

**Piotr NOWAK\***

## **WYKORZYSTANIE METOD PLANOWANIA EKSPERYMENTÓW W OCENIE WYBRANYCH WŁASNOŚCI STALI**

### **THE USE OF METHODS OF PLANNING EXPERIMENTS IN THE EVALUATION OF SELECTED PROPERTIES OF THE STEEL**

#### **Słowa kluczowe:**

stal, synergizm, planowanie eksperymentów

#### **Key words:**

steel, synergism, planning matrices

#### **Streszczenie**

Polepszenie własności konstrukcyjnych stali można uzyskać poprzez wykorzystanie rezultatów odpowiednio zaplanowanych doświadczeń. Mogą one zidentyfikować oddziaływania synergiczne, czyli wzajemne wzmocnianie działania poszczególnych czynników powodujące, że łączny efekt jest większy od sumy

---

\* Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Instytut Budowy Maszyn, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom.

efektów ich działania oddzielnego. Działania synergiczne wykazują m.in. pierwiastki stopowe.

Przedstawione efekty uzyskano w oparciu o eksperymenty zrealizowane według planów czynnikowych dwuwartościowych ( $2^{n-p}$ ) i ich rozwinięcia – planów kompozycyjnych. W pierwszym etapie optymalizacji formułuje się pożądane efekty badanego procesu. Po ich zweryfikowaniu przeprowadza się serię eksperymentów, których celem jest wyznaczenie poszukiwanego optimum. W każdym etapie badań stosuje się metody statystyczne i analityczne pozwalające na weryfikację poprawności podejmowanych decyzji [L. 1, 3].

Poszukiwane własności mechaniczne stali odgrywają również ważną rolę we własnościach tribologicznych związanych z tarciem i zużywaniem materiałów. Zmieniając np. parametry procesów obróbki cieplnej stali, możemy spowodować polepszenie lub pogorszenie jej odporności na zużycie.

W pracy poddano analizie trzy wybrane gatunki stali: C40, 41Cr4, 42CrMo4 i za pomocą metod planowania eksperymentów pokazano wpływ temperatury odpuszczania, udziału martenzytu oraz zawartości węgla na kształtowanie się własności mechanicznych badanych stali. Na podstawie przeprowadzonych badań określono tzw. współczynniki regresji i ułożono równania, w których pokazano wpływ poszczególnych zmiennych na własności stali.

## WPROWADZENIE

Metody planowania eksperymentów umożliwiają określenie takich warunków prowadzenia procesu  $x$  (tj. zbioru wartości zmiennych sterujących), w których wartości charakterystyk, jakości ( $y$ ) są stabilne wobec występowania ewentualnych zakłóceń losowych ( $z$ ). Wybór ww. warunków jest dokonywany na podstawie modelu matematycznego badanego procesu opisującego zmienność charakterystyk, jakości procesu w funkcji zmiennych sterujących (nazywanych inaczej badanymi czynnikami). Problem ten sprowadza się do poszukiwania ekstremum funkcji celu wyrażającej kryteria jakości procesu. Ogólnie rzecz biorąc, procedury optymalizacyjne zmierzające do poprawy jakości procesu technologicznego są uwarunkowane kontekstem sytuacji badawczej i mogą dotyczyć [L. 12]:

- wyznaczenia warunków prowadzenia procesu technologicznego  $x$  (lub użytkowania produktu), dla których wartości charakterystyk jakości przyjmą wartość optymalną,
- poszukiwania takich warunków prowadzenia procesu  $x$ , dla których uzyska się korzystną redukcję wpływu zakłóceń  $z$ , przy jednoczesnym zachowaniu ustalonej lub dopuszczalnej wartości charakterystyki jakości  $y$ ,
- ustalenia warunków wytwórczych lub użytkowania produktu  $x$ , w których charakterystyka jakości  $y$  będzie stabilna ze względu na występowanie ewentualnych zakłóceń  $z$ .

Wymieniona klasyfikacja nie jest zupełna, możliwe jest bowiem złożenie wielu kryteriów optymalizacji, by w ramach tej samej procedury badań jednocześnie wyznaczyć optymalne wartości charakterystyk jakości oraz zredukować ich rozrzut.

