

УДК 621.664: 669.01(075)

МОДЕЛЮВАННЯ РІДКОТЕКУЧОСТІ ТА ГУСТИНИ ЛИВАРНИХ СТАЛЕЙ

Є. Г. Афтандіянц, М. М. Круглій

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття зі спеціальності: 131 – прикладна механіка.

Кореспонденція авторів: aftyev@yahoo.com

Історія статті: отримано – листопад 2020, акцептовано – грудень 2020.

Бібл. 9, рис. 4, табл. 0.

Анотація. В результаті аналізу процесу формування рідкотекучості та умов живлення виливків при охолодженні після тверднення теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що їх рівень визначається дисперсністю дендритної структури, величиною перегріву розплаву над температурою ліквідусу, а також властивостями рідкого металу, теплопровідністю стали при температурі солідусу, теплою і інтервалом кристалізації.

Встановлено кількісні закономірності такого впливу, які з ймовірністю не менше 95% і високим ступенем достовірності ($R = 0,709-0,837$; $\delta = 1,2 - 13,8\%$) описують реальний процес.

У статті показано, що по збільшенню ефективності впливу інтегральних факторів на рідкотекучість конструкційних сталей їх можна розташувати в наступній послідовності: теплофізичні умови тверднення, дисперсність дендритної структури, властивості рідкого металу. При цьому з ростом перегріву розплаву над температурою ліквідусу, теплоти кристалізації і дисперсності дендритної структури відбувається зростання рідкотекучості, збільшення ж значень інших факторів призводить до зворотного ефекту. За питомою ефективністю збільшення рідкотекучості легуючі елементи можна розташувати в наступній послідовності: Si, Cr, Mn, C, V, N, V+N.

Результатами виконаних досліджень показано, що по ефективності впливу розглянутих факторів на густину стали їх можна розташувати в наступній послідовності: дисперсність дендритної структури, властивості рідкого металу і теплофізичні умови затвердіння. Вплив легуючих елементів на ці параметри такі, що спостерігається складна багатоекстремальна зміна густини при легуванні стали. Загальна тенденція така, що вуглець і хром знижують, а кремній, марганець, ванадій, азот і спільне легування азотом і ванадієм підвищують густину стали. Щодо збільшення питомої ефективності зміни густини легуючі елементи можна розташувати в наступній послідовності: V, Cr, Mn, Si, N, N+V, C.

Ключові слова: сталь, рідкотекучість, хімічний склад, температура, густина, виливка, дендритна структура.

Постановка проблеми

Якість сталевих виливків визначається не тільки фізико-механічними властивостями сталей, а й такими ливарними властивостями, як рідкотекучість, лінійна і об'ємна усадка, уявлення про які широко розглянуті в літературі, наприклад в монографіях Г. Ф. Баландіна, Б. Б. Гуляєва, В. А. Єфімова, А. М. Королькова, Ю. А. Нехендзі, І. І. Новикова, А. А. Рижикова та інших роботах [1-7].

Однак закономірності впливу властивостей рідкого розплаву, дисперсності дендритної структури і технологічних параметрів лиття вивчені недостатньо.

Аналіз останніх досліджень

Рідкотекучість характеризує здатність розплаву заповнювати порожнину ливарної форми. Найбільш вірогідно порівняльну оцінку рідкотекучості сталей характеризує умовна рідкотекучість, яка визначається при однаковому перегріві над температурою ліквідусу [2]. При постійних матеріалі форми, гідрравлічних і теплофізичних умовах заповнення рідкотекучість стали залежить від швидкості руху розплаву і часу утворення каркаса твердої фази, які в свою чергу залежать від властивостей рідкого металу і закономірності його кристалізації.

При наскрізній транскристалізації каркас твердої фази може утворюватися внаслідок стикування стовпчастих кристалітів, що ростуть від стінок форми, в тих ділянках, куди метал надходить зі знятим перегрівом. У разі ж послідовно – об'ємної кристалізації в потоці розплаву є дрібні кристалики. Вони виносяться в вершину потоку і беруть участь в утворенні суцільного твердо-рідкого каркаса, який зупиняє рух металу, ще до стикування кристалітів, що ростуть від стінок форми.

