

**Л.І. Солоненко**<sup>1</sup>, канд. техн. наук., доц. каф. технології та управління ливарними процесами,  
e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

**С.І. Реп'ях**<sup>2</sup>, д-р техн. наук., проф. каф. ливарне виробництво, e-mail: 123rs@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>

**О.П. Білий**<sup>2</sup>, ст. викл. каф. ливарне виробництво, e-mail: baplitvo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>

<sup>1</sup>Державний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

<sup>2</sup>Національна металургійна академія України (Дніпро, Україна)

## Вплив піщано-рідкоскляних форм, структурованих паро-мікрохвильовим затвердінням, на пригар і шорсткість поверхні виливків

Метою цієї роботи є вивчення впливу піщано-рідкоскляних форм, структурованих за способом паро-мікрохвильового затвердіння (ПМЗ-процес), на пригар і шорсткість виливків. У дослідженнях використовували форми, що були виготовлені за Cold-box-amin-процесом, Resol-CO<sub>2</sub>-процесом, CO<sub>2</sub>-процесом та ПМЗ-процесом, які заливали сталлю 30Л. Зразки виливків зі сталей 30Л, 20Х27Н18С2Л, сірого чавуну СЧ20, бронз БрА9ЖЗЛ, БрО5Ц5С5, БрО4Ц4С17 і алюмінієвого сплаву АЛ2 відливали в форми, що виготовлені за ПМЗ-процесом. Перегрів всіх сплавів над температурою ліквідус при заливці становив 120 ± 7 °С. Мікроструктуру зразків сталі 30Л досліджували на оптичному мікроскопі МБС-10 до і після їх травлення ніталем. Параметри шорсткості визначали на профілометрі в комплекті з інформаційно-обчислювальним комплексом мод. 170622.

Встановлено, що якість поверхні виливків, виготовлених за ПМЗ-процесом, не поступається якості поверхні виливків, виготовлених в формах за Cold-box-amin, Resol-CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-процесами, і для виливків зі сплаву АЛ2 знаходиться на рівні якості (по чистоті поверхні) з виливками, що виготовляють в оболонкових формах. Якщо врахувати, що ПМЗ-процес екологічно безпечніший, ніж Cold-box-amin, Resol-CO<sub>2</sub>-процес, і економічніший, ніж Cold-box-amin, Resol-CO<sub>2</sub> і CO<sub>2</sub>-процес, то цей спосіб виготовлення форм і стрижнів, з числа перерахованих способів, при наявності відповідного обладнання та оснащення, є найбільш перспективним для виготовлення середнього і дрібного литва загальномашинобудівного призначення із залізобетонних і легкоплавких кольорових сплавів. Виходячи з викладеного, перспективні дослідження повинні бути спрямовані на встановлення закономірностей впливу ряду основних параметрів плакованих рідкоскляних сумішей і умов виготовлення форм і стрижнів за способом ПМЗ на якість литва та оптимізацію умов структурування подібних сумішей в умовах виробництва виливків в сучасних ливарних цехах.

**Ключові слова:** вилівок, шорсткість поверхні, пригар, пісок, рідке скло, плакування, паро-мікрохвильове затвердіння.

**Вступ.** Виникнення дефектів на поверхнях виливків (пригар, ужиміна, наріст, засмічення, просічка, газова шорсткість, газові раковини і т. ін.) обумовлено певною невідповідністю властивостей розплаву і умов його заливки та рівнем фізико-хімічних і технологічних властивостей використаних ливарних форм і/або стрижнів (ЛФС) [1, 2].

З числа поверхневих дефектів, які можливо механічно усунути, найбільш часто на виливках зустрічається пригар. За механізмом виникнення пригар поділяють на хімічний, механічний і термічний. Якісну

класифікацію пригару за способом його видалення з поверхні вилівка і виду відокремлюваних при цьому часток пригару, що наведено в табл. 1 і табл. 2, одним з перших дав Ф.Д. Оболенцев [3].

У разі необхідності, для кількісної оцінки пригару використовують відносні величини трудовитрат на його видалення стиранням або ударом [4].

Залежно від властивостей сполучного і зернистого матеріалу форми і стрижня, кількості сполучного матеріалу, температури розплаву, що заливають в форму, металостатичного тиску у формі, хімічної ак-

Таблиця 1

**Якісна оцінка пригару на виливках за Ф.Д. Оболенцевим**

Категорія пригару	Ступінь труднощів видалення пригару при очищенні
Дуже сильний	Пригар з великими труднощами видаляється пневматичним зубилом і лише разом з металом тіла виливка. Поверхня виливка після очищення посічена зубилом, і на ній залишаються смуги міцно пригорілої суміші.
Сильний	Пригар насилу видаляється пневматичним зубилом. Поверхня виливка посічена зубилом. Місцями залишаються ділянки пригорілої суміші.
Середній	Пригар добре видаляється пневматичним зубилом. Ручним зубилом теж може бути видалений, але з великими труднощами. Поверхня виливка після очищення дуже шорстка.
Слабкий	Пригар успішно видаляється ручним зубилом. Поверхня виливка після очищення трохи шорстка.
Дуже слабкий	Пригар легко очищується ручним зубилом. Поверхня виливка після очищення не має слідів пригару.
Немає пригару	Поверхневий шар спеченої суміші легко очищується ударами молотка, навіть без застосування ручного зубила. Поверхня виливка після очищення гладка.

Таблиця 2

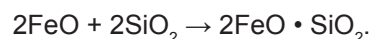
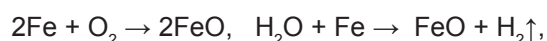
**Оцінка пригару за способом видалення за Ф.Д. Оболенцевим**

Спосіб видалення пригару	Бал
Ударом молотка по виливку	1
Сталевою щіткою (ручною, механічною)	2
Піскоструминним очищенням	3
Дробоструминним очищенням	4
Пневматичним зубилом – пластинами	5
Пневматичним зубилом – дрібними частинками разом із шаром металу виливка	6

тивності суміші по відношенню до залитого у неї розплаву, виду газового середовища в капілярних каналах і робочій порожнині форми і т. ін., для одного і того ж сплаву, який залито у форми з різних сумішей, а також для різних сплавів, залитих в форми з однакової суміші, рівень якісної і кількісної оцінки пригару може бути різним.

З цього випливає, що на виливку може з'явитися як хімічний, механічний або термічний пригар, так і пригар хіміко-термічний, термо-механічний та інші більш складні види пригару.

