

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Názov projektu

Optimalizácia výroby zaříru pre mikro- a nanoelektroniku

Druh projektu

Projekt aplikovaného výskumu (§ 2 ods. 3 zákona č. 172/2005)

Evidenčné číslo projektu

2015-19119/46015:1-15E0

Logo riešiteľa



Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Riešiteľ

CEIT, a.s., Univerzitná 8661/6A, 010 08 Žilina, ceit@ceitgroup.eu

Spoluriešiteľ

Južná federálna univerzita, Inštitút nanotechnológií, elektroniky a konštruovania zariadení, Rostov na Done,
Ruská federácia

Doba riešenia

1.1.2016 - 31.12.2018

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Zodpovedný riešiteľ projektu

Ing. Peter Mačuš PhD.

Hlavný cieľ projektu

Vytvorenie expertného systému tvorby optimálnych technologických riešení pre procesy pestovania veľkorozmerných zafírových monokryštálov vysokej kvality pre mikro- a nanoelektroniku.

Čiastkové ciele projektu

- Vytvorenie matematického modelu procesu kryštalizácie zafíru a jeho korekcia na základe experimentálne získaných dát, vypracovanie popisu hydrodynamických prúdení v tavenine a ich závislosti od konfigurácie teplotného poľa.
- Vytvorenie algoritmov a softvéru pre optimalizáciu výroby zafíru pre mikro- a nanoelektroniku pomocou prístupov stratégie Industry 4.0.
- Vytvorenie databázy parametrov procesu pestovania monokryštálov zafíru s využitím pokročilého monitorovacieho systému.

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Plánované výstupy projektu

1. Matematický model procesu kryštalizácie zafíru, vrátane opisu hydrodynamických prúdení v tavenine a ich závislosť na konfigurácii teplotného poľa vytvoreného systémom s nezávislým riadením ohrievacích telies.
2. Riadiaci algoritmus procesu kryštalizácie zafíru na základe dát z obrazových snímok kryštalizačného frontu pre jeho použitie v hromadnej výrobe pre pestovanie monokryštálov zafíru.
3. Rozšírenie možností systému zberu a spracovania technologických informácií procesu a tiež expertného systému za účelom zvýšenia efektívnosti spôsobov riadenia a automatizácie procesu priemyselnej výroby vysokokvalitných produktov zo zafíru.

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Etapy riešenia

Č. aktivity	Názov aktivity	Doba realizácie	Zodpovedný
1.1	Realizácia procesov pestovania monokryštálov zaфіру s reguláciou teplotného poľa systémom, ktorý sa skladá z ohrievačov s nezávislým riadením	01.01.2016 - 31.12.2016	CEIT
1.2	Vývoj matematických modelov procesov rastu monokryštálov zaфіру	01.01.2016 - 31.12.2016	JFU
1.3	Vývoj riadiaceho algoritmu v procese kryštalizácie zaфіру v rastových zariadeniach novej generácie. Vývoj expertného systému pre pestovanie monokryštálov zaфіру	01.01.2017 - 31.12.2017	JFU

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Etapy riešenia

Č. aktivity	Názov aktivity	Doba realizácie	Zodpovedný
2.1	Vývoj riadiacich algoritmov pre proces pestovania monokryštálov zafíru, na základe dát získaných z pyrometrie a videozáberov z kryštalizačného frontu	01.01.2017 - 31.12.2017	CEIT
2.2	Rozšírenie možností expertného systému prijímania optimálnych technologických rozhodnutí pre procesy pestovania veľkorozmerných monokryštálov zafíru. Vývoj programového zabezpečenia pre výrobu výrobkov z kryštálov zafíru	01.01.2018 - 31.12.2018	JFU
2.3	Vývoj softvéru pre priemyselné riadenie procesu pestovania monokryštálov zafíru pre mikro- a nanoelektroniku	01.01.2018 - 31.12.2018	CEIT
3.1	Štúdium kvality kryštálov, popis dosiahnutých parametrov a korelácia s priebehom kryštalizácie	01.01.2018 - 31.12.2018	CEIT
3.2	Monitorovanie parametrov procesu rastu monokryštálov	01.01.2018 - 31.12.2018	CEIT
3.3	Tvorba databázy experimentálnych údajov	01.01.2018 - 31.12.2018	CEIT

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Rozpočet projektu – slovenská strana

Položka	2016	2017	2018	Spolu
Oprávnené náklady na projekt	100 000,00	100 000,00	100 000,00	300 000,00
Výška dotácie spolu	100 000,00	100 000,00	100 000,00	300 000,00
Spolufinancovanie	0,00	0,00	0,00	0,00

Financovanie riešenia pre spoluriešiteľa zabezpečuje ruská strana.