При легуванні і модифікуванні конструкційної сталі відбувається зміна таких теплофізичних

параметрів процесу затвердіння, як температура ліквідусу ($t_{\text{л}}$), теплота кристалізації ($q_{\text{кр}}$) і теплопровідність сталі (λ), що роблять істотний вплив на рідкотекучість металу. Отже, при дослідженні впливу елементів на рідкотекучість конструкційної сталі необхідно основну увагу приділити зміни ними властивостей рідкого металу, теплофізичних параметрів затвердіння і дисперсності дендритних структури, оскільки саме ці характеристики в першу чергу визначають рівень рідкотекучості металу. Усадкова пористість формується в місцях зрощення суміжних кристалітів і в міжгілкових ділянках дендритів і визначається гідродинамічними умовами масопереносу і фільтрації [1–8].

Найбільш сприятливі умови для гідродинамічного масоперенесення розплаву до фронту затвердіння мають місце при транскристалізації. Тільки в разі наскрізний транскристалізації при стикуванні стовпчастих кристалітів, що ростуть від протилежних стінок форми, умови живлення різко погіршуються і відбувається значний розвиток усадочної пористості [9]. У зоні об'ємної кристалізації умови гідродинамічного живлення металу, що твердіє менш сприятливі, так як можлива ізоляція окремих обсягів металу в рідко-твердому і твердо-рідкому станах від живильного розплаву. Проте, перевага зазвичай віддається рівновісній структурі в зв'язку з більш хаотичним розподілом пір.

Підвищення в'язкості і густини розплаву, а також зменшення міжгілкових відстаней призводить до погіршення умов гідродинамічного живлення міжгілкових ділянок. Разом з тим зі збільшенням поверхневого натягу на границі рідкої і твердої фаз і зі зменшенням міжгілкових відстаней зростає проникаюча сила капілярного масопереносу в скелет напівзатверділого металу. [3]. При обох способах масопереносу умови живлення поліпшуються в міру зменшення розмірів первинних кристалітів. Зменшення міжгілкових відстаней створює передумови до формування більш дрібних усадкових пір, оскільки менша кількість рідкої фази кристалізується в замкнутому міжгілковому просторі.

Істотний вплив на розвиток усадочної пористості надають температурні умови заливки і теплофізичні параметри затвердіння виливків. Отже, вплив хімічного складу сталі на розвиток в виливках усадкової пористості має бути пов'язано в першу чергу зі зміною ними властивостей рідкого металу, теплофізичних умов тверднення і дисперсності дендритної структури.

Аналіз вищенаведених результатів показує, що для ефективного управління процесом отримання якісних виливків необхідно досліджувати вплив властивостей рідкого металу, теплофізичних умов тверднення і дисперсності дендритної структури на рідкотекучість і густину виливків.

Мета досліджень

Метою даної роботи є:

1. Дослідження впливу дисперсності дендритної структури, величини перегріву розплаву над

температурою ліквідусу, властивостей рідкого металу, теплопровідності сталі при температурі солідусу, теплоти і інтервалу кристалізації на рідкотекучість і умови живлення виливків при охолодженні після тверднення.

2. Розробка фізико-математичних моделей рідкотекучості та густини ливарних сталей

Результати досліджень

Конструкційні сталі виплавляли в 160 кг індукційної печі з основною футеровкою.

Кількісну закономірність рідкотекучості конструкційних сталей, що містять від 0,2 до 0,37% масової частки вуглецю; 0,97-3,2 кремнію; 0,54-3,35 марганцю; 0,79-3,09 хрому; до 0,26 ванадію; 0,005-0,031 азоту, визначали в залежності від величини перегріву розплаву над температурою ліквідусу ($\Delta t_{\text{л}}$), теплоти кристалізації ($q_{\text{кр}}$), щільності (ρ), кінематичної в'язкості (ν) і поверхневого натягу (σ) розплаву, довжини стовпчастих ($l_{\text{ст}}$) і дезорієнтованих ($l_{\text{д}}$) дендритів, а також теплопровідності сталі при температурі солідусу ($\lambda_{\text{с}}$).