*Хімічний пригар* у вигляді чорного шару формульованої або стрижневої суміші, що прилягає до поверхні виливка, найбільш часто утворюється на виливках з вуглецевої сталі і чавуну. Для даних сплавів, хімічний пригар – це шар формульованої суміші, просочений великою кількістю оксидів заліза. За даними Жуковського С.С., Дорошенко С.П. та інших вчених, такі оксиди, наприклад, на сталевих виливках, з'являються в результаті послідовного проходження на межі розплав-форма або розплав-стрижень наступних хімічних реакцій:



При цьому кисень, який взаємодіє з залізом сплаву, присутній в повітрі, а волога і оксид кремнію – у формульованій суміші. В результаті цих хімічних реакцій утворюється фаяліт – склоподібна хімічна сполука з аморфною структурою. У складі фаяліту ( $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ) у невеликій кількості також присутній оксид марганцю [5, 6]. При кімнатній температурі такий пригар характеризується крихкістю (наявністю склоподібної фази з аморфною структурою) і легкістю відділення від виливка. Зі зменшенням частки оксидів заліза і марганцю у шарі пригару формуються хімічні сполуки з кристалічною структурою, і пригар стає важковидальним з поверхні виливка [7, 8]. Тобто, для отримання на сталевому виливку легковидального пригару підвищують температуру заливки металу в форму, в формульовану та стрижневу суміш додають невелику кількість рідкого скла (РС) або порошокподібних оксидів заліза, для попередження утворення пригару – обмежують окислення поверхні виливка у формі, фарбують або облицьовують робочі поверхні форми меленим хромистим залізняком тощо.

Водночас при використанні сухих піщано-глинистих форм або форм і стрижнів на основі РС на

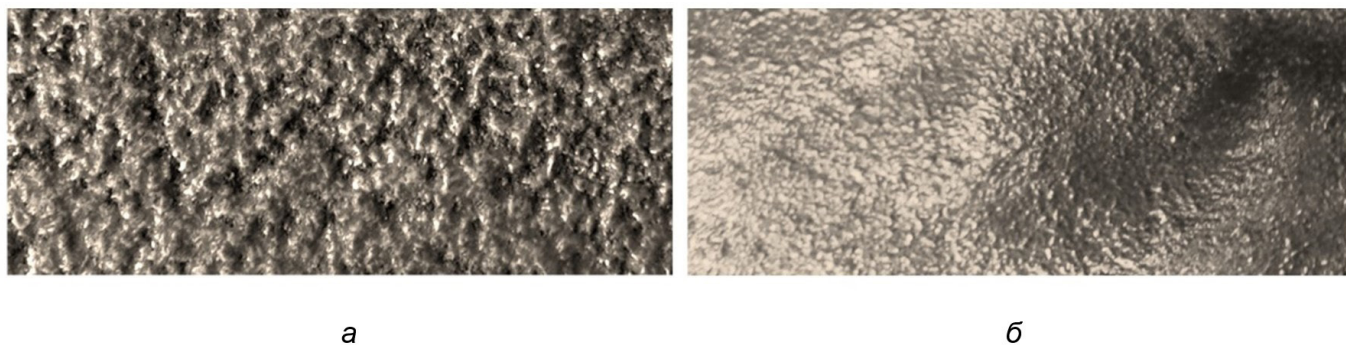


Рис. 1. Вид пласкої поверхні вилівка з бронзи БрО5Ц5С5 з механічним пригаром, відлитим в піщано-рідкоскляну форму за CO<sub>2</sub>-процесом з 5 % РС (а) і з 8 % РС та 10 % золи-виносу теплової електростанції (б), ×7

чавунних виливках утворюється товстий важковидальняємий від вилівка шар пригару. Виходячи з цього, при виробництві виливків з чавуну робочі поверхні сухих кварцових форм та стрижнів покривають вогнетривкими фарбами, що містять графіт.

На поверхні виливків з високолегованих хромонікелевих сталей формується невеликий шар легковидаляемого пригару, оскільки оксиди хрому, що виникають під час заливання і охолодження розплаву в формі, не утворюють хімічних сполучень з двоокисом кремнію.

Водночас на поверхні вилівка з високомарганцевої сталі у піщано-рідкоскляних ЛФС виникає значної товщини важковидальняємий шар механічного пригару, що обумовлено високою хімічною активністю проникаючих у формувальну або стрижневу суміш з поверхні вилівка оксидів залізу і марганцю [9, 10].

*Механічний пригар* – самий важковидальняємий з поверхні виливків вид пригару. Це обумовлено тим, що в шарі механічного пригару сполучним матеріалом є сам метал вилівка. Ймовірність появи механічного пригару на вилівку збільшується з підвищенням металостатичного тиску в формі, зі збільшенням розмірів частинок піску в формувальній/стрижневій суміші, зі зменшенням уявної щільності матеріалу форми і стрижня, з підвищенням змочування піску розплавом, зі збільшенням тривалості затвердіння розплаву в формі тощо.

У ливарних цехах в піщано-рідкоскляні суміші для попередження появи на сталевих виливках механічного пригару додають хлориди марганцю і кальцію, суміш магнетиту (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) і гематиту (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), замінюють

кварцовий пісок на цирконовий і т. ін., в піщано-глинисті суміші вводять сульфат алюмінію тощо [11, 12]. При литті бронзи, що містить олово і/або свинець, в піщано-рідкоскляну суміш додають пилоподібний кварц, золу-виносу теплової електростанції і т. ін.

Слід зазначити, що застосування зазначених вище технологічних прийомів з ряду причин також не завжди дозволяє досягти позитивного результату. Зокрема, про це свідчить вид пласкої поверхні вилівка з бронзи БрО5Ц5С5 з механічним пригаром, який був відлитий в піщано-рідкоскляну форму за CO<sub>2</sub>-процесом з 5 % РС, і поверхні вилівка без пригару, який було відлито в піщано-рідкоскляну форму за CO<sub>2</sub>-процесом з 8 % РС і 10 % золи-виносу теплової електростанції, що наведені на рис. 1.

З аналізу зображень на рис. 1 випливає, що використання золи-виносу в складі піщано-рідкоскляної форми, виготовленої за CO<sub>2</sub>-процесом, дозволяє уникнути появи на виливках механічного пригару. Разом з цим пласкі поверхні таких виливків характеризуються значною хвилястістю (див. рис. 1, б), що слід враховувати при призначенні на них припуску під подальшу механічну обробку.

