

## *Термокінетичні параметри обробки розплаву і структуроутворення литої сталі*

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор

Ж. В. Пархомчук, кандидат технічних наук

В. І. Вейс

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Розглянуто процеси утворення зародків кристалізації та структуроутворення сталі залежно від термокінетичних параметрів обробки розплаву за різних перегрівів над ліквідусом, ізотермічної обробки у передкристалізаційний період та швидкості охолодження розплаву під час кристалізації.*

Зростаючі вимоги сучасного машинобудування щодо більш широкого використання у виробництві ливарних технологій і матеріалів зумовлені можливістю швидкого одержання виливків різних форм і габаритів наближених до готових виробів, низькою собівартістю їх виробництва, значним скороченням обсягів механічної обробки і відходів металу у стружку. Проте у ряді випадків конкурентоспроможність литих виробів порівняно з виробами з прокату сталей, знижують відомі для традиційних технологій лиття прояви ліквациї, транскристалізації, різнозернистості і пористості в певних об'ємах виливків. Не завжди забезпечуються також вимоги щодо потрібної однорідності і дисперсності литої структури, поєднання високих показників міцності, в'язкості і опору крихкому руйнуванню.

Основними параметрами, що визначають характеристики литої структури і властивості литих виробів є градієнт температур рідкої і твердої фаз, протяжність двофазної зони, кінетика виділення твердої фази [1 – 3]. В зв'язку з цим останнім часом набувають розвитку і поширення технології регульованої та швидкісної кристалізації, струменевого формування, суспензійного лиття, спадкового модифікування тощо [4 – 6]. Важливими для керування і підвищення властивостей литих виробів з оптимальним поєднанням високих характеристик міцності і пластичності є не тільки температурно-кінетичні параметри під час кристалізації але й на стадіях підготовки розплаву та у передкристалізаційний період.

Виходячи із сучасних уявлень щодо спадкового зв'язку будови твердого і рідкого металу [7 – 10] на кожному з вказаних технологічних етапів виробництва виливків відкриваються можливості цілеспрямованого керування мікроструктурними характеристиками рідкого, тверднучого і твердого металу за рахунок регламентованої зміни термокінетичних параметрів і використання проявів структурної і технологічної спадковості для підвищення властивостей литих виробів. При цьому забезпечується

реалізація трьох основних механізмів зміцнення – при зменшенні розміру зерен і гальмуванні руху дислокацій границями зерен і субзерен (за Холлом-Петчем), дисперсними фазами (за Орованом) і твердофазного зміцнення [11 – 14].

На першому етапі виготовлення литих виробів практикою ливарного виробництва визначено оптимальний інтервал температур розливки розплаву сталей у ливарні форми з перевищенням температури рівноважного ліквідусу ( $T_L$ ) на 30 – 50 °С оскільки за певного підвищення температури перегріву розплаву розмір зерна у виливках збільшується. Це пов'язують з розчиненням неметалевих включень і дезактивацією домішок, які за невеликих перегрівів могли б слугувати осередками утворення зародків кристалізації і сприяти формуванню більш дрібної литої структури. При цьому за звичайних умов тепловідбору і невеликого переохолодження такого перегрітого розплаву спостерігається не тільки суттєве збільшення розміру зерна але й збагачення міжзеренних границь і міждендритних ділянок окрихчуючими неметалевими фазами.

Відзначаємо, що існуючий спадковий зв'язок будови твердого (шихтового) і рідкого металу задовільно пояснюється з позицій кластерної теорії [15 – 18] і уявлень про енергетичну (хімічну), структурну (фізичну) і часову мікронеоднорідність розплаву [19].

