

6. Projektowanie składu chemicznego stali szybko tnących o wymaganej twardości i odporności na pękanie

Do projektowania składu chemicznego stali szybko tnących, które jest zadaniem optymalizacyjnym, wykorzystano algorytmy ewolucyjne. Funkcją celu jest wskaźnik określający zespół optymalizowanych własności, który w tym przypadku stanowią twardość oraz odporność na pękanie. Założono, że możliwe będzie ustalenie wag dla każdej z własności, co pozwoli na podejmowanie decyzji, która z własności w aktualnie przeprowadzanej procedurze optymalizacji jest istotniejsza. Wynikiem przeprowadzonej optymalizacji ze względu na maksymalną twardość wtórną są składy chemiczne stali szybko tnących najwyższej twardości, a ze względu na odporność na pękanie - składy chemiczne stali o wykazujące najwyższą wartość współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic} . Ponadto założono możliwość ograniczenia obszaru poszukiwań optymalnego składu chemicznego spełniającego przyjęte kryteria. Ze względu na postać opracowanych modeli materiałowych zastosowanych w projektowaniu składu chemicznego optymalizacji podlegają nie tylko stężenia pierwiastków stopowych, ale również parametry obróbki cieplnej, tj. temperatura austenitowania i odpuszczania. Zastosowane metody ewolucyjne optymalizacji bazują na teorii nauk przyrodniczych opisujących zjawiska doboru naturalnego oraz dziedziczenia i polegają na przetrwaniu osobników najlepiej dostosowanych w danym środowisku, podczas gdy osobniki gorzej przystosowane są eliminowane. Z kolei te osobniki, które przetrwają - przekazują informację genetyczną swoim potomkom. Krzyżowanie informacji genetycznej otrzymanej od "rodziców" prowadzi do sytuacji, w której kolejne pokolenia są przeciętnie coraz lepiej dostosowane do warunków środowiska. Jest to zatem proces optymalizacji globalnej o wyjątkowej zbieżności i odporności na zakłócenia.

W porównaniu do innych metod analitycznych i stochastycznych można wskazać następujące cechy metod ewolucyjnych:

- są odporne na lokalne maksima,
- operują na zakodowanej postaci danych,
- przetwarzają populacje rozwiązań, a nie pojedyncze rozwiązania,
- korzystają jedynie z funkcji celu (przystosowania),

- są niedeterministyczne,
- znajdują rozwiązania jedynie przybliżone.

Przeprowadzając optymalizację przyjęto opisane w dalszej kolejności założenia dotyczące związków między poszczególnymi stężeniami pierwiastków stopowych występujących w stali szybko tnącej oraz temperaturą hartowania i odpuszczania, a jej własnościami.

Do zrealizowania zadania optymalizacji składu chemicznego stali szybko tnącej, ze względu na maksymalną twardość oraz odporności na pękanie opracowano własny program komputerowy, w którym wykorzystano algorytm genetyczny z funkcjami twardości oraz odporności na pękanie w postaci modeli sieci neuronowych.

Założenia procedury optymalizacyjnej

Optymalizacji poddano funkcję celu ujmującą twardość stali szybko tnących oraz odporność na pękanie o postaci:

$$Z = a \cdot HRC(x) + b \cdot K_{IC}(x) \quad (11)$$

gdzie: $HRC(x)$ - funkcja twardości (model sieci neuronowej), $K_{IC}(x)$ - funkcja odporności na pękanie (model sieci neuronowej), x_i - wektor parametrów (stężenia masowe pierwiastków stopowych, wartości temperatury austenitowania i odpuszczania), a , b - współczynniki wagi dla każdego ze składników funkcji celu, przyjmują wartości z zakresu $\langle 0;1 \rangle$.

Procedura optymalizacji składu chemicznego wymaga ustalenia granic parametrów optymalizowanej funkcji tj. zakresów stężeń pierwiastków stopowych oraz temperatury austenitowania i odpuszczania. Na podstawie analizy stężeń składów chemicznych stali podanych w tabelach 1-3 przyjęto w algorytmie genetycznym granice optymalizacji zestawiono w tabeli 19, natomiast dodatkowe ograniczenia w tabeli 20. W algorytmie do selekcji przyjęto metodę ruletki. Na rysunku 54 przedstawiono schemat działania algorytmu genetycznego. Widok okien roboczych opracowanego programu komputerowego przedstawiono na rysunkach 55-57.