## MATERIAŁ DO BADAŃ

Badaniu zostały poddane stale C40, 40H oraz 40HM. Stale te różnią się od siebie zawartością procentową pierwiastków stopowych. Udział poszczególnych pierwiastków stopowych wpływa w różny sposób na kształtowanie się własności stali. Wpływ pierwiastków stopowych na własności stali zależy w znacznym stopniu od tego, w jakiej fazie dany pierwiastek występuje. W zależności od ilości i rodzaju pierwiastków stopowych mogą one:

- rozpuszczać się w ferrycie lub austenicie;
- tworzyć węgliki, azotki lub węglikoazotki;
- tworzyć fazy międzymetaliczne z żelazem lub między sobą;
- tworzyć związki z domieszkami (np. S, O<sub>2</sub>) i znajdować się we wtrąceniach niemetalicznych;
- w nielicznych przypadkach mogą występować w stanie wolnym, kiedy nie rozpuszczają się w ogóle w osnowie lub ich rozpuszczalność jest bardzo mała, a jednocześnie nie reagują ze składnikami stopu.

Pierwiastki stopowe znajdujące się w roztworach stałych (ferrycie lub austenicie) wpływają na własności mechaniczne tych faz, na położenie temperatur krytycznych przemiany austenitu lub szybkość dyfuzji, na przemianę martenzytyczną i skłonność do odpuszczania. Wchodzenie pierwiastków stopowych do innych faz działa w bardziej złożony sposób, gdyż z jednej strony następuje zubożenie roztworu stałego w te pierwiastki, a z drugiej (w zależności od własności wydzielonych faz, ich kształtu i dyspersji) ich wpływ na własności mechaniczne może być różny [L. 1, 7, 8].

Badaniom poddano trzy gatunki stali: C40, 41Cr4, 42CrMo4 różniące się między sobą składem chemicznym i własnościami mechanicznymi. Stal do ulepszenia cieplnego C40 charakteryzuje się małą hartownością. Jest to stal z reguły stosowana w stanie normalizowanym, czasem utwardzana przez hartowanie powierzchniowe. Mniejsze wyroby z tej stali można stosować w stanie ulepszonym cieplnie. Do grupy tej zalicza się także stale stosowane na blachy płaskie (do 0,1% C) i do głębokiego tłoczenia, posiadające obniżoną zawartość wtrąceń niemetalicznych (siarczków) i są tak walcowane i rekrytalizowane, by ziarna stali były drobne i równomierne. W przypadku tej stali występuje również struktura sorbityczna, powstała w wyniku ulepszenia cieplnego. Zapewnia duży stosunek Re/Rm przy dużej ciągliwości (udarności). Hartowność tych stali jest większa niż stali węglowych i rośnie w miarę zwiększania ilości dodatków stopowych [L. 9, 11].

Natomiast stal stopowa konstrukcyjna 41Cr4 o zawartości 0,3–0,5% C i niewielkim dodatku pierwiastków stopowych jak: Mn, Cr, Ni, Mo, Si jest wykorzystywana do wytwarzania większości części maszyn, pojazdów i konstrukcji. Ulepszanie tej stali zapewnia duży stosunek Re/Rm, zachowując dużą ciągliwość, a im większa ilość dodatków stopowych, tym lepsza hartowność. Stale używane w przemyśle są skatalogowane i objęte PN. W stalach używanych na elementy pracujące w trudnych warunkach, gdy wymaga się dużej ciągliwości, stosuje się stale o zmniejszonej zawartości C (0,2–0,3%), ale o zwiększonej ilości dodatków stopowych [L. 1].

W pracy badano również stal 42CrMo4 stosowaną do nawęglania i hartowania powierzchniowego. Jest to stal chromowo-molibdenowa o podobnej zawartości składników stopowych do stali 41Cr4. Stal chromowa przeznaczona jest do hartowania powierzchniowego. Stale o większej hartowności stosuje się tylko wtedy, gdy elementy mają duże przekroje i przed hartowaniem powierzchniowym są poddawane ulepszeniu na wskroś [L. 4, 8].

