

Razvlaknjenje taline kamene volne na disku centrifuge

Brane ŠIROK, Benjamin BIZJAN, Robert AGNIČ, Tom BAJCAR

Izvleček: Prispevek opisuje tvorjenje mineralnih vlaken na kolesih centrifuge v realnem proizvodnem procesu kamene volne. Predstavljeni rezultati navajajo na prisotnost nestabilnosti taline, ki se oblikuje kot kompleksno kvaziperiodično osciliranje struktur na površini filma. Poleg oscilacije taline, ki sovpada z vrtilno frekvenco kolesa in višjimi harmoniki, so zaznane tudi aperiodične strukture taline kot posledica Taylorjeve nestabilnosti, ki je lastna gibanju kapljevine in je ena od osnovnih mehanizmov tvorjenja ligamentov taline, iz katerih se oblikujejo vlakna kamene volne. Dobljeni rezultati navajajo na značilen vpliv dinamike filma taline na nastajanje vlaken in posredno na kvaliteto končnega proizvoda.

Ključne besede: kamena volna, centrifuga, razvlaknjenje taline, Taylorjeva nestabilnost, nihanja struktur

■ 1 Uvod

Kamena volna je splošni izraz za različne tipe anorganskih izolacijskih materialov. Delijo se na različne tipe surovin, kot so kamena, steklena in keramična volna. Pri kameni volni se kot surovina najpogosteje uporabljajo bazalt, diabaz, dolomit, granit... Vlakna tvorijo homogeno anizotropno strukturo, ki ima odlične zvočno- in toplotno-izolacijske lastnosti.

Med najpogostejše proizvodne procese kamene volne se uvršča postopek razvlaknjenja mineralne taline na hitro vrtečih diskah centrifuge [1]. Mineralna talina pri temperaturi cca 1450 °C izstopa iz kupolne peči skozi sifon v dovodne kanale nad prvim kolesom centrifuge. Iz rotirajočega filma taline se preko kapljevityh ligamentov na površini filma oblikujejo

vlakna, ki jih zračni tok odpiha transportira v usedalno komoro, kjer se oblikuje homogena primarna plast kamene volne.

Osnovne mehanizme nastajanja ligamentov iz rotirajočega filma taline je podal že Eisenklam [2]. Na nastanek in gibanje vlaken odločujoče vplivajo vztrajnostne in viskozne sile ter sile površinske napetosti. Solidifikacija vlaken pa je značilno odvisna tudi od termodinamskih karakteristik taline in karakteristik zračnega toka odpiha, v katerem vlakna nastajajo [3]. Za praktično aplikacijo napovedi debeline vlaken so bili razviti statistični multiregresijski modeli [4], ki so bili usmerjeni predvsem v oblikovanje fenomenoloških modelov vplivov procesnih parametrov, kot so: geometrijski, kinematični parametri koles centrifuge, aerodinamske lastnosti odpiha, masni pretok taline ter snovne lastnosti taline, kot so gostota, viskoznost in površinska napetost. Izvedene so bile tudi raziskave toka taline v obliki prosto padajočega curka s ciljem vrednotenja časovnih fluktuacij masnega toka taline [5], ki navajajo na dejstvo, da je masni tok taline nestacionaren in da so značilne frekvence fluktuacij toka taline v padajočem curku taline mnogo manjše od vrtilne frekvence rotorja centrifuge.

V prispevku je raziskan vpliv vrtilne frekvence kolesa centrifuge na dinamične lastnosti toka taline in vlaken v opazovanem polju eksperimenta. Razumevanje tokovnih razmer v filmu taline na rotirajočem disku centrifuge temelji na primerjavi tipičnih razdalj med zarodnimi mesti ligamentov, ki so določene z računalniško podprto vizualizacijo in primerjavo s poznanimi fenomenološkimi modeli razvlaknjenja [6].

■ 2 Proces razvlaknjenja kamene volne

Zaradi omejenih eksperimentalnih možnosti so poznani modeli nastajanja vlaken in njihove rasti zasnovani predvsem na teoretičnih predpostavkah in v manjši meri na eksperimentalno dobljenih podatkih. Poenostavljen teoretični model je v svojem delu podal Eisenklam [2], pri čemer začetno fazo razvlaknjenja pojasnjuje kot posledico nestabilnosti, ki se pojavijo na površini taline mineralne volne na vrtečih se kolesih centrifuge. Pri tem curek taline nateka navpično na vrteče se kolo centrifuge, kjer se zaradi viskoznih sil v točki dotika curka taline z rotirajočim kolesom talina pospeši. Tok taline preide v rotacijsko gibanje v tankem filmu na rotirajočem kolesu. Na obodu kolesa se oblikuje plast

