

АНОТАЦІЯ

Семенов Олександр Дмитрович. Встановлення кінетики формування рідко-твердої та твердо-рідкої зон у виливках із залізовуглецевих сплавів та розрідження в теплових вузлах виливків. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – *Металургія.* – Український державний університет науки та технологій. – Дніпро, 2023.

У дисертації узагальнено теоретичні уявлення процесів формування виливків і керування процесами їх затвердіння у рамках рішення науково-технічної задачі встановлення кінетики твердіння фронтів виливання, солідус і ліквідус по товщині виливків із залізовуглецевих сплавів, що охолоджуються в кокіль і виливниці, розробки режимів впливу на твердіння металу в рідко-твердій зоні виливків, встановлення причин появи ливарного дефекту «утяжина» і розробленні рекомендацій його попередження.

Побудовані криві тривалості твердіння для фронтів виливання рідкого залишку металу, ліквідус та солідус в координатах відносної товщини затверділого шару металу x/R і параметричного критерію τ/R^2 для Fe-C сплавів з вмістом вуглецю 0,04...4,83%, розраховано кінетику фронтів твердіння для сталевих виливків, що містять вуглець 0,15%, 0,20%, 0,25%, 0,30%, 0,45%, 0,55%, 0,80%, 1,2%, 1,8%. Отримані результати дозволяють скоротити час находження виливків у чавунних кокільях та виливницях, збільшити зворотність кокільно-опокового оснащення, встановити час безпечного переміщення виливниці зі злитком з кесону до ділянки охолодження або вибивання вилівка і переміщення його в термічну піч для реалізації технології гарячого посаду. Наведено приклади використання результатів роботи науковцями і технологами в ливарних цехах.

Встановлення границі виливання для сплавів Fe–C дозволяє реалізувати виробництво виливків і злитків за технологією, у якій: після твердіння заданого робочого шару металу на виливниці, розраховується необхідна кількість модифікатора або розкислювача для введення в осьову частину виливка, яка ще не затверділа. Поступове розплавлення цих хімічних сполук забезпечить плавну зміну макро- і мікроструктури між робочим шаром і осьовою зоною.

Для розроблення режимів впливу на твердіння металу в осьовій зоні виливка запропоновано використати отримані в роботі результати про положення границі виливання, що більш точне, ніж за розрахунками по границі солідус. Обумовлено це відсутністю живлення усадки з центру виливка в зону мікроскопічних переміщень. Тому введення в осьову зону виливка модифікатора необхідно розраховувати по масі рідкої ділянки та рідко-твердої частини виливка.

Отримані за експериментальними дослідженнями розрахунки кінетики просування фронтів твердіння ліквідус, солідус і виливання рідкого металу від поверхні до центру виливків доцільно використовувати для оцінки точності комп'ютерного моделювання процесів твердіння сплавів Fe–C і подальшої адаптації математичних моделей завдяки корегуванню теплофізичних коефіцієнтів для металу виливків і матеріалу ливарної форми.

Розроблено методику розрахунку маси рідкої та рідко-твердої частини в чавунних прокатних валках різних розмірів після твердіння робочого шару на кокілі, що забезпечило введення в осьову зону виливків графітизуючого модифікатора (алюмінію). Практичне випробовування розробки при литті валка з чорною масою 1619 кг в умовах ливарного цеху підтверджує доцільність розрахунку робочого шару по границі виливання у порівнянні з оцінкою формування робочого шару по температурі солідус, що раніше використовували. Також удосконалено процес розплавлення алюмінію і його розподіл по висоті валка за рахунок обертання електричним двигуном алюмінію і його переміщення відцентровими силами до фронту твердіння бочки і шийок прокатного валка.

Перспективним напрямком подальшого розвитку отриманих результатів є розробка нових способів виготовлення чавунних виливків за рахунок фізичного, хімічного і механічного впливу на двофазову зону, розкислення і легування рідкої та рідко-твердої зон виливків в процесі твердіння для підвищення їх фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

Експериментально встановлено, що причиною виникнення ливарного дефекту «утяжина» є формування в масивних частинах виливків теплових вузлів, з центру яких розплав фільтрується для живлення усадки на всі найближчі поверхні виливка. При переміщенні розплаву з теплового вузла в його центрі утворюються усадкова раковина та розрідження. Тому атмосферний тиск спричиняє втягування і викривлення шару металу, що твердіє, на частині поверхні виливка з меншою міцністю. Розроблено пристрій для вимірювання розрідження в усадковій раковині, який засновано на використанні голки медичної спинальної із неіржавіючої сталі, встановлено кінетику утворення розрідження в усадковій раковині виливка у формі куля діаметром 120 мм та процес твердіння центру кулі у піщано-глинистій формі. Відповідно отриманим експериментальним результатам запропоновано провести корегування визначення ливарного дефекту «утяжина» в ДСТУ 9051:2020 (Виливки з чавуну і сталі. Дефекти. Терміни та визначення), що підтверджено актом від 24.04.2023 р. Технічного комітету стандартизації 177 «Ливарне виробництво» про прийняття к впровадженню.