**Tabela 1. Skład chemiczny (% masowy) badanych stali**

Table 1. Chemical composition (% by mass) of steel

Numer normy	Znak stali	Zawartość składników, %								
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
PN-72/H-84030	C40	0,37÷ 0,44	0,50÷ 0,80	0,10÷ 0,40	0,040	0,0,40	0,30	0,30	0,10	0,30
PN-72/H-84030	41Cr4	0,36÷ 0,44	0,50÷ 0,80	0,17÷ 0,37	0,035	0,035	0,80÷ 1,10	0,30	0,10	0,30
PN-72/H-84030	42CrMo4	0,38÷ 0,45	0,40÷ 0,70	0,17÷ 0,37	0,035	0,035	0,80÷ 1,10	0,30	0,15÷ 0,25	0,30

## OPIS METODY BADAŃ I PRZEDSTAWIENIE WYNIKÓW

Wykorzystując statystyczne metody planowania doświadczeń, a dokładnie plan czynnikowy kompletny  $2^{(3-0)}$ , opracowano zestaw eksperymentów umożliwiający identyfikację wpływu parametrów obróbki cieplnej na kształtowanie się własności mechanicznych badanych stali. Wartości zmiennych niezależnych ( $x_1$  – temperatura odpuszczania,  $x_2$  – udział martenzytu po hartowaniu i  $x_3$  – zawartość węgla) oraz wartości średnie zmiennych zależnych ( $y_4$  – twardość,  $y_5$  – wytrzymałość na rozciąganie oraz  $y_6$  – zawartość węgla) uzyskane w rezultacie uśrednienia wyników uzyskanych w rezultacie czterech realizacji zaplanowanych procesów pokazano w **Tabeli 4**.

Niezbędne obliczenia statystyczne konieczne do wyznaczenia wartości współczynników regresji odwzorowujących wpływ zmiennych niezależnych na zmienne wyjściowe wykonano w programie STATISTICA<sup>TM</sup>PL. W celu oceny

istotności opracowanych modeli regresyjnych wykorzystano analizę wariancji ANOVA, której rezultaty przedstawiono w **Tabelach 2, 3**. Uzyskane równania regresji pozwoliły zaobserwować wpływ synergizmu procesów obróbki cieplnej na własności badanych stali.

Równania regresji dla stali C40 mają postać:

Wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ :

$$y_4 = 64,975 - 1,775 x_1 - 1,625 x_2 - 0,425 x_3 - 0,875 x_1x_2 - 1,025 x_1x_3 + 2,525x_2x_3$$

Wielkość ziarna:

$$y_5 = 5,588 + 2,263 x_1 - 0,237 x_2 + 0,437 x_1x_2 - 0,463 x_1x_3 - 0,412 x_2x_3$$

gdzie:

- $x_1$  – temperatura odpuszczania  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $x_2$  – udział martenzytu po hartowaniu  $m$  [%];
- $x_3$  – zawartość węgla  $C$  [%];
- $x_1x_2$  – współdziałanie temperatury odpuszczania z udziałem martenzytu po hartowaniu;
- $x_1x_3$  – współdziałanie temperatury odpuszczania z zawartością węgla;
- $x_2x_3$  – współdziałanie martenzytu po hartowaniu z zawartością węgla.

**Tabela 2.** Analiza istotności statystycznej współczynników modelu regresyjnego wytrzymałości na rozciąganie

Table 2. Analysis of the statistical significance of a regression model of tensile strength

Wejśc.	Wpólcz. regresji; $R^2=,99$ ; Popr.:988) 2**(3-0) plan; Resztowy MS=,173 ZZ Wytrz.					
	Regresji Wsp.	Błąd std	t(33)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
Średn./Stała	64,975	0,07	988,34	0,000	64,84	65,11
(1)x1	-1,775	0,07	-27,00	0,000	-1,91	-1,64
(2)x2	-1,625	0,07	-24,72	0,000	-1,76	-1,49
(3)x3	-0,425	0,07	-6,46	0,000	-0,56	-0,29
1 wz.2	-0,875	0,07	-13,31	0,000	-1,01	-0,74
1 wz.3	-1,025	0,07	-15,59	0,000	-1,16	-0,89
2 wz.3	2,525	0,07	38,41	0,000	2,39	2,66

Zawarte w **Tabeli 2** wartości statystyk t-Studenta i odpowiadające im wartości prawdopodobieństw testowych  $p$  – mniejsze od przyjętego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  potwierdzają istotność statystyczną współczynników funkcji regresji wytrzymałości na rozciąganie w zależności od badanych zmiennych zależnych. Podobnie wartości przedstawione w **Tabeli 3** potwierdzają istotność statystyczną współczynników funkcji regresji wielkości ziarna.

