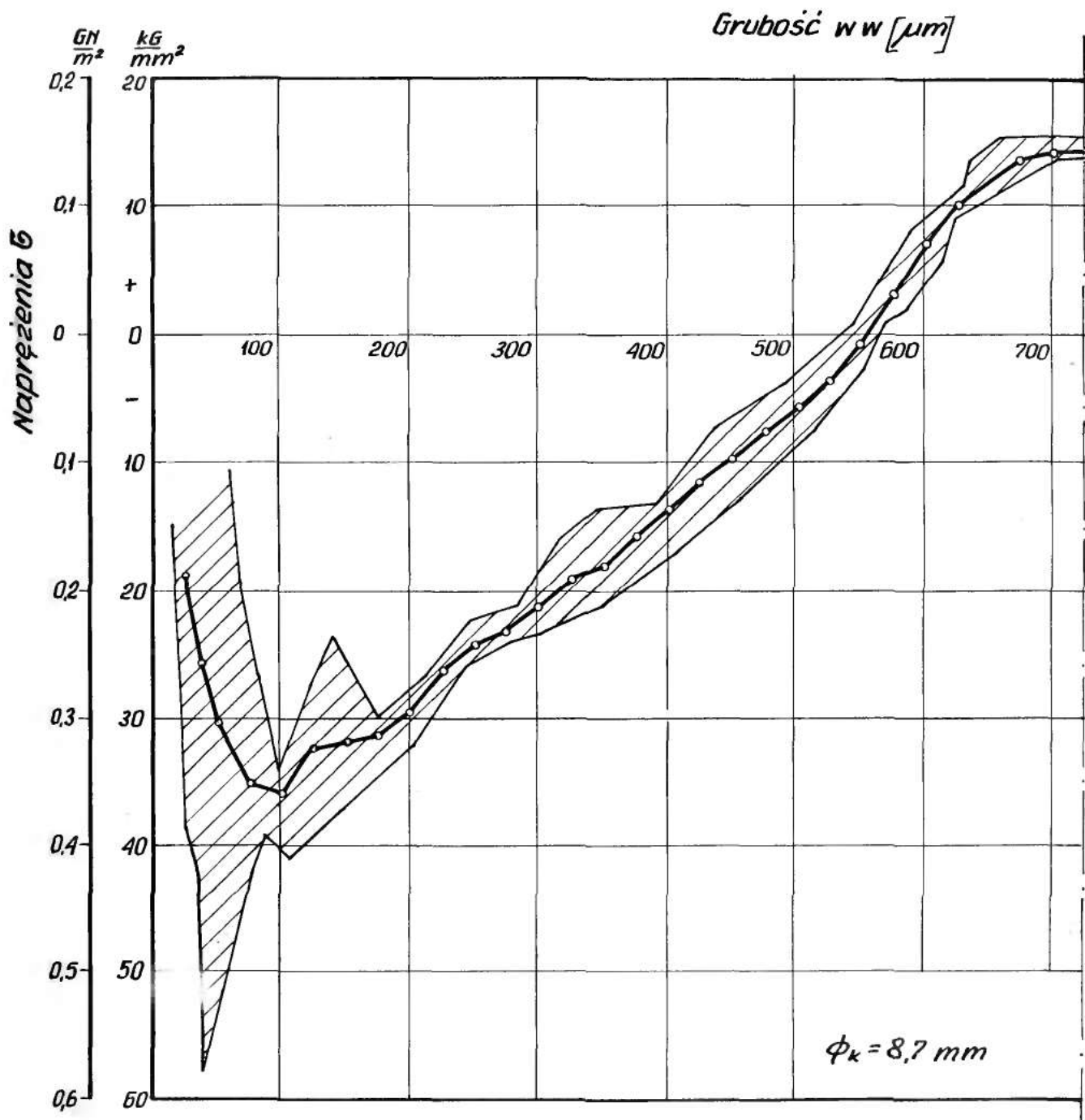
Rys. 12<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $v = 70 \frac{1}{s}$  (rys. 11<sub>z</sub>) i dla  $v = 80 \frac{1}{s}$  (rys. 12<sub>z</sub>). Mat.: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.:  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ .



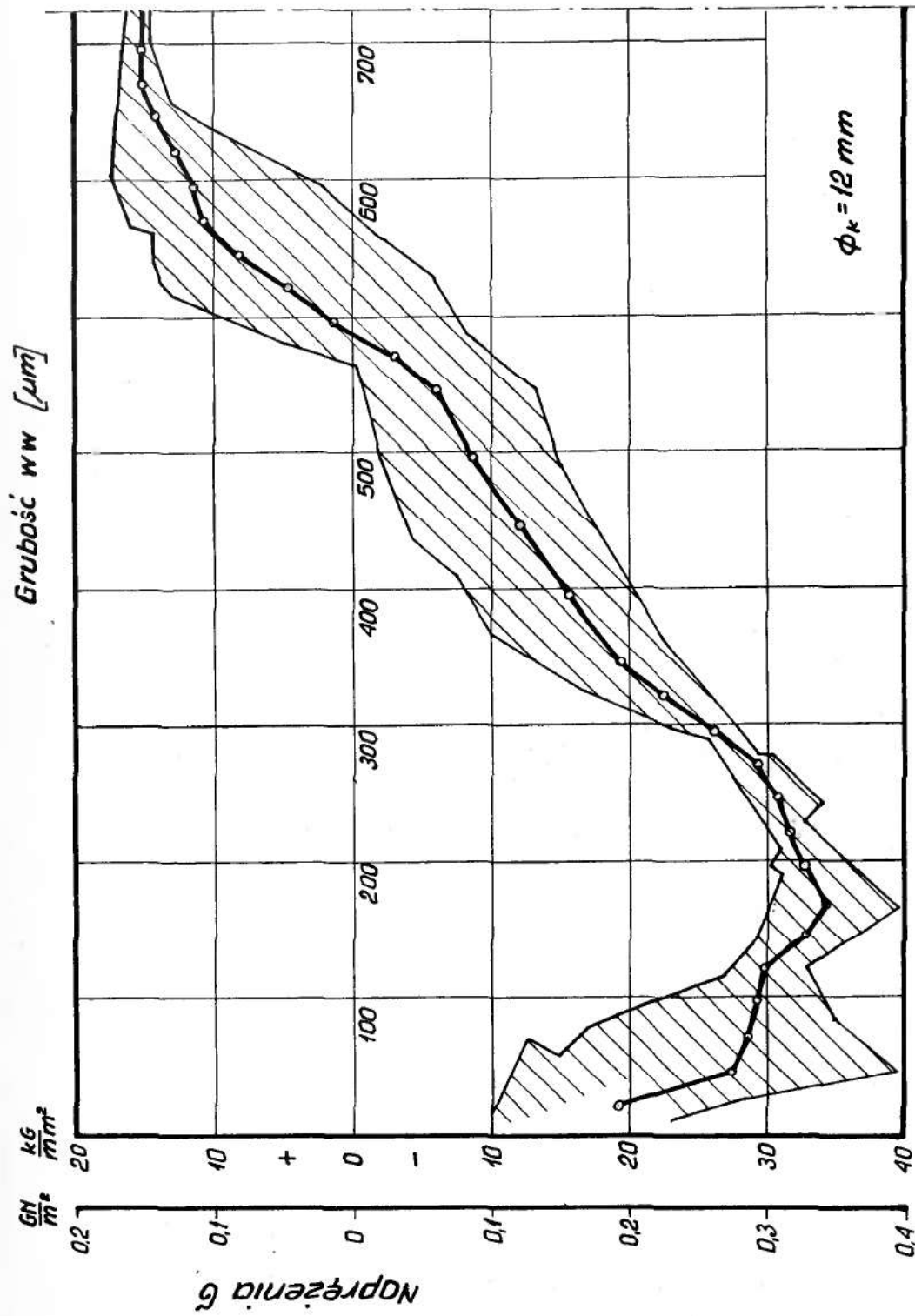
Rys. 13<sub>z</sub>



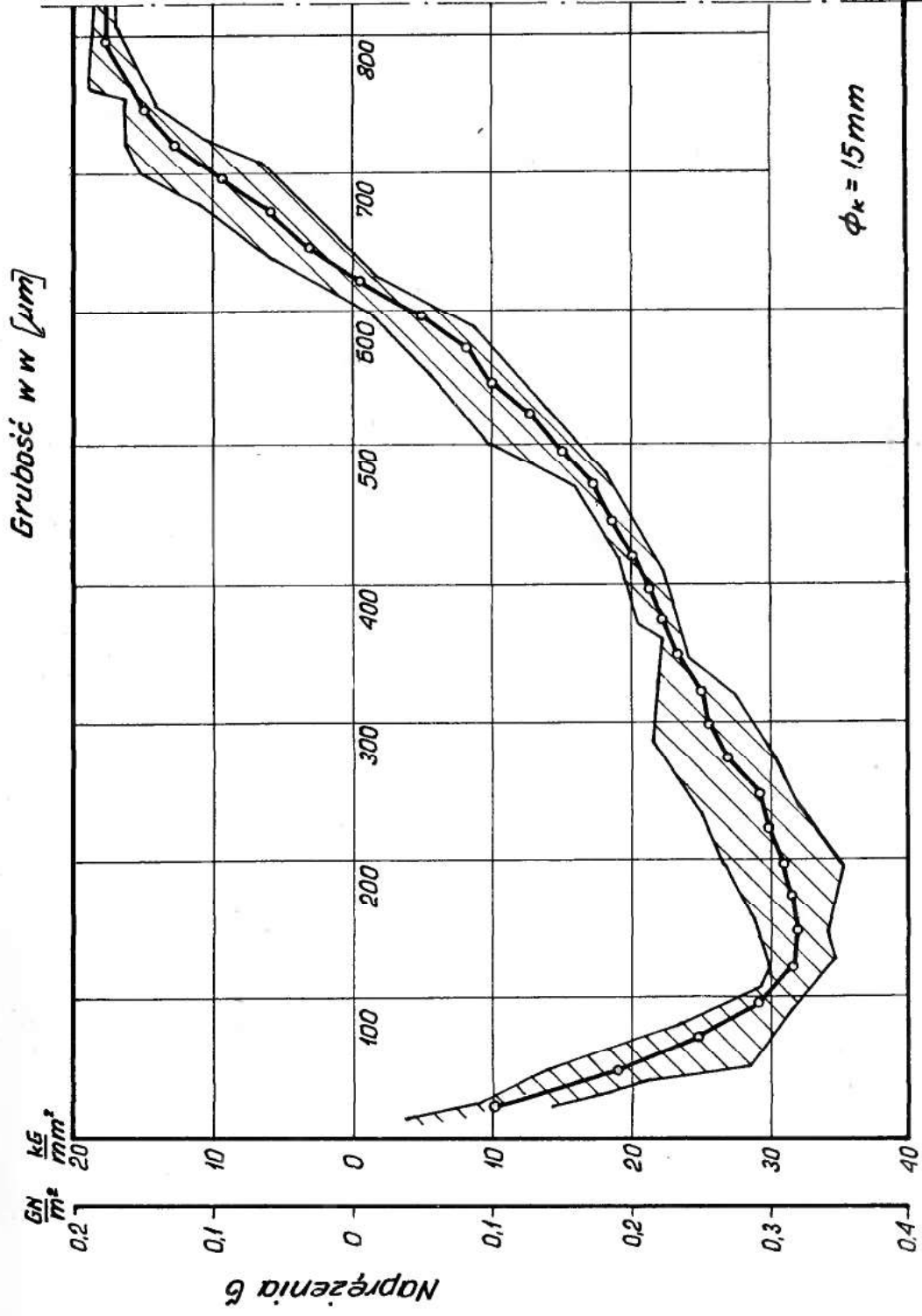
Rys. 14<sub>z</sub> Rozkład naprężen własnych w warstwie wierzchniej dla  $\phi_k = 3,2 \text{ mm}$  (rys. 13<sub>z</sub>) i dla  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$  (rys. 14<sub>z</sub>). Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.)  
Warunki obróbki:  $v = 70 \frac{1}{s}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ ,  $A = 2 \text{ mm}$ .



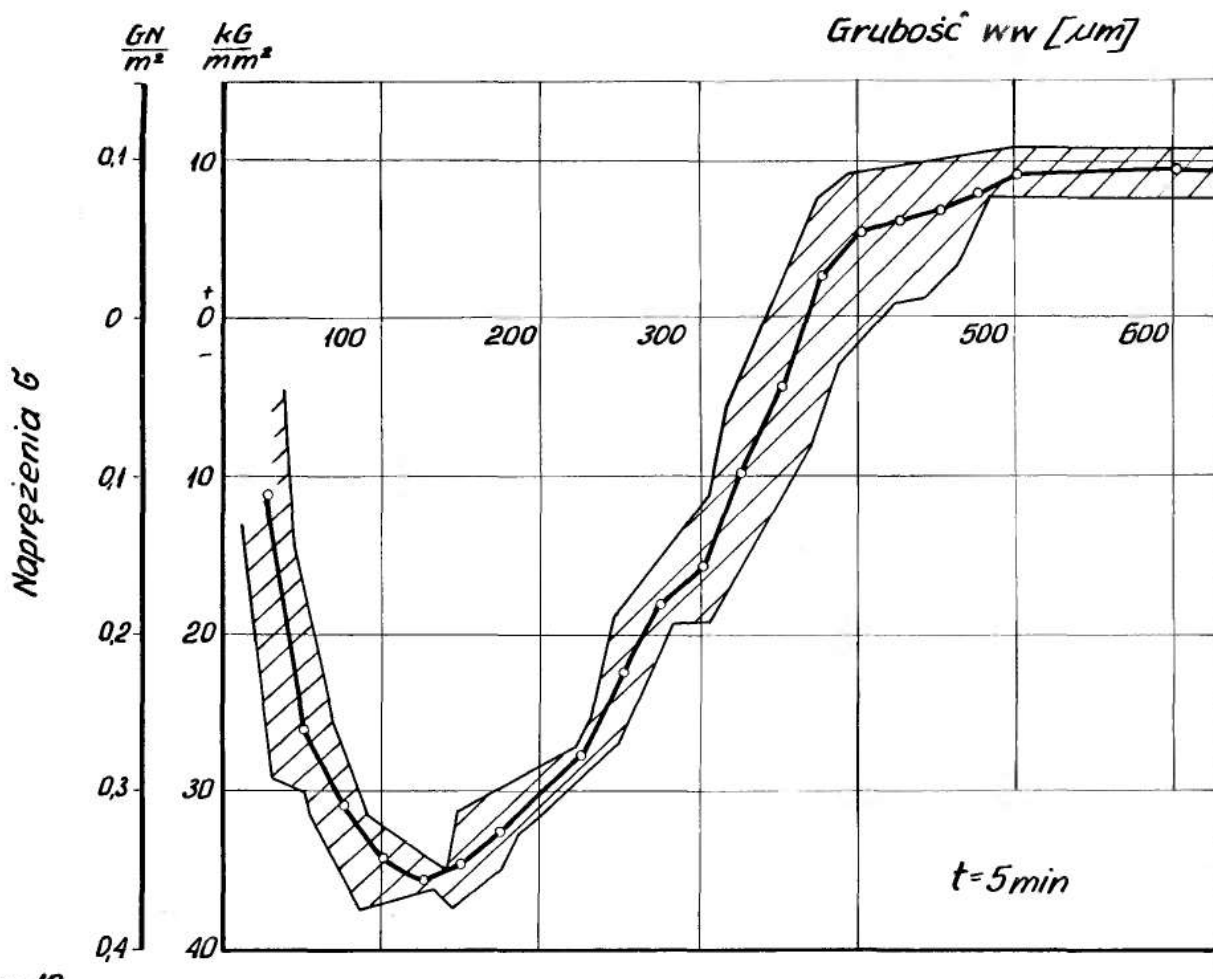
Rys.15<sub>2</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $\phi_{\kappa} = 8,7 \text{ mm}$   
 Materiał: stal 55 (wyż i odpr.) War. obr.:  $v = 70 \frac{1}{3}$ ;  $t = 20 \text{ min}$ ;  $A = 2 \text{ mm}$



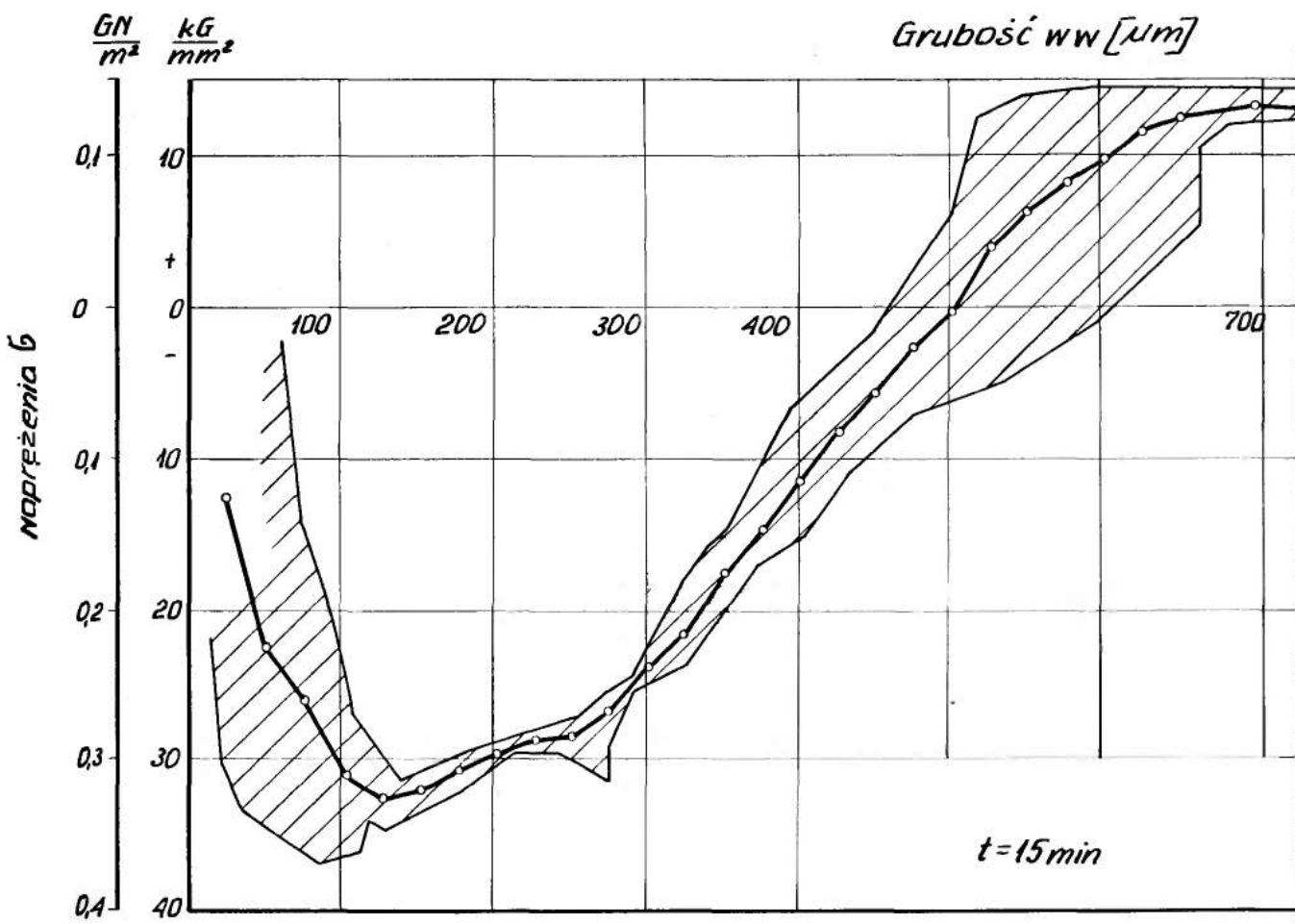
Rys. 16. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $\phi_k = 12 \text{ mm}$   
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $v = 70 \frac{1}{2}$ ;  $t = 20 \text{ min}$ ;  $A = 2 \text{ mm}$ .



Rys. 17. Rozkład naprężeni wtaśnych w warstwie wierzchniej dla  $\phi_k = 15 \text{ mm}$ .  
 Materiał: stal 55 (wyę. i odpr.). War. obróbki:  $v = 70 \frac{1}{2}$ ;  $t = 20 \text{ min}$ ;  $A = 2 \text{ mm}$ .

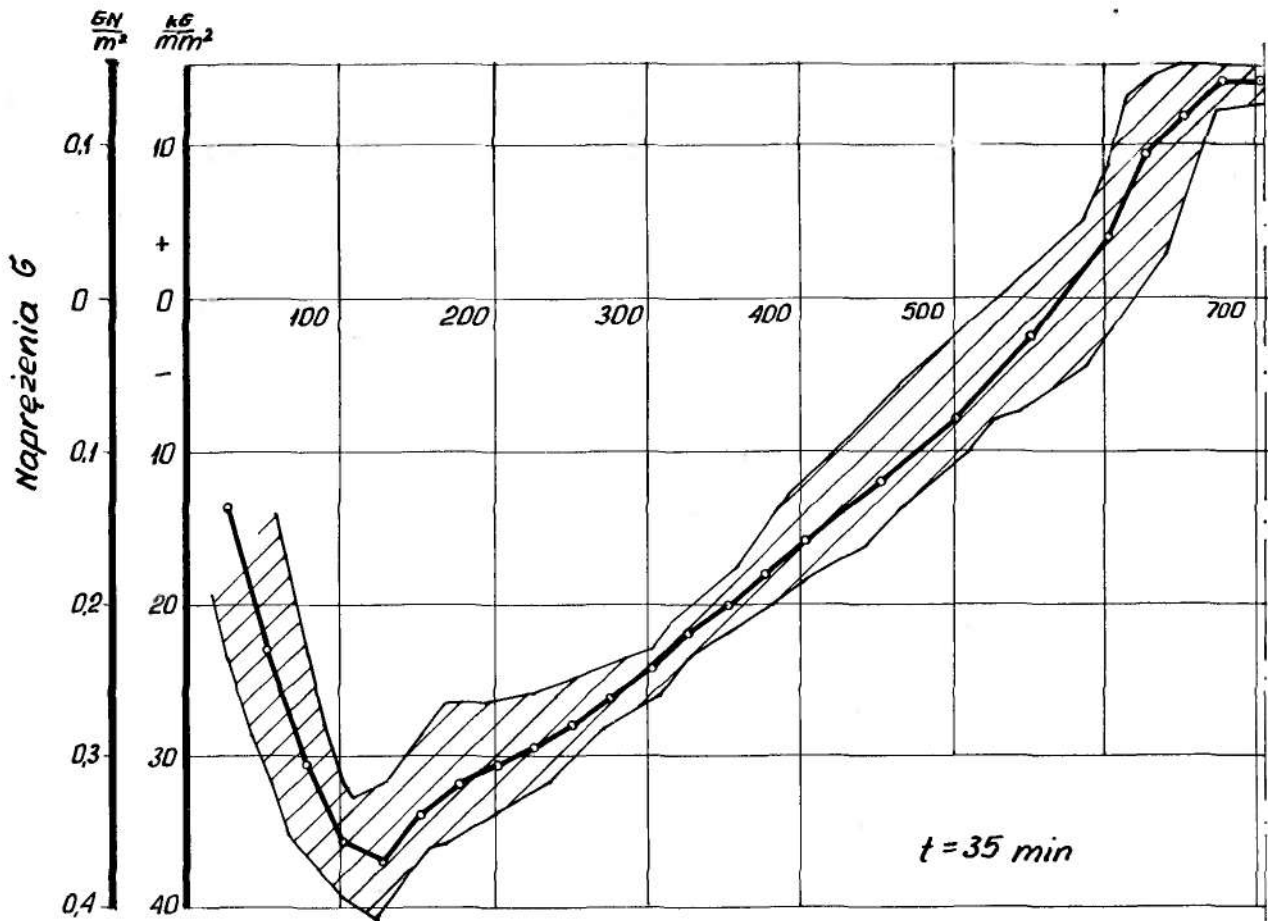


Rys. 18<sub>z</sub>

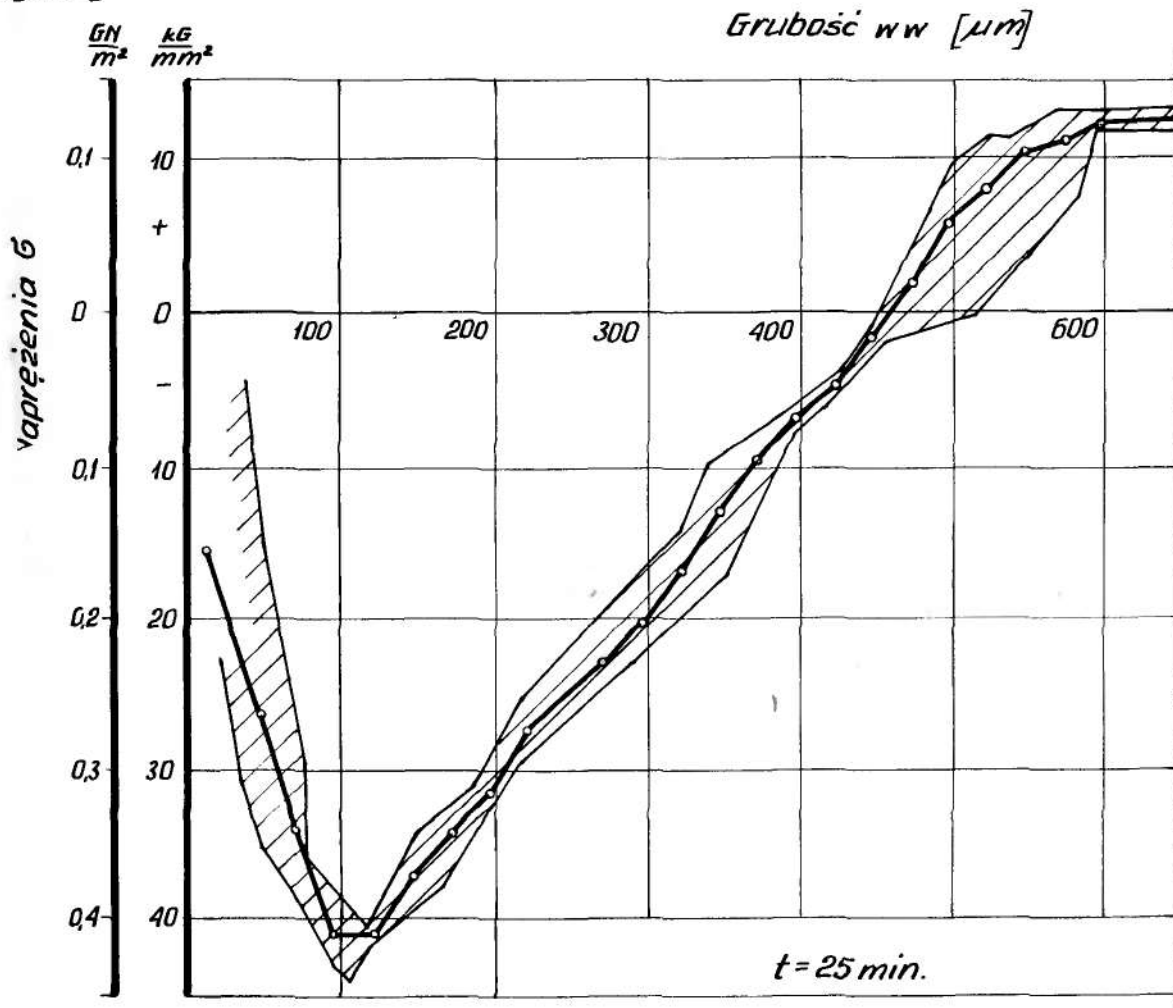


Rys. 19<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $t=5\text{ min}$  (rys. 18<sub>z</sub>) i dla  $t=15\text{ min}$ . (rys. 19<sub>z</sub>). Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3\text{ mm}$ ,  $v = 60\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $t = 10\text{ min}$ ,  $A = 2,15\text{ mm}$ .

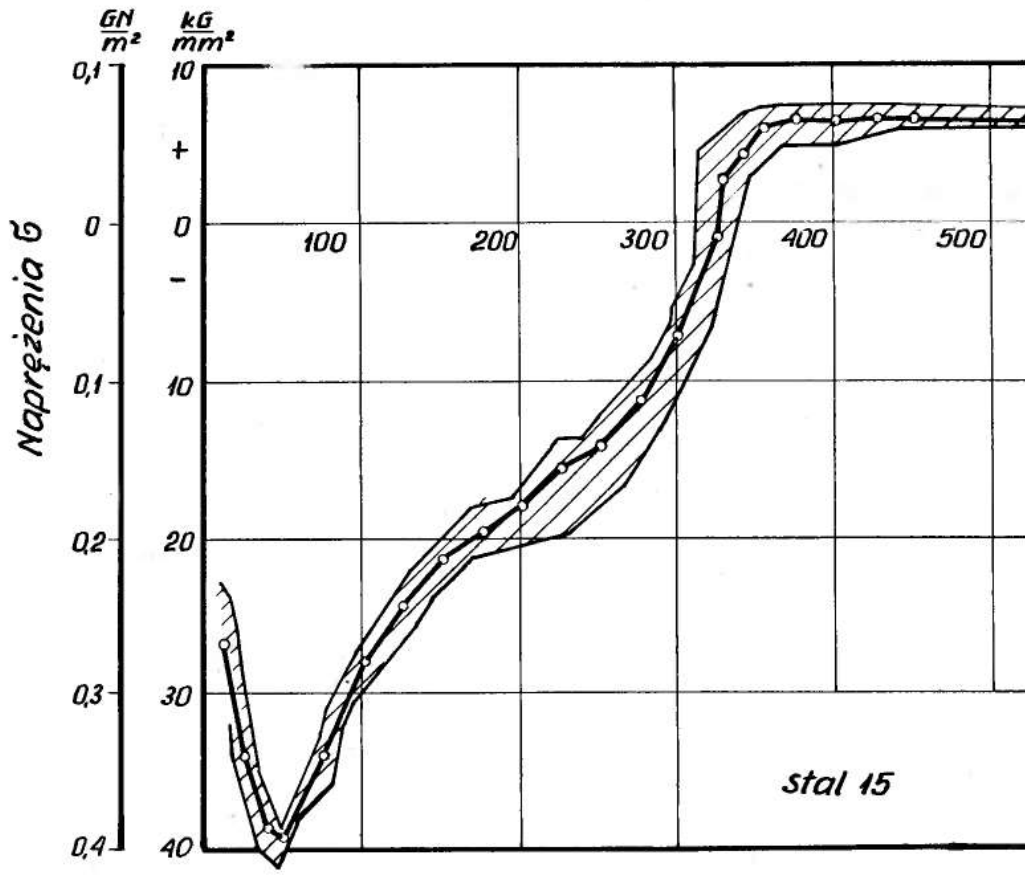




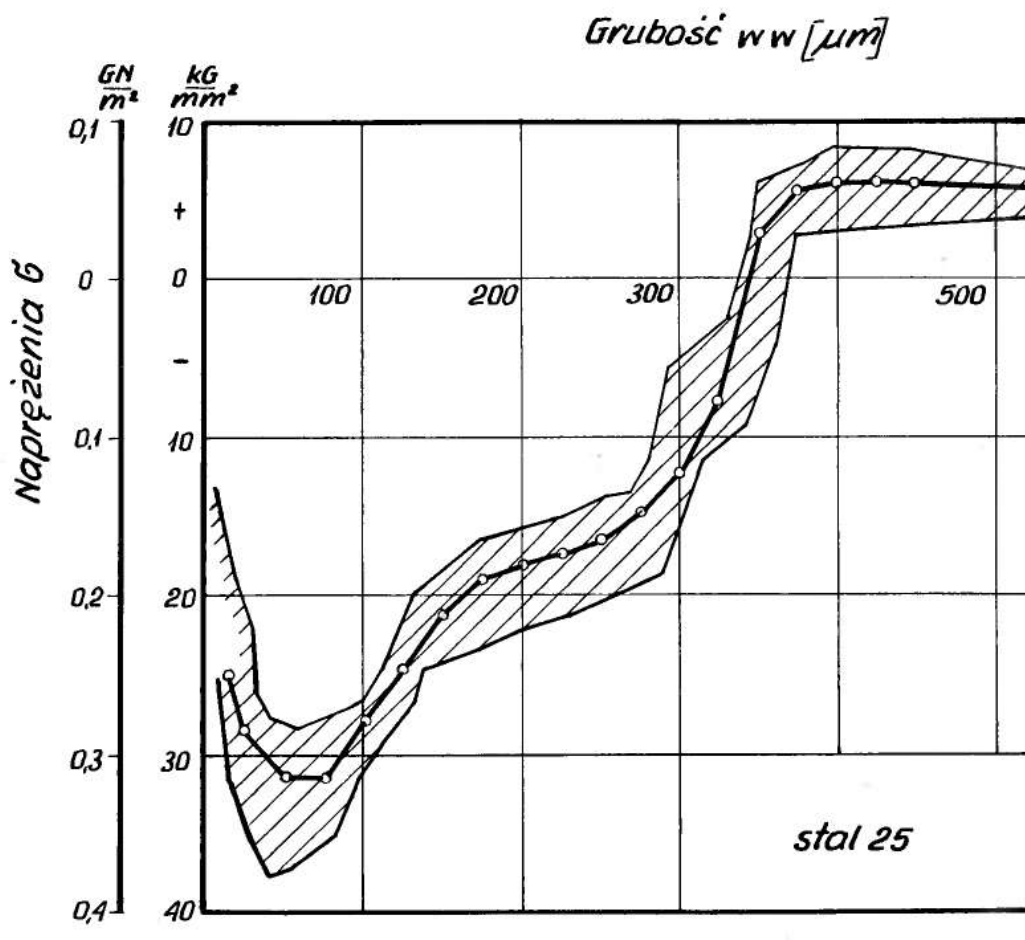
Rys. 20<sub>z</sub>



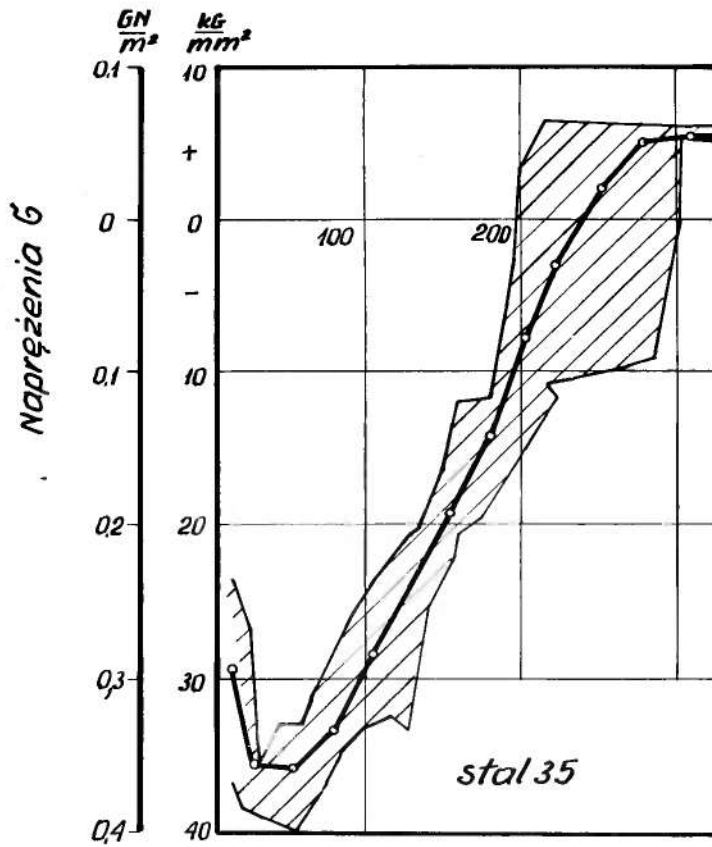
Rys. 21<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla  $t = 35$  min (rys. 20<sub>z</sub>) i dla  $t = 25$  min (rys. 21<sub>z</sub>). Mat.: stal 55 (wyż. odpr). War. obr.:  $\phi_k = 8,7$  mm,  $v = 70 \frac{1}{s}$ ,  $A = 2$  mm



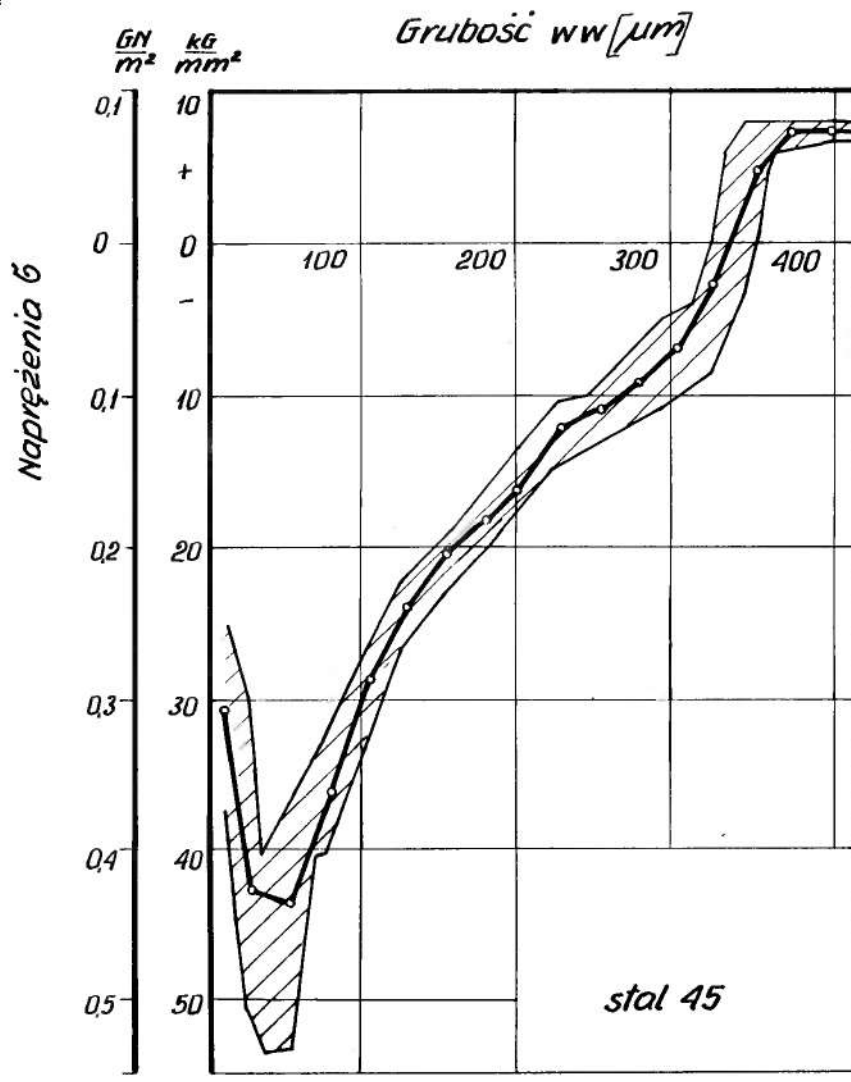
Rys. 22<sub>z</sub>



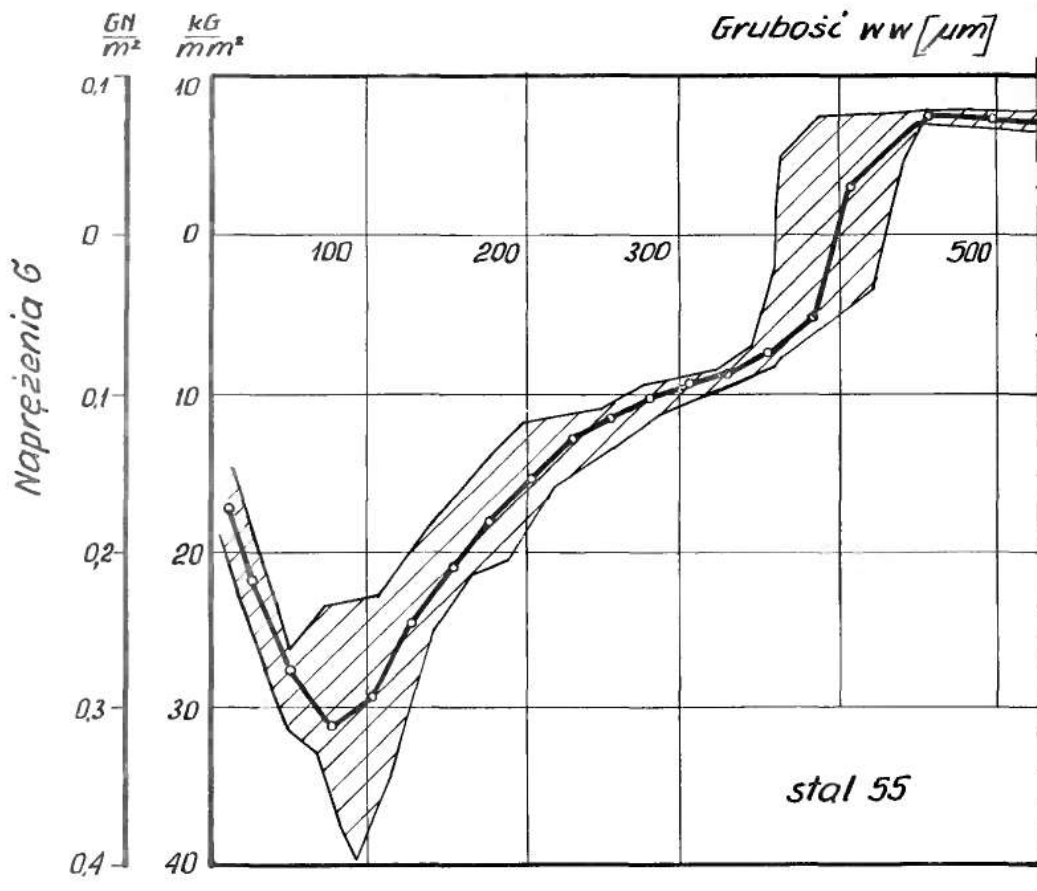
Rys. 23<sub>z</sub> Rozkład naprężen własnych w warstwie wierzchniej dla stali 15 (rys. 22<sub>z</sub>) i stali 25 (rys. 23<sub>z</sub>) - wyż.iodpr. War.obr.:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



