

Прогнозування ливарних і механічних властивостей жаростійких сталей

Досліджено вплив легувальних елементів на властивості хромоалюмінієвої сталі у широких межах їх концентрацій (хром – 20...30 %, алюміній – 1...7 %, титан – 0,1...0,8 %). За допомогою математичних методів оброблення експериментальних даних розраховано коефіцієнти кореляції та рівняння регресії для прогнозування ливарних і механічних властивостей за першим хімічним аналізом під час плавлення сталі. У програмному середовищі Microsoft Visual Studio 2010 розроблено програмний комплекс, який дозволяє технологу-ливарнику оптимізувати свою роботу від розраховування шихти, прогнозування властивостей до корегування хімічного складу сплаву під час його плавлення.

Ключові слова: хромоалюмінієва сталь, хімічний склад, ливарні властивості, механічні властивості, розрахунок шихти, прогнозування властивостей

Прогнозування ливарних, механічних і спеціальних властивостей високолегованих сплавів на основі заліза з використанням комп'ютерної техніки сьогодні є досить актуальним завданням як для науковців, так і для виробників.

На даний час є багато способів прогнозування властивостей сталей, але всі вони досить незручні у використанні та потребують значної витрати часу (складання матриць або систем рівнянь).

Жаростійкі сталі, які використовують для виготовлення литих деталей, що працюють в агресивних середовищах за температур до 1300 °С, повинні мати не тільки високі експлуатаційні характеристики (окислостійкість, термостійкість і ростостійкість), але й задовільні технологічні властивості.

Технологічні властивості визначають поведінку матеріалу під час виготовлення з нього виробу. У комплексі технологічних характеристик важливе місце посідають ливарні властивості сплавів, які залежать від технологічних особливостей ливарної форми, з одного боку, та фізико-хімічних властивостей металу – з другого. Вони проявляються в рідкому стані, під час кристалізації, в рідко-твердій і твердо-рідкій фазах та в твердому стані.

Ливарні властивості схильних до плівкоутворення жаростійких сталей, які вміщують у своєму складі значну кількість хрому, алюмінію, кремнію титану тощо, вивчені вкрай мало [1...5].

Відсутність у літературі чітких рекомендацій щодо оптимального хімічного складу, температурних режимів виплавлення та розливання хромоалюмінієвих сталей є значним гальмом на шляху до впровадження їх у виробництво, незважаючи на високі експлуатаційні характеристики цих сплавів. Відсутність методології прогнозування ливарних властивостей таких сталей на рівні задовільних також ускладнює впровадження технологій виготовлення жаростійких деталей у виробництво.

Кафедрою ливарного виробництва чорних і кольорових металів НТУУ «КПІ» виконано перший крок у

цьому напрямку – розроблено методологію прогнозування та програму, яка дає можливість визначати ливарні та механічні властивості жаростійких хромоалюмінієвих сталей за їх першим хімічним аналізом і температурами перегрівання розплаву та розливання в ливарні форми.

Програма реалізується в системі програмування Microsoft Visual Studio 2010.

Для розроблення програми прогнозування властивостей жаростійких хромоалюмінієвих сталей за їх хімічним складом створено банк даних, для якого використано дані понад 50 плавок сплавів з високим вмістом хрому, алюмінію, вуглецю, титану тощо.

Практичну рідкотекучість сталей визначали за сталого металостатичного напору та температури 1580 ± 10 °С. Як технологічну пробу використовували спіраль Керрі. Метал у форму заливали, використовуючи спеціальну чашу, і підводили від периферії спіралі до її центру. Температуру металу вимірювали в чаші вольфрам-ренієвою термopарою з кварцовим наконечником та електронним потенціометром ЕПП-09-3М. Після досягнення металом необхідної температури включали електромагніт, який піднімав перегородку в чаші й відкривав шлях для руху металу в ливарну форму. Методика дає можливість у кожному досліді витримувати однакові температуру та металостатичний напір розплаву.

Установлено, що з підвищенням вмісту хрому до 30 % рідкотекучість сталей зростає до 550...600 мм внаслідок зниження температури ліквідус, зменшення інтервалу кристалізації сплаву відповідно діаграмі стану Fe-Cr і теплопровідності сплаву.

