

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
АКАДЕМІЯ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

# ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА МЕТАЛУРГІЇ

№6  
(123)  
2019

ЗАГАЛЬНОДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видається з березня 1997 року  
Виходить 6 разів на рік

**Засновники:** Національна металургійна академія України  
Відділення матеріалознавства та металургії  
Академії інженерних наук України

**Видавці:** Національна металургійна академія України  
Відділення матеріалознавства та металургії  
Академії інженерних наук України

Дніпро  
2019

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**  
**АКАДЕМІЯ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК УКРАЇНИ**

Загальнодержавний  
науково-технічний журнал

**ISSN 1028-2335**

Випуск 6 (123) 2019р

Свідоцтво про реєстрацію:  
серія КВ № 21962-11862ПР  
від 23 березня 2016 року

Постановою Президії Вищої  
атестаційної комісії України від  
**16.05.2016 р.** журнал включено до  
категорії «В» переліку наукових  
фахових видань України в галузі  
технічних наук за номером **1156**

Рекомендовано Вченою  
Радою Національної  
металургійної академії  
України №9 від 27.11.2019

Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

Ум.друк.арк. 6,28

Адреса редакції та видавця: Національна  
металургійна академія України,  
пр.Гагаріна, 4, м.Дніпро, 49006  
т.(0562) 47-44-42; (067)719-37-51  
Тираж 100 прим.

Засновиники:

Центр (відділення) матеріалознавства і металургії Академії  
інженерних наук України

Національна металургійна академія України

**Редакційна колегія**

*Головний редактор*

д.т.н., проф. **Пройдак Ю.С.** (Україна)

*Заступник головного редактора*

д.т.н., проф. **Камкіна Л.В.** (Україна)

д.т.н., проф. Білодіденко С.В.	(Україна)
д.т.н., проф. Волкова О. І.	(Німеччина)
д.т.н., проф. Гнатушенко В.В.	(Україна)
д.т.н., проф. Кнапинський М.Я.	(Польща)
д.т.н., проф. Куцова В.З.	(Україна)
д.т.н., проф. Лежнев С.М.	(Казахстан)
д.т.н., проф. Лялюк В.П.	(Україна)
д.т.н., проф. Малий Є.І.	(Україна)
д.т.н., проф. Медовар Л.Б.	(Україна)
д.т.н., проф. Сігарьов Є.М.	(Україна)
д.т.н., проф. Стовпченко Г.П.	(Україна)
д.т.н., проф. Фролов Я.В.	(Україна)
д.т.н., проф. Шатоха В.І.	(Україна)

Передрук лише за дозвілом редакції

При використанні матеріалів посилання на журнал обов'язкове  
**Видавництво не несе відповідальність за зміст матеріалу,  
наданого автором до друку**

Матеріали публікуються на мові оригіналу

За якість перекладу статей на англійську мову редакція відповідальності не несе  
**Редакційна рада залишає за собою право змінювати текст статей,  
не впливаючи на загальний зміст наданого матеріалу**



<http://tpm.nmetau.edu.ua>

Комп'ютерне верстання О.Г.Безшукуренко

©НМетАУ 2019

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF UKRAINE  
NATIONAL METALLURGICAL ACADEMY OF UKRAINE

# THEORY AND PRACTICE OF METALLURGY



GENERAL STATE SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Issued since March 1997  
Released 6 times a year

*Founders:* National Metallurgical Academy of Ukraine  
Department of Materials Science and Metallurgy  
Of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine

*Publishers:* National Metallurgical Academy of Ukraine  
Department of Materials Science and Metallurgy  
Of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine

Dnipro  
2019

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF UKRAINE  
NATIONAL METALLURGICAL ACADEMY OF UKRAINE**

National scientific journal

**ISSN 1028-2335**

*Edition 6 (123) 2019 year*

Certificate of registration:

KB № 21962-11862ПП

23.03.2016

By the resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of Ukraine dated **May 16, 2016**, the magazine was included in the category "B" of the list of scientific professional publications of Ukraine in the field of technical sciences by number **1156**

Recommended Academic  
Council of the National  
Metallurgical Academy of  
Ukraine #**9 27.11.2019**

Format 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
CPP. 6,28

Editorial address and publisher: National  
Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina,  
4, Dnipro 49006

т.(0562) 47-44-61; 0662911534  
Copies of 100.

Founders:

Center (Department) of Materials Science and Metallurgy of the  
Academy of Engineering Sciences of Ukraine  
National Metallurgical Academy of Ukraine

**Editorial board**

*Editor in Chief*

D.Tech.Sc., prof. **Proydak Yu** (Ukraine)

*Honorable Editor*

D.Tech.Sc., prof. **Kamkina L.** (Ukraine)

Prof., d.t.s. Bilodidenko S.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Volkova O.	(Germany)
Prof., d.t.s. Gnatushenko V.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Knapinskij M.	(Poland)
Prof., d.t.s. Kutsova V.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Lezhnyev S.	(Kazakhstan)
Prof., d.t.s. Lyalyuk V.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Malij Ye.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Medovar L.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Sigarov Ye	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Frolov Ya.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Shatocha V.	(Ukraine)

Reproduction only with permission of the publisher

With reference to the journal is obligatory

Publisher is not responsible for the content of the material,  
by authors for publication

Publikuyutsya materials in the original language

For quality translations of articles on English version is not liable

Editorial Board reserves the right to change the text of the articles without affecting  
the overall content of the material



<http://tpm.nmetau.edu.ua>

©NMetAU 2019

## ЗМІСТ

ГРИШИН О.М., НАДТОЧІЙ А.А., ВЕЛИКОНСЬКА Н.М.

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТВЕРДОФАЗНОГО ВІДНОВЛЕННЯ  $Cr_2O_3$  ВУГЛЕЦЕМ ..... 5

КОВАЛЕНКО В.Л.