Згідно сучасних уявлень мікронеоднорідний у певному інтервалі температур розплав складається з локальних кристалоподібних угруповань атомів з ближнім порядком розташування, із зниженою енергією, розміром 2 – 5 нм, з тривалістю існування  $10^{-7}$  –  $10^{-8}$  с (кластер, циботаксиси, комплекси), а також розупорядкованих зон атомів з підвищеною енергією. Угруповання атомів з ближнім порядком (кластерів) і розупорядковані зони атомів постійно обмінюються атомами і енергією. Такий мікронеоднорідний розплав немає фізичних поверхонь розділу, зберігає незмінним поняття рідини як однофазної системи. Щодо співвідношення загальних об'ємів кластерів і розупорядкованої зони, а також температури перегріву над ліквідусом, за якою відбувається певне розупорядкування розплаву ( $T_p$ ), це питання залишається дискусійним [20 – 24]. Узагальнюючи ці уявлення можемо прийняти за критичну температуру таку, за якою розплав знаходиться у стані певної гомогенізації, що виключає явище гістерезису при вимірюванні структурно чутливих властивостей, а також наявність великих кластерних угруповань. Нашими дослідженнями сталі Р6М5Л з різною вихідною структурою металу шихти, одержаного за різних умов охолодження під час кристалізації показано, що існує певна температура перегріву розплаву над ліквідусом яка обмежує інтервал збереження структурної спадковості вихідного шихтового металу [25]. Вона не є постійною величиною і визначається певним ступенем розупорядкування (нерівноважності) мікронеоднорідного розплаву зумовленого ступенем нерівноважності і фазово-структурним станом вихідного металу шихти. Відповідно зростанню його нерівноважності підвищується і вказана температура. При перегрівках розплаву нижчих від цієї температури ( $T_p$ ) спадковий зв'язок структури твердого і рідкого металу зберігається. При

перевищенні ж цієї температури вірогідність збереження угруповань атомів з ближнім порядком (кластерів), як носіїв металогенетичних особливостей структури шихтового металу, значно зменшується. За цих умов розплав переходить у більш рівноважний стан і наступне формування литої структури і властивостей виливків визначається вже температурно-часовими умовами кристалізації і твердофазних перетворень при їх охолодженні.

Відзначимо, що різні значення критичних температур при використанні вторинних шихтових матеріалів пов'язані також з накопиченням різних небажаних домішок, неметелевих включень, інтерметалідних фаз і нерівноважних областей ближнього порядку, успадкованих при повторних переплавах сталей. Наявність багатьох типів структур ближнього порядку шихтових матеріалів, різний ступінь їх легованості, гетерофазна будова розплавів зумовлюють мікронеоднорідний стан розплавів і можливість існування кількох температур його переходу у більш рівноважний стан.

Отже з позицій можливостей технологічних впливів на рідкий, тверднучий і твердий литий метал основними є температура розплаву, тривалість температурної обробки на всіх стадіях виготовлення виливків і швидкість охолодження розплаву в інтервалі кристалізації та твердофазних перетворень.

Як вже відзначалось основними елементами структури розплаву є угруповання атомів з ближнім порядком (кластери), а рушійними силами є фізико-хімічні процеси на мезо- і атомному рівні [26, 27]. Численними дослідженнями в основному на сплавах кольорових металів, показано, що за значних перегрівів розплаву (200 – 300 °С) вище температури рівноважності ( $T_p$ ) реалізується найбільш однорідний розподіл атомів, можливий для їх сукупності і існуючих для них хімічних взаємодій. Будова такої системи практично вже не залежить від передісторії металу і визначається природою утворюючих її атомів і термодинамічними параметрами розплаву [17, 22]. Збільшення часу ізотермічної обробки порівняно із звичайним режимом (10 – 15 хв) сприяє підвищенню ступеня рівноважності перегрітого розплаву. Структура литого металу, який одержано з рівноважного розплаву за невисоких швидкостей охолодження характеризується збільшенням розміру зерна і проявів ліквації [28 – 32].

В роботі [30] досліджено вплив температури перегріву розплаву на 200 – 250 °С відносно ліквідусу на температури фазових перетворень, дендритну будову і ліквацію елементів в жароміцних нікелевих сплавах. Показано, що такий перегрів призводить до зменшення температурного інтервалу кристалізації за рахунок зсуву  $T_j$  в область низьких температур, зумовлює збільшення переохолодження розплаву при кристалізації на 10 – 15 °С, покращенню характеристик ліквації. Проте за умов низької швидкості охолодження (20 °С/хв) це не призводить до подрібнення литої структури.

