

ПРИГУНОВА А.Г.¹, ПЕТРОВ С.С.², ПРИГУНОВ С.В.³,
ДЯДЮРА А.С.³

(¹ФТІМС НАН України, м. Київ; ²НМетАУ, м. Дніпропетровськ;

³КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ)

ВПЛИВ ОБРОБКИ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ У РІДКОМУ СТАНІ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АК5М2

E-mail: dyadyura.andrey.ad@gmail.com

АНОТАЦІЯ. Досліджено вплив імпульсного електричного струму на мікроструктуру, морфологію залізовмісних фаз у сплаві АК5М2. Визначено оптимальні параметри частоти і щільності струму, при використанні яких було отримано максимальні показники механічних властивостей. Визначено вплив термічного оброблення на мікроструктуру та властивості виливків, які одержані із сплаву АК5М2, обробленого у рідкому стані імпульсним електричним струмом.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікроструктура, механічні властивості, термічне оброблення

Розвиток сучасного машинобудування неможливий без конструкційних матеріалів, здатних забезпечити високий рівень експлуатаційних властивостей виробів при мінімальних витратах на виробництво. Серед них важливе місце належить сплавам системи Al-Si, що обумовлено сприятливим поєднанням їх технологічних і фізико-механічних властивостей. При цьому значно посилилися вимоги до структури виливків, формування якої, як відомо, починається вже на стадії рідкого металу. За відсутності в Україні виробництва первинного алюмінію основним сировинним ресурсом одержання ливарних сплавів, як загалом і в світі, є брукхт та відходи. Але такі сплави містять значну кількість шкідливих домішок, насамперед заліза, що призводить до погіршення їх механічних властивостей і робить проблематичним виготовлення з них вузлів та деталей відповідального призначення.

Останнім часом все більшого поширення набуває концептуальна ідея генетичного взаємозв'язку структури сплаву у твердому і рідкому станах [1-5]. В технологічному ланцюзі «шихта – розплав – виливок» рідина несе інформацію про природу сировинних матеріалів, їх якість та є благодатним об'єктом для поліпшення структури і властивостей литих виробів фізико-хімічними впливами на розплав, зокрема електричним струмом.

З урахуванням вищесказаного, відповідний інтерес представляє розширення досліджень щодо впливу оброблення рідкої фази електричним струмом на структуру та властивості доєвтектичних силумінів, особливо тих, які виго-

товляються з вторинної сировини. У цьому аспекті заслуговує на увагу однополярний імпульсний електричний струм, який характеризується широким амплітудно-частотним спектром одничного імпульсу з його великими потенційними можливостями змінювати будову розплаву.

Принциповою відмінністю від силумінів, виготовлених із первинних матеріалів, у яких основним елементом структури є Al-Si евтектика, у сплавах, виплавлених із брукхту та відходів, – це евтектики, які містять інтерметаліди з залізом [4]. Зміну структури і механічних властивостей, а також вплив термічного оброблення на сплав АК5М2 після оброблення розплаву однополярним імпульсним електричним струмом не досліджено.

Оброблення розплаву електричним струмом здійснювали за режимами, описаними в [5], в процесі його переміщення по жолобу. Для запобігання контакту розплаву з металевим жолобом у нього вмонтовано діелектричну кварцову трубку. Щільність електричного струму визначали співвідношенням сили струму, визначеної за показниками амперметра, до площі поперечного перерізу потоку розплаву.

Електроди виготовлено з графіту. Один із них виконував роль катода та приймача рідкого сплаву. Через циліндричний отвір іншого (анода), розташованого з протилежного кінця жолоба, оброблений електричним струмом розплав заливали в графітовий тигель або в металеву ливарну форму для одержання зразків для механічних випробувань.

Мікроструктурні дослідження виконували на мікроскопі "Neophot-21". Зразки готували за стандартними методиками. Поверхнєве травлення шліфа здійснювали в 0,5% водному розчині HF протягом 5...20 с. Рентгеноструктурні дослідження проведено на дифрактометрі ДРОН-3М у Cu-K α випромінюванні. Послідовність і механізм фазових перетворень при твердненні вивчали методом «стоп-гартування» [6]. Температури фазових перетворень визначали методом диференціального термічного аналізу [7].