**Tabela 3. Analiza istotności statystycznej współczynników modelu regresyjnego wielkości ziarna**

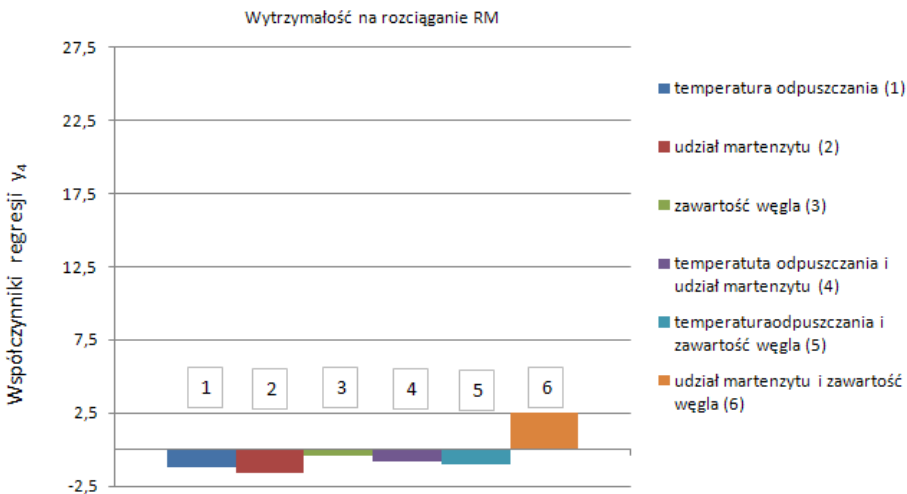
Table 3. Analysis of the statistical significance of grain size of the regression model

Wejśc.	Wpółcz. regresji; R <sup>2</sup> = ,94; Popr.:93 2**(3-0) plan; Resztowy MS=,442 ZZ Ziarno [µm]					
	Regresji Wsp.	Błąd std	t(34)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
Średn./Stała	5,588	0,105	53,146	0,000	5,374	5,801
(1) x1	2,263	0,105	21,520	0,000	2,049	2,476
(2) x2	-0,237	0,105	-2,259	0,030	-0,451	-0,024
1 wz.2	0,437	0,105	4,161	0,000	0,224	0,651
1 wz.3	-0,463	0,105	-4,399	0,000	-0,676	-0,249
2 wz.3	-0,412	0,105	-3,924	0,000	-0,626	-0,199

Jako miarę oceny modelu regresyjnego przyjęto współczynnik korelacji R<sup>2</sup> oceniający stopień dopasowania modelu do wyników pomiarów na podstawie, który został opracowany.

Według tego kryterium najlepiej dopasowanym modelem regresyjnym jest model odwzorowujący wytrzymałość na rozciąganie stali C40 o bardzo wysokim współczynniku R<sup>2</sup> = 0,99, a następnie model odwzorowujący wielkość ziarna o współczynniku korelacji R<sup>2</sup> = 0,94.