Що ж до швидкості охолодження, то ще в свій час В. І. Даніловим [33] було показано, що подрібнення литої структури при кристалізації перегрітого розплаву може бути досягнуто лише за високих швидкостей тепловідбору тобто при значному підвищенні його переохолодження.

Приклади ефективного використання інтенсивного охолодження розплаву під час кристалізації сталей наведено в роботах [4, 6, 10].

В роботі [29] зроблено ретроспективний огляд даних щодо впливу різновидів термочасової обробки сплавів на основі алюмінію. Показано, що залежно від зміни контрольованих параметрів – температури перегріву розплаву над ліквідусом (200 – 400 °C), тривалості високотемпературної обробки розплаву (2 – 20 хв) і швидкості охолодження під час кристалізації (10 – 10<sup>3</sup> °C/с) закономірно змінюються характеристики литої структури і властивості сплавів. Розглянуто різні технологічні схеми термочасової обробки при яких контролюються: температура перегріву і швидкість охолодження розплаву перед заливкою у форму, швидкість нагріву і температура перегріву розплаву. Показана можливість підвищення дисперсності литої структури і механічних властивостей при оптимальному поєднанні вказаних температурно-часових параметрів – характеристик міцності на 10 – 15 %, пластичності у 1,5 – 2,0 рази, ударної в'язкості на 20 – 30 %.

Баумом Б.А., Хасінім Б.А., Тягуновим Г.В. було показано, що ізотермічна обробка розплаву за певних перегрівів зумовлює підвищення якості литих виробів і характеристик пластичності сталей на 10 – 15 %. При цьому перегрітий розплав перед кристалізацією охолоджують до нормальної температури розливки [7, 17, 22].

Що ж до тривалості високотемпературної ізотермічної обробки розплаву, то в роботах [34 – 36] вказується на можливість досить тривалого існування при цьому металевих розплавів у нерівноважному стані у зв'язку з повільною зміною мікроскопічних характеристик розплаву. Наближення розплаву до стану рівноваги супроводжується послідовним, часом багатостадійним, протіканням процесів, залежних від різних факторів – хімічного складу, кількості і природи домішок, фазово-структурного стану металу шихти тощо. Так, наприклад, у вуглецевих сталях, незважаючи на високий вміст в них неметалевих включень і газів, стан рівноважності встановлюється досить швидко [37]. В цілому тривалість витримки розплаву для стабілізації його структури з певним ступенем рівноважності залежить в першу чергу від температури. За невеликих перегрівів над ліквідусом, притаманних звичайним сталеплавильним процесам, потрібна для цього тривалість ізотермічної обробки, може в кілька разів перевищувати тривалість виплавки сталей. За значних перегрівів розплаву збільшення часу ізотермічної обробки порівняно із звичайним режимом (10 – 15 хв) сприяє підвищенню ступеня рівноважності перегрітого розплаву.

Зміна властивостей виробів з литих сталей після вказаної термочасової обробки пояснюється усуненням проявів негативної металургійної і структурної спадковості за рахунок видалення шкідливих домішок, розчинення неметалевих фаз і відповідної зміни структур ближнього порядку. Низькотемпературна ізотермічна витримка розплаву після його високотемпературної обробки за нормальної температури розливки забезпечує перебудову структури розплаву до рівноважної для даної температури. Тобто така низькотемпературна витримка розплаву перед

розливкою у певній мірі усуває небажаний ефект великого зерна як наслідок високотемпературного перегріву [38].

