

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.03

УДК 629.58. 633.79.623.84

О.І. Бабаченко, Г.А. Кононенко, Т.В. Кімстач, Р.В. Подольський, О.А. Сафронова

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУР КРИТИЧНИХ ТОЧОК ЕКОНОМНОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Анотація. *Кінцевий рівень механічних та експлуатаційних властивостей легованих сталей багато в чому забезпечують параметри термічної обробки для проведення якої необхідно знати величини критичних температур фазових перетворень A_{c1} і A_{c3} , також температур бейнітного (BS) та мартенситного (MS) перетворень. Експериментальне визначення витратне, тому актуальною є потреба у використанні розрахункових методів. Мета роботи – з числа відомих математичних моделей визначити найбільш придатні для прогнозування температури критичних точок багатокомпонентних економнолегованих конструкційних сталей.*

Дослідження проводили шляхом порівняльного аналізу результатів розрахунків за відомими математичними моделями, які використовують для визначення температур критичних точок фазових перетворень в багатокомпонентних економнолегованих конструкційних сталях, та експериментальних даних для досліджуваних сталей і сталі-прототипу. Хімічний склад досліджуваних сталей визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L. Досліджувані сталі виплавляли в лабораторних умовах з шихтових матеріалів технічної чистоти в індукційному модулі ІТПЕ-0,01. Плавку проводили методом переплаву без примусового окислення домішок. Для виявлення структурних і фазових перетворень сталі-прототипу був використаний метод диференційного термогравіметричного аналізу (ДТГА) який проводили на синхронному термічному аналізаторі STA 449 C Jupiter.

Приведено результати порівняльного аналізу математичних моделей, що застосовують для прогнозування температур критичних точок фазових перетворень в економнолегованих конструкційних сталях. Проаналізовано вплив легуючих елементів на значення критичних температур, а також розглянуто умови застосування різних математичних моделей. Встановлено, що досліджені математичні моделі дозволяють встановити величини критичних точок сталей

© Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Кімстач Т.В., Подольський Р.В., Сафронова О.А.

з відносно невеликою точністю відносно фактичних, визначених експериментально. Тим не менше, виходячи з того, що на практиці для призначення температури під загартування найбільш значущою є температура A_{c3} , а реальна температура загартування, з технологічної точки зору та обладнання, що використовується для проведення термічної обробки, може перевищувати температуру точки A_{c3} на 30...100 °C, то з достатньо високим рівнем точності розрахунок величини температури A_{c3} для економнолегованих конструкційних сталей рекомендовано проводити за математичними моделями програмного комплексу Jmat PRO або ІЧМ.

Ключові слова: сталь, математична модель, критичні точки, термічна обробка, легуючі елементи.

Вступ

Листовий сталевий прокат складає майже половину від загальної кількості прокату, що виробляють на металургійних підприємствах, і потреба в ньому щорічно зростає. Застосування сучасних технологічних процесів штампування та зварювання замість лиття, кування та різання обумовлює широке використання листового прокату в різних галузях промисловості.

Найбільшими споживаючими галузями товстолистого металу є: суднобудування – для виготовлення елементів корпусу та надбудови, деталей фундаменту, для обшивки судна, при виробництві судових приладів, механізмів, понтонів, причалів та інших конструкцій:

- будівництво та мостобудування - для виготовлення двотаврових балок, зварних колон коробчастого перерізу та інших несучих профілів, одержуваних шляхом різання та зварювання елементів з листової сталі; перекриттів будівель, елементів прогонової будови мостів, естакад, галерей; труб середнього та великого діаметра, які можуть служити як для організації комунікацій (трубопроводи, димарі, кабельні комунікації тощо), так і як несучі опори споруд і мостів;

- машинобудування (автотракторне, вагоно- та тепловозобудівне виробництво) – кузова самоскидів та фронтальних навантажувачів, ківші екскаваторів, дробарки, бетономішалки, різні елементи добувного обладнання, вузли сільськогосподарських машин та інше;

- хімічне виробництво – для виготовлення труб, котлів, посудин та резервуарів для транспортування та зберігання рідких та газоподібних речовин тощо;

- верстатобудування та інших виробничих сферах і напрямках.

Товстий лист у значній кількості також є заготовкою для отримання тонких листів. Завдяки необхідному рівню механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей гарячекатаний лист є кращим на сьогодні вихідним матеріалом при виготовленні зварних металевих конструкцій, деталей і з'єднань, наприклад, зварних нафтогазопровідних труб великого діаметра.

Товстолистову трубну сталь широко застосовують для виготовлення офшорних конструкцій - морських споруд для видобутку та зберігання нафти і газу, для генерації та акумулювання електроенергії, що отримується від поновлюваних джерел, несучих конструкцій, глибоководних платформ тощо.

Кожен із перелічених сегментів пред'являє свій комплекс вимог до листового металу відповідно до умов його експлуатації.

Якість товстолистової сталі залежить від багатьох факторів і зі збільшенням товщини листа погіршується. Це обумовлено меншим ступенем обтискання серединних шарів листа при прокатці, більш розвиненою ліквациєю вуглецю, сірки та фосфору, меншою швидкістю охолодження і, як наслідок, грубозернистою структурою. В свою чергу, збільшення товщини листа призводить до зменшення порога холодноламкості, що неминуче пов'язано з необхідністю поліпшення показників ударної в'язкості. Конкретні вимоги до товстого листа залежать від його подальшого використання. З числа відомих важелів впливу на характеристики товстого листа є його термічна обробка, температурно-часові режими якої призначають з урахуванням результатів визначення температур критичних точок.

Стан питання. Конструкційна придатність матеріалу виробів визначається комплексом механічних і експлуатаційних властивостей, оптимальне поєднання яких забезпечує надійність їх експлуатації. Для сталі це, перш за все, показники міцності, а також ударна в'язкість, пластичність, тріщиностійкість і ряд інших параметрів. Їх кінцеві значення багато в чому

забезпечують параметри термічної обробки для проведення якої, перш за все для легованих сталей, треба знати величини температур критичних точок фазових перетворень A_{c1} і A_{c3} , також точок бейнітного (BS) та мартенситного (MS) перетворень.

Така необхідність визначення температур критичних точок викликана тим, що легуючі елементи в сталях значно впливають на їх величину. Зокрема, легуючі елементи та домішки в сталі можуть значно підвищувати або знижувати температуру її точки A_{c1} .