*Термічний пригар* – вид легковидаляемого пригару, який з'являється у результаті спікання або сплавлення між собою компонентів формувальної або стрижневої суміші. Зі свого боку спікання або сплавлення компонентів суміші визначається рівнем їх вогнетривкості. Зокрема, в піщано-глинистих сумішах ймовірність появи термічного пригару тим вище, чим більше в них міститься глини, речовин-плавнів тощо. Для попередження виникнення даного виду пригару

Таблиця 3

**Шорсткість поверхні виливків, виготовлених різними видами лиття [16]**

Вид лиття	Шорсткості поверхонь виливків (мкм) з:	
	чорних металів	легкоплавких кольорових металів
В піщані форми	320–160	320–80
В кокіль	320–40	160–20
За витоплюваними моделями	80–20	80–2,5
В оболонкові форми	160–40	80–20
Під тиском алюмінієвих і мідних сплавів	–	40–2,5

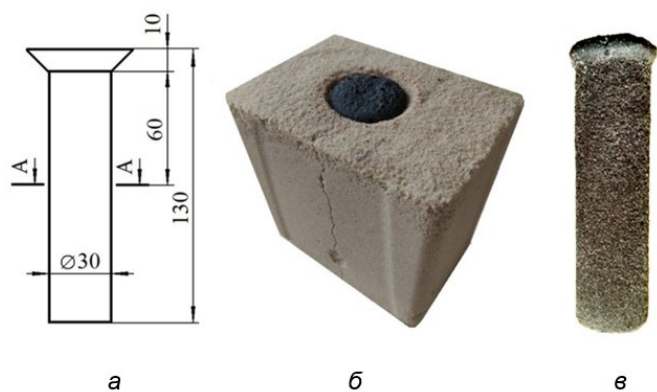


Рис. 2. Схема циліндричного зразка (а), вид залитої ливарної форми (б) і вибитого з форми зразка (в)

в піщано-глинисті суміші вводять коксове, торф'яне або солом'яне борошно, пилоподібну деревну тирсу, використовують сполучні органічного походження, порошок вермикуліту і т. ін. [13, 14].

Шорсткість поверхні виливків є одним зі здавальних показників якості виливків і залежить від значного числа параметрів виробництва лиття та властивостей сплавів виливків, а так само виду і параметрів пригару на поверхні виливка [15, 16]. Узагальнені дані про величину шорсткості поверхні виливків, виготовлених різними видами лиття, наведено в табл. 3.

Аналіз викладеного вище і даних табл. 3 підтверджує, що вид пригару і шорсткість поверхні виливків залежать як від властивостей сплаву виливка, так і властивостей ЛФС.

Для виливків, отриманих в формах, що виготовлені за ПМЗ-процесом, який є перспективним з багатьох точок зору [17–19], дані про пригар і шорсткість їх поверхні до теперішнього часу відсутні.

**Постановка задачі.** Структурування піщано-рідкоскляних сумішей паро-мікрохвильовим затвердінням (ПМЗ-процес) на сьогодні є новим і одним з перспективних напрямів в ливарному виробництві. Однак дані про якість поверхні виливків, що виготовляються в таких формах, відсутні. Тому робота, яка спрямована на дослідження впливу піщано-рідкоскляних ЛФС, структурованих за ПМЗ-процесом, на

пригар і шорсткість поверхні виливків, є актуальною.

**Мета роботи.** Вивчення впливу піщано-рідкоскляних форм, структурованих за ПМЗ-процесом, на пригар і шорсткість виливків.

**Об'єкт і методика досліджень.** Об'єкт досліджень – поверхня виливків, які були отримані в піщано-рідкоскляних формах, структурованих за ПМЗ-процесом.

У дослідженнях використовували форми, виготовлені за Cold-box-атін-процесом з 2 %мас. сполучної речовини, Resol-CO<sub>2</sub>-процесом з 5 %мас. сполучної речовини, CO<sub>2</sub>-процесом з 5 %мас. сполучної речовини і за ПМЗ-процесом з 1 %мас. сполучної речовини. Зразки виготовляли зі сталей 30Л, 20Х27Н18С2Л, сірого чавуну СЧ20, бронз БрА9ЖЗл, БрО5Ц5С5, БрО4Ц4С17, алюмінієвого сплаву АЛ2. Перегрів розплаву всіх сплавів при заливанні в форму складав 120 ± 7 °С.

Вплив типу формувальної суміші на якість поверхні виливків зі сталі 30Л оцінювали візуально на зразках циліндричної форми, схема яких, вид залитої ливарної форми і вибитого з форми зразка представлено на рис. 2.

Для металографічних досліджень зразки зі сталі 30Л, відлиті в форми з різних сумішей, розрізали по лінії А-А (див. рис. 2, а). Мікроструктуру зразків досліджували на оптичному мікроскопі МБС-10 до і після їх травлення ніталем. Об'ємний вміст перліту в зразках визначали за зображеннями мікроструктури 5-ти полів кожного шліфа на видаленні 5 мм від їх циліндричної поверхні в перерізі А-А з використанням комп'ютерної програми ImageJ 1.53e (<http://imagej.nih.gov/ij>).

Параметри шорсткості литих поверхонь виливків визначали на профілометрі в комплекті з інформаційно-обчислювальним комплексом мод. 170622. З метою мінімізації впливу величини металостатичного напору в формі на величину шорсткості поверхні виливків, а також визначення впливу вмісту РС, яке було використане на плакування кварцового піску, температури перегріву розплаву при заливці, відливали клиноподібні виливки трапецієподібної форми з алюмінієвого сплаву АЛ2. Схему моделі клиноподібного виливка представлено на рис. 3, а, схему траси

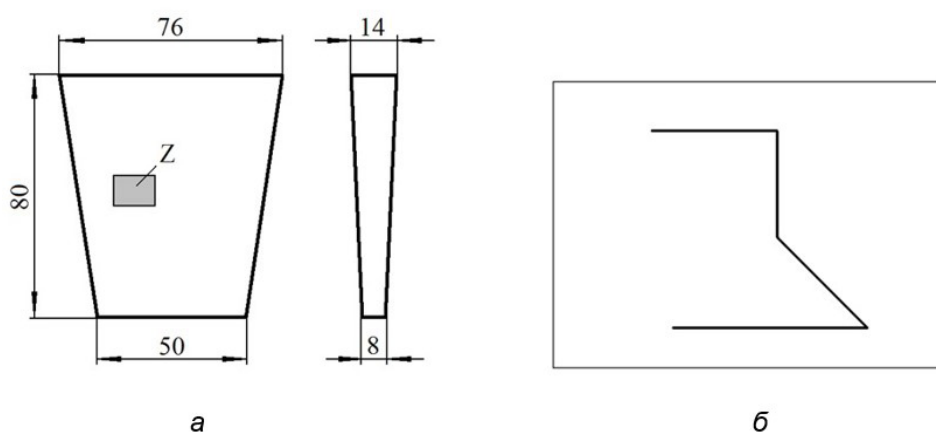


Рис. 3. Схема моделі клиноподібного виливка для визначення параметрів шорсткості її поверхні на ділянці Z (а) і траси профілометра на ділянці Z (б)