Підвищення концентрації алюмінію в хромистих сталях до 1,0...1,5 % зберігає їх практичну рідкотекучість на високому рівні, проте після підвищення його до 2...3 % дещо знижує рідкотекучість розплаву, хоча вона залишається високою. Такий вплив алюмінію на рідкотекучість хромистих сталей, очевидно, можна пояснити так: невеликі присадки алюмінію добре розкиснюють метал, надають йому

максимальної гомогенності, а тому рідкотекучість залишається високою. Зниження рідкотекучості сталей після доведення алюмінію в розплаві до 3 % пояснюється утворенням значної кількості оксидних плівок і нітридів, які значною мірою підвищують в'язкість розплаву. Вміст алюмінію понад 3 % в хромистій сталі сприяє деякому підвищенню рідкотекучості розплаву внаслідок зниження температури плавлення сплаву та теплопровідності рідкого металу, утворення щільної «сорочки» з оксидів, яка попереджає проникання розплаву в міжзернинні канали формувальної суміші та зменшує тертя рідини об стінки форми.

Отже, для збереження необхідної для виготовлення якісних виливків рідкотекучості хромисті сталі мають вміщувати 25...30 % хрому та 1...2 % алюмінію.

Практична рідкотекучість хромоалюмінієвих сталей значно підвищується за вмісту вуглецю до 0,4 % внаслідок зниження температури плавлення та теплопровідності розплаву. Подальше підвищення вмісту вуглецю знижує рідкотекучість сталей через збільшення інтервалу кристалізації, який превалює над процесами подальшого зниження теплопровідності та температури ліквідус.

Додавання титану в кількості до 0,35 % дещо підвищує практичну рідкотекучість досліджуваних сталей. Така поведінка обумовлена його високою розкиснювальною здатністю та зниженням температури початку кристалізації сталей. Подальше підвищення вмісту титану призводить до зниження рідкотекучості сталей внаслідок утворення великої кількості оксидних плівок та інших неметалевих вкраплин, які підвищують в'язкість сталі.

На підставі аналізу одержаних даних побудовано рівняння регресії для визначення рідкотекучості розплаву, який знаходиться в плавильному агрегаті, за першим хімічним аналізом, температурою його перегрівання, $T_{\text{пер}}$, i -тою температурою заливання металу у форми, $T_{\text{зал}}$:

$$Y_1 = -3627,054 + 3,27086\text{Cr} + 8,08007\text{Al} - 102,8557\text{C} - 60,7832\text{Ti} + 1,44852 T_{\text{пер}} + 1,09172 T_{\text{зал}}$$

Лінійна усадка. Відомо, що коефіцієнт усадки металу в твердому стані менший, ніж у рідкому, аустеніту більший, ніж у фериту, а із збільшенням у сталі вмісту вуглецю коефіцієнт підвищується [1]. На коефіцієнт усадки впливають також і фазові перетворення, які здійснюються в твердому металі. Оскільки досліджувані сталі мають феритно-карбідну структуру, то крива усадки змінюється плавно, без будь-яких перегинів.

Хром має необмежену розчинність в α -залізі, тому збільшує кількість феритної складової структури й знижує лінійну усадку досліджуваних сталей. На зменшення лінійної усадки сталі, після підвищення концентрації хрому, суттєвий вплив справляє також зміцнення міжатомних сил зв'язку в кристалевій ґратці легованого фериту.

Додавання невеликої кількості алюмінію помітно знижує усадку хромистих сталей внаслідок ще більшого звуження γ -області в сталях і збільшення феритної складової. Металографічні дослідження показали, що

сталь з 30 % Cr та 1 % Al має феритну структуру з дрібними вкрапинами карбідів. Коефіцієнт термічного стискання фериту складає $14,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ [2]. Це суттєво знижує лінійну усадку металу. Додавання алюмінію зменшує також загальний вміст газів у розплаві через утворення тугоплавких оксидів і нітридів, які стають додатковими центрами кристалізації, подрібнюють первинне зерно та підвищують щільність металу ще на ранній стадії реєстрації лінійної усадки.