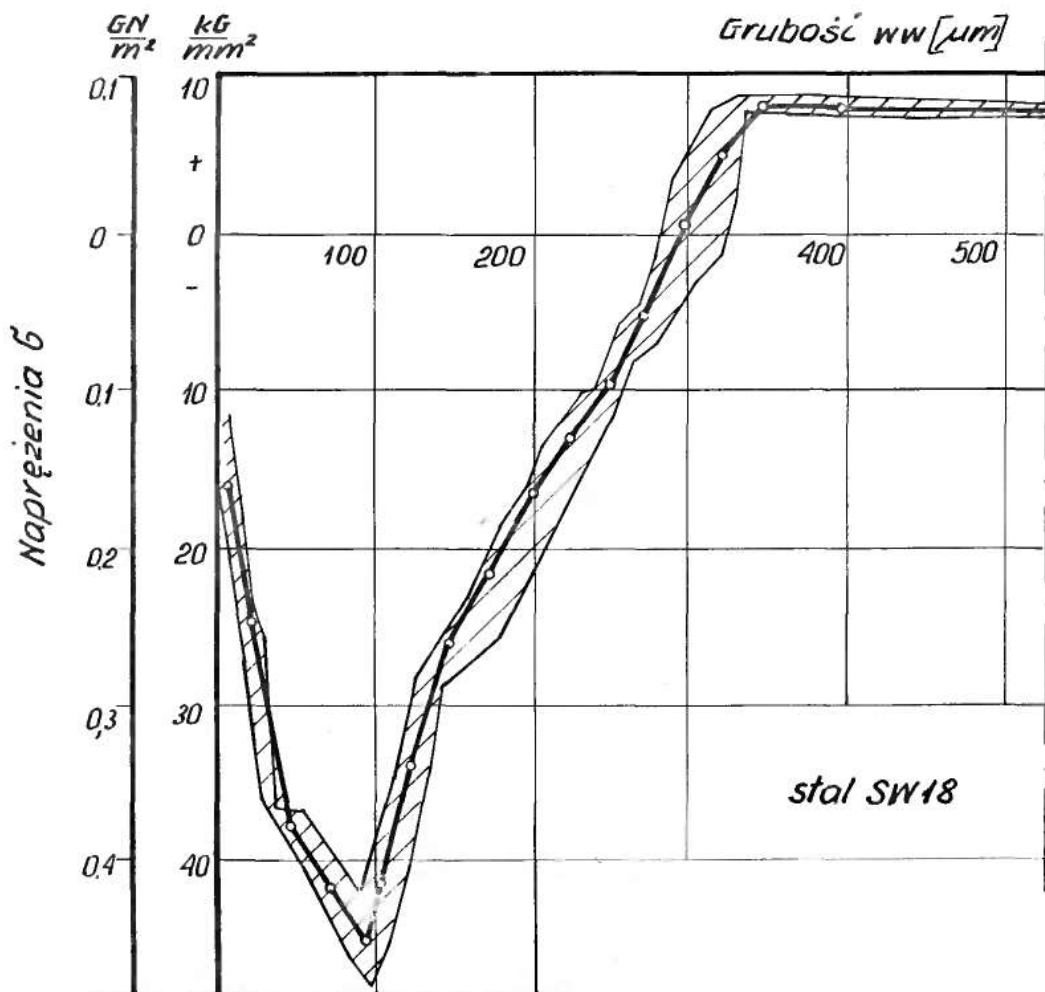
Rys.24<sub>z</sub>



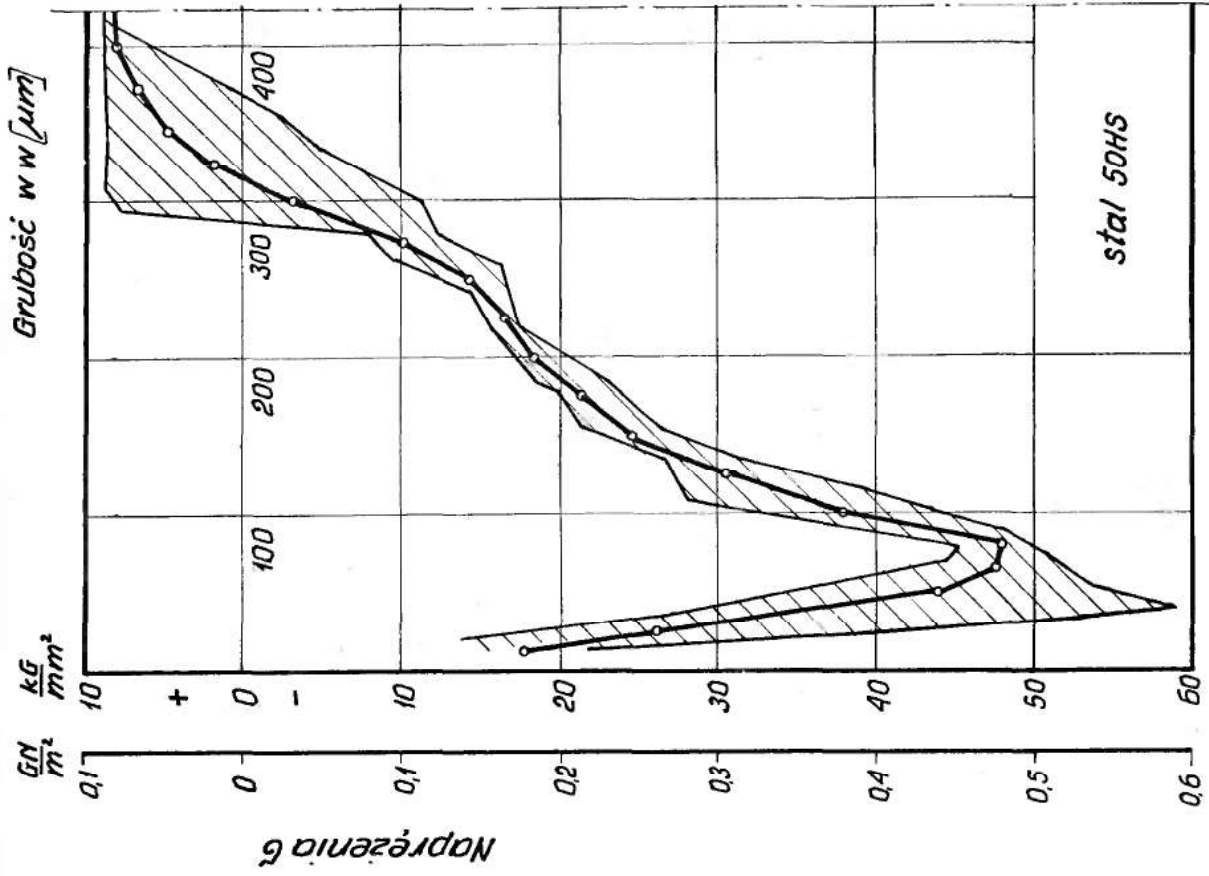
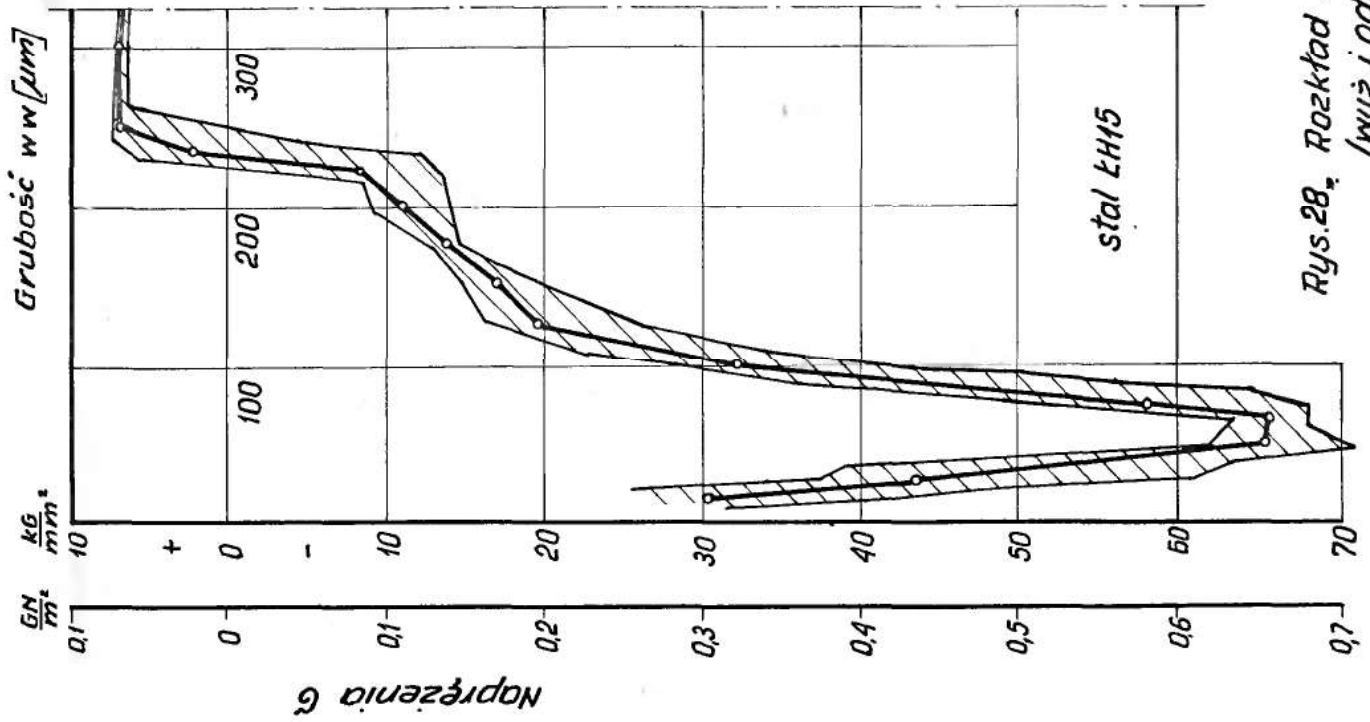
Rys.25<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej dla stali 35 (rys.24<sub>z</sub>) i dla stali 45 (rys.25<sub>z</sub>) - wyż i odpr.: War.obr.:  $\phi_k = 6,3 mm$ ,  $v = 60 \frac{m}{s}$ ,  $t = 10 min$ ,  $A = 2,15 mm$



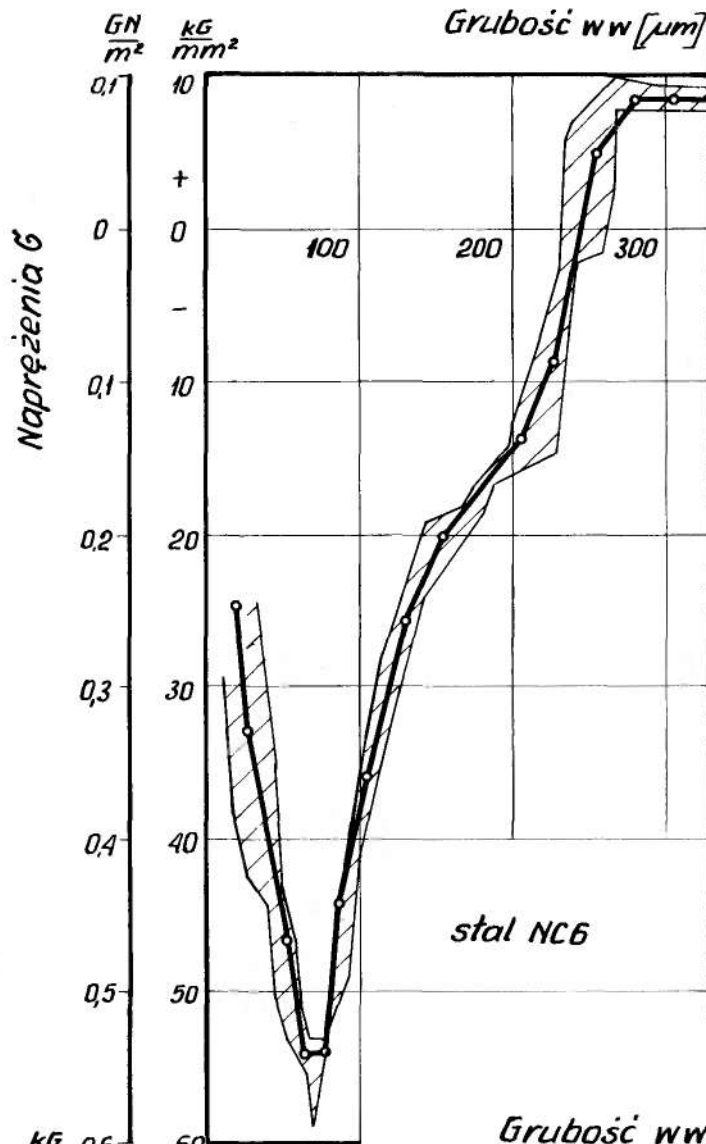
Rys.26<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stali 55 (wyż. i odpr.) War. obr.:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{s}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



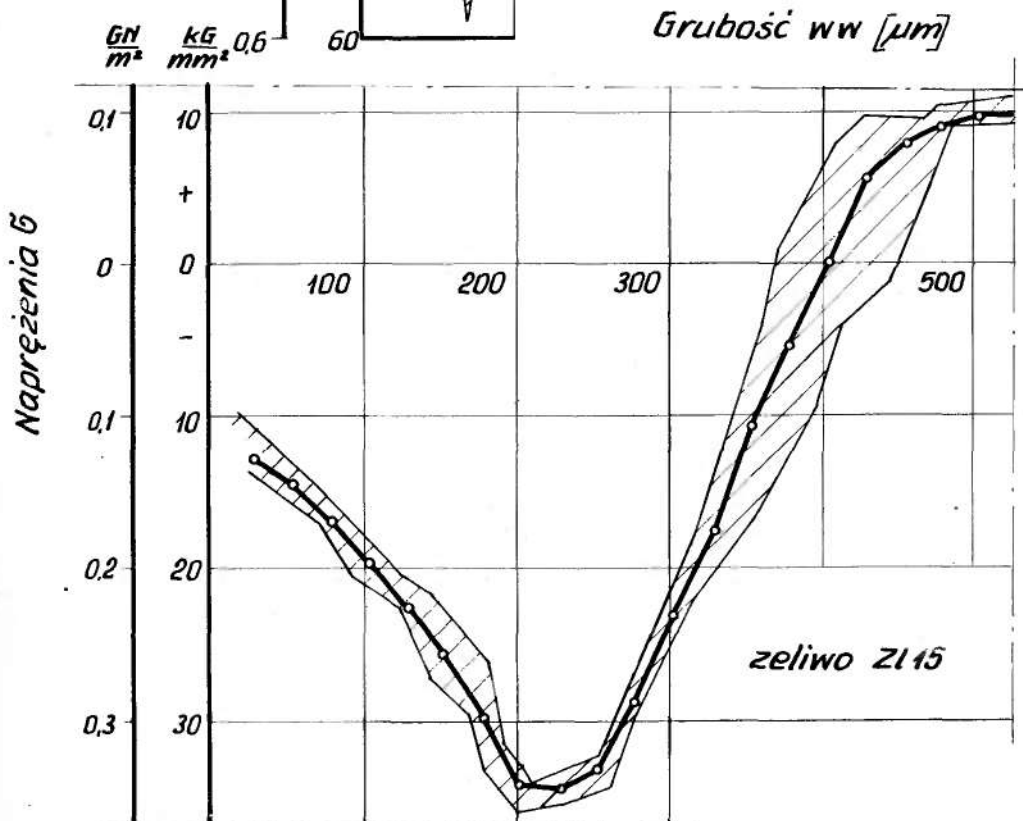
Rys.27<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stali SW18 (wyż. i odpr.) War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ;  $v = 60 \frac{1}{s}$ ;  $t = 10 \text{ min}$ ;  $A = 2,15 \text{ mm}$



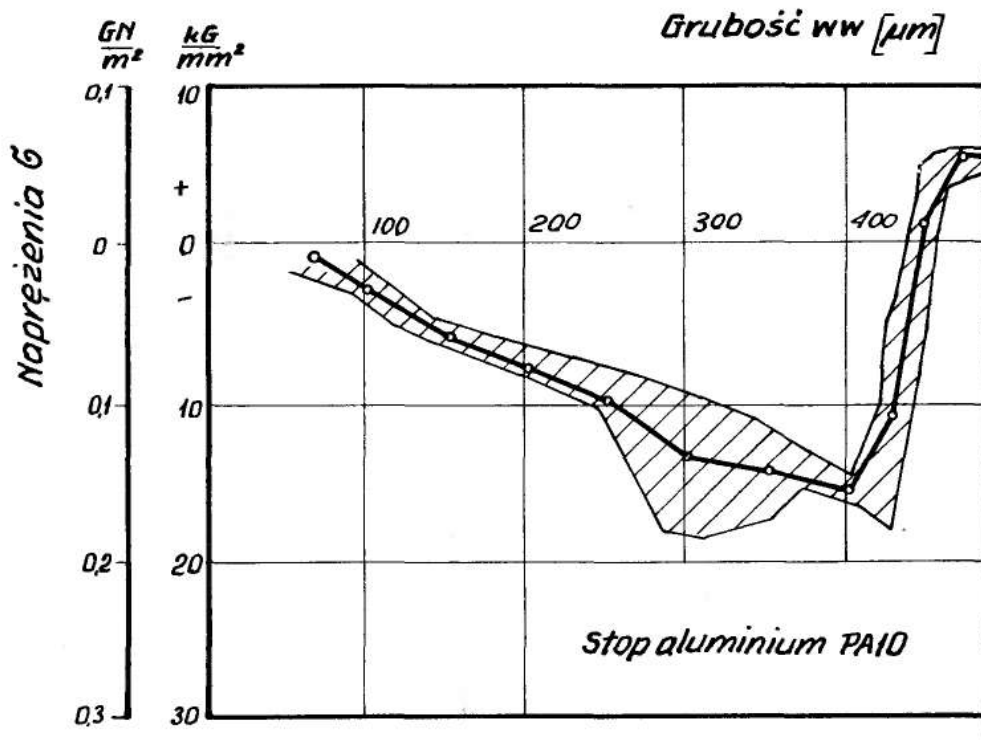
Rys. 28. Rozkład naprężeń własnych w stali tożyskowej LHM5 i stali resorowej 50HS (wyz. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ;  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ;  $t = 10 \text{ min}$ ;  $A = 2,15 \text{ mm}$ .



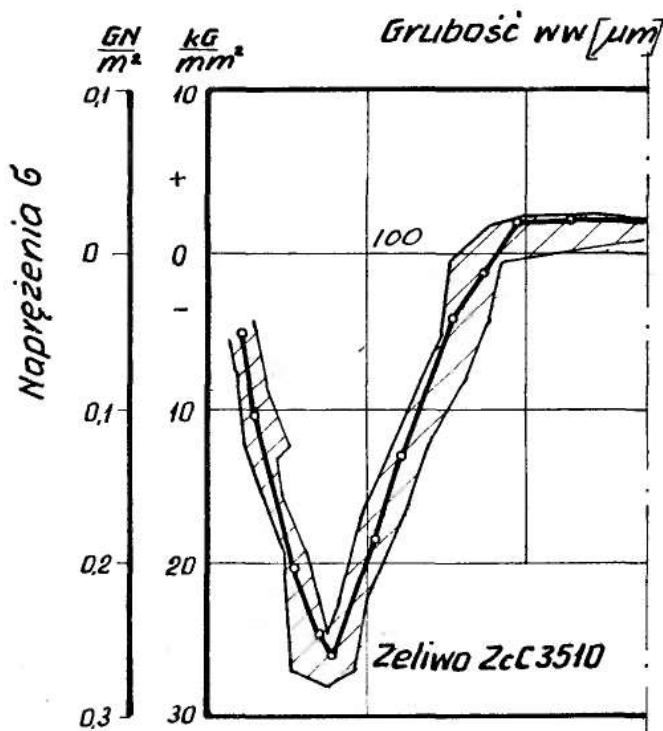
Rys. 29<sub>z</sub>



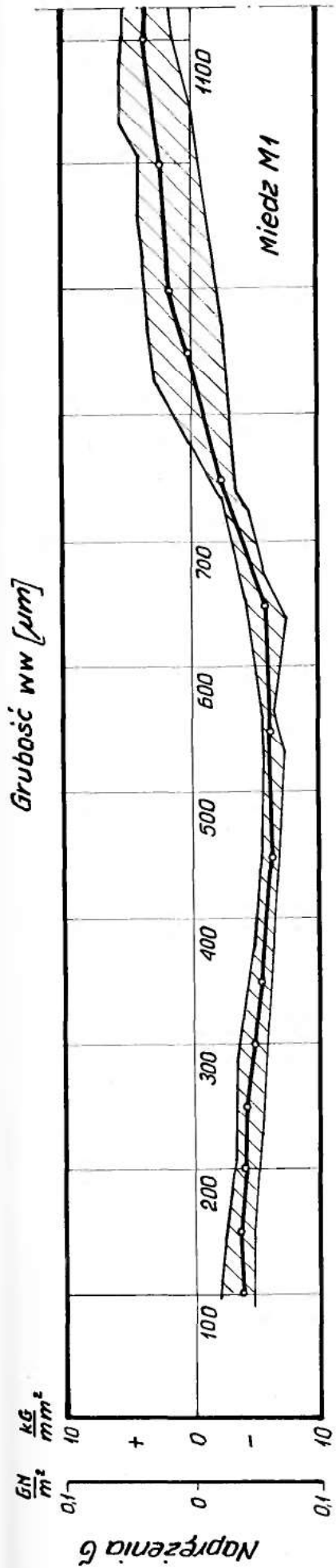
Rys. 30<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stali narzędziowej NC6 i żeliwie szarym Z115 (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ;  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ;  $t = 10 \text{ min}$ ;  $A = 2,15 \text{ mm}$ .



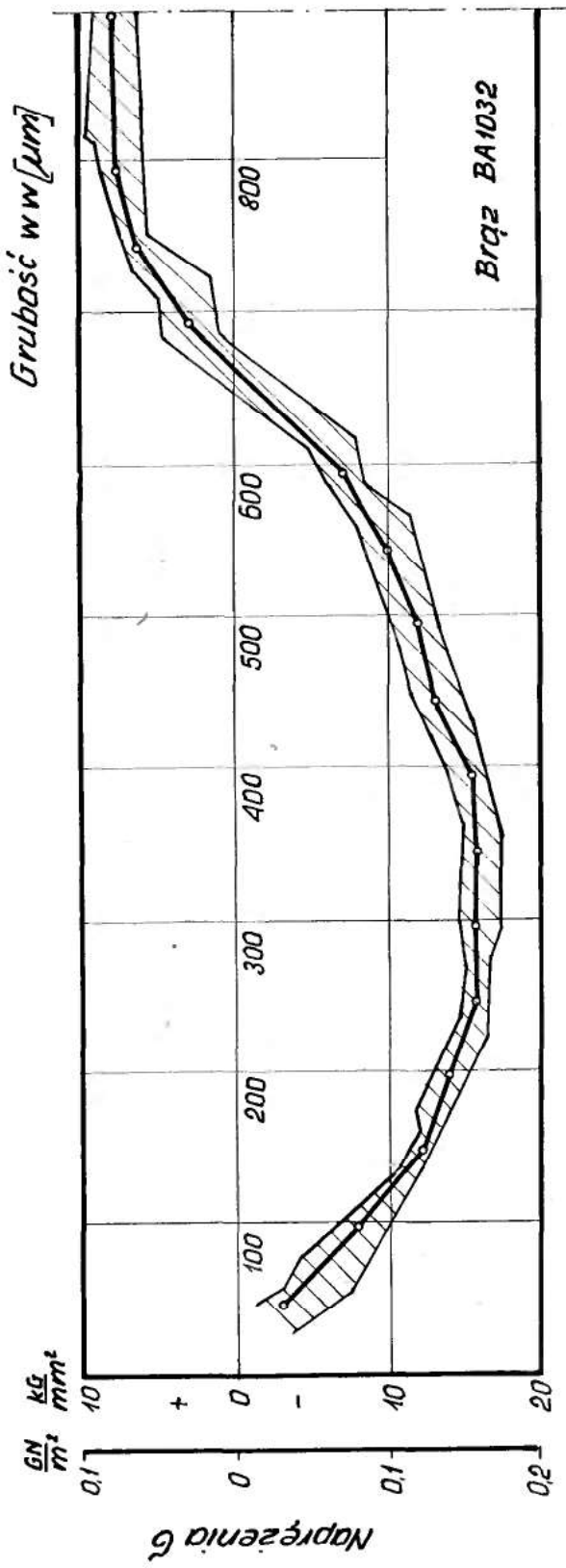
Rys.31<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stopu al. PA10 (przesyc. i starz.). War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ;  $v = 60 \frac{1}{3}$ ;  $t = 10 \text{ min}$ ;  $A = 2,15 \text{ mm}$



Rys.32<sub>z</sub> Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej żeliwa ciągliwego ZcC3510 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ;  $v = 60 \frac{1}{3}$ ;  $t = 10 \text{ min}$ ;  $A = 2,15 \text{ mm}$ .

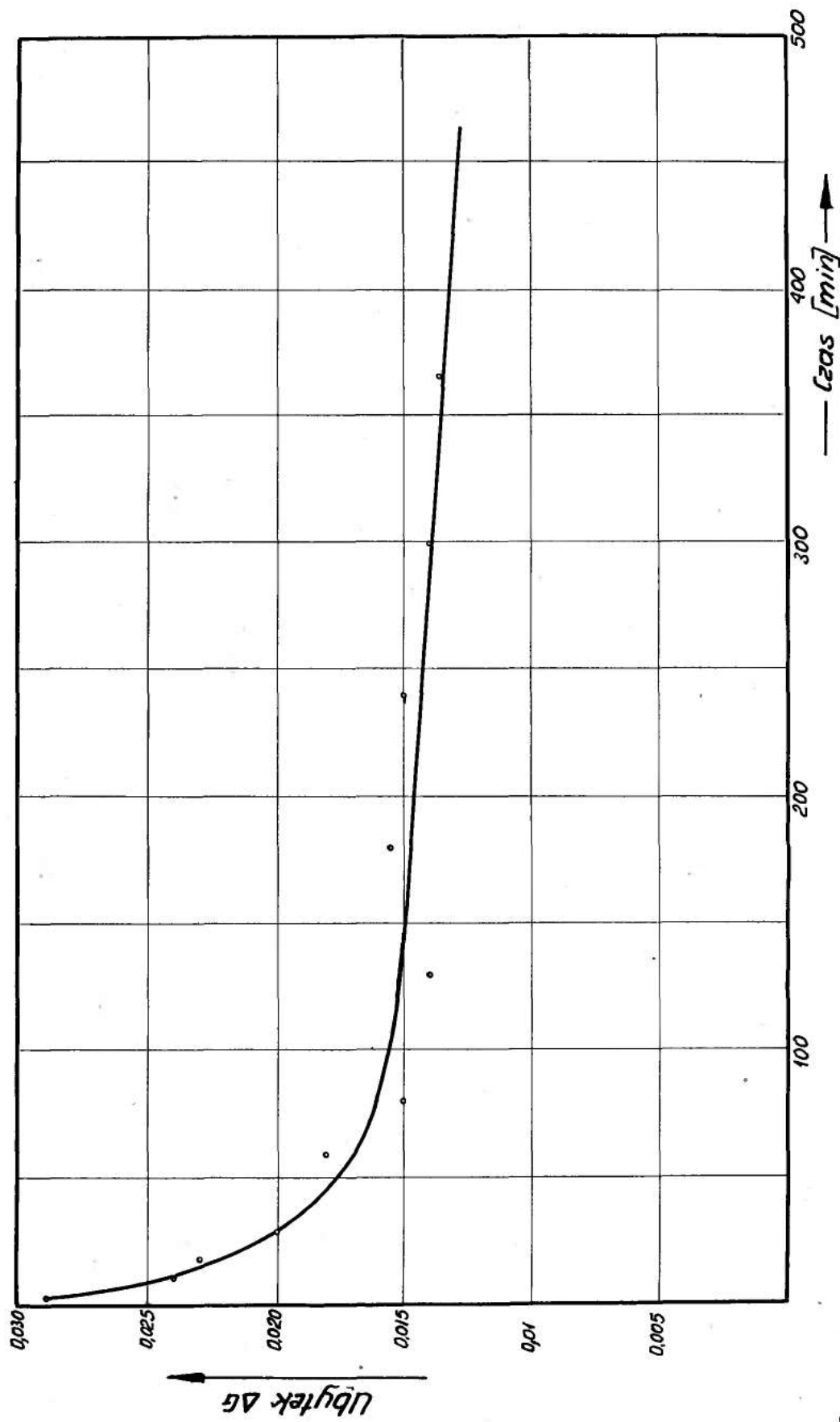


Rys.33. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej miedzi M1 (wyż. i odpr.).  
 Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ;  $v = 60 \frac{1}{2}$ ;  $t = 10 \text{ min}$ ;  $A = 2,15 \text{ mm}$

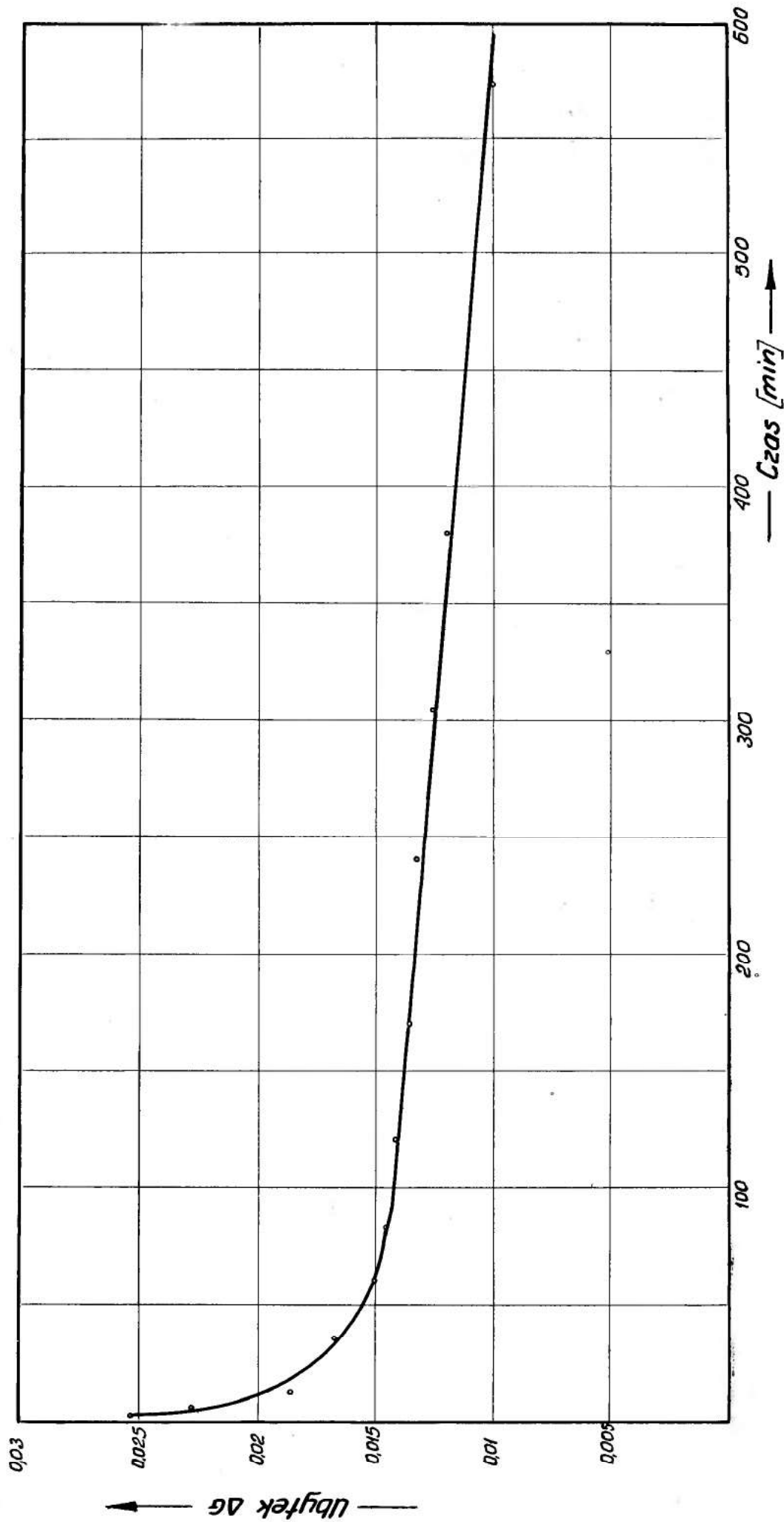


Rys.34. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej brązu BA1032 (wyż. i odpr.).  
 Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ;  $v = 60 \frac{1}{2}$ ;  $t = 10 \text{ min}$ ;  $A = 2,15 \text{ mm}$ .