Твердість (НВ) сплавів вимірювали за ГОСТ 9012 на твердомірі типу Брінель моделі ТШ-2М при кімнатній температурі вдавлюванням кульки діаметром 5 мм при навантаженні 250 кгс. Тимчасовий опір розриву (σ_b) при кімнатній температурі визначали на розривній машині Р-5. Випробування проводили на коротких зразках (ГОСТ 1497) діаметром 10 мм з ливарною кіркою, відлитих у спеціальну металеву ливарну форму.

Термічне оброблення виконували в муфельній печі за режимами Т1 ($t_{стар} = (180 \pm 5) ^\circ C$, $\tau_{витр} = 7$ год) та Т5 ($t_{гарт} = (525 \pm 5) ^\circ C$, $\tau_{витр} = 4$ год, охолоджувальне середовище – вода, $t = 20 ^\circ C$; $t_{стар} = (175 \pm 10) ^\circ C$, $\tau_{витр} = 7$ год).

Мікроструктуру сплаву АК5М2 (мас %: Si – 4,7; Cu – 1,97; Mg – 0,23; Mn – 0,28; Fe – 0,8; Ni – 0,17; Zn – 0,5; Al – решта; Mn:Fe = 0,35) у вихідному стані наведено на рис. 1. За даними проведеного гартівно-мікроструктурного аналізу вихідного сплаву АК5М2 (рис. 2) при температурі 600 $^\circ C$ утворюються первинні кристали твердого розчину алюмінію Al $_1^1$ (рис. 2, а). При охолодженні до температури нижче 600 $^\circ C$ з'являється незначна кількість фази (Fe,Mn,Cu) $_3$ Si $_2$ Al $_{15}$ (α), яка формується в процесі евтектичної реакції: P \rightarrow + Al $_{\alpha}$ (рис. 2, б).

Маючи більш складну порівняно з алюмінієвим твердим розчином кристалохімічну природу, тугоплавка фаза α відіграє провідну роль у ході евтектичного перетворення [8]. При досягненні температури 575 $^\circ C$ спостерігаються зміни у фазовому складі – з'являються продукти евтектичного розпаду рідини: P \rightarrow α + Si + Al $_{\alpha}$ (рис. 2, в). Об'ємна частка β -фази теж незначна і в цілком закристалізованому сплаві складає 1,3%. Тому рентгеноструктурним аналізом не виявляється (табл. 1).

При температурі 560 $^\circ C$ утворюється потрійна евтектика β -FeSiAl $_5$ + Si + Al $_{\alpha}$ (рис. 2, г), що є основною евтектичною складовою сплаву АК5М2.