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗОВИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ..... 12

КАМКІНА Л.В., МІШАЛКІН А.П., КАМКІН В.Ю., ГРИЩЕНКО Ю.М., ІСАЄВА Л.Є.

ЗМЕНШЕННЯ ШКІДЛИВОГО ВПЛИВУ АЗОТУ НА ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ 08Ю ШЛЯХОМ ПІДБОРУ РАЦІОНАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ НІТРІДОУТВОРЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ..... 16

ПАРУСОВ Е. В., ЧУЙКО І. М., ПАРУСОВ О. В., ГОЛУБЕНКО Т. М., СІВАК Г. І.

ПРО ВПЛИВ ШВИДКОСТІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ТА ТЕПЛА РЕКАЛЕСЦЕНЦІЇ НА ОСОБЛИВОСТІ ДИФУЗІЙНОГО РОЗПАДУ АУСТЕНІТУ В ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЯХ..... 25

СОЛОНЕНКО Л.І., С.І. РЕП'ЯХ, К.І. УЗЛОВ, Р.В. УСЕНКО

МІЦНІСТЬ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНОЇ СУМІШІ, ЯКА СТРУКТУРОВАНА СПОСОБОМ ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОГО ЗАТВЕРДІННЯ..... 33

ФЕСЕНКО М.А., ФЕСЕНКО А.Н., МОГИЛАТЕНКО В.Г.

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ МЕТОДУ ВНУТРІШНЬОФОРМОВОГО МОДИФІКУВАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЧАВУННИХ ВИЛИВКІВ ІЗ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ..... 40

НІЗЯЄВ К.Г., МАМЕШИН В.С., ЖУРАВЛЬОВА С.В.

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ДИСИПАЦІЮ ПОТУЖНОСТІ КИСНЕВОГО СТРУМЕНЯ ПРИ ВЕРХНІЙ ПРОДУВЦІ В КИСНЕВОМУ КОНВЕРТОРІ..... 46

ЗМІСТ ..... 52

## CONTENT

GRYSHYN O., NADTOCHIY A., VELYKONSKA N.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF INTENSIFICATION OF SOLID-PHASE REDUCTION OF CHROMIUM OXIDE BY CARBON ..... 5

KOVALENKO V.

DETERMINATION OF ECONOMIC EFFICIENCY OF USING BIOGAS IN THE CONDITIONS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES ..... 12

KAMKINA L., MISHALKIN A., KAMKIN V., GRISHCHENKO Y., ISAEVA L.

REDUCTION OF HARMFUL EFFECTS OF NITROGEN ON THE PROPERTIES OF LOW-CARBON STEEL 08Y BY SELECTING A RATIONAL AMOUNT OF NITRIDE-FORMING ELEMENTS ..... 16

PARUSOV E., CHUIKO I., PARUSOV O., GOLUBENKO T., SIVAK A.

ON THE INFLUENCE OF THE RATE OF CONTINUOUS COOLING AND HEAT OF RECALCENCE ON THE FEATURES OF DIFFUSION TRANSFORMATION OF AUSTENITE IN HIGH-CARBON STEELS ..... 25

SOLOHENKO L., REPYAKH S., UZLOV K., USENKO R.

STRENGTH OF SAND-SODIUM-SILICATE MIXTURE STRUCTURED BY STEAM-MICROWAVE SOLIDIFICATION METHOD ..... 33

FESENKO M., FESENKO A., MOGYLATENKO V.

EXPANDING THE CAPABILITY OF THE IN-MOLD MODIFICATION METHOD FOR THE PRODUCTION OF CAST IRON MOLDS WITH DIFFERENTIATED PROPERTIES ..... 40

NIZYAEV K., MAMESHYN V., ZHURAVLYOVA S.

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE POWER DISSIPATION OF THE OXYGEN JET AT UPPER BLOWING IN OXYGEN CONVERTERS ..... 46

CONTENT ..... 53

УДК 621.74.04

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2019.06>

Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І., Усенко Р.В.

## Міцність піщано-рідкоскляної суміші, яка структурована способом паро-мікрохвильового затвердіння

### Solonenko L., Rep'yakh S., Uzlov K., Usenko R.

## Strength of sand-sodium-silicate mixture structured by steam-microwave solidification method

Робота присвячена вирішенню проблеми підвищення міцності піщано-рідкоскляних сумішей (ПРС) з малим вмістом силікату натрію в своєму складі, структурованих способом паро-мікрохвильового затвердіння (ПМЗ-процес), шляхом визначення закономірностей впливу основних параметрів ПРС на їх міцність. У роботі використовували стандартні методи і методики визначення міцності і дослідження структури формувальних і стрижневих сумішей. Тип міжзеренного руйнування сумішей встановлювали за результатами зіставлення ходу залежностей міцності сумішей від масового вмісту натрієвого рідкого скла, використаного для їх приготування, встановлених за результатами експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків.

Вперше встановлено, що у ПРС, структурованих по ПМЗ-процесу: руйнування носить адгезійний характер; міцність при стисненні визначається масштабним фактором їх структурних складових – площею поверхні контакту піщинки і манжета з дегідратованого силікату натрію; практично весь сполучний матеріал суміші знаходиться в міжзернових манжетах; підвищення міцності можна досягти шляхом збільшення вмісту в суміші силікату натрію, підвищення уявної щільності використаного для плакування натрієвого рідкого скла, а також підвищення середнього діаметру зерен піску.

Облік отриманих результатів при розробці технологій виробництва ливарних форм і стрижнів дозволить прогнозувати властивості, оптимізувати склад і умови виробництва даних виробів в промислових умовах, провести заміну екологічно небезпечних сполучних матеріалів імпортного виробництва на безпечне рідке скло вітчизняного виробництва, істотно зменшити викиди в атмосферу канцерогенних і отруйних речовин, значно скоротити витрату кварцових пісків і зменшити надходження техногенної продукції у відвали.