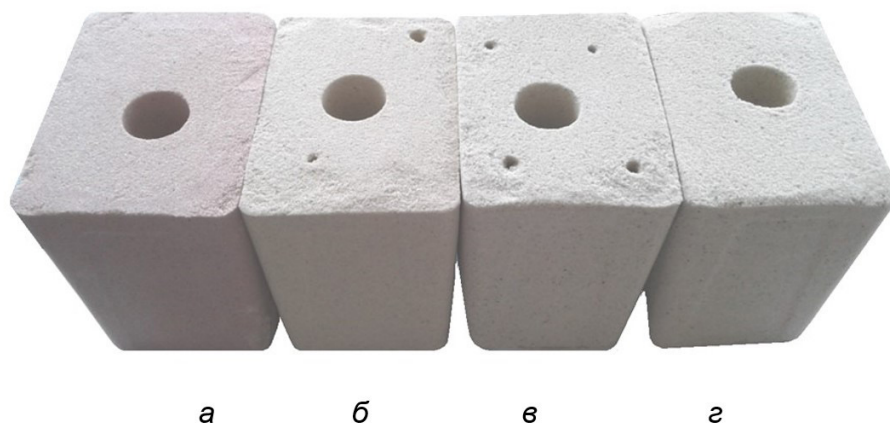


Рис. 4. Ливарні форми, які виготовлені за Cold-box-аміп-процесом (а), Resol-CO<sub>2</sub>-процесом (б), CO<sub>2</sub>-процесом (в), ПМЗ-процесом (з)

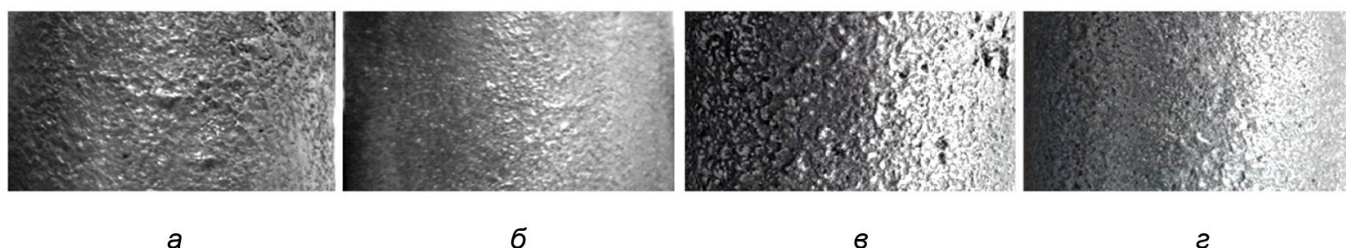


Рис. 5. Вид поверхні (×2,5) циліндричних виливків зі сталі 30Л, отриманих в ливарній формі, які виготовлено за Cold-box-аміп-процесом (а), Resol-CO<sub>2</sub>-процесом (б), CO<sub>2</sub>-процесом (в), ПМЗ-процесом (з)

профілометра загальною довжиною не менше 8 мм – на рис. 3, б.

Уявну щільність структурованих сумішей розраховували за формулою:

$$\rho_2 = m/V,$$

де  $m$  – маса зразка, кг;  $V$  – об'єм зразка, м<sup>3</sup>.

Масу визначали зважуванням на електронних вагах з точністю 0,1 г. Об'єм зразків розраховували за результатами вимірювання їх розмірів.

**Результати досліджень.** Для якісного визначення впливу типу формувальної суміші, на пригар і якість поверхні виливків, виготовляли форми, вид яких представлено на рис. 4.

Через 2 години, з моменту закінчення виготовлення форми, заливали сталлю 30Л. Візуальну оцінку якості поверхні зразків, фрагменти яких представлено на рис. 5, проводили після їх очищення металевою щіткою.

З аналізу візуальної оцінки якості поверхонь зразків випливає, що з числа випробовуваних формувальних сумішей краща якість поверхні у зразків, отриманих в формах за Resol-CO<sub>2</sub> (рис. 5, б) і ПМЗ-процесами (рис. 5, з). Гірша якість поверхні у зразків, відлитих в формах за Cold-box-аміп (рис. 5, а) і CO<sub>2</sub>-процесами (рис. 5, в).

Мікроструктури зразків сталі 30Л, отриманих в різних формах, до і після їх травлення ніталем, представлено на рис. 6.

З рис. 6, б випливає, що незалежно від виду ливарної форми, мікроструктури всіх зразків подібні і являють собою суміш фериту і перліту. Об'ємний вміст перліту у зразках, отриманих в формах за Cold-box-

аміп-процесом, складає 48,7–50,5 %, за Resol-CO<sub>2</sub>-процесом – 58,2–59,9 %, за CO<sub>2</sub>-процесом – 37,1–39,3 % і за ПМЗ-процесом – 49,7–52,1 %. Встановлена величина об'ємного вмісту перліту в структурі сталі 30Л опосередково свідчить про те, що з числа досліджуваних ливарних форм найбільша швидкість охолодження виливків у формі, виготовленої за Resol-CO<sub>2</sub>-процесом, а в формі, виготовленої за CO<sub>2</sub>-процесом – найменша. У той же час, швидкість охолодження виливків у формах, виготовлених за ПМЗ-процесом, порівнянна зі швидкістю охолодження виливків у формах за Cold-box-аміп-процесом.

При цьому на нетравлених шліфах (див. рис. 6, а) зразків спостерігається різна за площею усадкова пористість (темні плями). За результатами візуальної оцінки, найменша усадкова пористість у зразка, який отримано в формі, виготовленої за ПМЗ-процесом, найбільша пористість у зразка, отриманого в формі, виготовленої за Cold-box-аміп-процесом.

Для визначення виду і класифікації пригару за Ф.Д. Оболенцевим, візуальної оцінки виду поверхні виливків після їх очищення, в піщано-рідкоскляні форми, що виготовлені за ПМЗ-процесом, відливали циліндричні зразки з різних сплавів. Вид поверхонь циліндричних зразків до і після їх механічного очищення наведено в табл. 4.

З аналізу виду поверхонь (див. табл. 4) випливає, що механічний пригар на всіх без винятку зразках був відсутній. Пригар на зразках зі сталі і чавуну відноситься до різновидів хімічного пригару. При цьому кірка пригару на сталевих зразках була тендітною і відокремлювалася легко вже під час вибивання зразка з форми. Пригар на чавунному зразку був пухкий важ-