Підвищення вмісту алюмінію понад 2 % збільшує лінійну усадку сталей, що можна пояснити спотворенням кристалічної ґратки фериту внаслідок подальшого легування металу алюмінієм і різницею коефіцієнтів термічного стискання, оскільки зростає розчинність алюмінію у фериті (практично може досягати 30 %). Коефіцієнт термічного стискання алюмінію дорівнює $23,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ (заліза – $11,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, хрому – $6,7 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$).

Таким чином, для зменшення лінійної усадки хромистих сталей вміст в них алюмінію має не перевищувати 2 %. Це стосується, перш за все, виробництва складних за геометрією та великогабаритних виливків.

З підвищенням вмісту вуглецю в сталі суттєво зменшується лінійна усадка внаслідок зниження температури початку тверднення металу та реєстрації усадки. Крім того вуглець у хромоалюмінієвих сталях утворює міцні карбіди з хромом та залізом, коефіцієнт термічного стискання яких нижчий, ніж легованого алюмінієм фериту.

Додавання невеликої кількості титану в хромоалюмінієві сталі дещо збільшує лінійну усадку. У низьковуглецевих сталях максимальне значення усадки досягається після додавання 0,35 % Ti, в середньовуглецевих – 0,25 % V, у високовуглецевих – 0,15 % Ti.

Підвищення лінійної усадки, очевидно, здійснюється внаслідок дегазації розплаву титаном та утворення високотемпературних сполук. Титан утворює оксиди (TiO_2 – 1950°C ; Ti_2O_3 – 2130°C ; TiO – 2020°C), нітриди TiN (2950°C) та карбіди TiC (3177°C), які є додатковими центрами кристалізації, а тому вони сприяють прискоренню початку кристалізації сталі та можливості реєстрації усадки на більш ранній стадії, тобто в твердо-рідкому стані після появи металевого каркасу в зразку.

Після подальшого зростання концентрації титану в сталях їх лінійна усадка знижується через зменшення коефіцієнта термічного стискання та збільшення міжатомних сил зв'язку в кристалічній ґратці фериту, оскільки титан може розчинятися в α -залізі до 9,8 %.

Рівняння регресії для визначення лінійної усадки розплаву має такий вигляд:

$$Y_2 = 5,738748 - 0,02734477\text{Cr} + 0,04279568\text{Al} - 0,0608981\text{Ti} - 0,4011802\text{Si} + 0,588994\text{Mn} + 0,0008889 T_{\text{пер}} - 0,00282918 T_{\text{зал}}$$

Трищинотійкість. Загально визнано, що причиною виникнення гарячих тріщин у виливках є механічні або термічні гальмування, які створюються геометрією вилівка та усадкою. Гарячі тріщини зароджуються за температур, близьких до температур завершення первинної кристалізації. Для

високолегованих сталей інтервалом зародження гарячих тріщин є 1450...1250 °С [3]. У цьому інтервалі температур на межах зерен ще залишаються прошарки рідкої фази, які сприяють зниженню високо-температурної міцності та пластичності металу.

Деякою мірою це пояснюється шкідливим впливом інтервалу кристалізації, за якого подовжується час перебування металу в двофазному стані та існування міжкристалічних рідких плівок, що і сприяє зниженню опору металу до утворення гарячих тріщин.

Сталі з хромом та алюмінієм мають низьку тепло-провідність, внаслідок чого виникає велика різниця температур між поверхневими та внутрішніми шарами металу, що й призводить до появи внутрішніх гарячих тріщин, які згодом поширюються до поверхні вилівка внаслідок збільшення усадки металу. Помітний вплив на процеси утворення гарячих тріщин справляють теплофізичні властивості формувальних матеріалів, перегрівання стінок форми в місцях, які розташовуються проти живильників тощо. Проте зниження коефіцієнта термічного стискання, яке обумовлене зростанням феритної складової структури після підвищення вмісту хрому та додавання оптимальної кількості алюмінію, позитивно впливає на тріщино-стійкість досліджених сталей.