Реалізацію виконаних досліджень проведено на прикладі виготовлення художнього виливку "Буйвол". Розрідження, що виникає в центрі теплового вузлу, усунули за рахунок переміщення атмосферного повітря по тонкій трубчастій голці із аустенітної неіржавіючої сталі, яка використовується для медичних ін'єкцій. Голку із зовнішнім діаметром 0,80 мм і отвором діаметром 0,49 мм встановлювали одним кінцем в центрі термічного вузлу потовщеної частини виливка, а другим – в ливарній формі з боку не робочої поверхні, яка недоступна для огляду і не порушує естетичний вид художнього виливку. Нова литникова система без масивного живильника, який раніше підводили в

тепловий вузол, дозволила усунути усадкові дефекти на зовнішній поверхні, зменшити витрати на литникову систему, карбування поверхні в місці з'єднання живильника з художнім виливком, уникнути формування утяжини.

В роботі вперше встановлені причини появи ливарного дефекту «утяжина», розроблені рекомендації для його попередження, які захищені патентом України № 127278 «Спосіб усунення утяжин у виливках з потовщеними частинами стінки».

Ключові слова: виливок, твердіння, кінетика, модифікування, рідко-тверда зона, утяжина

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. V. Khrychikov, O. Semenov, H. Meniailo, Y. Aftandiliants, S. Gnyloskurenko. The Process of Vacuum Formation in the Shrinkage Cavity at Castings Crystallization. *Archives of Foundry Engineering*. Vol. 2022, Issue 4, 2022, P. 79-84. [The Katowice Branch of the Polish Academy of Sciences](https://www.katowice.pan.ozon.pl/). Scopus. DOI: [10.24425/afe.2022.143953](https://doi.org/10.24425/afe.2022.143953).

2. V.E. Khrychikov, H.V. Meniailo, O.D. Semenov, Y.G. Aftandiliants, S.V.Gnyloskurenko. Graphitizing modification of the axial zone of cast iron rolling rolls in the liquidus-solidus temperature range. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipro, Ukraine. 2023, № 1. P. 67-73. Scopus. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/067>

3. Семенов О.Д., Хричиков В.Є., Куцова В.З., Меньяйло О.В. Розрахунок кінетики просування фронту твердіння ізосолідус залізовуглецевих сплавів у кокільних циліндричних формах. *Процеси лиття*. 2021. № 2 (144). С. 31-38. <https://doi.org/10.15407/plit2021.02.023>.

4. Хричиков В.Є., Семенов О.Д., Меньяйло О.В., Шалевська І.А., Мьяновська Я.В. Усунення утяжини у художніх виливках з різною товщиною стінки. *Процеси лиття*. 2021. № 4 (146). с. 14-21. <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.014>.

5. Семенов О.Д., Хричиков В.Є., Меняйло О.В., Афтандіянц Є.Г., Гнилоскуренко С.В. Вплив вмісту вуглецю на тривалість твердіння фронту ізолеквідус сплавів Fe-C у кокільних циліндричних формах. *Теорія і практика металургії*. 2022. №3. с. 57-62. https://nmetau.edu.ua/file/zh_03_2022_site.pdf

6. Семенов О.Д., Іванова Л.Х. Розрахунок процесу модифікування осьової зони прокатних валків із заевтектоїдної сталі з вмістом вуглецю 1,80%. *Теорія і практика металургії*. 2022. № 6 (137). С. 5-12. https://nmetau.edu.ua/file/zh_06_2022_v1.pdf

7. Семенов А.Д. Влияние кремния на формирование зародышей шаровидного графита в чугунах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 4. С. 53-55. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2015_4_15

8. Чавун для прокатних валків. Патент України № 116726. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хричиков В.Є., Семенов О.Д. МПК7 С22С 37/08, С22С 37/10, заявл. 29.11.16. власник НМетАУ; опубл.25.04.18, Бюл. № 8. 4с. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=246236&chapter=description>

9. Чавун. Патент України № 116725. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хричиков В.Є., Семенов О.Д. МПК7 С22С 37/10, заявл. 29.11.16. № а201612102; власник НМетАУ; опубл. 25.04.18, Бюл. № 8. 4с. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=246235>