Współczynniki regresji opisujące wytrzymałość na rozciąganie dla stali C40 mają postać:



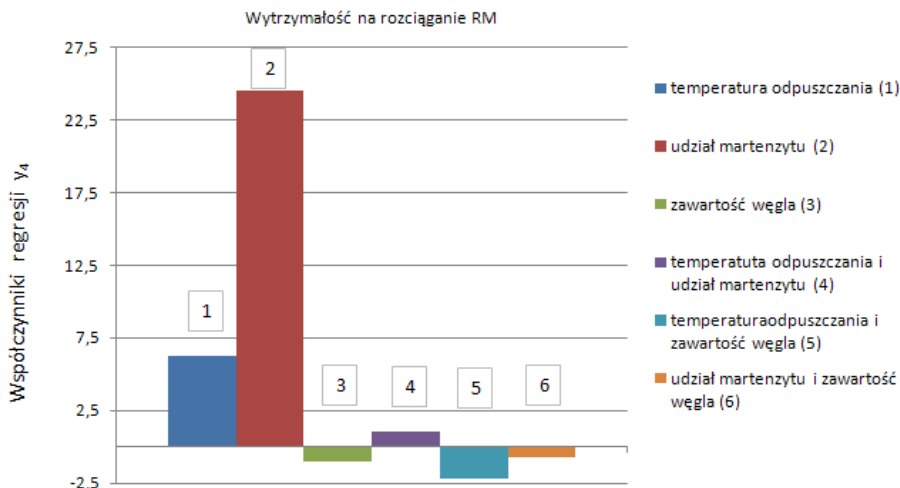
**Rys. 1. Wytrzymałość na rozciąganie RM dla stali C40**

Fig. 1. Hardness on the expansion for steel C40

**Tabela 4. Planowanie i wyniki badań za pomocą macierzy planowania doświadczeń ekstremalnych stali C40**  
 Table 4. Planning and results of the studies using the matrix of planning experience extreme steel C40

	Temperatura odpuszczania	Udział martenzytu po hartowaniu	Zawartość węgla				Twardość HB	Wytrzymałość na rozciąganie RM	Wielkość ziarna w [ $\mu\text{m}$ ]
				$x_1$	$x_2$	$x_3$			
Poziom podstawowy	500	80	0,41						
Przedział zmian	200	10	0,03						
Poziom wyższy	700	90	0,44						
Poziom niższy	300	70	0,38						
Symbole kodowe	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
Nr próby									
1	-	-	-	+	+	+	167	69,1	3,8
2	+	-	-	-	-	+	165	70	7,2
3	-	+	-	-	+	-	169	63,2	2,1
4	+	+	-	+	-	-	163	59,3	9,6
5	-	-	+	+	-	-	170	65,9	4,2
6	+	-	+	-	+	-	166	61,4	8,1
7	-	+	+	-	-	+	164	68,8	3,2
8	+	+	+	+	+	+	168	62,1	6,5
Współczynniki regresji									
$b(y_3)$	-1	-0,5	0,25	0,5	1	-0,5			
$b(y_4)$	-1,775	-1,625	-0,425	-0,875	-1,025	2,525			
$b(y_5)$	2,2625	-0,2375	-0,0875	0,4375	-0,4625	-0,4125			

Współczynniki regresji opisujące wytrzymałość na rozciąganie dla stali 41Cr4 mają postać:



Rys. 2. Wytrzymałość na rozciąganie RM dla stali 41Cr4

Fig. 2. Hardness on the expansion for steel 41Cr4

## PRZEDSTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Na kształtowanie się wytrzymałości stali C40 istotny, ujemny wpływ wykazuje martenzyt, nieco mniejsze oddziaływanie ma temperatura odpuszczenia, najmniej zaś również negatywnie wpływa zawartość węgla. Istotny dodatni wpływ na kształtowanie się wytrzymałości, biorąc pod uwagę synergizm, ma udział martenzytu i zawartość węgla, mniejszy negatywny ma temperatura odpuszczenia i zawartość węgla. Synergizm związany z temperaturą odpuszczenia i udziałem martenzytu ma najmniejszy negatywny wpływ na własności stali. Wielkość ziarna natomiast istotnie zależy przede wszystkim od temperatury odpuszczenia. Współdziałanie temperatury odpuszczenia i martenzytu podwyższa własności stali. Natomiast oddziaływanie temperatury odpuszczenia i udziału martenzytu po hartowaniu powoduje wzrost wielkości ziarna.