На цій стадії в інтервалі температур  $T_L = + 50 - 150$  °С «передкристалізаційного періоду» відбувається вказана перебудова кластерної структури і зародження центрів кристалізації. При цьому якщо не реалізується процес відведення тепла у зовнішнє середовище, стає можливим розпад зародків кристалізації що утворились. За відсутності реального відведення тепла такий «мерехтливий» процес утворення і розпаду центрів кристалізації може бути досить тривалим зумовлюючи певну передкристалізаційну підготовку розплаву. Ізотермічна обробка в області температури ліквідусу зумовлює утворення більшої кількості кластерних угруповань атомів з ближнім порядком у передкристалізаційний період і сприяє при кристалізації такого підготовленого розплаву подрібненню зерна і дендритної будови виливків [38]. Необхідною умовою утворення великої кількості зародків кристалізації і подрібнення литої структури є подальше активне відведення теплоти кристалізації при елементарному акті утворення центрів кристалізації тобто досягнення певного значного переохолодження розплаву на фронті кристалізації [2, 15, 16, 39].

Виходячи з того, що для формування дрібнозернистої однорідної литої структури і високих механічних властивостей слід створити умови для виникнення в розплаві значної кількості зародків кристалізації при обмеженій можливості їх швидкого росту, визначального значення набувають процеси в інтервалі температур ліквідус-солідус.

Експериментально підтверджено можливість глибокого переохолодження розплаву і формування подрібненої литої структури металів і сплавів при їх кристалізації за значних переохолодженнях, тобто за умов гомогенного утворення зародків твердої фази [2]. Згідно [40] вдалось досягнути переохолоджень не тільки до умов гомогенного зародкоутворення, але й значно їх перевищити. Для деяких сплавів при  $\Delta T = 170$  К було зафіксовано стрибкоподібне зменшення розмірів зерна майже на порядок і практична відсутність дендритної структури. Проте досягнення таких значних переохолоджень для мас металів, що мають практичне значення, поки що вельми ускладнено. Тому актуальним є пошук засобів одержання однорідної дрібнокристалічної литої структури за умов реально можливих переохолоджень.

Температурно-часові параметри сплавів в інтервалі температур твердо- рідкого стану суттєво впливають на кінетику тверднення і структуроутворення. Відомі технологічні схеми процесів одержання заготовок кольорових сплавів у твердо-рідкому стані – тиксолиття, реолиття. Проте основні дослідження у цьому напрямі пов'язані з процесами формоутворення точних виливків і створення промислових ливарних технологій. Питання ж кристалізації і структуроутворення сплавів, зокрема сталей, у зв'язку з режимами теплової обробки в інтервалі температур твердо-рідкого стану і швидкістю наступного охолодження практично не досліджувались.

Для утворення більшої кількості центрів зародкоутворення сприятливою умовою може бути ізотермічне витримування розплаву в інтервалі температур  $T_L - T_o$ , де  $T_o$  – температура, за якої вільні енергії рідкої і твердої фаз є однаковими. Аналіз «Таммановських кривих» залежності числа центрів кристалізації і швидкості їх росту від переохолодження розплаву показує, що максимум утворення центрів кристалізації спостерігається за помітно меншого переохолодження ніж максимум їх росту. Це дозволяє вважати інтервал температур ( $T_L - T_o$ ) найбільш ефективним для ізотермічної обробки розплаву, в якому швидкість росту кристалів достатньо мала. Це підтверджується дослідженнями зміни в'язкості, залізобуглецевих розплавів в інтервалі температур кристалізації [41]. Встановлено, що нижче температури ліквідусу (до 10 °С), в'язкість охолоджуваних розплавів різко зростає у кілька разів. По мірі подальшого зниження температури розплаву незначне плавне зростання в'язкості змінюється другим різким стрибком при температурах, близьких до середини інтервалу температур між ліквідусом і солідусом.

Такі зміни характеристик в'язкості можуть бути пов'язані з початком масового утворення зародків твердої фази у верхній області температур інтервалу кристалізації (перший стрибок в'язкості) і з переважаючим ростом твердої фази при температурах, що відповідають середній частині температурного інтервалу  $T_L - T_o$  (другий стрибок зміни в'язкості). З енергетичної точки зору ізотермічне витримування розплаву за невеликих переохолоджень можна розглядати як процес, що призводить до зменшення вільної енергії системи. За умов же звичайного безперервного охолодження це може бути здійснено лише шляхом підвищення ступеня переохолодження.