Рідкотекучість визначали методом вакуумного всмоктування розплаву в інтервалі температур від 1500 до 1650 °С в кварцові трубки діаметром 3 мм при розрідженні $0,03 \pm 7 \cdot 10^{-4}$ МПа шляхом заміру довжини металу, котрий заповнив трубку (l). Похибка вимірювання довжини становила $\pm 0,5$ мм.

З огляду на те, що між пористістю і густиною металу існує зворотна кореляція, визначили кількісну закономірність впливу таких властивостей рідкого металу, як густина (ρ), поверхневий натяг між рідкої і твердої фазами ($\sigma_{\text{жт}} = 0,33\sigma_{\text{ж}}$), динамічна в'язкість (η) і теплофізичних умов затвердіння (перегрів над температурою ліквідусу ($\Delta t_{\text{л}}$), інтервал кристалізації ($\Delta t_{\text{кр}}$), теплота кристалізації ($q_{\text{кр}}$) і теплопровідність сталі при температурі солідусу ($\lambda_{\text{с}}$), і дисперсності дендритної структури на густину конструкційних сталей, що містять від 0,19 до 0,42% масової частки вуглецю; 0,83 - 3,51 - марганцю; 0,9 - 3,52 - хрому; 0,012 - 0,041 - сірки; 0,004 - 0,025 - фосфора; 0,005 - 0,038 - азоту; до 0,33 ванадію.

Густину визначали методом гідростатичного зважування зразків діаметром 5 мм, довжиною 10 мм, вирізаних з живильника технологічної проби, в напрямку перпендикулярному руху розплаву при заповненні живильника в процесі заливки металу, нагрітого до 1600 °С, в керамічні форми.

Регресійний аналіз результатів дослідження рідкотекучості показав, що рідкотекучість конструкційної сталі визначається наступною залежністю:

$$l = 82,5 + 55,91 \cdot l_{\text{ст}} - 12,11 \cdot l_{\text{ст}}^2 - 5,31 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma \cdot \rho \cdot \nu - 0,3794 \cdot \lambda_{\text{с}} \cdot l_{\text{ст}} \cdot l_{\text{д}} + 1,85 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta t_{\text{л}} \cdot q_{\text{кр}} \quad (1)$$

$$R=0,837; \delta=13,8\%; F_p=32,4 > F_{\text{т}(95\%)} = 2,3.$$

Аналіз рівняння (1) показує, що за винятком розмірів зони стовпчастих дендритів вплив незалежних факторів на рідкотекучість стали значимо тільки при комплексній їх дії, пов'язаної зі зміною властивостей рідкого металу (ρ , ν , σ), теплоти

кристалізації ($\Delta t_{\text{л}}$, $q_{\text{кр}}$), теплопровідності при температурі солідусу і дисперсності дендритної структури ($\lambda_{\text{с}}$, $l_{\text{ст}}$, $l_{\text{д}}$). При цьому тільки з ростом перегріву розплаву над температурою ліквідусу ($\Delta t_{\text{л}}$) і теплоти кристалізації ($q_{\text{кр}}$) відбувається збільшення рідкотекучості конструкційної сталі, збільшення ж значень інших факторів, включених в рівняння 1, призводить до зворотного ефекту.

Щодо збільшення значимості комплексного впливу, визначеного за критерієм Стюдента, з імовірністю 90% ($t_{\text{кр}} = 1,70$) фактори можна розташувати в наступній послідовності: $\Delta t_{\text{л}} \cdot q_{\text{кр}}$ ($t_p = 1,76$), теплопровідність при температурі солідусу і дисперсність дендритної структури $\lambda_{\text{с}} \cdot l_{\text{ст}} \cdot l_{\text{д}}$ ($t_p = 1,82$), $l_{\text{ст}}$ ($t_p = 2,24$), $\rho \cdot v \cdot \sigma$ ($t_p = 10,94$). Отже, по зменшенню ефективності впливу, в відзначених межах зміни досліджуваних параметрів, можна виділити три основні групи чинників:

1. Властивості рідкого металу;
2. Дисперсність дендритної структури;
3. Теплофізичні умови тверднення.

Приймаючи за основу сталь 20ХГСЛ, визначили ефективність впливу елементів на зміну рідкотекучості конструкційних сталей при температурі заливання 1550 °С (рис. 1) і при різному перегрів над температурою ліквідусу (рис. 2).