10. Спосіб усунення утяжин у виливках з потовщеними частинами стінки. Патент України № 127278. Хричиков В.Є., Семенов О.Д., Меняйло О.В. (in Ukrainian). Дата подання заявки 09.03.2021. МПК (2021.01) В22D 27/13 (2006.01), В22D 25/00. Опубл. 05.07.2023, Бюл. №27. <https://base.uipv.org/searchInvStat/showclaimdetails.php?IdClaim=336807&resId=1>

11. Семенов О.Д., Куцова В.З., Хричиков В.Є. Технологічні особливості формування утяжин у фасонних виливках. Збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції «Литво-2021». *XVII міжнародна науково-практична конференція «Литво-2021»*. X міжнародна науково-практична конференція

«Металургія-2021». 18-20 травня. Запоріжжя. Козак-Палац. с. 175.
https://nmetau.edu.ua/file/lite_metallurgiya_2021.pdf

12. A. D. Semenov. Removal of shrinkage depression in art castings with different wall thickness. *15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF CROATIAN METALLURGICAL SOCIETY. SHMD '2022, Croatia, Zagreb, March 22nd – 23rd 2022*. pg. 564. <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

13. Семенов О.Д. Теплофизические процессы ввода ФС75 в чугуны, модифицированный магнием. Збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції Литьє-2015. *XI международная научно-практическая конференция. IV международная научно-практическая конференция Металлургия 2015*. 26-28 мая. Запорожье. Козак-Палац. с. 215-216.
<https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstreams/85d00a37-3e22-4cb5-a07b-099df25cae4a/download>.

14. Хричиков В.Є., Меняйло О.В., Семенов О.Д. Твердофазне гідродинамічне модифікування Fe-C сплавів. Збірник тез. *XV Міжнародна науково-технічна конференція «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах»*. Запоріжжя, 11–12 жовтня 2018 р. ЗНТУ. 2018. С. 67-68.
http://eir.zp.edu.ua/bitstream/123456789/4347/4/Conf_non_metallic_inclusions_2018.pdf.

15. Семенов О.Д. Тепловые эффекты ввода магния в чугуны, для поглощения шаровидной формы графита. Материалы XII Международной научно-практической конференции «Литьё. Металлургия. 2016». 24-26 мая. Запорожье. ЗТПП. С. 445-446. https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/30304/1/Litye_Metallurgiya_2016.pdf.

16. Семенов О.Д., Хричиков В.Є. Анализ кинетических кривых затвердевания с целью определения продолжительности затвердевания отливок из Fe-C сплавов. *Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, 25–28 вересня 2017 р.* / ред. А. М. Фесенка, М. А. Турчаніна. Краматорськ: ДДМА, 2017. С. 112-114.

<http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/tolp/publication/tolpkonf/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B2017.pdf>.

17. Хричиков В.Є., Семенов О.Д., Іванова Л.Х., Меньяло О.В., Афтанділянц Є.Г., Гнилоскуренко С.Г. Обговорення доцільності корегування терміну утяжина в ДСТУ:2020. *Литво. Металургія. 2023*: Матеріали ХІХ Міжнародної науково-практичної конференції (10-12 жовтня 2023 р., м. Харків - м. Київ) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. – Харків, НТУ «ХПІ». С. 220-221. <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023>.

SUMMARY

Oleksandr Semenov. Establishing the kinetics of the formation of liquid-solid and solid-liquid zones in castings from iron-carbon alloys and rarefaction in thermal nodes of castings. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 136 - Metallurgy. – Ukrainian State University of Science and Technology, – Dnipro, 2023.

The dissertation summarizes the theoretical concepts of the processes of forming castings and controlling their solidification processes within the framework of solving the scientific and technical problem of establishing the kinetics of solidification of the casting fronts, solidus and liquidus along the thickness of castings made of iron-carbon alloys cooled in the mold and the mold, the development of modes of influence on metal hardening in liquid-solid zone of castings, establishing the causes of the "shrinkage depression" casting defect and developing recommendations for its prevention.

Curves of the duration of solidification are constructed for the fronts of pouring of the liquid metal residue, liquidus and solidus in the coordinates of the relative thickness of the solidified metal layer x/R and the parametric criterion τ/R^2 for Fe-C alloys with a carbon content of 0.04...4.83% were plotted, the kinetics of the fronts were calculated for solidification of steel castings containing carbon 0.15%, 0.20%,

0.25%, 0.30%, 0.45%, 0.55%, 0.80%, 1.2%, 1.8%. The obtained results make it possible to reduce the time of finding castings in cast iron molds and foundries, to increase the reversibility of the mold and shell equipment, establish the time of safe movement of the foundry with the ingot from the caisson to the area of cooling or knocking out the casting and moving it to the thermal furnace for the implementation of the hot position technology. Examples of the use of the results of work by scientists and technologists in foundries are given.