У вузькому температурному інтервалі біля температури ліквідусу утворюються зародки кристалізації і виділяються перші кристали твердої фази, які можуть накопичуватись без суттєвого збільшення їх розмірів за певних температур ізотермічної обробки розплаву, що кристалізується. Виходячи з цього, дослідження механізмів кристалізації і структуроутворення у зв'язку з підготовленим спадковим базисом не тільки вихідної структури шихти, але й розплаву на всіх стадіях ливарного процесу, зокрема у передкристалізаційний період та в температурному інтервалі кристалізації є вельми перспективним щодо розроблення нових ливарних технологій, що забезпечують підвищення властивостей литих виробів до рівня властивостей виробів з прокату вуглецевих і легованих сталей.

Таким чином вирішення проблеми підвищення властивостей литих сталевих виробів можливо шляхом розроблення засобів технологічного впливу на рідкий, тверднучий і твердий метал, зокрема створенням потрібної нерівноважності і структурної мікронеоднорідності розплаву перед розливкою, керуванням процесами зародження і росту твердої фази то структуроутворення на стадіях рідкофазних і твердофазних перетворень, зокрема з використанням металогенетичного (спадкового) зв'язку в системі «шихта-розплав-виливок». Можливість управління цими процесами відкриває перспективу одержання литих виробів з прогнозованим комплексом властивостей на рівні властивостей виробів з термічно зміцненого прокату сталей.

### Література

1. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. – М. : Металлургия, 1976. – 556 с.
2. Флемингс М. Процессы затвердевания. – М. : Металлургия, 1977. – 424 с.
3. Куманин И.Б. Некоторые проблемы металловедения в литейном производстве // Литейн. пр-во. - 1983. - № 3. - С. 2 - 5.
4. Кондратюк С.Е., Сокирко Л.А. КЛИТ-технология – резерв повышения свойств сталей. – Киев: Об-во «Знание» УССР, 1989. – 19 с.
5. Лакенихт Ф., Шарф Г., Зебровски Д., Шалимов А. Струйное компактирование – перспективный процесс производства сталей и сплавов повышенного качества // Metallurg. – 2010. – № 10. – С. 36 – 43.
6. Кондратюк С.Е., Пархомчук Ж.В., Стоянова Е.Н., Щеглов В.М. Спадкове модифікування сталі. // – К. : Кравченко Я.О., 2018. – 129 с.
7. Тягунов Г.В. Связь свойств расплава со структурой и свойствами твердого металла // Литейн. пр-во. - 1988. - № 2. - С. 8 - 9.
8. Гаврилин И.В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. – Владимир: ВлГУ, 2000. – 255 с.
9. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. – М.: Машиностроение. – 2005. – 510 с.
10. Кондратюк С.Е. Структуроутворення, спадковість і властивості литої сталі. – Київ: Наук. думка, 2010. – 175 с.
11. E.O. Hall // Physical Society of London Proceedings. – 1951. – 64 B. – P. 747 – 753.
12. N.J. Petch // J. Iron Steel Inst. – 1953. – V. 174. – № 1. – P. 25 – 28.
13. Honeycombe R.W., K. Understanding alloy steel // Solid mech. Arch. - 1976. - No 1. - P. 27 48.
14. Pofes-Vernis T., Robat D. Engineering steels for the automotive industry // International seminar «Modern developments in metallurgy and technologies of steel for automotive industry». – Moskov, 2004. – P.173 – 180.
15. Гаврилин И.В. Строение жидкой и твердой фаз в литейных сплавах в твердожидком состоянии // Металлургия машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 9– 11.
16. Гаврилин И.В. Кластеры – фуллерены – фракталы в жидких литейных сплавах // Металлургия машиностроения. – 2009. – № 5. – С. 30 – 33.
17. Баум Б.А., Хасин Г.А., Тягунов Г.В. Жидкая сталь. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
18. Скребцов А. М. Кинетика разупорядочения кластеров при нагреве и выдержке металлического расплава // Процессы литья. – 2002. – № 4. – С. 8 – 14.
19. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. – Ленинград: Наука, 1972. – 424 с.
20. Ершов Г.С., Черняков В.А. Строение и свойство жидких и твердых металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
21. Филипов Е.С. Строение, физика и химия металлургических расплавов. – М.: Металлургия, 1995. – 304 с.
22. Баум Б.А., Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Цепелев В.С. Фундаментальные исследования физико-химии металлургических расплавов. – М.: ИКЦ Академкнига, 2002. – С. 214 – 228.
23. Скребцов А.М. Особенности структурных превращений металлических расплавов в интервале температур ликвидус – кипение // Сталь. – 2010. – № 10.– С. 14 – 19.
24. Гаврилин И.В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. – Владимир: Вл. ТУ, 2000 – 255 с.
25. Кондратюк С.Е., Стоянова О.М., Щерецький О.А., Пляхтур О.О. Структуроутворення і температура рівноважності розплаву при перепадах сталі Р6М5Л // Металознавство та обробка металів. – 2012. – № 2. – С. 3 – 10.

