

Piotr ZYZAK<sup>1</sup>, Sebastian PODGÓRSKI<sup>2</sup>

Opiekun naukowy: Piotr ZYZAK

## DOŚWIADCZALNE PODSTAWY MONITOROWANIA PROCESU PNEUMATYCZNEJ OBRÓBKII STRUMIENIOWO-ŚCIERNEJ

**Streszczenie:** Artykuł zawiera przedstawienie wybranych badań doświadczalnych procesu pneumatycznej obróbki strumieniowo-ścierniej. Wyznaczono wybrane charakterystyki procesu z uwagi na jakość oczyszczonej powierzchni, wyrażonej za pomocą określonych parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni. Przedstawiona analiza stanowi przykład optymalizacji parametrycznej z wyznaczeniem funkcji obiektu badań dla analizowanego procesu obróbki. Badania doświadczalne przeprowadzono według planu statycznego zdeterminowanego selekcyjnego wieloczynnikowego ortogonalnego PS/DS-P:  $\alpha$ .

**Słowa kluczowe:** obróbka pneumatyczna strumieniowo-ścierna, optymalizacja parametryczna, chropowatość powierzchni, ścierniwo

## EXPERIMENTAL BASIS FOR MONITORING THE PNEUMATIC ABRASIVE BASTING PROCESS

**Summary:** The article presents selected experimental studies of the pneumatic abrasive blasting process. Selected process characteristics were determined due to the quality of the cleaned surface, expressed using specific parameters characterizing the geometric structure of the surface. The presented analysis is an example of parametric optimization with determining the function of the research object for the analyzed machining process. Experimental research was carried out according to the static determined selective multifactor orthogonal PS/DS-P:  $\alpha$  design

**Keywords:** pneumatic abrasive blasting, parametric optimization, surface roughness, abrasive

### 1. Wprowadzenie

Proces obróbki strumieniowo-ścierniej polega na dokładnym i szybkim oczyszczeniu powierzchni, dzięki czemu dany element jest przygotowany do dalszych etapów

---

<sup>1</sup> Dr inż, Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, przyzak@ath.bielsko.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: CAD/CAM, podgorskisebastian3@gmail.com

związanych z technologią jego wytwarzania. W jego trakcie na oczyszczaną powierzchnię narzucany jest materiał ścierny [1, 2]. W zależności od rodzaju ścierniwa, można uzyskać określony stopień chropowatości powierzchni [3, 4]. Obróbka strumieniowo-ścierna nie tylko usuwa zanieczyszczenia, ale również zwiększa przyczepność powłok proszkowych, ochronnych oraz dekoracyjnych. Istnieje kilka metod obróbki strumieniowo-ścierniej, które powstały na przestrzeni wielu lat wykorzystywania tego procesu oczyszczania. Obróbka strumieniowo-ścierna, ze względu na sposób wyrzucania ścierniwa, dzieli się na: wirnikową oraz pneumatyczną [5, 6]. Do wyrzucania ścierniwa w obróbce wirnikowej wykorzystuje się turbiny rzutowe, wyposażone w łopatki rzutowe. W obróbce pneumatycznej wykorzystuje się zasilany ścierniwem strumień powietrza, kierowany z dyszy na oczyszczaną powierzchnię. Obróbkę strumieniowo-ścierną można również podzielić ze względu na stopień oczyszczenia powierzchni. W tym przypadku wyróżniamy obróbkę lekką (zgrubną), dokładną i bardzo dokładną oraz do białego metalu, czyli stali wrodzowo czystej. Lekka obróbka usuwa smary, oleje, pył, brud, zgorzelinę, rdzę i stare powłoki lakiernicze. W obróbce dokładnej pozostawione zanieczyszczenia nie przekraczają 20% powierzchni, a w bardzo dokładnej 5%. Obróbka do białego metalu usuwa 100% zanieczyszczeń i pozostawia powierzchnię jednorodnie gładką [7]. Obok obróbki strumieniowo-ścierniej istnieje również omiotanie ściernie, stosowane do powierzchni aluminiowych i cynkowanych, a także w pracach renowacyjnych do matowienia starych powłok lakierniczych [7].

Rodzaj stosowanego w obróbce ścierniwa determinuje stopień chropowatości oczyszczonej powierzchni. Ścierniwo dzielimy na ścierniwo jednorazowego użytku oraz wielokrotnego użytku. Do ścierniwa jednorazowego użytku zalicza się piasek naturalny i kwarcowy oraz żużel. Ścierniwa wielokrotnego użytku stosowane w obróbce strumieniowo-ścierniej stanowią śruty żeliwne i stalowe, korund oraz kulki szklane. Śrut stalowy, wykorzystywany jest najczęściej w procesie śrutowania metali i charakteryzuje się wysoką trwałością (1600-1700 cykli). Śrut żeliwny podobnie jak piasek kwarcowy, ulega bardzo szybkiemu zużyciu (niska trwałość wynosząca około 150 cykli obiegu w oczyszczarce). Ogólnie, ścierniwa stosowane w obróbce strumieniowo-ścierniej mają kształt kulisty lub łamany (kanciasty) [1, 5, 8].

W ramach stosowanych metod obróbki strumieniowo-ścierniej wyróżnia się obróbkę na sucho oraz obróbkę na mokro. Wiodącą rolą obróbki strumieniowo-ścierniej jest określone przygotowanie powierzchni obrabianego elementu przed kolejnymi przewidzianymi etapami procesu technologicznego.

Istotnym zadaniem obróbki strumieniowo-ścierniej jest zmiana stanu obrabianej powierzchni poprzez śrutowanie lub kulowanie (shot peening) [2, 4÷6]. W przypadku śrutowania najczęściej usuwa się powierzchnię obrabianej strumieniem ścierniwa tlenki, rdzę, zgorzelinę lub przywarłe zanieczyszczenia. Kulowanie (shot peening), jest rodzajem obróbki plastycznej polegającej na mechanicznym oddziaływaniu na obrabianą powierzchnię ścierniwem kulistym (stalowymi, z tworzyw sztucznych, naturalnymi) wyrzucanymi w strumieniu sprężonego powietrza (oczyszczarki pneumatyczne) lub z wirnika (oczyszczarki wirnikowe), w efekcie której poprawia się właściwości użytkowe, zwiększa wytrzymałość zmęczeniową, zmniejsza się chropowatość powierzchni [2, 6, 9].

Obróbka strumieniowo-ścierna, w zależności m.in. od parametrów obróbki, rodzaju zastosowanego ścierniwa, rodzaju obrabianego materiału charakteryzującego się określonymi właściwościami wytrzymałościowymi umożliwia stworzenie

odpowiedniego profilu chropowatości powierzchni po obróbce. Jeżeli, w warunkach przemysłowych kolejną operacją po procesie obróbki strumieniowo-ścierniej jest np. nakładanie powłok ochronnych, czy też dekoracyjnych, to w takim przypadku przyczepność powłoki zapewniona jest przez rozwinięcie powierzchni – zwiększenie powierzchni kontaktu z powłoką poprzez utworzenie szczytów, wgłębień i podcięć [6, 9, 10].

Analizując wiodące opracowania w zakresie analizowanej tematyki można stwierdzić, że obróbka strumieniowo-ścierna jest najbardziej efektywną metodą przygotowania powierzchni metalowych przed nakładaniem powłok ochronnych, zabezpieczających oraz antykorozyjnych [6, 9÷12]. Stan powierzchni jest opisywany przez klasę czystości powierzchni, która determinuje efektywność procesu czyszczenia. Istnieją trzy główne standardy opisujące stan wykończenia powierzchni, wydane przez Steel Structures Painting Council USA (SSPC), British Standards Institution (BS) oraz Svenska Institutet för Standardem (SIS) [12].