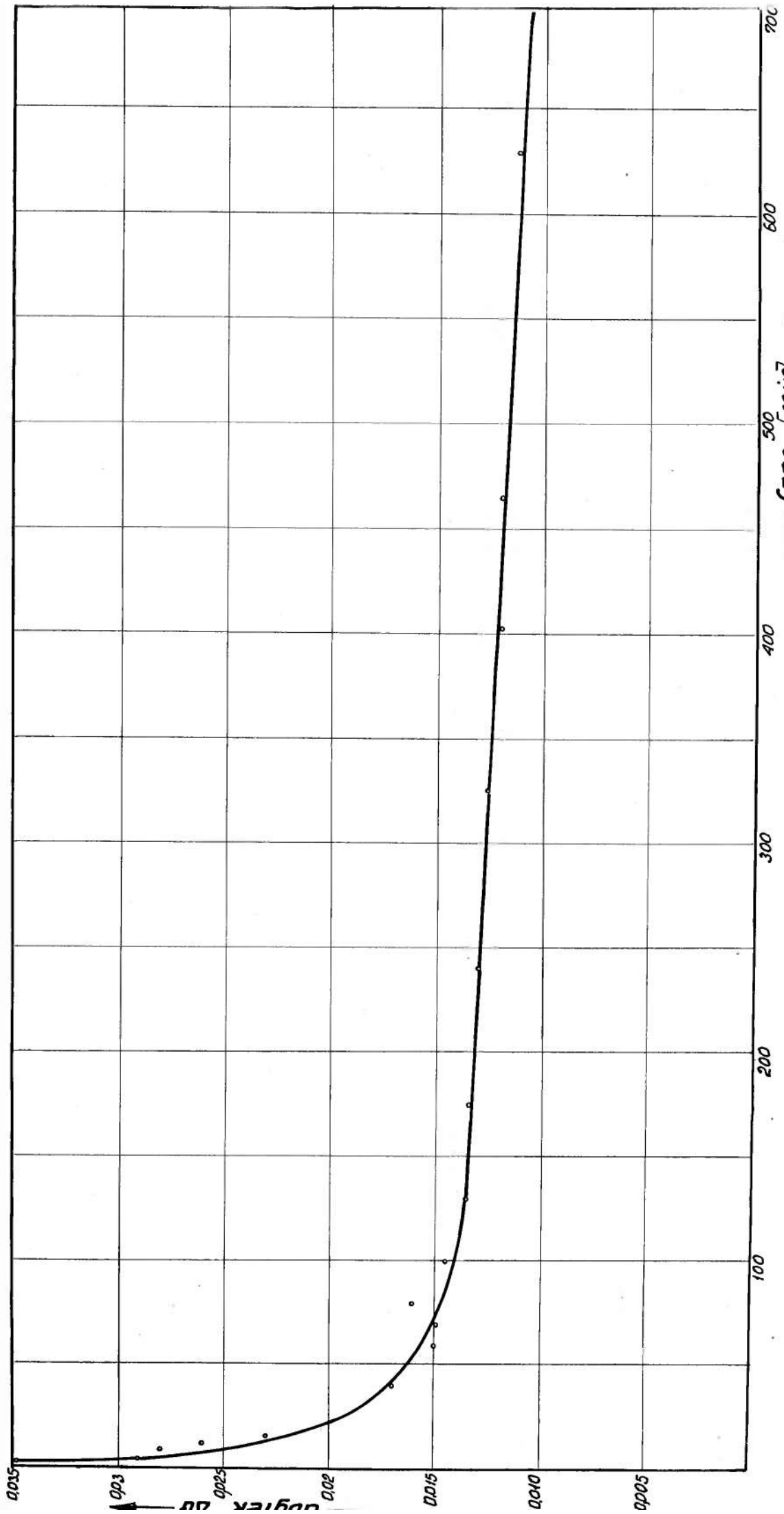




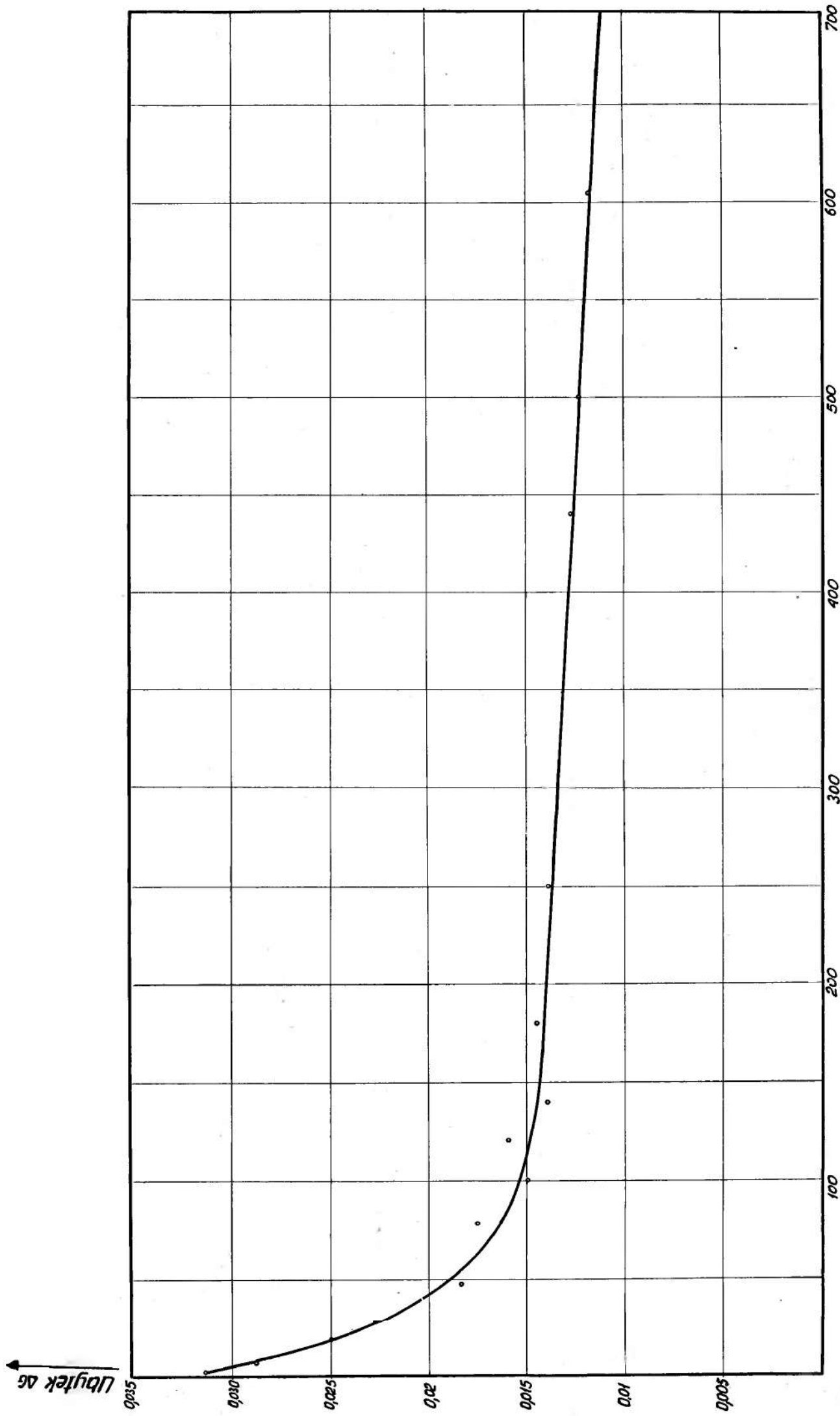
Rys. 35<sub>2</sub> Intensywność trawienia warstwy wierzchniej stali S55 wyż. i odpr. dla ugięcia  $f=0.04:0.06\text{ mm}$



Rys. 36<sub>2</sub> Intensywność trawienia warstwy wierzchniej stali 55 (wyż. i odpr.) dla ugięcia  $f=0,07 \div 0,10$  mm

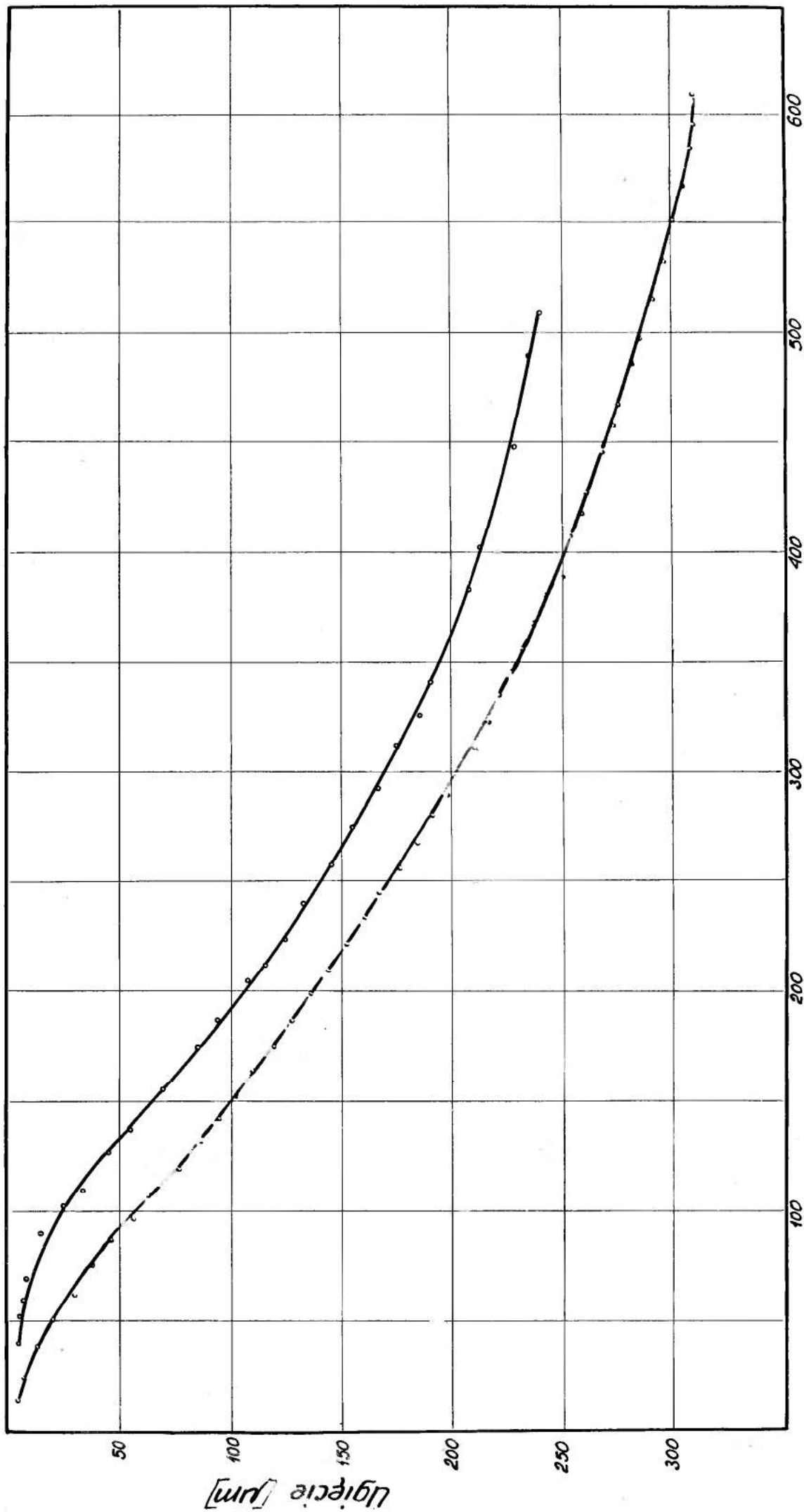


Rys. 37. Intensywność trawienia warstwy wierzchniej stali 55 (wyz. i odpr.) dla ugięcia  $f = 0.13 \div 0.16 \text{ mm}$



Rys. 38. Intensywność trawienia warstwy wierzchniej stali 55 (wyz. i odpor.) dla ugięcia  $f = 0,018 \div 0,019$  mm.

Grubość  $w$  w  $\mu\text{m}$



Rys. 39. Krzywna próbki w zależności od strawionej grubości warstwy wierzchniej dla czasu  $t = 25$  min.



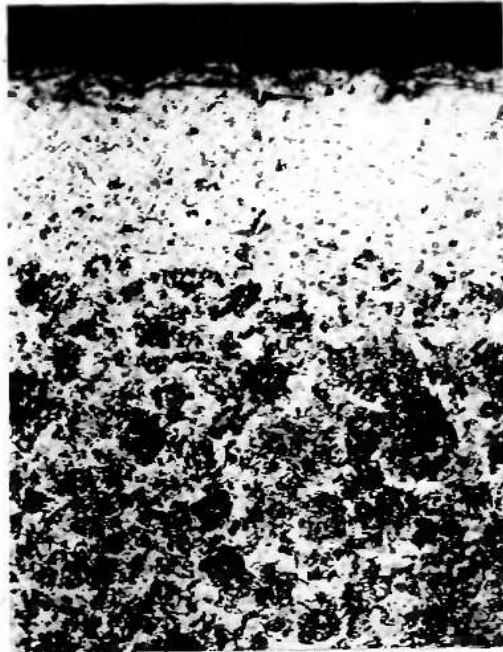
*Trawiono nitałem  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 124*

*Rys 40<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali 15  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem  
War. obróbki:  $\dot{V}=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\Phi_k=5,3mm$*



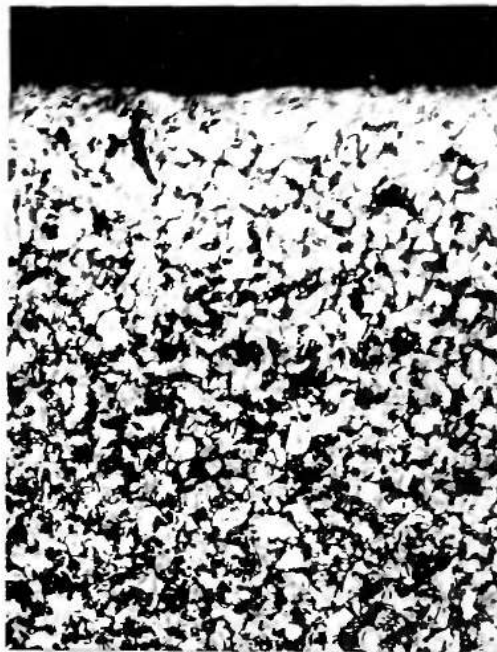
*Trawiono nitałem  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 134*

*Rys 41<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali 25  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $\dot{V}=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\Phi_k=5,3mm$*



*Trawiono nitalem  
Powiększenie: 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 151*

*Rys.42<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali 35  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
Warunki obróbki:  $\dot{\nu}=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t=10 \text{ min}$ ,  $A=2,15 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$*



*Trawiono nitalem  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 165*

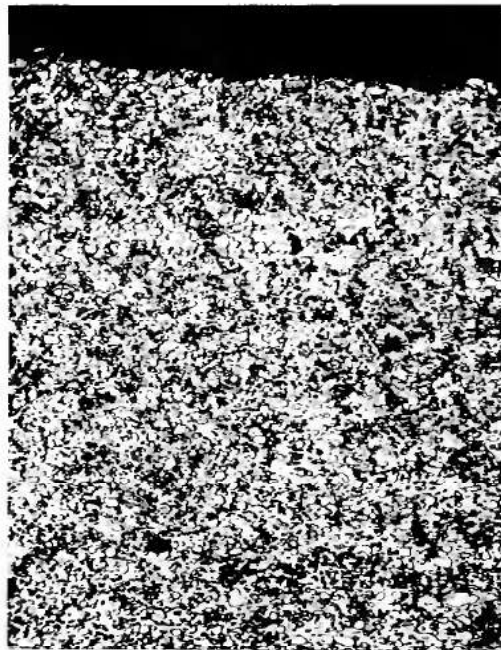
*Rys.43<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali 45  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $\dot{\nu}=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t=10 \text{ min}$ ,  $A=2,15 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$*



*Trawiono nitałem  
Powiększenie 400x  
Próbka nr 173*

*Rys.44<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali 55  
(wyz. i odpr.) po obróbce zgniotem.*

*War. obróbki:  $v=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\phi_k=6,3mm$*

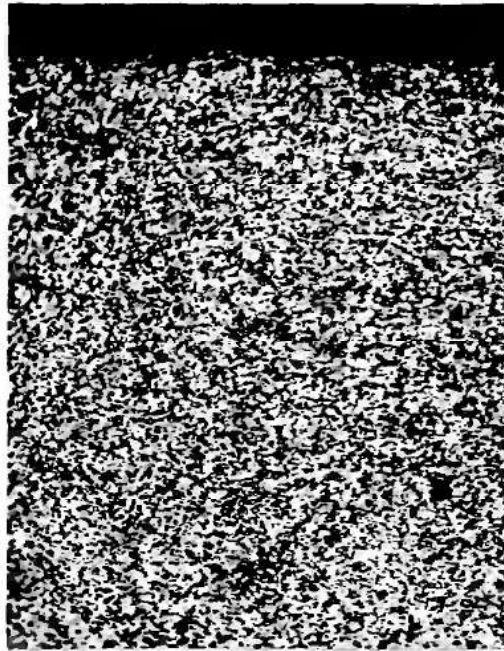


*Trawiono nitałem  
Powiększenie 400x  
Próbka nr 270*

*Rys.45<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali NC6  
(wyz. i odpr.) po obróbce zgniotem.*

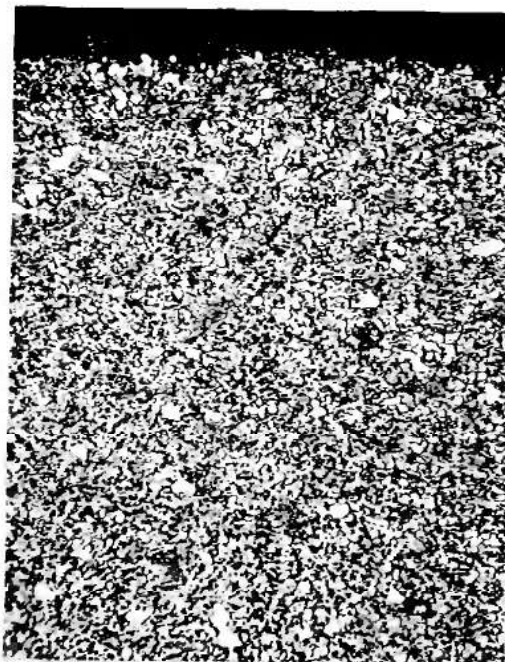
*War. obróbki:  $v=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\phi_k=6,3mm$*





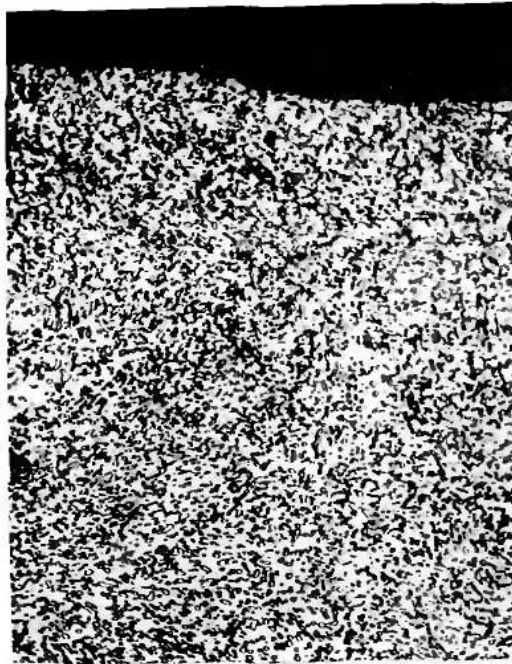
*Trawiono - 37% HNO<sub>3</sub>  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 224*

*Rys.46<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali SW9  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $\dot{\nu}=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\phi_k=6,3mm$*



*Trawiono - 3,7% HNO<sub>3</sub>  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 208*

*Rys.47<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali SW18  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $\dot{\nu}=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\phi_k=6,3mm$*



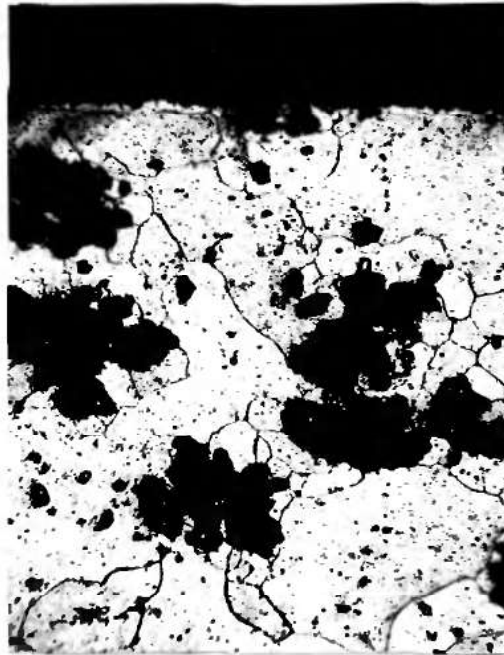
*Trawiono nitalem  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 270*

*Rys.48. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali ŁH15  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem  
War. obróbki:  $v = 60 \frac{1}{sek}$ ,  $t = 10 min$ ,  $A = 2,15 mm$ ,  $\phi_k = 6,3 mm$*



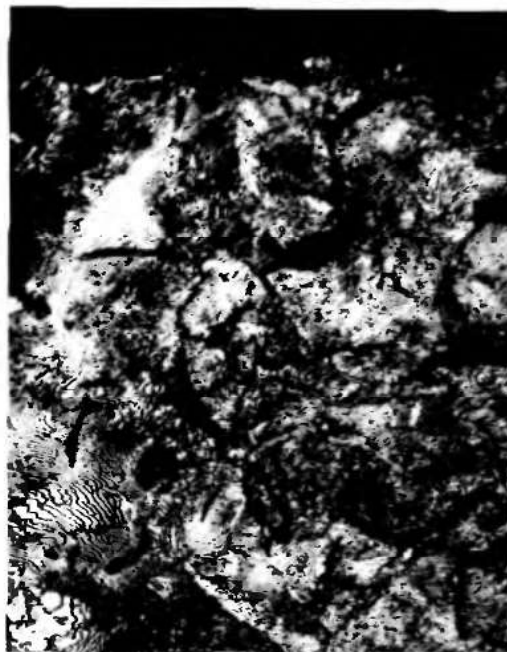
*Trawiono nitalem  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 313*

*Rys.49. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stali 50HS  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $v = 60 \frac{1}{sek}$ ,  $t = 10 min$ ,  $A = 2,15 mm$ ,  $\phi_k = 6,3 mm$*



*Trawiono nitałem  
Powiększenie 250<sup>x</sup>  
Próbka nr 248*

*Rys.50<sub>2</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej żeliwa ZcC3510  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $\dot{\nu}=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\phi_k=6,3mm$*



*Trawiono nitałem  
Powiększenie 250<sup>x</sup>  
Próbka nr 237*

*Rys.51<sub>2</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej żeliwa Z115  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $\dot{\nu}=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\phi_k=6,3mm$*



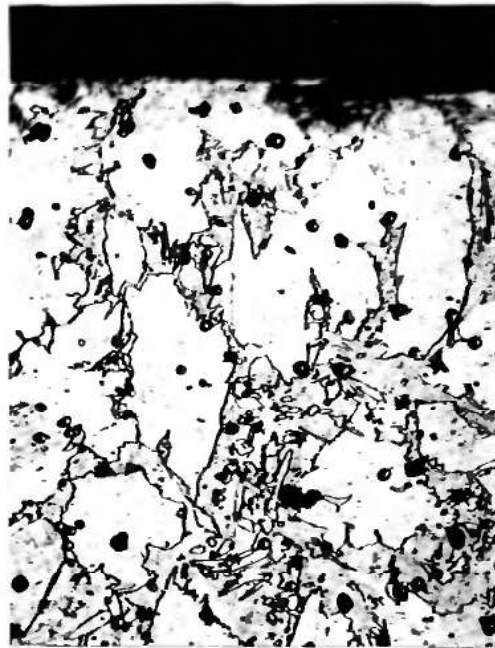
*Trawiono - 20% NaOH  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 187*

*Rys.52<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej stopu alum. PA10  
(przesyc.i starz.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $\dot{\nu}=60 \frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\Phi_k=6,3mm$*



*Trawiono - 10% (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>  
Powiększenie 250<sup>x</sup>  
Próbka nr 308*

*Rys.53<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej miedzi M1  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem  
War. obróbki:  $\dot{\nu}=60 \frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\Phi_k=6,3mm$ .*



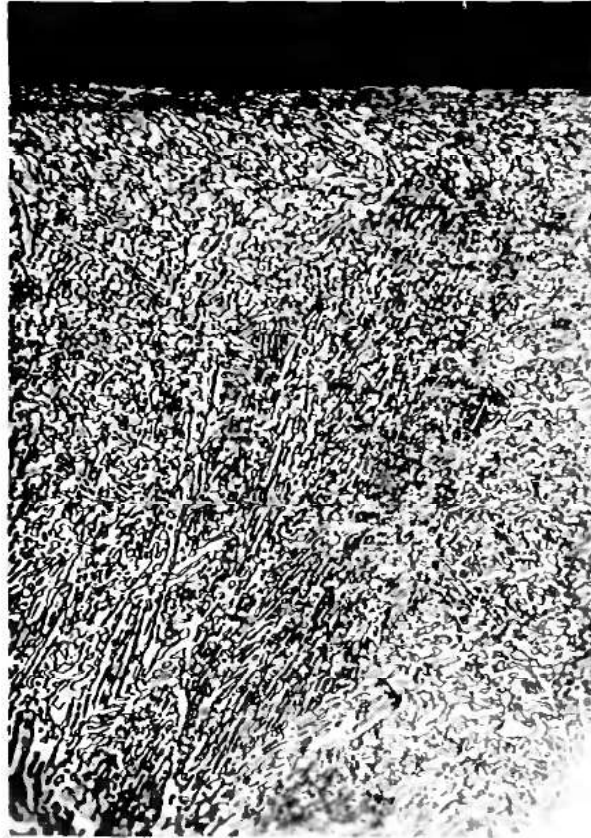
*Trawiono-10%(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 298*

*Rys.54<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej brązu BA1032  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $v=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\Phi_k=6,3mm$*



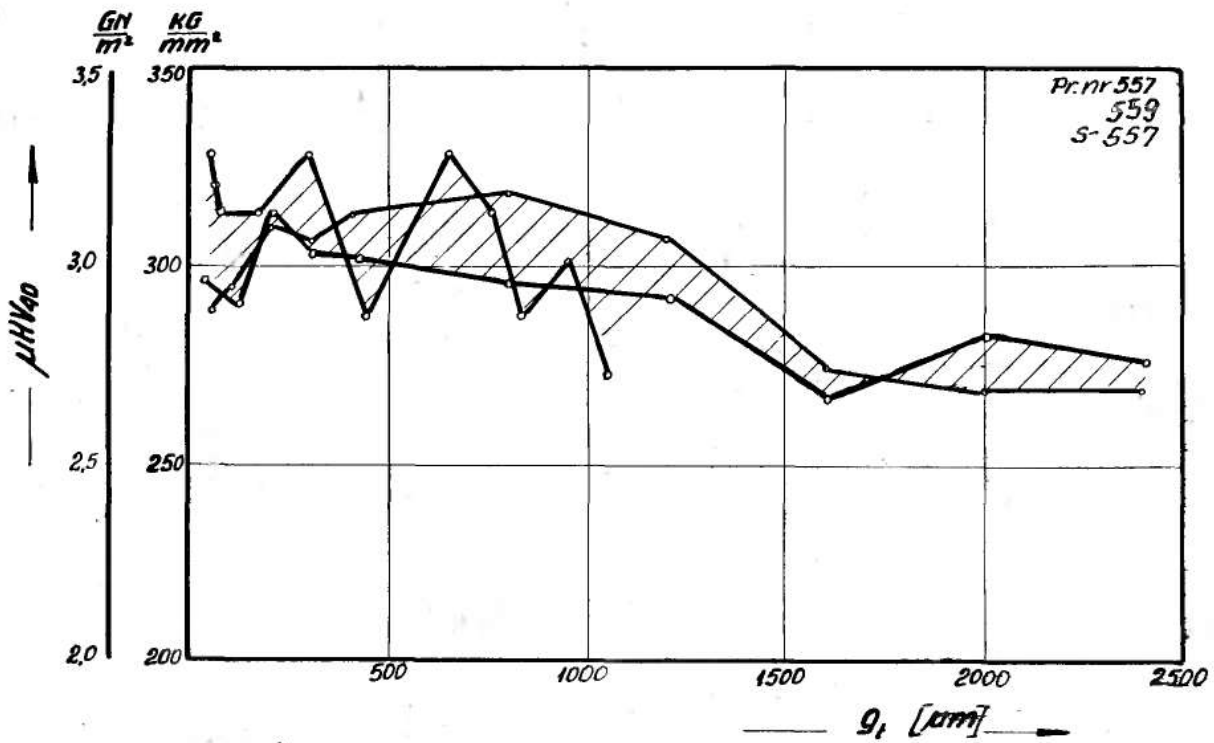
*Trawiono-10%(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 280*

*Rys.55<sub>z</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej mosiądzu M60  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $v=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=2,15mm$ ,  $\Phi_k=6,3mm$*

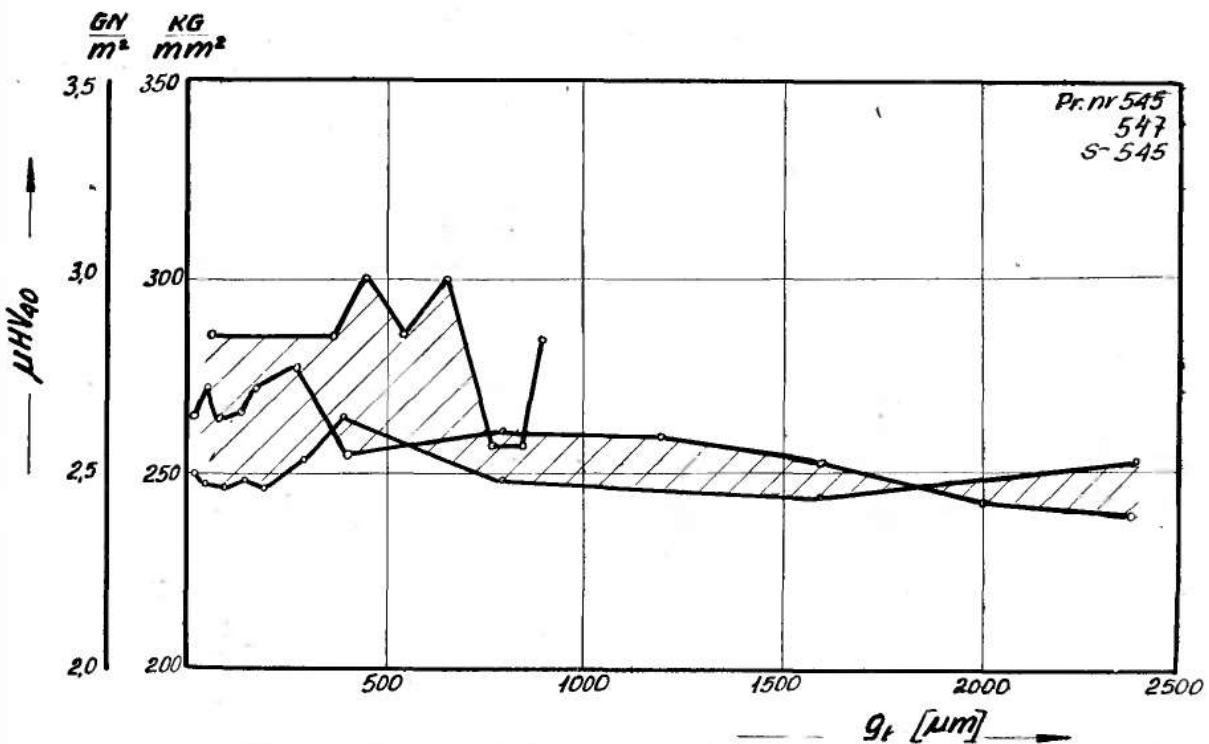


*Trawiono 8% HF  
Powiększenie 400<sup>x</sup>  
Próbka nr 255*

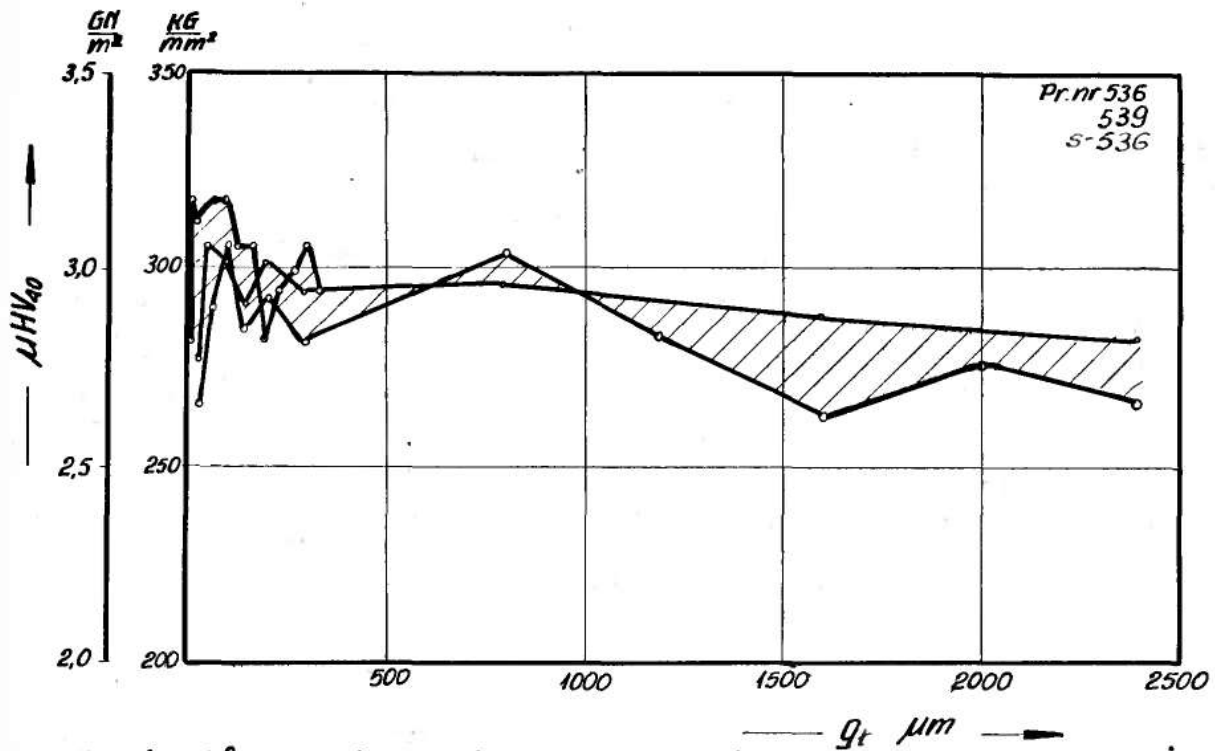
*Rys.56<sub>e</sub> Mikrostruktura warstwy wierzchniej tytanu WT3  
(wyż. i odpr.) po obróbce zgniotem.  
War. obróbki:  $v=60\frac{1}{sek}$ ,  $t=10min$ ,  $A=215mm$ ,  $\phi_k=6,3mm$*



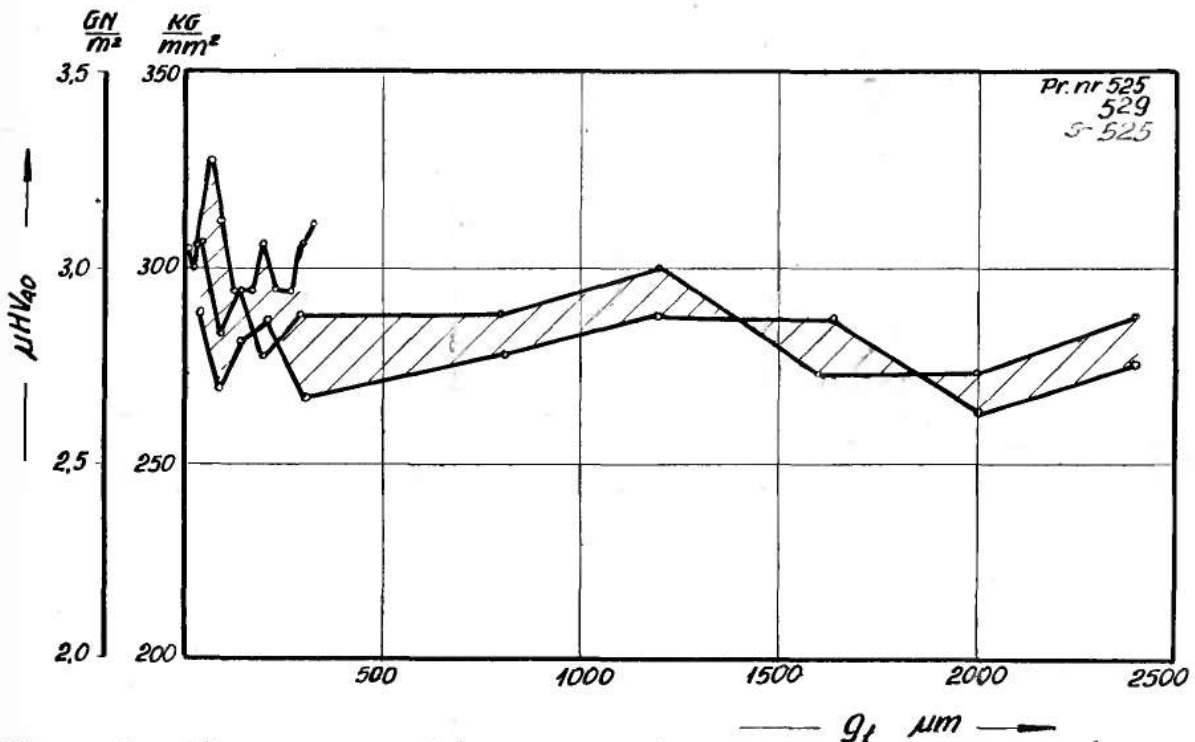
Rys.57 Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_1$  dla  $A=0.6$  mm. Materiał: stal 55 (wyz. i odpr.). War. obr.:  $\phi_k=5$  mm,  $v=70 \frac{1}{sek}$ ,  $t=20$  min



Rys.58 Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  dla  $A=1.0$  mm. Materiał: stal 55 (wyz. i odpr.). War. obr.:  $\phi_k=5$  mm,  $v=70 \frac{1}{sek}$ ,  $t=20$  min

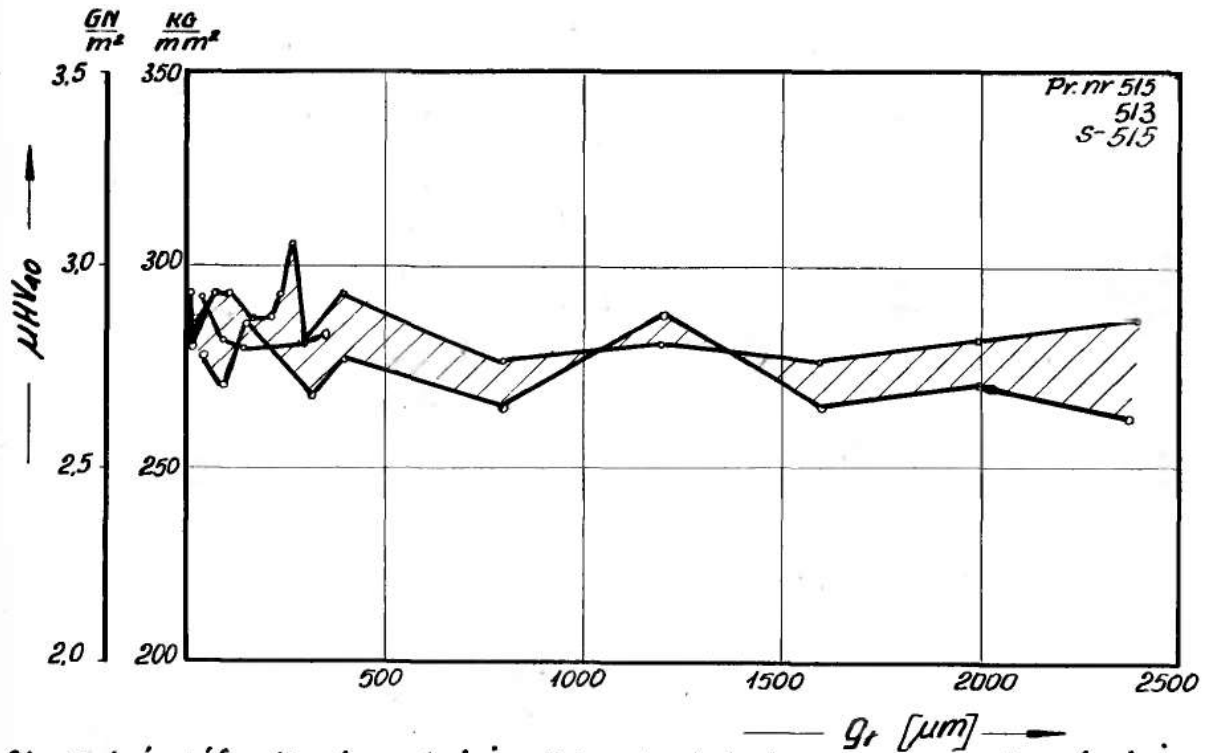


Rys.59<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  dla  $A_3=115\text{mm}$ . Materiał: st 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k=5\text{mm}$ ,  $v=70\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t=20\text{min}$ .

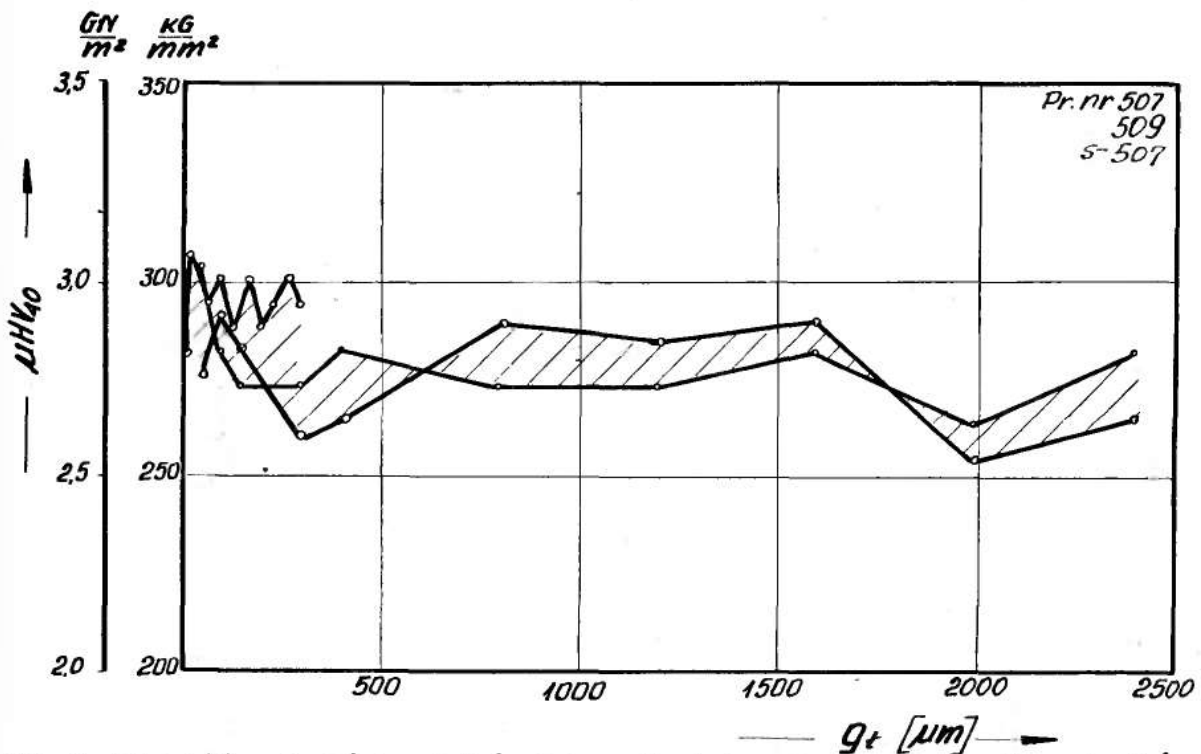


Rys.60<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  dla  $A_3=14\text{mm}$ . Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.:  $\phi_k=5\text{m}$ ,  $t=20\text{min}$ ,  $v=70\frac{1}{\text{sek}}$ .