Подібний характер впливу легуючих елементів пов'язаний з двома наступними факторами. Як відомо, критична температура A_{c1} в вуглецевій сталі відповідає перетворенню евтектоїдної суміші перліту $\alpha + Fe_3C$ в аустеніт шляхом фазового переходу $\alpha \rightarrow \gamma$, дисоціації карбіду і розчинення вуглецю в γ -залізі. З одного боку, легуючі елементи змінюють температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення для фериту, що входить до складу евтектоїду (перліту), а з іншого боку легуючі елементи впливають на температуру дисоціації евтектоїдних карбідів і подальше розчинення вуглецю та легуючих елементів в γ -залізі. Як правило карбідоутворюючі елементи підвищують температуру дисоціації карбідів. При цьому, якщо карбідоутворюючі елементи також підвищують температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення, то їх вплив на зміщення температури точки A_{c1} посилюється ще більше.

Некарбідоутворюючі елементи, розчиняючись у цементиті, знижують температуру дисоціації карбіду. При цьому нікель і марганець знижують температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходу, а отже, знижують точку A_{c1} . В цілому вплив елементів на критичні точки зберігається і в сталях, що містять одночасно декілька легуючих елементів.

Вплив хрому на точку A_{c1} має складний характер. Збільшення вмісту хрому до 12-13% порівняно слабо підвищує точку A_{c1} , а при збільшенні його вмісту понад 14% спостерігається різке підвищення температури A_{c1} . Подібний вплив пояснюється тим, що при вмісті до 12-13% хром знижує температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходу, і підвищення точки A_{c1} обумовлено більш сильним впливом підвищених температур дисоціації евтектоїдних карбідів.

Багатокомпонентне легування сталей значно ускладнює процес прогнозування та знижує його точність щодо визначення температур критичних точок. Тому, для надійного визначення критичних температур фазових перетворень застосовують експериментальні методи (метод пробних загартувань, дилатометричний, диференціальний, термічний, вимірювання електроопору тощо).

У зв'язку з тим, що експериментальні визначення критичних точок потребують значних часових, матеріальних та фінансових витрат наразі для визначення значень критичних точок все частіше використовують математичні моделі - емпіричні рівняння, які отримують шляхом зіставлення та вирішення системи лінійних рівнянь за експериментальними даними, або отриманими за результатами використання феноменологічного підходу.

В більшості відомих математичних моделей для розрахунку температур фазових перетворень вміст елементів виражено у масових відсотках, температура – у градусах Цельсія. В числі таких математичних моделей є:

- модель Е. Гюнтера, Г. Радомськи та Б. Охайм [1]:

$$Ac_1 = 723 - 9,2 \cdot Mn + 30,4 \cdot Si + 19,0 \cdot Cr - 15,8 \cdot Ni + 23,6 \cdot V + 24,3 \cdot Al. \quad (1)$$

$$Ac_3 = 924,8 - 231,1 \cdot \sqrt{C} + 53,7 \cdot Si - 15,9 \cdot Ni + 23,2 \cdot Mo + 88,7 \cdot V + 78,6 \cdot Al - 439,2 \cdot Zr. \quad (2)$$

- модель К. Ендрюса [2]:

$$Ac_1 = 723 - 10,7 \cdot Mn + 29,1 \cdot Si + 16,9 \cdot Cr - 16,9 \cdot Ni + 6,38 \cdot W + 290 \cdot As. \quad (3)$$

$$Ac_3 = 910 - 203 \cdot \sqrt{C} + 44,7 \cdot Si - 15,2 \cdot Ni + 31,5 \cdot Mo + 13,1 \cdot W + 104 \cdot V + (-30 \cdot Mn - 11 \cdot Cr - 20 \cdot Cu + 400 \cdot Al + 400 \cdot Ti + 700 \cdot P + 120 \cdot As). \quad (4)$$

$$Ms = 539 - 423 \cdot C - 30,4 \cdot Mn - 12,1 \cdot Cr - 17,7 \cdot Ni - 7,5 \cdot Mo \quad (5)$$

$$Ms = 512 - 453 \cdot C + 217 \cdot C^2 + 15 \cdot Cr - 16,9 \cdot Ni - 9,5 \cdot Mo - 71,5 \cdot C \cdot Mn - 67,6 \cdot C \cdot Cr. \quad (6)$$

- модель Р. Грейнджа [3]:

$$Ac_1 = 723 - 13,9 \cdot Mn + 22,2 \cdot Si + 23,3 \cdot Cr - 14,4 \cdot Ni. \quad (7)$$

$$Ac_3 = 854 - 179,4 \cdot C - 13,9 \cdot Mn + 44,4 \cdot Si - 1,7 \cdot Cr - 17,8 \cdot Ni. \quad (8)$$

- модель Т. Кунітаке [4]:

$$Ac_1 = 727,0 - 32,7 \cdot C + 2,0 \cdot Mn + 14,9 \cdot Si + 17,8 \cdot Cr - 14,2 \cdot Ni + 25,6 \cdot Mo - 17,0 \cdot Cu. \quad (9)$$

$$Ac_3 = 912,0 - 230,5 \cdot C - 20,4 \cdot Mn + 31,6 \cdot Si - 14,8 \cdot Cr - 18,1 \cdot Ni + 16,8 \cdot Mo - 39,8 \cdot Cu. \quad (10)$$

$$Ms=560,5-407,3\cdot C-37,8\cdot Mn-7,3\cdot Si-19,8\cdot Cr-19,5\cdot Ni-4,5\cdot Mo-20,5\cdot Cu. \quad (11)$$

- модель Т. Кунітаке та Т. Като [5]:

$$Ac_1=754,83-32,25\cdot C-17,76\cdot Mn-23,32\cdot Si+17,13\cdot Cr+4,51\cdot Mo+15,62\cdot V. \quad (12)$$

$$Ac_3=930,21-394,75\cdot C-14,40\cdot Mn+54,99\cdot Si+5,77\cdot Cr+24,49\cdot Mo+83,37\cdot V. \quad (13)$$