## 2. Wybrane aspekty optymalizacji parametrycznej operacji wytwórczych

Optymalizację warunków realizacji operacji procesu wytwórczego, zwaną optymalizacją parametryczną wewnętrzną, prowadzić można [13÷15]:

- z wyznaczeniem modelu właściwości obiektu, względnie z identyfikacją funkcji obiektu badań,
- bez wyznaczania modelu właściwości obiektu, względnie bez identyfikacji funkcji obiektu badań.

W niektórych publikacjach można spotkać jeszcze inny podział: ze znajomością modelu matematycznego i bez znajomości modelu matematycznego [16].

Bardziej zasadne wydaje się jednak użycie pojęcia funkcji obiektu badań, ponieważ ekstremalizowana funkcja nie jest znana, a informacje jakie można o niej uzyskać będą pochodziły z szacowania jej wartości w wybranych punktach zbioru.

Optymalizacja parametryczna z wyznaczeniem funkcji obiektu badań wymaga realizacji cyklu doświadczeń, których wyniki pozwalają na wyznaczenie funkcji obiektu, a następnie na określenie ekstremum tej funkcji.

Proces tworzenia funkcji celu może odbywać się poprzez analizę regresji lub poprzez utworzenie modelu matematycznego lub określenie planu przeprowadzania badania. Wyróżniamy również optymalizacje parametryczną bez poszukiwania modelu matematycznego, nazywaną optymalizacją doświadczalną. W tym zagadnieniu znajdowanie ekstremum funkcji odbywa się poprzez dwa przypadki:

- nie znana jest wartość ekstremum, wyznaczana jest ona w sposób doświadczalny za pomocą planów sekwencyjnych lub planów ekstremalnych,
- znana jest wartość ekstremum, jednak jej wartość musi zostać sprawdzona pod kątem współdziałania z innymi elementami procesu, które mogą wpłynąć na jej rzeczywistą wartość (parametry zakłócające). W tym przypadku stosuje się plany adaptacyjne.

### 2.1. Model matematyczny optymalizacji parametrycznej

Pojęcie modelu matematycznego określa zależności matematyczne opisujące wyidealizowane zjawisko fizyczne lub ekonomiczne. W rozważaniach związanych

z technologią maszyn wskazane jest przyjęcie innej definicji, w której model matematyczny obiektu badań jest odzwierciedleniem związków między wielkościami (czynnikami) mającymi wpływ na budowę strukturalną i funkcjonalną rzeczywistego obiektu badań. Model matematyczny przyjmuje różne postacie, może być przedstawiony wzorem, tablicą lub wykresem. Model matematyczny pozwala na odzwierciedlenie związków strukturalnych i funkcjonalnych występujących w operacji wytwórczej [13÷16].

Zastosowanie modeli matematycznych w technologii maszyn sprowadzić można do następujących zadań [13] :

- optymalizacja i sterowanie ekstremalnego operacjami procesu wytwórczego,
- rozwiązywanie zagadnień sterowania operacjami procesu wytwórczego,
- rozwiązywanie zagadnień przewidywania i stymulowanie efektów realizowanej operacji na podstawie danych warunków jej realizacji.

Uformowanie jednego modelu matematycznego jest niemożliwe, dlatego buduje się modele matematyczne poszczególnych składowych procesu. Budowanie takich funkcji odbywa się poprzez zbieranie wyników doświadczeń. Forma zbierania zróżnicowanych danych procesów wymaga zdefiniowania wielkości [13]:

- wejściowych:  $x_1, x_2, \dots, x_i,$
- wyjściowych:  $z_1, z_2, \dots, z_w,$
- stałych:  $c_1, c_2, \dots, c_s,$
- zakłócających:  $h_1, h_2, \dots, h_z.$

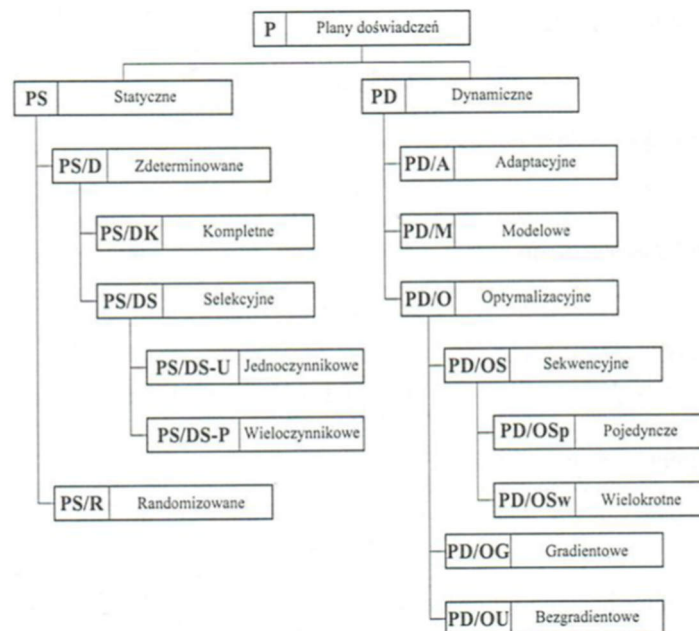
Do zbioru wielkości wejściowych zalicza się te wielkości, których wpływ na wielkości wyjściowe interesuje realizatora badań [13]. Wielkości w tym zbiorze muszą być wzajemnie niezależne oraz mierzalne. Najczęściej są to wielkości fizyczne, ekonomiczne, technologiczne czy chemiczne. Wielkości wyjściowe podobnie jak wyżej wymienione parametry są mierzalne. Zmienne te są zależne od innych w taki sposób, że każda zmiana wielkości wejściowych oddziałuje na poszczególne wartości. Wielkości stałe wpływają na wielkości wyjściowe. Podczas przeprowadzania badania doświadczalnego nie zmienia się ich wartości. Wielkości zakłócające dzielą się na parametry [13]:

- znane, mierzalne lecz celowo nie uwzględniane w obliczeniach,
- znane, niemierzalne jednak ich wpływ na proces jest losowy.

Obiekty badań można podzielić na [13] :

- statyczne - obiekt badań nie ulega zmianie w jednostce czasu. Parametry niezależne nie zależą od czasu i mogą być swobodnie regulowane podczas procesu,
- dynamiczne – obiekt badań ulega zmianie w jednostce czasu.

Przed przystąpieniem do badań doświadczalnych należy określić: charakterystykę obiektu badań oraz cel badań. Można wyróżnić trzy ogólne cele badań: weryfikację istotności wpływu wielkości wejściowych na wielkości wyjściowe, wyznaczenie stanu ekstremalnego obiektu badań, wyznaczenie funkcji obiektu badań. Przyjęcie każdego z podanych wyżej celów badań wymaga opracowania lub poszukiwania gotowego planu doświadczenia w określonej grupie planów doświadczeń. Szczegółową klasyfikację planów doświadczeń zamieszczono na rysunku 1.