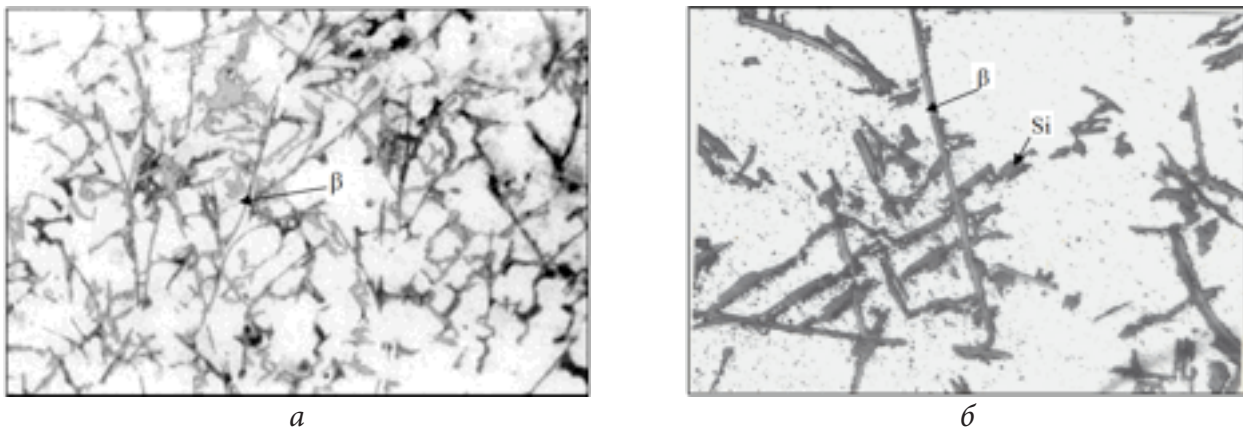


Рис. 1. Мікроструктура сплаву АК5М2 у вихідному стані: а – X400, б – X800

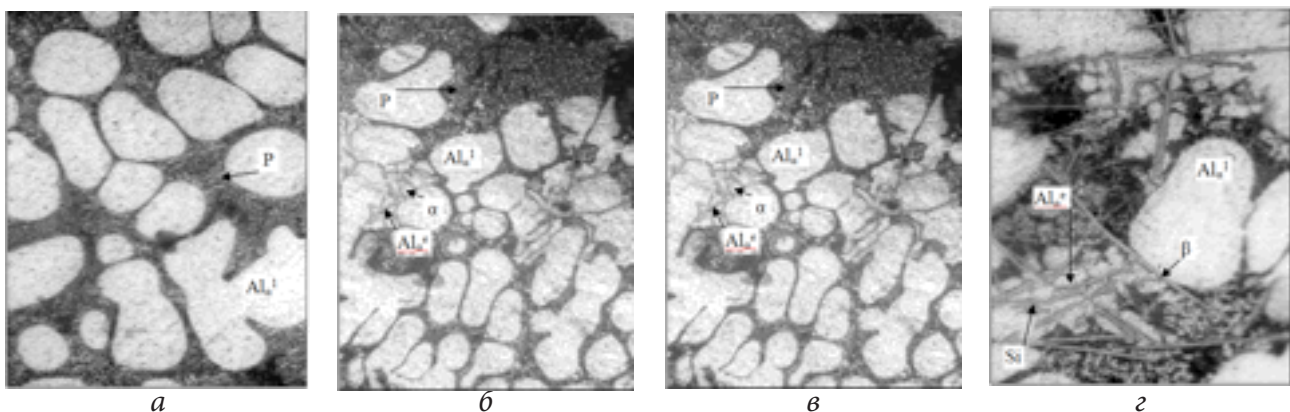


Рис. 2. Початкові етапи формування сплаву АК5М2: а – P \rightarrow Al $_{\alpha}$; б – P \rightarrow α + Al $_{\alpha}$; в – P \rightarrow α + Si + Al $_{\alpha}$; з – P \rightarrow β + Si + Al $_{\alpha}$; а, в, з – X400; б – X250

Провідною фазою евтектичного розпаду рідини $P \rightarrow \beta\text{-FeSiAl}_5 + \text{Si} + \text{Al}_\alpha$ є голкоподібний інтерметалід $\beta\text{-FeSiAl}_5$ (β), що визначає вигляд евтектичної колонії. Наступне, п'яте перетворення супроводжується виділенням фази $\text{FeMg}_3\text{Si}_6\text{Al}_8$ (π) за перитектичною реакцією: $P + \beta \rightarrow \pi + \text{Si} + \text{Al}_\alpha$. Найбільш типовими низькотемпературними перетвореннями є: $P \rightarrow \theta\text{-CuAl}_2 + \text{Si} + \text{Al}_\alpha$ в інтервалі температур 520...491 °C і $P \rightarrow \theta\text{-CuAl}_2 + \text{Mg}_2\text{Si} + \text{Si} + \text{Al}_\alpha$ на останньому етапі тверднення (481...477 °C).

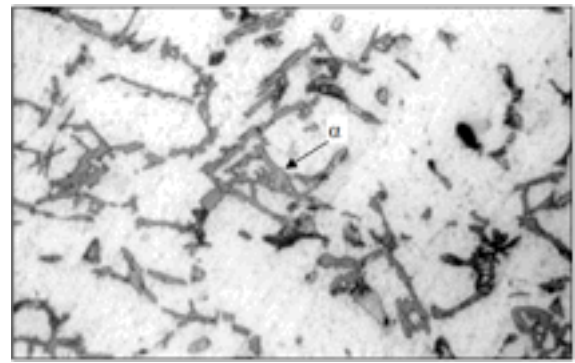
Таблиця 1 – Вплив параметрів оброблення розплаву імпульсним електричним струмом на фазовий склад сплаву АК5М2 за даними рентгеноструктурного аналізу

Режим оброблення ν , Гц	Фази, визначені за допомогою рентгеноструктурного аналізу, $j = 7 \text{ A/cm}^2$						
	$\alpha\text{-Al}$	Si	β	θ	π	α	Mg_2Si
Початковий стан	+	+	+	+	+	-	-
50,00	+	+	+	+	+	-	-
100,00	+	+	-	+	-	-	+
500,00	+	+	-	+	-	+	+
1000,00	+	+	-	+	-	+	+
5000,00	+	+	-	+	+	+	+
50000,00	+	+	+	+	+	-	-