- модель Дж. Елдіса [6]:

$$Ac_1=712-17,8\cdot Mn+20,1\cdot Si+11,9\cdot Cr-19,1\cdot Ni-9,8\cdot Mo. \quad (14)$$

$$Ac_3=871-254,4\cdot C+51,7\cdot Si-14,2\cdot Ni. \quad (15)$$

$$Ms=531-391,2\cdot C-43,3\cdot Mn-16,2\cdot Cr-21,8\cdot Ni. \quad (16)$$

- модель О.Г. Касаткіна, Б.Б. Вінокура та В.Л. Пилюшенко [7, 8]:

$$Ac_1=723-7,08\cdot Mn+37,7\cdot Si+18,1\cdot Cr-8,95\cdot Ni+44,2\cdot Mo+3,18\cdot W+50,1\cdot V+21,7\cdot Al+297\cdot S-830\cdot N-11,5\cdot C\cdot Si-5,28\cdot C\cdot Ni-57,9\cdot C\cdot Mo-27,4\cdot C\cdot V-14,0\cdot Mn\cdot Si-6,0\cdot Mn\cdot Ni-15,5\cdot Mn\cdot Mo-3,1\cdot Si\cdot Cr+6,77\cdot Si\cdot Ni-0,8\cdot Cr\cdot Ni+30,8\cdot Mo\cdot V-0,84\cdot Cr^2-0,46\cdot Ni^2-3,46\cdot Mo^2-28\cdot V^2. \quad (17)$$

$$Ac_3=912-370\cdot C-27,4\cdot Mn+27,3\cdot Si-6,35\cdot Cr-32,7\cdot Ni+5,57\cdot W+95,2\cdot V+72,0\cdot Al+70,2\cdot Ti+64,5\cdot Nb+276\cdot P+332\cdot S-485\cdot N-900\cdot B+16,2\cdot C\cdot Mn+32,3\cdot C\cdot Si+15,4\cdot C\cdot Cr+48,0\cdot C\cdot Ni+4,8\cdot Mn\cdot Ni+4,32\cdot Si\cdot Cr-18,6\cdot Si\cdot Ni-17,3\cdot Si\cdot Mo+40,5\cdot Mo\cdot V+174\cdot C^2+2,46\cdot Mn^2-6,86\cdot Si^2-0,322\cdot Cr^2+1,24\cdot Ni^2+9,9\cdot Mo^2-60,2\cdot V^2. \quad (18)$$

- модель В.І. Зюзіна, В.Д. Садовського та С.І. Баранчука [9]:

$$Ms=520-320\cdot C-45\cdot Mn-5\cdot Si-30\cdot Cr-20\cdot Ni-20\cdot Mo-5\cdot Cu. \quad (19)$$

- модель У. Стівена та А. Хейнса [10]:

$$Ms=561-474\cdot C-33\cdot Mn-17\cdot Cr-17\cdot Ni-21\cdot Mo. \quad (20)$$

$$Bs=830-270\cdot C-90\cdot Mn-70\cdot Cr-37\cdot Ni-83\cdot Mo. \quad (21)$$

- модель Л. Карапелли [11]:

$$Ms=513,9\cdot(1-0,620\cdot C)\cdot(1-0,092\cdot Mn)\cdot(1-0,033\cdot Si)\cdot(1-0,070\cdot Cr)\cdot(1-0,045\cdot Ni)\cdot(1-0,029\cdot Mo)\cdot(1-0,013\cdot W)\cdot(1+0,120\cdot Co)-18. \quad (22)$$

- модель П. Пейсона та К. Севіджа [12]:

$$Ms=499-317\cdot C-33,3\cdot Mn-11,1\cdot Si-27,8\cdot Cr-16,7\cdot Ni-11,1\cdot Mo-11,1\cdot W. \quad (23)$$

- модель О. Роуленда та С. Лайла [13], яка уточнює формулу [12]:

$$Ms=499-333\cdot C-33,3\cdot Mn-11,1\cdot Si-27,8\cdot Cr-16,7\cdot Ni-11,1\cdot Mo-1,1\cdot W. \quad (24)$$

- модель Р. Грейнджа та Г. Стюарта [14]

$$Ms=538-361\cdot C-38,9\cdot Mn-38,9\cdot Cr-20\cdot Ni-27,8\cdot Mo. \quad (25)$$

- модель І. Артінгера [15]:

$$Ms=520-(360-C)\cdot C-33\cdot Mn-11\cdot Si-22\cdot Cr-17\cdot Ni-11\cdot Mo-11\cdot W+6\cdot Co+17\cdot Al. \quad (26)$$

- модель Т. Кунітаке та Я. Окади [16]:

$$Bs=732-202\cdot C-85\cdot Mn+216\cdot Si-47\cdot Cr-37\cdot Ni-39\cdot Mo. \quad (27)$$

- модель А. Кульмбурга [17]:

- для сталей великих поковок:

$$Ac_1=747-17,4\cdot Mn+13,3\cdot Cr-24,8\cdot Ni+18,4\cdot Mo \quad (28)$$

$$Ac_3=880-204\cdot C+19,5\cdot Si-17,2\cdot Ni+83,5\cdot V. \quad (29)$$

$$Ms=572-386\cdot C-69\cdot Mn-43\cdot Cr-26\cdot Ni. \quad (30)$$

$$Bs=813-303\cdot C-86\cdot Mn+107\cdot Si-68\cdot Cr-37\cdot Ni-108\cdot Mo. \quad (31)$$

для корозійностійких сталей:

$$Ac_{1H}=765-30,2\cdot C-19,5\cdot Mn+134\cdot Si-67\cdot Ni+20,5\cdot Mo-64\cdot V. \quad (32)$$

- модель А. Неренберга [18], що є уточненням моделі роботи [12] має наступний вигляд:

$$Ms=499-300\cdot C-33,3\cdot Mn-11,1\cdot Si-22,2\cdot Cr-16,7\cdot Ni-11,1\cdot Mo. \quad (33)$$

До числа розрахункових моделей також відносять математичну модель, яка розроблена Інститутом чорної металургії (ІЧМ, м. Дніпро) для прогнозування температур фазових перетворень. Ця модель створена на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку з використанням інтегральних параметрів міжатомної взаємодії [19]:

$$Ac_1=10^3\times[5,538-61,831\text{tg}\alpha-0,188\Delta ZY+0,187\text{pl}] \quad (34)$$

$$Ac_3=10^3\times[7,430+0,521d-83,547\text{tg}\alpha-0,559ZY] \quad (35)$$

де d – середньостатистична між'ядерна відстань, 10-1нм; $\text{tg}\alpha$ – градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду; ZY – фізико-хімічний еквівалент зарядового стану та його мікронеоднорідності – ΔZY , е; pl – параметр спрямованої зарядової щільності, е/нм.