Rysunek 1. Klasyfikacja planów doświadczeń [14]

Na ogół przy badaniu wpływu jednej wielkości wejściowej (zasadniczo badany jest wpływ kilku wielkości wejściowych, lecz wpływ każdej badany jest oddzielnie) na interesującą wielkość wyjściową (czynnik wynikowy) wykorzystuje się [13]:

- model wielomianowy:
- pierwszego stopnia o postaci

$$z = b_0 + b_1x \quad (1)$$

- drugiego stopnia o postaci

$$z = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad (2)$$

- trzeciego stopnia o postaci

$$z = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 \quad (3)$$

- model potęgowy postaci:

$$z = ax^b + c \quad (4)$$

- model wykładniczy postaci:

$$z = ae^{(bx)} + c \quad (5)$$

- model hiperboliczny postaci:

$$z = \frac{a}{x} + b \quad (6)$$

W przypadku badania jednoczesnego wpływu kilku wielkości wejściowych na obiekt badań, zaleca się stosowanie wielomianu drugiego stopnia, dla którego opracowano większość typowych planów doświadczeń. Wyróżnia się tu modele [12]:

- model liniowy

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i \quad (7)$$

- model wielomianowy

$$z = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_ix_i + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \dots + b_{ii}x_i^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{i-1,i}x_{i-1}x_i \quad (8)$$

- model potęgowy

$$z = a \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \cdot x_3^{b_3} \cdot \dots \cdot x_i^{b_i} \quad (9)$$

Na rysunku 2 przedstawiono funkcje obiektu badań, szczególne zastosowanie w planach doświadczeń.

Funkcja obiektu badań	Szczególne zastosowanie w planach doświadczeń	Zalecane testy weryfikujące		
		Istotność modelu matematycznego	Adekwatność modelu matematycznego	Istotność wyznaczonych współczynników
$z = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_ix_i + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{ii}x_i^2 + (b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{i-1,i}x_{i-1}x_i)$	PS/DS-P	F	F	t
$z = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_ix_i$ $Z = B_0 + B_1X_1 + \dots + B_iX_i,$ $Z = \varphi(z), \quad X_k = \varphi_k(x_k),$ $B_k = \varphi_k(b_k)$	PS/DK PS/DS-P: $2^{1-p}$ PS/DS-P: X	F	F	t
$z = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_mx^m$	PS/DK PS/DS-M PS/DS-O(D-x)	F	F	t

Rysunek 2. Wybrane wielomiany stosowane do aproksymacji funkcji obiektu badań [12]

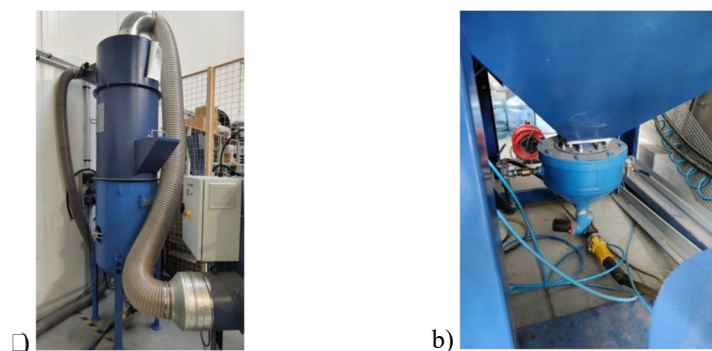
### 3. Stanowisko badawcze przemysłowej oczyszczarki OPK-140

Całość badań doświadczalnych została zrealizowana w firmie Sant-Tech z Krakowa. Firma SANT-TECH jest uznanym polskim producentem zaawansowanych maszyn do obróbki strumieniowo-ścierniej oraz systemów filtro-wentylacyjnych dla przemysłu [17]. Na cele badawcze procesu pneumatycznej obróbki strumieniowo-ścierniej wykonano stanowisko doświadczalne, które w części zasadniczej odpowiada konstrukcji stanowiska przemysłowego oczyszczarki OPK-140. Zasadnicze wyposażenie stanowiska obejmuje: komorę roboczą (rysunek 3a) z zamocowanym przyrządem kątowym, wózek z napędem liniowym (rysunek 3b), zespół separujący ścierniwo (rysunek 4a), zawór podawania ścierniwa Thompson II (rysunek 4b).

Wewnątrz komory oczyszczarki znajduje się wózek przemieszczany napędem liniowym, do którego mocuje się próbki podczas badań oraz przyrząd kątowy na podstawie, którego określano kąt zawarty między dyszą, a obrabianym przedmiotem (zakres ustawienia kąta od 0 do 90 stopni). Jego konstrukcja pozwalała również na ustawienie odległości dyszy od przedmiotu obrabianego (od 0 do +30cm). Dysza podczas obróbki nie wykonuje żadnych ruchów, jest ona przykręcona śrubami do przyrządu kąтового. Na zamieszczonym rysunku 3 został przedstawiony widok wnętrza komory stanowiska badawczego.



Rysunek 3. Stanowisko doświadczalne; a) komora obróbcza, b) układ liniowego napędu wózka (obwódka koloru czerwonego)[17]



Rysunek 4. Stanowisko doświadczalne: a) ciśnieniowy zbiornik 200l firmy Komino, b) ciśnieniowy zbiornik 13l firmy Komino wraz z zaworem Thompson II [17]

W stanowisku oczyszczarki OPK-140 docelowo instalowane są zbiorniki ciśnieniowe o pojemności 13 l (rysunek 4a). Przeprowadzone wstępne badania doświadczalne wykazały, że w przypadku korzystania ze zbiornika o objętości 13l rozpręż w układzie ciśnieniowym następuje bezpośrednio przez dyszę obróbczą. Aby wyeliminować to zjawisko zaprojektowano, a następnie wykonano zbiornik ciśnieniowy o objętości 200 l (rysunek 4b), gdzie po zainstalowaniu go w układzie oczyszczarki rozpręż następuje bezpośrednio w zbiorniku. Zmodyfikowana konstrukcja zbiornika umożliwia również zasyp ścierniwa do obróbki w zdecydowanie większej ilości w stosunku do poprzedniego rozwiązania, co gwarantuje stabilność strugi powietrzno-ścierniej. Z uwagi na wymagania jakościowe ścierniwa krążącego w obiegu zbiornik ciśnieniowy wyposażono w układ sit pełniących rolę separatora. Śrut może się

kruszyć, a także przekształcać w pył poobrobkowy, większy zbiornik pozwala na dłuższą pracę przy zachowaniu zasady pracy przy maksymalnym stężeniu zanieczyszczeń w śrucie na poziomie 1%. Jeżeli procentowy udział zanieczyszczeń w ścierniwie krążącym w obiegu przekracza 1%, to trwałość elementów roboczych oczyszczarek zmniejsza się o około 80%.