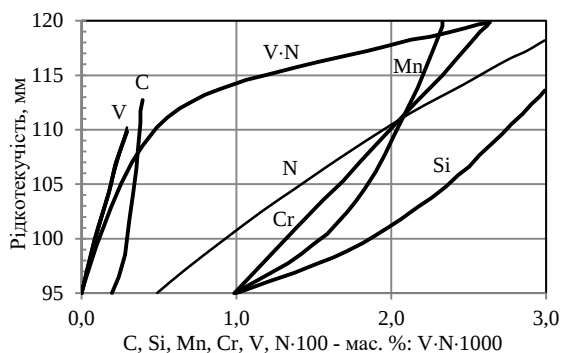


Рис. 1. Вплив елементів на рідкотекучість конструкційних сталей при температурі заливання 1550 °С. Базовий хімічний склад сталі (мас. частка %): C = 0,2; Si = 1,0; Mn = 1,0; Cr = 1,0; N = 0,006.

Fig. 1. The influence of contents of elements on the steel fluidity at pouring with 1550°C. The base is - steel containing 0.2% C, 1 Si, 1 Mn, 1 Cr.

Аналіз результатів досліджень показує, що вплив легуючих елементів на властивості рідкого металу, дисперсність дендритної структури і теплофізичні параметри тверднення таке, що за питомою ефективності збільшення рідкотекучості їх можна розташувати в наступній послідовності Si, Cr, Mn, C, V, N, V+N.

Видно, що найбільш ефективне підвищення рідкотекучості досягається при мікролегуванні сталі азотом і ванадієм. Зважаючи, що одночасно з цим відбувається диспергування первинної і вторинної структури мікролегування сталі азотом і ванадієм має бути одним з ефективних способів підвищення якості виливків з низько- і середньо легованих сталей.

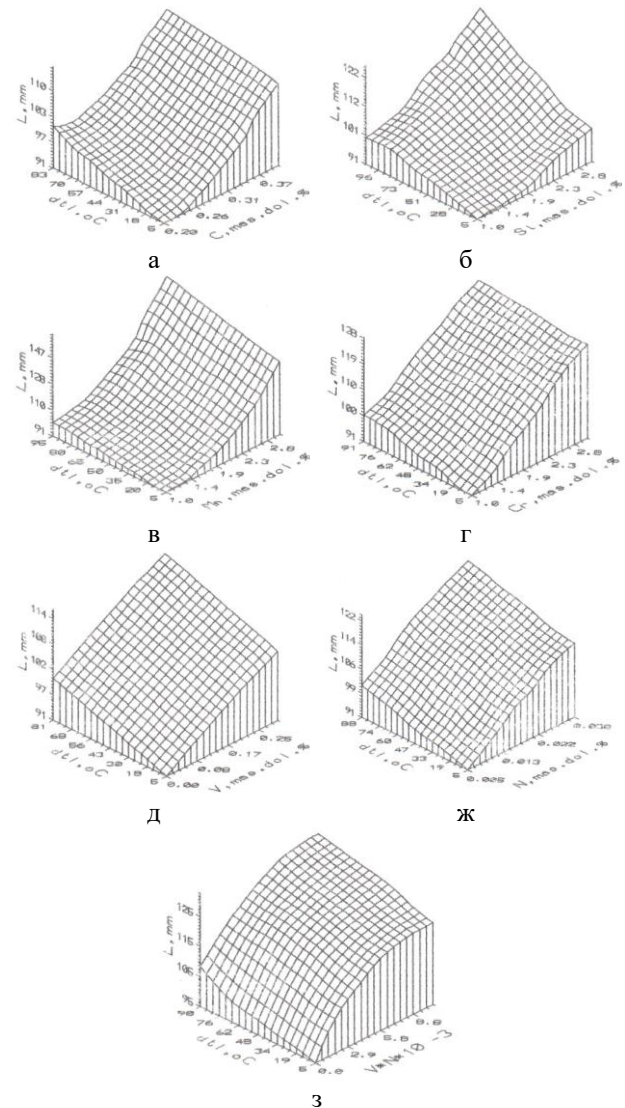


Рис. 2. Вплив вуглецю (а), кремнію (б), марганцю (в), хрому (г), ванадію (д), азоту (ж), ванадію та азоту (з) та перегріву над температурою ліквідусу на рідкотекучість конструкційних сталей. Базова сталь 20ХГСЛ.