Крім зазначених вище моделей та методів, на сьогодні існує модель для визначення фазових перетворень в програмному комплексі JMatPro, яка основана на математичній моделі Кіркалді.

Я було зазначено вище, використання розрахункового методу дозволяє значно скоротити час та витрати на визначення температур критичних точок, необхідних для розробки температурно-часових режимів термічної обробки. Тим не менше, наразі відсутні відомості щодо придатності будь-якої математичної моделі для її використання стосовно економнолегованих сталей в умовах зі зміненою концентрацією легуючих компонентів відносно концентрацій в відомих сталях. Виходячи з цього, робота, що спрямована на встановлення рівню точності існуючих математичних моделей прогнозування температур критичних точок для економнолегованих конструкційних сталей є актуальною.

Мета роботи. З числа відомих математичних моделей визначити найбільш придатні для прогнозування температур критичних точок багатокомпонентних економнолегованих конструкційних сталей

Методика досліджень. Дослідження проводили шляхом порівняльного аналізу результатів розрахунків за відовими математичними моделями, які використовують для визначення температур критичних точок фазових перетворень в багатокомпонентних економнолегованих конструкційних сталях, та експериментальних даних для досліджуваних сталей і сталі-прототипу, хімічний склад яких приведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей та сталі-прототипу

Сталь	Вміст елементів, % мас.															
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Ca	Nb	S	P	N	Cu	B
Прототип	0,313	0,35	0,384	2,86	2,54	0,451	0,0057	0,0031	0,014	<0,0001	<0,004	0,018	0,011	0,012	0,03	0,002
Склад 1	0,329	0,74	1,68	2,26	1,92	0,455	0,153	0,0024	0,024	0,0004	<0,001	0,007	0,004	0,007	0,03	0,001
Склад 2	0,321	0,54	0,368	0,81	2,26	0,356	0,148	0,026	0,043	0,003	0,002	0,022	0,02	0,0035	0,03	0,002
Склад 3	0,251	0,65	0,284	0,98	1,84	0,317	0,133	0,0012	0,026	0,0003	0,029	0,022	0,022	0,0071	0,271	0,002

Хімічний склад досліджуваних сталей визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L.

Досліджувані сталі виплавляли з шихтових матеріалів технічної чистоти в індукційному модулі ІТПЕ-0,01. Плавку проводили методом переплаву без

примусового окислення домішок. Введення легуючих елементів в рідку сталь проводили шляхом занурення в неї захисного металевго контейнера де розміщували наважки необхідних легуючих елементів.

Для виявлення структурних і фазових перетворень сталі-прототипу був використаний метод диференційного термогравіметричного аналізу (ДТГА), який проводили на синхронному термічному аналізаторі STA 449 C Jupiter.

Результати досліджень. Проблема вибору оптимального хімічного складу та технологічного режиму обробки будь-якої легованої сталі передбачає необхідність визначення впливу вмісту окремих хімічних елементів на температурні інтервали існування фаз, а також положення критичних точок. При цьому, визначальними параметрами для розробки технологічного регламенту термічної обробки виробів з таких сталей при їх нагріванні (охолодженні) є критичні температури фазових перетворень (A_{c1} і A_{c3}). Тобто, відповідно до величин температурних значень A_{c1} і A_{c3} і призначають режими термічної обробки для надання сталям необхідних експлуатаційних властивостей.

Виходячи з того, що будь яка математична модель для розрахунку температур критичних точок була розроблена їх авторами для відповідних меж змін хімічного складу сталі, провели аналіз умов (див. таблицю 2) щодо можливості використанні представлених вище математичних моделей.

Таблиця 2

Умови використання математичних моделей за хімічним складом сталей

Модель	Вміст хімічних елементів, % мас. (Fe - залишок)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Інші
[1]	0,03-0,96	0,17-2,10	0,04-1,90	≤ 3,3	≤ 4,2	≤ 1,0	≤ 0,75	≤0,15 Zr; ≤ 0,1 Al
[2]	0,08-1,43 (Ac ₁), 0,08-0,59 (Ac ₃), 0,11-0,60 (Ms)	0,04-1,98 (Ac ₁ , Ac ₃), 0,04-4,87 (Ms)	0,06-1,78 (Ac ₁), 0,09-1,78 (Ac ₃), 0,11-1,89 (Ms)	≤ 4,48 (Ac ₁ , Ac ₃) ≤ 4,61 (Ms)	≤ 5,00 (Ac ₁ , Ac ₃), ≤ 5,04 (Ms)	≤ 2,61 (Ac ₁), ≤ 1,05 (Ac ₃), ≤ 5,40 (Ms)	≤ 2,51 (Ac ₁), ≤ 0,70 (Ac ₃)	≤ 0,072 (Ac ₁ , Ac ₃) As; ≤ 4,10 (Ac ₁ , Ac ₃) W
[3]	0,30-0,60	≤ 2,00	≤ 1,00	≤ 1,50	≤ 3,50	≤ 0,50	–	–
[4]	0,13-0,60 (Ac ₁), 0,13-0,73 (Ac ₃ , Ms)	0,39-2,04	0,15-0,53 (Ac ₁), 0,15-1,62 (Ac ₃ , Ms)	≤ 1,95	≤ 5,00	≤ 0,54	–	– ≤ 0,98 Cu
[5]	0,25-0,45	0,70-1,20	0,6-3,1	0,8-2,9	–	0,20-0,90	≤ 0,4	–
[6]	0,09-0,81	0,35-1,79	0,02-1,49	≤ 1,55	≤ 4,56	≤ 0,92	–	–
[7,8]	≤ 0,83	≤ 2,0	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 3,0	≤ 1,0	≤ 0,5	≤ 1,0 %W; ≤ 1,0 Cu; ≤ 0,2 Al; ≤ 0,15 Ti; ≤ 0,2 Nb; ≤ 0,04 P; ≤ 0,04 S; ≤ 0,025 N; ≤ 0,01 B
[9]	~ 1 %	*	*	*	*	*	*	*
[10]	0,1-0,55	0,20-1,70	–	≤ 3,50	≤ 5,00	≤ 1,00	–	–
[14]	0,20- 0,85	–	–	≤ 1,50	–	≤ 1 %	–	–
[16]	0,11-0,56	0,34-1,49	0,14-0,40	0,14-4,80	0,23-4,33	0,07-1,99	–	–
[17]	0,15-0,45	0,35-1,30	0,05-0,50	0,10-1,90	0,03-2,80	0,03-0,85	0,01-0,35	–
	0,10-1,10	0,35-1,45	0,25-0,50	11,00-17,70	0,25-2,45	0,05-1,65	0,01-0,35	–
ГЧМ	0,25-0,35	0,35-0,75	0,25-1,70	0,80-2,90	1,80-2,60	0,30-0,47	0,0005- 0,17	0,01-0,05 Al; 0,001-0,004 Ti; 0,004-0,03 Nb; 0,03-0,30 Cu; 0,001-0,002 B