Prof. dr. Brane Širok, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
Benjamin Bizjan, univ. dipl. inž., Robert Agnič, univ. dipl. inž., KNAUF INSULATION, d. o. o., Škofja Loka
dr. Tom Bajcar, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

oziroma film taline, na površini tega pa prihaja do več vrst nestabilnih tokovnih struktur. Kot posledica zdrsa na mejni površini med talino in zrakom se pojavi Kelvin-Helmholtzeva nestabilnost, ki skupaj z ostalimi pojavi (npr. nestacionarnim tokom taline, mehanskimi vibracijami kolesa centrifuge, pulzirajočim zračnim tokom odpiha, ...) povzroči motnje na površini filma taline. Glavni vir nestabilnosti pa je Rayleigh-Taylorjeva nestabilnost, ki povzroča formiranje ligamentov iz filma taline, v nadaljevanju poimenovan kot razvoj vlaknaste strukture. Nastajanje ligamentov povzroča centrifugalna sila na mejni plasti med fluidoma različnih gostot. Pojav nestabilnosti določa pogoj, $\sigma^2 > 0$, kjer je:

$$\sigma^2 = \left[\omega^2 R - \frac{k^2 \gamma}{\rho} \right] \cdot k \cdot \tanh(kh) \quad (1)$$

R polmer kolesa centrifuge

ω kotna hitrost kolesa

k valovno število

h debelina filma taline v radialni smeri

ρ gostota kapljevine (taline)

γ površinska napetost med talino in zrakom

Mejna vrednost valovnega števila, kjer postajajo vztrajnostne sile dominantne in se nestabilnosti ne zadušijo v silah površinske napetosti, je podana z izrazom:

$$k_m = \left(\frac{\rho}{\gamma} \omega^2 R \right)^{1/2} \quad (2)$$

Enačbi (1) in (2) sta izpeljani za nevskozen tok kapljevine. Uporabimo pa jo lahko z določenim odstopanjem tudi za realne, viskozne fluide [2] (Westerlund), kjer površinska napetost in viskoznost taline delno oslabita Taylorjeve nestabilnosti. Pri tem obstaja najmanjša valovna dolžina motnje λ_{\min} , ki jo določa mejna vrednost valovnega števila k_m :

$$\lambda_{\min} = \frac{2\pi}{k_m} \quad (3)$$

λ_{\min} je v odvisnosti od debeline filma taline h na kolesu podana z izrazom:

$$\lambda_{\min} = \frac{\pi}{\omega} \sqrt{\frac{2\gamma}{R\rho}} \quad \text{za } h \geq \frac{\lambda_{\min}}{\pi} \quad (4)$$

oziroma

$$\lambda_{\min} = \frac{\pi}{\omega} \sqrt{\frac{8\gamma}{R\rho}} \quad \text{za } h \leq 0.2 \frac{\lambda_{\min}}{\pi} \quad (5)$$

Taylorjeve nestabilnosti so predstavljane kot najmanjše možne motnje – »zarodna mesta« za oblikovanje ligamentov taline na rotirajočem filmu. Te motnje se superponirajo na motnje večjih razsežnosti, ki so posledica nestacionarnosti toka taline in mehanskih vibracij kolesa centrifuge. Vsota navedenega tvori kompleksno dinamiko taline na površini rotirajočega filma. Iz predstavljenih relacij lahko zaključimo, da se število zarodnih mest s povečano površinsko napetostjo in viskoznostjo manjša in pri tem razdalja med ligamenti narasča. Nasprotno pa se število zarodnih mest povečuje s povečano vrtilno frekvenco.

Za opazovano talino, izbrani premer kolesa centrifuge in nominalno vrtilno frekvenco kolesa je pričakovano področje valovnih dolžin motenj v mejah $\lambda_{\min} = \{2 \text{ do } 20 \text{ mm}\}$.

Enačbe 1–5 predstavljajo teoretične relacije med naborom parametrov na centrifugi in velikostjo nestabilnosti. Obstajajo pa tudi polempirične enačbe, npr. Hinze in Milborn [6] sta iz eksperimentalno dobljenih podatkov izpeljala relacijo za razmik med ligamenti s (enačba 6), ki upošteva tudi učinek viskoznosti:

$$s = 10.9 R^{-5/12} \gamma^{1/4} \rho^{-7/12} \omega^{-5/6} \mu^{1/3} \quad (6)$$

Relacija je bila preizkušena le na rotirajočih valjih z značilno manjšim premerom kolesa centrifuge, kar navaja na pričakovano odstopanje med rezultati na opazovanem primeru in izračunanimi vrednostmi po enačbi 6. Enačba bo uporabljena predvsem za primerjavo z rezultati eksperimenta.

Da bi ocenili predstavljeni model v realnem proizvodnem procesu, je v nadaljevanju predstavljen ekspe-

riment, ki temelji na računalniško podprti vizualizaciji kinematike filma taline na rotirajočem disku. Cilj prispevka je raziskati značilne dinamične pojave, ki se odražajo v fluktuacijah strukture filma taline.