26. Коул Г.С., Боллинг Г.Ф. Получение сверхмелкозернистой структуры металлов и сплавов при кристаллизации в кн. Сверхмелкое зерно в металлах, пер. с англ. М.: Металлургия, 1973. – С. 41 – 82.
27. Горобченко С.Л. Иерархия структур и управление свойствами литой хладостойкой стали // Литейн. пр-во. - 1991. - № 5. - С. 6 - 8.
28. Бычков Ю.Б., Кисунько В.З., Гудкевич В.М. // Изв. вузов. Цв. металлы. - 1979. - № 2. - С. 128 - 130.
29. Котлярский Ф.М., Борисов Г.П., Дука В.М. и др. Термовременная обработка алюминиевых сплавов // Процессы литья. - 2012. - № 3. - С. 42 - 52.
30. Петрухин Н.В., Черкасова Е.Р. Зависимость фазовых превращений и структуры жаропрочных никель-алюминиевых сплавов от температуры нагрева расплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1993. - № 1. - С. 10 - 19.
31. Глазов В.М., Вигдорович В.Н. Микротвердость металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1962. – 244 с.
32. Котлярский Ф. М. Формирование отливок из алюминиевых сплавов. – К.: Наукова думка, 1990. – 216 с.
33. Данилов В.И. Строение и кристаллизация жидкостей – К.: АНУССР, 1956. – 566 с.
34. Вертман А.А., Самарин А.М. Свойства расплавов железа. – М.: Наука, 1969. – 280 с.
35. Белашенко Д.К., Спектор Е.З. – в кн. Теория металлургических процессов. – М.: ВИНТИ, 1973. – С 5 – 55.
36. Романова А.В. – в кн. Металлофизика. – вып. 37, К.: Наукова думка, 1971. – С 3 – 14.
37. Гельд П.В., Баум Б.А., Тягунов Г.В. и др. – в кн. Свойства расплавленных металлов. М.: Наука, 1974. – С. 7 – 10.
38. Золотаревский В.С., Новиков И.И. // ФММ, 1964. – Т. 18. – № 6. – С. 862 – 868.
39. Бестужев Н.И., Бестужев А.Н. Кластерный механизм образования зародышей и закономерности первичной кристаллизации литейных сплавов (на примере высокохромистых чугунов) // Литье и металлургия. - 2005. - № 3. - С. 37 - 42.
40. Flemings M., Shiohara V. // Mat. Scien. Eng. – 1984. – № 65. – P. 157.
41. Тягунов Г.В., Кушнир И.Н., Баум Б.А. и др. // Проблемы стального слитка. – 1974. – № 5. – С. 128.