Примітки: “–” вплив елементів не враховується, * – дані відсутні

Результати визначення температур критичних точок для сталі-прототипу (див. таблицю 1) за результатами ДТГА приведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Експериментальні величини температур критичних точок для сталі прототипу

Критичні точки	Ac1	Ac3	Ms	Bs
Температура, °C	749	761	285	311

Результати розрахунку температур критичних точок сталі-прототипу, які виконано за математичними моделями, що були обрані за результатами оцінювання умов їх використання (див. таблицю 2), та величини похибок від їх експериментальних значень (див. таблицю 3), наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Результати розрахунків температур критичних точок для сталі-прототипу, та похибка між розрахунковими та експериментальними даними

Модель	Ac ₁		Похибка, %	Ac ₃		Похибка, %	M _s		Похибка, %	B _s		Похибка, %
	експ.	розн.		експ.	розн.		експ.	розн.		експ.	розн.	
[1]	749	746	0,40	761	788	-3,5	285			311		
[2]		736	1,74		762	-0,1		319	-11,9			
[10]								300	-5,3		382	-22,8
[11]								259	9,1			
[12]								257	9,8			
[13]								252	11,6			
[16]											476	-53,1
[18]								278	2,5			
JmatPRO		743	0,80		756	0,7		289	-1,4		305	1,9
ІЧМ		717	4,27		762	-0,1						

Гістограми температур фазових перетворень в критичних точках сталі-прототипу, які розраховані за різними моделями представлено на рис. 1.

З аналізу отриманих результатів (див. таблицю 4, рис. 1) витікає, що з числа обраних математичних моделей найбільш точною

(величина похибки не більше 1,9%) є модель, яка основана на математичній моделі Кіркалді і реалізована в програмному комплексі JMatPro.

Виходячи з цього, в подальших дослідженнях для сталей 1...3 в якості істинних використовували результати розрахунку температур критичних точок за програмним комплексом JMatPro. Результати розрахунку за програмою JmatPRO для сталей 1...3 приведено в таблиці 5.

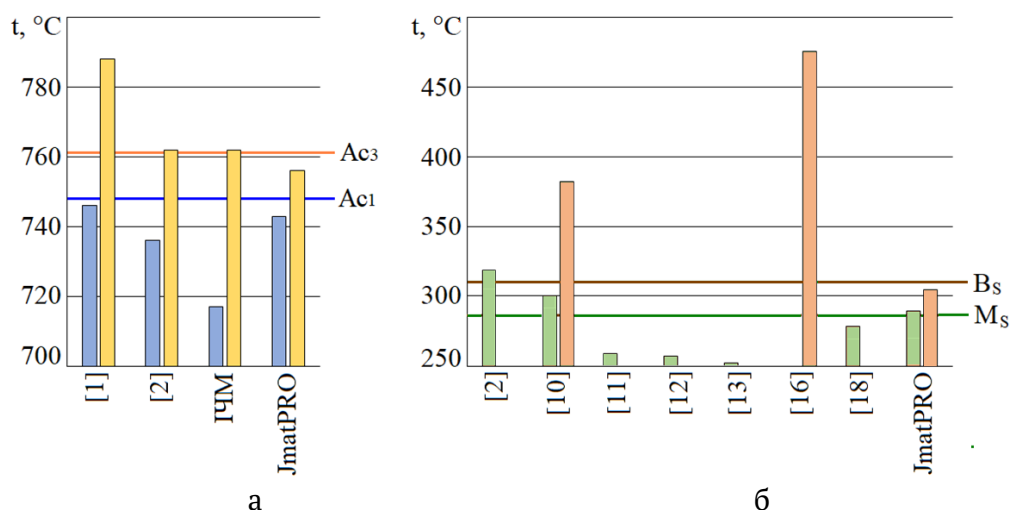


Рисунок 1 - Гістограми температур фазових перетворень в критичних точках Ac1, Ac3 (а) та Ms, Bs (б) в сталі-прототипу, які розраховані за різними моделями, де горизонтальними лініями відмічені експериментальні рівні критичних точок

■ -Ac1 ■ -Ac3 ■ -Ms ■ -Bs

Таблиця 5

Результати розрахунку за програмою JmatPRO для сталей 1...3

Сталь	Ac ₁	Ac ₃	Ms	Bs
	Температура, °C			
Сталь 1	772	780	280	303
Сталь 2	720	773	354	368
Сталь 3	719	763	335	412

Результати розрахунків температур критичних точок для сталей 1...3, та похибка між розрахунковими даними та даними за програмою JmatPRO представлено в таблицях 6...8, та на гістограмах рис. 2...4.

Таблиця 6

Результати розрахунків температур критичних точок для сталі 1, та похибка між розрахунковими даними та даними за програмою JmatPRO

Модель	Ac ₁		Похибка, %	Ac ₃		Похибка, %	M _s		Похибка, %	B _s		Похибка, %
	JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.	
[1]	772	784	-1,55	780	878	-12,56	280			303		
[2]		770	0,26		835	-7,05		316	-12,86			
[5]		735	4,79		919	-17,82						
[10]								300	-7,14		408	-34,65
[11]								255	8,93			
[12]								251	10,36			
[13]								246	12,14			
[18]								270	3,57			
ІЧМ		713	7,64		721	7,56						