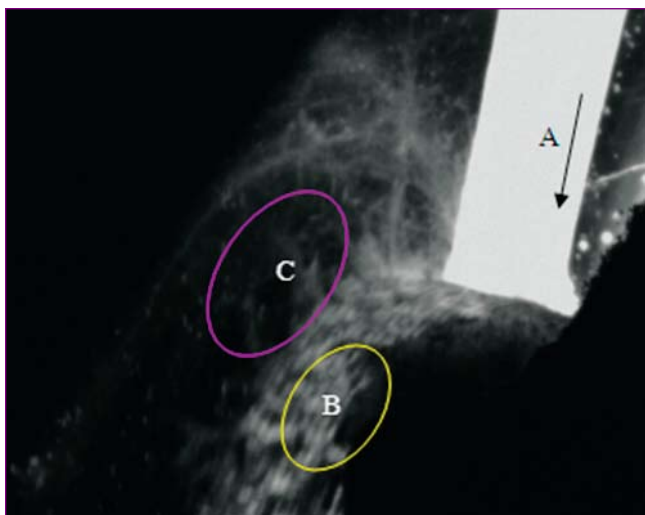
■ 3 Eksperiment

Vizualizacija tokovnih razmer v toku taline na 1. kolesu štirikolesne centrifuge je bila izvedena z uporabo visokofrekvenčne digitalne kamere in prirejene programske opreme, ki omogoča analizo topoloških struktur taline na površini gibajočega se filma. Pri konstantnih integralnih parametrih procesa, ki zajemajo kemično sestavo, temperaturo in masni pretok taline ter masni tok odpiha, je bila izvedena študija vpliva vrtilne frekvence kolesa 1, ki se je spreminjala v mejah od 5000 do 6500 min^{-1} , na tokovne razmere na površini filma taline in na kinematiko vlaken v področju njihovega nastajanja.

Vizualizacija je bila izvedena s kamero Fastec Imaging HiSpec4 2G mono (CMOS senzor 1696 × 1710 slikovnih točk, z ločljivostjo 0,3 mm/piksel, frekvenco zajemanja slike $f = 12000 \text{ s}^{-1}$ in ekspozicijskim časom 2 μs). Kamera je bila postavljena pod kotom 45 °C glede na os vrtenja kolesa centrifuge na oddaljenosti 4,5 m od kolesa centrifuge. V štirih izbranih obratovalnih točkah, ki so bile določene z vrtilno frekvenco kolesa centrifuge, so bile posnete serije 1024 časovno zaporednih slik za posamezno meritev. Na *sliki 1* je predstavljena struktura toka taline, ki vsebuje tako razmere v področju natoka taline na kolo (A) kot tudi tokovne razmere v filmu taline (B) in v področju nastajanja vlaken ter njihovega transporta z zračnim tokom odpiha (C).

V prispevku se omejimo samo na analizo toka taline na površini filma taline (področje B na *sliki 1*) in na analizo kinematike vlaken v področju C.

Za določitev količinskih lastnosti tokovnih vzorcev na opazovanem procesu vpeljemo celoštevilčno spremenljivko $A(k,t)$:



Slika 1. Značilna področja nastajanja vlaken kamene volne na kolesu centrifuge

$$A(k, t) = \frac{1}{l} \cdot \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m E(i, j)$$

$$(i, j) = \{0, 1, 2, 3, \dots, 255\} \quad (7)$$

S skalarno celoštevilčno spremenljivko $A(k, t)$ je podana prostorsko povprečena intenzivnost sivine v opazovanem oknu k v času t . Opisani model povezuje intenzivnost svetlobe v opazovanem oknu. Časovni interval je definiran s frekvenco zajema slik na kameri in s številom zaporednih slik poljubno izbranega časovnega intervala. Intenzivnost svetlobe $E(i, j)$ zaznavamo v 256 nivojih sivine, od popolnoma črne z vrednostjo 0 pa vse do popolnoma bele z vrednostjo 255. Časovne vrste lokalno krajevno povprečnega nivoja sivine so bile dobljene za vsa izbrana okna. Zanimajo nas fluktuacije tokovnih struktur na površini filma taline, ki odražajo tako hitrostne fluktuacije kot tudi frekvenco pojavljanja iskanih nestabilnosti. Fluktuacije so bile raziskane tako v časovnem kot krajevnem prostoru in jih zaznamo kot spreminjanje svetlosti slike v opazovanem območju, pri čemer se predpostavi, da je optična intenziteta (v našem primeru svetlost slik, izražena v sivinah) sorazmerna s koncentracijo – deležem taline. Podatke o svetlosti sivinskih slik smo zajeli s pomočjo programa Dynascan, ki za vsako izmed zaporednih slik v sekvenci zapiše matriko povprečnih sivin, in sicer za obliko, velikost in položaj matrike, kot jo definira upo-

rabnik. Pri analizi fluktuacij optične intenzitete je bila uporabljena spektralna analiza, s katero so predstavljene tipične fluktuacijske lastnosti filma taline in vlaknaste strukture v področju njihovega nastajanja. Pri analizi razmikov med ligamenti – zarodnimi mesti na površini filma taline – pa je bil razvit algoritem za statistično vrednotenje značilnih razdalj med tipičnimi strukturnimi vzorci na površini filma taline.