Fig. 2. The influence of C (a), Si (б), Mn (в), Cr (г), V (д), N (ж), V+N (з) contents and overheating above liquidus temperature on the steel fluidity. The base is steel 20KhGSL.

Дослідження густини сталей показало, що густина конструкційних сталей з імовірністю 95% описується наступною залежністю:

$$\rho_{\text{тв}} = 0,99 - 0,172 \cdot l_{\text{ст}} \cdot \Delta_2 + 6,71 \cdot 10^{-6} \cdot \rho \cdot \sigma_{\text{жте}} - 0,015 \cdot l_{\text{д}} - 6,12 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta t_{\text{л}} \cdot \Delta t_{\text{кр}} + 5,52 \cdot 10^{-6} \cdot \rho \cdot \sigma_{\text{жте}} / \eta, (2)$$

$$R=0,709; \delta=1,2\%; F_p=7,29 > F_{\alpha(95\%)}=2,5.$$

Аналіз формули (2) показує, що збільшення тільки двох факторів густини і міжфазного натягу розплаву призводить до зменшення пористості і, як наслідок, до зростання густини сталі. У разі інших досліджених чинників спостерігається зворотна залежність або їх незначимість в межах дослідженої зміни. Щодо збільшення ефективності впливу чинники можна розташувати в наступній послідовності: дисперсність дендритної структури ($l_{\text{ст}}$, Δ_2 , $l_{\text{д}}$) властивості рідкого

металу (ρ , σ , η), теплофізичні умови тверднення ($\Delta t_{\text{л}}$, $\Delta t_{\text{кр}}$).

Приймаючи за основу сталь 20ХГСЛ, визначили вплив елементів на зміну густини металу, залитого при температурі заливки 1550 °С (рис. 3) і при різному перегрів над температурою ліквідус (рис. 4).

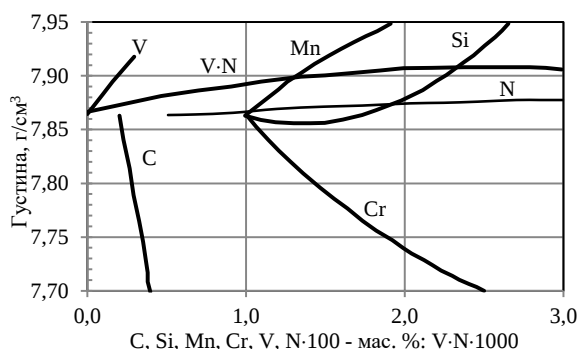


Рис. 3. Вплив елементів на густину конструкційних сталей при температурі заливання 1550 °С. Базовий хімічний склад сталі (мас. частка %): C = 0,2; Si = 1,0; Mn = 1,0; Cr = 1,0; N = 0,006.

Fig. 3. The influence of element contents on the steel density at pouring with 1550°C. The base is steel containing 0.2% C, 1 Si, 1 Mn, 1 Cr.

Видно, що вплив елементів на властивості рідкого металу, інтервал кристалізації, дисперсність дендритної структури і перегрів над температурою ліквідусу такий, що вуглець і хром в середньому знижують, а кремній, марганець, ванадій, азот і спільне легування азотом і ванадієм збільшує густину стали.

Однак при цьому необхідно відзначити існування численних локальних екстремумів, де зі збільшенням вмісту елемента густина може як збільшуватися, так і зменшуватися. В середньому по збільшенню питомої ефективності зміни густини легуючі елементи можна розташувати в наступній послідовності: V, Cr, Mn, Si, N+V, C.

Враховуючи, що зниження густини практично завжди супроводжується погіршенням технологічних і службових властивостей сталей, одним з найбільш перспективних, з точки зору густини, методів підвищення якості виливків є легування металу азотом або спільно азотом і ванадієм.