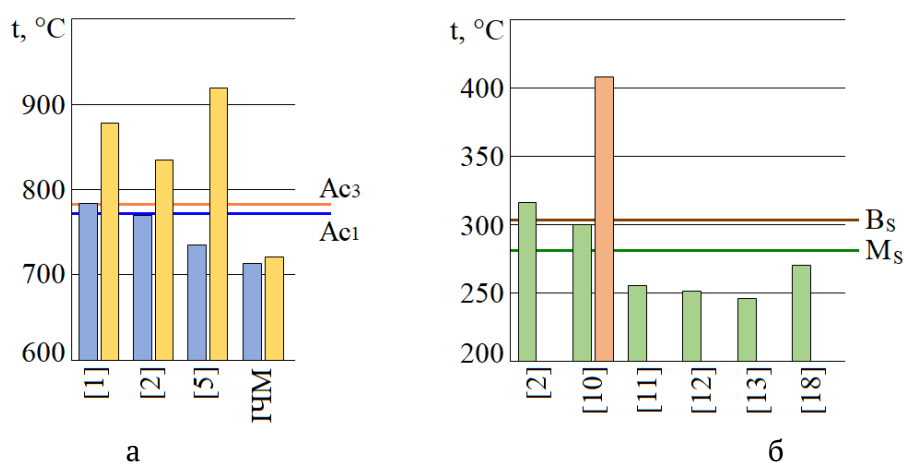


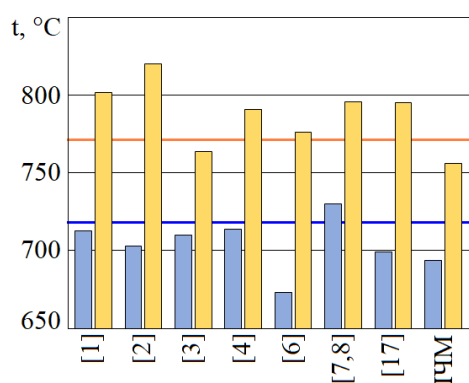
Рисунок 2 - Гістограм температур фазових перетворень в критичних точках Ac1, Ac3 (а) та Ms, Bs (б) в сталі 1, які розраховані за різними моделями, де горизонтальними лініями відмічені рівні критичних точок, визначених за програмою JmatPRO

■ -Ac1 ■ -Ac3 ■ -M_s ■ -B_s

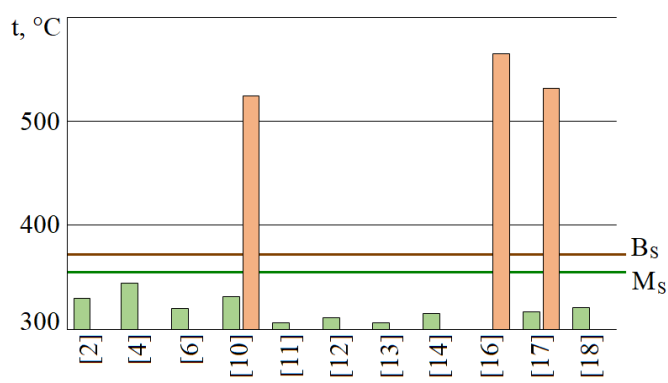
Таблиця 7

Результати розрахунків температур критичних точок для сталі 2, та похибка між розрахунковими даними та даними за програмою JmatPRO

Модель	Ac ₁		Похибка, %	Ac ₃		Похибка, %	M _s		Похибка, %	B _s		Похибка, %
	JmatPR O	розр.		JmatPR O	розр.		JmatPR O	розр.		JmatPR O	розр.	
[1]	720	713	0,97	773	802	-3,75	354			368		
[2]		703	2,36		820	-6,08		330	6,78			
[3]		710	1,39		764	1,16						
[4]		714	0,83		791	-2,33		344	2,82			
[6]		673	6,53		776	-0,39		320	9,60			
[7,8]		730	-1,39		796	-2,98						
[10]								331	6,50		525	-42,66
[11]								306	13,56			
[12]								311	12,15			
[13]								306	13,56			
[14]								315	11,02			
[16]											565	-53,53
[17]		699	2,92		795	-2,85		317	10,45		532	-44,57
[18]								321	9,32			
ІЧМ		694	3,61		756	2,20						



а



б

Рисунок 3 - Гістограм температур фазових перетворень в критичних точках Ac1, Ac3 (а) та Ms, Bs (б) в сталі 2, які розраховані за різними моделями, де горизонтальними лініями відмічені рівні критичних точок, визначених за програмою JmatPRO

■ -Ac1 ■ -Ac3 ■ -M_s ■ -B_s

Таблиця 8

Результати розрахунків температур критичних точок для сталі 3, та похибка між
розрахунковими даними та даними за програмою JmatPRO

Модель	Ac ₁		Похибка, %	Ac ₃		Похибка, %	M _s		Похибка, %	B _s		Похибка, %
	JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.	
[1]	719	719	0,00	763	816	- 6,95	335			412		
[2]		710	1,25		807	- 5,77		364	-8,66			
[4]		719	0,00		797	- 4,46		369	-10,15			
[6]		680	5,42		796	- 4,33		349	-4,18			
[7,8]		729	-1,39		809	- 6,03						
[10]								366	-9,25		541	-31,31
[11]								324	3,28			
[12]								333	0,60			
[13]								329	1,79			
[14]								338	-0,90			
[16]											561	-36,17
[17]		709	1,39		814	- 6,68		340	-1,49		542	-31,55
[18]								343	-2,39			
ІЧМ		705	1,95		780	- 2,23						

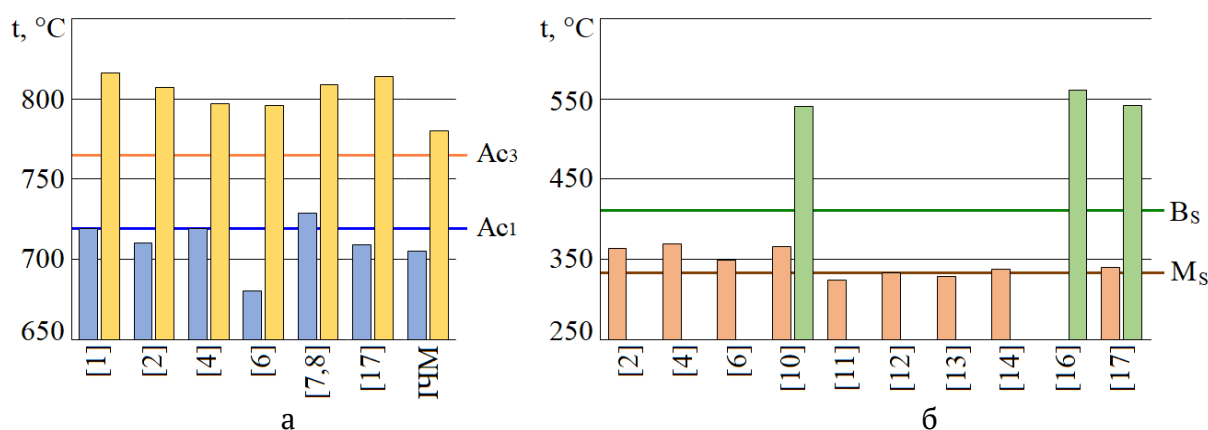


Рисунок 4 - Гістограм температур фазових перетворень в критичних точках Ac1, Ac3 (а) та Ms, Bs (б) в сталі 3, які розраховані за різними моделями, де горизонтальними лініями відмічені рівні критичних точок, визначених за програмою JmatPRO