#### 4. Badania doświadczalne

Badania parametrów procesu obróbki strumieniowo-ścierniej przeprowadzono na stanowisku badawczym przedstawionym w rozdziale 3. Próbkę poddano obróbce strumieniem ściernym podczas trwania badań, zostały wykonane z następujących materiałów [18, 19, 20]:

- HARDOX 400 - stal trudnościerna o nominalnej twardości 400 HBW. Jest odpowiednia dla umiarkowanie wymagających zastosowań w zakresie ścierania, w których ważna jest wysoka udarność, dobra podatność na gięcie i znakomita spawalność.
- EN AW-6061 –stop aluminium ogólnego przeznaczenia, który ma wysokie właściwości mechaniczne, wysoką odporność na korozję, a także plastyczność, dzięki której jest powszechnie wykorzystywany w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, morskim oraz spożywczym.
- S235J – stal zaliczana do najczęściej stosowanych stali konstrukcyjnych ogólnego przeznaczenia, ponieważ charakteryzuje się wysoką wytrzymałością, a także parametrami zapewniającymi nieskomplikowany proces obróbki oraz spawania. Wyroby z tej stali w postaci rur, prętów, blach, różnego rodzaju profili zamkniętych itp., wykorzystywane są do tworzenia konstrukcji spawanych. Przed nałożeniem powłoki zabezpieczającej konstrukcję spawaną, należy ją oczyścić strumieniem ściernym.
- AISI 304 – jest austenityczną stalą zawierającą co najmniej 18% chromu i 8% niklu oraz maksymalnie 0,08% węgla i najczęściej wykorzystywaną stalą nierdzewną, ponieważ ma wysokie właściwości mechaniczne, dobrą spawalność oraz odporność na korozję. Stal ta, wykorzystywana jest do produkcji urządzeń przeznaczonych do pracy w przemyśle przetwórczym, do produkcji wyposażenia kuchni, do produkcji zbiorników oraz rurociągów, a także wykonania części przeznaczonych do pracy w środowiskach silnie korodujących (części statków).

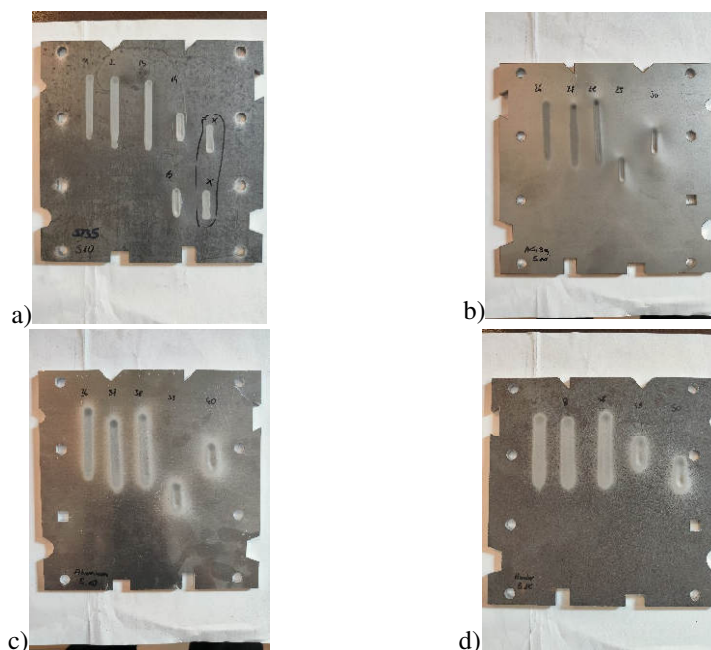
W ramach zrealizowanych badań doświadczalnych wykorzystano dwa rodzaje ścierniw, jakimi były elektrokorund o oznaczeniu F100 oraz F120.

W części zasadniczej badań doświadczalnych każdy materiał poddano obróbce pneumatycznej strumieniowo-ścierniej. Dysza znajdowała się w odległościach 3, 2 i 1cm od przedmiotu obrabianego przy prędkości posuwu stolika, na którym znajdowała się próbka na poziomie 3, 2 i 1 mm/s. Czas obróbki wynosi 30 sekund przy kącie pochylenia dyszy względem powierzchni przedmiotu 85 oraz 90 stopni. Otwarcie zaworu Thompson II Schmidt ustawiano ręcznie, przyjmując dla realizowanych prób doświadczalnych odpowiednio:  $1\frac{3}{4}$ , 2,  $2\frac{1}{4}$ ,  $2\frac{3}{4}$ , 3 obrotu.

Przygotowana próbka po wycięciu z materiału była ważona za pomocą wagi Axis AKZ3200. Każdorazowo po dokonaniu pneumatycznej obróbki strumieniowo-ścierniej z przyjętymi parametrami obróbki, próbki była ważona, w celu określenia ubytku masy próbki. Wskaźniki wagowe ubytku masy próbki po obróbce mogą



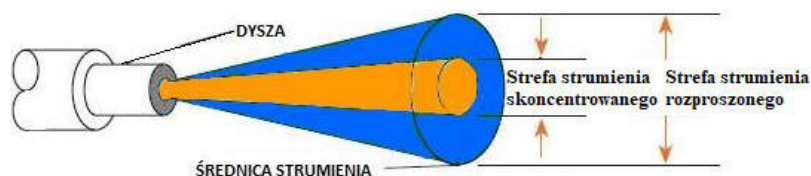
w przyszłości posłużyć jako kluczowe wyznaczniki do opracowania strategii obróbki dla danego rodzaju materiału. Widok wybranych próbek po przeprowadzonych testach badawczych zamieszczono na rysunku 5.



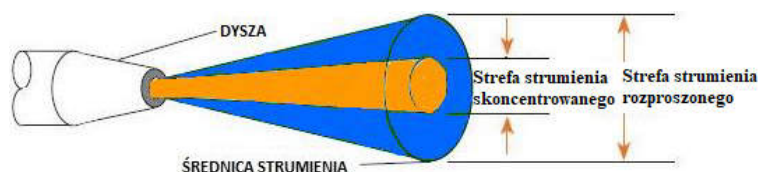
Rysunek 5. Widok powierzchni próbek po procesie obróbki zgodnie z parametrami planu badań: a) stal S235J, stal AISI304, stop EN AW-6061, stal Hardox400

#### 4.1. Pomiar wymiarów stref oddziaływania strumienia skoncentrowanego oraz rozproszonego powstałych na powierzchniach próbek

W czasie przeprowadzania obróbki powierzchni z wykorzystaniem pneumatycznej obróbki strumieniowo-ściernej, występują dwie strefy oddziaływania strumienia ściernego na obrabianej powierzchni: strefa oddziaływania strumienia skoncentrowanego oraz rozproszonego (rysunek 6 i 7).



Rysunek 6. Schemat stref oddziaływania strumienia ściernego w pneumatycznej ciśnieniowej obróbce strumieniowo-ściernej



Rysunek 7. Schemat stref oddziaływania strumienia ściernego w pneumatycznej inżektorowej obróbce strumieniowo-ściernej

Wymiary tych stref są zależne od: średnicy oraz konstrukcji dyszy, zastosowanej metody pneumatycznej obróbki strumieniowo-ściernej, zastosowanego ciśnienia roboczego, materiału ściernego, parametrów obróbki oraz także od właściwości obrabianego materiału. Rozmiar strefy oddziaływania strumienia ściernego zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości od obrabianej powierzchni oraz jej twardości, ponieważ wzrost odległości ziarna ściernego od osi strumienia, determinuje zmniejszanie się wartości prędkości tego ziarna, a więc energia kinetyczna podczas uderzenia tego ziarna o obrabianą powierzchnię zmniejsza swoją wartość.

Przykładowe wartości opisujące rozmiary poszczególnych stref oddziaływania strumieni ściernych w zależności od rodzaju zastosowanej obróbki pneumatycznej, średnicy dyszy oraz także odległości dysz śrutujących od obrabianej powierzchni, zamieszczono w tabeli 1 oraz 2. W powyższych tabelach przy wartościach szerokości poszczególnej strefy oddziaływania zastosowano dolny indeks „1” w celu przedstawienia wartości dla strefy oddziaływania strumienia skoncentrowanego, natomiast „2” zastosowano dla strumienia rozproszonego. Wartości przedstawione w powyższych tabelach potwierdzają w pewien sposób mniejszą wydajność pneumatycznej inżektorowej obróbki strumieniowo-ściernej w stosunku do ciśnieniowej obróbki, przy identycznych parametrach obróbki.