■ 4 Analiza rezultatov

Analiza značilnih dinamskih lastnosti filma taline, vključno z izračunanimi povprečnimi razmiki med nestabilnostmi na filmu taline in značilnimi frekvencami fluktuacij v območju filma in vlaken, je podana za štiri različne delovne točke, ki jih podaja tabela 1 (razlikujejo se v vrtilni frekvenci koles, ostali parametri so enaki):

Dinamika filma taline in vlaknaste strukture je bila opazovana v področju, kjer je tok taline usmerjen pretežno vertikalno (slika 2), zato lahko prizmujemo, da je ravnina opazovanja paralelna z dejansko tangencialno ravnino na rotirajočem disku centrifuge.

Na sliki 2 je lepo vidna struktura filma taline, ki ga pospešuje rotirajoči disk centrifuge. Značilna je ponavljajoča se struktura svetlejših področij, ki so posledica lokalnih odebelitev filma taline, ki prehajajo v področja tvorbe ligamentov. Na mejah filma taline (v levem in desnem področju filma taline) pa so vidni ligamenti, ki prehajajo v vlaknasto strukturo v skladu s teorijo, predstavljeno v poglavju 2.

Tabela 1. Obratovalne točke

Meritev $i(-)$	1	2	3	4
Vrtilna frekvenca f_0 (s^{-1})	120,2	111,6	99,16	86,9

V oknu 1 (film taline) in oknu 2 (območje nastajanja vlaken) na sliki 2 je bila merjena optična intenziteta (sivine) v odvisnosti od časa. V oknu (1b) pa so bile posnete časovno-krajevne vrste, sestavljene iz zaporednih vrednosti sivin po enačbi (7) od okna 1 do okna 15 za vsako opazovano sliko. Tako dobljena krajevno-časovna vrsta je predstavljala osnovo za ocenno tipičnih razdalj med nastajajočimi ligamenti na filmu taline.

Dinamika filma taline in nastajajočih vlaken v oknih 1 in 2 na sliki 2 je podana na slikah 3 do 6 v obliki močnostnih spektrov strukturnih fluktuacij (optične intenzitete) za obravnavane delovne točke iz tabele 1.

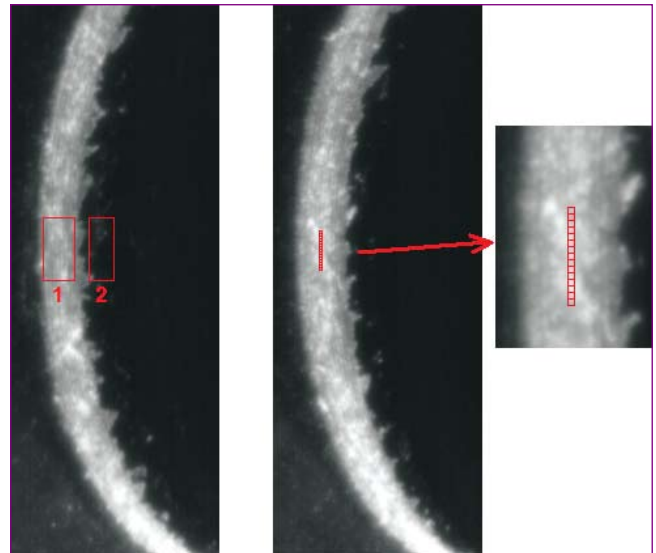
V vseh delovnih točkah se pojavijo izrazite fluktuacije optične intenzitete v strukturi filma taline, ki pripadajo osnovnim vrtilnim frekvencam kolesa centrifuge. Odražajo se kot vrhovi v močnostnem spektru v bližini osnovnih frekvenc f_0 ter višjih harmonskih frekvenc. V delovni točki 2 so te fluktuacije najizrazitejše. V ostalih točkah pa so najizrazitejše pri frekvenci okrog 1000 Hz, kar je najverjetneje posledica hidrodinamskih pojavov na filmu taline (npr. lastnih nihanj), ki jih povzročijo nestacionarnost toka taline, odpih vlaken in mehansko vzbujanje filma kot posledica mehanskih vibracij na uležajenju vretena kolesa centrifuge. V točki 4, kjer je vrtilna frekvenca najnižja, se te fluktuacije pojavijo pri nekoliko nižji frekvenci (600–700 Hz) in so bistveno močnejše kot v ostalih točkah. Zaradi počasnejšega vrtenja pri enakem masnem toku taline se ta namreč kopiči v debelejšo plast, katere debelina pa je po obodu kolesa zelo neenakomerna, od tod velike fluktuacije v svetlosti opazovanega območja.