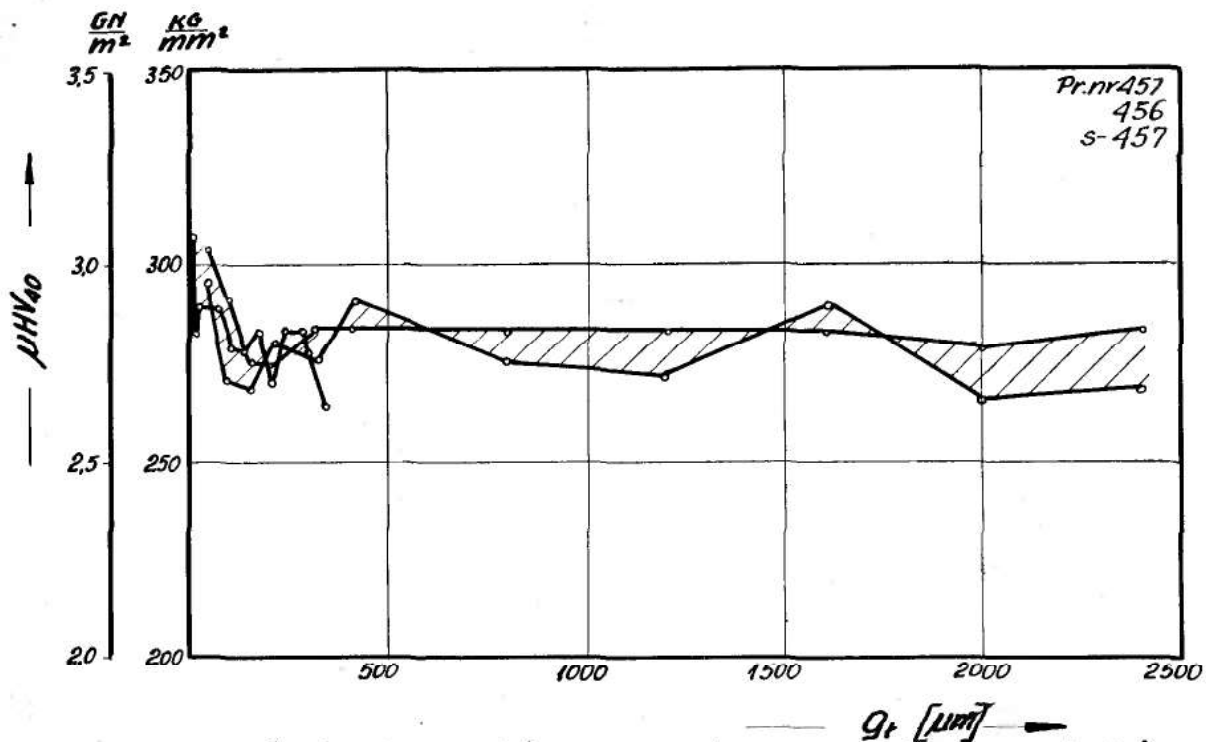




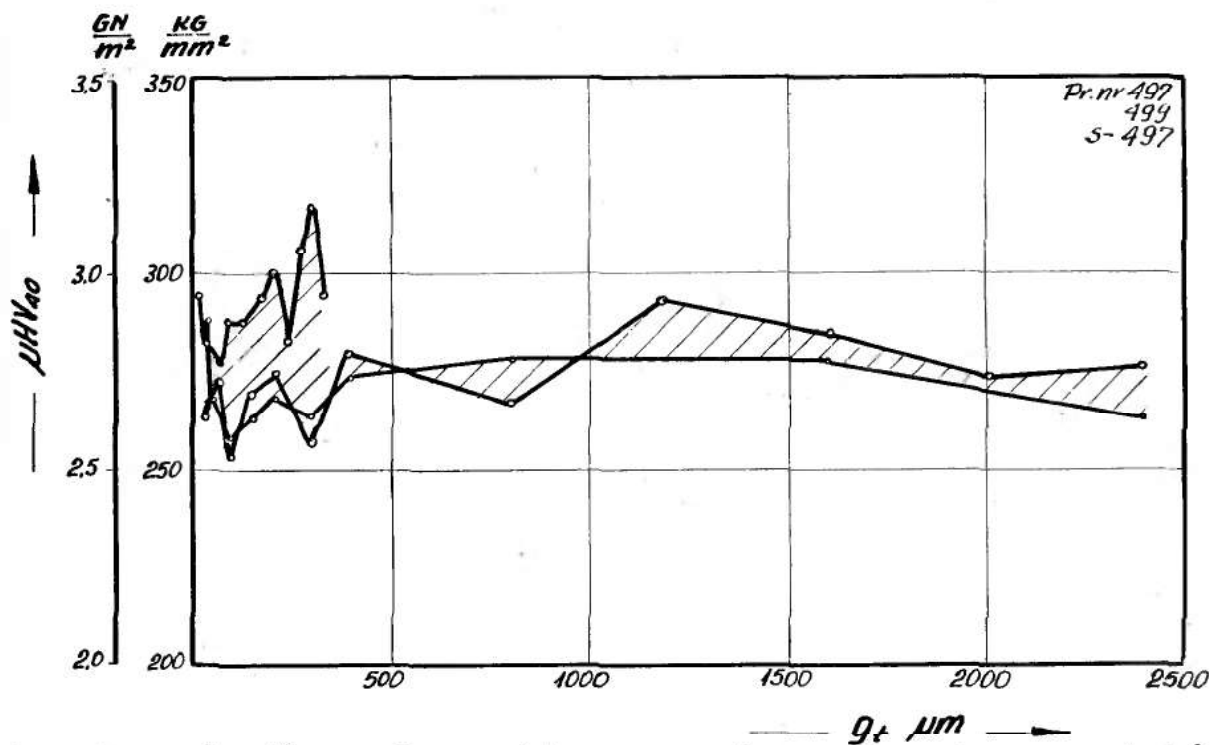
Rys. 61<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  dla  $A_5 = 165 \text{ mm}$ . Mater. stal 55 (wyz. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ ,  $v = 70 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$



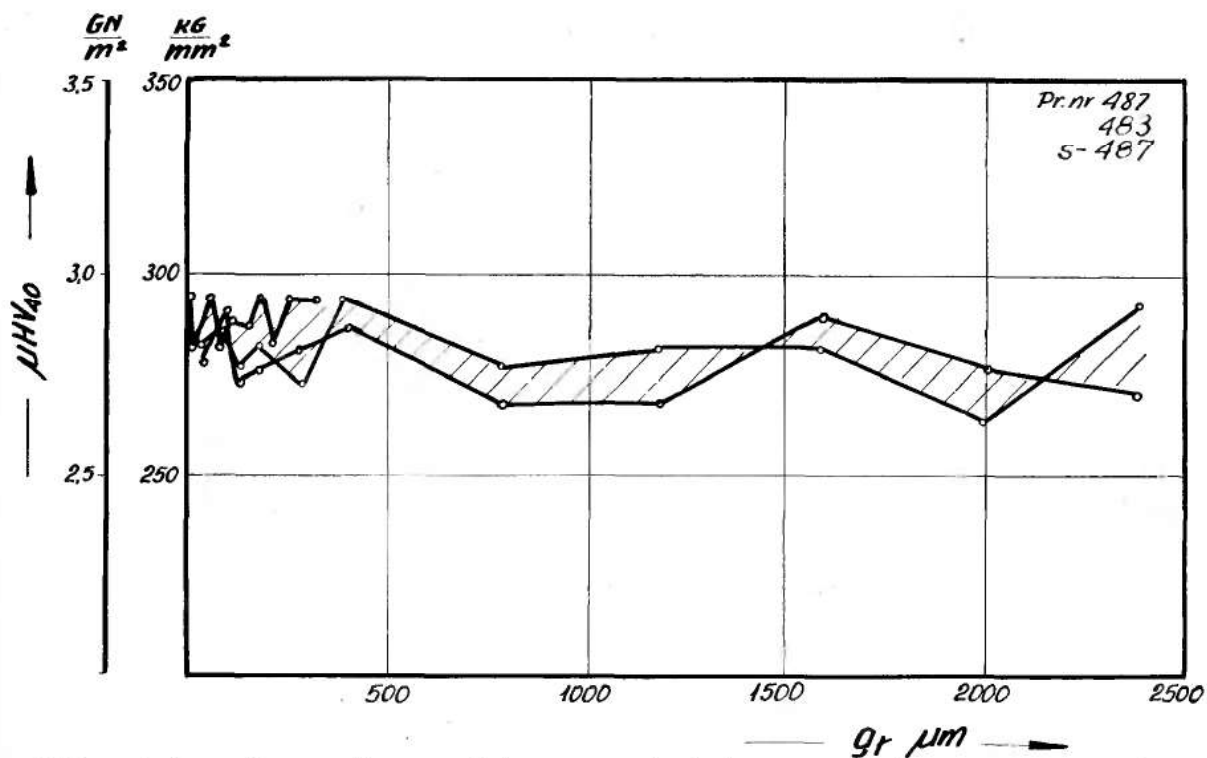
Rys. 62<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  dla  $A_5 = 2 \text{ mm}$ . Mater. stal 55 (wyz. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ ,  $v = 70 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$



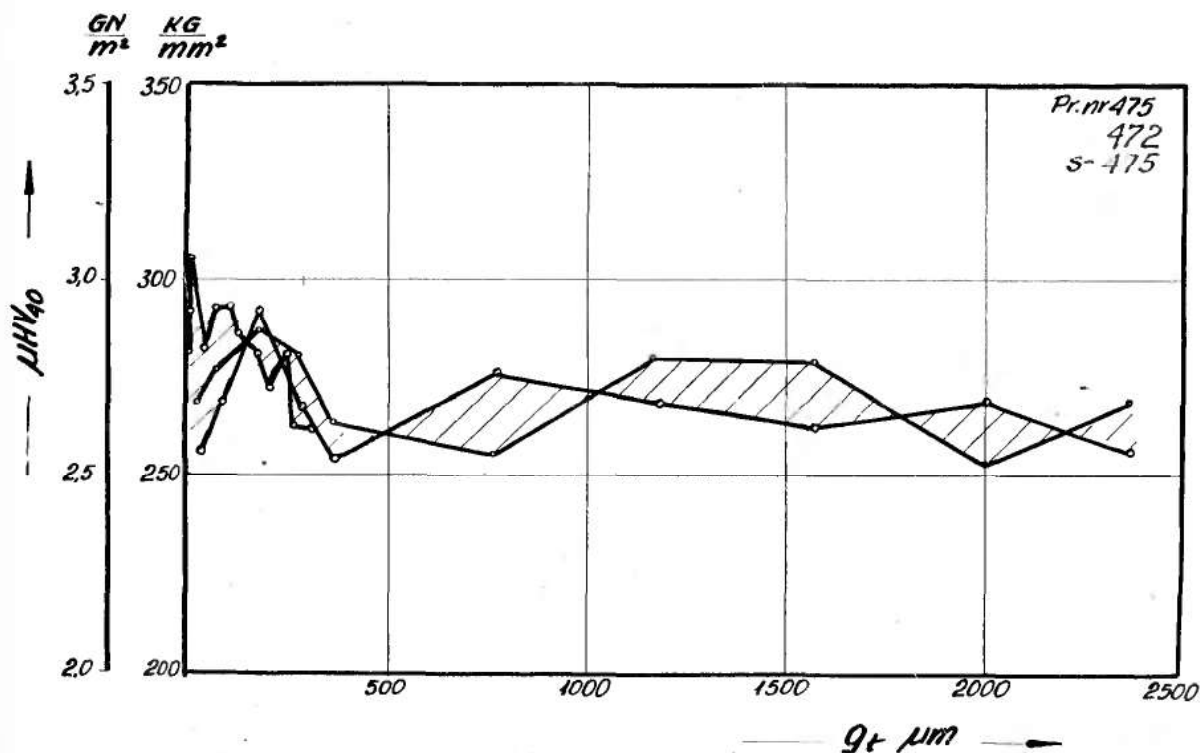
Rys. 63<sub>z</sub> Zależność mikrołwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  dla  $\phi_k = 3,2 \text{ mm}$ . Materiał: stal 55 (wyz. i odpr.). War. obr.:  $A = 2 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \text{ sek}$ ,  $t = 20 \text{ min}$



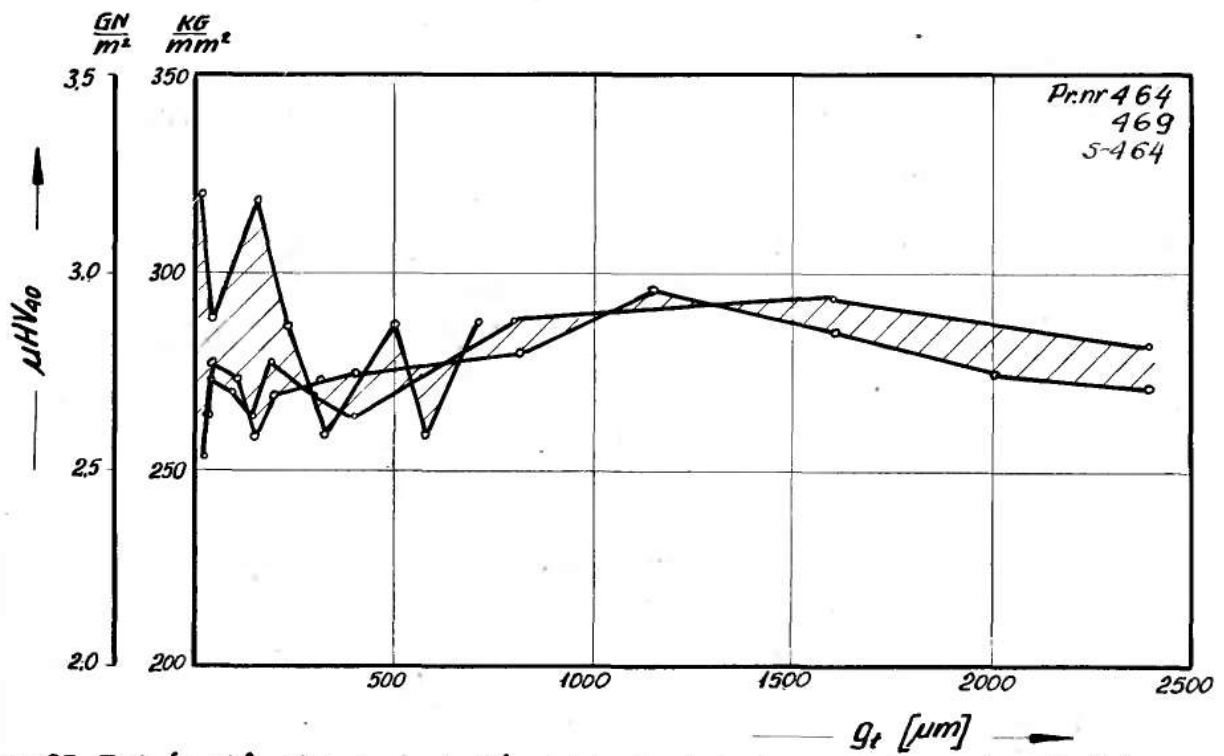
Rys. 64<sub>z</sub> Zależność mikrołwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  dla  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ . Materiał: stal 55 (wyz. i odpr.). War. obr.:  $A = 2 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \text{ sek}$ ,  $t = 20 \text{ min}$



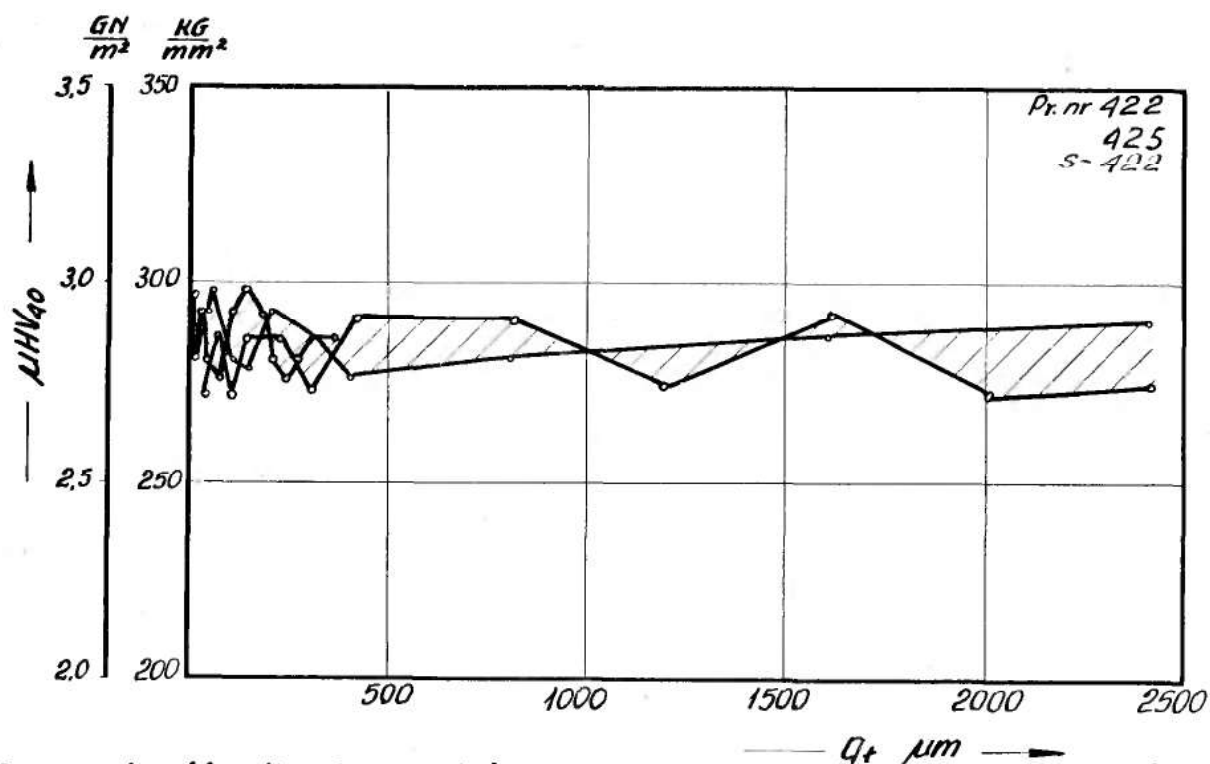
Rys.65<sub>z</sub> Zależność mikrohardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  dla  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$ . Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.:  $A = 2 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 20 \text{ min}$



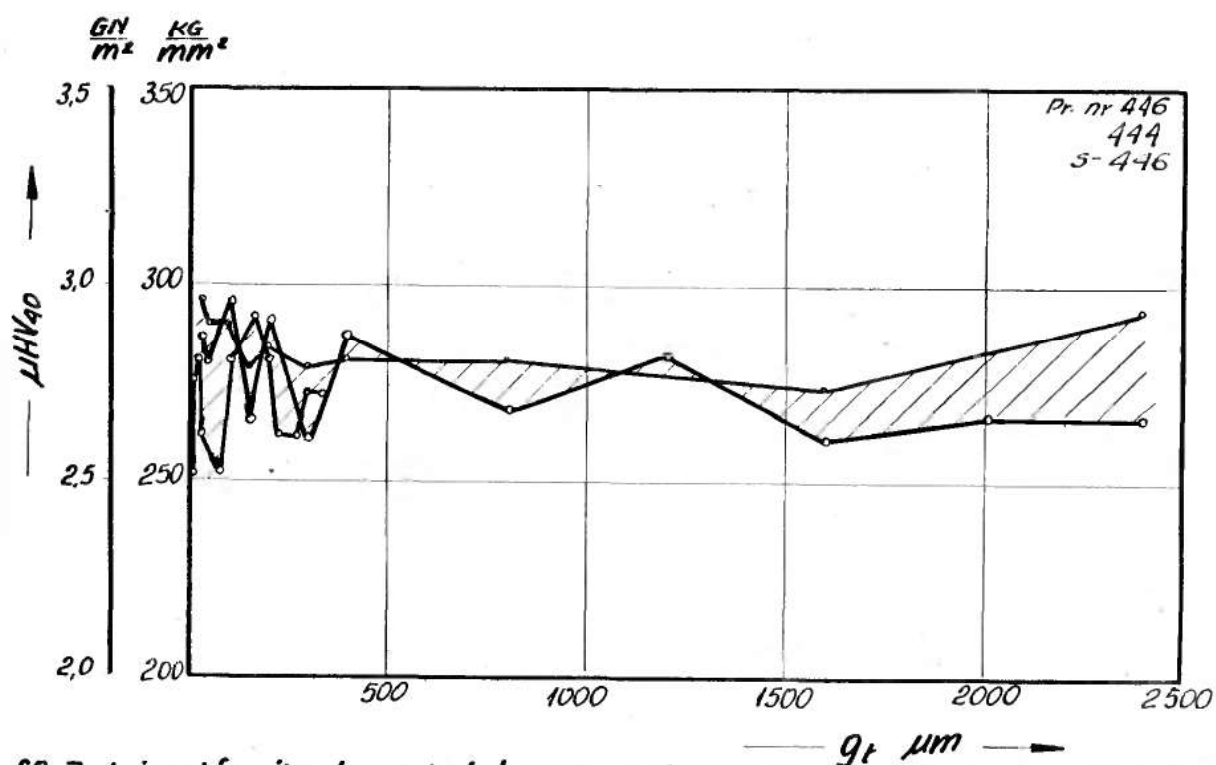
Rys.66<sub>z</sub> Zależność mikrohardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  dla  $\phi_k = 12 \text{ mm}$ . Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.:  $A = 2 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 20 \text{ min}$



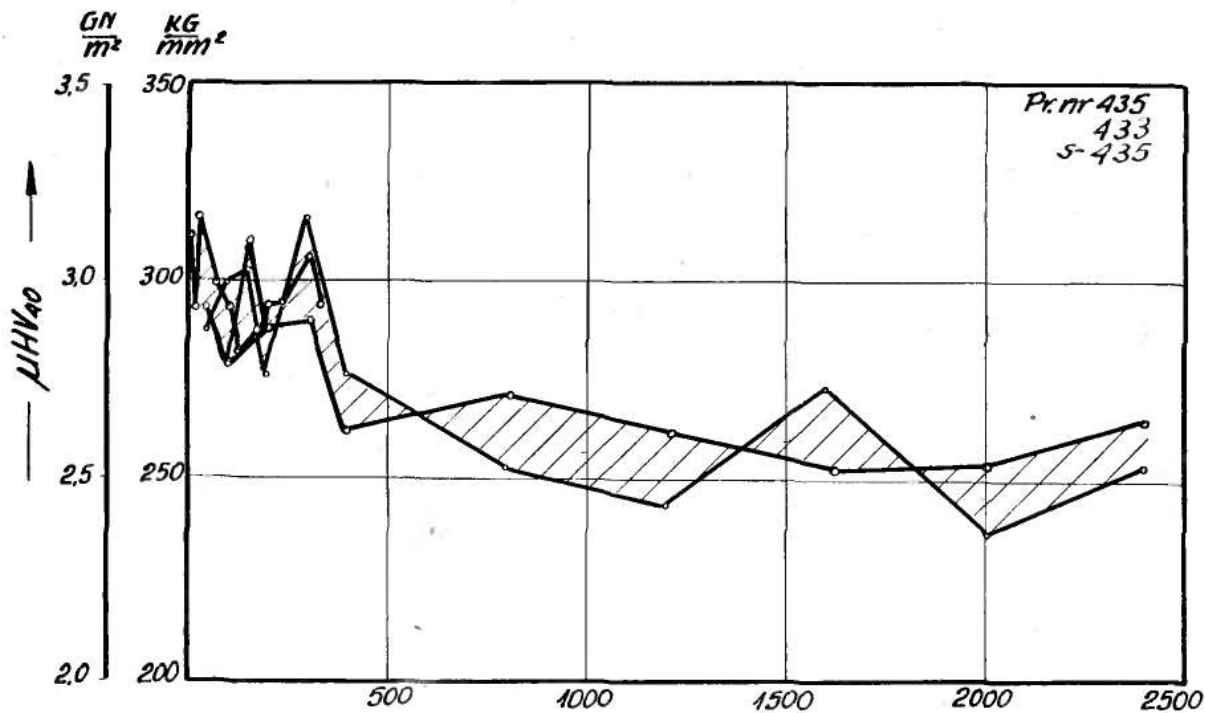
Rys.67. Zależność mikrowartości  $\mu\text{HV}_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  dla  $\phi_k = 15\text{mm}$ . Materiał: stal 55 (wyz i odpr). War. obr.:  $A=2\text{mm}$ ,  $v=70\frac{\text{sek}}{\text{min}}$ ,  $t=20\text{min}$



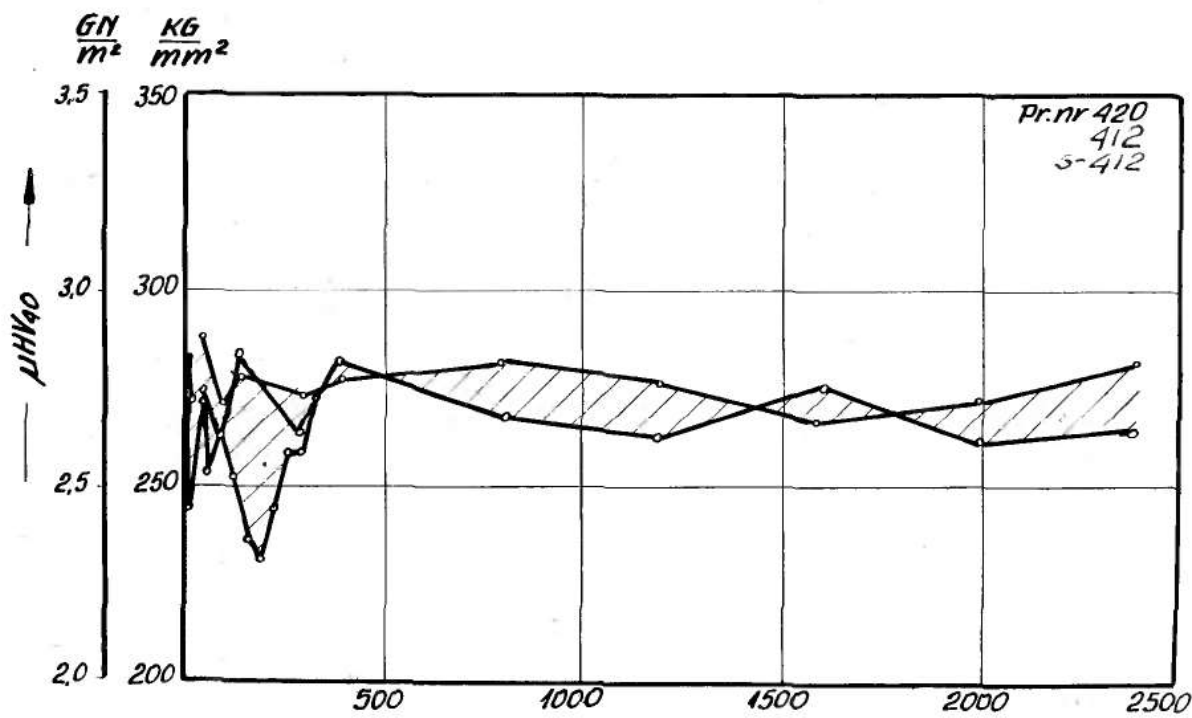
Rys. 68. Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  dla  $v = 30 \frac{1}{\text{sek}}$ . Materiat: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.  $\phi_x = 5 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ ,  $A = 3,0 \text{ mm}$



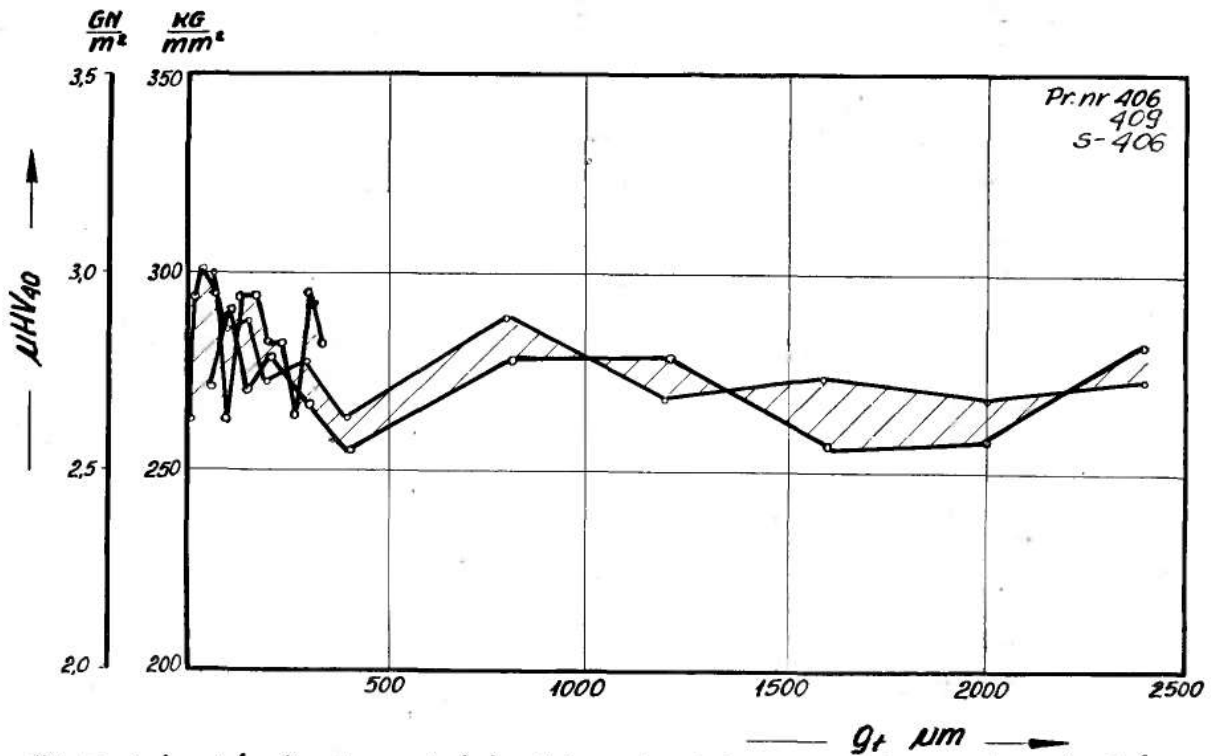
Rys. 69. Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  dla  $v = 40 \frac{1}{\text{sek}}$ . Mater. stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.  $\phi_x = 5 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$ ,  $A = 2,65 \text{ mm}$



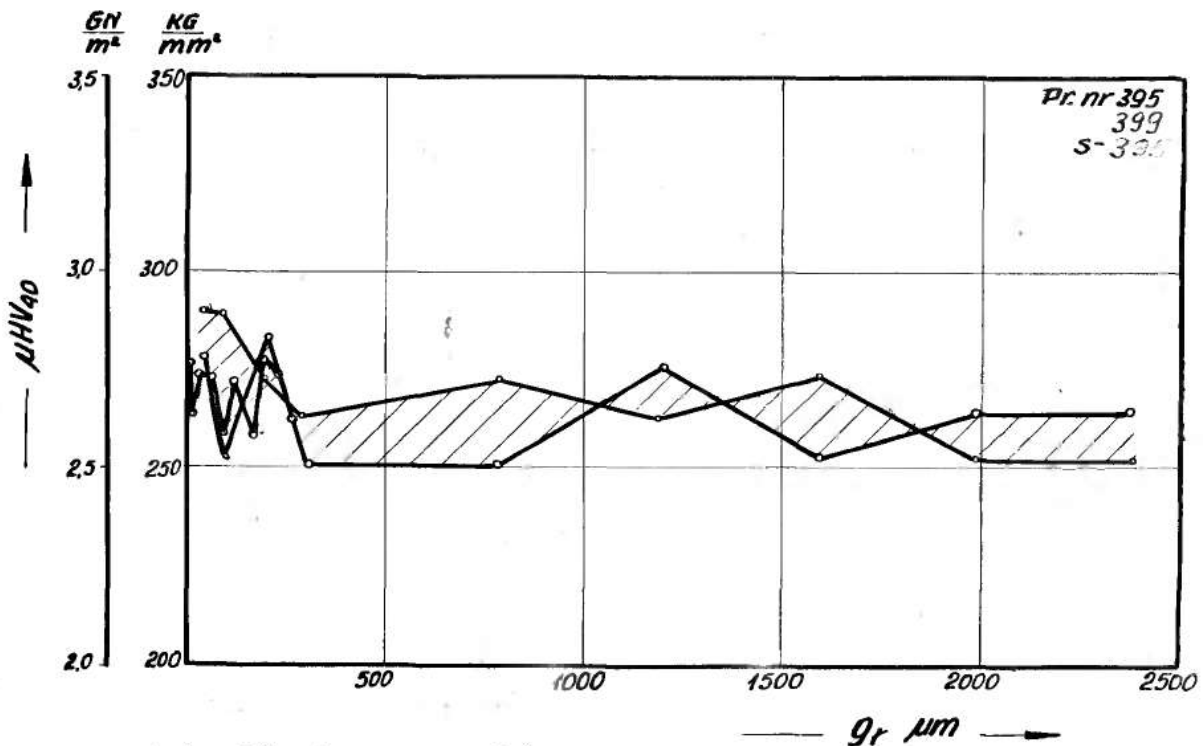
Rys.70<sub>z</sub> Zależność mikrohardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  dla  $v = 50 \frac{1}{sek}$ . Mater. stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.  $A =$  mm,  $\phi_k = 8,7 mm$ ,  $t = 20 min$



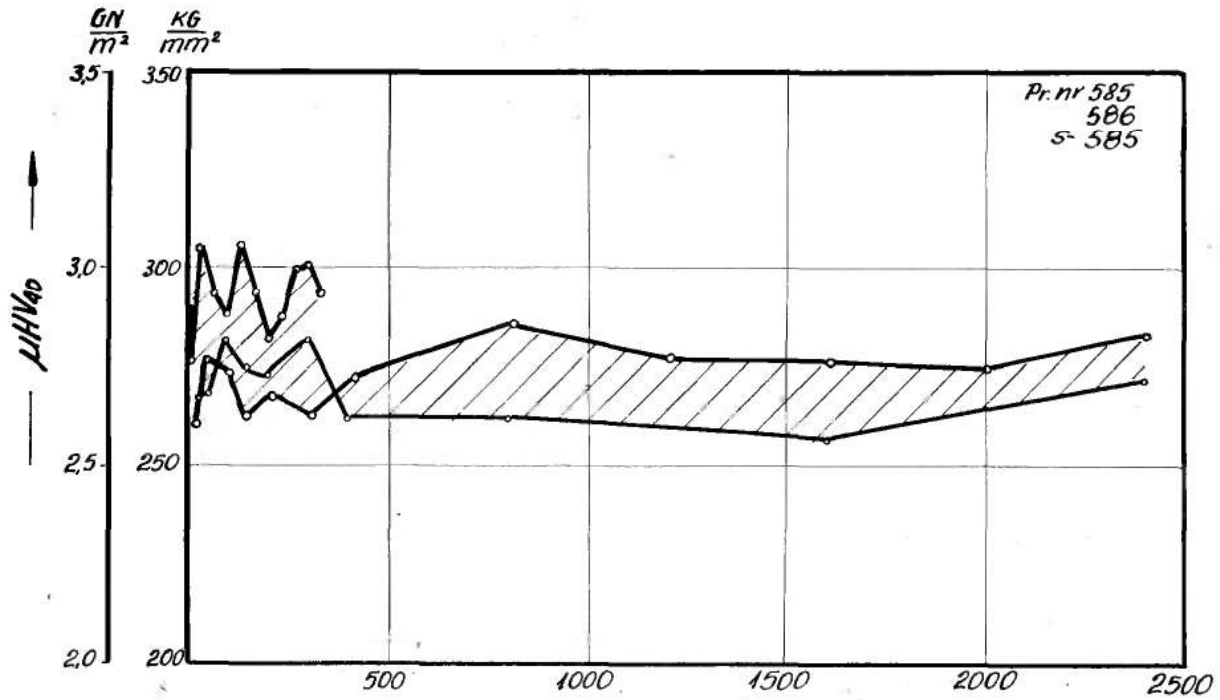
Rys.71<sub>z</sub> Zależność mikrohardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  dla  $v = 60 \frac{1}{sek}$ , Mater. stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.  $A = 2,15 mm$ ,  $\phi_k = 8,7 mm$ ,  $t = 20 min$



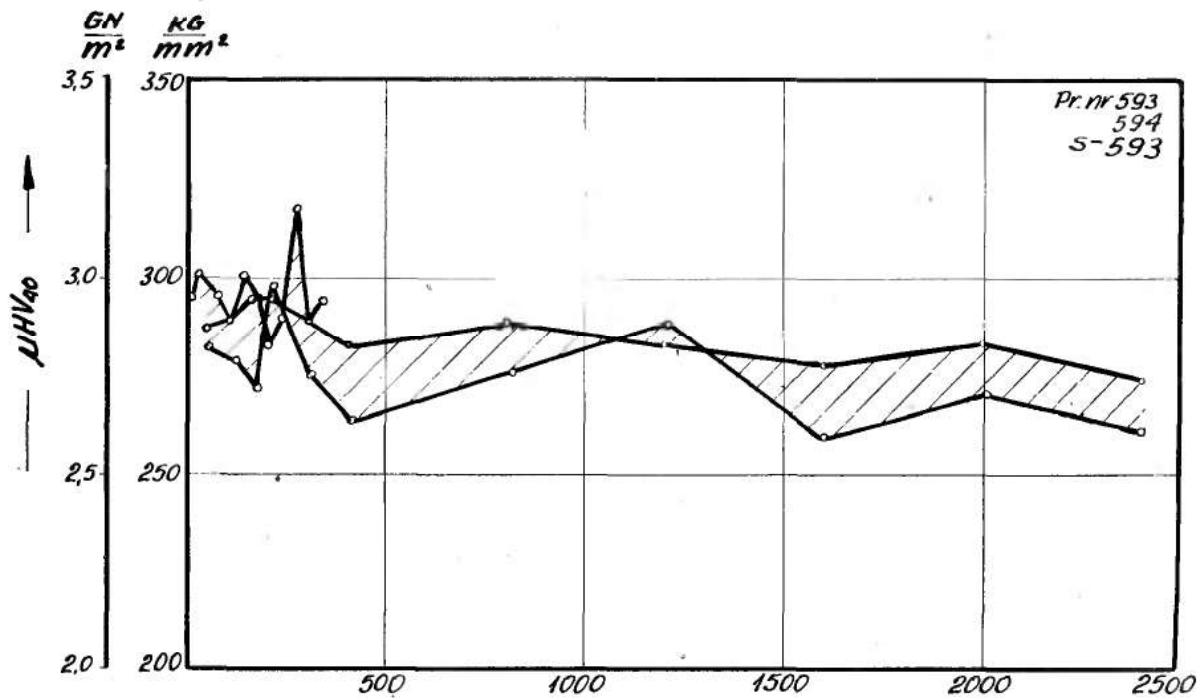
Rys. 72 Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_r$  dla  $v=70 \frac{1}{\text{sek}}$ . Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.:  $\phi_k=8,7\text{mm}$ ,  $t=20\text{min}$ ,  $A=2\text{mm}$



Rys. 73 Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_r$  dla  $v=80 \frac{1}{\text{sek}}$ . Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.:  $\phi_k=8,7\text{mm}$ ,  $t=20\text{min}$ ,  $A=1,9\text{mm}$

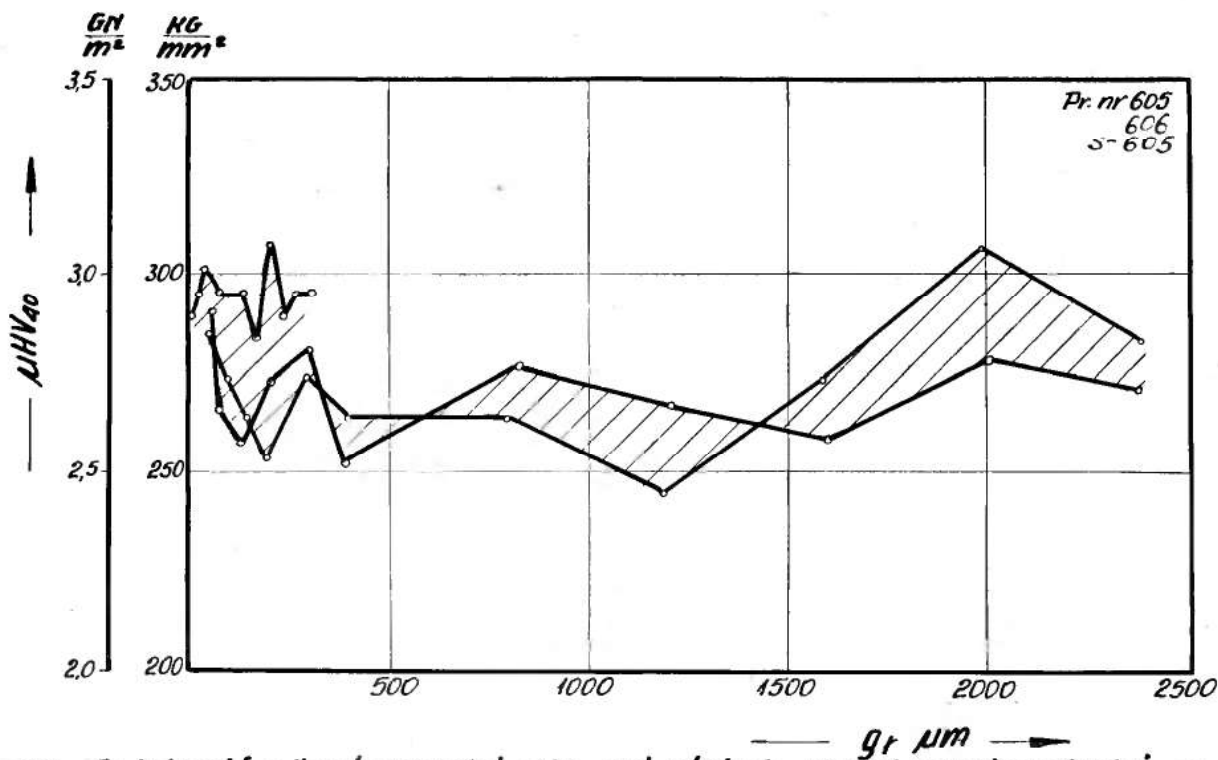


Rys.74<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  dla  $t=5\text{min}$ . Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.:  $A=2\text{mm}$ ,  $\phi_k=8,7\text{mm}$ ,  $v=70\frac{1}{\text{sek}}$

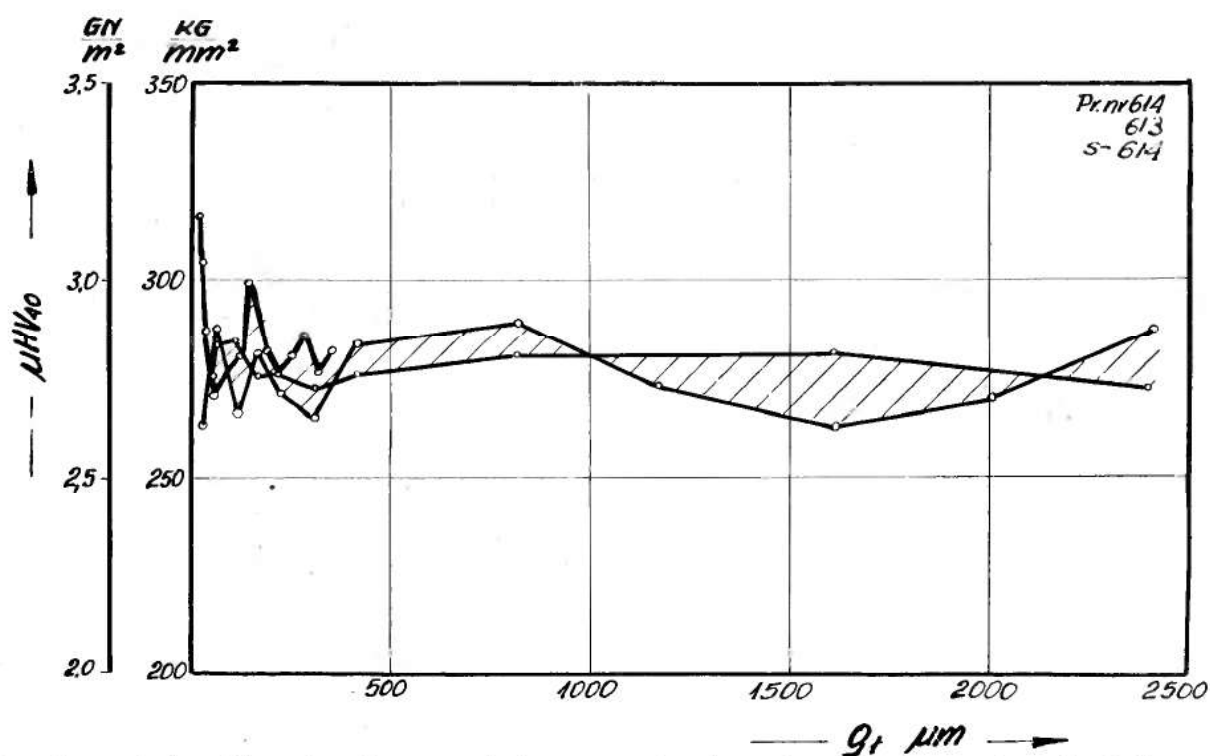


Rys.75<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  dla  $t=15\text{min}$ . Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obr.:  $A=2\text{mm}$ ,  $\phi_k=8,7\text{mm}$ ,  $v=70\frac{1}{\text{sek}}$ .