Tabela 1. Szerokość stref oddziaływania strumienia skoncentrowanego oraz rozproszonego podczas pneumatycznej ciśnieniowej obróbki strumieniowo-ściernej

Średnica dyszy [mm]	Odległość dyszy od obrabianej powierzchni [mm]					
	150		300		450	
3	19 <sub>1</sub>	25 <sub>2</sub>	25 <sub>1</sub>	38 <sub>2</sub>	-	25 <sub>2</sub>
4,8	32 <sub>1</sub>	35 <sub>2</sub>	38 <sub>1</sub>	50 <sub>2</sub>	41 <sub>1</sub>	64 <sub>2</sub>
6	32 <sub>1</sub>	38 <sub>2</sub>	48 <sub>1</sub>	57 <sub>2</sub>	54 <sub>1</sub>	70 <sub>2</sub>
9,5	41 <sub>1</sub>	44 <sub>2</sub>	50 <sub>1</sub>	57 <sub>2</sub>	57 <sub>1</sub>	75 <sub>2</sub>

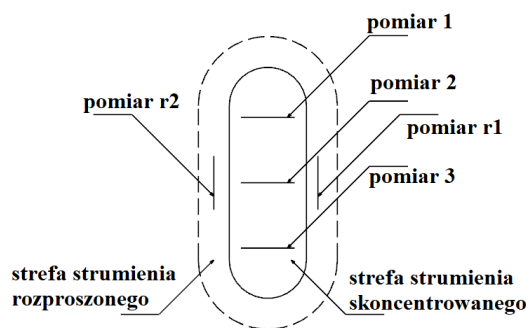
Tabela 2. Szerokość stref oddziaływania strumienia skoncentrowanego oraz rozproszonego podczas pneumatycznej inżektorowej obróbki strumieniowo-ściernej

Średnica dyszy [mm]	Odległość dyszy od obrabianej powierzchni [mm]					
	150		300		450	
6	35 <sub>1</sub>	67 <sub>2</sub>	-	70 <sub>2</sub>	-	25 <sub>2</sub>
8	38 <sub>1</sub>	89 <sub>2</sub>	44 <sub>1</sub>	114 <sub>2</sub>	-	95 <sub>2</sub>
11	51 <sub>1</sub>	95 <sub>2</sub>	51 <sub>1</sub>	114 <sub>2</sub>	-	95 <sub>2</sub>

#### 4.2. Pomiar chropowatości stref oddziaływania strumienia ściernego

Przed przystąpieniem do pomiaru chropowatości poszczególnych stref powstałych w wyniku oddziaływania strumienia skoncentrowanego oraz rozproszonego na powierzchni badanych próbek, zmierzono chropowatość obszaru przed obróbką strumieniem ściernym. Pomiar chropowatości dla nieobrobionych powierzchni oraz także dla obydwóch stref przeprowadzono przy wykorzystaniu profilografu MarSurf M 310 (90415) wyposażonego w głowicę PHT 350. Wszystkie pomiary przeprowadzono z następującymi parametrami:  $L_t = 4,8$  mm,  $L_s = 2,5$   $\mu\text{m}$ ,  $VB = \pm 200,0$   $\mu\text{m}$ ,  $V_t = 1,0$  mm/s, natomiast liczba punktów pomiarowych wynosiła 9600.

Pomiar chropowatości stref oddziaływania strumienia ściernego na powierzchni badanej próbki, przeprowadzono na podstawie schematu przedstawionego na rysunku 8.



Rysunek 8. Schemat pomiaru chropowatości strefy oddziaływania strumienia skoncentrowanego oraz rozproszonego

Dla strefy oddziaływania strumienia skoncentrowanego, pomiar chropowatości przeprowadzono trzykrotnie, natomiast w strefie rozproszonej pomiarów dokonano dwukrotnie. Szerokość stref skoncentrowanych umożliwia pomiar chropowatości na odcinku znajdującym się pomiędzy dłuższymi krawędziami tej strefy, natomiast pomiar chropowatości strefy rozproszonej przeprowadzono wzdłuż najdłuższych krawędzi. Wybór miejsca pomiaru chropowatości strefy rozproszonej był zdeterminowany zbyt małą szerokością tej strefy, a więc pomiar chropowatości tej strefy przeprowadzono w taki sam sposób jak w przypadku strefy skoncentrowanej, dostarczyłby nieprawidłowych informacji, ponieważ głowica pomiarowa profilografu przemieszczałaby się także po powierzchni nieobrobionej i strefie skoncentrowanej.

#### 4.3. Statystyczne opracowanie wyników pomiarów chropowatości stref oddziaływania strumienia skoncentrowanego

Założono model matematyczny operacji pneumatycznej obróbki strumieniowości w formie wielomianu drugiego stopnia z podwójną interakcją:

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad (10)$$

gdzie:

$z$ - chropowatość powierzchni określona parametrem  $R_a$ ,  $\mu\text{m}$  (średnia arytmetyczna rzędnych profilu  $R_a$ ,

$x_1$  - prędkość ruchu wózka  $v$ , mm/s,

$x_2$  - odległość dyszy  $x$ , cm.

Badania przeprowadzono wg planu statycznego zdeterminowanego selekcyjnego wieloczynnikowego ortogonalnego PS/DS-P:  $\alpha$ . Zakresy parametrów obróbki pneumatycznej strumieniowo-ściernej przyjęto na podstawie badań rozpoznawczych na trzech poziomach. Jako rezultaty badań doświadczalnych wyznaczono ubytek masy próbki, chropowatość powierzchni oraz w przypadku prób bez ruchu zespołu jezdnego stolika maksymalną głębokość śladu obróbki (za pomocą skanowania z wykorzystaniem skanera 3D Shining 3d Einscan Pro 2x 2020). Z uwagi na dużą ilość danych pomiarowych, stanowiących wyniki badań doświadczalnych, w artykule zdecydowano się zaprezentować tylko wybrane analizy statystyczne otrzymanych wyników dotyczących chropowatości powierzchni po obróbce.

Tabela 3. Poziomy i wartości zmiennych niezależnych dla realizacji programu PS/DS-P:  $\alpha$

Czynniki badane	$x_k$	$\Delta x_k$	Kod ( $\alpha=1,000$ )		
			$-\alpha = -1$	0	$+\alpha = +1$
Prędkość ruchu stolika $v$ , mm/s	$x_1$	1	1	2	3
Odległość dyszy $x$ , cm	$x_2$	1	1	2	3

Przeprowadzono eliminację błędów grubych testem Grubbsa, przy użyciu programu ReGreg. Wykorzystując program ReGreg oraz wyniki pomiarów chropowatości powierzchni obliczono współczynniki regresji:  $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}$  i  $b_{22}$ .