Dinamiki filma taline sledijo tudi fluktuacije v področju nastajanja in transporta vlaken. Pojav je pričakovani in navaja na ugotovitev, da je produkcija vlaken neenakomerna in da je variiranje koncentracije vlaken (masa vlaken na enoto volumna)

kvaziperiodično, kar v proizvodnem procesu vpliva na kvaliteto omočnosti vlaken z vezivom v zračnem toku odpiha. V vseh delovnih točkah z izjemo četrte se vrhova v spektru za območje vlaken in filma v bližini vrtilne frekvence kolesa dobro ujemata, ravno tako pri 2. in 3. harmonični frekvenci in nekoliko slabše v frekvenčnem območju okrog 1000 Hz. Sklepamo lahko, da se kvaziperiodična generacija vlaken kamene volne pojavlja v celotnem obravnavanem področju.

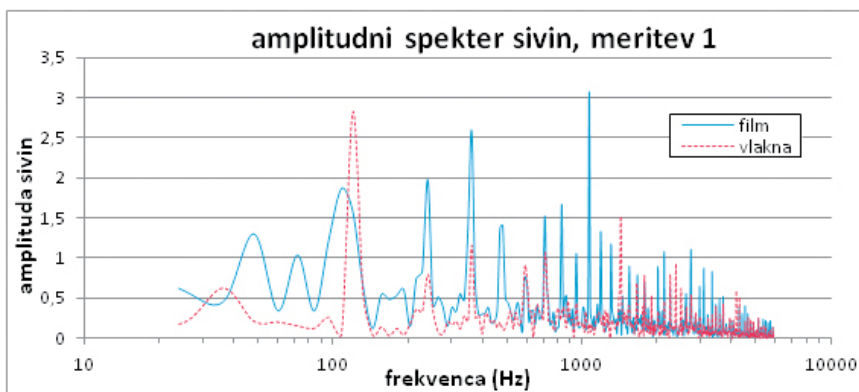
Z zniževanjem vrtilne frekvence kolesa centrifuge se pojavi zamik – zmanjšanje osnovne frekvence fluktuacij filma taline in vlaken glede na vrtilno frekvenco kolesa. Poleg tega se na nastajajočih vlaknih pojavijo strukturne fluktuacije v nižjem in višjem frekvenčnem območju od osnovne vrtilne frekvence kolesa. Amplitude oscilacij v območju vlaken pa se z izjemo merilne točke 3 v področjih osnovne frekvence značilno zmanjšujejo. V točki 4 je intenzivnost fluktuacij vlaknaste strukture minimalna, kar navaja na

časovno zaporednih slik, je 6 kHz. Z namenom ugotoviti prisotnost fluktuacij pri višjih frekvencah oziroma na manjših dolžinskih skalah se omejimo na vrednotenje strukture površine filma, ki temelji na krajevno-časovni analizi optične intenzitete (sivin). V ta namen so določene porazdelitve sivin za serijo 15-tih oken, ki so razvrščena v vertikalni smeri, kot je predstavljeno na sliki (1b na sl. 2). Velikost posamezne celice znaša 2×2 piksela, pri čemer je velikost enega piksela 0,56 mm. V vsaki od celic $i = 1$ do 15 je bila za izbrano sliko izmerjena in v datoteko zapisana sivina $A(i)$, sivi-



Slika 2. Opazovana območja na kolesu centrifuge (za primer delovne točke 2). Levo: Območje opazovanja časovnih fluktuacij optične intenzitete na segmentu filma taline (1) in v področju že oblikovanih vlaknastih struktur, ki se gibljejo v zračnem toku odpiha nad kolesom centrifuge (2). Desno: Območje opazovanja profilov optične intenzitete na filmu taline na zaporednih slikah (1b), 15 celic velikosti 2×2 piksela.