Вуглець значною мірою подрібнює первинне зерно литої сталі. Це сприяє збільшенню довжини меж зерен, а отже й загальної поверхні їх на одиницю об'єму, внаслідок чого знижується питоме навантаження на одиницю їх довжини, що сприяє підвищенню міцності сталі в інтервалі утворення гарячих тріщин і, як наслідок, покращує її тріщиностійкість.

Додавання невеликої кількості титану (у низьковуглецеві хромоалюмінієві сталі – до 0,35 %, у середньовуглецеві – до 0,25 % і у високовуглецеві – до 0,15 %) знижує тріщиностійкість сталей через збільшення лінійної усадки.

Підвищення вмісту титану понад 0,35 % зменшує схильність сталей до утворення гарячих тріщин внаслідок підвищення міцності металу в період можливо утворення гарячих тріщин, оскільки здійснюється додаткове мікролегування хромоалюмінієвого фериту титаном та подрібнення зерна.

За результатами досліджень побудовано рівняння регресії для визначення схильності хромоалюмінієвих сталей до утворення тріщин, яке має такий вигляд:

$$Y_3 = 9,709851 - 0,060479Cr + 0,16103Al - 0,146276Ti - 1,16504Si + 1,90252Mn - 0,0072883T_{\text{пер}} - 0,0047076T_{\text{зал}}$$

Об'ємна усадка. На повну об'ємну усадку впливає багато факторів: температура та швидкість заливання металу у форми, виокремлення газів, швидкість і направленість тверднення тощо.

Підвищення вмісту хрому в сталі знижує її тепло-провідність, що суттєво погіршує умови формування якісних виливків. У дослідах проби заливались приблизно за однакової температури, тому час перебування їх у рідкому стані з підвищенням вмісту хрому збільшувався, що призводило до зростання усадки в рідкому стані, під час кристалізації та охолоджен-

ня металу до кімнатної температури. Таку ж дію на усадку сталі справляє й алюміній.

Зниження теплопровідності сталей після підвищення в них хрому та алюмінію сприяє збільшенню усадкових дефектів і сконцентрованої усадкової раковини.

Підвищення вмісту вуглецю в хромоалюмінієвих сталях від 0,08 до 0,8 % збільшує повну об'ємну усадку та об'єм усадкових пустот, знижує об'єм усадкових раковин, які при вмісті в сталі біля 1,5 % Ti та 0,8 % C взагалі не утворюються.

З підвищенням концентрації вуглецю значно знижується температура початку кристалізації, що, за однакової температури заливання форм, збільшує усадку в рідкому стані. Крім того, підвищення вмісту вуглецю до 0,8 % розширює інтервал кристалізації приблизно на 100 °С, а тому збільшується усадка і під час кристалізації. Відповідно до цього, повна об'ємна усадка та об'єм усадкових пустот збільшуються з підвищенням вмісту вуглецю, а об'єм сконцентрованих усадкових раковин зменшується через ускладнене живлення міждендритних порожнин рідким металом.

За результатами досліджень побудовано рівняння регресії для визначення повної об'ємної усадки хромоалюмінієвих сталей, яке має такий вигляд:

$$Y_4 = -43,06737 + 0,135247Cr + 5,85028C + 0,928318Ti + 0,278277Si - 1,16424Mn + 0,033678T_{\text{пер}} - 0,00341997T_{\text{зал}}$$

За аналогією ливарних характеристик побудовано рівняння регресії для визначення механічних властивостей хромоалюмінієвих сталей за результатами першого хімічного аналізу розплаву:

тимчасовий опір розриванню:

$$Y_5 = 5254,985 - 5,743621Cr - 24,90652Al + 0,02463425C + 38,96235Ti - 2,916841T_{\text{пер}} - 0,00341997T_{\text{зал}}$$

ударна в'язкість:

$$Y_6 = 1,013471 - 0,00234522Cr - 0,00888259Al + 0,01997738C - 0,00732455Si - 0,00061275T_{\text{пер}} + 0,000093026T_{\text{зал}}$$

твердість:

$$Y_7 = 308,1203 + 1,417297Cr - 104,4992Al + 690,7473C + 22,18616Ti + 179,2316Mn - 0,266538T_{\text{пер}} - 0,2054998T_{\text{зал}}$$

На основі цих рівнянь та з урахуванням коефіцієнтів кореляції створено перший модуль програми. Приклад прогнозування властивостей сплавів за їх хімічним складом і температурами перегрівання та заливання в ливарні форми показано на рис. 1. Для одержання результатів у діалоговому вікні необхідно внести хімічний склад сталі та розрахувати властивості.