Висновки

1. В результаті аналізу процесу формування рідкотекучості та умов живлення виливків при охолодженні після тверднення теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що їх рівень визначається дисперсністю дендритної структури, величиною перегріву розплаву над температурою ліквідусу, а також властивостями рідкого металу, теплопровідністю стали при температурі солідусу, теплою і інтервалом кристалізації.

2. Встановлено кількісні закономірності такого впливу, які з ймовірністю не менше 95% і високим

ступенем достовірності ($R = 0,709-0,837$); $\delta = 1,2 - 13,8\%$) описують реальний процес.

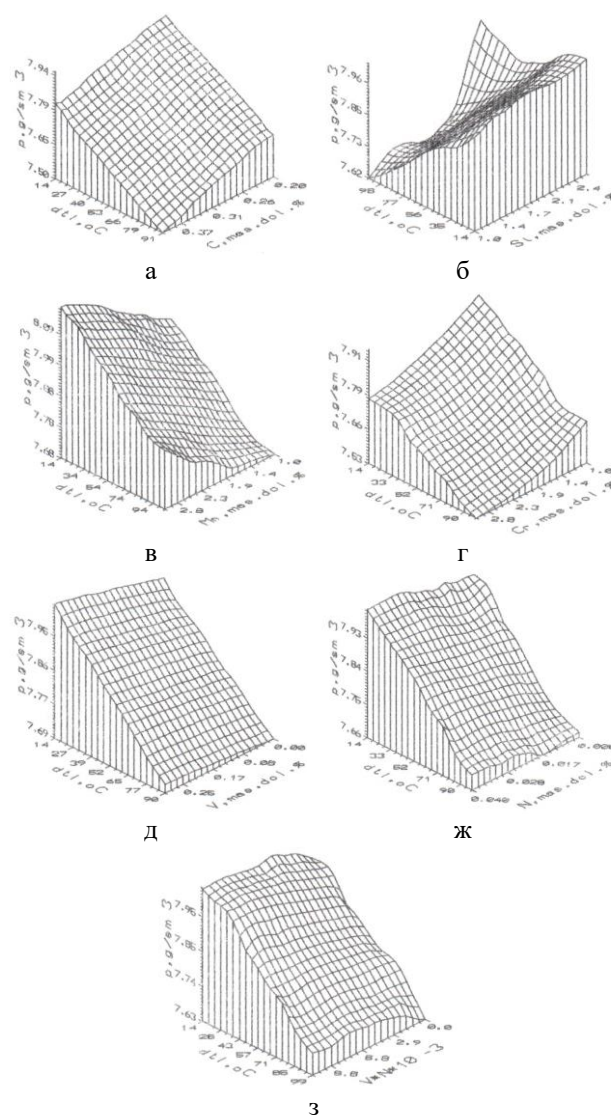


Рис. 4. Вплив вуглецю (а), кремнію (б), марганцю (в), хрому (г), ванадію (д), азоту (ж), ванадію та азоту (з) та перегріву над температурою ліквідус на густину конструкційних сталей. Базова сталь 20ХГСЛ.

Fig. 4. The influence of C (а), Si (б), Mn (в), Cr (г), V (д), N (ж), V+N (з) contents and overheating above liquidus temperature on the steel density. The base is steel 20KhGSL.

3. У статті показано, що по збільшенню ефективності впливу інтегральних факторів на рідкотекучість конструкційних сталей їх можна розташувати в наступній послідовності: теплофізичні умови тверднення, дисперсність дендритної структури, властивості рідкого металу. При цьому з ростом перегріву розплаву над температурою ліквідусу, теплоти кристалізації і дисперсності дендритної структури відбувається зростання рідкотекучості, збільшення ж значень інших факторів призводить до зворотного ефекту. За питомою ефективністю збільшення рідкотекучості легуючі елементи можна розташувати в наступній послідовності: Si, Cr, Mn, C, V, N, V+N.

4. Результатами виконаних досліджень показано, що по ефективності впливу розглянутих факторів на густину стали їх можна розташувати в наступній послідовності: дисперсність дендритної структури, властивості рідкого металу і теплофізичні умови затвердіння. Вплив легуючих елементів на ці параметри такі, що спостерігається складна багатоекстремальна зміна густини при легуванні стали. Загальна тенденція така, що вуглець і хром знижують, а кремній, марганець, ванадій, азот і спільне легування азотом і ванадієм підвищують густину стали. Щодо збільшення питомої ефективності зміни густини легуючі елементи можна розташувати в наступній послідовності: V, Cr, Mn, Si, N, N+V, C.