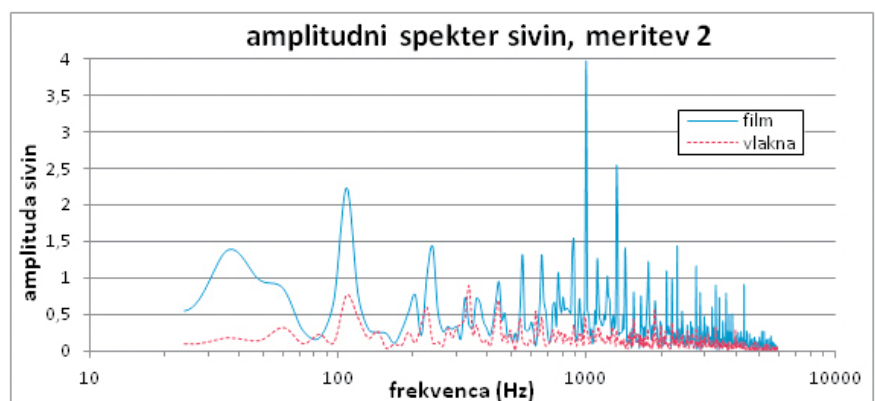
ne vseh celic pa tvorijo profil sivin. Postopek je bil ponovljen na seriji 1024 zaporednih slik, tako da se je oblikovala časovna vrsta, kjer si v časovnem zaporedju sledijo profili sivin s posameznih slik. Zaradi po višini neenakomerne osvetlitve slike smo od vrednosti vsake celice odšteli povprečno sivino vseh slik v seriji na isti celici, s čimer smo dobili normalirane profile fluktuacij sivin. Fluktuacije na najmanjših skalah (manjših od pričakovane velikosti λ_{\min} , npr. med sosednjima točkama na profilu) so bile interpolirane s polinomsko regresijo. Posnetim profilom smo prilegali polinome 4. stopnje in slednje uporabili v nadaljnjih izračunih. Slika 7 prikazuje profile fluktuacij sivin za



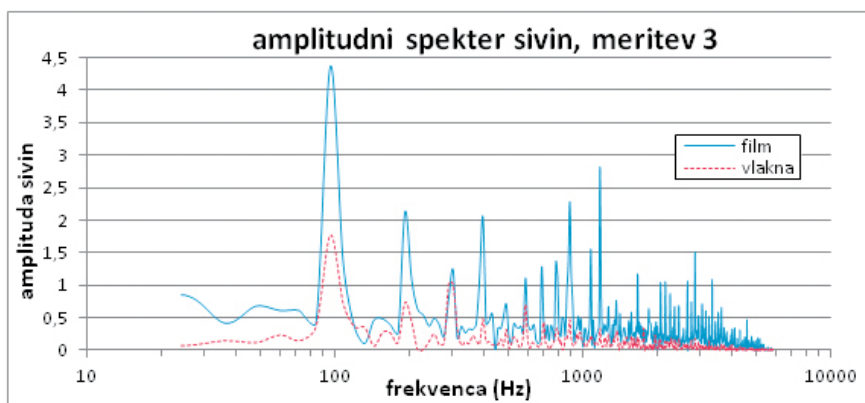
Slika 3. Spekter strukturnih fluktuacij: vrtilna frekvenca kolesa $f_0 = 120$ Hz

manjšo produkcijo vlaken na kolesu centrifuge v opazovanem režimu. Taylorjeve nestabilnosti, opisane v poglavju 2, so superponirane na topološki strukturi filma taline in prav tako na opazovanem signalu $A(k,t)$. V frekvenčnem prostoru jih »pričakujemo« v višjem frekvenčnem področju (nekaj 10 kHz), kar presega frekvenčno področje, ki ga lahko opazujemo na časovnih vrstah $A(k,t)$ v knjih 1 in 2 na sliki 2.

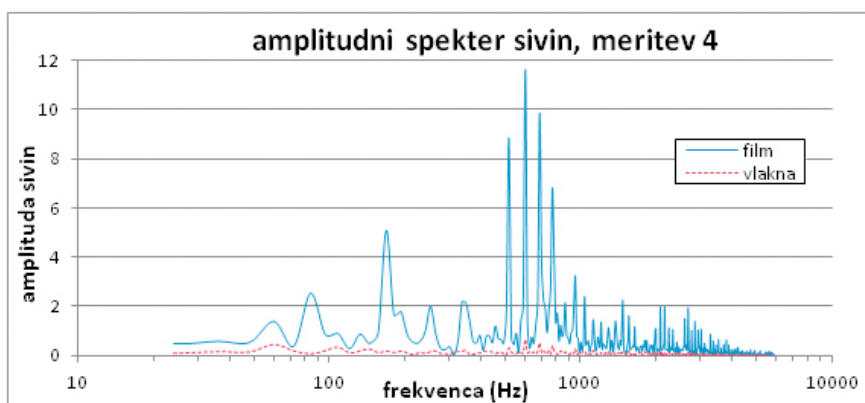
Najvišja še določljiva frekvenca, ki je določena s frekvenco zajemanja



Slika 4. Spekter strukturnih fluktuacij: vrtilna frekvenca kolesa $f_0 = 112$ Hz



Slika 5. Spekter strukturnih fluktuacij: vrtljna frekvenca kolesa $f_0 = 99$ Hz



Slika 6. Spekter strukturnih fluktuacij: vrtljna frekvenca kolesa $f_0 = 87$ Hz

dve različni sliki v seriji za merilno točko 2.

Valovno dolžino oziroma razmik med dvema motnjama oz. nestabilnostma na profilu smo določili kot dvakratno vrednost razdalje med točko minimalne (d_{\min}) in maksimalne (d_{\max}) vrednosti fluktuacij sivin na posameznem (z regresijo zglajenem) profilu:

$$s = 2|d_{\max} - d_{\min}| \quad (8)$$

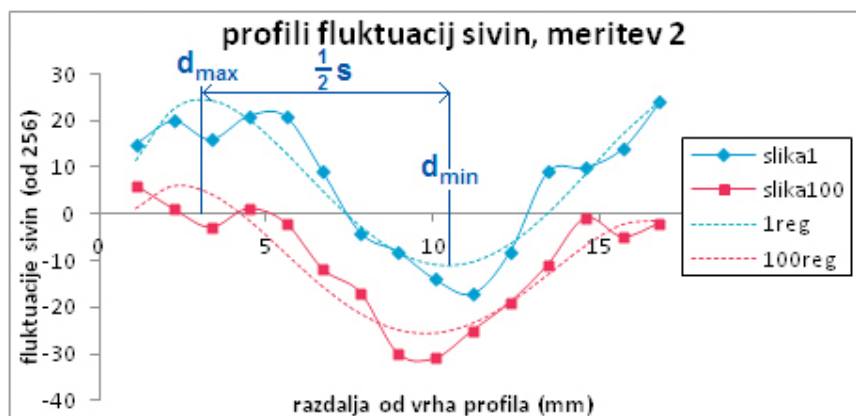
Ker se je razmik s med posameznimi slikami razlikoval oziroma je bil opazen določen raztros podatkov, smo izdelali diagrame porazdelitve gostote verjetnosti za velikost razmika (slika 8).

Najpogosteje se pojavlja razmik v velikosti 14–16 mm, odvisno od merilne točke. Višja, kot je vrtljna frekvenca, manjši je razmik med motnjami na filmu, kar se sklada s teorijo o Taylorjevi nestabilnosti, predstavljeno v poglavju 2. Manjša vrhova se pojavita tudi pri polovični in dvakratni vrednosti tega razmika, in to

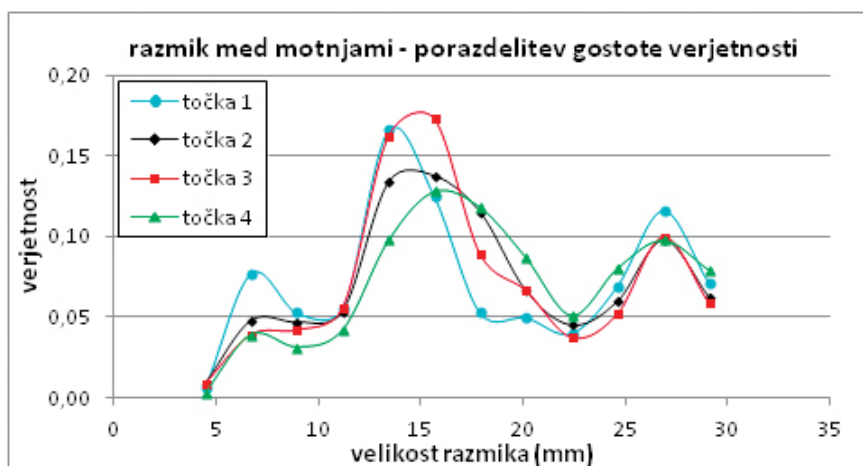
za vse meritve pri enakih vrednostih velikosti razmika s , kar navaja na pojav prve višje harmonske frekvence, ki ga lahko povežemo z bifurkacijo motnje, ki ima za posledico njeno delitev v dve manjši motnji. Pojav subharmonske – polovične frekvence, ki ima za posledico ponavljanje vzorca na večji valovni dolžini, pa se lahko poveže z mehanskimi motnjami, ki so predstavljene v diagramih na slikah od 3 do 6. Za primerjavo po

enačbi 6 ocenimo minimalni razmik med zarodnimi mesti ligamentov, ki so posledica Taylorjevih nestabilnosti. Za tipične lastnosti taline (pri 1450 °C) – gostoto 2600 kg/m³, viskoznost 70 Pas, površinsko napetost 400 mN/m – in premer kolesa 280 mm so po en. 6 izračunani razmiki s , podani v tabeli 2 in primerjani z eksperimentalno dobljenimi rezultati.