Wzrost wytrzymałości stali 41Cr4 można uzyskać przez większy procentowy udział martenzytu, mniejszy przez wzrost temperatury odpuszczenia. Istotny wpływ na kształtowanie się wytrzymałości, biorąc pod uwagę synergizm, wpływa temperatura odpuszczenia i udział martenzytu działając dodatnio, nieco mniejszym wpływem ujemnym przy jednoczesnym oddziaływaniu charakteryzuje się temperatura odpuszczenia i zawartość węgla. Wielkość ziarna natomiast istotnie zależy przede wszystkim od temperatury odpuszczenia i zawartości węgla.



Na kształtowanie się wytrzymałości stali 42CrMo4 istotny wpływ ma udział martenzytu, nieco mniejsze oddziaływanie wykazuje zawartość węgla, najmniej zaś wpływa temperatura odpuszczania. Wielkość ziarna natomiast istotnie zależy przede wszystkim od temperatury odpuszczania i zawartości węgla. Natomiast martenzyt wpływa na wielkość ziarna w sposób mało istotny. Synergizm związany z temperaturą odpuszczania oraz zawartością węgla powoduje wzrost wielkości ziarna.

## PODSUMOWANIE

Analizując gatunki stali oraz wpływ parametrów obróbki cieplnej – temperatury odpuszczania, udziału martenzytu i zawartości węgla, wykazano za pomocą badań empirycznych, iż można w prosty sposób określić wpływ różnych parametrów na właściwości badanych materiałów.

Przedstawione w pracy współzależności czynników chemicznych, strukturalnych i własności mechanicznych mogą być szczególnie przydatne w technologii obróbki cieplnej stali konstrukcyjnej do ulepszania cieplnego, w przypadku gdy istotne jest uzyskanie określonych właściwości, np. w aspekcie charakterystyk tribologicznych.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń zauważono, że ze wzrostem zawartości węgla i pierwiastków stopowych (Mn, Si, Mo) wszystkich omówionych gatunków stali wzrasta wytrzymałość na rozciąganie. Jeżeli temperatura odpuszczania rośnie, wtedy wytrzymałości na rozciąganie maleje.

## LITERATURA

1. Górecka R.: *Metodyka eksperymentu*. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1994.
2. Maciąg M.: Model termodynamiczny zużywania ściernego metali. *Tribologia* nr 1/2003.
3. Czupryk W.: Wpływ zjawisk wtórnych na zużywanie utleniające metali w procesie tarcia poślizgowego. *Prace Naukowe nr 848 Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu, Wrocław 2000.
4. Nalimov V.V., Černova N.A.: *Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych*. WNT, Warszawa 1967.
5. Godziszewski J., Mania R., Pampuch R.: *Zasady planowania doświadczeń i opracowywania wyników pomiarów*. Wyd. AGH, Kraków 1987.
6. Švedkov E.L. i in.: *Slovar – spravočnik po treniju, iznosu i smazke detalej mašin*. Naukova Dumka Kiev 1979.
7. Pająk E., Wieczorowski K.: *Podstawy optymalizacji operacji technologicznych przykładach*. PWN, Poznań 1982.
8. Sadowski J.: *Untersuchungen zur maximalen Verschleißvestigkeit fester Körper*. *Tribologie und Schmierungstechnik* Nr 3 1990.
9. Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa 1984.

10. Sadowski J., Śurowski W.: Sposób zmniejszania zużycia trybologicznego elementów trących. Patent polski nr 1767118, B1, F16N 29/00 opublikowano 30.07.1999.
11. Sadowski J., Śurowski W.: Thermodynamische Aspekte über die Verschleißbeständigkeit von Metallen. Tribologie und Schmierungstechnik Nr 3 1992r.
12. Wieleba W.: Analiza procesów trybologicznych zachodzących podczas współpracy kompozytów PTFE ze stalą. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.

## Summary

**In the planning experience, structural properties play an important role. They can affect the steel by impact synergism, that is, the mutual strengthening of activity of chemical compounds or ions in the environment, resulting in that the total effect is greater than the sum of their separate effects. The solution was obtained based on the plans of the factors Divalent (2n-p) and their deployment-composition plans. The first stage of optimization includes the assumption as to the desired properties of the test process. After their verification carried out like a series of experiments whose purpose is to define the optimum. In every stage of the research applies statistical methods and analytical verification of the correctness of decisions.**