Список літератури

1. Zhi-ling Peng, Chun-gui Zhou. Research on modeling of nonlinear vibration isolation system based on Bouc-Wen model. *Defence Technology*. 2014. Vol. 10. P. 371-374.
2. Semenov M. E., Meleshenko P. A., Solovyov A. M., Semenov A. M. Hysteretic nonlinearity in inverted pendulum problem. *Springer Proceedings in Physics*. 2015. Vol. 168. P. 463-507.
3. Bernyk I., Nazarenko I., Luhovskyi O. Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation. *Materials and technology*. 2018. Vol. 4 (52). P. 465-468.
4. Veklich A., Tmenova T., Zazimko O., Trach V., Lopatko K., Titova L., Boretskij V., Aftandiliants Y., Lopatko S., Rogovskiy I. Regulation of biological processes with complexions of metals produced by underwater spark discharge. 2020. *Springer Proceedings in Physics*. Book series Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructure Surfaces and Their Applications. Vol. 247. P. 283-306.
5. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217747.
6. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3(105). P. 19-29.
7. Tmenova T., Valensi F., Veklich A., Cressault Y., Boretskij V., Lopatko K., Aftandilyant Y. Etude d'un arc impulsif immergé à l'aide de deux dispositifs expérimentaux. *Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement*. 2017. Vol. 3. No 1. P. 2428-8500. doi: 10.18145/jitipee.v3i1.159.
8. Loveikin V., Romasevych Y., Shymko L., Ohienko M., Duczmal W., Potwora W., Titova L., Rogovskii I. Agrotechnics and optimal control of cranes and hoisting machines: monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2020. 164 p.
9. Boretskij V. F., Veklich A. N., Tmenova T. A., Cressault Y., Valensi F., Lopatko K. G., Aftandilyants Y. G.

Plasma of underwater electric discharges with metal vapors. *Problems of atomic science and technology*. 2019. № 1. Series: Plasma Physics (25). P. 127-130.

References

1. Zhi-ling Peng, Chun-gui Zhou. (2014). Research on modeling of nonlinear vibration isolation system based on Bouc-Wen model. *Defence Technology*. 10. 371-374.
2. Semenov M. E., Meleshenko P. A., Solovyov A. M., Semenov A. M. (2015). Hysteretic nonlinearity in inverted pendulum problem. *Springer Proceedings in Physics*. 168. 463-507.
3. Bernyk I., Nazarenko I., Luhovskyi O. (2018). Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation. *Materials and technology*. 4 (52). 465-468.
4. Veklich A., Tmenova T., Zazimko O., Trach V., Lopatko K., Titova L., Boretskij V., Aftandiliants Y., Lopatko S., Rogovskiy I. (2020). Regulation of biological processes with complexions of metals produced by underwater spark discharge. *Springer Proceedings in Physics*. Book series Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructure Surfaces and Their Applications. 247. 283-306.
5. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6 (7-108). 71-79. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217747.
6. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3(105). 19-29.
7. Tmenova T., Valensi F., Veklich A., Cressault Y., Boretskij V., Lopatko K., Aftandilyant Y. (2017). Etude d'un arc impulsif immergé à l'aide de deux dispositifs expérimentaux. *Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement*. 3(1). 2428-8500. doi: 10.18145/jitipee.v3i1.159.
8. Loveikin V., Romasevych Y., Shymko L., Ohienko M., Duczmal W., Potwora W., Titova L., Rogovskii I. (2020). Agrotechnics and optimal control of cranes and hoisting machines: monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 164.
9. Boretskij V. F., Veklich A. N., Tmenova T. A., Cressault Y., Valensi F., Lopatko K. G., Aftandilyants Y. G. (2019). Plasma of underwater electric discharges with metal vapors. *Problems of atomic science and technology*. 1. Series: Plasma Physics (25). 127-130.