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Činnosti v roku 2017

V sledovanom období od 1.1.2017 do 31.12.2017 bola v zmysle zmluvy o poskytnutí stimulov predmetom riešenia projektu etapa č. 2.1 s názvom: „Vývoj riadiacich algoritmov pre proces pestovania monokryštálov zaříru, na základe dát získaných z pyrometrie a videozáberov z kryštalizačného frontu“.

Predmetom riešenia etapy bolo overiť správnosť predpokladov a výstupov predchádzajúcich etáp počas reálnych rastových procesov a na základe získaných poznatkov aplikovať zmeny v konštrukcii testovacieho zariadenia alebo v technologickom procese.

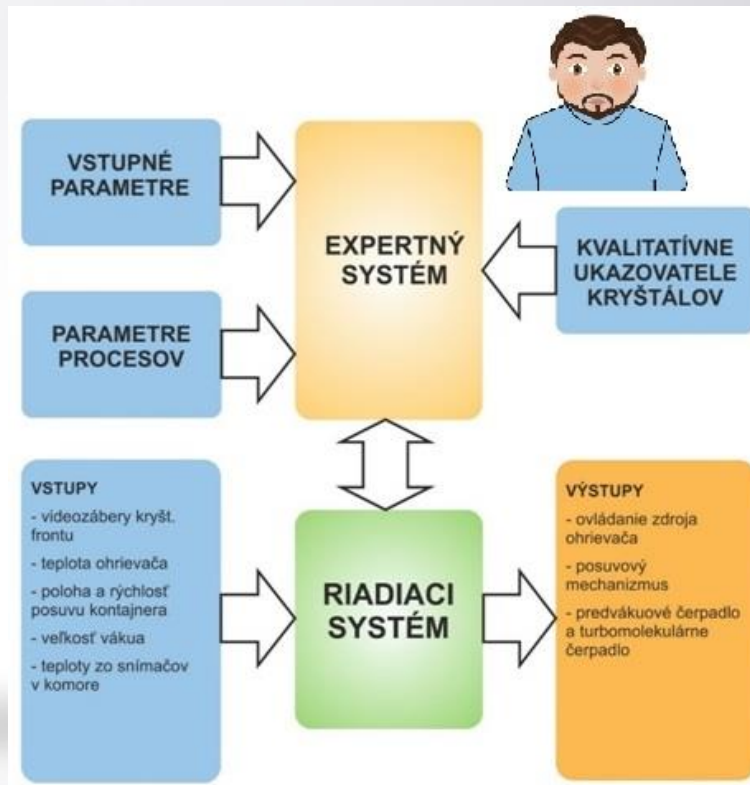
Cieľom bolo získať popis vzájomných vzťahov rôznych parametrov režimu kryštalizácie pri rôznych scenároch kryštalizácie a postkryštalizačných procesov a dáta sústredené do databázy pre tvorbu expertného systému.

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Návrh algoritmov riadenia pre rôzne scenáre kryštalizácie

Úspešné riešenie problému vývoja účinných algoritmov riadenia pre rast zařírových kryštálov metódou HDC závisí v podstate od toho, do akej miery sa berú do úvahy fyzikálne a chemické javy vyskytujúce sa v tepelnom uzle.

Naše štúdie preukázali, že použitie pomerne jednoduchého algoritmu, ako je stabilizácia priemernej teploty ohrievača, umožňuje automatizovať proces rastu kryštálov vo väčšom rozsahu a efektívnejšie ako externe dodávané hodnoty požadovaného výkonu.



Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Definovanie parametrov pre pokročilé riadenie procesu s využitím expertného systému

1. Vstupné parametre

P.č.	Názov - popis	Hodnota	M. j.
1.1	Názov a číslo procesu	text 20 znakov	-
1.2	Termín realizácie	dd.mm.yyyy- dd.mm.yyyy	-
Požadované rozmery pravouhého polotovaru			
1.3	dĺžka	celé číslo, > 0	mm
1.4	šírka	celé číslo, > 0	mm
1.5	výška	celé číslo, > 0	mm
Projektované rozmery kryštálu			
1.6	dĺžka	celé číslo, > 0	mm
1.7	šírka	celé číslo, > 0	mm
1.8	výška	celé číslo, > 0	mm
Veľkosť kryštalizačného kontajnera			
1.9	celková dĺžka	celé číslo, > 0	mm
1.10	šírka	celé číslo, > 0	mm
1.11	výška	celé číslo, > 0	mm
1.12	uhol nosa lodičky	celé číslo, > 0	stupeň
Surovina-obsah frakcií			
1.13	zhrtené ingoty, hustota $\geq 3,97 \text{ g/cm}^3$	0-100	hmot. %
1.14	lisované tablety, hustota $\geq 3,5 \text{ g/cm}^3$	0-100	hmot. %
1.15	crackle, častice 5-10 mm, hustota $\geq 2,5 \text{ g/cm}^3$	0-100	hmot. %
1.16	crackle, častice 1-5 mm, hustota $\geq 2,5 \text{ g/cm}^3$	0-100	hmot. %
1.17	prášok, častice < 1 mm, hustota $\geq 1 \text{ g/cm}^3$	0-100	hmot. %
Teplný uzol			
1.18	Konstruktívne vyhotovenie tep. uzla – verzia č. 1, 2, 3 X	celé číslo, > 0	-
<i>Rezerva min. 10 parametrov</i>			

2. Parametre procesu

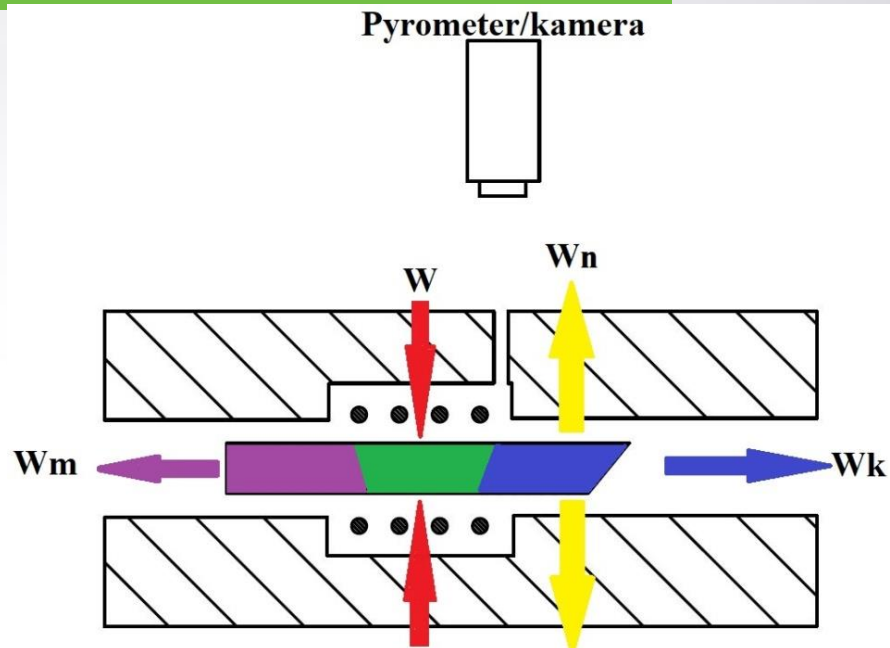
P.č.	Názov - popis	Hodnota	M. j.
Pretavenie			
2.1	Realizácia procesu pretavenia suroviny áno-nie	0,1	-
2.2	Rýchlosť posuvu počas pretavenia	celé číslo, > 0	mm/hod
2.3	Smer posuvu lodičky spredu dozadu áno-nie	0,1	-
2.4	Celkový priemerný výkon ohrievačov počas fázy pretavenia	0,00; > 0	kW
2.5	Priemerná hodnota vakuua počas fázy pretavenia	10-4 + 10-6	mbar
Kryštalizácia			
Proces samotnej kryštalizácie bude rozdelený na 5 časových úsekov, pričom pre každý úsek budú zaznamenané parametre:			
2.6	Rýchlosť posuvu min.	celé číslo, > 0	mm/hod
2.7	Rýchlosť posuvu max.	celé číslo, > 0	mm/hod
2.8	Výkon horného ohrievača min.	0,00; > 0	kW
2.9	Výkon horného ohrievača max.	0,00; > 0	kW
2.10	Výkon dolného ohrievača min.	0,00; > 0	kW
2.11	Výkon dolného ohrievača max.	0,00; > 0	kW
2.12	Priemerná hodnota vakuua	10-4 + 10-6	mbar
2.13	Teplota konštrukcie tepelného uzla T1	celé číslo, > 0	oC
2.14	Teplota konštrukcie tepelného uzla T2	celé číslo, > 0	oC
2.15	Teplota konštrukcie tepelného uzla T3	celé číslo, > 0	oC
2.16	Teplota konštrukcie tepelného uzla T4	celé číslo, > 0	oC
Rezerva min. 10 parametrov			