Po podstawieniu współczynników do wielomianu (10) uzyskano następującą funkcję regresji w postaci zakodowanej:

$$\hat{z}^{(u)}(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = b_0 + b_1 \hat{x}_1 + b_2 \hat{x}_2 + b_{11} \hat{x}_1^2 + b_{22} \hat{x}_2^2 + b_{12} \hat{x}_1 \hat{x}_2 \quad (11)$$

Występujące w równaniu (11) wartości wielkości wejściowych są unormowane i aby je zamienić na wartości rzeczywiste należy dokonać przekształcenia stosując zależność (12):

$$\hat{x} = \frac{x_k - \bar{x}_k}{\Delta x_k} \quad (12)$$

Dla dwóch zmiennych niezależnych  $x_1$  i  $x_2$  zależność (12) przyjmuje postać:

$$\hat{x}_1 = \frac{x_1 - \bar{x}_1}{\Delta x_1} \quad (13)$$

$$\hat{x}_2 = \frac{x_2 - \bar{x}_2}{\Delta x_2} \quad (14)$$

gdzie (wg tabeli 3):

$$\bar{x}_1 = 2mm/s; \Delta x_1 = 1mm/s$$

$$\bar{x}_2 = 2cm; \Delta x_2 = 1cm$$

Czyli po podstawieniu:

$$\hat{x}_1 = \frac{x_1 - 2}{1} = x_1 - 2 \quad (15)$$

$$\hat{x}_2 = \frac{x_2 - 2}{1} = x_2 - 2 \quad (16)$$

Zależności (15) i (16) podstawione do wielomianu (11), z uwzględnieniem, że  $x_1 = v$  i  $x_2 = x$  umożliwiają wyznaczenie postaci funkcji regresji dla badanych materiałów.

#### Próbka wykonana z AISI 304

Wyniki obliczeń statystycznych z wykorzystaniem oprogramowania ReGreg przedstawiono w tabeli 4.

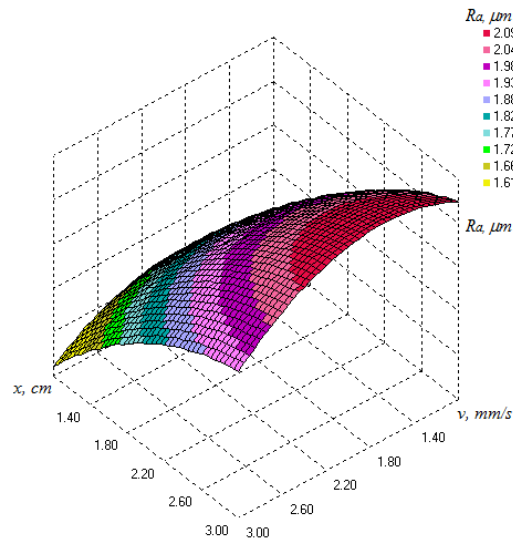
Tabela 4. Statystyki regresji dla AISI304

Współczynnik korelacji $R^2$		0.850693	
Test t współczynnika korelacji		4.282	
t krytyczne (0.050, 7)		2.361	
Korelacja istotna dla $t > t_{kryt}$			
Skorygowany wsp. korelacji $R^2$		0.601847	
Błąd standardowy estymacji $S_E$		0.1462	
Procentowy błąd $S_E/Y_{\text{śr}}$		7.83%	
Średni błąd bezwzględny $E_{\text{śr}}$		0.0738	
Ekstrema	$x_1 (v, mm/s)$	min=3.000	max=1.378
Ekstrema	$x_2 (x, cm)$	min=1.000	max=3.000
Ekstrema	$Y (R_a, \mu m)$	min=1.557	max=2.144

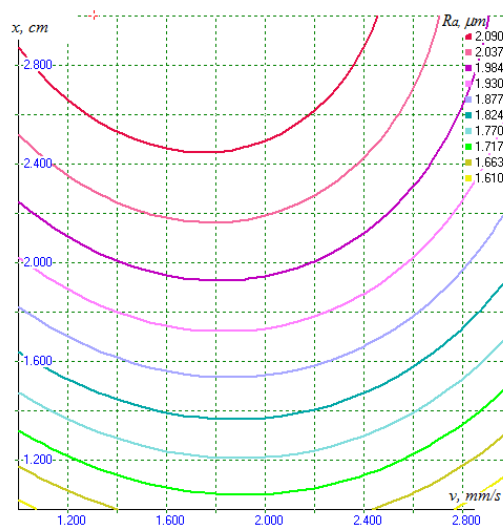
Po podstawieniu zależności (15) i (16) do wielomianu (11), z uwzględnieniem, że  $x_1 = v$  i  $x_2 = x$  otrzymano następującą postać funkcji regresji:

$$R_a = -4.95904 + 1.00919v + 3.63801x + -0,11817v^2 - 0.075x^2 - 0.02767vx \quad (17)$$

Dla funkcji regresji modelu kompletnego (17) sporządzono wykresy: przestrzenny (rysunek 9) i warstwowy (rysunek 10), obrazujące zależność  $R_a = g(v, x)$ .



Rysunek 9. Wykres przestrzenny obrazujący wpływ prędkości ruchu stolika  $v$  i odległości dyszy  $x$  na chropowatość powierzchni określoną parametrem  $R_a$ ; materiał obrabiany AISI 304, ścierniwo - elektrokorund F120



Rysunek 10. Wykres warstwowy obrazujący wpływ prędkości ruchu stolika  $v$  i odległości dyszy  $x$  na chropowatość powierzchni określoną parametrem  $R_a$ ; materiał obrabiany AISI 304, ścierniwo - elektrokorund F120

**Próbka wykonana ze stopu EN AW-6061**

Wyniki obliczeń statystycznych z wykorzystaniem oprogramowania ReGreg przedstawiono w tabeli 5.

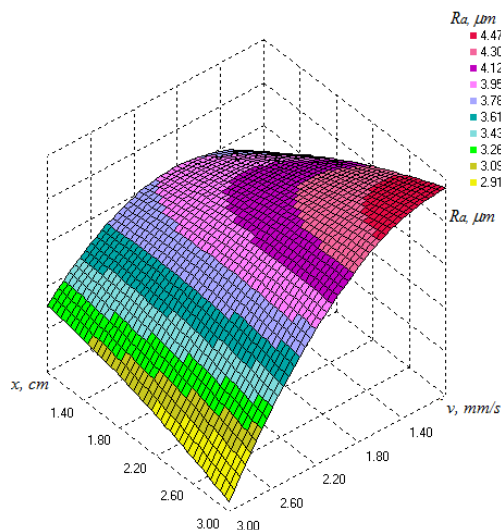
Tabela 5. Statystyki regresji dla stopu EN AW-6061

Współczynnik korelacji $R^2$		0.896116	
Test t współczynnika korelacji		5.342	
t krytyczne (0.050, 7)		2.361	
Korelacja istotna dla $t > t_{kryt}$			
Skorygowany wsp. korelacji $R^2$		0.722975	
Błąd standardowy estymacji $S_E$		0.3426	
Procentowy błąd $S_E/Y_{\text{śr}}$		9.10%	
Średni błąd bezwzględny $E_{\text{śr}}$		0.1739	
Ekstrema	$x_1 (v, mm/s)$	min=3.000	max=1.000
Ekstrema	$x_2 (x, cm)$	min=3.000	max=3.000
Ekstrema	$Y (R_a, \mu m)$	min=2.477	max=4.643

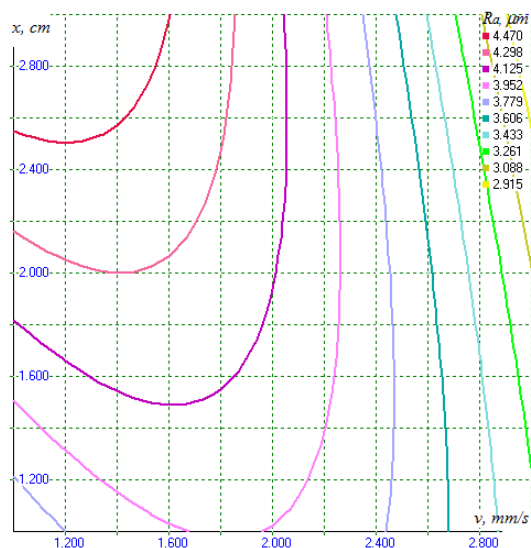
Po podstawieniu zależności (15) i (16) do wielomianu (11), z uwzględnieniem, że  $x_1 = v$  i  $x_2 = x$  otrzymano następującą postać funkcji regresji:

$$R_a = -9.09925 + 4.80051v + 2.26368x - 0.47617v^2 - 0.07467x^2 - 0.38875vx \quad (18)$$

Dla funkcji regresji modelu kompletnego (18) sporządzono wykresy: przestrzenny (rysunek 11) i warstwiczny (rysunek 12), obrazujące zależność  $R_a = g(v, x)$ .