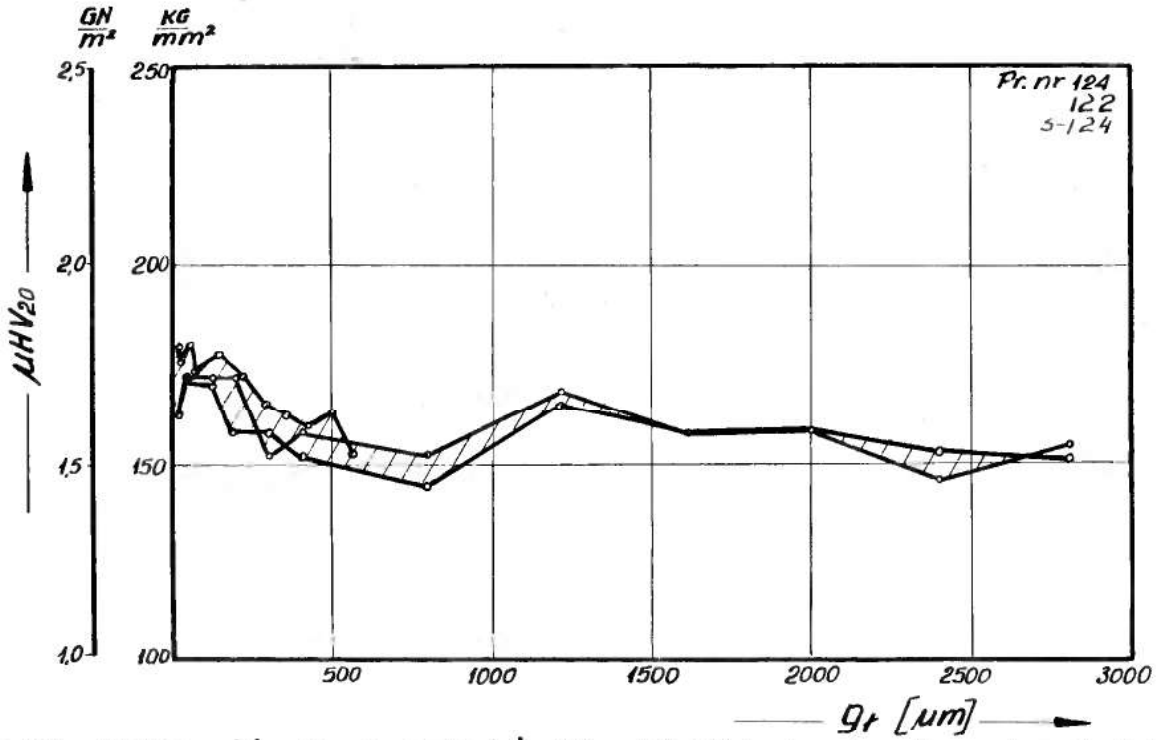




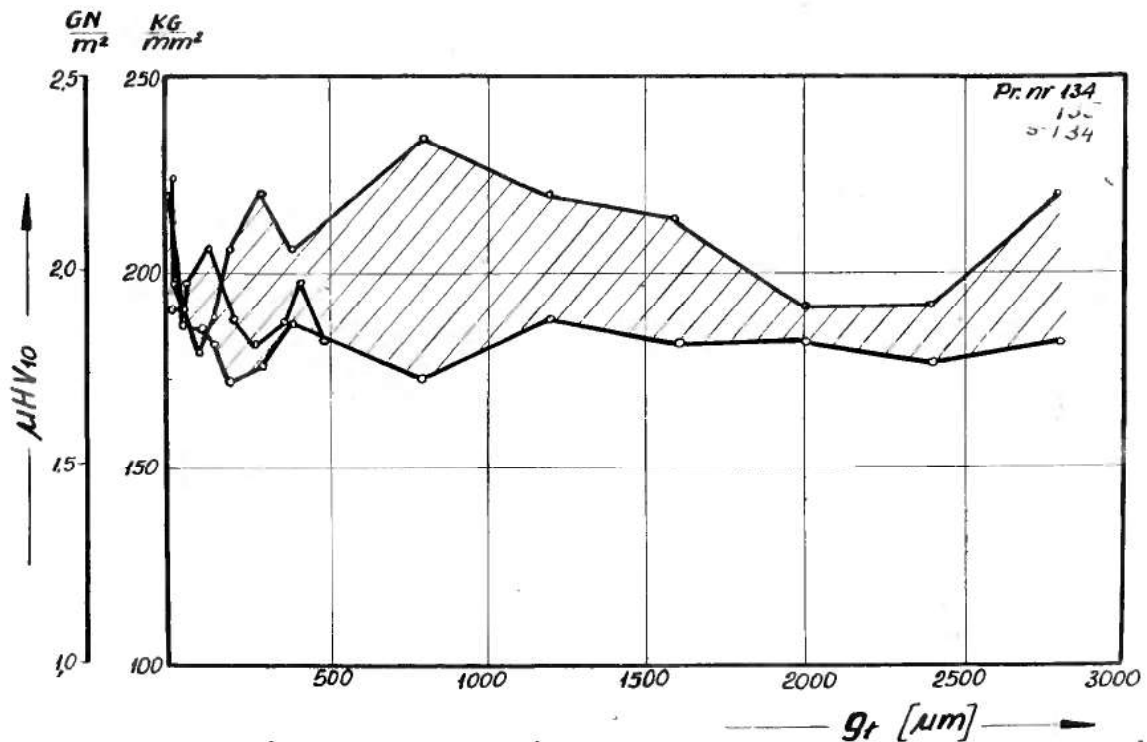
Rys.76. Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  dla  $t=25$  min. Materiał: stal 55 (wyz. i odpr.). War. obr.:  $A=2$  mm,  $\phi_k=8,7$  mm,  $v=70$   $\frac{1}{\text{sek}}$ .



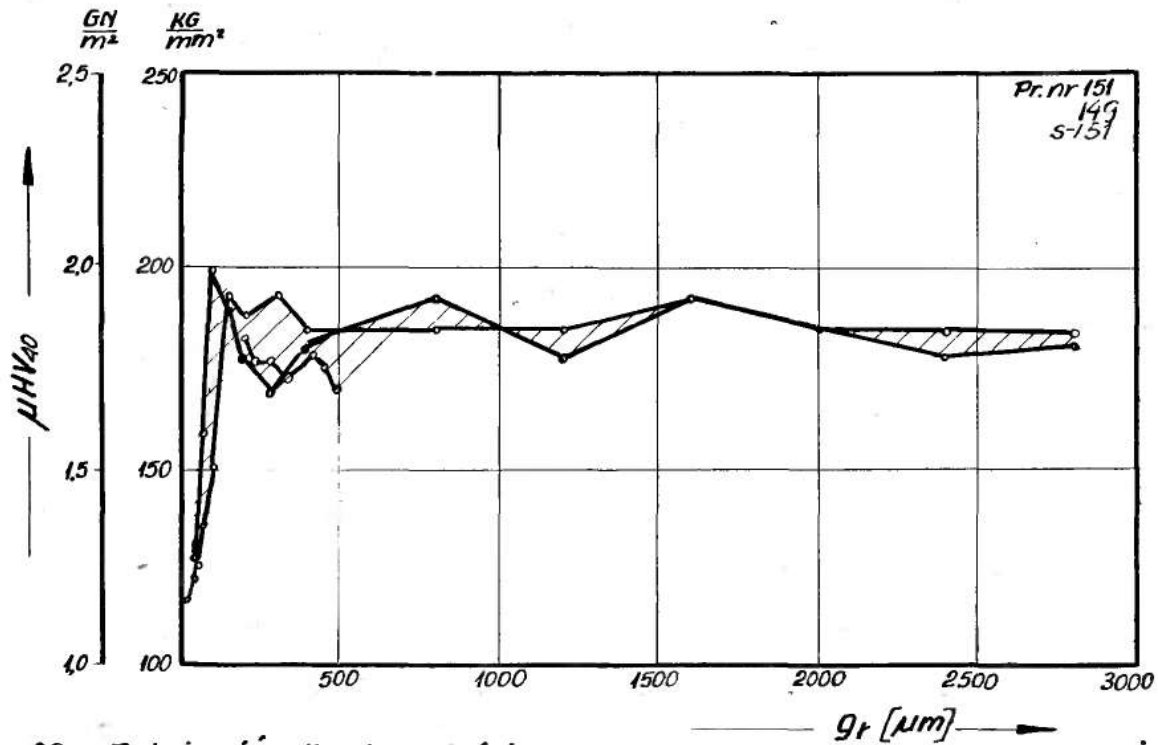
Rys.77. Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  dla  $t=35$  min. Materiał: stal 55 (wyz. i odpr.). War. obr.:  $A=2$  mm,  $\phi_k=8,7$  mm,  $v=70$   $\frac{1}{\text{sek}}$ .



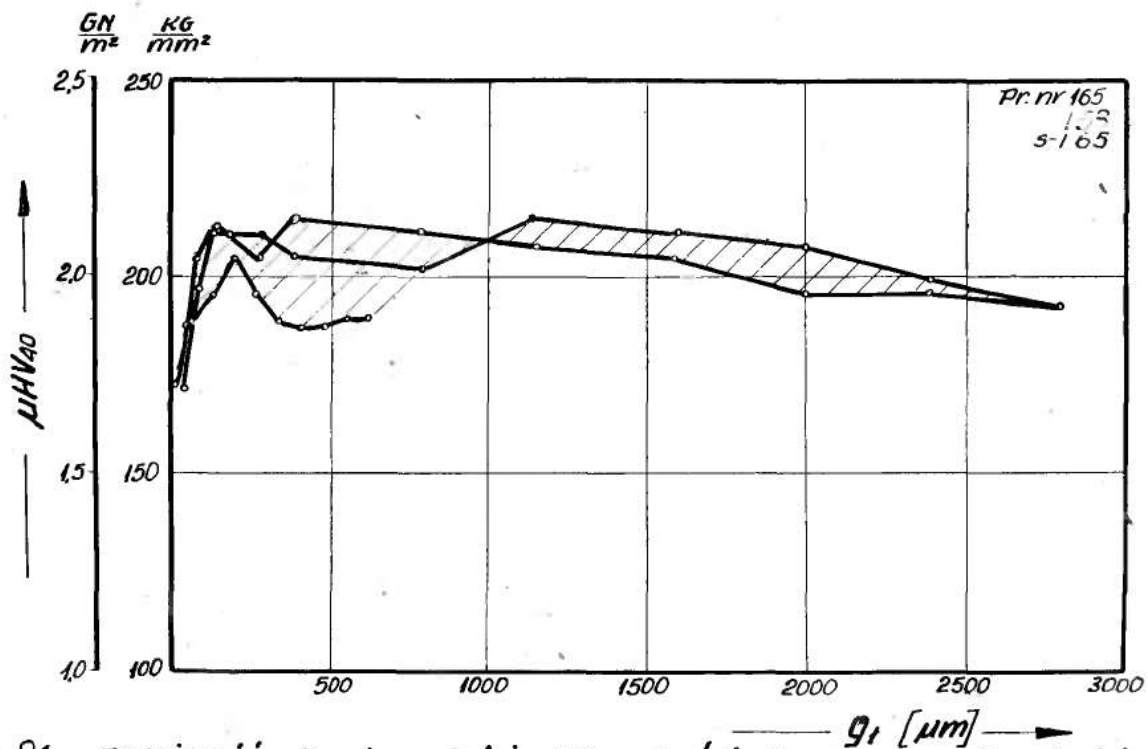
Rys. 78z Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{20}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_T$  stali 15 (wyz. i odpr.). War. obróbki:  $t=10\text{min}$ ,  $v=60\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15\text{mm}$ ,  $\phi_k=6,3\text{mm}$



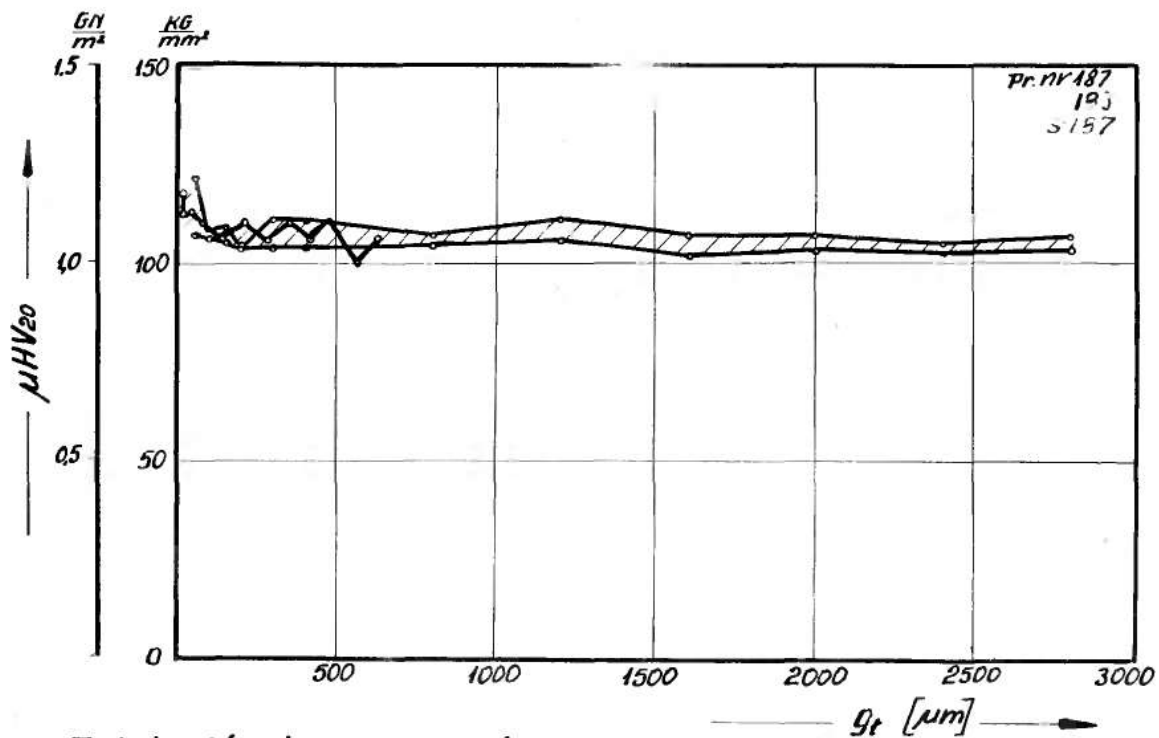
Rys. 79z Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{10}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_T$  stali 25 (wyz. i odpr.). War. obróbki:  $t=10\text{min}$ ,  $v=60\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15\text{mm}$ ,  $\phi_k=6,3\text{mm}$



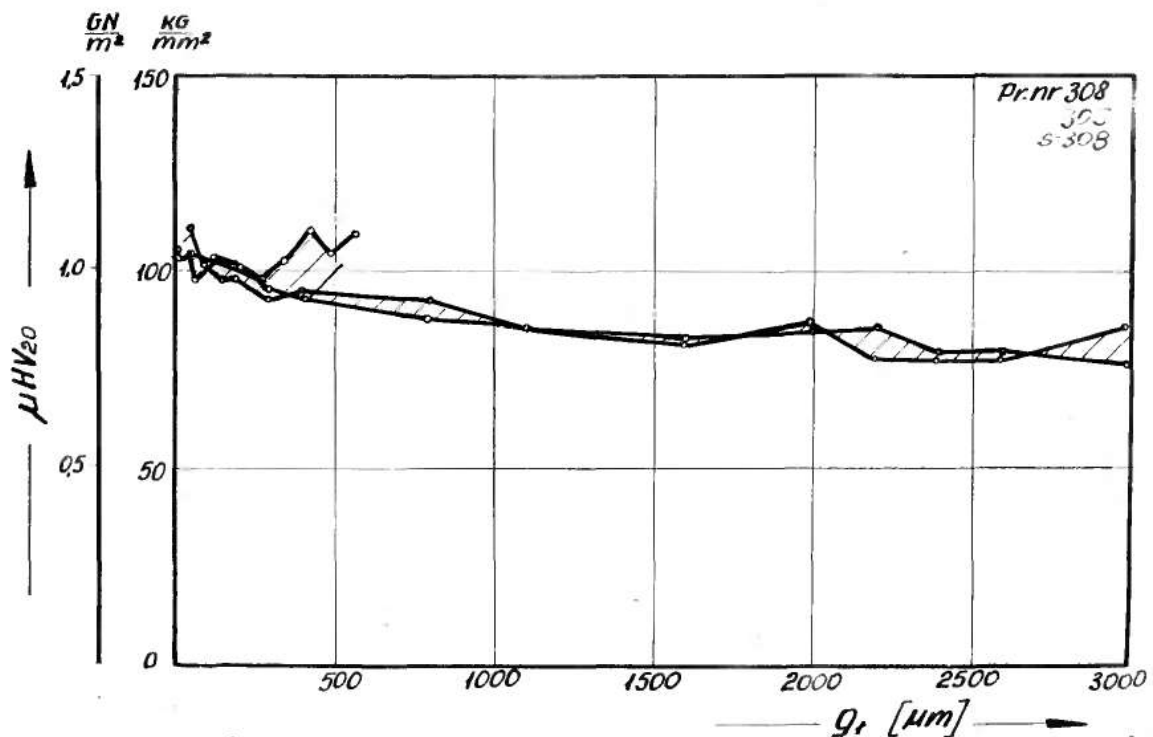
Rys. 80<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  stali 35 (wyz. i odpr.). War. obróbki:  $t=10 \text{ min}$ ,  $v=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$



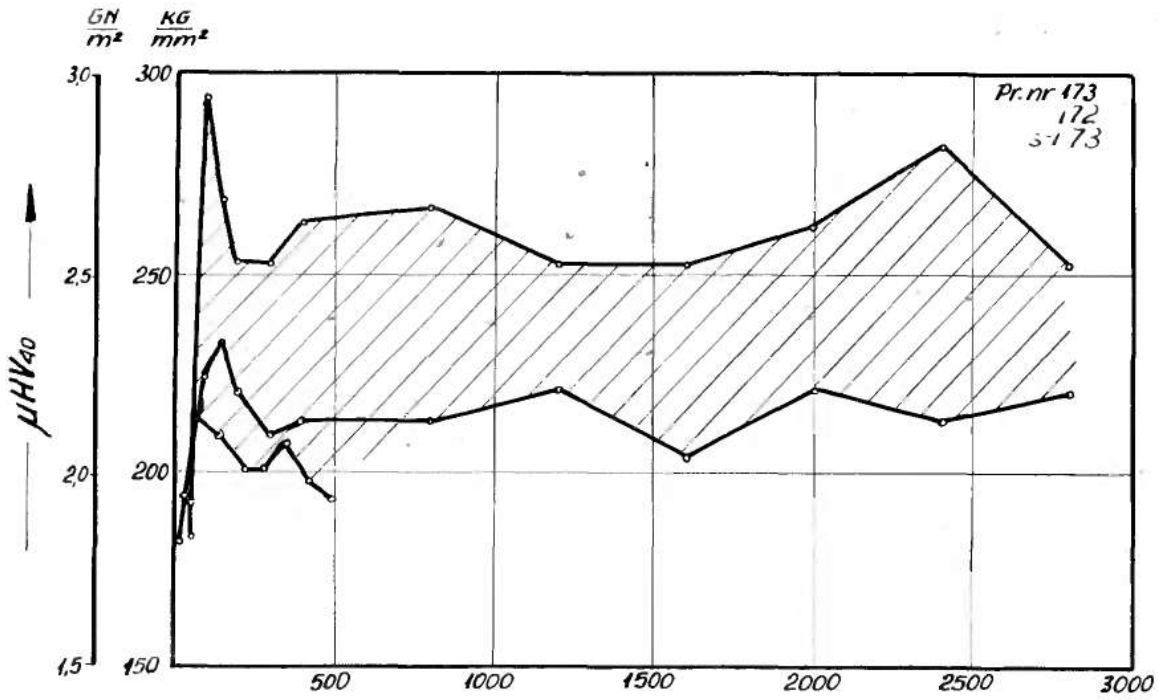
Rys. 81<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  stali 45 (wyz. i odpr.). War. obróbki:  $t=10 \text{ min}$ ,  $v=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$



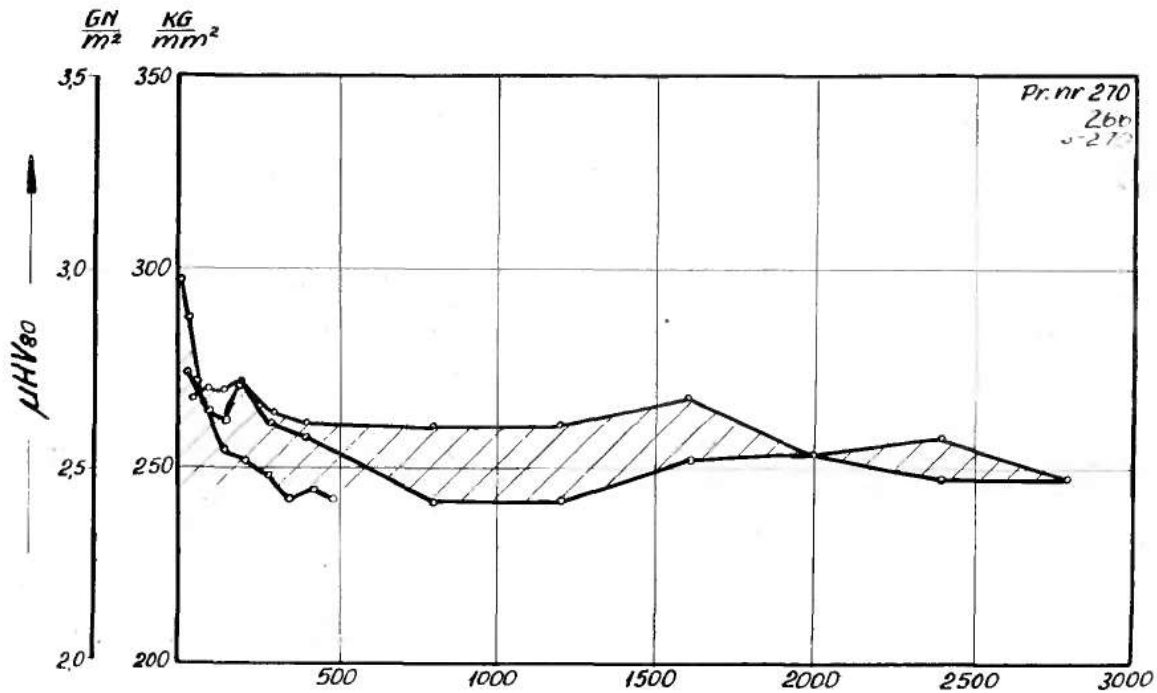
Rys. 82<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{20}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  stopu alum. PA10 (przesyc. i starz.). War. obróbki:  $t=10 \text{ min}$ ,  $v=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=215 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$



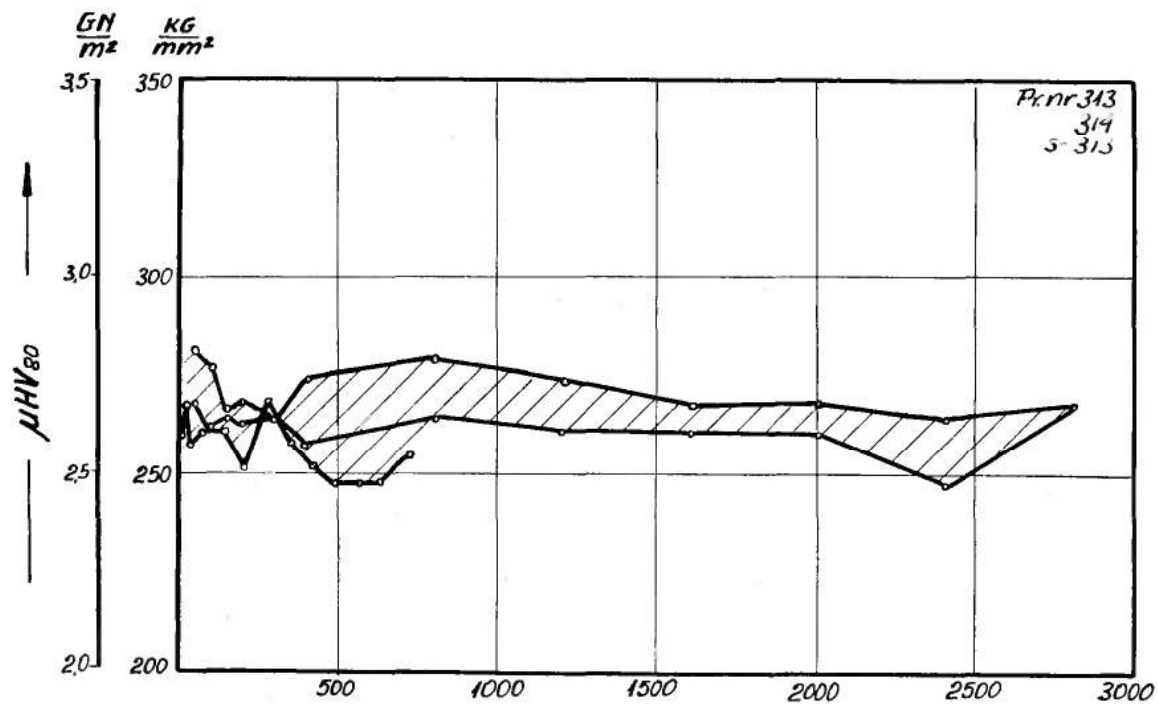
Rys. 83<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{20}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  miedzi M1 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10 \text{ min}$ ,  $v=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=215 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$



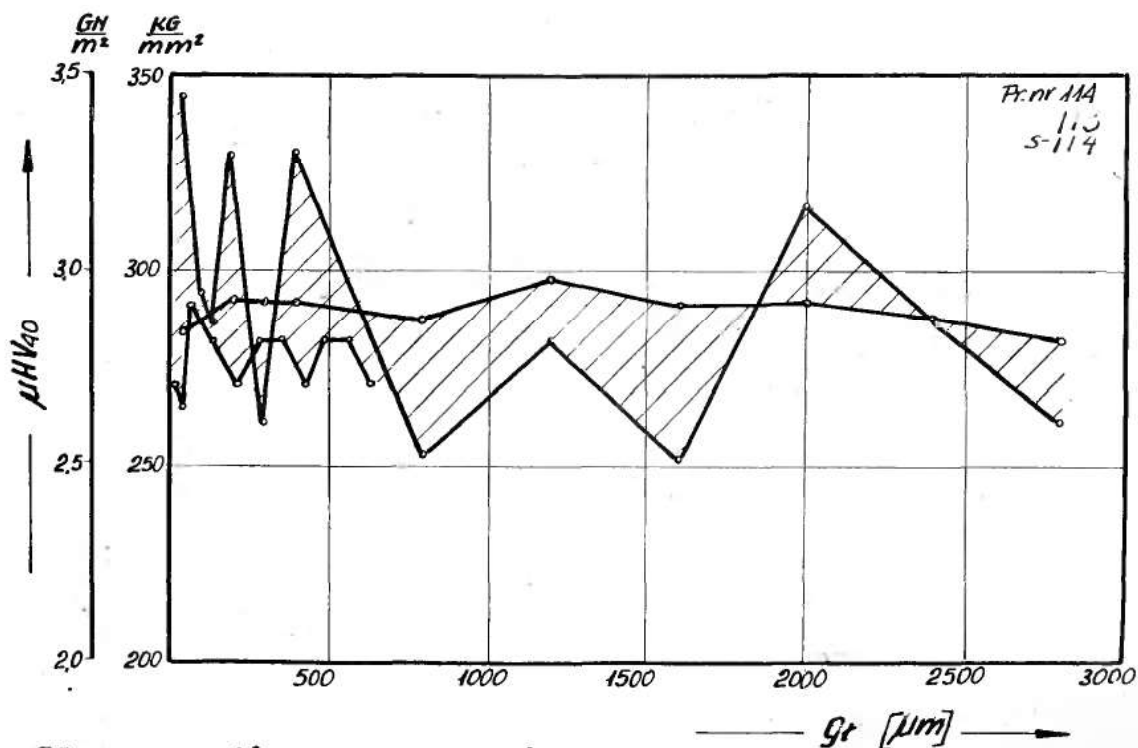
Rys. 84<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  stali 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10 \text{ min}$ ,  $v=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$



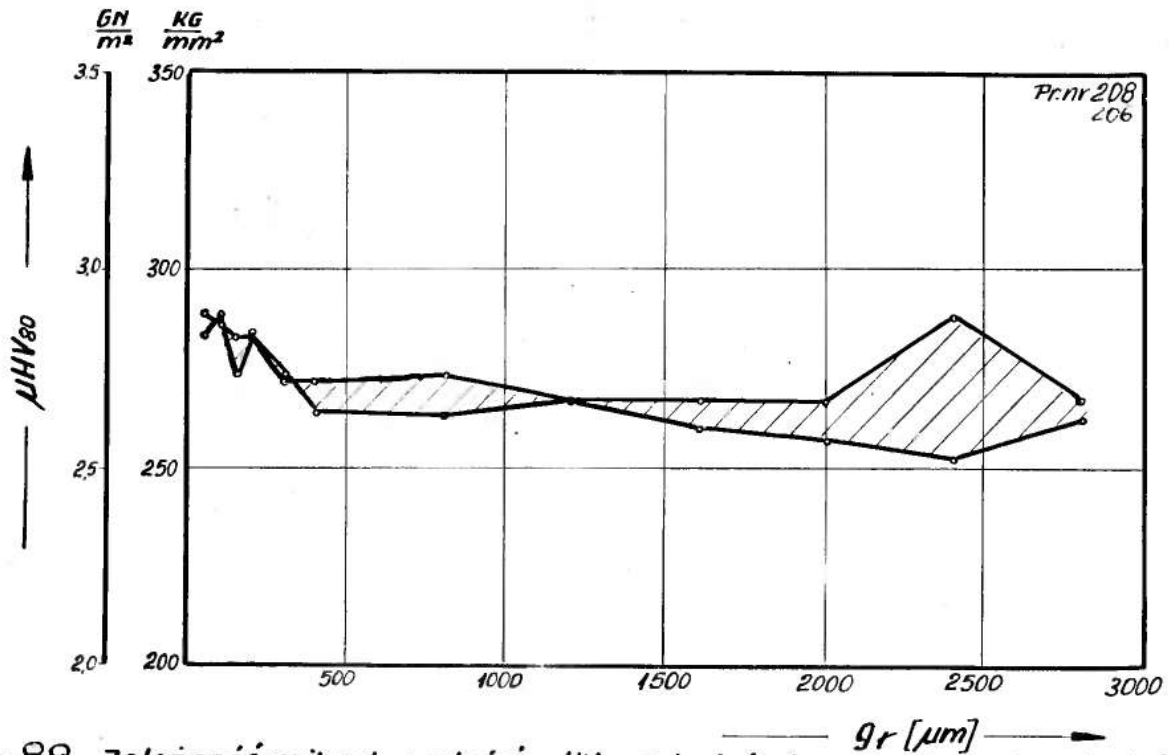
Rys. 85<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{80}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_t$  stali 15H15 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10 \text{ min}$ ,  $v=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$



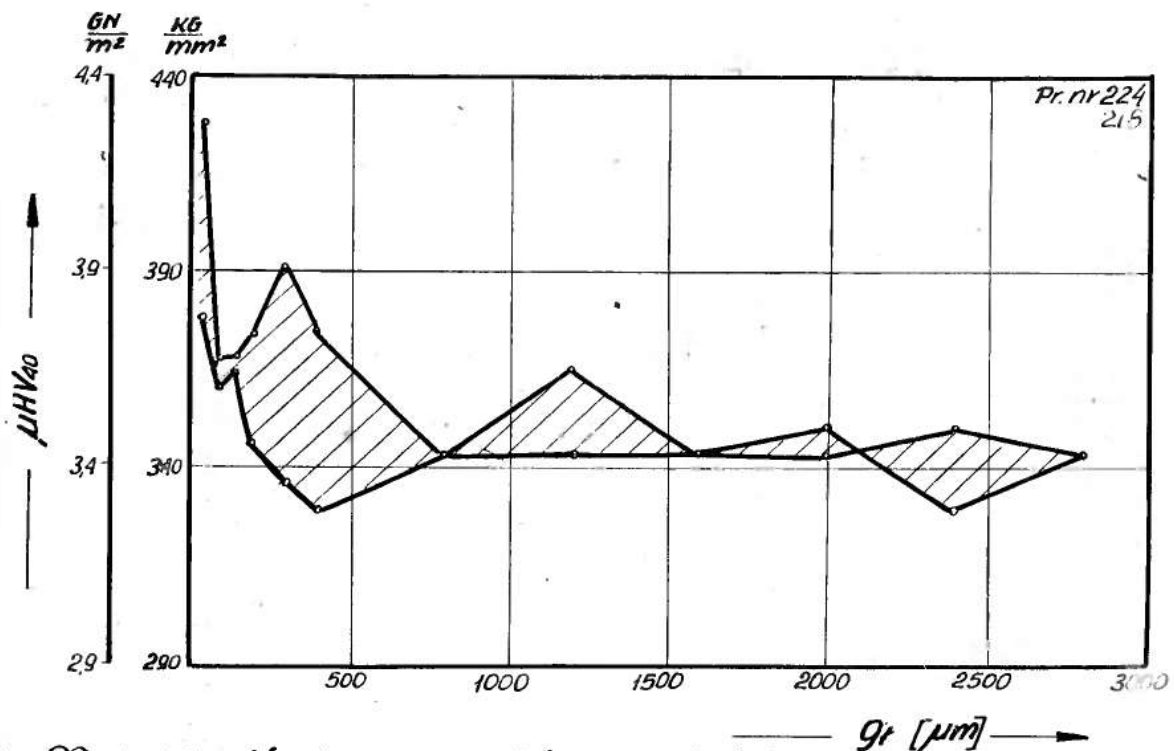
Rys. 86 Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{80}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_r$  stali respr. 50Hs (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10\text{min}$ ,  $v=60\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15\text{mm}$ ,  $\phi_k=6,3\text{mm}$



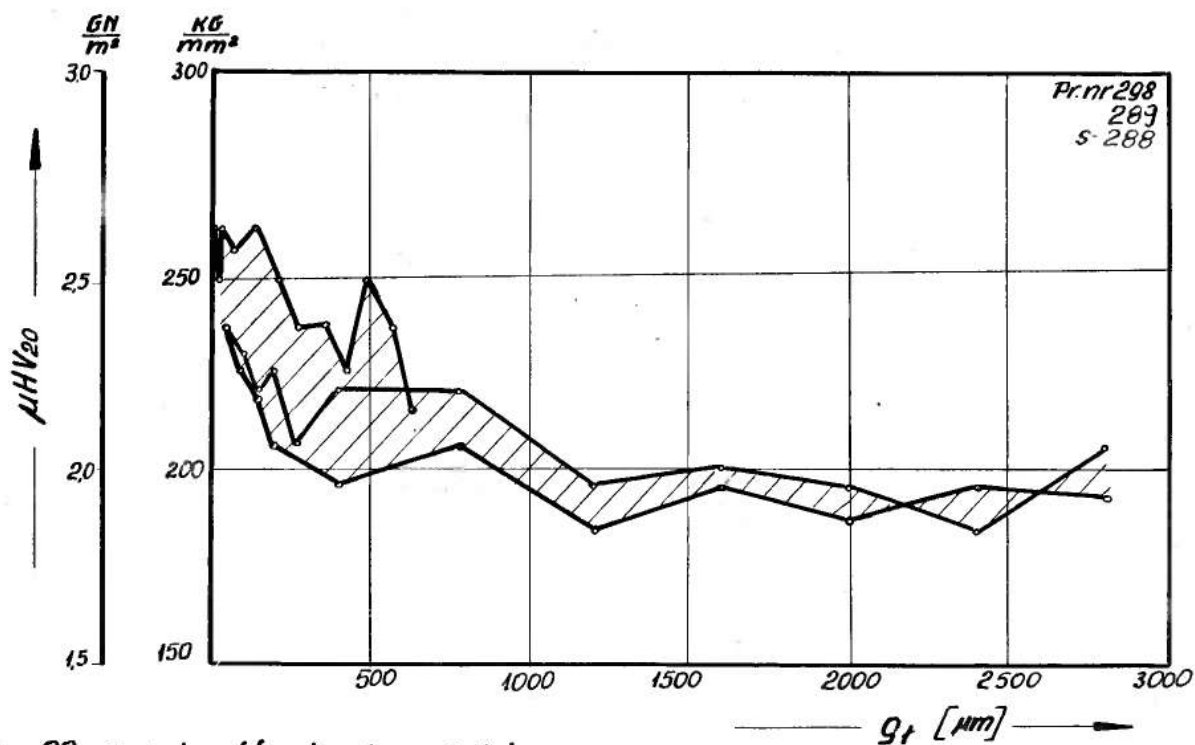
Rys. 87 Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_r$  stali NC6 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10\text{min}$ ,  $v=60\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15\text{mm}$ ,  $\phi_k=6,3\text{mm}$