Tabela 19*Przyjęte w obliczeniach granice optymalizacji*

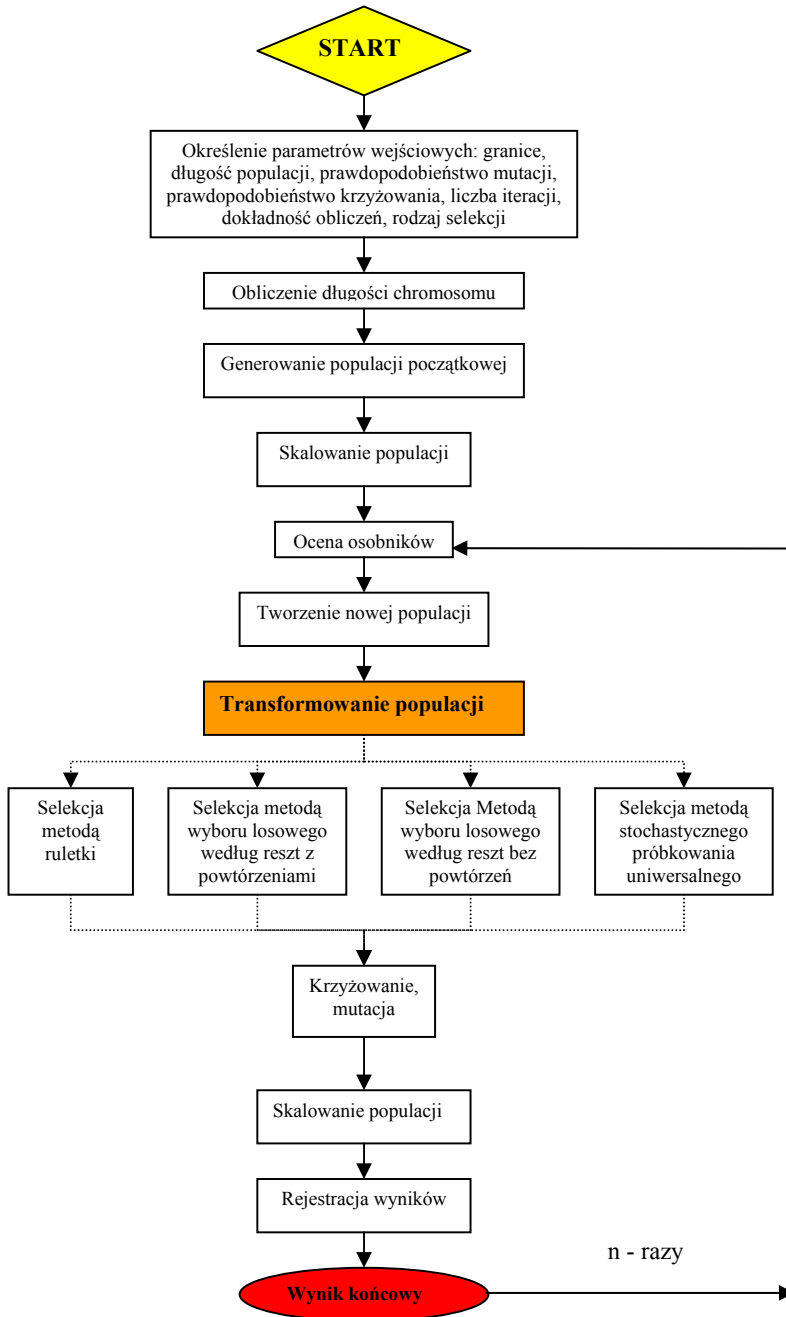
Parametr	C, %	Cr, %	W, %	Mo, %	V, %	Co, %	Ta, °C	To, °C
Wartość minimalna	0,72	3,7	0	0	1	0	1150	500
Wartość maksymalna	1,41	4,7	18	9,5	4,5	11	1280	630

Tabela 20*Przyjęte w obliczeniach ograniczenia procedury optymalizacyjnej*

Ograniczenie	Cr+W+Mo+V+Co	(Cr+W+Mo+V+Co)/C	Mo+V+Co	W+Mo+V
Wartość minimalna	9,3	11,1	1,1	5,3
Wartość maksymalna	31	30,9	18,7	19,2

Parametrami algorytmu definiowanymi przez użytkownika w opracowanym programie są:

- **Liczba pokoleń** – określa ilość powtórzeń działania algorytmu;
- **Wielkość populacji** – liczba osobników
- **Współczynnik krzyżowania** – wartość z zakresu od 0 do 1 (0 oznacza prawdopodobieństwo krzyżowania 0, 1 prawdopodobieństwo 0,2), określa prawdopodobieństwo wyboru odpowiedniej pary osobników do transformowania populacji (wartość domyślna 1);
- **Współczynnik mutacji** – wartość z zakresu od 0 do 1 (0 oznacza prawdopodobieństwo mutacji 0, a 1 prawdopodobieństwo 0,2), określa prawdopodobieństwo wyboru danego osobnika do operacji mutacji (wartość domyślna 0,5);
- **Liczba iteracji** – określa ilość powtórzeń działania algorytmu;
- **Dokładność obliczeń** – określa precyzję przeszukiwania środowiska.
- **Wagi a i b** – określające wagę przypisaną do każdego ze składników funkcji celu



Rys. 54. Schemat działania algorytmu genetycznego z uwzględnieniem czterech metod selekcji

6. Projektowanie składu chemicznego stali szybkotnących ...

	min.	max.
C	0,72	1,41
Cr	3,70	4,70
W	0,00	18,0
Mo	0,00	9,50
V	1,00	4,50
Co	0,00	11,0
Ta	1150	1280
To	500	630
	0	0

Rys. 55. Okno edycji granic procedury optymalizacyjnej

Liczba pokoleń	100
Wielkość populacji	50
Wsp. krzyżowania	1
Wsp. mutacji	0,5
Dokładność liczby	8
Liczba najlepszych	2
Waga HRC	1
Waga Klc	1

Rys. 56. Okno parametrów algorytmu optymalizacyjnego

Pokolenie	C	Cr	W	Mo	V	Co	Ta	To	F_przyst	F_popul	HRC	Klc
0	1,171	4,055	0,759	0,105	2,002	10,021	1176,616	516,407	90,329	78,899	69,195	21,134
1	1,169	4,555	0,706	0,075	2,002	10,008	1176,51	516,314	93,141	79,037	69,447	23,694
2	1,166	4,049	0,635	0,075	2,002	10,008	1176	515,804	90,566	79,07	69,188	21,377
3	1,166	4,547	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	515,294	93,289	79,192	69,446	23,843
4	1,166	4,041	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	514,784	90,77	79,17	69,206	21,565
5	1,166	4,539	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	514,275	93,362	79,235	69,443	23,919
6	1,166	4,033	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	513,765	90,938	79,146	69,206	21,732
7	1,166	4,531	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	513,255	93,437	79,352	69,437	24
8	1,166	4,025	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	512,745	91,112	79,32	69,205	21,907
9	1,166	4,524	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	512,745	93,453	79,443	69,432	24,02
10	1,166	4,018	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	512,745	91,092	79,401	69,202	21,891
11	1,166	4,516	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	512,745	93,408	79,371	69,429	23,978
12	1,166	4,01	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	512,745	91,073	79,221	69,198	21,875
13	1,166	4,508	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	512,745	93,363	79,383	69,426	23,936
14	1,166	4,002	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	512,745	91,055	79,033	69,194	21,861
15	1,166	4,5	0,565	0,075	2,002	10,008	1176	512,745	93,318	79,08	69,423	23,895

Rys. 57. Okno główne programu z wynikami optymalizacji

Działanie algorytmu optymalizacji polega na takim dobraniu stężeń pierwiastków stopowych oraz temperatury hartowania i odpuszczania, aby uzyskać skład chemiczny stali o możliwe najwyższej twardości i największej odporności na pękanie, zachowując proporcje dla tych własności ustalone przez wagi dla każdej z nich (równanie 11). Jako ilustrację badań z wykorzystaniem opracowanego programu przedstawiono wybrane przykłady wyników optymalizacji składu chemicznego, przeprowadzone dla różnych parametrów algorytmu genetycznego oraz dla różnych ograniczeń nałożonych na przestrzeń poszukiwań optymalnego składu chemicznego.

Przyjęto następujące założenia dla kolejnych przykładów:

Przykład 1

Pełny zakres stężeń pierwiastków (wyjątek stanowią wolfram i molibden, dla których przyjęto wyższą minimalną dolną granicę stężeń – 2%, gdyż zerowe stężenia tych pierwiastków występują jedynie dla dwóch gatunków stali, co może być uznane za niereprezentatywne) oraz pełny zakres temperatury austenitowania i odpuszczania. Wagi dla twardości i odporności na pękanie równe 1.