3. Kvalitatívne ukazovatele kryštálu

P.č.	Názov - popis	Hodnota	M. j.
<i>Telo kryštálu bude pri pohľade zhora rozdelené mriežkou na 5 dielov v priehornom smere, 8 dielov v pozdižnom smere a 3 diely vo vertikálnom smere. V každom vzniknutom poli budú vyhodnocované nasledovné parametre:</i>			
3.1	Inklúzia áno-nie	0,1	-
3.2	Blok áno-nie	0,1	-
3.3	Dvojča áno-nie	0,1	-
3.4	Skizová stopa áno-nie	0,1	-
3.5	Bublina < 10 μm áno-nie	0,1	-
3.6	Bublina $\geq 10 \wedge < 20 \mu\text{m}$ áno-nie	0,1	-
3.7	Bublina $\geq 20 \wedge < 50 \mu\text{m}$ áno-nie	0,1	-
3.8	Bublina $\geq 50 \wedge < 200 \mu\text{m}$ áno-nie	0,1	-
3.9	Bublina $\geq 200 \wedge < 500 \mu\text{m}$ áno-nie	0,1	-
3.10	Bublina $\geq 500 \mu\text{m}$ áno-nie	0,1	-
3.11	Klastre bublín 1 s veľkosťou < 200 μm áno-nie	0,1	-
3.12	Klastre bublín 2 s veľkosťou $\geq 200 \wedge < 500 \mu\text{m}$ áno-nie	0,1	-
3.13	Vzdialenosť bublín < 10 mm áno-nie	0,1	-
3.14	Vzdialenosť bublín < 2 mm áno-nie	0,1	-
3.15	Vzdialenosť klastrov 1 < 10 mm	0,1	-
3.16	Vzdialenosť klastrov 2 < 5 mm áno-nie	0,1	-
3.17	Nízko-uhľová hranica	0,1	-
3.18	Prítomnosť zvyškových napätí áno-nie	0,1	-
3.19	Napätový lom áno-nie	0,1	-
3.20	Rozdiel výšky kryštálu a požadovanej výšky $\geq -2 \wedge \leq 2 \text{ mm}$ áno-nie	0,1	-
3.21	Rozdiel výšky kryštálu a požadovanej výšky $> 2 \wedge < 5 \text{ mm}$ áno-nie	0,1	-
3.22	Rozdiel výšky kryštálu a požadovanej výšky $\geq 5 \wedge < 10 \text{ mm}$ áno-nie	0,1	-
3.23	Rozdiel výšky kryštálu a požadovanej výšky $\geq 10 \text{ mm}$ áno-nie	0,1	-
3.24	Rozdiel výšky kryštálu a požadovanej výšky < -2 \wedge > -5 mm áno-nie	0,1	-
3.25	Rozdiel výšky kryštálu a požadovanej výšky $\leq -5 \wedge > -10 \text{ mm}$ áno-nie	0,1	-
3.26	Rozdiel výšky kryštálu a požadovanej výšky $\leq 10 \text{ mm}$ áno-nie	0,1	-
<i>Rezerva min. 10 parametrov</i>			