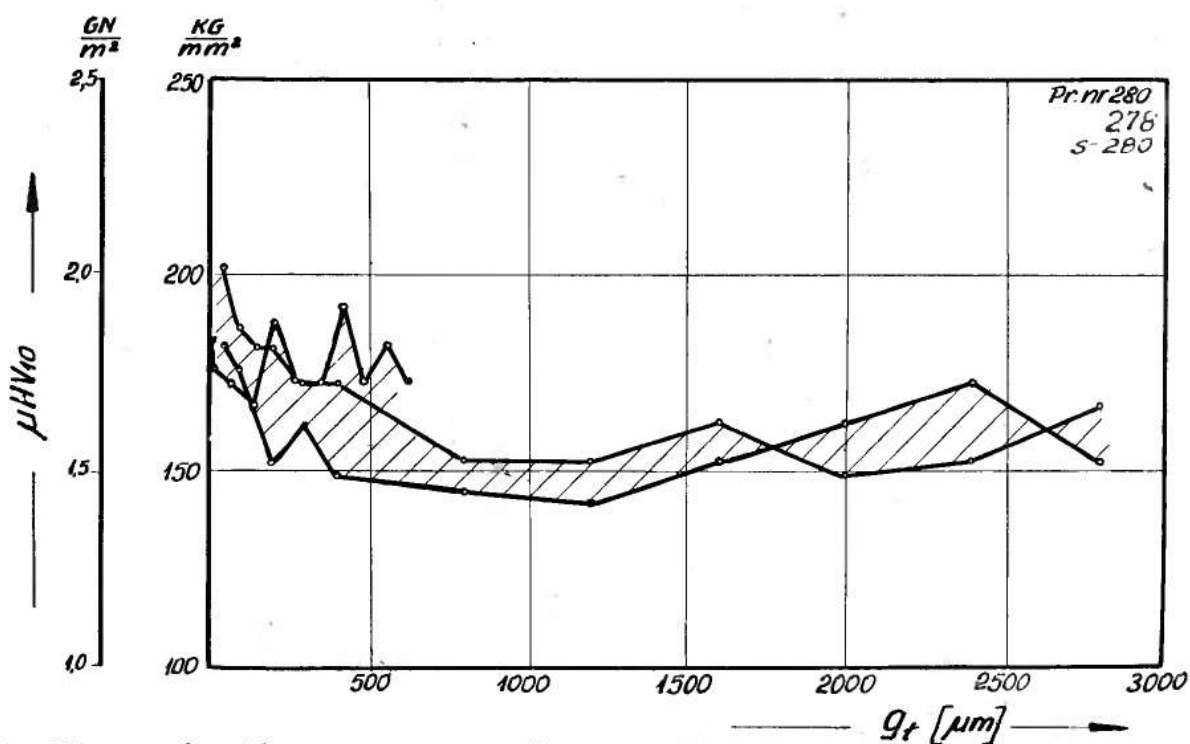
Rys. 88z Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{80}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_r$  stali SW9 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10\text{min}$ ,  $v=60\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15\text{mm}$ ,  $\phi_k=6,3\text{mm}$



Rys. 89z Zależność mikrotwardości  $\mu\text{HV}_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_r$  stali SW18 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10\text{min}$ ,  $v=60\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15\text{mm}$ ,  $\phi_k=6,3\text{mm}$

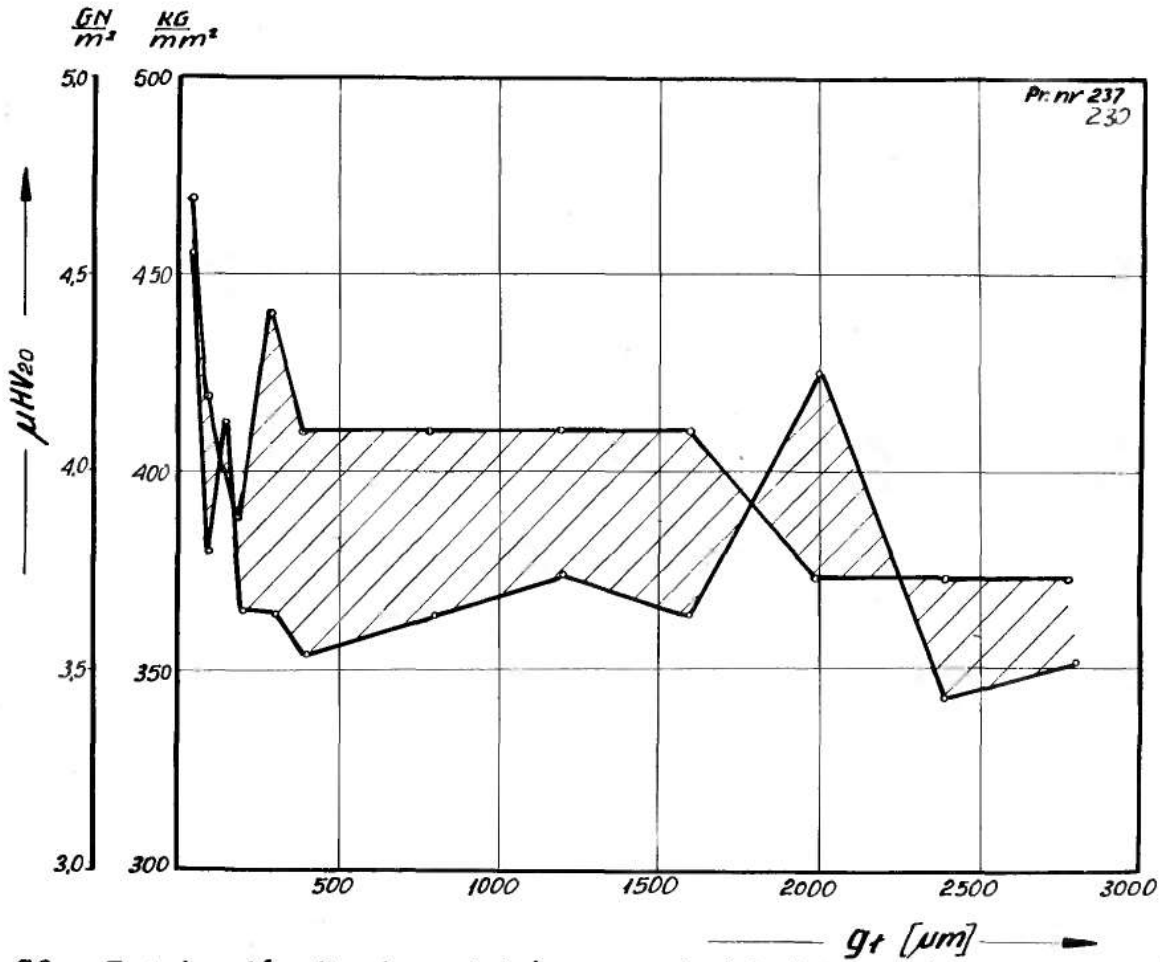


Rys.90<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{20}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_f$  brązu BA1032 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10\text{min}$ ,  $v=60\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15\text{mm}$ ,  $\phi_k=6,3\text{mm}$

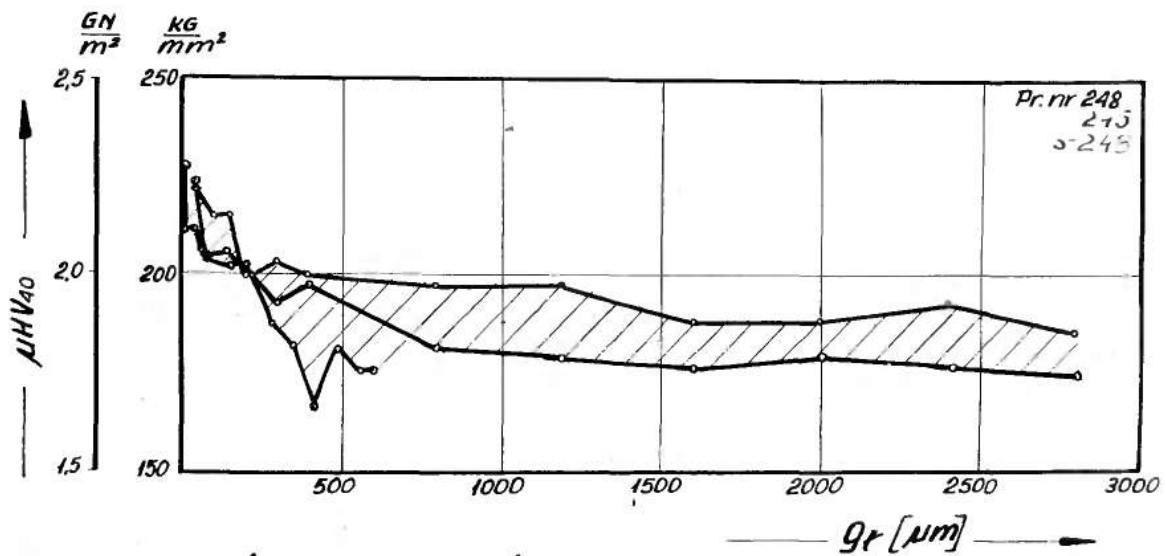


Rys.91<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{10}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $q_f$  mosiądzu M60 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10\text{min}$ ,  $v=60\frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15\text{mm}$ ,  $\phi_k=6,3\text{mm}$

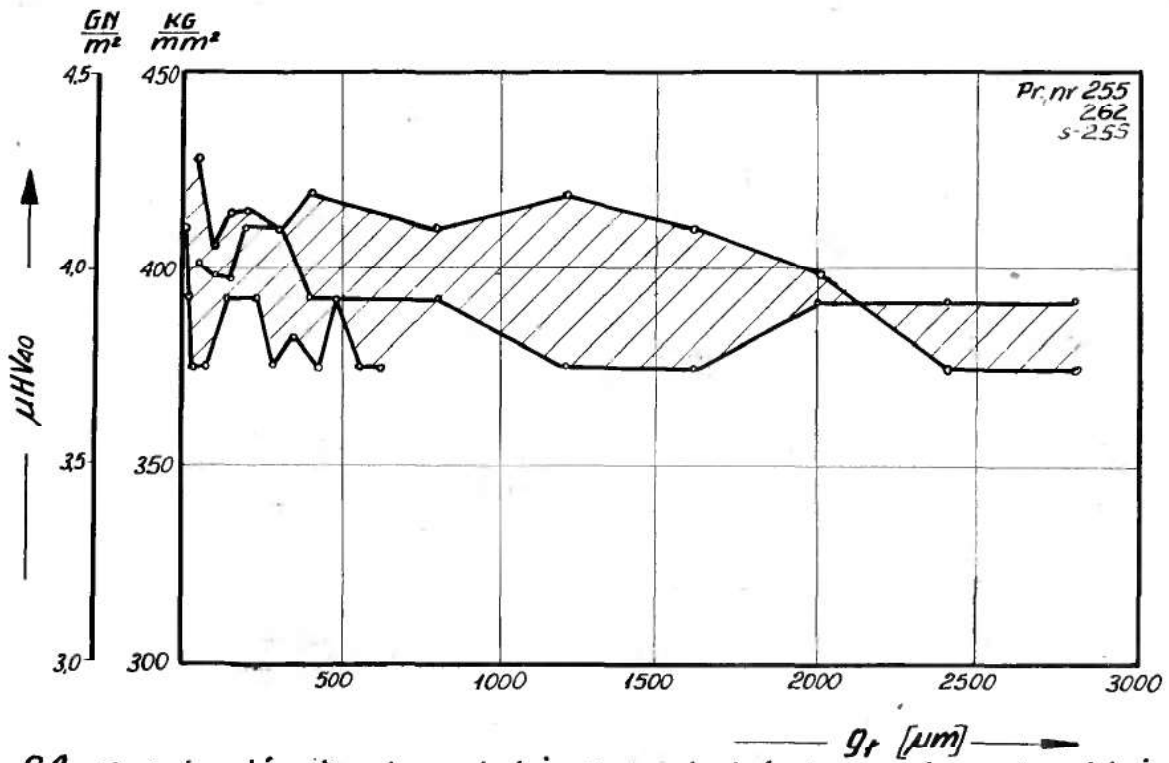




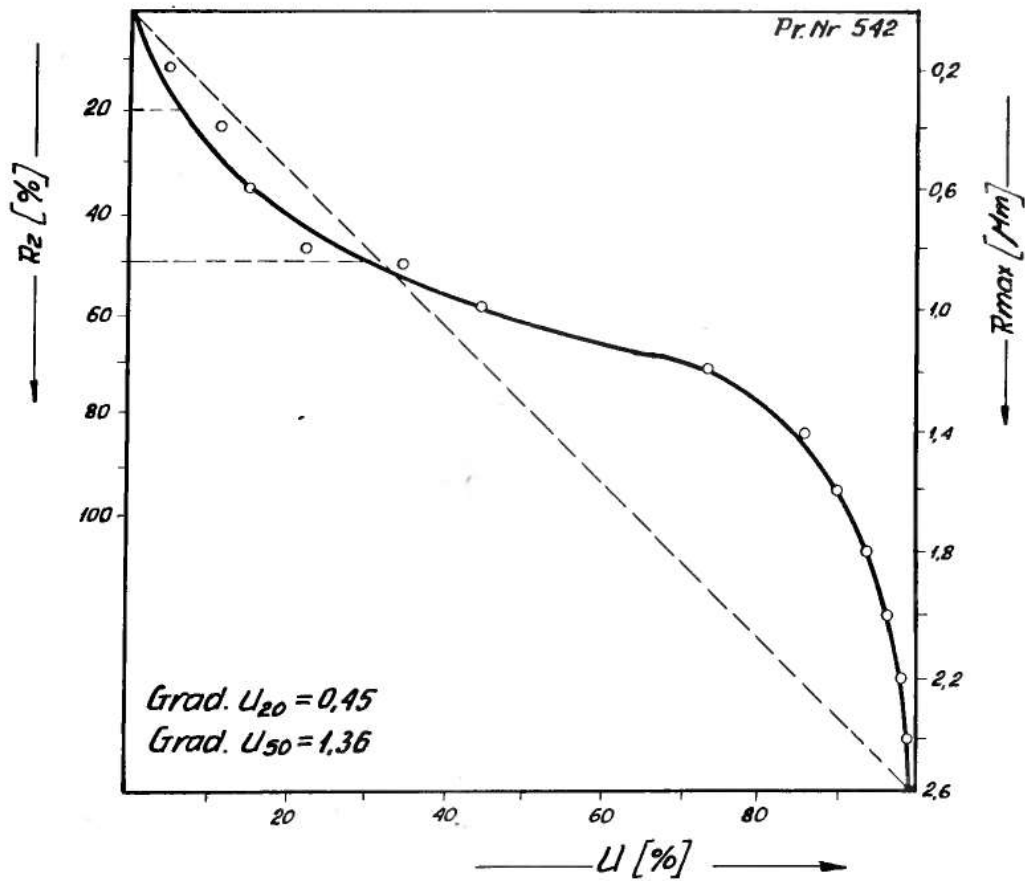
Rys. 92<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{20}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  żeliwa ZL15 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10 \text{ min}$ ,  $v=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$



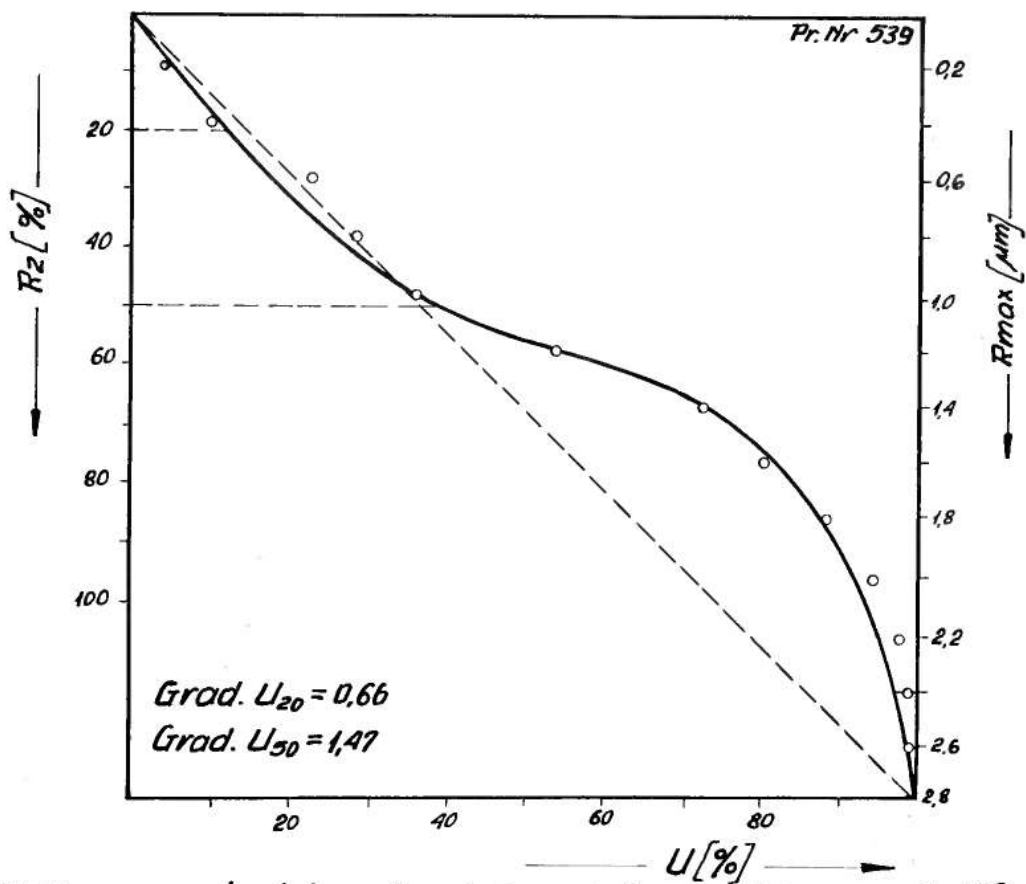
Rys. 93<sub>z</sub> Zależność mikrotwardości  $\mu HV_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_t$  żeliwa Zc C3510 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10 \text{ min}$ ,  $v=60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15 \text{ mm}$ ,  $\phi_k=6,3 \text{ mm}$



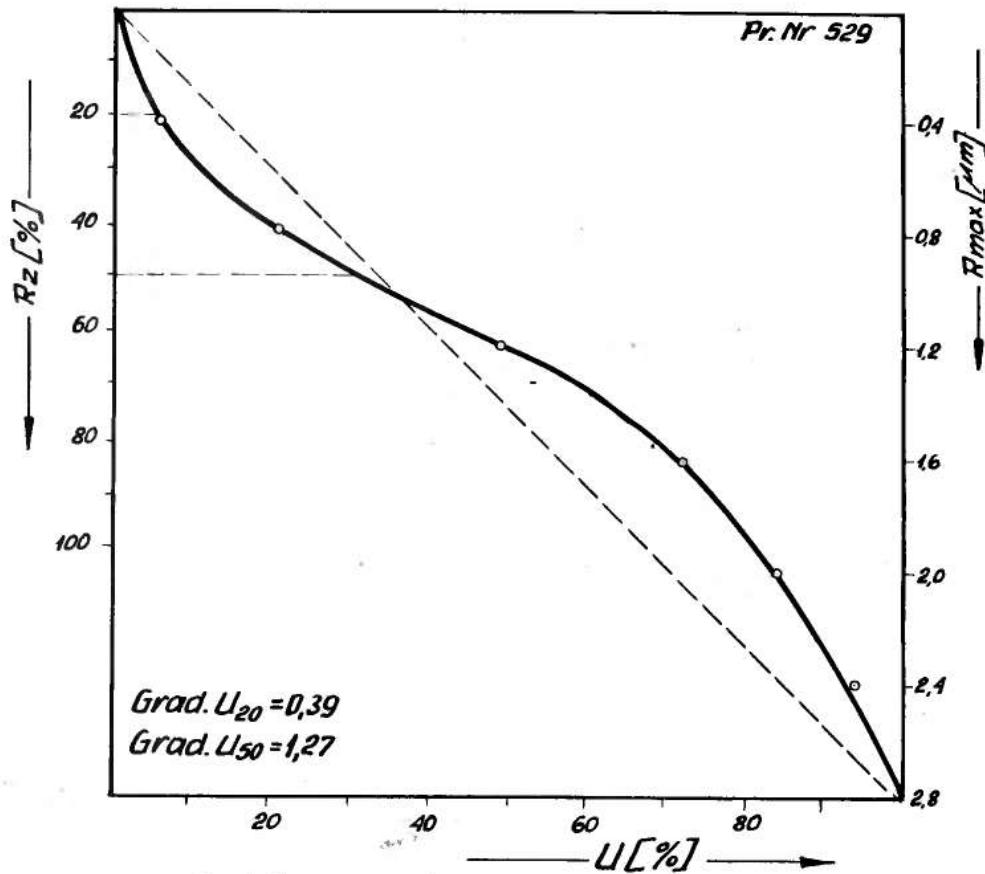
Rys. 94<sub>z</sub> Zależność mikrohardości  $\mu\text{HV}_{40}$  od głębok. warstwy wierzchniej  $g_r$  tytanu WT3 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $t=10\text{min}$ ,  $v=60\frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ,  $A=2,15\text{mm}$ ,  $\phi_k=5,3\text{mm}$



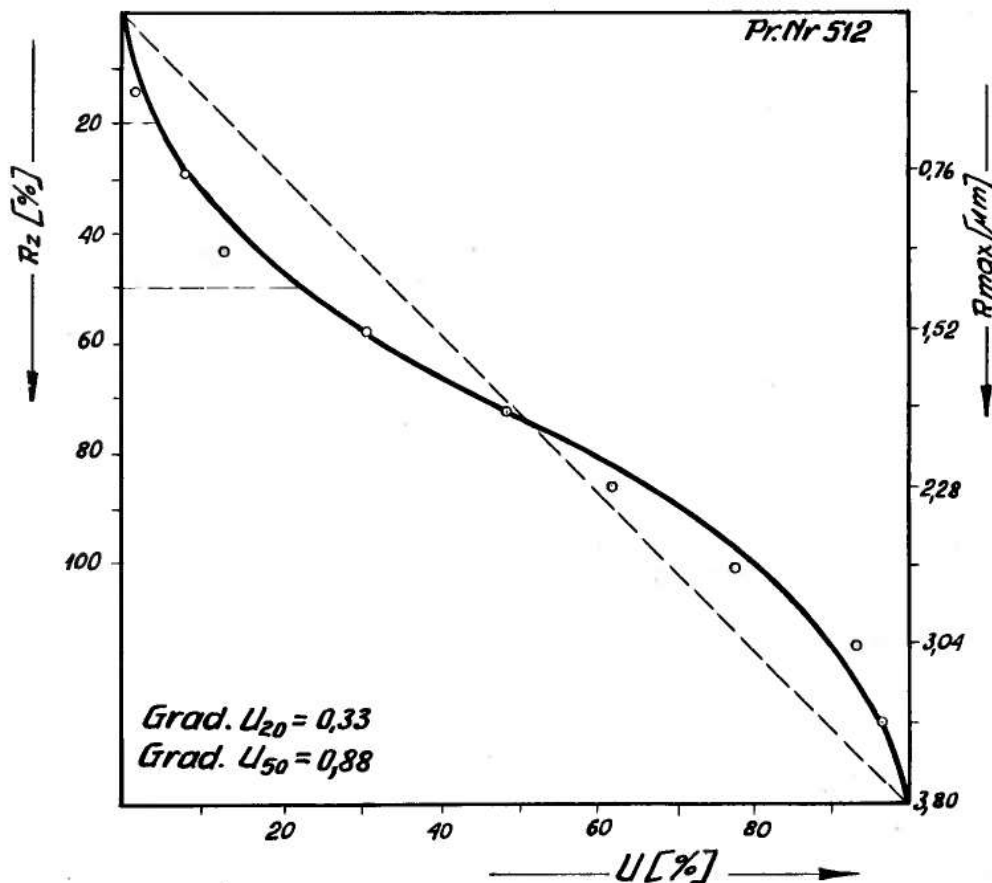
Rys.95<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $A_2 = 1,0$  mm  
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5$  mm,  $t = 20$  min,  $v = 70 \frac{1}{sek}$



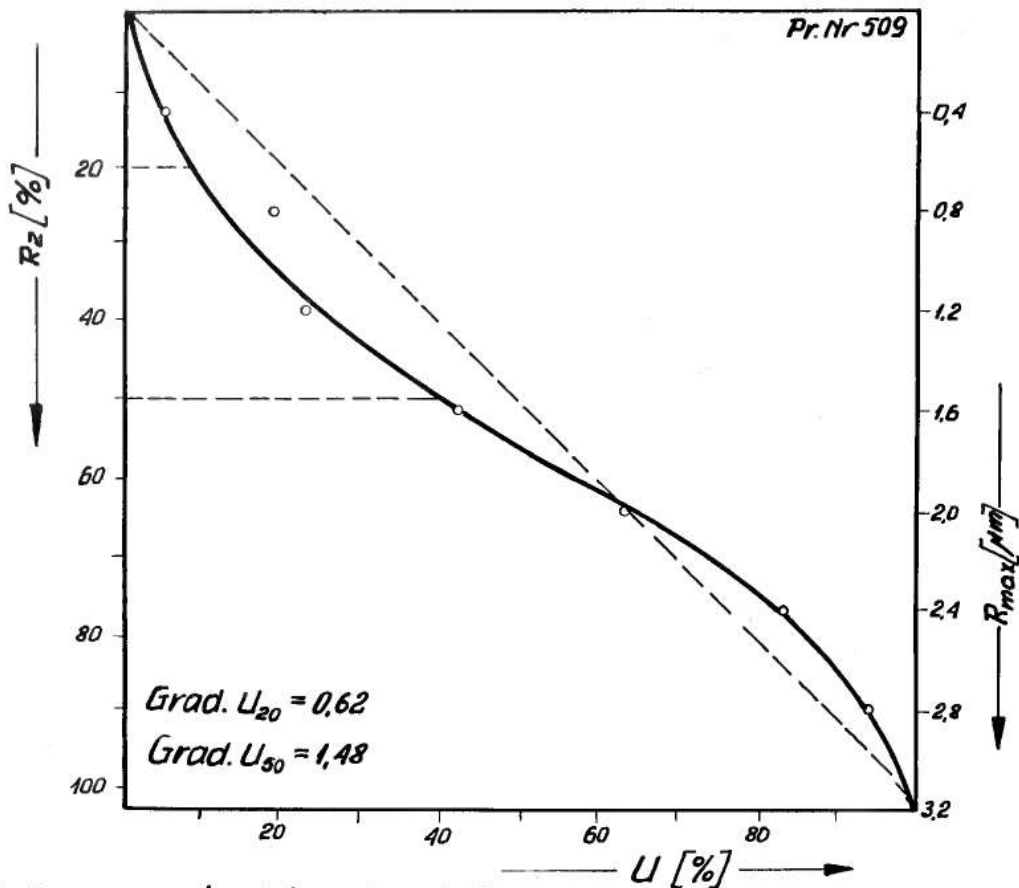
Rys.96<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $A_3 = 1,15$  mm  
 Materiał: stal 55 (wyż. odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5$  mm,  $t = 20$  min,  $v = 70 \frac{1}{sek}$



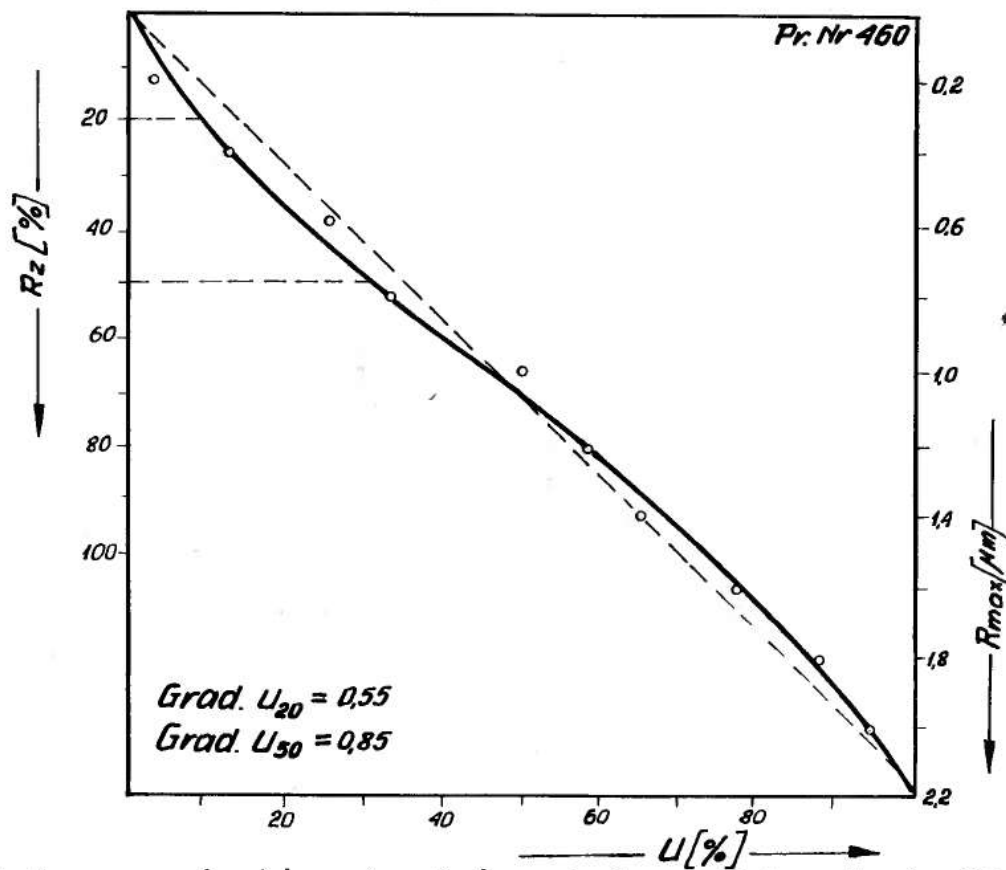
Rys.97<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $A_s = 1,4 \text{ mm}$   
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $\phi_k = 5 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$



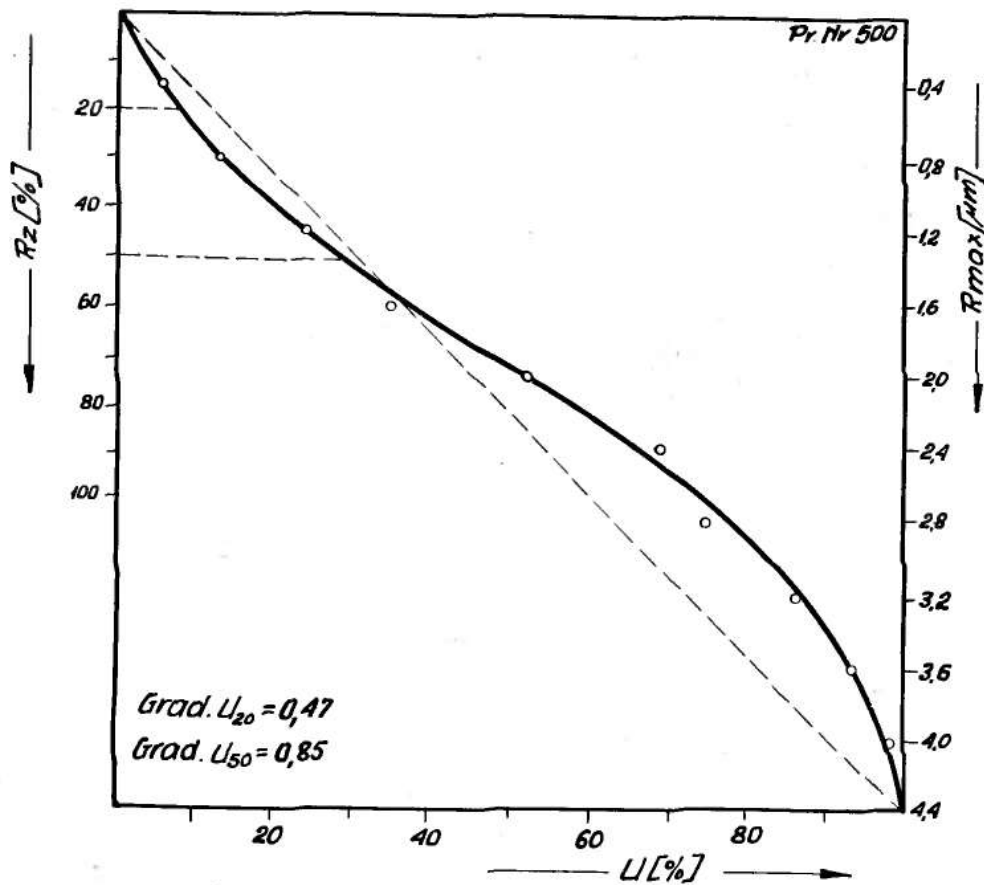
Rys.98<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $A_s = 1,65 \text{ mm}$   
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $\phi_k = 5 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$



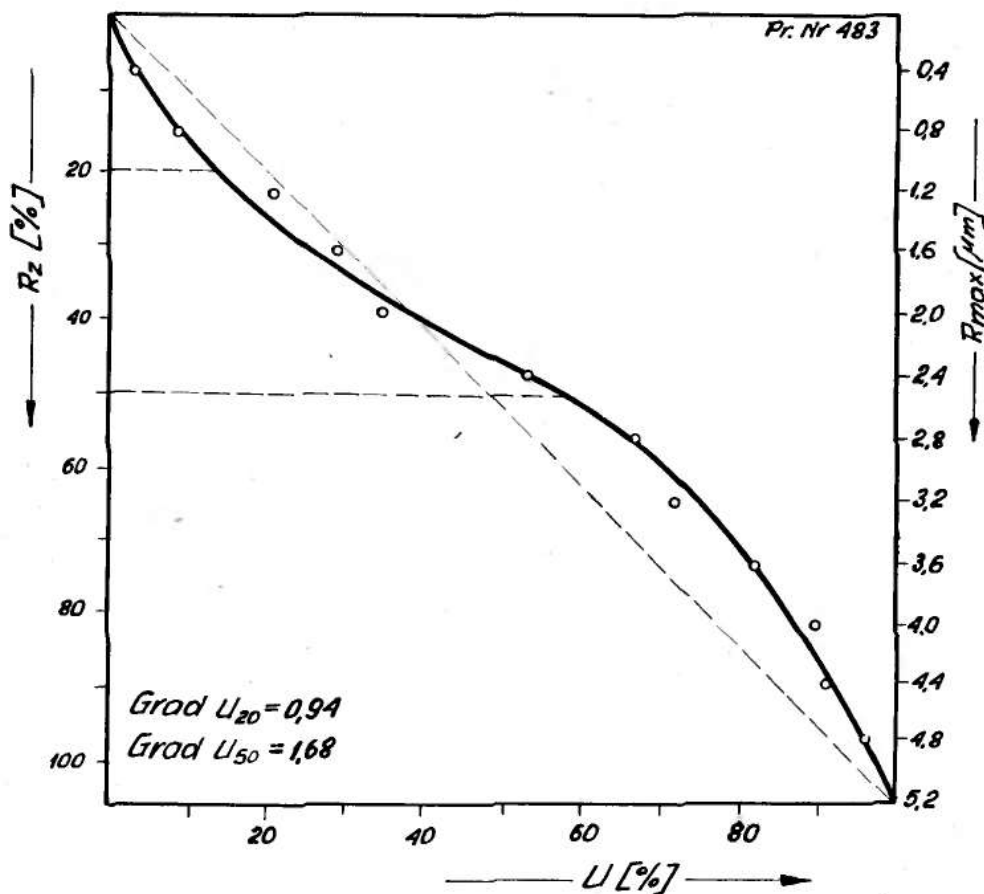
Rys.99<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $A_6 = 2.0$  mm  
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5$  mm,  $v = 70 \frac{1}{sek}$ ,  $t = 20$  min



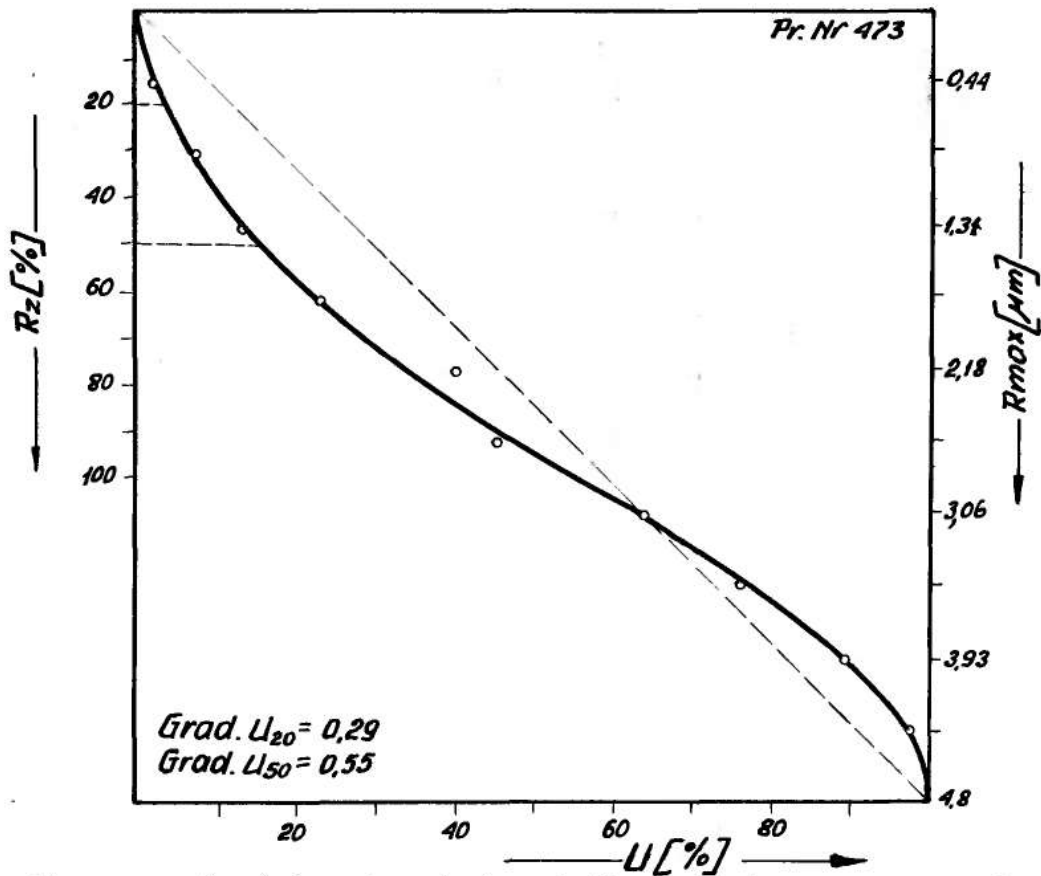
Rys.100<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $\phi_k = 3.2$  mm  
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $A = 2$  mm,  $v = 70 \frac{1}{sek}$ ,  $t = 20$  min