## References

1. Efimov V.A. *Razlivka y krystallyzatsyia stali* (Casting and crystallization of steel), Moskva. : Metallurhyia, 1976, 556 p [in Russian].
2. Flemynhs M. *Protsessy zatverdevaniya* (Solidification processes), Moskva. : Metallurhyia, 1977, 424 p [in Russian].
3. Kumanyn Y.B., *Lyteinoe proyzvodstvo*, 1983, No 3, pp. 2 – 5 [in Russian].
4. Kondratiuk S.E., Sokyрко L.A. *KLYT-tekhnohohyia – rezervo povysheniya svoistvo stalei* (KLIT-technology is a reserve for improving steel properties), Kyev: Obshchestvo «Znanye» USSR, 1989, 19 p. [in Russian].
5. Lakenykht F., Sharf H., Zebrovsky D., Shalymov A., *Metallurhyia*, 2010, No 10, pp. 36 – 43 [in Russian].
6. Kondratiuk S.Ie., Parkhomchuk Zh.V., Stoianova E.N., Shcheglov V.M. *Spadkove modyfikuvannya stali* (Hereditary modification of steel), Kyiv : Kravchenko Ya.O., 2018, 129 p. [in Ukraine].
7. Tiahunov H.V., *Lyteinoe proyzvodstvo*, 1988, No 2, pp. 8 – 9 [in Russian].

8. Havrylyn Y.V. *Plavlenye y krystallizatsiya metallov y splavov* (Melting and crystallization of metals and alloys), Vladimir: VIHU, 2000, 255 p. [in Russian].
9. Nikitin V.I., Nikitin K.V. *Nasledstvennost v lityh splavah* (Heredity in cast alloys), Moskva: Mashinostroenie, 2005, 510 p. [in Russian].
10. Kondratiuk S.Ie. *Strukturoutvorennia, spadkovist i vlastyvosti lytoi stali* (Structure formation, heredity and properties of cast steel), Kyiv: Naukova dumka, 2010, 175 p. [in Russian].
11. Hall E.O., *Physical Society of London Proceedings*, 1951, 64 B, P. 747 – 753 [in English].
12. N.J. Petch // *J. Iron Steel Inst.*, 1953, V. 174, No 1. pp. 25 – 28 [in English].
13. Honeycombe R.W. K., *Solid mech. Arch.*, 1976, No 1, pp. 27 - 48 [in English].
14. Pofes-Vernis T., Robat D. *Modern developments in metallurgy and technologies of steel for automotive industry*, Moskva, 2004, pp.173 – 180 [in English].
15. Gavrilin I.V., *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2007, No 6, pp. 9 – 11 [in Russian].
16. Gavrilin I.V. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2009, No 5, pp. 30 – 33 [in Russian].
17. Baum B.A., Hasin G.A., Tyagunov G.V. *Zhidkaya stal* (Liquid steel), Moskva: Metallurgiya, 1984, 208 p. [in Russian].
18. Skrebcov A. M., *Processy litya*, 2002, No 4, pp. 8 – 14 [in Russian].
19. Frenkel Ya.I. *Vvedenie v teoriyu metallov* (Introduction to metal theory), Leningrad: Nauka, 1972, 424 p. [in Russian].
20. Ershov G.S., Chernyakov V.A. *Stroenie i svojstvo zhidkikh i tverdyyh metallov* (Structure and property of liquid and solid metals), Moskva: Metallurgiya, 1978, 248 p. [in Russian].
21. Filipov E.S. *Stroenie, fizika i himiya metallurgicheskikh rasplavov* (Structure, physics and chemistry of metallurgical melts), Moskva: Metallurgiya, 1995, 304 p. [in Russian].
22. Baum B.A., Tyagunov G.V., Baryshev E.E., Cepelev V.S. *Fundamentalnye issledovaniya fiziko-himii metallurgicheskikh rasplavov* (Fundamental studies of the physics and chemistry of metallurgical melts), Moskva: IKC Akademkniga, 2002, pp. 214 – 228 [in Russian].
23. Skrebcov A.M., *Stal*, 2010, No 10, pp. 14 – 19 [in Russian].
24. Gavrilin I.V. *Plavlenie i kristallizaciya metallov i splavov* (Melting and crystallization of metals and alloys), Vladimir: VI. TU, 2000, 255 p. [in Russian].
25. Kondratiuk S.Ie., Stoianova O.M., Shcheretskyi O.A., Pliakhtur O.O., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2012, No 2, pp. 3 – 10 [in Ukraine].
26. Koul G.S., Bolling G.F. In: «Sverhmelkoe zerno v metalah» (*Very fine grains in metals*) Moskva: Metallurgiya, 1973, pp. 41 – 82 [in Russian].
27. Gorobchenko S.L., *Litejnoe proizvodstvo*, 1991, No 5, pp. 6 – 8 [in Russian].
28. Bychkov Yu.B., Kisunko V.Z., Gudkevich V.M., *Izvestiya vuzov. Cvetnye metally*, 1979, No 2, pp. 128 – 130 [in Russian].
29. Kotlyarskij F.M., Borisov G.P., Duka V.M., *Processy litya*, 2012, No 3, pp. 42 – 52 [in Russian].
30. Petruhin N.V., Cherkasova E.R., *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1993, No 1, pp. 10 – 19 [in Russian].
31. Glazov V.M., Vigdorovich V.N. *Mikrotverdost metallov i poluprovodnikov* (Microhardness of metals and semiconductors), Moskva: Metallurgiya, 1962, 244 p. [in Russian].
32. Kotlyarskij F.M. *Formirovanie otlivok iz alyuminievyh splavov* (Forming castings from aluminum alloys), Kiev: Naukova dumka, 1990, 216 p. [in Russian].
33. Danilov V.I. *Stroenie i kristallizaciya zhidkostej* (Structure and crystallization of liquids), Kiev: ANUSSR, 1956, 566 p. [in Russian].