■ -Ac1 ■ -Ac3 ■ -Ms ■ -Bs

Як випливає з аналізу отриманих даних, для визначення температури Ac1 і Ac3 можна рекомендувати математичну модель роботи [1]. Щодо усіх інших критичних точок, то жодна з використаних моделей не дозволяє з прийнятною для інженерних розрахунків точністю вичислити їх значення. Крім того всі відомі моделі за виключенням моделі програмного комплексу JmatPRO непридатні для комплексного розрахунку одним методом температур всіх критичних точок, обраних в роботі багатокомпонентних конструкційних економнолегованих багатокомпонентних сталей.

Висновки.

За результатами виконаних досліджень встановлено, що досліджені математичні моделі дозволяють встановити величини критичних точок сталей з відносно невеликою точністю. Тим не менше, виходячи з того, що на практиці для призначення температури під загартування найбільш значущою є температура Ac3, а реальна температура загартування, з технологічної точки зору та обладнання, що використовується для проведення термічної обробки, може перевищувати температуру точки Ac3 на 30...100 °C, то з достатньо високим рівнем точності розрахунок величини температури Ac3 для економнолегованих конструкційних сталей рекомендовано проводити за математичними моделями програмного комплексу Jmat PRO або IЧМ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Günther E., Radomski G., Oheim B., Günther E. Die rechnerische Ermittlung der Umwandlungspunkte A_{c1} und A_{c3} . *Neue Hütte*. 1970. Vol. 15. P. 18–21.
2. Andrews K.W. Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1965. Vol. 203. P. 721–727.
3. Grange R.A. Estimating Critical Ranges in Heat Treatment of Steels. *Metal Progress*. 1961. Vol. 79. No. 4. P. 73–75.
4. Kunitake T. Prediction of A_{c1} , A_{c3} and M_s temperature of steels by empirical formulas. *Journal of the Japan Society for Heat Treatment*. 2001. Vol. 41(3). P. 164–169.
5. Кунітаке Т., Като Т. Вплив різних легуючих елементів на Si-Cr-Mo-V сталі. *Теги то заган*. 1964. Т. 50. № 4. P. 666–668.
6. Eldis, G.T. A Critical Review of Data Sources for Isothermal Transformation and Continuous Cooling Transformation Diagrams. *Hardenability Concepts with Applications to Steel*. 1978. P. 126–148.
7. Винокур, Б.Б., Пілюшенко В.Л., Касаткін О.Г. Структура конструкційної легованої сталі. М.: Металургія, 1983. 216 с.
8. Касаткін О.Г., Винокур Б.Б., Пілюшенко В.Л. Розрахункові моделі визначення критичних точок сталі. *Металознавство та термічна обробка металів*. 1984. №1. С. 20–22.
9. Зюзін В.І., Садовський В.Д., Баранчук С.І. Вплив легуючих елементів на положення мартенситної точки, кількість залишкового аустеніту та стійкість його при відпустці. *Металург*. 1939. № 10–11. С. 75–80.
10. Steven W., Haynes A.G. The Temperature of Formation of Martensite and Bainite in Low-Alloy Steels: Some Effects of Chemical Composition. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1956. Vol. 183. P. 349–359.
11. Carapella L.A. Computing A'' or M_s (Transformation Temperature on Quenching) from Analysis. *Metal Progress*. 1944. Vol. 46. No. 1. P. 108.
12. Payson P., Savage C.H. Martensite Reactions in Alloy Steels. *Transactions ASM*. 1944. Vol. 33. P. 261–275.
13. Rowland E.S., Lyle S.R. The Application of M_s Points to Case Depth Measurement. *Transactions ASM*. 1946. Vol. 37. P. 27–46.
14. Grange R.A., Stewart H.M. The Temperature Range of Martensite Formation. *Transactions AIME*. 1946. Vol. 167. P. 467–490.
15. Artinger I. Szerszámacélok és hőkezelésük : підручник. Budapest : Műszaki Könyvkiadó, 1978. 271 p.
16. Kunitake T., Okada Y. The estimation of bainite transformation temperatures in steels by the empirical formulas. *Tetsu-to-Hagane*. 1998. Vol. 84, №2. P. 137–141.
17. Kulmburg A. Contribution to the Calculation of the Transformation Behaviour of Steel. Computational Materials Technology. Proceedings of an International Conference. Linköping (4–5 Jun). 1981. P. 61–67.
18. Nehrenberg A.E. Contribution to discussion on grange and stewart. *Transactions AIME*. 1946. Vol. 167. P. 494–498.
19. Тогобицкая Д.Н., Кукса О.В., Пучиков А.В., Узлов О.В., Хулин А.Н. Прогнозирование величин критических точек фазовых превращений A_{c1} , A_{c3} для малоуглеродистых конструкционных сталей методом физико-химического моделирования на основе параметров межатомного взаимодействия. *Системные технологии* 2018. №2 (215). С. 14–19.