**Ключові слова:** ливарна форма, стрижень, міцність, манжет, рідке скло, структуровання, руйнування, адгезія

Work has been devoted to the problem solving of sand-sodium-silicate mixtures (SSSM) with low sodium silicate content in their composition strength increasing, structured by steam-microwave solidification (SMS-process), due to determination of SMS-process main parameters influence regularity on their strength. In the present work standard methods and techniques for strength determining and structure of mold and core mixtures studying have been used. Type of mixtures intragranular destruction has been determined by comparing the mixtures strength dependence trend vs. sodium silicate solute used for their preparation mass content, established by experimental studies and theoretical calculations results.

For the first time, it has been established that in SSSM structured by SMS-process: destruction is adhesive; compressive strength determines by the scale factor of their structural components - sand and cuff of dehydrated sodium silicate contact surface area; almost all binder material of the mixture is in intergranular cuffs; strength growth can be achieved by increasing of sodium silicate content in mixture, of molten silicate sodium solute used for placket apparent density, as well as average diameter of the sand grains.

Obtained results accounting in technologies development for the of foundry molds and rods production will allow to predict the properties, optimize production of these parts composition and conditions in manufacturing, replace environmentally hazardous imported binder materials with safe sodium silicate solute of domestic production, significantly reduce pollution of carcinogenic and poisoning substances into the atmosphere, reduce consumption of quartz sand and reduce the flow of technogenous products to the scrap.

**Keywords:** mold, core, strength, cuffs, sodium silicate solute, structuring, destruction, adhesion

**Вступ.** Одноразові ливарні форми і стрижні (ЛФС) на різних етапах свого існування відчувають різні теплові, фізичні і хімічні впливи, які зумовлюють до матеріалу цих виробів відповідні вимоги, зокрема, вимоги до міцності. Відносно висока міцність ЛФС з моменту закінчення структуровання їх сумішей до моменту вибивання вилівка повинна бути втрачена або на порядок знижена від своєї початкової величини. Для більшості сполучних матеріалів, використовуваних для ЛФС, такого ефекту досягають шляхом введення в суміш різних технологічних домішок. Однак разом з цим виникає

інше завдання – регенерація піску. Відновлення піску з відпрацьованої суміші ЛФС – процес тривалий і витратний у всіх відношеннях. Відпрацьовані суміші ЛФС, як правило, вивозять на утилізацію у відвали, забруднюючи навколишнє середовище і ґрунтові води. З точки зору екології зберігання деяких типів відпрацьованих сумішей неприпустимо навіть у відвалах. Чи не складно порахувати, що, прийнявши співвідношення витрат кварцового піску по відношенню до 1 тонни виробленого гідного сталевого або чавунного лиття рівним 3...7, то, наприклад, в 2016 році в Україні на випуск 44300

Солоненко Людмила Ігорівна – к.т.н., ОНПУ  
Реп'ях Сергій Іванович – д.т.н., проф. НМетАУ,  
Узлов Костянтин Іванович д.т.н., проф. НМетАУ  
Усенко Руслан Вікторович – к.т.н., доц. НМетАУ

Solonenko L. - Ph.D. ONPU  
Rep'yakh S. - Doctor of Technical Sciences, prof. NMetAU  
Uzlov K. - Doctor of Technical Sciences, prof. NMetAU  
Usenko R. - Ph.D., Assoc.

тонн лиття [1] з яких близько 50% було виготовлено в одноразових піщаних формах було безповоротно витрачено від 66450 до 155050 тонн кварцового піску.

Одним із шляхів вирішення даної проблеми є використання піщано-рідкоскляних сумішей (ПРС) з малим (до 1,5% за масою) вмістом силікату натрію і без будь-яких технологічних домішок, структуровані за способом паро-мікрохвильового затвердіння (ПМЗ-процес). Володіючи спочатку високою маніпуляційною міцністю і хорошим вибиванням таку суміш немає необхідності регенерувати для рециклінгу кварцового піску, але можна використовувати для виробництва силікат-брили, у виробництві бетонних виробів і конструкцій і т.п. В цьому випадку процес виготовлення виливків в частині використання ЛФС стає практично безвідходним.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Міцність – один з найважливіших показників будь-якої структурованої суміші, що використовується для виготовлення ЛФС. Від величини міцності сумішей залежні і показники їх обсіпальності, і податливості, і вибивання, і придатності до регенерації і т.п. [2, 3].

В даний час, питанням міцності ЛФС присвячені дослідження багатьох дослідників і вчених [4...6 і ін.]. За результатами цих досліджень встановлені і розроблені описи, як механізмів структурування, так і механізмів руйнування сумішей структурованих самими різними способами і з самих різних сполучних матеріалів. Зокрема, встановлено, що для одних видів структурованих сумішей міцність визначається рівнем адгезійних і когезійних властивостей матеріалів, що входять до них, у інших, наприклад, піщано-глинистих сумішей, – Ван-дер-Ваальсовими та капілярними силами, водневими зв'язками і донорно-акцепторною взаємодією і т.д. [7...9]. При відносно невеликому вмісті води в піщано-глинистій суміші її межу міцності при стисненні ( $\sigma_{СТ}$ ) в "сирому" стані А.А. Степанов і Б.Б. Гуляєв, наприклад, розраховують за формулою, кг/см<sup>2</sup> [8]:

$$\sigma_{СТ} = \frac{0,93 \cdot 10^{-23}}{l^4} \cdot n \cdot \pi \cdot R^2,$$

де  $l$  – товщина плівки води в суміші, см;  $n$  – число контактів на площі в 1 см<sup>3</sup>;  $R$  – радіус контакту, см.

Проте, механізм руйнування сумішей, структурованих по ПМЗ-процесу з малим вмістом силікату натрію, до теперішнього часу не досліджено, відсутній опис механізму та кінетики їх структурування і т.п. Відповідно, для сумішей, структурованих по ПМЗ-процесу, не визначені параметри і не встановлені «важелі» управління міцністю і т.д. Як наслідок, до теперішнього часу технології з виготовлення ЛФС, які виготовлені по ПМЗ-процесу, в ливарних цехах не застосовують, продовжуючи традиційне одноразове використання кварцових пісків з їх подальшою безповоротною утилізацією

в відвалах [10]. З цього випливає, що робота, яка спрямована на вирішення проблеми підвищення міцності ПРС з малим вмістом силікату натрію в своєму складі, структурованих по ПМЗ-процесу, є актуальною.

**Мета і завдання досліджень.** Мета досліджень – визначення закономірностей впливу основних параметрів ПРС з малою кількістю силікату натрію, структурованих по ПМЗ-процесу, на їх міцність.

Завдання досліджень – для ПРС, структурованих по ПМЗ-процесу, встановити тип їх руйнування при зовнішньому механічному впливі, визначальні чинники міцності, переважне просторове положення силікату натрію в структурі суміші і напрямки виконання заходів щодо підвищення їх міцності.

**Матеріали та методи дослідження.** У роботі використовували кар'єрний кварцовий пісок Вільногірського гірничо-металургійного комбінату з вмістом глини менше 0,1% за масою і середнім розміром частинок 0,23 мм, воду, рідке скло з питомою щільністю 1,44 г/см<sup>3</sup> і силікатним модулем 2,9, каніфоль соснову. Структурування сумішей проводили в камері з мікрохвильовим випромінюванням частотою 2,45 ГГц і потужністю магнетрона 0,9 кВт. Тривалість обробки суміші – 120±1 с. Виготовлення зразків здійснювали в поліпропіленових склянках з розмірами внутрішньої порожнини Ø46×46 мм. Міцність при стисненні структурованих сумішей розраховували як співвідношення величини тиску на зразок в момент його руйнування з точністю 0,01 МПа до площі поперечного перерізу зразка. Структуру зразків досліджували на мікроскопі при збільшенні ×25.

**Результати дослідження.** Дослідження структури зразків ПРС, структурованих по ПМЗ-процесу, свідчать про те, що між сусідніми піщинками в суміші за час їх обробки паром у полі мікрохвильового випромінювання з'явилися тверді манжети зі сполучного матеріалу. Залежно від віддалення сусідніх піщинок і в'язкості вихідного рідкого сполучного матеріалу манжет може бути витягнутого типу, що схематично надано на рис. 1, а, або, скороченого типу (див. рис. 1, б), або короткого типу (див. рис. 1, в).

Витягнутий тип манжета (див. рис. 1, а) характерний для нестикованих, досить віддалених один від одного сусідніх піщинок у випадках, коли сполучний матеріал під час обробки за ПМЗ-процесом набуває рідкоплинності та високої в'язкості. До числа таких сполучних матеріалів, наприклад, відносяться смоли (див. рис. 1, г). Скорочений тип манжета характерний для сусідніх піщинок, нестикованих між собою, але які знаходяться на невеликій відстані одна від одної. Тобто, такий тип манжета можна спостерігати в сумішах, де сполучний матеріал під час структурування набуває відносно невисокої в'язкості. Прикладом таких сполучних матеріалів є смоли, масла, рідке скло з високою питомою щільністю і т.п. Короткі манжети



(див. рис. 1,в) формуються під час структуривання суміші між контактуючими між собою піщинками навколо точок їх взаємного контакту і не залежно

від в'язкості у рідкому стані використаного сполучного матеріалу.

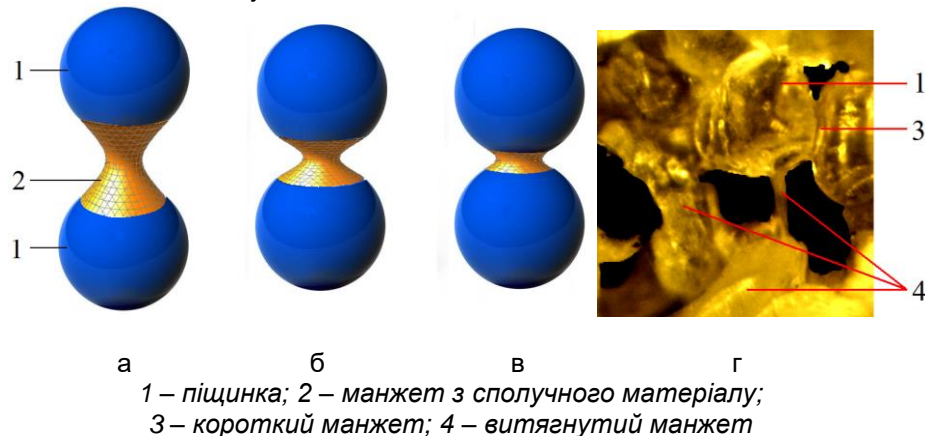


Рисунок 1 – Вид манжета витягнутого (а), скороченого (б) і короткого (в) типу із сполучного матеріалу між сусідніми піщинками в суміші, структура ( $\times 25$ ) піщано-каніфольної суміші (г), структурованої по ПМЗ-процесу

Виходячи з того, що в структурі ПРС, структурованої по ПМЗ-процесу, всі спостережувані манжети відносяться до короткого типу, припустили, що зміна міцності таких сумішей залежить виключно від зміни вмісту в них сполучного матеріалу, тобто від площі контакту піщинки і манжета. Якщо це припущення справедливе, то тип залежностей зміни міцності такої структурованої суміші від вмісту в ній сполучний матеріал і, відповідно, площі контакту піщинки і манжета повинні бути ідентичними. У свою чергу з цієї ідентичності витікає, що руйнування сумішей, структурованих по ПМЗ-процесу, проходить переважно по адгезійному механізму і при даному способі структуривання практично весь сполучний матеріал знаходиться в манжетах. Це означає, що таке адресне переміщення сполучного матеріалу в суміші (з плакованого шару – в манжет) має привести до того, що в порівнянні з відомими способами затвердіння, суміш, структурована по ПМЗ-процесу, повинна мати високу міцність при істотно меншому масовому вмісті сполучного матеріалу в ній. Якщо прийняте припущення не вірно, то руйнування структурованої суміші йде по когезійному механізму. В цьому ви-

падку для підвищення її міцності слід модифікувати рідке скло.

Для вирішення поставленого завдання припустили, що у структурованій суміші:

1 - всі піщинки в суміші одного розміру і мають сферичну форму, що схематично надано на рис. 2,а;

2 - всі манжети між усіма піщинками одного розміру і форми;

3 - руйнування суміші по адгезійному механізму проходить по поверхні контакту піщинки і манжета (див. лінію А-В-С на рис. 2,а), при руйнуванні по когезійному механізму – по площині, що проходить через точку контакту піщинок перпендикулярно геометричній осі манжета;

4 - міцність структурованої суміші змінюється прямо пропорційно зміні площі поверхні контакту піщинки і манжета або площі поверхні поперечного перерізу манжета, що проходить крізь точку контакту піщинок.

З метою спрощення, розрахунок проводили для манжета не із тороподібною зовнішньою поверхнею (див. рис. 2,б), а з поверхнею циліндричної форми (див. рис. 2,в).

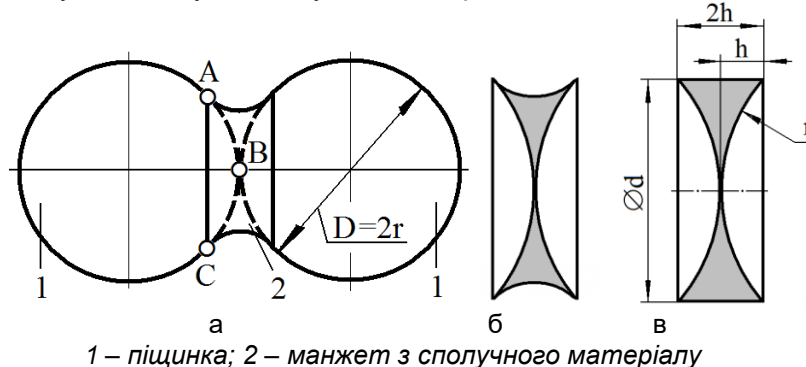


Рисунок 2 – Схема до розрахунку (а), теоретичний (б) і прийнятий в розрахунку (в) перетин короткого манжета

Відповідно до рис. 2, в площу контакту піщинки сферичної форми діаметром  $D = 2r$  і манжета розраховуємо за формулою:

$$S_A = \pi \cdot d \cdot h, \quad (1)$$

що відповідає за умови руйнування структурованої суміші по адгезійному механізму. При руйнуванні суміші по когезійному механізму площу поперечного перерізу манжета розраховували за формулою:

$$S_K = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2. \quad (2)$$

Оскільки об'єм циліндра діаметром  $d$ , охоплює манжет і має висоту  $2h$ , то його об'єм дорівнює:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{2}, \quad (3)$$

а об'єм двох кульових сегментів радіусом  $r$ , які утворюються від двох піщинок, що контактують між собою, дорівнює:

$$V_C = 2\pi h^2 \left( r - \frac{h}{3} \right), \quad (4)$$

то об'єм манжета дорівнює:

$$V_M = V - V_C = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{2} - 2\pi \cdot h^2 \left( r - \frac{h}{3} \right). \quad (5)$$

Після перетворення (4) отримуємо вираз:

$$\frac{2\pi \cdot h^3}{3} - 2\pi \cdot h^2 \cdot r + \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{2} - V_M = 0, \quad (6)$$

$$d = 2\sqrt{Dh - h^2}. \quad (7)$$

З точки зору маси сполучного матеріалу (рідкого скла), який пішов на плакування піску величину  $V_M$  розраховуємо за формулою:

$$V_M = \frac{V_p \cdot \rho_p \cdot k \cdot \varphi}{n \cdot \rho_m} = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot \rho_p \cdot k \cdot \varphi}{6 \cdot n \cdot \rho_m}, \quad (8)$$

$$k = \frac{m_m}{m_p}, \quad \varphi = f(\rho_{pc}),$$

де  $\rho_p, \rho_m$  – питома щільність матеріалу піщинки (для кварцового піску  $\rho_p = 2,65 \text{ г/см}^3$ ) і силікату натрію (при величині силікатного модуля від 2,8 до

3,0 взяли  $\rho_m = 2,44 \text{ г/см}^3$ ) відповідно;  $V_p$  – об'єм піщинки;  $\varphi$  – масова частка силікату натрію в рідкому склі, витраченого на плакування піску;  $n$  – число манжетів, що припадають на 1 частку піску;  $m_m, m_p$  – маса рідкого скла і піску в суміші при плакуванні відповідно.

Виходячи з того, що в реальних сумішах, структурованих по ПМЗ-процесу,  $m_m \ll m_p$  можна з виразу (6) записати:

$$h = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot V_M}{\pi}}. \quad (9)$$

Виходячи з прийнятих припущень межі міцності структурованих сумішей від величини  $S_A$  і  $S_K$  розраховували за формулами:

$$\sigma_{CT} = z_A \cdot S_A, \quad (10)$$

$$\sigma_{CT} = z_K \cdot S_K, \quad (11)$$

де  $z_A, z_K$  – коефіцієнти, що враховують прийняті для розрахунку припущення.

Численними дослідженнями встановлено, що для структурованих сумішей між величинами межі міцності на розрив ( $\sigma_p$ ) і при стисканні ( $\sigma_{CT}$ ) існує пряма пропорційна залежність [11...14]. При цьому, як показує практика випробувань структурованих формувальних і стрижневих матеріалів результати вимірювань міцності при стисненні характеризуються меншим інтервалом відхилень від їх середніх арифметичних значень. У зв'язку з цим, прийнявши  $D=0,023 \text{ см}$ ,  $\rho_p=2,65 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_m=2,44 \text{ г/см}^3$ ,  $\varphi=f(\rho_{pc})$ ,  $n=6$ ,  $k=0,000\dots0,035$ ,  $z_A=4,7 \cdot 10^4$ ,  $z_K=2,6 \cdot 10^4$  за формулами (10) і (11), розраховали і побудували залежності  $\sigma_{CT}=f(m_m)$ , представлені на рис. 3.

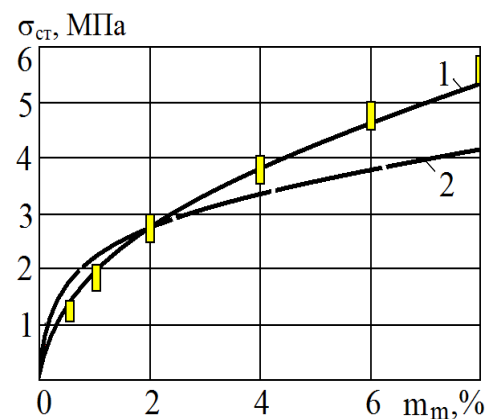


Рисунок 3 – Залежності  $\sigma_{CT}=f(m_m)$ , відповідні руйнуванню суміші за адгезійним (1) і когезійним (2) механізмом (маркери – експериментальні дані)

Прийнявши  $\rho_p=2,65 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_m=2,44 \text{ г/см}^3$ ,  $\varphi=f(\rho_{pc})$ ,  $n=6$ ,  $k=0,00\dots0,06$ ,  $z_A=4,7 \cdot 10^4$  за формулою (10), розраховали і побудували залежності  $\sigma_{CT}=f(m_m, D)$ , які надані на рис. 4,а, а на рис. 4,б надано залежності  $\sigma_{CT}=f(m_m, \rho_{pc})$  при  $D = 0,023 \text{ см}$ . На рис. 4,в

надано залежність  $\sigma_{CT}=f(D)$ , що побудована за експериментальними даними при  $m_m = 2\%$  та часом структурування паро- мікрохвильовим випромінюванням у продовж 3 хв.

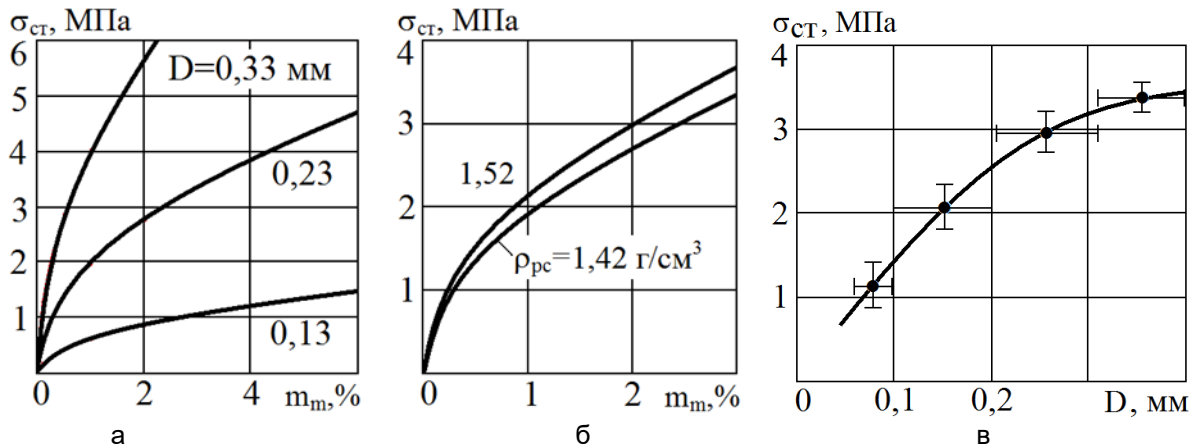


Рисунок 4 – Залежність межі міцності при стисненні піщано-рідкосткляної суміші, структурованої по ПМЗ-процесу від маси рідкого скла (понад 100% піску), використаного на плакування кварцового піску, діаметра піщинок (а)

і питомої щільності рідкого скла (б), що розраховані за формулою (10), та побудована за експериментальними даними (в)

Аналіз ходу залежностей на рис. 3 та рис. 4 показує, що міцність суміші структурованої по ПМЗ-процесу зростає за статичної залежності зі збільшенням вмісту рідкого скла, яке пішло на плакування піску, розмірів частинок піску (за інших рівних умов) та питомої щільності рідкого скла.

Якщо для опису досліджуваного процесу використовувати  $\pi$ -теорему, то кінцевий результат її використання для сумішей піску і сполучного матеріалу можна представити у вигляді:

$$\sigma = z_H \cdot \varphi \cdot \frac{V_M}{V_p} \cdot \frac{1}{S_p} = z_H \cdot \varphi \cdot \frac{m_M}{\rho_M} \cdot \frac{\rho_p}{m_p} \cdot \frac{1}{S_p} = z_H \cdot \varphi \cdot k \cdot \frac{\rho_p}{\rho_M} \cdot \frac{1}{S_p}, \quad (12)$$

де  $z_H$  – поправочний коефіцієнт;  $\varphi$  – масова частка в'язкої речовини в сполучному матеріалі;  $m_M$ ,  $m_p$  – маса сполучного матеріалу і піску в суміші відповідно;  $\rho_M$ ,  $\rho_p$  – питома щільність сполучного матеріалу (силікату натрію) і піску відповідно;  $S_p$  – питома площа поверхні піску.

З аналізу (12) випливає, що міцність структурованої суміші підвищується зі збільшенням вмісту в ній сполучної речовини і, відповідно, маси в ній в'язкого матеріалу, що пов'язано з питомою щільністю використаного рідкого скла, а також зі зниженням питомої поверхні піску, тобто, зі збільшенням діаметру його піщинок. З викладеного випливає, що висновки щодо впливу основних параметрів структурованої суміші по ПМЗ-процесу з аналізу формули (12) повністю узгоджуються з раніше отриманими теоретичними результатами та експериментальними даними (див. рис. 4).

**Обговорення результатів.** З аналізу ходу залежностей і положення експериментальних маркерів на рис. 3 випливає, що руйнування суміші кварцового піску, плакованого рідким склом, структурованого по ПМЗ-процесу проходить по адгезій-

ному механізму. Тобто адгезійна міцність з'єднання силікату натрію в манжетах і кварцових піщинок менше когезійної міцності даних матеріалів. При цьому, структурування плакованого піску по ПМЗ-процесу дозволяє забезпечити суміші досить високу міцність ( $\sigma_{CT}=1,3\dots1,5 \text{ МПа}$ ) вже при вмісті в ній силікату натрію  $\sim 0,25\dots0,30 \%$  (див. рис. 4) і цей показник зростає зі збільшенням середнього діаметра частинок піску (див. рис. 4,а). Слід зазначити, що у зв'язку з тим, що руйнування ПРС проходить по адгезійному механізму, то одним з напрямів збільшення їх міцності є активація поверхні піщинок кварцового піску або розробки піщаних сумішей з штучно зміненим певним фракційним складом.

Таким чином, руйнування сумішей, структурованих по ПМЗ-процесу, проходить переважно за адгезійним механізмом і при такому способі структурування практично весь сполучний матеріал знаходиться в манжетах. Причиною такого адресного переміщення силікату натрію по поверхні піщинок (див. рис. 5,а), вочевидь, є його насичення водою під час ПМЗ-обробки (див. рис. 5,б), перехід

цього розчину в стан легкорухливої рідини (див. рис. 5,в) і її плівкового сповзання під дією капілярних сил до точок міжзеренного контакту (див. рис. 5,г) з утво-

ренням рідких манжетів (див. рис. 5,д) і їх подальшим дегідратуванням (висиханням) під дією мікрохвильового випромінювання.

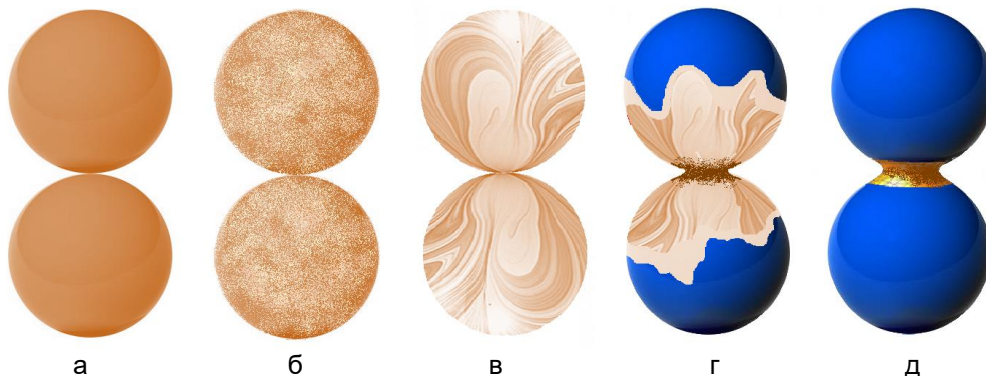


Рисунок 5 – Схематичне зображення піщинок, які контактують між собою, плакованих силікатом натрію (а), перехід силікату натрію в водний розчин (б), плівкова течія рідкого скла по поверхні піщинок (в), формування манжета навколо точки міжзеренного контакту (г)

**Висновки.** Встановлено, що у ПРС, структурованих по ПМЗ-процесу:

- руйнування носить адгезійний характер;
- міцність при стисненні і розтягуванні визначається масштабним фактором їх структурних складових – площею поверхні контакту піщинки і манжетом з дегідратованого силікату натрію;
- практично весь сполучний матеріал (силікат натрію) в структурованій суміші знаходиться в міжзеренних манжетах;

- підвищення міцності можна досягти шляхом збільшення вмісту в суміші силікату натрію, підвищення уявної щільності використовуваного для плакування натрієвого рідкого скла, а також, за інших рівних умов, підвищення середнього діаметра зерен піску.

#### Бібліографічний опис

1. Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. [Состояние и перспективы мирового рынка металлоотливок и место в нем отечественного литейного производства](#). Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка. 2018. №3. С. 66-70.
2. Пономаренко О.И., Евтушенко Н.С. Технологический процесс получения холоднотвердеющих смесей на основе олигофурфурилоксисилаксановых связующих. Литье и металлургия. 2016. №2 (83). С. 31-38. ISSN 1683-6065.
3. Ткаченко С.С., Колодий Г.А., Знаменский Л.Г., Ермоленко А.А. Холоднотвердеющие смеси и неорганическом связующем: состояние и перспективы развития (неорганика против органики). Литье и металлургия. 2018. №2 (91). С. 16-22. ISSN 1683-6065.
4. Мазорчук В.Ф., Наумова И.Ю., Репях С.И., Шаркова С.Ф. Напряжения в полых цилиндрических комбинированных отливках. Науковий Вісник ННУ. 2018. № 3. С.94-100. ISSN 2071-2227. (Scopus)
5. Крутилин А.Н., Гуминский Ю.Ю., Русевич О.А. Повышение эффективности использования жидкостекольных смесей. Часть 3. Нано дисперсные материалы. Литье и металлургия. 2018. №3 (92). С. 31-35. ISSN DOI: 10.21122/1683-6062-20189-92-3-31-35. ISSN 1683-6065.
6. Антошкина Е.Г., Смолко В.А. Процессы формирования прочности песчаных формовочных и стержневых смесей. Вестник ЮУрГУ. 2012. №5. С. 6-8. ISSN 1990-8482.
7. Дорошенко С.П., Авдокушин В.П. Формовочные материалы и смеси. Киев: Вища школа, 1990. 415 с.
8. Гуляев Б.Б., Корнюшкин О.А. Формовочные процессы. Ленинград: Машиностроение, 1987. 264 с.
9. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. Москва: Машиностроение, 1989. 288 с.
10. Ключкина Т.Д., Власова К.А., Леонов А.А., Яшина С.А. Изучение механизма образования прочности в самотвердеющих смесях с фенольным связующим (обзор). Труды ВИАМ. 2018. №3 (63). С. 18-27. ISSN 2307-6046.
11. Шинский О. И., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И. Влияние состава, дисперсности и температуры охлаждения формовочных материалов на прочностные свойства низкотемпературных форм. Металл и литье Украины. 2016. № 11-12. С. 19-23. ISSN 2077-1304.
12. Холоднотвердеющая смесь для изготовления литейных форм и стержней: пат. [2187405](#) Российская федерация: МПК В22С 2/16. № 2000127346/02; заявл. 01.11.200; опубл. 20.08.2002, Бюл. № 15. 3 с.
13. Суспензия для изготовления керамических форм: пат. 2241571 Российская федерация: МПК В22С 1/16. № 2005108433/02; заявл. 25. 03.2005; опубл. 20.09.2006, бюл. № 26. 4 с.
14. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: пат. 2425732 Российская федерация: МПК В22С 1/02. № 2010130970/02; заявл. 23.07.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22. 6 с.

**References**

1. Gnatush V.A., Doroshenko V.S. Sostoyaniye i perspektivy mirovogo rynka metallootlivok i mesto v nem otechestvennogo liteynogo proizvodstva. Oborudovaniye i instrument dlya professionalov. Metalloobrabotka. 2018. №3. S. 66-70.
2. Ponomarenko O.I., Yevtushenko N.S. Tekhnologicheskiy protsess polucheniya kholodnotverdeyushchikh smesey na osnove oligofurfuriloksisislaksanovykh svyazuyushchikh. Lit'ye i metallurgiya. 2016. №2 (83). S. 31-38. ISSN 1683-6065.
3. Tkachenko S.S., Kolodiy G.A., Znamenskiy L.G., Yermolenko A.A. Kholodnotverdeyushchiye smesi n neorganicheskom svyazuyushchem: sostoyaniye i perspektivy razvitiya (neorganika protiv organiki). Lit'ye i metallurgiya. 2018. №2 (91). S. 16-22. ISSN 1683-6065.
4. Mazorchuk, V.F., Naumova I.YU., Repyakh S.I., Sharkova S.F. Napryazheniya v polykh tsilindricheskikh kombinirovannykh otlivkakh. Naukovyi Visnyk NHU. 2018. № 3. S.94-100. ISSN 2071-2227. (Scopus)
5. Krutilin A.N., Guminskiy YU.YU., Rusevich O.A. Povysheniye effektivnosti ispol'zovaniya zhidkostekol'nykh smesey. Chast' 3. Nano dispersnyye materialy. Lit'ye i metallurgiya. 2018. №3 (92). S. 31-35. ISSN DOI: 10.21122/1683-6062-20189-92-3-31-35. ISSN 1683-6065.
6. Antoshkina Ye.G., Smolko V.A. Protssy formirovaniya prochnosti peschanykh formovochnykh i sterzhnykh smesey. Vestnik YUUrGU. 2012. №5. S. 6-8. ISSN 1990-8482.
7. Doroshenko S.P., Avdokushin V.P. Formovochnyye materialy i smesi. Kiyev: Vishcha shkola, 1990. 415 s.
8. Gulyayev B.B., Korniyushkin O.A. Formovochnyye protsessy. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1987. 264 s.
9. Zhukovskiy S.S. Prochnost' liteynoy formy. Moskva: Mashinostroyeniye, 1989. 288 s.
10. Klyukvina T.D., Vlasova K.A., Leonov A.A., Yashina S.A. Izucheniye mekhanizma obrazovaniya prochnosti v samotverdeyushchikh smesyakh s fenol'nykh svyazuyushchim (obzor). Trudy VIAM. 2018. №3 (63). S. 18-27. ISSN 2307-6046.
11. Shinskiy O. I., Lysenko T.V., Solonenko L.I. Vliyaniye sostava, dispersnosti i temperatury okhlazhdeniya formovochnykh materialov na prochnostnyye svoystva nizkotemperaturnykh form. Metall i lit'yo Ukrainy. 2016. № 11-12. S. 19-23. ISSN 2077-1304.
12. Kholodnotverdeyushchaya smes' dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney: pat. 2187405 Rossiyskaya federatsiya: MPK V22S 2/16. № 2000127346/02; zayavl. 01.11.200; opubl. 20.08.2002, Byul. № 15. 3 s.
13. Suspenziya dlya izgotovleniya keramicheskikh form: pat. 2241571 Rossiyskaya federatsiya: MPK B22C 1/16 . № 2005108433/02; zayavl. 25. 03.2005; opubl. 20.09.2006, byul. № 26. 4 s.
14. Smes' dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney: pat. 2425732 Rossiyskaya federatsiya: MPK B22C 1/02. № 2010130970/02; zayavl. 23.07.2010; opubl. 10.08.2011, Byul. № 22. 6 s.

*Стаття поступила: 21.10.2019*