Варіант програми дає можливість прогнозувати ливарні та механічні властивості хромоалюмінієвих

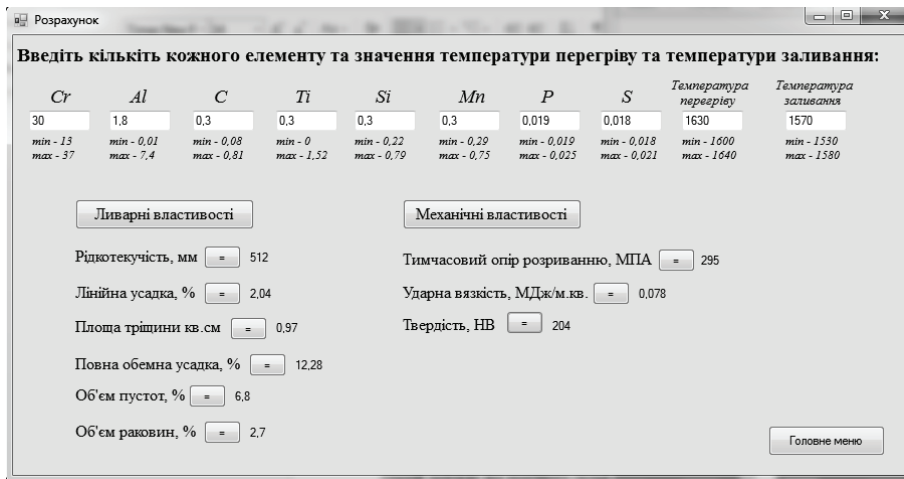


Рис. 1. Приклад прогнозування властивостей за хімічним складом і температурами перегрівання та заливання металу у форми

сталей після визначення експрес-аналізом хімічного складу розплаву та температури металу, що знаходиться в плавильному агрегаті. Температуру металу перед заливанням у форму вибирають за технологічним процесом і підставляють у рівняння. Це дає можливість своєчасно скоригувати хімічний склад і температуру металу перед випусканням його із печі та витримати оптимальну температуру заливання розплаву в ливарні форми.

Після прогнозування властивостей, технолог аналізує отримані дані і, якщо якась властивість не влаштовує, то є можливість повернутись до головного меню програми та обрати другий модуль «Прогнозування хімічного складу хромоалюмінієвих сталей залежно від заданих властивостей».

Другий модуль програми засновано на багатокритеріальному пошуку хімічного складу за заданими властивостями.

Після вибору даного модулю відкривається діалогове вікно (рис. 2) для введення бажаних властивостей та відбувається розрахунок хімічного складу сталі для заданих властивостей. Якщо варіантів хімічного складу більше одного є можливість розглянути усі для оцінки та вибору найоптимальнішого варіанта.

Розроблена програма прогнозування властивостей жаростійких хромоалюмінієвих сталей значною мірою полегшить виробникам вирішення технологічних питань, пов'язаних із виробництвом жаростійких литих деталей із сталей цього класу.

Похибка в розрахунку за розробленою програмою максимально досягає 10 %, що припустимо при похибці вимірювань до 7 %.

Проте, слід зазначити, що для використання цієї програми на підприємствах, слід мати у виробничих умовах високу технологічну культуру:

- виплавляння сталей необхідно виконувати відповідно до вимог технологічних інструкцій, щоб забезпечити точний хімічний склад

металу кожної плавки з використанням різної шихти, в тому числі й некондиційної;

- для визначення хімічного складу розплаву слід використовувати сучасні методи експресного спектрального аналізу.