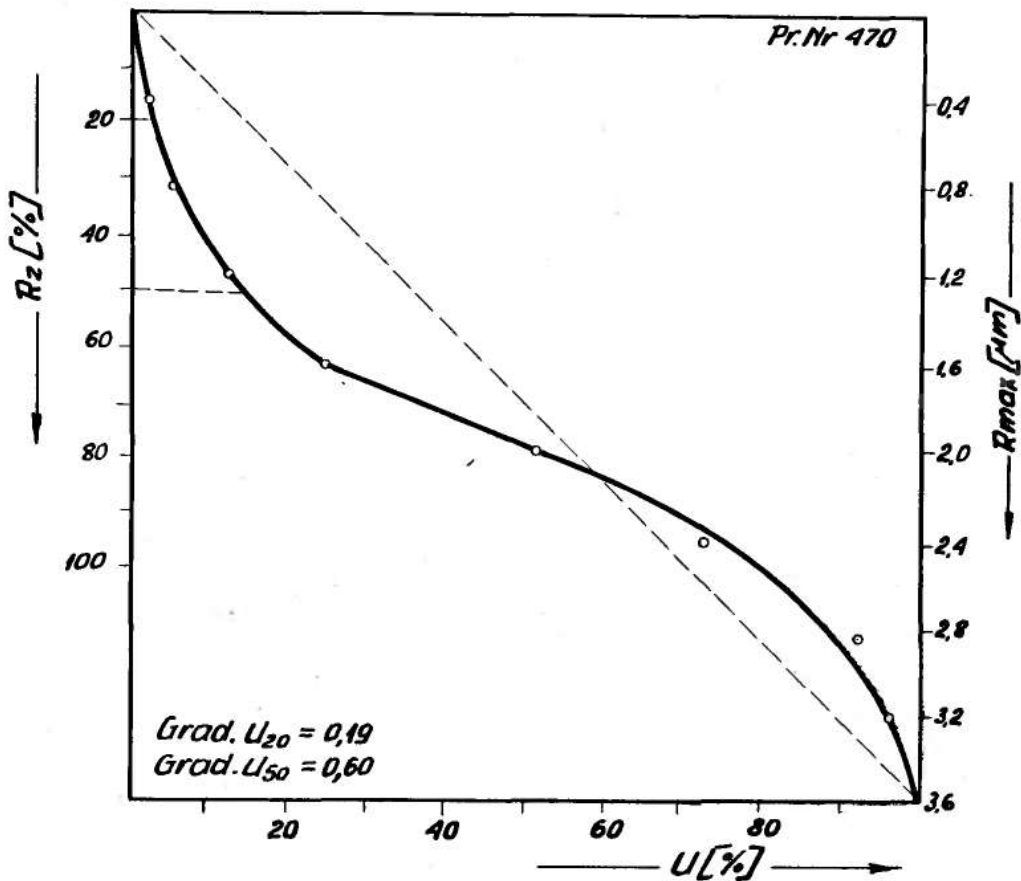
Rys.101<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $\phi_k = 8,7 [mm]$   
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $A = 2 [mm]$ ,  $t = 20 [min]$ ,  $v = 70 [\frac{1}{sek}]$



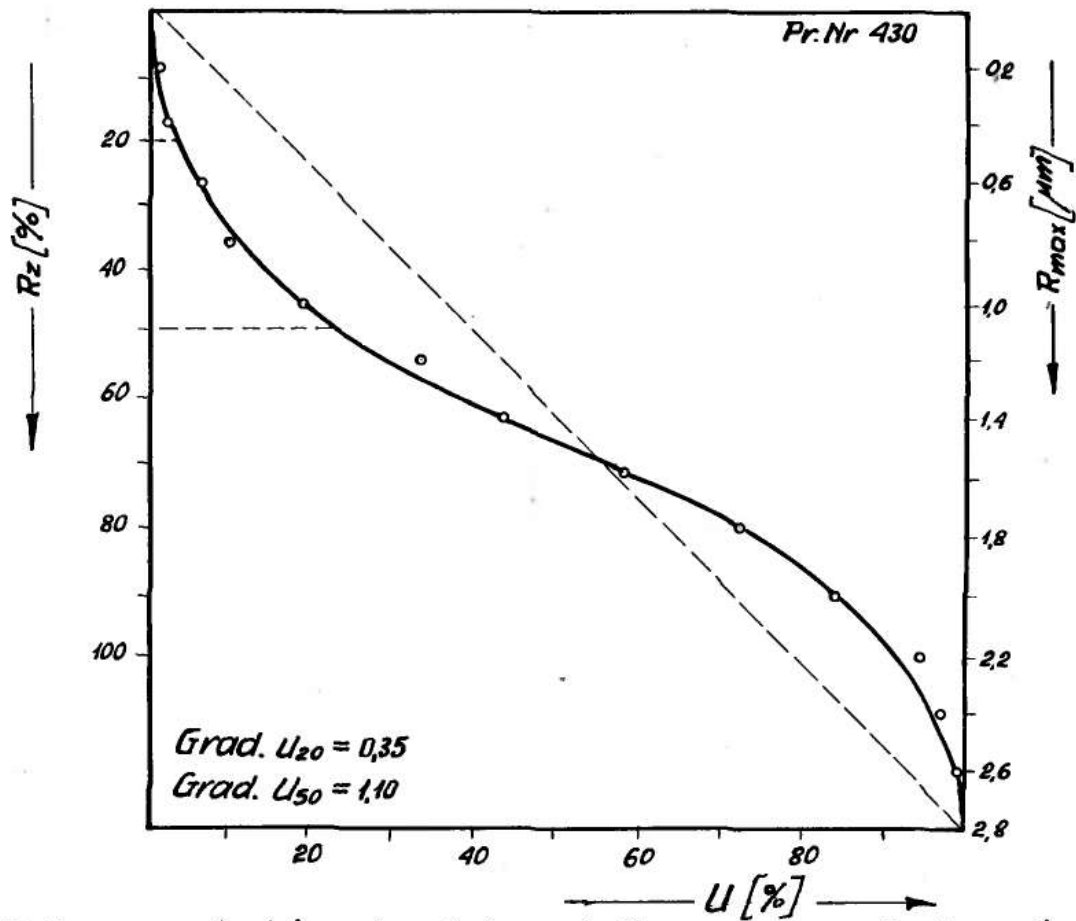
Rys.102<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $\phi_k = 6,3 [mm]$   
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $A = 2 [mm]$ ,  $t = 20 [min]$ ,  $v = 70 [\frac{1}{sek}]$



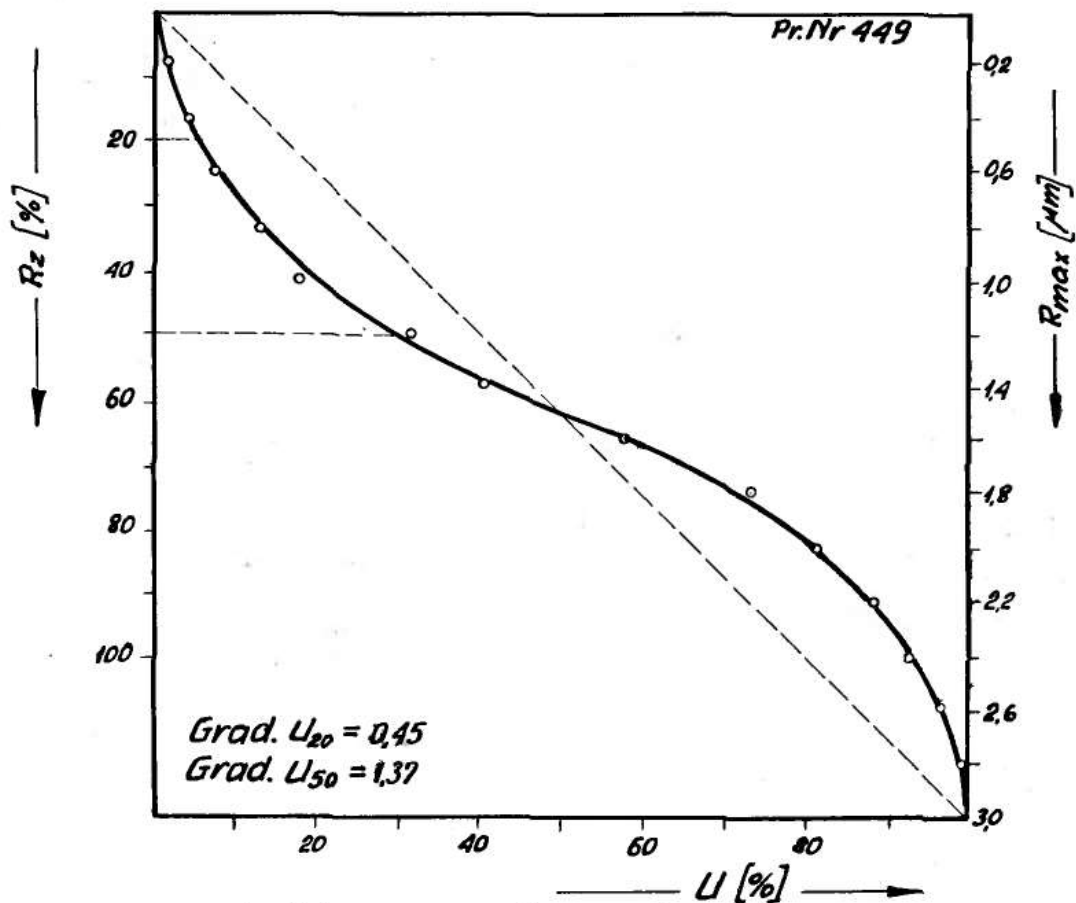
Rys.103 Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $\phi_k = 12$  [mm]  
Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $A = 2$  [mm],  $t = 20$  [min],  $v = 70$  [ $\frac{1}{sek}$ ]



Rys.104 Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $\phi_k = 15$  [mm]  
Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $v = 70$  [ $\frac{1}{sek}$ ],  $t = 20$  [min],  $A = 2$  [mm]

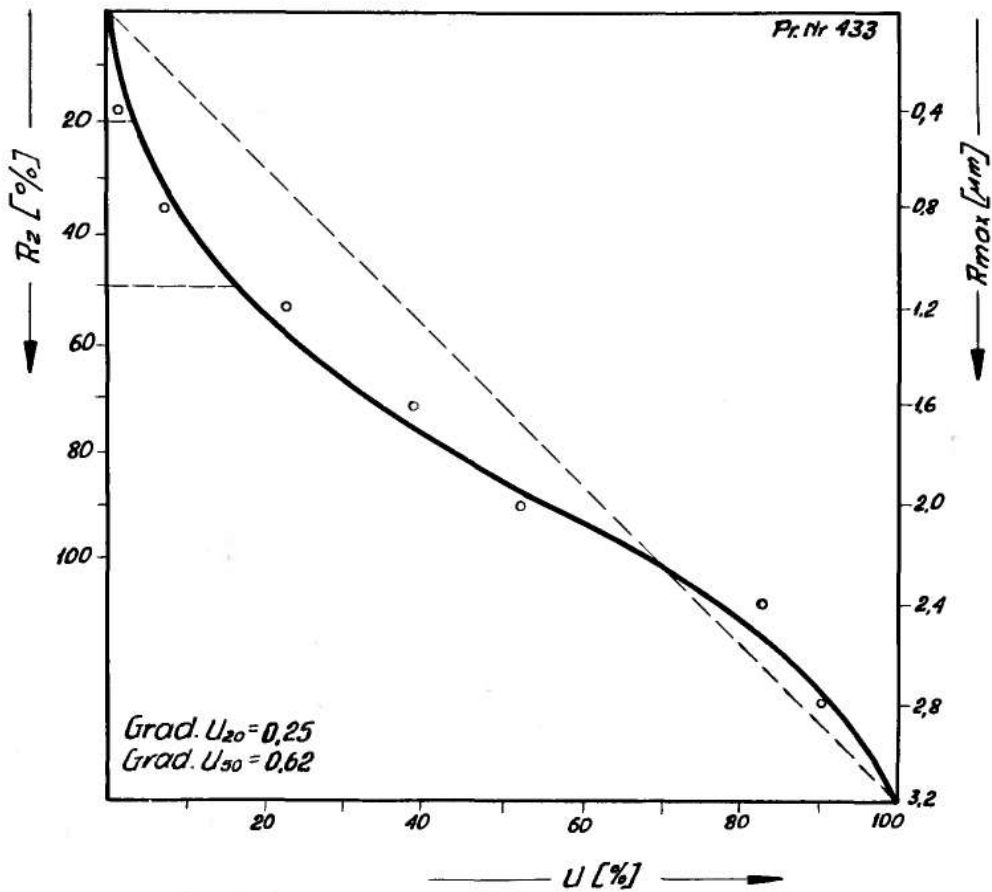


Rys.105<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $v = 30 \frac{1}{sek}$   
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $A = 3 \text{ mm}$ ,  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$

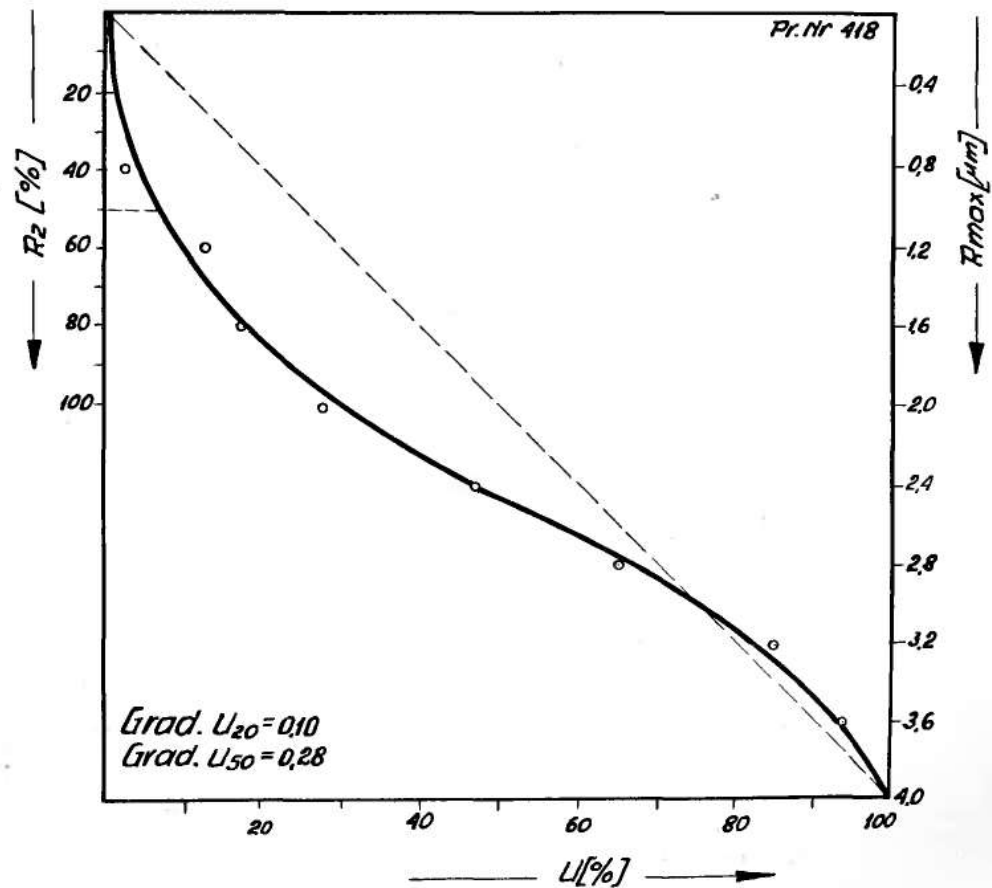


Rys.106 Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $v = 40 \frac{1}{sek}$   
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $A = 2,55 \text{ mm}$ ,  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$ ,  $t = 20 \text{ min}$

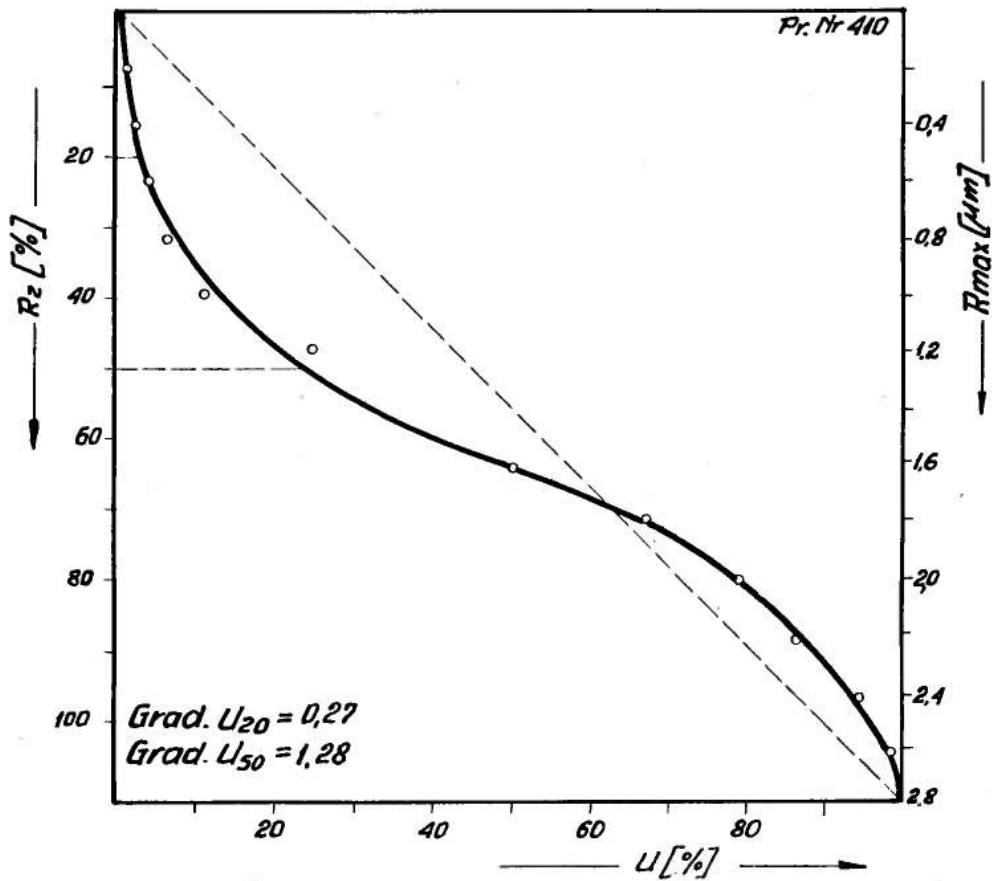




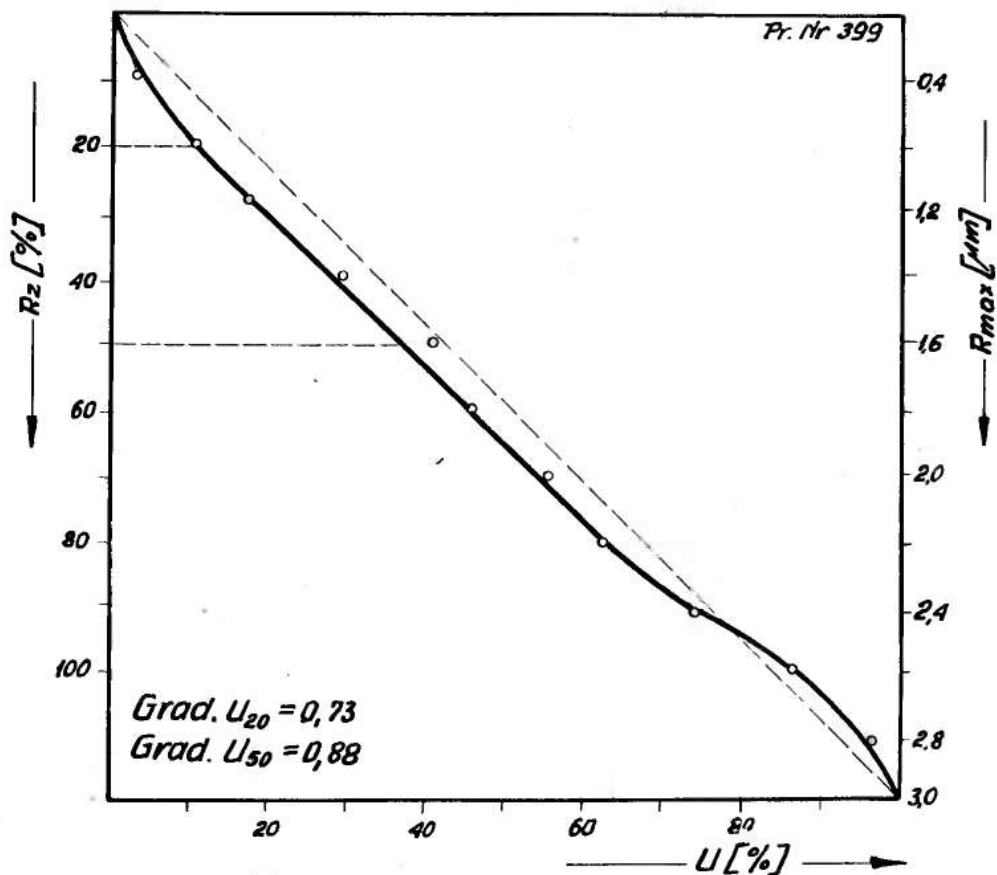
Rys.107 Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $v=50 [\frac{1}{sek}]$   
Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5 [mm]$ ,  $t = 20 [min]$ ,  $A = 2,3 [mm]$



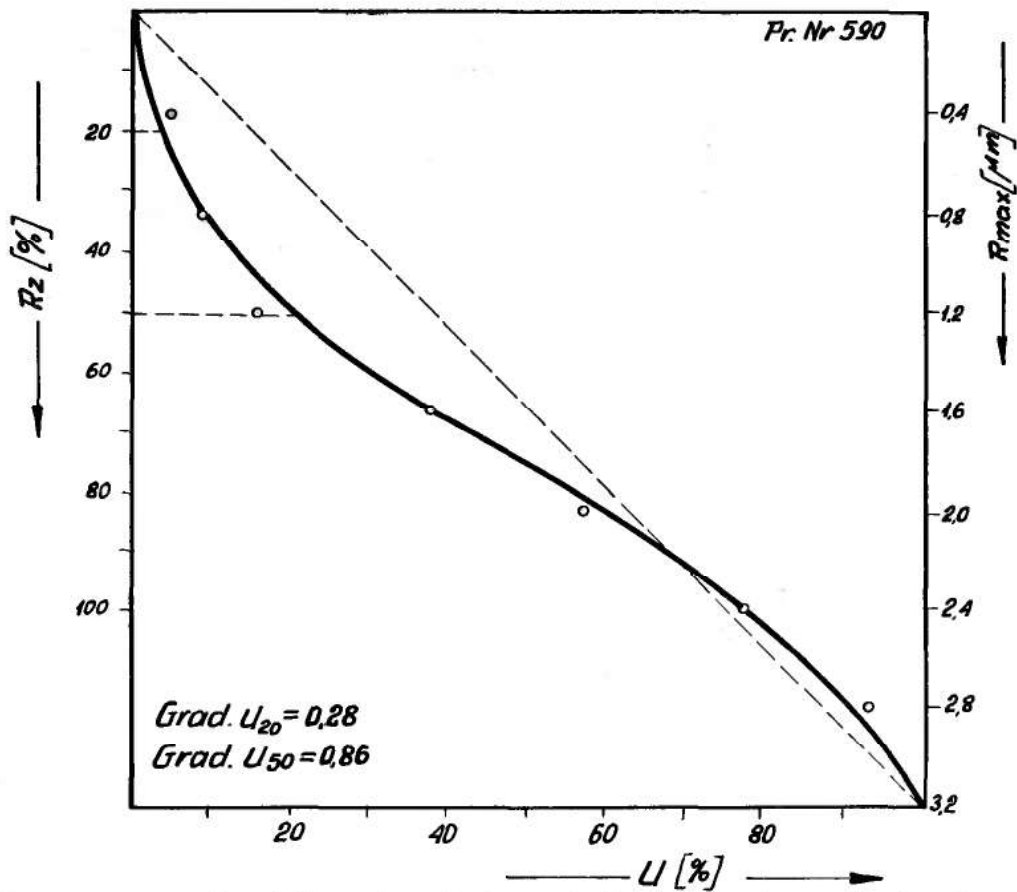
Rys.108 Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $v=60 [\frac{1}{sek}]$   
Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5 [mm]$ ,  $t = 20 [min]$ ,  $A = 2,15 [mm]$



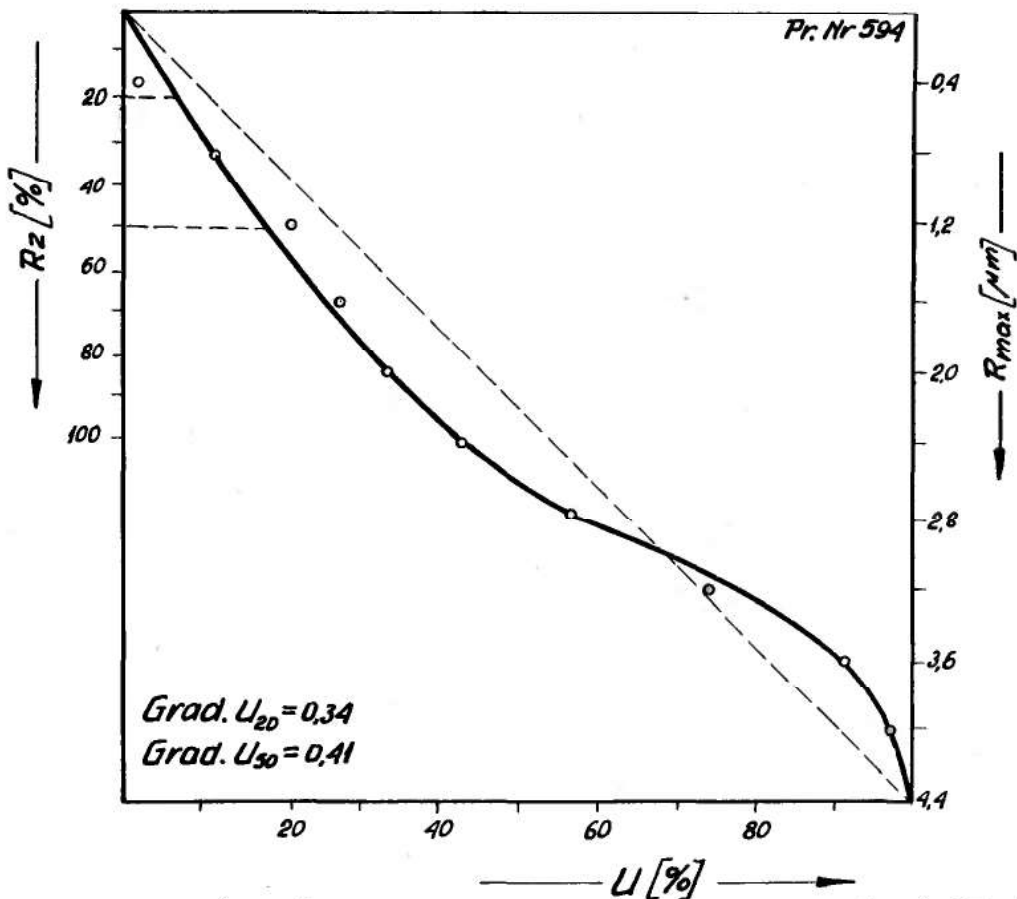
Rys.109. Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $v=70 [\frac{1}{\text{s\k{e}k}}]$   
Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5 [\text{mm}]$ ,  $t = 20 [\text{min}]$ ,  $A = 2 [\text{mm}]$



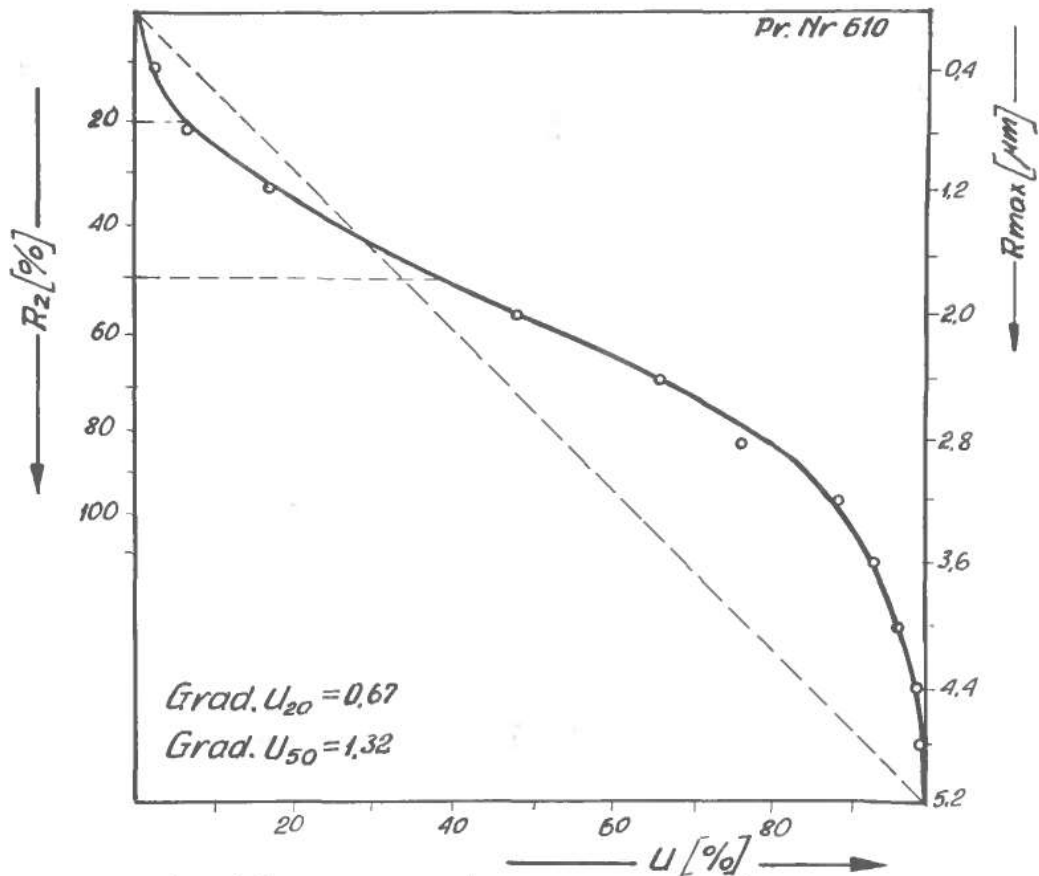
Rys.110. Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $v=80 [\frac{1}{\text{s\k{e}k}}]$   
Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 5 [\text{mm}]$ ,  $t = 20 [\text{min}]$ ,  $A = 19 [\text{mm}]$



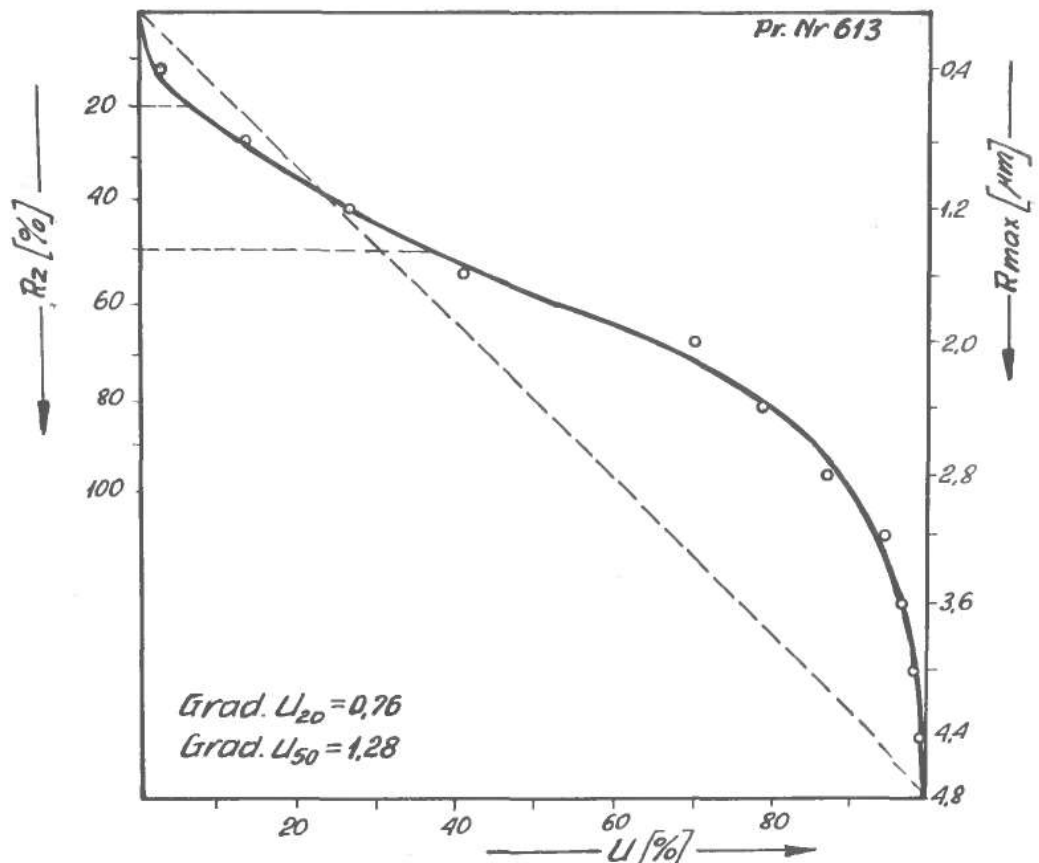
Rys.111<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $t = 5$  min  
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 8,7$  mm,  $v = 70$   $\frac{1}{sek}$ ,  $A = 2$  mm



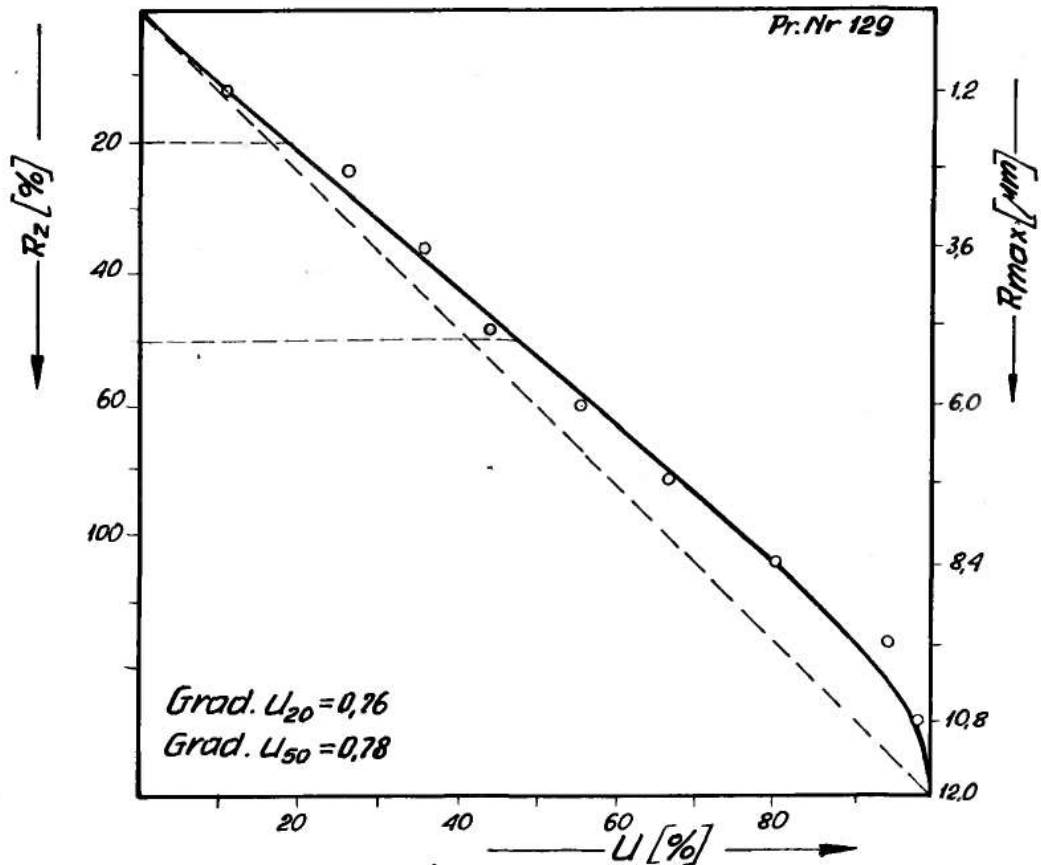
Rys.112<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $t = 15$  min  
 Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 8,7$  mm,  $v = 70$   $\frac{1}{sek}$ ,  $A = 2$  mm



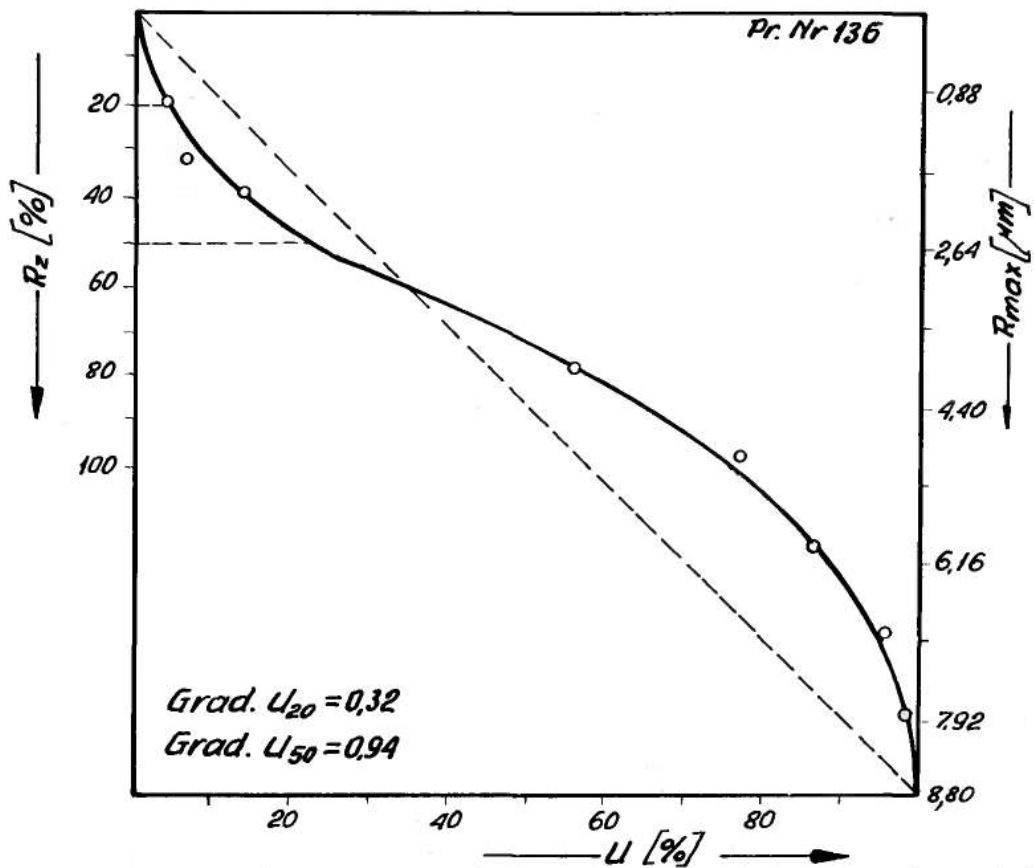
Rys.113<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $t = 25 \text{ min}$   
Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $A = 2 \text{ mm}$ ,  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$



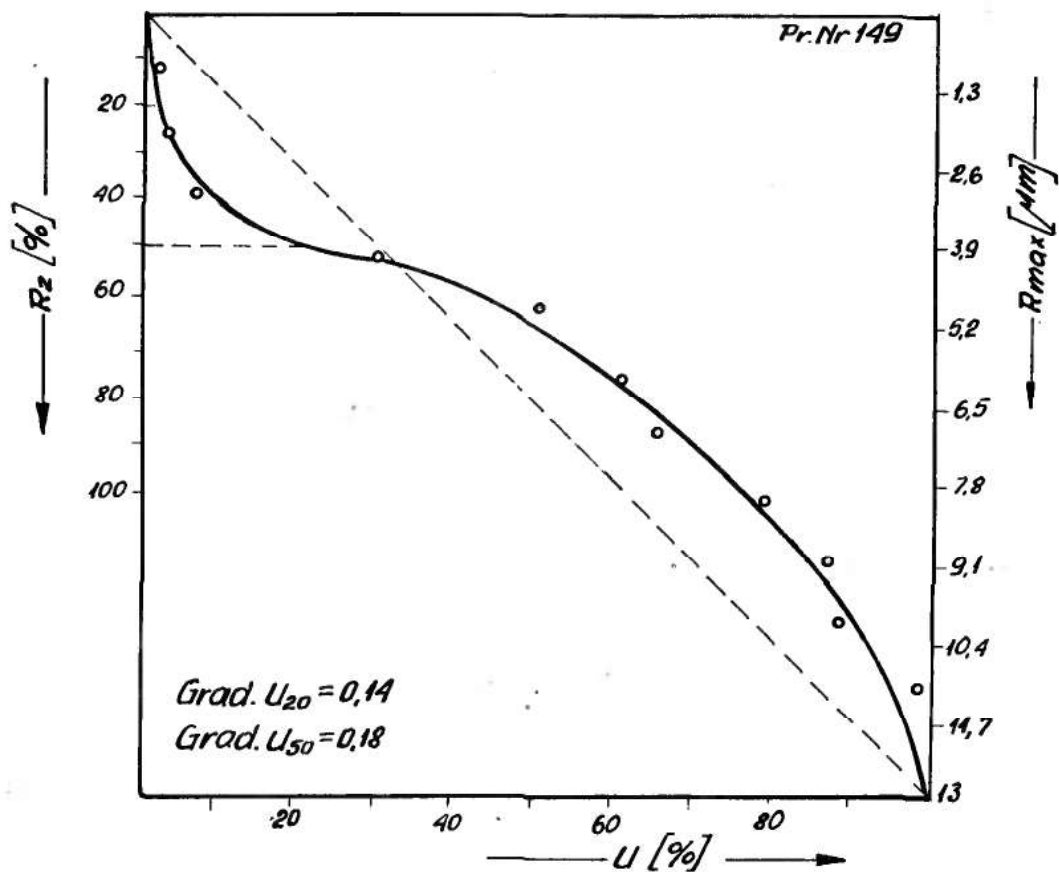
Rys.114<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem dla  $t = 35 \text{ min}$   
Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 8,7 \text{ mm}$ ,  $A = 2 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \frac{1}{\text{sek}}$