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

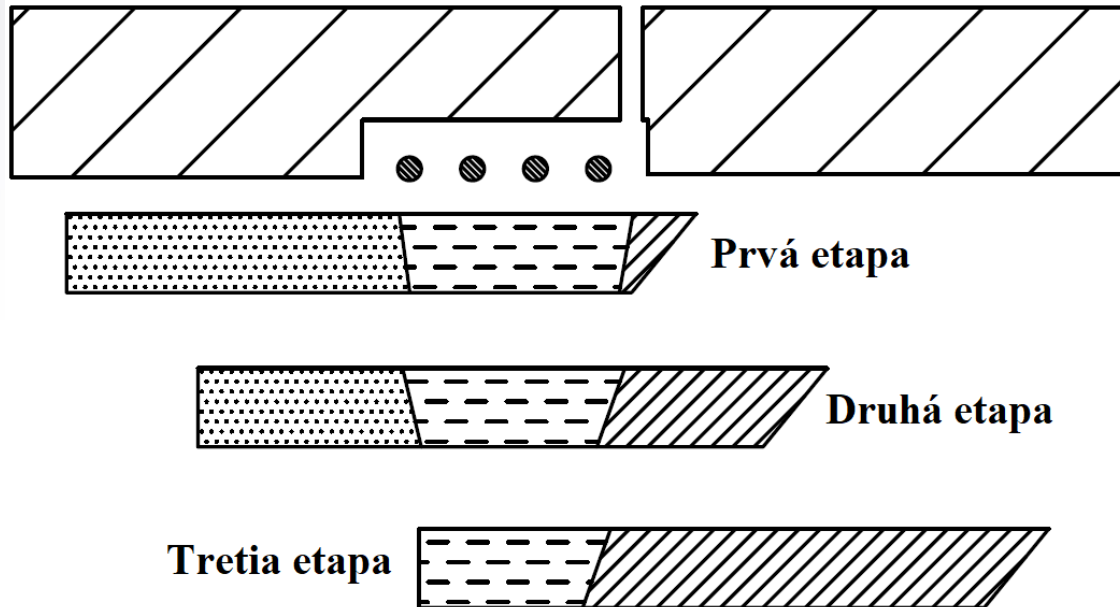
Hlavný faktor procesu kryštalizácie –
pomer (rovnováha) tepelných prúdení
určujúcich rast kryštálov metódou HDS



$$\frac{d}{dt} (c_p * m_p * T_p) = W(t) - W_k(t) - W_m(t) - W_n(t) - W_l(t)$$

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Zmena hodnôt prúdení tepla
v rôznych štádiách kryštalizácie



Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Zmena hodnôt prúdení tepla
v rôznych štádiách kryštalizácie

$$W_k = k_k * \frac{\partial T_k}{\partial x} * S_k + \frac{4 * \sigma}{3 * \beta} * \epsilon * T_m^3 * \frac{\partial T_k}{\partial x} * S_k$$

$$W_m(t) = k_m * (T_p - T_m) * S_m$$

$$W_v(t) = \lambda_k - \frac{\partial T_k}{\partial x} * S_k$$

$$W_n(t) = k_n * (T_{n0} - T_n) * S_n$$

$$\frac{d}{dt} (c_p * m_p * T_p) = c_p * m_p * \frac{dT_p}{dt} + c_p * T_p * \frac{dm_p}{dt}$$

$$W(t) = c_p * T_p * \frac{dm_p}{dt} + W_k(t) - W_m(t) - W_n(t) - W_l(t)$$

Podmienka určujúca konštantnú rýchlosť rastu kryštálu,
kryštalizačný front zostáva v rovnakej polohe
vzhľadom k ohrievaču.

$$\frac{dT_p}{dt} = 0$$

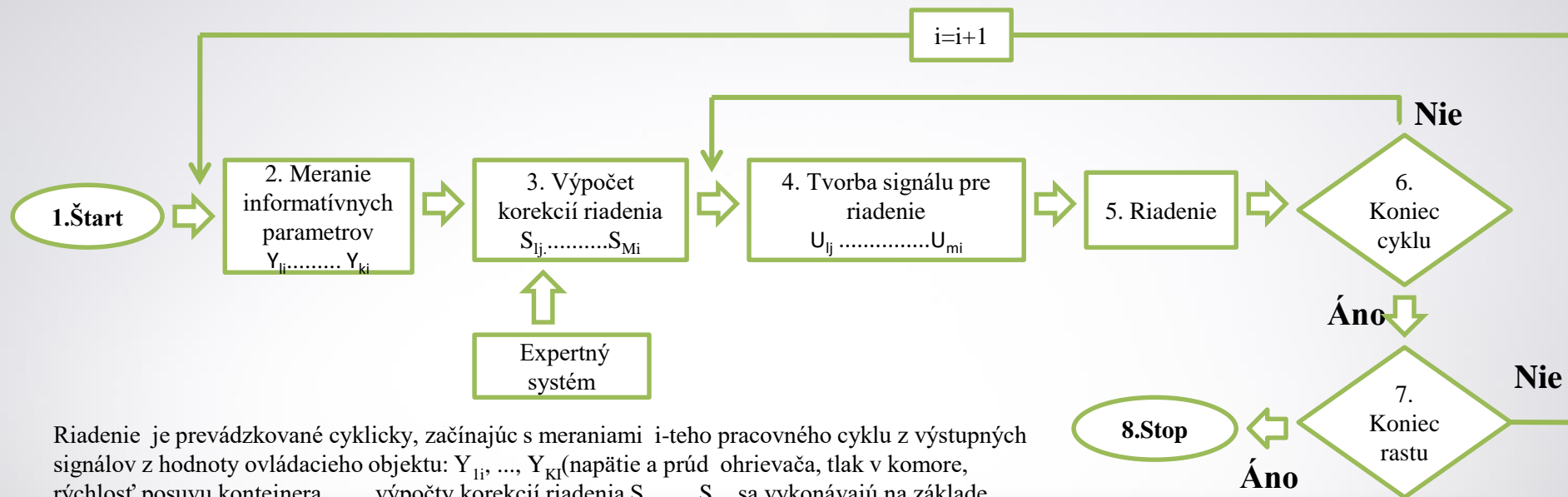
Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Výpočet programu pre zmenu výkonu
ohrievača, poskytujúceho podmienku
stabilnej rýchlosti rastu

$$\begin{aligned}
 W(t) = & c_p * T_p \frac{dm_p}{dt} + k_k * \frac{\partial T_k}{\partial X} * S_k + \frac{4 * \sigma}{3 * \beta} * \epsilon * T_m^3 * \frac{\partial T_k}{\partial X} * S + k_m \\
 & * (T_p - T_m) * S + k_n * (T_{n0} - T_m) * S_n - W_l
 \end{aligned}$$

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Algoritmus riadenia technologického procesu rastu kryštálu metódou HDS



Riadenie je prevádzkované cyklicky, začínajúc s meraniami i -teho pracovného cyklu z výstupných signálov z hodnoty ovládacieho objektu: Y_{1i}, \dots, Y_{ki} (napätie a prúd ohrievača, tlak v komore, rýchlosť posuvu kontajnera výpočty korekcií riadenia S_{1i}, \dots, S_{Mi} sa vykonávajú na základe údajov získaných od expertného systému. V súlade s korigovanými hodnotami S_{1i}, \dots, S_{Mi} sa vytvárajú riadiace činnosti na výstupných parametroch riadiaceho objektu: U_{1i}, \dots, U_{mi} .

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Zhodnotenie činností za rok 2017

Časový harmonogram riešenia pre rok 2017 je splnený. Počas experimentálnych procesov rastu s využitím obrazových záznamov kryštalizačného frontu boli získané dáta o procese, ako podklad pre hľadanie a definovanie riadiacich algoritmov.

Po spracovaní a analýze dát boli navrhnuté riadiace algoritmy a štruktúra riadiaceho systému využívajúca expertný systém. Pre tvorbu expertného systému bola navrhnutá štruktúra dátových vstupov do databázy.

Počas experimentálnych rastov boli vykonávané konštrukčné úpravy a údržba kryštalizačného zariadenia, najmä výmena opotrebovaných dielov. Ďalej bol rozširovaný matematický model kryštalizačného zariadenia za účelom spresňovania simulácií.

Projekt rusko-slovenskej vedecko-technickej spolupráce

Popis činností na rok 2018

V nasledujúcom období bude prebiehať vývoj a optimalizácia softvéru pre riadenie rastového procesu a tvorba databázy experimentálnych údajov.

Dosiahnuté výsledky riešenia etapy č. 2.1 vytvorili predpoklady pre dosiahnutie ďalších plánovaných výstupov.