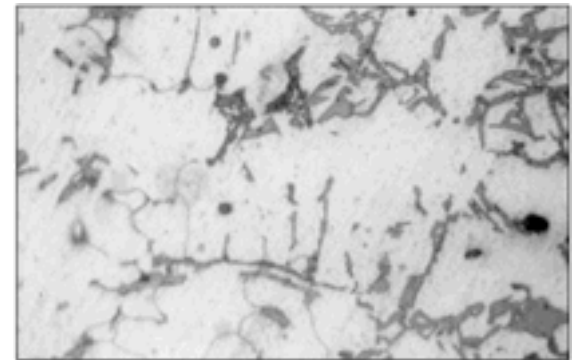
Оброблення сплаву АК5М2 в рідкому стані однополярним імпульсним електричним струмом за способом [5] призводить до значних змін у процесі структуроутворення (рис. 3) та фазового складу (див. табл. 1).

Насамперед, це стосується залізовмісних інтерметалідів, які утворюються на перших етапах тверднення. Так, за даними рентгеноструктурного і металографічного аналізів при деяких режимах оброблення розплаву електричним струмом (див. рис. 3, а, б) реакція розпаду рідини $P \rightarrow \beta + \text{Si} + \text{Al}_\alpha$ пригнічується. Після тверднення голкоподібний інтерметалід β майже відсутній. Стабілізуються перетворення $P \rightarrow \alpha + \text{Al}_\alpha$ і $P \rightarrow \alpha + \text{Si} + \text{Al}_\alpha$, внаслідок чого збільшується об'ємна частка розгалуженої α -фази, яка виявляється як металографічним (див. рис. 3 а, б), так і рентгеноструктурним аналізом (див. табл. 1).

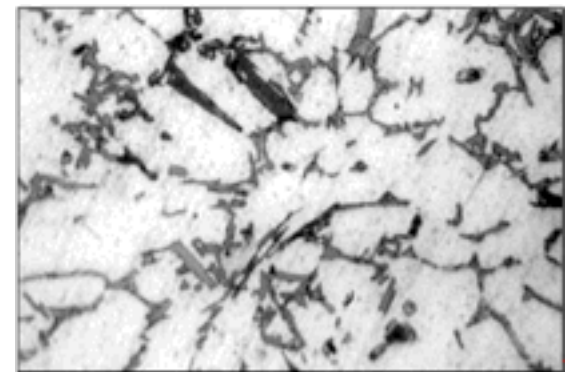
Оброблення рідкого сплаву АК5М2 імпульсним електричним струмом у діапазоні частот від 500 до 6000 Гц, при зміні щільності від 5 до 35 A/cm^2 призводить до практично повної заміни фази β на α . Найбільш ефективним режимом оброблення є: $\nu = 500 \text{ Гц}$, $j = 7...20 \text{ A/cm}^2$, що



а



б



в

Рис. 3. Мікроструктура сплаву АК5М2 після оброблення розплаву електричним струмом ($\times 400$): а - $\nu = 1000 \text{ Гц}$, $j = 7 \text{ A/cm}^2$; б - $\nu = 1000 \text{ Гц}$, $j = 20 \text{ A/cm}^2$; в - $\nu = 50000 \text{ Гц}$, $j = 7 \text{ A/cm}^2$

сприяє підвищенню міцності вторинного сплаву АК5М2 на 50%, пластичності у 3,6 рази, твердості на 15%. За рівнем механічних властивостей це відповідає сплавам АК5М і АК5Мч, які виплавляються з первинних металів.

Термічне оброблення сплавів, виготовлених із вторинної сировини і оброблених у рідкому стані однополярним імпульсним електричним струмом, засвідчило, що незважаючи на те, що процес тверднення здійснюється за метастабільною діаграмою нерівноважного стану, залізовмісні фази, які формуються, характеризуються стабільністю структури та морфології (рис. 4).