SIMULATION OF FLUIDITY AND DENSITY OF CAST STEELS

Y. G. Aftandiliants, M. M. Kruhliy

Abstract. As a result of the analysis of the formation processes of fluidity and the conditions for feeding the

castings during cooling after solidification, a significant effect of the properties of the melt and the dispersion of the primary structure on the fluidity and density of steel was established.

It is theoretically substantiated and experimentally confirmed that the level of fluidity and density is determined by the dispersion of the dendritic structure, the magnitude of the melt overheating over the liquidus temperature, as well as the properties of the liquid metal, the thermal conductivity of steel at the solidus temperature, crystallization heat and crystallization interval.

The established quantitative laws describe the real process with a probability more than 95% and a high degree of reliability ($R = 0,709-0,837$; $\delta = 1,2 - 13,8\%$).

The article shows that in order to increase the effectiveness of the influence of integral factors on the fluidity of structural steels, they can be arranged in the following sequence: thermophysical conditions of solidification, dispersion of the dendritic structure, properties of liquid metal. In this case, an increase in fluidity occurs with an increase in the overheating of the melt above the liquidus temperature, the heat of crystallization and the dispersion of the dendritic structure.

An increase in the values of other factors leads to the opposite effect. Alloying elements are arranged in the following sequence: Si, Cr, Mn, C, V, N, V + N according to the specific efficiency of increasing fluidity.

The results of the studies performed show that according to the effectiveness of the influence of the considered factors on the steel density, they can be arranged in the following sequence: dispersion of the dendritic structure, properties of liquid metal and thermophysical conditions of solidification. Alloying elements affect these parameters in such a way that a complex multiextremal change in density is observed during alloying of steel. The general trend is that carbon and chromium decrease, while silicon, manganese, vanadium, nitrogen, and co-alloying with nitrogen and vanadium increase the density of the steel. Alloying elements can be arranged in the following sequence: V, Cr, Mn, Si, N, N + V, C to increase the specific efficiency of changing the density.

Key words: steel, fluidity, chemical composition, temperature, density, dendritic structure.

и высокой степенью достоверности ($R = 0,709-0,837$; $\delta = 1,2 - 13,8\%$) описывают реальный процесс.

В статье показано, что по увеличению эффективности влияния интегральных факторов на жидкотекучесть конструкционных сталей их можно расположить в следующей последовательности: теплофизические условия затвердевания, дисперсность дендритной структуры, свойства жидкого металла. При этом с ростом перегрева расплава над температурой ликвидуса, теплоты кристаллизации и дисперсности дендритной структуры происходит рост жидкотекучести, увеличение же значений остальных факторов приводит к обратному эффекту. По удельной эффективности увеличения жидкотекучести легирующие элементы можно расположить в следующей последовательности: Si, Cr, Mn, C, V, N, V+N.

Результатами выполненных исследований показано, что по эффективности влияния рассмотренных факторов на плотность стали их можно расположить в следующей последовательности: дисперсность дендритной структуры, свойства жидкого металла и теплофизические условия затвердевания. Влияние легирующих элементов на эти параметры таково, что наблюдается сложное многоэкстремальное изменение плотности при легировании стали. Общая тенденция такова, что углерод и хром понижают, а кремний, марганец, ванадий, азот и совместное легирование азотом и ванадием повышают плотность стали. По увеличению удельной эффективности изменения плотности легирующие элементы можно расположить в следующей последовательности: V, Cr, Mn, Si, N, N+V, C.

Ключевые слова: сталь, жидкотекучесть, химический состав, температура, плотность, дендритная структура.

С. Г. Афтандіянц ORCID 0000-0001-5864-9855.

М. М. Круглій ORCID 0000-0003-4753-4352.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИДКОТЕКУЧЕСТИ И ПЛОТНОСТИ ЛИТЫХ СТАЛЕЙ

Е. Г. Афтандіянц, М. М. Круглій

Аннотация. В результате анализа процесса формирования жидкотекучести и условий питания отливок при охлаждении после затвердевания теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что их уровень определяется дисперсностью дендритной структуры, величиной перегрева расплава над температурой ликвидуса, а также свойствами жидкого металла, теплопроводностью стали при температуре солидуса, теплотой и интервалом кристаллизации.

Установлены количественные закономерности такого влияния, которые с вероятностью не менее 95%