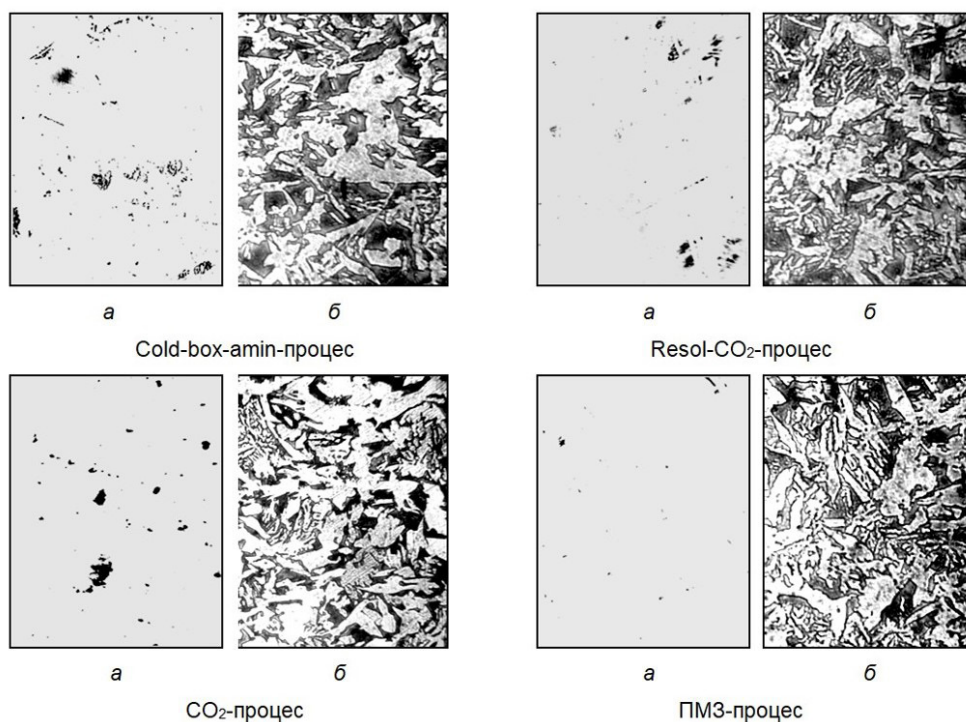


Рис. 6. Поверхня нетравлених (а) і травлених ніталем (б) шліфів сталі 30Л.  $\times 200$



Рис. 7. Вид робочих поверхонь форми (а), форма в зборі після склеювання її половин (б), форма залита розплавом сплаву АЛ2 (в)

ковидальєний. Поверхня зразків з бронз і алюмінієвого сплаву була покрита шаром термічного пригару, що виник в результаті спікання силікату натрію в формувальній суміші, що прилягає до поверхні зразків.

Термічний пригар на всіх зразках легко відокремлювався в процесі очищення їх металевою щіткою, пригар з поверхні зразка зі сплаву АЛ2 видаляли ворсовою щіткою.

Для визначення шорсткості поверхні виливків зі сплаву АЛ2, заливали клиновидні виливки в клеєні форми. Половини таких форм були виготовлені з сумішей, які мали різний вміст РС і структуровані за ПМЗ-процесом. Одна половина такої форми містила 1 %мас. РС, інша – 2,5 %мас. РС (понад 100 % піску). Вид робочих поверхонь форми, форма в зборі після склеювання її половин, форма залита розплавом сплаву АЛ2 представлені на рис. 7.

В роботі клиновидні виливки виготовляли не тільки в формах з різним вмістом РС в плакованих шарів, але і заливали розплав при різній величині перегріву, що слідує з даних табл. 5.

Вид литої поверхні клиноподібних виливків з алюмінієвого сплаву АЛ2 представлено на рис. 8.

Результати вимірювання і обчислення параметрів шорсткості поверхні трапецієподібних клиновидних зразків з алюмінієвого сплаву АЛ2 представлено на рис. 9 і в табл. 6.








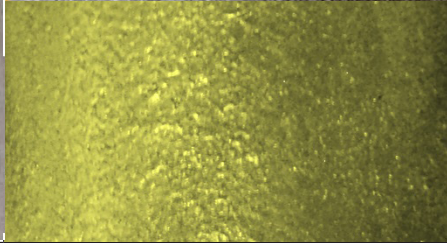

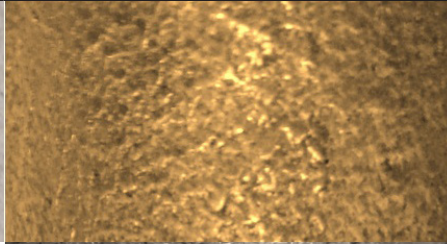
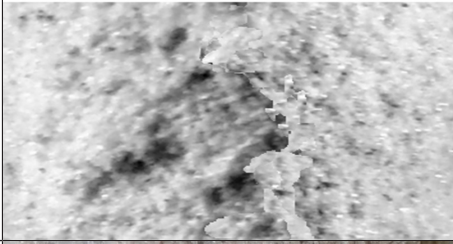
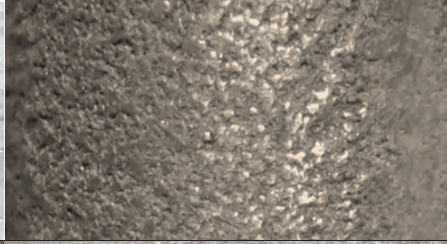


Результати визначення параметрів шорсткості литих поверхонь свідчать про те, що зі збільшенням вмісту в суміші РС, використаного для плакування кварцового піску, а також температури перегріву розплаву при заливці в форму, клас шорсткості поверхні виливків збільшується. В даному випадку від 5–6 класу за ГОСТ 26645 у зразків, розплав яких при заливці мав перегрів 120 °С, а пісок був плакований 1 %мас. РС, до 10–14 у зразків, розплав яких при заливці мав перегрів 160 °С, а пісок був плакований 2,5 %мас. РС. При цьому збільшення перегріву розплаву підвищує шорсткість на 4–6 класів, а збільшення вмісту РС – на 1–3 класів.

Слід зазначити, що шорсткість поверхні виливка, що твердіє в суміші з РС, використаного для плакування



Таблиця 4

Вид поверхонь циліндричних зразків, відлитих в піщано-рідкоскляні форми, що виготовлені за ПМЗ-процесом

Марка сплаву (категорія і бал пригару за класифікаціями Ф.Д. Оболенцева)	Вид пригару на виливку після його вибивання	Вид поверхні виливка після очищення металевою щіткою (для алюмінієвого сплаву – ворсовою щіткою)
Сталь 30Л (пригар дуже слабкий, бал – 1)		
Сталь 20X24H18C2Л (пригар дуже слабкий, бал – 1)		
Чавун сірий СЧ20 (пригар слабкий, бал – 2)		
Бронза БрА9ЖЗл (пригар дуже слабкий, бал – 1)		
Бронза БрО5Ц5С5 (пригар слабкий, бал – 2)		
Бронза БрО4Ц4С17 (пригар слабкий, бал – 2)		
Сплав алюмінієвий АЛ2 (пригару немає, бал – 1)		

Таблиця 5

Нумерація клиновидних виливків і особливості їх виготовлення

Номер вилівка	Масовий вміст РС, що використано на плакування кварцового піску, %	Температура перегріву розплаву при заливці, °С
1	1	120
2	2,5	
3	1	160
4	2,5	