Термічне оброблення виливків, одержаних із сплавів, оброблених у рідкому стані однопо-

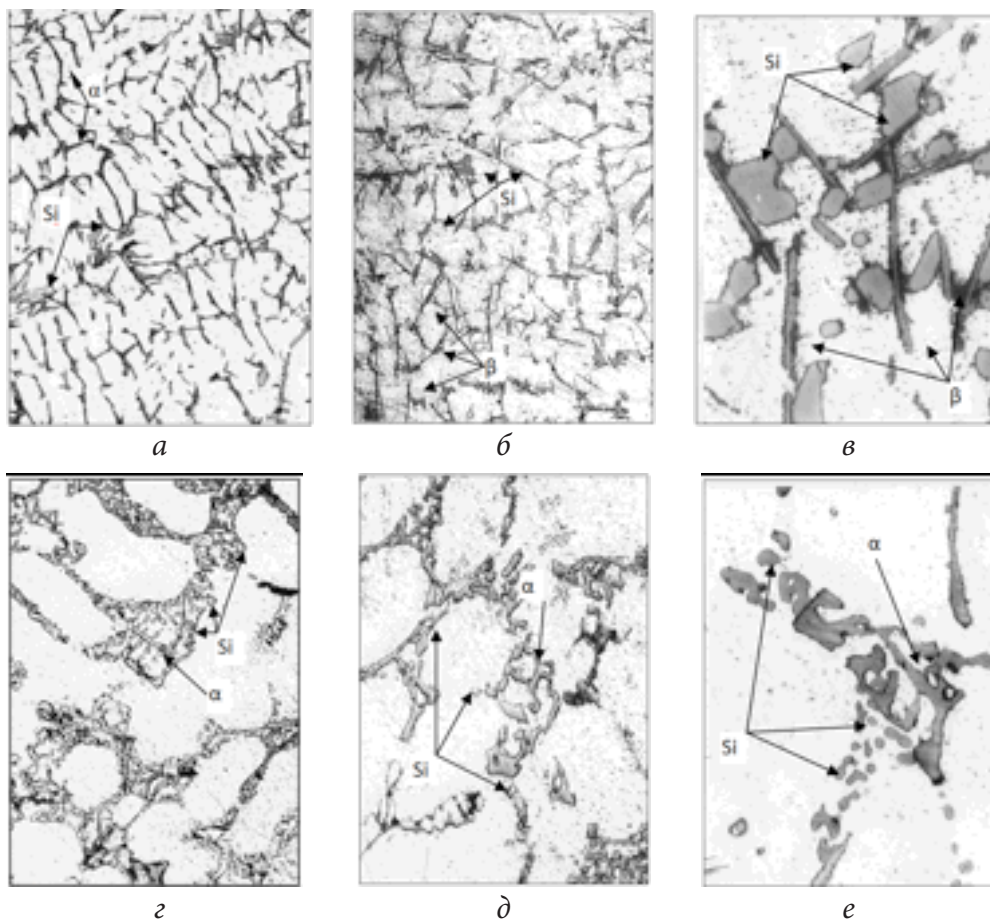


Рис. 4. Вплив режимів термічного оброблення на мікроструктуру та морфологію залізовмісних фаз сплаву AK5M2: а, б, в – вихідний сплав; г, д, е – сплав, оброблений в рідкому стані однополярним імпульсним електричним струмом ($j = 7 \text{ A/cm}^2$; $\nu = 700 \text{ Гц}$); а, г – без термічного оброблення; б, д – штучне старіння (T1); в, е – гартування з неповним штучним старінням (T5); а, б – X200; г, д, – X400; в, е – X800