Przykład 2

Ograniczenia jak w **przykładzie 1**. Ograniczono zakres temperatury austenitowania do 1190-1240 °C, jako zwykle gwarantującej maksymalną twardość.

Przykład 3

Ograniczenia jak w **przykładzie 2**. Ograniczono zakres temperatury odpuszczania do 520-590 °C.

Przykład 4

Przyjęto jako istotniejszą odporność na pękanie. Ograniczenia jak w **przykładzie 3**. Waga dla twardości 0,95, a dla odporności na pękanie równa 1.

Przykład 5

Przyjęto jako istotniejszą twardość. Ograniczenia jak w **przykładzie 3**. Waga dla twardości 1, a dla odporności na pękanie równa 0,95.

Przykład 6

Ograniczenia jak w **przykładzie 3**. Wylimitowano ze składu chemicznego stali kobalt.

Przykład 1**Parametry algorytmu**

Liczba pokoleń	100	Precyzja kodowania	8 bitów
Liczba osobników	50	Waga HRC	1
Współczynnik krzyżowania	1	Waga K_{Ic}	1
Współczynnik mutacji	0,5	Liczba najlepszych	2

Granice optymalizacji

Parametr	C, %	Cr, %	W, %	Mo, %	V, %	Co, %	Ta, °C	To, °C
Wartość minimalna	0,72	3,7	2	2	1	0	1150	500
Wartość maksymalna	1,41	4,7	18	9,5	4,5	11	1280	630

Wyniki obliczeń

Osobnik	C	Cr	W	Mo	V	Co	Ta	To	Fb	Fp	HRC	K_{Ic}
1	1,22	4,67	10,53	2,12	1,98	1,12	1253	512	84,3	81,5	66,4	17,9
2	1,16	4,65	2,13	4,24	1,06	10,01	1254	589	86,9	80,3	68,5	18,5
3	0,99	4,59	3,51	2,24	1,00	7,72	1264	533	87,5	82,7	68,8	18,6
4	1,18	4,61	2,13	3,35	1,37	3,62	1253	585	86,0	78,2	67,0	19,0
5	1,34	4,68	9,03	3,62	1,00	0,69	1267	501	85,3	79,5	67,1	18,1

Przykład 2**Parametry algorytmu**

Liczba pokoleń	100	Precyzja kodowania	8 bitów
Liczba osobników	50	Waga HRC	1
Współczynnik krzyżowania	1	Waga K_{Ic}	1
Współczynnik mutacji	0,5	Liczba najlepszych	2

Granice optymalizacji

Parametr	C, %	Cr, %	W, %	Mo, %	V, %	Co, %	Ta, °C	To, °C
Wartość minimalna	0,72	3,7	2	2	1	0	1190	500
Wartość maksymalna	1,41	4,7	18	9,5	4,5	11	1240	630

Wyniki obliczeń

Osobnik	C	Cr	W	Mo	V	Co	Ta	To	Fb	Fp	HRC	K_{Ic}
1	1,05	4,31	2,00	3,24	2,24	10,53	1219	552	83,5	75,1	68,3	15,2
2	0,85	4,66	4,89	2,35	2,00	6,17	1220	598	86,5	79,3	63,4	23,1
3	0,89	4,61	2,38	4,44	1,00	2,24	1215	591	87,5	82,1	64,5	22,9
4	1,06	4,63	2,82	4,00	1,93	0,00	1190	604	89,3	83,4	61,9	27,4
5	1,20	4,63	9,03	2,00	1,88	4,75	1235	509	85,5	81,2	66,5	19,1

Przykład 3

Parametry algorytmu

Liczba pokoleń	100	Precyzja kodowania	8 bitów
Liczba osobników	50	Waga HRC	1
Współczynnik krzyżowania	1	Waga K_{lc}	1
Współczynnik mutacji	0,5	Liczba najlepszych	2

Granice optymalizacji

Parametr	C, %	Cr, %	W, %	Mo, %	V, %	Co, %	Ta, °C	To, °C
Wartość minimalna	0,72	3,7	2	2	1	0	1190	520
Wartość maksymalna	1,41	4,7	18	9,5	4,5	11	1240	590