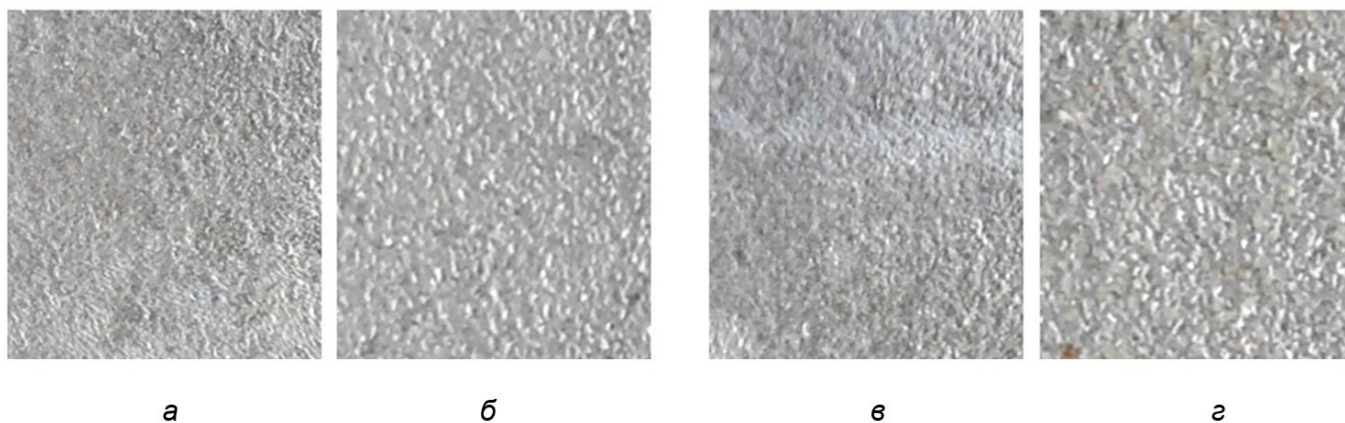


Рис. 8. Вид литої поверхні клиноподібного вилівка (див. табл. 5) № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в); № 4 (г), ×7

Таблиця 6

Величини показників шорсткості зразка

Показник	Розмірність	Величина для зразка			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Вміст РС, що пішло на плакування піску	%мас. (понад 100 % піску)	1	2,5	1	2,5
Перегрів розплаву АЛ2 при заливці в форму	°С	120 ± 5	120 ± 5	160 ± 5	160 ± 5
Клас шорсткості	за ГОСТ 2789	4	4	3	3-2
	за ISO 1302	9	9–10	10–11	11–12
	за ГОСТ 26645	5–6	5–8	9–11	10–14
Середньоарифметичне відхилення (Ra)	мкм	5,19–6,20	6,17–7,52	12,4–20,4	16,6–35,5
Висота нерівності по 10 точкам (Rz)	мкм	22,0–31,2	25,6–27,6	52,5–68,5	77,1–96,2
Максимальна висота нерівностей (Rmax, Ry)	мкм	42,5–32,3	42,1–36,8	85,1–112,0	126,0–191,0
Висота максимального виступу (Rp)	мкм	20,1–10,3	19,4–11,8	47,9–64,5	64,4–101,0
Глибина максимальної западини (Ry, Rm)	мкм	22,1–26,6	20,6–25,0	37,2–47,4	61,7–90,1
Середній крок нерівності (Sm)	мкм	114,0–98,6	204,0–135,0	140,0–186,0	196,0–249,0
Середній крок місцевих виступів (S)	мкм	12,3–14,2	15,9–13,6	17,4–24,6	20,1–31,7
Середня довжина хвилі (λa)	мкм	153,0–117,0	150,0–157,0	161,0–208,0	207,0–294,0



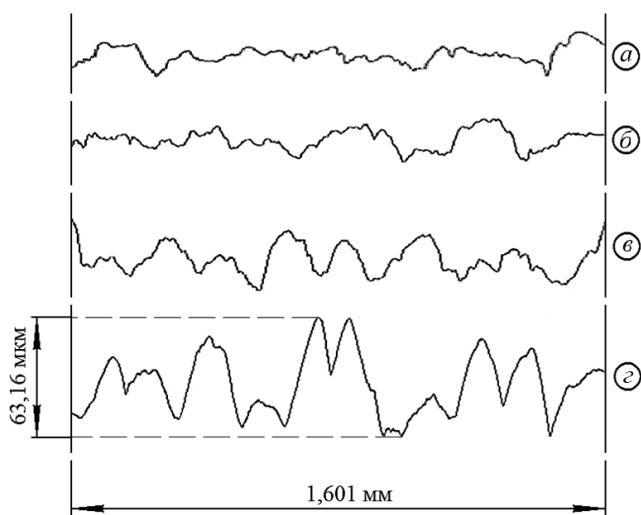


Рис. 9. Фрагмент комп'ютерного протоколу профілограм поверхонь зразків № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в) та № 4 (г)

кварцового піску, залежить і від способу підготовки плакованого піску до структурування. Зокрема, використання плакованого піску, просіяного попередньо через сито з осередком 0,4 мм, дозволяє виготовляти ЛФС з більшою уявною щільністю, ніж плакований пісок, просіяний через сито з осередком 0,63. Про це свідчить хід залежностей, представлених на рис. 10.

У свою чергу, як відомо, підвищення уявної щільності матеріалу ЛФС сприяє не тільки зменшенню величини шорсткості виливка, але і знижує ймовірність появи на ній механічного пригару.

**Обговорення результатів.** Порівняльний аналіз мікроструктур циліндричних зразків зі сталі 30Л показав, що незалежно від типу формувальної суміші їх мікроструктури практично ідентичні. Якість поверхні зразків зі сталі 30Л в міру її поліпшення дозволяє використати ливарні форми встановити в наступний ряд:

CO<sub>2</sub>-процес → Cold-box-amin-процес → ПМЗ-процес → Resol-CO<sub>2</sub>-процес.

З цього випливає, що при необхідності підвищення чистоти поверхні виливків, робочі поверхні ЛФС, які виготовляють за ПМЗ-процесом, доцільно попередньо покрити вогнетривкою фарбою на розчиннику органічного походження, наприклад, ізопропілового спирту. Щоб уникнути появи важковидляемого пригару на виливках, що найбільш ймовірно при заливці в форми чавуну, олов'яної або свинцевої бронзи або в разі значного металостатичного тиску в формі, робочі поверхні ЛФС, як і в описаному вище випадку, слід покрити вогнетривкою фарбою.