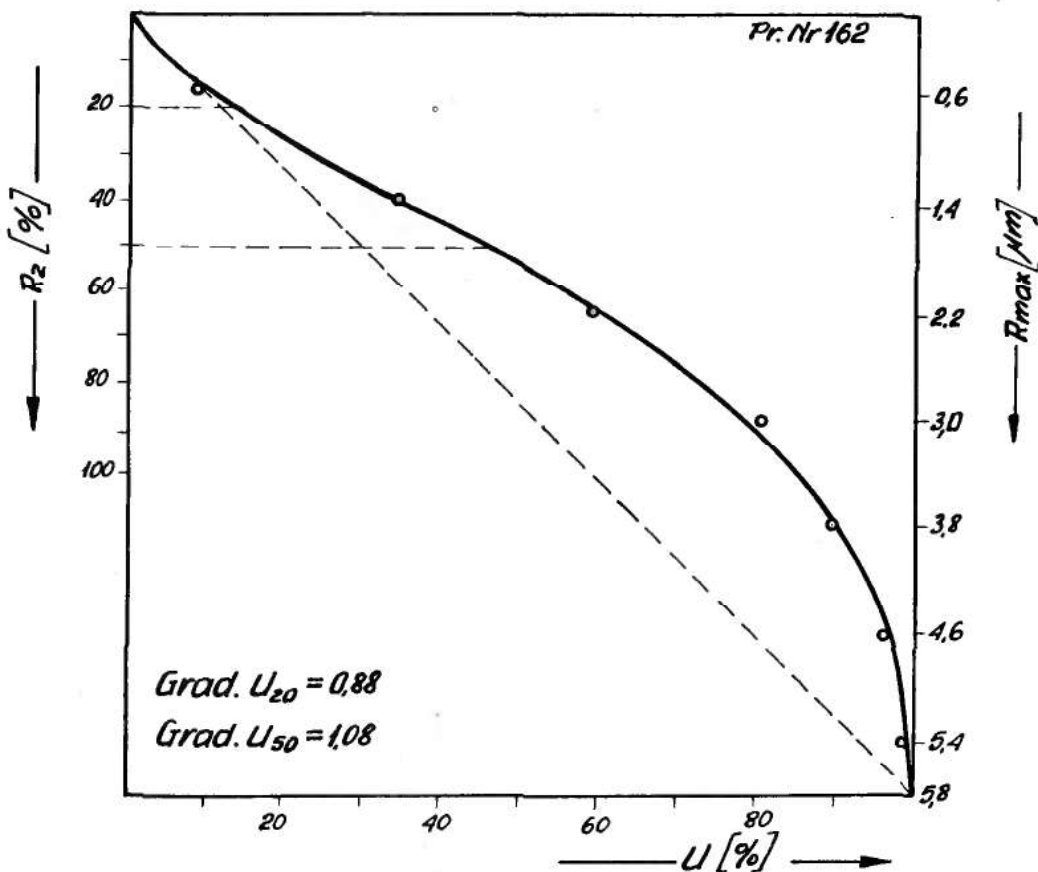
Rys. 115<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: stal 1.5 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



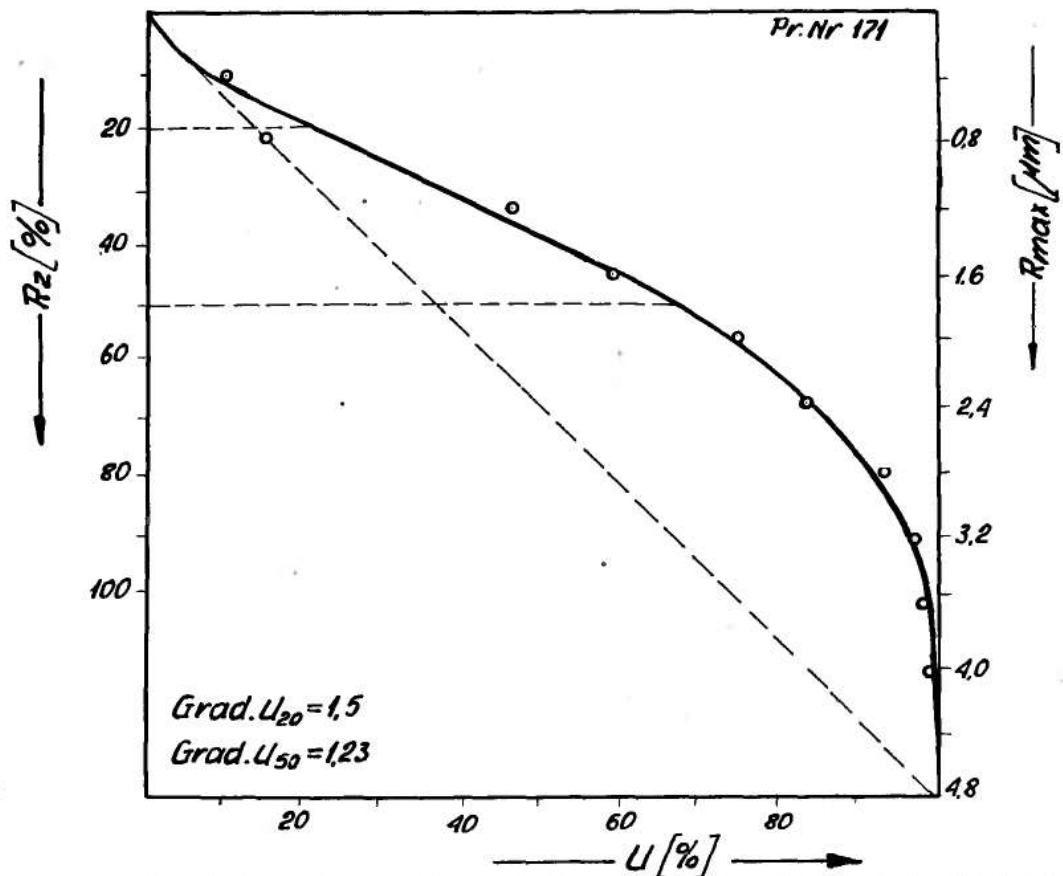
Rys. 116<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Mater. stal 25 (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$



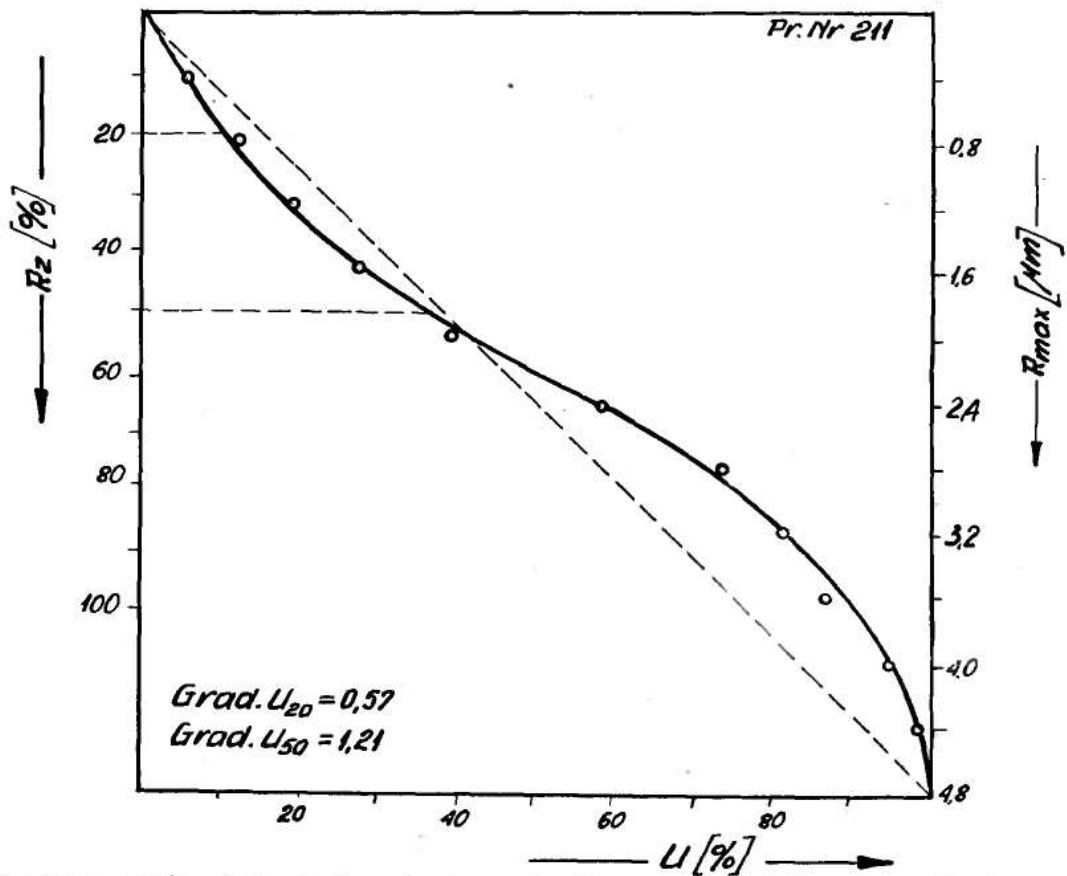
Rys. 117<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: stal 35 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



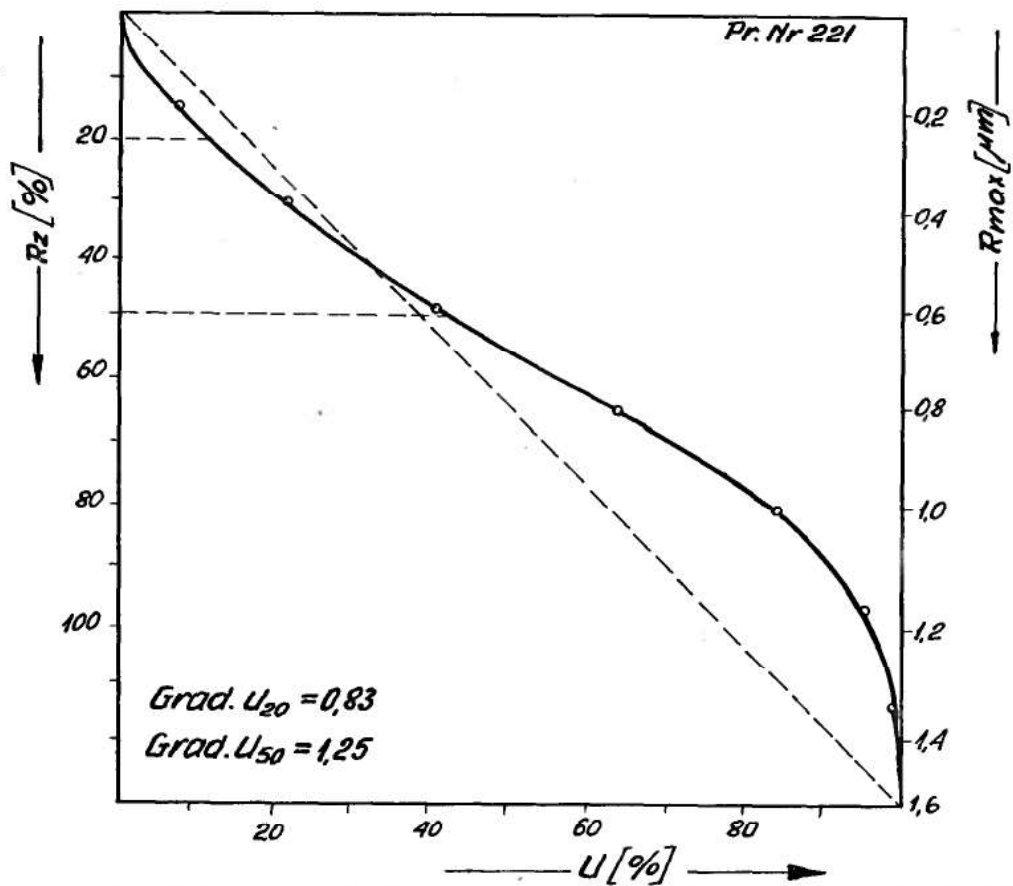
Rys. 118<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: stal 45 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



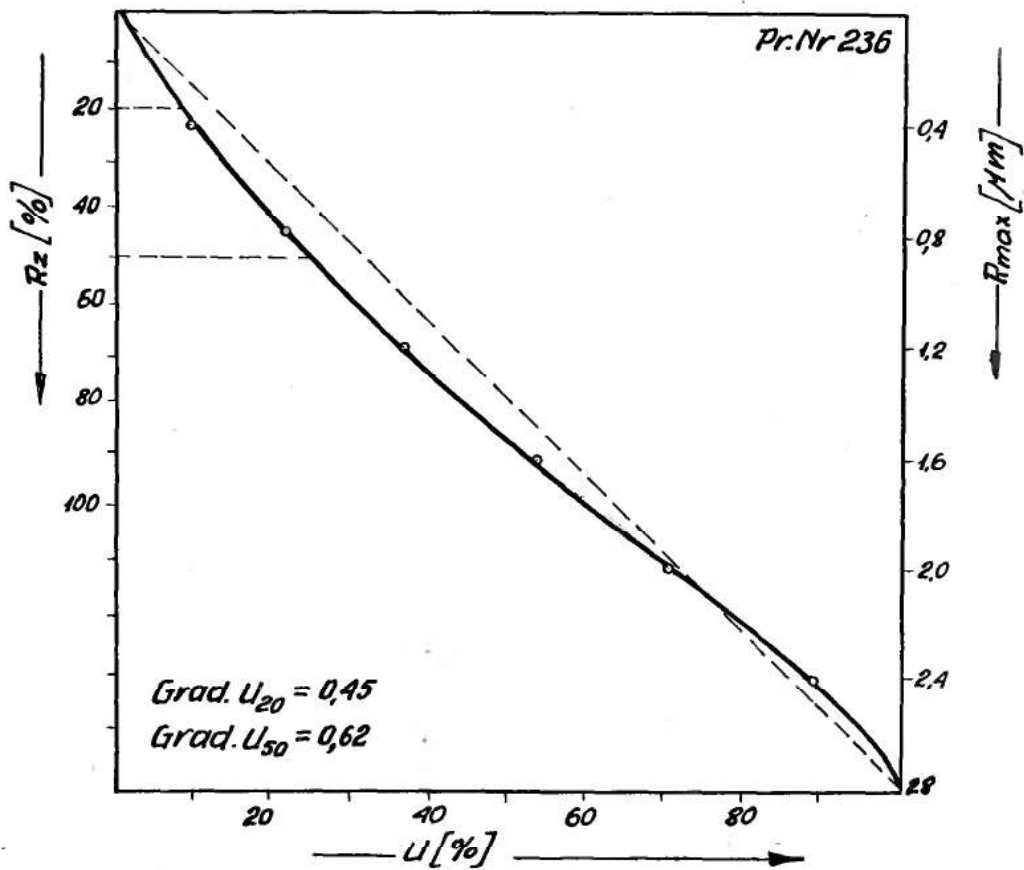
Rys. 119<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: stal 55 (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



Rys 120<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: stal SW9 (wyż. i odpr.). War. obróbki;  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$

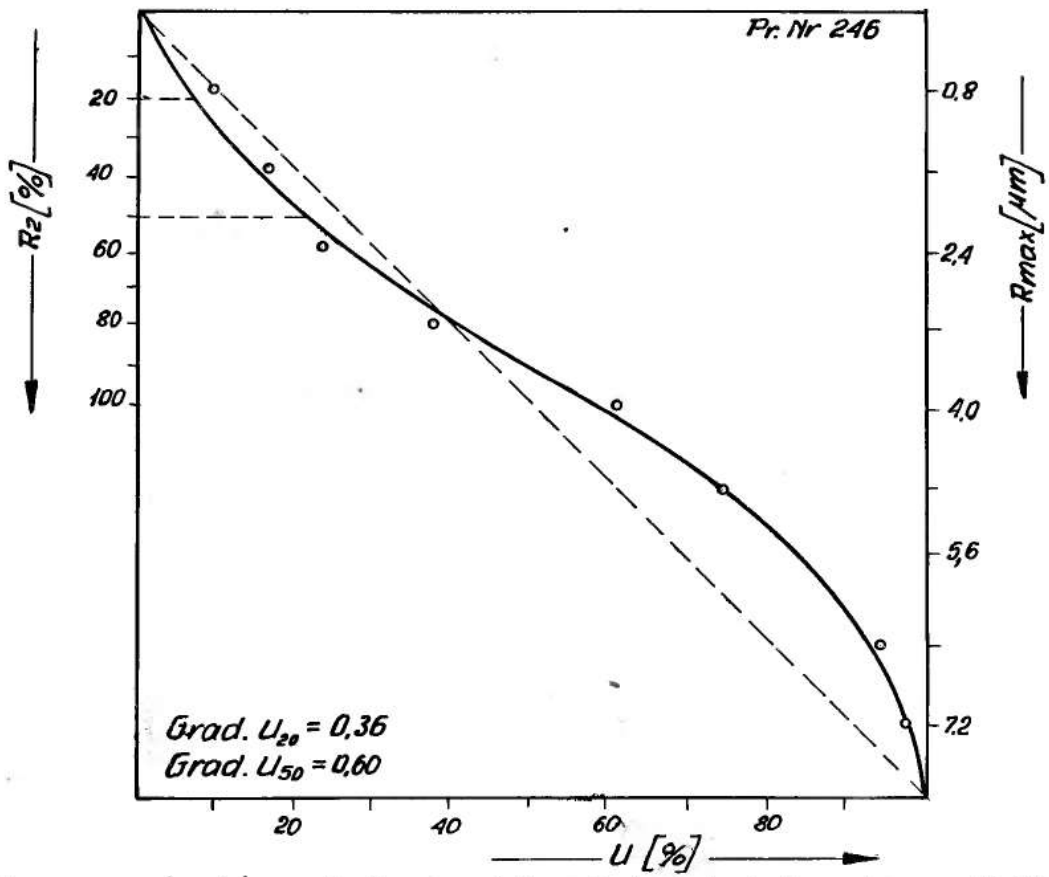


Rys.121<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: stal SW18 (wyż. i odpr.). War. obróbki  $\phi_K = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$

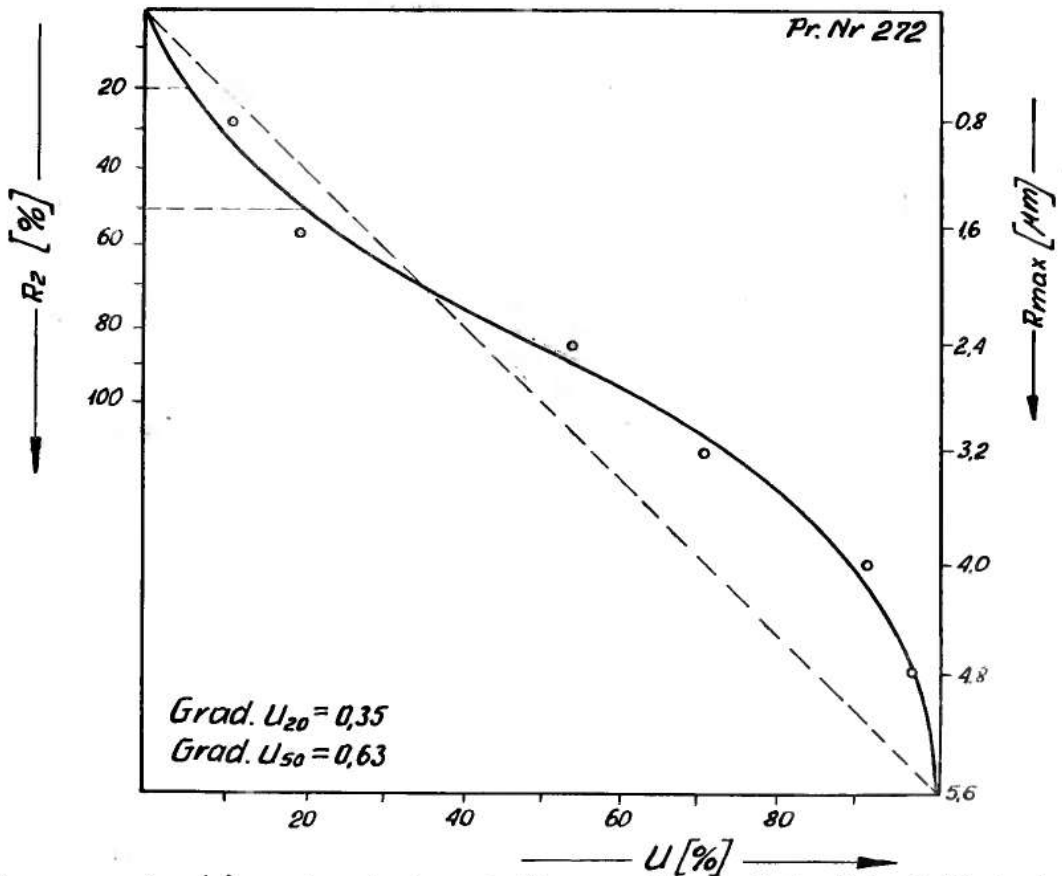


Rys.122<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: żeliwo Z115 (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_K = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$

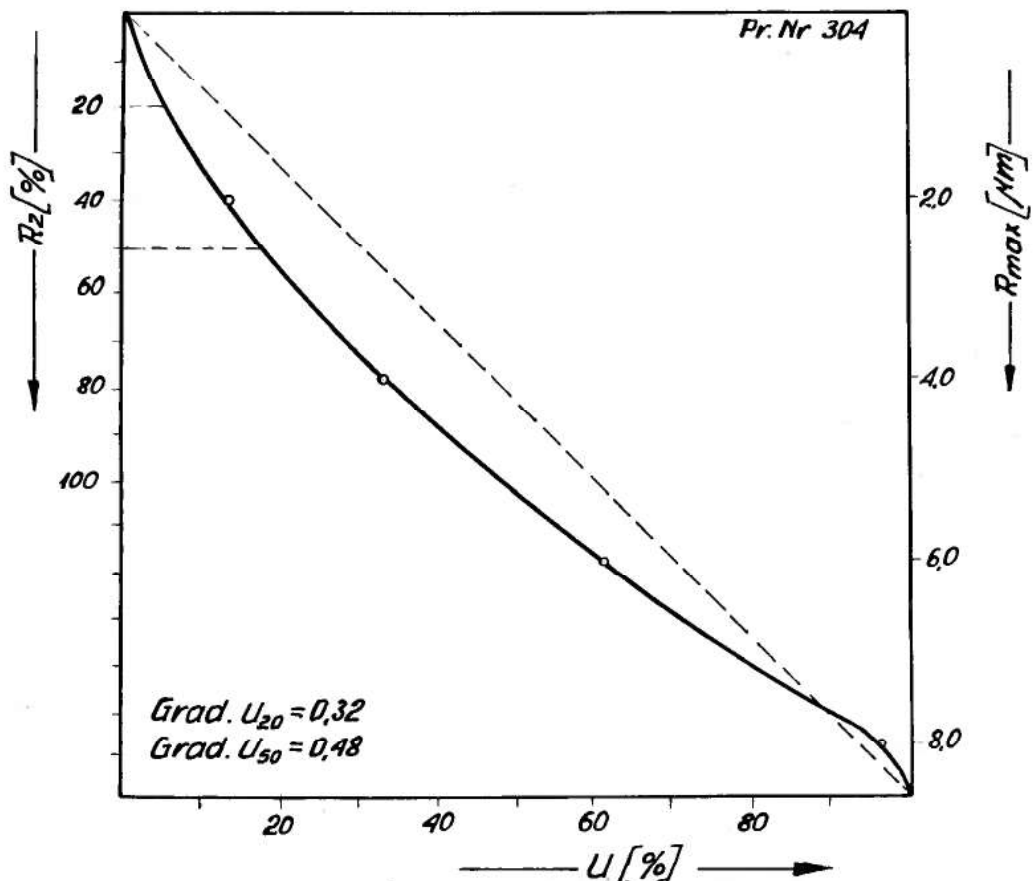




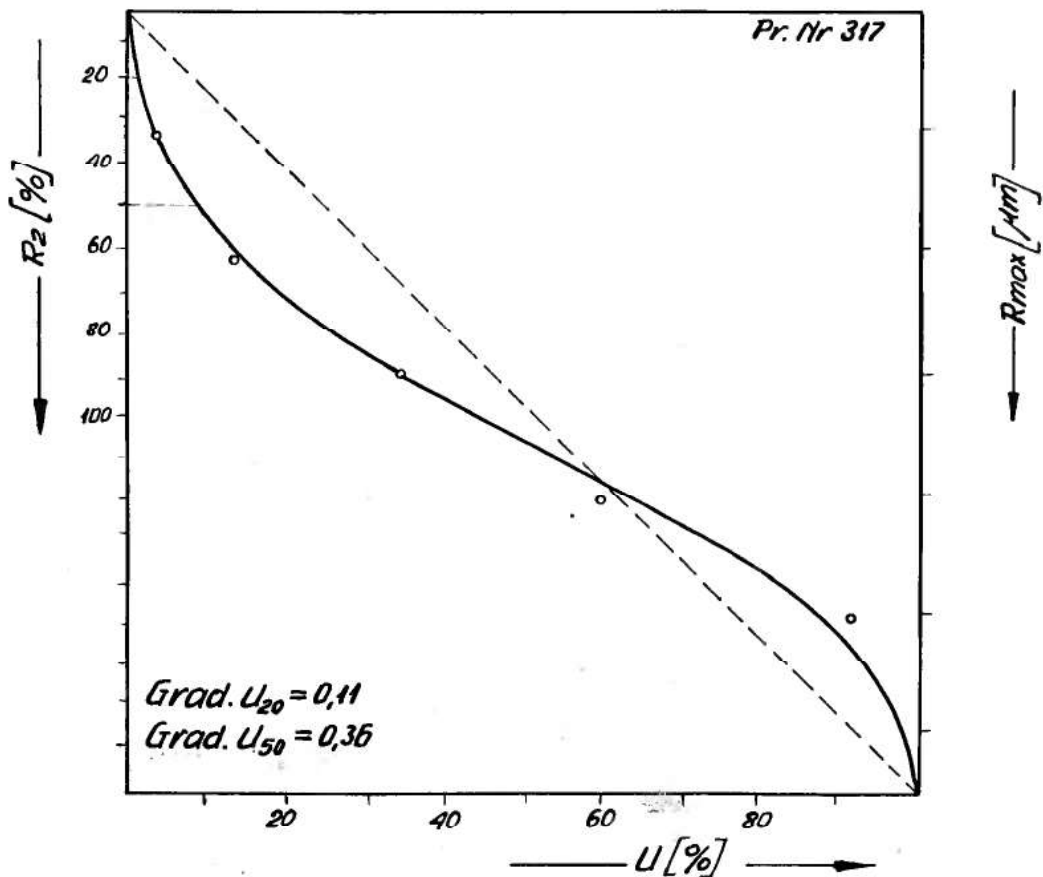
Rys.123<sub>z</sub> Krzywa nośności po obróbce zgniotem. Materiał: żeliwo stopowe ZcC3510 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 mm$ ,  $v = 60 \frac{1}{sek}$ ,  $t = 10 min$ ,  $A = 2,15 mm$



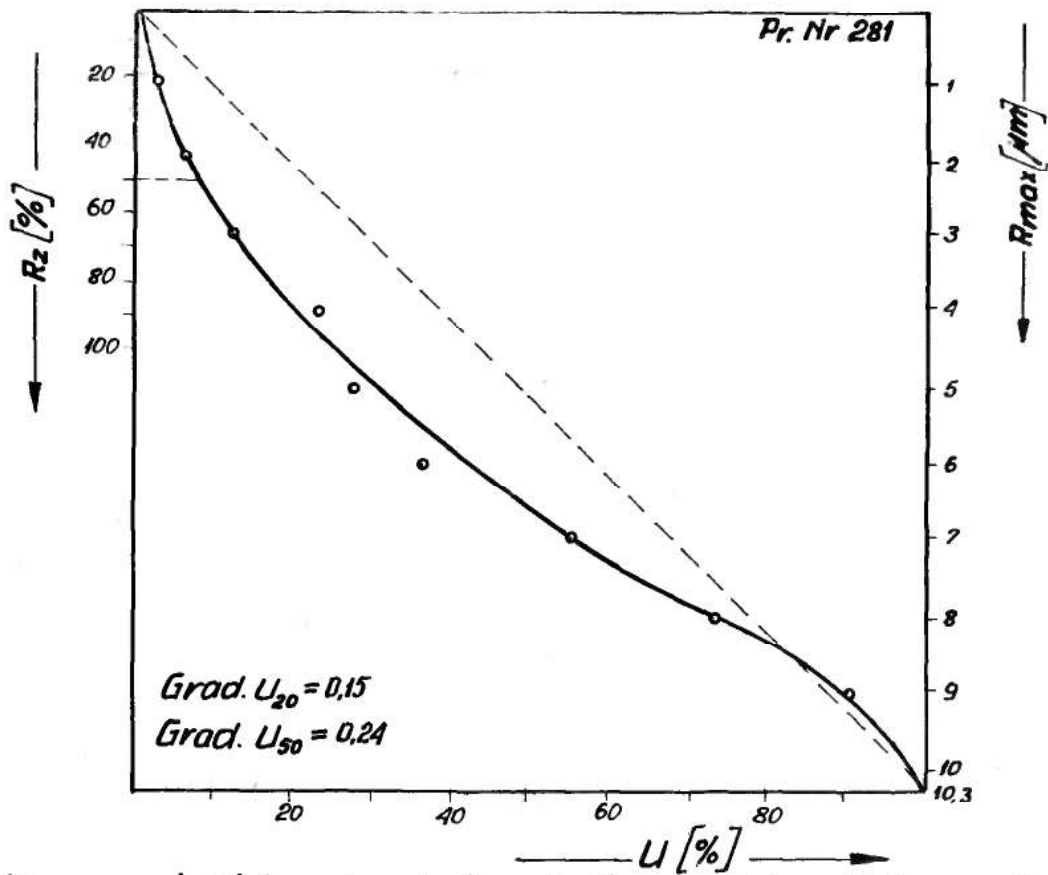
Rys.124<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: stal łozysk. ŁH15 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 mm$ ,  $v = 60 \frac{1}{sek}$ ,  $t = 10 min$ ,  $A = 2,15 mm$



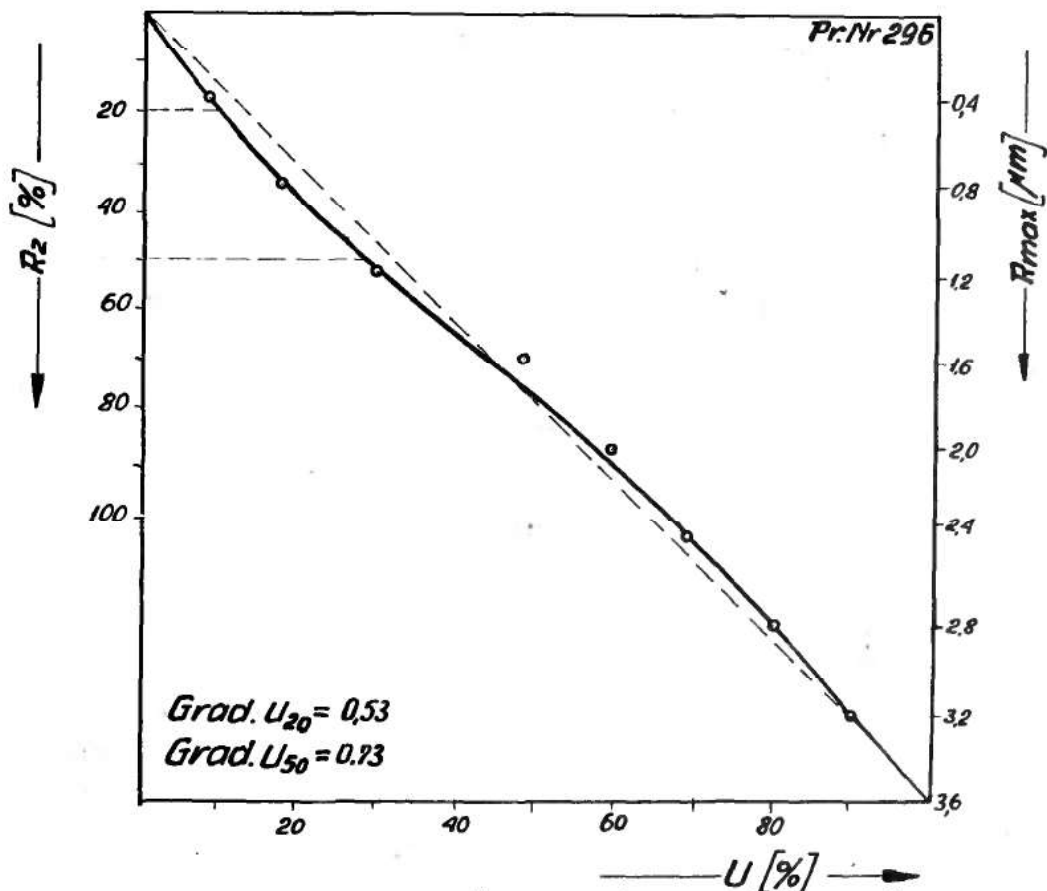
Rys. 125<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: miedź M1 (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



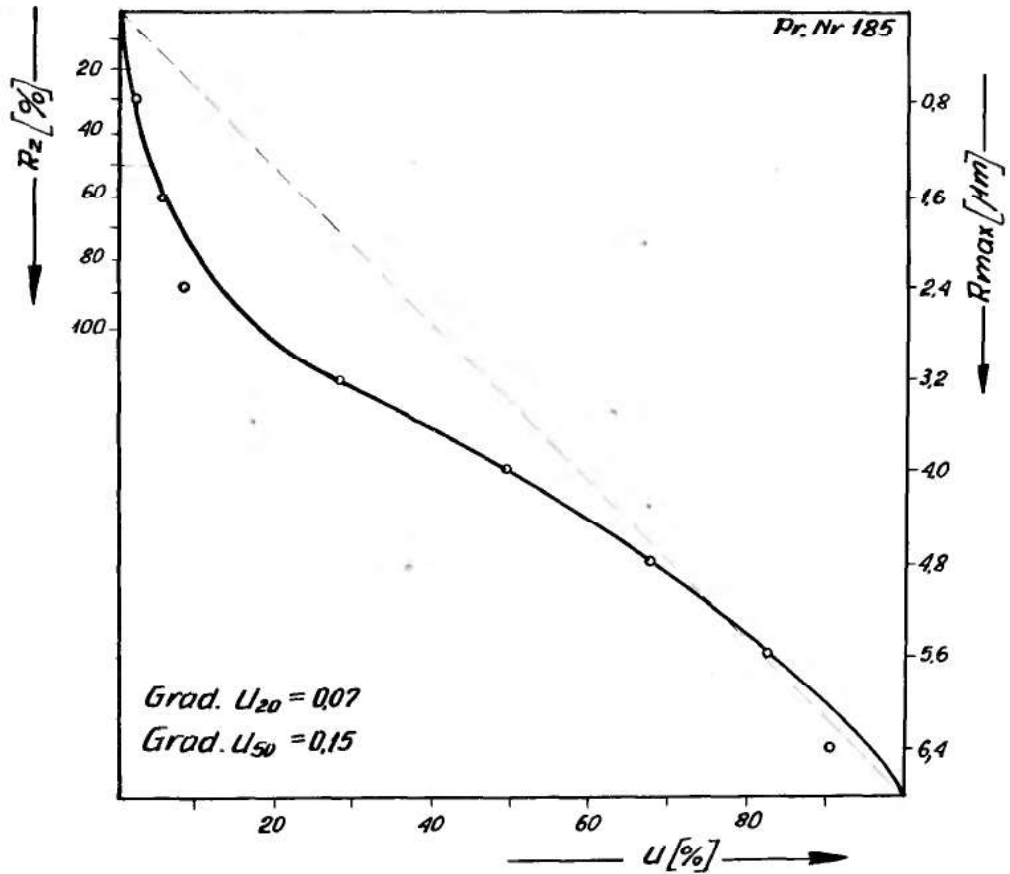
Rys. 126<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem stali resorowej 50HRS (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3$ ,  $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



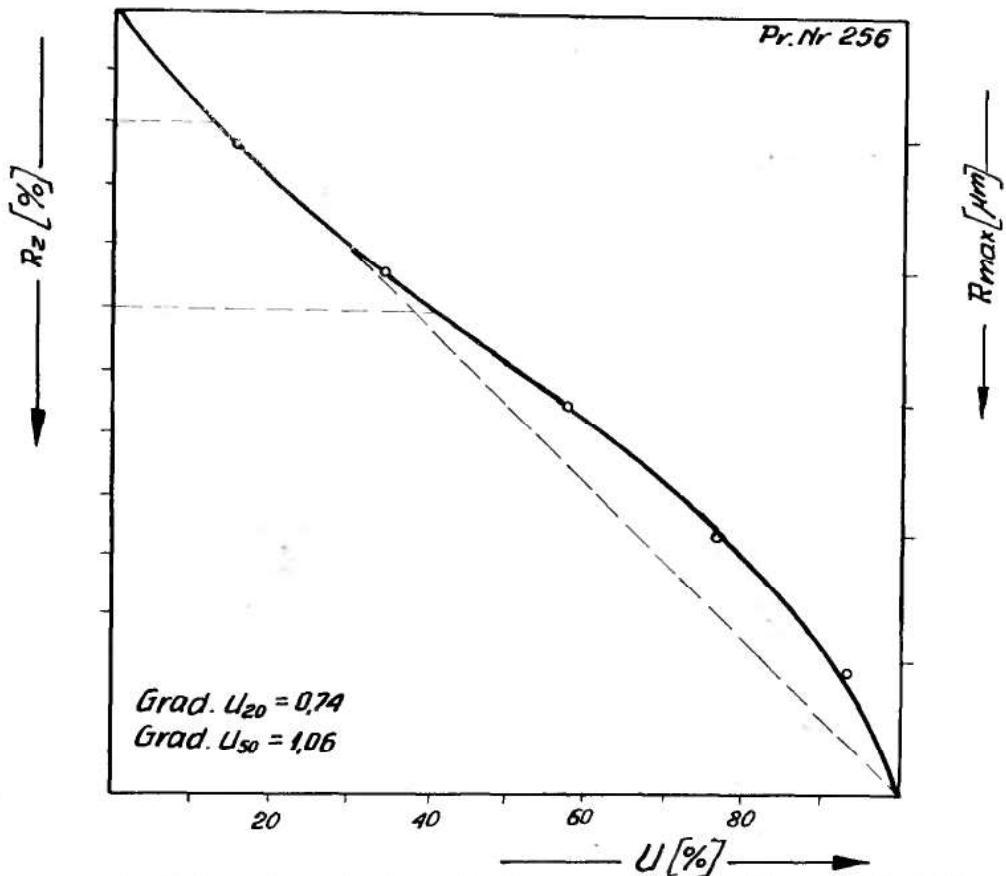
Rys.127<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Mater.: mosiądz M60 (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



Rys.128<sub>z</sub> Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Mater.: brąz BA1032 (wyż. i odpr.). Warunki obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



Rys. 129 Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: stop alum. PA10 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$



Rys. 130 Krzywa nośności powierzchni po obróbce zgniotem. Materiał: tytan WT3 (wyż. i odpr.). War. obróbki:  $\phi_k = 6,3 \text{ mm}$ ,  $v = 60 \frac{1}{\text{sek}}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ ,  $A = 2,15 \text{ mm}$