Rysunek 11. Wykres przestrzenny obrazujący wpływ prędkości ruchu stolika  $v$  i odległości dyszy  $x$  na chropowatość powierzchni określoną parametrem  $R_a$ ; materiał obrabiany stop EN AW-6061, ścierniwo - elektrokorund F120



Rysunek 12. Wykres warstwiczny obrazujący wpływ prędkości ruchu stolika  $v$  i odległości dyszy  $x$  na chropowatość powierzchni określoną parametrem  $R_a$ ; materiał obrabiany stop EN AW-6061, ścierniwo - elektrokorund F120

### Próbka wykonana ze stali S235J

Wyniki obliczeń statystycznych z wykorzystaniem oprogramowania ReGreg przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Statystyki regresji dla stali S235J

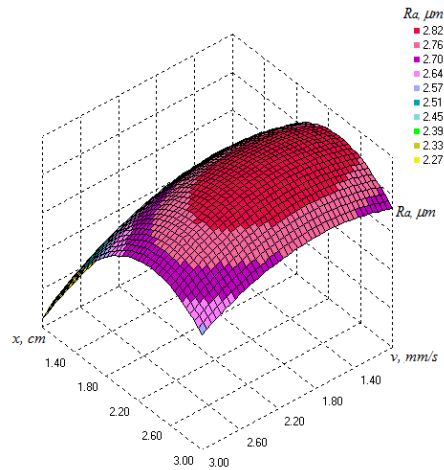
Współczynnik korelacji $R^2$		0.827439	
Test t współczynnika korelacji		3.898	
t krytyczne (0.050, 7)		2.361	
Korelacja istotna dla $t > t_{kryt}$			
Skorygowany wsp. korelacji $R^2$		0.539838	
Błąd standardowy estymacji $S_E$		0.1689	
Procentowy błąd $S_E/Y_{\text{śr}}$		6.51%	
Średni błąd bezwzględny $E_{\text{śr}}$		0.0777	
Ekstrema	$x_1 (v, mm / s)$	min=3.000	max=1.712
Ekstrema	$x_2 (x, cm)$	min=1.000	max=2.346
Ekstrema	$Y (R_a, \mu m)$	min=2.210	max=2.879

Po podstawieniu zależności (15) i (16) do wielomianu (11), z uwzględnieniem, że  $x_1 = v$  i  $x_2 = x$  otrzymano następującą postać funkcji regresji:

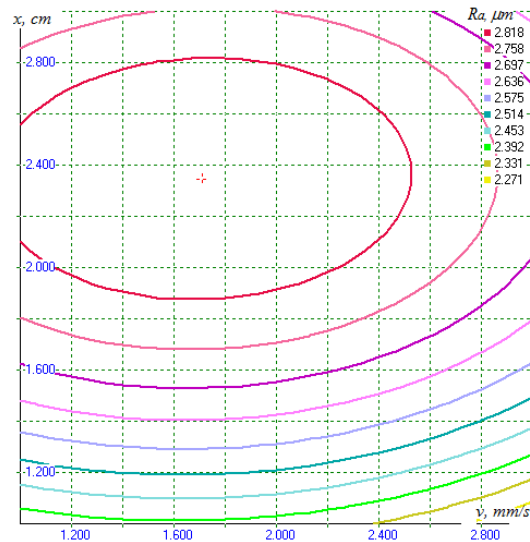
$$R_a = -2.88333 + 0.62383v + 2.33017x + -0.0915v^2 - 0.2735x^2 + 0.01275vx \quad (19)$$



Dla funkcji regresji modelu kompletnego (19) sporządzono wykresy: przestrzenny (rysunek 13) i warstwowy (rysunek 14), obrazujące zależność  $R_a = g(v, x)$ .



Rysunek 13. Wykres przestrzenny obrazujący wpływ prędkości ruchu stolika  $v$  i odległości dyszy  $x$  na chropowatość powierzchni określoną parametrem  $R_a$ ; materiał obrabiany stal S235J, ścierniwo - elektrokorund F120



Rysunek 14. Wykres warstwowy obrazujący wpływ prędkości ruchu stolika  $v$  i odległości dyszy  $x$  na chropowatość powierzchni określoną parametrem  $R_a$ ; materiał obrabiany stal S235J, ścierniwo - elektrokorund F120

#### Próbka wykonana ze stali Hardox 400

Wyniki obliczeń statystycznych z wykorzystaniem oprogramowania ReGreg przedstawiono w tabeli 7.

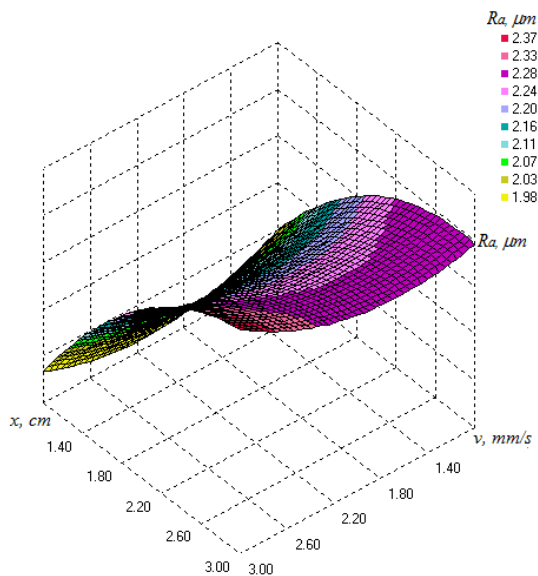
Tabela 7. Statystyki regresji dla stali Hardox400

Współczynnik korelacji $R^2$		0.751470	
Test t współczynnika korelacji		3.013	
t krytyczne (0.050, 7)		2.361	
Korelacja istotna dla $t > t_{kryt}$			
Skorygowany wsp. korelacji $R^2$		0.337254	
Błąd standardowy estymacji $S_{E}$		0.1586	
Procentowy błąd $S_{E}/Y_{\text{śr}}$		7.22%	
Średni błąd bezwzględny $E_{\text{śr}}$		0.0802	
Ekstrema	$x_1 (v, mm/s)$	min=2.310	max=3.000
Ekstrema	$x_2 (x, cm)$	min=1.000	max=3.00
Ekstrema	$Y (R_a, \mu m)$	min=1.941	max=2.414