На підставі накопиченої інформації щодо шихтових матеріалів і феросплавів, визначення угару хімічних елементів у різних печах з основною футеровкою розроблено методику та програму розрахування шихти для сплавів з високим вмістом хрому, яка реалізована в системі програмування Microsoft Visual Studio 2010. Робота програми полягає в наступному: технолог

обирає параметр плавки та тип печі, вказує місткість печі та кількість звороту власного виробництва. Далі вносить мінімальне, максимальне та прийняте значення кількості усіх елементів у сплаві (рис. 3). База даних вміщує понад 600 марок сплавів та їх хімічний склад.

Після введення всіх необхідних даних починається розрахунок кожного легувального елемента в окремому вікні. Визначення елемента здійснюється з урахуванням вмісту його в звороті власного виробництва та угару й кількості елемента, що вноситься феросплавом з урахуванням угару та загальної кількості феросплаву, яку додають у розплав. Під час визначення кількості необхідного феросплаву без урахування угару для прийнятої кількості елемента програма автоматично відкриває вікно для вибору марки феросплаву.

У базу даних внесено всі необхідні марки феросплавів для розрахунку будь-якої марки сталі. Після вибору феросплаву та його марки кількість основного елемента у феросплаві автоматично заноситься в розрахунок, а хімічний склад феросплаву переноситься в кінцеву таблицю.

Після аналогічного розрахунку для всіх легувальних елементів вибирають необхідну марку сталевого брухту. У базу даних занесено 64 марки сталевого брухту. Після завершення розрахунку отримують

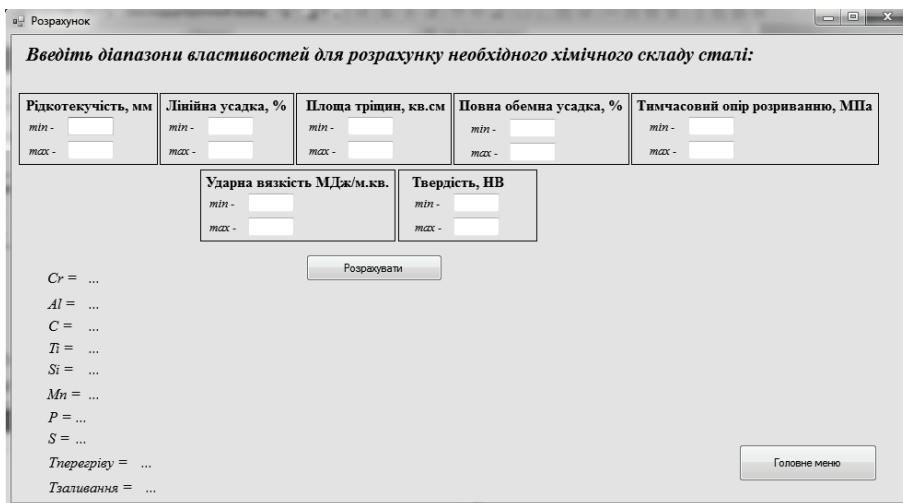


Рис. 2. Вікно прогнозування хімічного складу за заданими властивостями

Введіть дані для розрахунку:

1. Параметри плавки: З окисненням Перегрів

2. Тип печі: ІСТ ДСП

Продовжити

Введіть кількість елементів у сталі не враховуючи C, Si, Mn, P та S: (не більше 10 ел.)

Введіть тонажність печі, кг:

Введіть кількість звороту власного виробництва, %:

Продовжити

Введіть кількість кожного елемента у сталі, %: (приклад: чи являється він легувальним.)

1. C = 2. Si = 3. Mn = 4. S = 5. P =

6. Cr = 7. Ni = 8. Ti =

Продовжити

Рис. 3. Вікно введення даних для розраховування шихти

Результати розрахунку

	C	Si	Mn	Mo	W	V	Ti	Ni	Nb	Sb	Cr	Zn	Ві	Сь	Nb	Рь	Ni	Ал	В	Zr	P	S	%	кг	
Зарок сталюго виробництва	0,3	0,3	0,3	0	0	0	0,3	1,8	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,015	0,015	35	350	
Смислоий бруст	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,7	226,5	
Чезур виробничий	4	0,7	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12	0,03	6,1	61
ФХХ25	0,25	2	0	0	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,02	32,3	323,5
ЛВВВ	0	4	0	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	2,9	28,6	
ФГХ2С3	0,2	5	0	0,2	0	0,4	35	8	0,04	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0,2	0,04	0,04	1	10,4	