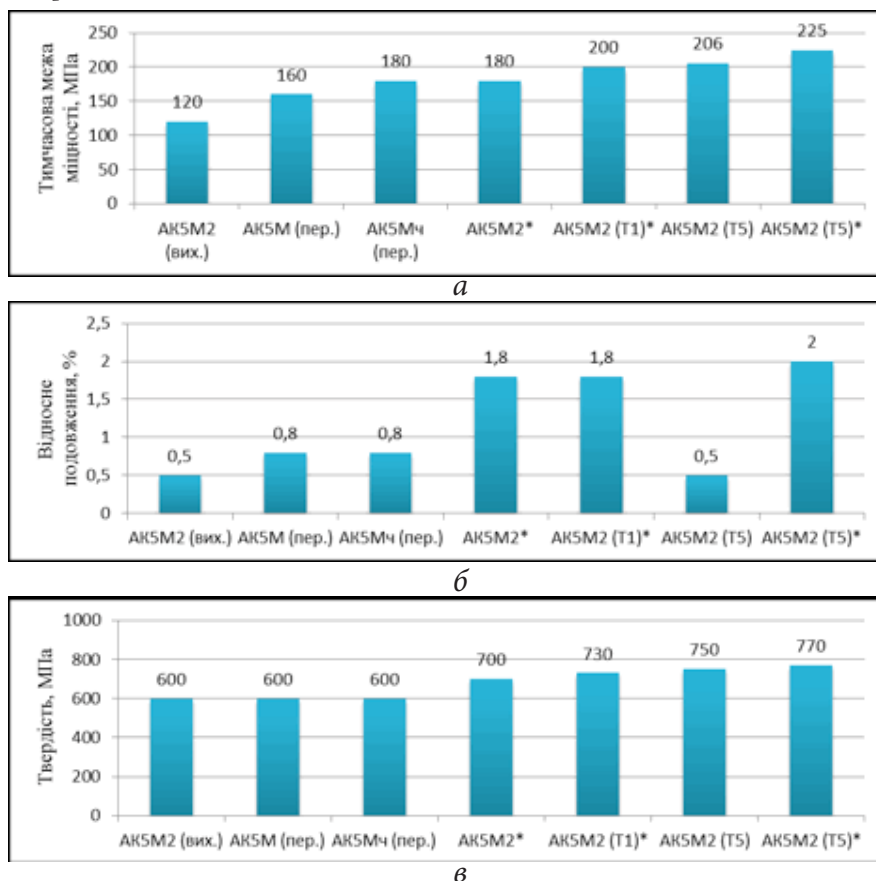


Рис. 5. Механічні властивості сплаву AK5M2 (* – сплав, оброблений імпульсним електричним струмом)

лярним імпульсним електричним струмом, сприяє додатковому підвищенню їх механічних властивостей. Зокрема, при режимах T5, T6 зростання межі міцності (рис. 5, а) і відносного подовження відповідно складає 25,0% і у 1,1 рази (рис. 5, б), при підвищенні твердості сплаву на 10,1% (рис. 5, в).

При цьому, різниця у властивостях між вихідним сплавом і таким, що був оброблений імпульсним електричним струмом з наступним термічним обробленням за режимом T5, досить суттєва: міцність, пластичність і твердість сплавів підвищилися відповідно на 32,3%, у 4 рази і на 1,3%.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Баум Б.А. Взаимовлияние жидкого и твёрдого состояния сплавов / Б.А. Баум, Е.А. Клименков, Г.В. Тягунов, Ю.А. Базин // Изв. АН СССР. Металлы. – 1986. – №3. – С. 19...24.
2. Попель П.С. Влияние структурного состояния расплава на кристаллизацию силуминов / П.С. Попель, В.И. Никитин, И.Г. Бродова [и др.] // Расплавы. – 1987. – Т.1. – Вып. 3. – С. 31...35.
3. Никитин В.И. Наследственность и технологии генной инженерии в литых сплавах / В.И. Никитин // Литейное производство, 2002.–№10. – С. 8...10.
4. Пригунова А.Г. Теорія та технології одержання високоякісних силумінів фізико-хімічними впливами на розплав: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.16.01 «Металознавство та термічна обробка металів» / А.Г. Пригунова. – Дніпропетровськ, 1999. – 34 с.
5. Патент на винахід 101208 Україна, МПК С22В9/00. Спосіб виробництва силумінів / С.С. Петров, С.В. Пригунов, А.Г. Пригунова, Д.Н. Ключник; заявл. 11.02.2011 р, опубл. 11.03.2013 р., Бюл. № 5.
6. Калинушкин Е.П. Применение метода закалки из полужидкого состояния для изучения процесса кристаллизации быстрорежущих сталей / Е.П. Калинушкин, Э.Я. Василёв // Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа. – Днепропетровск: ДМетИ, 1982. – С. 193...198.
7. Száraz, R.Pastirčák, A. Sládek The influence of electrical current on Al–Si alloys crystallization // Archives of Foundry Engineering. – Vol. 8. – Issue 2. – 2008. – P. 133...136.
8. Таран Ю.Н. Структура эвтектических сплавов / Ю.Н.Таран, В.И. Мазур. – М.: Металлургия. – 1978. – 312 с.