Шорсткість поверхні виливків, виготовлених в формах, структурованих за ПМЗ-процесом, відповідає 5–8 класу за ГОСТ 26645 (при просіюванні плакованого піску через сито з розміром осередку 0,4 мм) і знаходиться на рівні шорсткості поверхні лиття, що виготовляється в оболонкові форми (див. табл. 3). При цьому при інших рівних умовах, шорсткість поверхні виливка залежить не тільки від масового вмісту РС, використаного для плакування кварцового піску, а й фракційного складу використовуваного плакованого піску.

Така закономірність обумовлена величиною уяв-

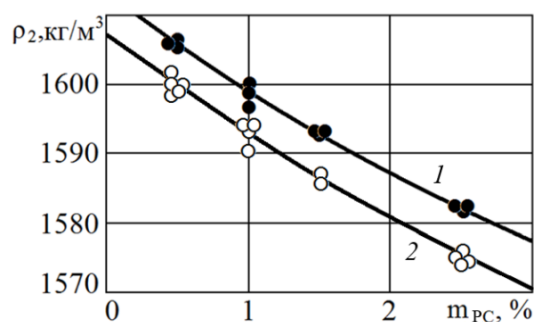


Рис. 10. Залежність уявної щільності піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за ПМЗ-процесом, від маси РС, використаного для плакування кварцового піску і величини осередку сита при просіюванні плакованого піску: 1 – сито з осередком 0,4 мм; 2 – сито з осередком 0,63 мм

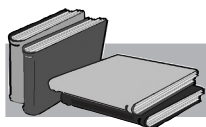
ної щільності структурованої суміші (ливарної форми, стрижня), яка зі свого боку в способі ПМЗ залежить від величини конгломератів зерен використовуваного піску і визначається величиною осередку сита, використовуваного для просіювання сухого плакованого піску перед його структуруванням.

Ливарні форми і стрижні, виготовлені за способом ПМЗ, можна використовувати як з незабарвленими, так і пофарбованими вогнетривкою фарбою робочими поверхнями для виробництва виливків із сталей, чавуну, бронзи, алюмінієвих сплавів.

## Висновки і перспективи досліджень

Якість поверхні виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом, не поступається якості поверхні виливків, виготовлених в формах за Cold-box-amin, Resol-CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-процесами і знаходиться на рівні якості (за чистотою поверхні) з виливками, що виготовляють в оболонкових формах. Якщо врахувати, що ПМЗ-процес екологічно безпечніший, ніж Cold-box-amin, Resol-CO<sub>2</sub>, і економічніший, ніж Cold-box-amin, Resol-CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-процеси, то цей спосіб виготовлення ЛФС, з числа перерахованих способів, при наявності відповідного обладнання та оснащення, є найбільш перспективним для виготовлення дрібного і середнього литва загальномашинобудівного призначення із залізобетонних і легкоплавких кольорових сплавів.

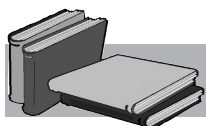
Перспективні дослідження повинні бути спрямовані на встановлення закономірностей впливу ряду основних параметрів плакованих рідкоскляних сумішей і умов виготовлення ЛФС за способом ПМЗ на якість литва та оптимізацію умов структурування подібних сумішей в умовах виробництва виливків сучасних ливарних цехів.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Разумов М.С., Глазков П.В., Вязников П.В., Вантеев А.В., Бышкин А.С. Выбор рациональной температуры литья алюминия марки АК-9. *Современные материал, техника и технологии*. 2019. № 6 (27). С. 4–7.
2. Илларионов И.Е. Пути улучшения качества отливок. *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 1 (18). С. 39–42.
3. Оболенцев Ф.Д. Качество литых поверхностей. М.-Л.: Машгиз, 1961. 182 с.
4. Черногоров П.В., Васин Ю.П. Получение отливок с чистой поверхностью. М.: Машгиз, 1961. 144 с.
5. Кукуй Д.М., Николайчик Ю.А., Судник Л.В. Термодинамический анализ химических реакций в контактной зоне металл-противопригарное покрытие. *Литейное производство*. 2012. № 3 (57). С. 51–56.
6. Николайчик Ю.А., Рудницкий Ф.И., Батайчук А.В., Мудрый В.В. Анализ методов профилактики пригара на поверхности стальных и чугунных отливок. *Литейное производство*. 2015. № 1 (78). С. 23–28.
7. Ягопольский А.Г., Куцай А.Ю., Савохина О.М., Зайцев А.Н. Повышение эксплуатационных характеристик литых станин и корпусных деталей на стадии их изготовления. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2015. № 3 (660). С. 35–41.
8. Крушенко Г.Г. Повышение чистоты поверхности металлоизделий с применением нанотехнологий. *Вестник СубГАУ*. 2016. № 2 (17). С. 484–489.
9. Stagno E. Behaviour of sintered 410 low carbon steels towards ion nitriding. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. № 24. P. 2122–2134.
10. Zhao J., Jiang Z. Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*. 2018. № 94. P. 174–242.
11. Швецов В.И., Иванов М.А., Кулаков Б.А., Каркарин А.М. Процессы образования и предотвращения пригара на стальных отливках. *Вестник ЮУрГУ*. 2015. № 1 (15). С. 17–23.
12. Ясюков В.В., Воронова О.И., Рудницкий Я.М. Влияние пригара на свойства отливок и меры борьбы с ним. *Металл и литье Украины*. 2016. № 6 (227). С. 17–21.
13. Васильовский И.В. Пригар на отливках. М.: Машиностроение, 1983. 192 с.
14. Лакедемонский А.В., Кваша Ф.С., Медведев Я.И. и др. Литейные дефекты и способы их устранения. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
15. Одарченко И.Б., Прусенко И.Н. Процессы взаимодействия жидкого металла и литейного стержня при формировании качества внутренних полостей отливок. *Литейное производство*. 2015. № 4 (81). С. 33–37.
16. Кечин В.А., Селихов Г.Ф., Афонин А.Н. Проектирование и производство литых заготовок. Владим. гос. ун-т. Владимир, 2002. 228 с.
17. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І. Кінетика структування піщано-рідкоскляних сумішей паро-мікрохвильовим затвердінням. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 4. С. 50–60. URL: [https://nmetau.edu.ua/file/9\\_.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/9_.pdf)
18. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І., Усенко Р.В. Міцність піщано-рідкоскляної суміші, яка структурована способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 6. С. 33–39. URL: [https://nmetau.edu.ua/file/ktmp\\_4778.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/ktmp_4778.pdf)
19. Solonenko L.I., Usenko R.V., Dziubina A.V., Uzlov K.I., Repiakh S.I. Sodium silicate solute foaming in a flat slot-type capillary under microwave radiation influence. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 6. P. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/034>

Надійшла 13.01.2021



## REFERENCES

1. Razumov, M.S., Glazkov, P.V., Vyaznikov, P.V., Vanteev, A.V., Byshkin, A.S. (2019). Selection of a rational temperature for casting AK-9 aluminum. *Modern material, technique and technology*, no. 6 (27), pp. 4–7 [in Russian].
2. Illarionov, I.E. (2016). Ways to improve the quality of castings. *Theory and technology of metallurgical production*, no. 1 (18), pp. 39–42 [in Russian].
3. Obolentsev, F.D. (1961). The quality of the cast surfaces. Moscow-Leningrad: Mashgiz, 182 p. [in Russian].
4. Chernogorov, P.V., Vasin, Yu.P. (1961). Obtaining castings with a clean surface. Moscow: Mashgiz, 144 p. [in Russian].
5. Kukuy, D.M., Nikolaychik, Yu.A., Sudnik, L.V. (2012). Thermodynamic analysis of chemical reactions in the contact zone of a metal-non-stick coating. *Foundry*, no. 3 (57), pp. 51–56 [in Russian].

6. Nikolaychik, Yu.A., Rudnitskiy, F.I., Bataychuk, A.V., Mudryi, V.V. (2015). Analysis of methods for preventing burn-in on the surface of steel and iron castings. *Foundry*, no. 1 (78), pp. 23–28 [in Russian].
7. Yagopolskiy, A.G., Kutsaya, A.Yu., Savokhina, O.M., Zaitsev, A.N. (2015). Improving the operational characteristics of cast beds and body parts at the stage of their manufacture. *News of higher educational institutions. Mechanical engineering*, no. 3 (660), pp. 35–41 [in Russian].
8. Krushenko, G.G. (2016). Improving the surface cleanliness of metal products using nanotechnologies. *Bulletin of SibGAU*, no. 2 (17), pp. 484–489 [in Russian].
9. Stagno, E. (2015). Behavior of sintered 410 low carbon steels towards ion nitriding. *Journal of Alloys and Compounds*, no. 24, pp. 2122–2134.
10. Zhao, J., Jiang, Z. (2018). Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*, no. 94, pp. 174–242.
11. Shvetsov, V.I., Ivanov, M.A., Kulakov, B.A., Karkarin, A.M. (2015). Processes of formation and prevention of burn-in on steel castings. *Bulletin of SUSU*, no. 1 (15), pp. 17–23 [in Russian].
12. Yasyukov, V.V., Voronova, O.I., Rudnitskiy, Ya.M. (2016). Effect of burn-in on the properties of castings and measures to combat it. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 6 (227), pp. 17–21 [in Russian].
13. Vasilovsky, I.V. (1983). Burn-in on castings. Moscow: Mashinostroenie, 192 p. [in Russian].
14. Lakedemonskiy, A.V., Kvasha, F.S., Medvedev, Ya.I. et al. (1972). Foundry defects and methods for their elimination. Moscow: Mashinostroenie, 152 p. [in Russian].
15. Odarchenko, I.B., Prusenko, I.N. (2015). Processes of interaction of liquid metal and a casting core during the formation of the quality of the internal cavities of castings. *Foundry*, no. 4 (81), pp. 33–37 [in Russian].
16. Kechin, V.A., Selikhov, G.F., Afonin, A.N. (2002). Design and manufacture of cast billets. Vladim. state un-t. Vladimir, 228 p. [in Russian].
17. Solonenko, L.I., Repyakh, S.I., Uzlov, K.I. (2019). Kinetics of sand-sodium silicate solute mixtures structuring by steam-microwave solidification. *Theory and practice of metallurgy*, no. 4, pp. 50–60. URL: [https://nmetau.edu.ua/file/9\\_.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/9_.pdf) [in Ukrainian].
18. Solonenko, L.I., Repyakh, S.I., Uzlov, K.I., Usenko, R.V. (2019). Strength of sand-sodium-silicate mixture structured by steam-microwave solidification method. *Theory and practice of metallurgy*, no. 6, pp. 33–39. URL: [https://nmetau.edu.ua/file/ktmp\\_4778.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/ktmp_4778.pdf) [in Ukrainian].
19. Solonenko, L.I., Usenko, R.V., Dziubina, A.V., Uzlov, K.I., Repiakh, S.I. (2020). Sodium silicate solute foaming in a flat slot-type capillary under microwave radiation influence. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 6, pp. 34–40, doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/034>

Received 13.01.2021

## Summary

**L.I. Solonenko**<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Associated Professor at the Department of Technology and Management of Foundry Processes,  
 e-mail: [solonenkoli14@gmail.com](mailto:solonenkoli14@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>  
**S.I. Repyakh**<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Professor at the Department of Foundry,  
 e-mail: [123rs@ua.fm](mailto:123rs@ua.fm), <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>  
**O.P. Bilyi**<sup>2</sup>, Senior Lecturer at the Department of Foundry,  
 e-mail: [baplitvo@gmail.com](mailto:baplitvo@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>

<sup>1</sup>Odessa Polytechnic State University (Odessa, Ukraine)

<sup>2</sup>National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

## Influence of sand-sodium-silicate molds structured by steam-microwave solidification on castings surface burn-in and roughness

*The purpose of this work is to study the effect of sand-liquid glass molds, structured by the method of steam-microwave hardening (SMH-process), on the burn-in and roughness of the casting. The studies used molds prepared by the Cold-box-amin-process, Resol-CO<sub>2</sub>-process, CO<sub>2</sub>-process and SMH-process, which were filled with 30L steel. Samples of castings were cast in molds made by the SMH-process from steels 30L, 20Kh27N18S2L, gray cast iron SCh20, bronzes BrA9Zh3L, BrO5Ts5S5, BrO4Ts4S17, and aluminum alloy AL2. Overheating of all alloys above the liquidus temperature was 120 ± 7 °C. The microstructure of 30L steel samples was investigated using an MBS-10 optical microscope before and after their etching*



with nital. The roughness parameters were determined on a profilometer complete with an information-computing complex mod. 170622.

From the obtained data, it can be concluded that the surface quality of castings made by the SMH-process is not inferior to the surface quality of castings made in molds by the Cold-box-amin, Resol-CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-process and is at the quality level (in terms of purity surface) with castings made in shell molds. Considering that the SMH-process is environmentally safer than the Cold-box-amin, Resol-CO<sub>2</sub>, more efficient and economical than the Cold-box-amin, Resol-CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-process, then this method of making molds and cores, from among of the above methods, is the most promising for the manufacture of medium and small castings for general machine-building purposes from iron-carbon and low-melting non-ferrous alloys.

Proceeding from the foregoing, prospective studies should be aimed at establishing the regularities of the influence of a number of basic parameters of clad liquid glass mixtures and the conditions for the manufacture of molds and cores by the SMH method on the quality of casting and optimization of the conditions for structuring such mixtures in the conditions of casting production in modern foundries.

**Keywords**

Casting, surface roughness, burn-in, sand, water glass, cladding, steam-microwave hardening.