34. Vertman A.A., Samarin A.M. *Svojstva rasplavov zheleza* (Properties of iron melts), Moskva: Nauka, 1969. – 280 p. [in Russian].
35. Belashchenko D.K., Spektor E.Z. In: «*Teoriya metallurgicheskikh processov*» (Theory of metallurgical processes). – Moskva: VINITI, 1973, pp 5 – 55 [in Russian].
36. Romanova A.V. In: «*Metallofizika*» (Metal physics), Vol. 37, Kiev: Naukova dumka, 1971, pp 3 – 14 [in Russian].
37. Geld P.V., Baum B.A., Tyagunov G.V. In: «*Svojstva rasplavlennykh metallov*» (Properties of molten metals), Moskva: Nauka, 1974, pp. 7 – 10 [in Russian].
38. Zolotarevskij V.S., Novikov I.I., FMM, 1964, Vol. 18, No 6, pp. 862 – 868 [in Russian].
39. Bestuzhev N.I., Bestuzhev A.N., *Lite i metallurgiya*, 2005, No 3, pp. 37 – 42. [in Russian].
40. Flemings M., Shiohara V., *Mat. Scien. Eng.*, 1984, No 65, pp. 157 [in English].
41. Tyagunov G.V., Kushnir I.N., Baum B.A., *Problemy stalnogo slitka*, 1974, No 5, pp. 128 [in Russian].

Одержано 08.10.18

**С. Е. Кондратюк, Ж. В. Пархомчук, В. И. Вейс**

**Термокинетические параметры обработки расплава и  
структурообразование литой стали**

**Резюме**

Рассмотрены процессы образования зародышей кристаллизации и структурообразования стали в зависимости от термокинетических параметров обработки расплава при различных перегревах над ликвидусом, изотермической обработки в передкристаллизационный период и скорости охлаждения расплава при кристаллизации.

**S. Ye. Kondratyuk, Z. V. Parkhomchuk, V. I. Veis**

**Thermokinetic parameters of melt processing and structure  
formation of cast steel**

**Summary**

The processes of formation of nuclei and structure formation of steel are considered depending on the thermokinetic parameters of melt processing at different overheatings over the liquidus, isothermal processing during the pre-crystallization period and cooling rate during crystallization.