Iz tabele 2 je razvidno, da je eksperimentalno dobljen razmik s sorazmerno vrednostim, izračunanim po en. 6 in je od slednjega približno 4-krat večji oziroma je frekvenca pojavljanja 4-krat manjša. Razlika med ocenjeno in izmerjeno vrednostjo razmika je do neke mere posledica neidealne strukture površine kolesa, ker ta ni gladka, ampak so po obodu kolesa zareze, zato je debelina filma neenakomerna (tega vpliva enačba 6 ne upošteva). Poleg tega je temperatura taline v opazovanem območju na obodu kolesa zaradi ohlajanja filma že precej nižja od tiste na iztoku iz peči, za katero veljajo vrednosti, uporabljene v en. 6. Predvsem viskoznost s padanjem temperature zelo hitro narašča, zaradi česar bi bil razmik po en. 6 ob poznavanju in upoštevanju dejanskih lastnosti taline na opazovanem mestu precej večji. Ne glede na navedeno lahko zaključimo, da so dobljeni rezultati in zaključki pomembni za razumevanje procesa nastajanja vlaken kamene volne. Ocenjeni so vplivi na tvorbo in število zarodnih mest in podana je metodologija diagnostike nastajanja vlaknaste strukture v proizvodnji kamene volne.



Slika 7. Profila sivin za 1. in 100. zaporedno sliko pri meritvi 2, posneta v Dynascanu (slika-, polna črta) in polinomska regresija (-reg, črtkana črta)



Slika 8. Porazdelitev gostote verjetnosti za velikost razmika med motnjami

5 Zaključki

Podani so osnovni mehanizmi tvorjenja vlaken kamene volne iz rotirajočega filma taline na kolesu centrifuge. Uporabljena eksperimentalna metoda temelji na analizi časovno zaporednih slik – topoloških struktur taline na površini filma. Predstavljeni rezultati navajajo na prisotnost nestabilnosti taline, ki se oblikuje kot kompleksno kvaziperiodično osciliranje struktur taline na površini filma. Poleg oscilacije taline, ki sovпада z vrtilno frekvenco kolesa in višjimi harmoniki, so zaznane tudi

aperiodične strukture taline kot posledica Taylorjeve nestabilnosti, ki je lastna gibanju kapljevine in je ena od osnovnih mehanizmov tvorjenja ligamentov taline, iz katerih se oblikujejo vlakna kamene volne. Dobljeni rezultati navajajo na značilen vpliv dinamike filma taline na nastajanje vlaken in posredno na kvaliteto procesa nastajanja vlaken kamene volne.

6 Literatura

[1] Širok, B., Blagojević, B., Bullen, P., Mineral Wool, Production and

Properties, Cambridge, Woodhead Publishing in Materials, 2008.

- [2] Eisenklam, P., On ligament formation from spinning discs and cups, Chemical Engineering Science, 1964, Vol. 19, str. 693–694, Pergamon Press Ltd., Oxford.
- [3] Blagojević, B., Širok, B., Štremfelj, B. Simulation of the effect of melt composition on mineral wool fibre thickness. Ceramics – Silikáty, 2004, Vol. 48, No. 3, str. 128–134.
- [4] Širok, B., Blagojević, B., Bullen, P. R. The influence of the spinning disc film temperature on the fibre diameter distribution in mineral wool produced by a doubledisc spinning machine. Glass Technol., 2005, Vol. 46, No. 5, str. 334–340.
- [5] Širok, B., Bajcar, T., Orbanič, A., Eberlinc, M. Melt mass flow measurement in mineral wool production. Glass Technol., Oct. 2011, Vol. 52, No. 5, str. 161–168.
- [6] Hinze, J. O., Milborn, H. Atomization of Liquids by Means of a Rotating Cup. Journal of Applied Mechanics, June 1950, Vol. 17, No. 2, str. 145–153.

Tabela 2. Primerjava eksperimentalno in po en. 6 dobljenega razmika s med motnjami

Meritev	1	2	3	4
$s_{\text{teoretična}}$ (en. 6.), mm	3,30	3,51	3,87	4,32
$s_{\text{izmerjena}}$ (sl. 8), mm	13,8	14,5	15,0	16,2
$s_{\text{izmerjena}}/s_{\text{teoretična}}$	4,2	4,1	3,9	3,8

VENTIL
REVUIA ZA FLUIDNO TEHNIKO, AVTOMATIZACIJO IN MEHATRONIKO

telefon: + (0) 1 4771-704
 telefaks: + (0) 1 4771-761
<http://www.fs.uni-lj.si/ventil/>
 e-mail: ventil@fs.uni-lj.si

Mineral-wool melt fiberisation on the disc of a spinner

Abstract: In this article the formation of mineral-wool fibers is studied on a real industrial production process. The results presented indicate the presence of a melt instability that is formed as a complex quasi-periodic oscillation of the structures on the surface of the film. In addition to the melt oscillation, which coincides with the rotating frequency of the spinner wheel and its higher harmonics, aperiodic melt structures also appear. These structures result from the Taylor instability, which is inherent to liquid movement and is one of the basic mechanisms for the formation of melt ligaments that solidify into mineral-wool fibers. The results indicate the characteristic influence of melt film dynamics on the fiber formation and, indirectly, on the quality of the end product.

Key words: Mineral wool, Spinner, Fiberisation process of molten rock, Taylor instability, Structural oscillations