Принести параметри по екрану для розрахунку

Додати вагу поробки

Сума: 100 1000

Потрібна кількість C - 0,5

Складка вагу додати, % - 6,1

Зробити розрахунок

Отримана кількість C по розрахунку - 0,274

Потрібна кількість C - 0,5

Зробити параметри по всіх інших елементах

Отримана кількість C по розрахунку - 0,5

Зробити розрахунок

Рис. 4. Приклад кінцевої таблиці розрахунку шихти для виплавляння сталі 35Х30Ю2ТЛ

ЛИТЕРАТУРА

- Макаревич О. П. Виробництво виливків із спеціальних сталей / О. П. Макаревич, Г. Є. Федоров, Є. О. Платонов. – НТУУ «КПІ», 2005. – 712 с.
- Стальное литьё: Монография / Г. Е. Федоров, М. М. Ямшинский, Е. А. Платонов, Р. В. Лютый. – К.: НТУУ «КПИ», ПАО «Випол», 2013. – 896 с.
- Нехендзи Ю. А. Стальное литьё / Ю. А. Нехендзи. – М.: Металургиздат, 1949. – 766 с.
- Синцов В. А. Линейная усадка сталей 0Х23Н28М3Д3Т и 10Х18Н9Т / В. А. Синцов, В. А. Чечулин // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1972. – № 4. – С. 138-141.
- Крынин И. Р. Свойства хромоникелевых сталей в зоне температур возникновения горячих трещин / И. Р. Крынин // Усадочные процессы в сплавах и отливках. – К.: Наукова думка, 1970. – С. 54-56.

загальну таблицю (рис. 4), в якій показано всі необхідні дані.

Висновки

Комплексним дослідженням ливарних і механічних властивостей жаростійких сталей суттєво доповнено відомості щодо характеристик високолегованих сплавів на основі заліза. Це дало можливість визначити гаму сталей для роботи в умовах агресивних середовищ різного складу до температур 1300 °С.

Розроблено програми прогнозування якості розплавів з високим вмістом хрому за першими результатами хімічного аналізу та температурами перегрівання.

Розроблено програму розраховування шихти для виплавляння хромоалюмінієвих сталей з використанням промислових шихтових матеріалів.

Аннотация

Ямшинський Н. Н., Федоров Г. Е., Радченко К. С.

Прогнозирование литейных и механических свойств жаростойких сталей

Исследовано влияние легирующих элементов на свойства хромоалюминиевых сталей в широких пределах их концентраций (хром – 20...30 %, алюминий – 1...7 %, титан – 0,1...0,8 %). С помощью математических методов обработки экспериментальных данных рассчитаны коэффициенты корреляции и уравнения регрессии для прогнозирования литейных и механических свойств по первому химическому анализу во время плавления стали. В программной среде Microsoft Visual Studio 2010 разработан программный комплекс, позволяющий технологу-литейщику оптимизировать свою работу от расчёта шихты, прогнозирования свойств до корректировки химического состава сплава при проведении процесса плавления.

Ключевые слова

хромоалюминиевая сталь, химический состав, литейные свойства, механические свойства, расчёт шихты, прогнозирование свойств

Summary

Yamshinskiy M., Fedorov G., Radchenko K.

Prediction of casting and mechanical properties of heat-resistant steels

The influence of alloying elements on properties of the steels in the broad hromoaluminievyh wide limits Concentrations (chromium – 20...30 % aluminum – 1...7 % titanium – 0,1...0,8 %), was studied. By the mathematical methods for processing experimental data and was calculated correlation coefficients of the regression equation to predict the mechanical properties of the casting and the first chemical analysis during melting of steel. In the programmatic environment Microsoft Visual Studio 2010 have been designed a software package which allows technologist-caster to optimize their work by calculation of the charge, to predict the properties of correctin of the chemical composition of the alloy during the melting process.

Keywords

hromoaluminieva steel, the chemical composition, casting properties, mechanical properties, the charge calculation, forecasting properties

Поступила 23.09.2015