Setting the pouring boundary for Fe–C alloys allows the production of ingots using a technology in which: after solidification of the given working layer of the metal on the casting, the necessary amount of modifier or deoxidizer is calculated for introduction into the axial part of the casting, which has not yet solidified. The gradual melting of these chemical compounds will ensure a smooth change of the macro- and microstructure between the working layer and the axial zone.

It is proposed to use the results obtained in the work on the position of the casting border, which is more accurate than based on calculations on the solidus border to develop modes of influence on metal hardening in the axial zone of the casting. This happens due to the lack of shrinkage power from the center of the casting to the zone of microscopic movements. Therefore, the introduction of the modifier into the axial zone of the casting should be calculated based on the mass of the liquid section and the liquid-solid part of the casting.

Calculations of the kinetics of the advance of liquidus, solidus and liquid metal pouring fronts from the surface to the center of castings obtained from experimental studies should be used to assess the accuracy of computer modeling of Fe-C alloy solidification processes and further adaptation of mathematical models thanks to the correction of thermophysical coefficients for the metal of castings and material foundry mold.

A method for calculating the mass of the liquid and liquid-solid part in cast iron rolling rolls of various sizes after solidification of the working layer on the mold was developed, which ensured the introduction of a graphitizing modifier (aluminum) into the axial zone of castings. Practical testing of the development during the casting

of a roll with a rough mass of 1619 kg in the conditions of a foundry confirms the feasibility of calculating the working layer at the pouring boundary in comparison with the assessment of the formation of the working layer at the solidus temperature, which was previously used. The process of melting aluminum and its distribution along the height of the roll has also been improved due to the rotation of aluminum by an electric motor and its movement by centrifugal forces to the solidifying front of the barrel and the necks of the rolling roll.

A promising direction for the further development of the obtained results is the development of new methods of manufacturing iron castings due to physical, chemical and mechanical effects on the two-phase zone, deoxidation and alloying of the liquid and liquid-solid zones of castings during the solidification process to improve their physical, mechanical and operational properties.

It was experimentally established that the cause of the casting defect "shrinkage depression" is the formation of heat nodes in the massive parts of castings, from the center of which the melt is filtered to feed the shrinkage of the solidifying layer on all the nearest surfaces of the casting. When the melt is moved from the heat node, a shrinkage shell and rarefaction are formed in its center. Therefore, the atmospheric pressure causes the retraction and distortion of the solidifying layer of metal on the part of the surface of the casting with lower strength. A device for measuring rarefaction in the shrinking shell was developed, which is based on the use of a medical spinal needle made of stainless steel, the kinetics of rarefaction formation in the shrinking shell of a casting in the form of a ball with a diameter of 120 mm and the process of solidifying the center of the ball in a sand-clay mold were established. According to the obtained experimental results, it is proposed to correct the definition of the foundry defect "shrinkage depression" in DSTU 9051:2020 (Iron and steel castings. Defects. Terms and definitions), which was confirmed by the act dated 04.24.2023 of the Technical Committee for Standardization 177 "Foundry Production" on acceptance for implementation.

The implementation of the performed research was carried out on the example of the production of artistic casting "Buffalo". The rarefaction that occurs in the

center of the heat assembly was eliminated by moving atmospheric air through a thin tubular needle made of austenitic stainless steel, which is used for medical injections. A needle with an outer diameter of 0.80 mm and a hole with a diameter of 0.49 mm was installed with one end in the center of the thermal unit of the thickened part of the casting, and with the other - in the casting mold from the side of the non-working surface, which is not accessible for inspection and does not violate the aesthetic appearance of the artistic casting. The new sprue system without a massive feeder, which was previously fed into the heating unit, made it possible to eliminate shrinkage defects on the outer surface, to reduce the costs of the sprue system, coining the surface at the junction of the feeder with the art casting and to avoid the formation of shrinkage depression.

In the work, the causes of the appearance of the casting defect "shrinkage depression" were established for the first time, recommendations for its prevention were developed and protected by Ukrainian patent No. 127278 "Method of elimination of shrinkage depressions in castings with thickened wall parts".

Key words: casting, solidification, kinetics, modification, liquid-solid zone, shrinkage depression