Wyniki obliczeń

Osobnik	C	Cr	W	Mo	V	Co	Ta	To	Fb	Fp	HRC	K_{lc}
1	0,83	4,41	4,01	2,24	1,98	0,04	1218	572	84,6	78,5	63,6	21,0
2	0,82	4,62	4,01	3,88	1,36	8,50	1197	584	86,1	83,7	65,4	20,7
3	1,22	4,62	4,76	2,00	2,22	2,50	1210	590	85,6	80,2	64,2	21,4
4	1,08	4,64	3,26	3,85	1,60	9,97	1229	545	84,8	79,9	69,8	15,0
5	1,01	4,62	5,01	4,00	1,36	0,17	1191	586	87,2	83,4	64,4	22,8

Przykład 4

Parametry algorytmu

Liczba pokoleń	100	Precyzja kodowania	8 bitów
Liczba osobników	50	Waga HRC	0,95
Współczynnik krzyżowania	1	Waga K_{lc}	1
Współczynnik mutacji	0,5	Liczba najlepszych	2

Granice optymalizacji

Parametr	C, %	Cr, %	W, %	Mo, %	V, %	Co, %	Ta, °C	To, °C
Wartość minimalna	0,72	3,7	2	2	1	0	1190	520
Wartość maksymalna	1,41	4,7	18	9,5	4,5	11	1240	590

Wyniki obliczeń

Osobnik	C	Cr	W	Mo	V	Co	Ta	To	Fb	Fp	HRC	K_{lc}
1	0,86	4,20	3,00	2,71	1,17	10,53	1215	572	82,1	74,3	67,1	18,3
2	0,98	4,40	5,51	2,44	1,12	6,51	1212	520	80,9	74,3	67,2	17,0
3	1,09	4,68	3,95	2,00	2,25	0,04	1205	584	84,7	83,2	64,0	23,9
4	0,83	4,45	4,01	3,35	1,62	1,81	1226	578	81,4	80,3	64,4	20,2
5	1,16	4,61	5,77	2,35	2,22	0,00	1235	577	80,8	75,7	65,9	18,2

Przykład 5**Parametry algorytmu**

Liczba pokoleń	100	Precyzja kodowania	8 bitów
Liczba osobników	50	Waga HRC	1
Współczynnik krzyżowania	1	Waga K_{lc}	0,95
Współczynnik mutacji	0,5	Liczba najlepszych	2

Granice optymalizacji

Parametr	C, %	Cr, %	W, %	Mo, %	V, %	Co, %	Ta, °C	To, °C
Wartość minimalna	0,72	3,7	2	2	1	0	1190	520
Wartość maksymalna	1,41	4,7	18	9,5	4,5	11	1240	590

Wyniki obliczeń

Osobnik	C	Cr	W	Mo	V	Co	Ta	To	Fb	Fp	HRC	K_{lc}
1	0,80	4,65	2,00	2,74	3,13	9,02	1196	577	83,6	79,3	63,9	20,7
2	1,13	4,45	3,51	2,00	1,49	6,73	1233	580	84,3	77,5	66,5	18,8
3	1,16	4,45	5,89	4,15	1,74	10,44	1227	542	82,1	76,1	69,8	13,0
4	1,20	4,59	6,02	3,88	1,44	10,40	1219	558	82,9	77,0	69,7	13,9
5	0,82	4,67	11,54	2,35	1,12	0,69	1193	586	85,3	83,0	63,6	22,9

Przykład 6**Parametry algorytmu**

Liczba pokoleń	100	Precyzja kodowania	8 bitów
Liczba osobników	50	Waga HRC	1
Współczynnik krzyżowania	1	Waga K_{lc}	1
Współczynnik mutacji	0,5	Liczba najlepszych	2

Granice optymalizacji

Parametr	C, %	Cr, %	W, %	Mo, %	V, %	Co, %	Ta, °C	To, °C
Wartość minimalna	0,72	3,7	2	2	1	0	1190	520
Wartość maksymalna	1,41	4,7	18	9,5	4,5	0	1240	590

Wyniki obliczeń

Osobnik	C	Cr	W	Mo	V	Co	Ta	To	Fb	Fp	HRC	K_{lc}
1	0,80	4,66	7,27	2,00	1,62	0,00	1235	577	85,5	82,7	64,4	21,1
2	0,95	4,61	7,27	4,00	1,74	0,00	1204	571	83,4	78,6	65,4	18,1
3	1,06	4,38	2,38	2,24	3,00	0,00	1230	572	82,7	77,6	64,2	18,5
4	0,76	4,45	4,95	2,35	2,00	0,00	1199	560	83,9	78,4	63,0	20,9
5	0,82	4,45	3,51	3,00	1,49	0,00	1203	584	87,4	79,7	63,1	24,3