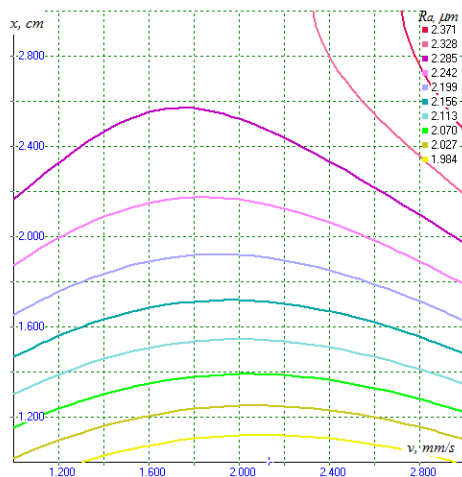
Po podstawieniu zależności (15) i (16) do wielomianu (11), z uwzględnieniem, że  $x_1 = v$  i  $x_2 = x$  otrzymano następującą postać funkcji regresji:

$$R_a = 1.47476 - 0.60732v + 0.78051x + 0.06233v^2 - 0.09017x^2 + 0.03075vx \quad (20)$$

Dla funkcji regresji modelu kompletnego (20) sporządzono wykresy: przestrzenny (rysunek 16) i warstwiczny (rysunek 17), obrazujące zależność  $R_a = g(v, x)$ .



Rysunek 15. Wykres przestrzenny obrazujący wpływ prędkości ruchu stolika  $v$  i odległości dyszy  $x$  na chropowatość powierzchni określoną parametrem  $R_a$ ; materiał obrabiany stal Hardox400, ścierniwo - elektrokorund F120



Rysunek 16. Wykres warstwiczny obrazujący wpływ prędkości ruchu stolika  $v$  i odległości dyszy  $x$  na chropowatość powierzchni określoną parametrem  $R_a$ ; materiał obrabiany stal Hardox400, ścierniwo - elektrokorund F120

## 5. Podsumowanie i wnioski

Jednodyszowe oczyszczarki kabinowe są najczęściej wykorzystywanymi w przemyśle obrabiarkami przeznaczonymi do obróbki strumieniem ściernym powierzchni w sposób manualny lub zautomatyzowany. Konstrukcję stanowiska doświadczalnego opracowano w oparciu o oczyszczarkę pneumatyczną komorową OPK-140 firmy Sant-Tech. Podczas przeprowadzania prób badawczych oraz późniejszej weryfikacji otrzymanych wyników, wyznaczono zależność pomiędzy takimi parametrami obróbki jak: odległość dyszy od obrabianej powierzchni, prędkości przemieszczania się stolika wewnątrz komory oczyszczarki oraz kątem nachylenia dyszy, a chropowatością powierzchni w strefie oddziaływania strumienia skoncentrowanego. Wielkość stref oddziaływania strumienia ściernego oraz ich chropowatość jest zależna od parametrów obróbki, dlatego dla próbek wykonanych z podanych w opracowaniu stopów przeprowadzono optymalizację parametryczną operacji pneumatycznej obróbki strumieniowo-ścierniej w oparciu o plan badań statyczny zdeterminowany selekcyjny ortogonalny wieloczynnikowy PS/DS-P: $\alpha$ . Z analizy statystycznej wynika, że przyjęte równanie regresji jest adekwatne dla każdego z poddanych obróbce materiałów. Próby badawcze dla przyjętych kątów padania strumienia ściernego ( $90^\circ$  i  $85^\circ$ ) na powierzchnię obrabianych materiałów nie ujawniły znacznego zróżnicowania w zakresie struktury geometrycznej powierzchni wyrażonej za pomocą parametru chropowatości  $R_a$ . Na podstawie uzyskanych rezultatów badań w powiązaniu z przyjętymi parametrami obróbki (średnica dyszy  $f=2\text{mm}$ , ścierniwo – elektrokorund F120, ciśnienie powietrza  $p=6\text{bar}$ , kąt obróbki  $90^\circ$  oraz  $85^\circ$ , prędkość przesuwu stolika w komorze 3, 2 i 1 mm/s, oraz odległości dyszy od powierzchni obrabianej odpowiednio 3, 2 i 1 cm) zaleca się prowadzenie obróbki dla badanych materiałów przy odległości dyszy  $x=1\div 2$  cm oraz prędkości  $v=1\div 3$  mm/s.

**LITERATURA**

1. MAŁECKI B.: Środki czyszczące stosowane w oczyszczarkach wirnikowych i metody ich badań. Przegląd Odlewnictwa, 1963.
2. NAKONIECZNY A.: Dynamiczna obróbka powierzchniowa - kulowanie. Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 2002.
3. ADAMCZAK S.: Pomiar geometryczny powierzchni. Zarysy kształtu, falistości i chropowatości. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2008.
4. ZYZAK P.: Ocena parametrów strumienia śrutu wskaźnikami próby z użyciem płytek kontrolnych. *Mechanik* **8-9** (2015), 374-381. DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.403.
5. WOŹNIAK K.: Obróbka strumieniowo-ścierna. Tom 1. Materiały ścierne. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2020.
6. WOŹNIAK K.: OBRÓBKA STRUMIENIOWO-ŚCIERNA. Tom 2. Oczyszczarki i procesy obróbki. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2020.
7. Serwis internetowy firmy Stilo.Tips: <https://silo.tips/download/przemysowe-powoki-malarskie-na-powierzchnie-metalowe>, 10.10.2023
8. WOŹNIAK K.: Śrut z tworzyw sztucznych jako media w obróbce strumieniowo-ścierniej. *Chemik* **12** (2013), 1227-1238.
9. Praca zbiorowa Shot Peening.: A Dynamic application and its Future. Wydawnictwo Metal Finishing News (MFN), Wetzikon 2006
10. PN-EN ISO 8504-2:2020-4. Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów – Metody przygotowania powierzchni – Część 2: Obróbka strumieniowo-ścierna.
11. POROŚ D., STECHNIJ T., ZABOROWSKI S.: Wpływ obróbki strumieniowo-ścierniej na strukturę geometryczną powierzchni wybranych metali nieżelaznych. *Mechanik* **8-9** (2016), 1080-1081. DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.257.
12. HIGGINS G. L., HULLCOOP R. S.: Corrosion 3rd Edition, Volume 2: Corrosion Control, Metal and Metal preparation, Chapters 11:11-11:13, G.T., Elsevier 1994.
13. PŁONKA S., OGIŃSKI L.: Podstawy eksperymentalnej optymalizacji parametrycznej operacji wytwórczych. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2004.
14. KACPRZYŃSKI B.: Planowanie eksperymentów. Podstawy matematyczne. WNT, Warszawa 1974.
15. POLAŃSKI Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
16. PAJAŁ E., WIECZORKOWSKI K.: Podstawy optymalizacji operacji technologicznych w przykładach. PWN, Warszawa-Poznań 1982.
17. Serwis internetowy firmy Sant-Tech: <https://www.sant-tech.pl/pl>, 20.06.2023
18. Serwis internetowy firmy Admetal: <http://admetal.pl/produkt/aluminium/blachyplyty/blachyplyty-walcowane/en-aw-6061-2/>, 04.06.2022
19. Serwis internetowy firmy Metinvest: <https://metinvestholding.com/pl/products/steel-grades/s235jr>, 04.06.2022
20. Serwis internetowy firmy Special Steels Polska: <https://stalespecjalne.com.pl/oferta/stale-nierdzewne/1-4301.html>, 04.06.2022