REFERENCES

1. Günther, E., Radomski, G., Oheim, B., & Günther, E. (1970). Die rechnerische Ermittlung der Umwandlungspunkte Ac1 und Ac3. *Neue Hütte*, 15, 18–21.
2. Andrews, K.W. (1965). Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 203, 721–727.
3. Grange, R.A. (1961). Estimating Critical Ranges in Heat Treatment of Steels. *Metal Progress*, 79, 4, 73–75.
4. Kunitake, T. (2001). Prediction of Ac1, Ac3 and Ms temperature of steels by empirical formulas. *Journal of the Japan Society for Heat Treatment*. 2001, 41(3), 164–169.
5. Kunitake, T., & Kato T. (1964). Vplyv riznykh lehuiuchykh elementiv na Si-Cr-Mo-V stali [The effect of various alloying elements on Si-Cr-Mo-V steels]. *Tetsu to gagan*, 50, 4, 666–668 [in Ukrainian].
6. Eldis, G.T. (1978). A Critical Review of Data Sources for Isothermal Transformation and Continuous Cooling Transformation Diagrams. *Hardenability Concepts with Applications to Steel*, 126–148.
7. Vynokur, B.B., Piliushenko, V.L., & Kasatkin, O.H. (1983). Struktura konstruktsiinoi lehovanoi stali [Structure of structural alloy steel] [in Ukrainian].
8. Kasatkin, O.H., Vynokur, B.B., & Pylushenko, V.L. (1984). Rozrakhunkovi modeli vyznachennia krytychnykh tochok staly [Calculation models for determining critical points of steel]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*, 1, 20–22.
9. Ziuzin, V.I., Sadovskyi, V.D., & Baranchuk, S.I. (1939). Vplyv lehuiuchykh elementiv na polozhennia martensytnoi tochky, kilnist zalyshkovoho austenitu ta stiikist yoho pry vidpusttsi [The influence of alloying elements on the position of the martensite point, the amount of retained austenite and its stability during tempering]. *Metalurh*, 10-11, 75–80.
10. Steven, W., & Haynes, A.G. (1956). The Temperature of Formation of Martensite and Bainite in Low-Alloy Steels: Some Effects of Chemical Composition. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 183, 349–359.
11. Carapella, L.A. (1944). Computing A'' or Ms (Transformation Temperature on Quenching) from Analysis. *Metal Progress*, 46, 1, 108.
12. Payson, P., & Savage, C.H. (1944). Martensite Reactions in Alloy Steels. *Transactions ASM*, 33, 261–275.
13. Rowland, E.S., & Lyle, S.R. (1946). The Application of Ms Points to Case Depth Measurement. *Transactions ASM*, 37, 27–46.
14. Grange, R.A., & Stewart, H.M. (1946). The Temperature Range of Martensite Formation. *Transactions AIME*, 167, 467–490.
15. Artinger, I. (1978). *Szerszámacélok és hőkezelésük : textbook*. Budapest : Műszaki Könyvkiadó.
16. Kunitake, T., & Okada, Y. (1998). The estimation of bainite transformation temperatures in steels by the empirical formulas. *Tetsu-to-Hagane*, 84, 2, 137–141.
17. Kulmburg, A. (1981). Contribution to the Calculation of the Transformation Behaviour of Steel. *Computational Materials Technology. Proceedings of an International Conference*. Linköping (4–5 Jun), 61–67.
18. Nehrenberg, A.E. (1946). Contribution to discussion on grange and stewart. *Transactions AIME*, 167, 494–498.

19. Tohobytskaia D.N., Kuksa O.V., Puchykov A.V., Uzlov O.V., Khulyin A.N. (2018). Prognozirovanie velichin kriticheskikh toчек fazovykh prevrascheniy Ac1, Ac3 dlya malouglerodistykh konstruktsionnykh staley metodom fiziko-himicheskogo modelirovaniya na osnove parametrov mezhatomnogo vzaimodeystviya [Prediction of values of critical points of phase transformed Ac1, Ac3 for low-carbon structural steels by the method of physical and chemical modeling based on parameters of interatomic interaction]. *Sistemnyie tehnologii*, 2 (215), 14-19 [in Russian].

Received 25.04.2025.

Accepted 11.05.2025.

UDC 627.63. 632.81.618.83

Oleksandr Babachenko, Ganna Kononenko, Tetiana Kimstach,
Rostyslav Podolskyi, Olena Safronova

COMPARATIVE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINING CRITICAL POINT TEMPERATURES OF ECONOMICALLY ALLOYED STEELS

The problem of determining the temperatures of critical points of phase transformations in steels remains relevant due to the need to ensure high accuracy in assigning heat treatment modes. It is known that the position of critical points is largely determined by the chemical composition of the steel, in particular the content of alloying elements.

The aim of the work is to determine, from among the known mathematical models, the most suitable ones for predicting the temperatures of critical points of multicomponent economically alloyed structural steels.

The research was conducted by comparative analysis of the results of calculations using known mathematical models used to determine the temperatures of critical points of phase transformations in multicomponent economically alloyed structural steels, and experimental data for the studied steels and the prototype steel. The chemical composition of the studied steels was determined on a precision analyzer EXPERT 4L. The studied steels were smelted from charge materials of technical purity in an induction module ITTE-0,01. The melting was carried out by the remelting method without forced oxidation of impurities. The introduction of alloying elements into the liquid steel was carried out by immersing a protective metal container into it, where samples of the necessary alloying elements were placed. To identify structural and phase transformations of the prototype steel, the method of differential thermogravimetric analysis was used, which was carried out on a synchronous thermal analyzer STA 449 C Jupiter.

The results of a comparative analysis of mathematical models used to predict the temperatures of critical points of phase transformations in multicomponent economically alloyed structural steels are presented. The influence of alloying elements on the values of critical temperatures is analyzed, and the conditions for the application of various mathematical models are also considered. It was found that the studied mathematical models allow to establish the values of critical points of steels with relatively low

accuracy. Nevertheless, based on the fact that in practice, the most significant temperature for setting the tempering temperature is the A_{c3} temperature, and the real tempering temperature, from a technological point of view and the equipment used for heat treatment, may exceed the A_{c3} point temperature by 30...100 °C, it is recommended to calculate the A_{c3} temperature value for economically alloyed structural steels with a sufficiently high level of accuracy using mathematical models of the Jmat PRO or ISI software complex..

Keywords: *steel, mathematical model, critical points, heat treatment, alloying elements.*

Бабаченко Олександр Іванович - член-кореспондент, докт. техн.наук, директор Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Кононенко Ганна Андріївна - докт. техн. наук, ст. досл., старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, професор НТУ «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна

Кімстач Тетяна Володимирівна – к.т.н., доцент Українського державного університету науки і технологій; старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Подольський Ростислав Вячеславович – докт. філ., в.о зав. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Сафронова Олена Анатоліївна – аспірантка, науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

Babachenko Oleksandr - corresponding member, Dr. Technical Sciences, Director of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine

Kononenko Ganna - Doct. technical science, sen.resear., Senior Researcher at the Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of the NAS of Ukraine, Professor at the National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine

Kimstach Tetiana Volodymyrivna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Ukrainian State University of Science and Technologies (USUST); senior researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine

Podolskyi Rostyslav – PhD, Acting Head of the Department of Problems of Deformation and Heat Treatment of Structural Steels of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine

Safronova Olena – PhD-student, researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine