

Афтанділянц Є. Г.
(ФТІМС НАН України, Київ)
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛИВАРНОЇ УСАДКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ
СТАЛЕЙ
E-mail: aftyev@yahoo.com

Кінетика ливарної усадки в значній мірі визначає тріщиностійкість виливків з конструкційних сталей. Однак до теперішнього часу відсутня фізико-математична модель кінетики ливарної усадки конструкційних сталей, що є наслідком несистемного дослідження питання.

Це зумовило необхідність проведення дослідження кінетики ливарної усадки конструкційних сталей и розробці на основі аналізу їх результатів фізико-математичної моделі процесу усадки конструкційних сталей.

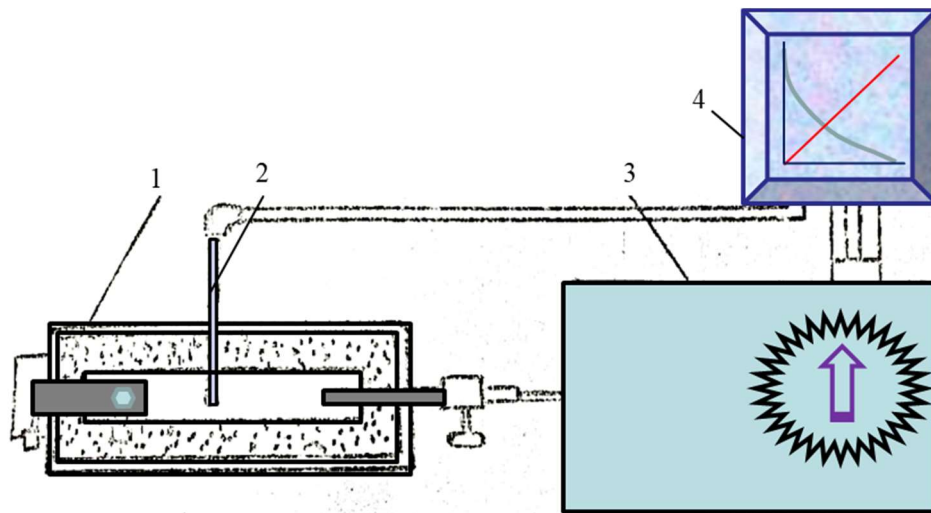
Закономірності розвитку ливарної усадки досліджували на сталях, що містять від 0,06 до 0,35 % масової частки вуглецю; 0,03-2,69 % кремнію; 0,1-2,54 % марганцю; 0,1-3,06 % хрому; 0,012-0,030 % азоту; 0,001-0,028 % кисню; 0,015-0,037 % сірки; 0,004-0,025 % фосфору, до 0,26 % ванадію. Хімічний склад сталей наведено в табл. 1.

Параметри вільної ливарної усадки конструкційних сталей визначали шляхом реєстрації одностороннього лінійного переміщення виливки на пристрої, ескіз якого наведено на рис. 1.

Розплав стали заливали в сиру піщано-глинисту форму, в якій з одного боку усадка виливка гальмувалася болтом, а з протилежного боку за допомогою індикаторного глибиноміра (ціна поділки 0,01 мм, абсолютна похибка ± 5 мкм) реєструвалося лінійне переміщення вільного кінця виливки, яке з похибкою 0,01 % перетворювалося феродинамічним датчиком ФД-1 в електричний сигнал і подавалося на один вхід комп'ютера, а на інший вхід комп'ютера подавалася термоелектрорушійна сила (у вигляді різниці потенціалів) з термопари ТПР-0679-01 (межа допустимої основної похибки $\pm 3,97$ °C) встановленої в центрі ливарної форми (рис. 1).

Таблиця 1 – Хімічний склад сталей (мас. %)

№ плавки	C	Si	Mn	Cr	V	N	S	P	O
1	0,06	0,03	0,10	0,10	0,00	0,012	0,023	0,005	0,016
2	0,06	0,03	0,10	0,10	0,05	0,017	0,023	0,005	0,017
3	0,06	0,05	0,10	0,10	0,15	0,027	0,023	0,005	0,028
4	0,19	0,22	1,19	0,09	0,00	0,006	0,028	0,022	0,003
5	0,17	0,39	1,15	0,30	0,05	0,010	0,027	0,024	0,002
6	0, 17	0,39	1,15	0,30	0,10	0,015	0,027	0,024	0,002
7	0,17	0,39	1,15	0,30	0,13	0,018	0,027	0,024	0,002
8	0,35	0,88	0,72	0,84	0,00	0,005	0,021	0,007	0,007
9	0,35	0,88	0,72	0,84	0,07	0,012	0,021	0,007	0,028
10	0,35	0,88	0,72	0,84	0,17	0,022	0,020	0,006	0,007
11	0,23	2, 69	0,65	1,14	0,00	0,004	0,017	0,004	0,002
12	0,23	2,69	0,65	1,14	0,06	0,010	0,017	0,005	0,002
13	0,23	2,69	0,65	1,14	0,11	0,015	0,015	0,005	0,002
14	0,23	2,69	0,65	1,14	0,17	0,022	0,020	0,006	0,002
15	0,23	2,69	0,65	1,14	0,26	0,030	0,023	0,004	0,002
16	0,19	1,00	2,54	1,01	0,00	0,006	0,034	0,025	0,001
17	0,19	1,00	2,54	1,01	0,07	0,013	0,037	0,020	0,001
18	0,19	1,00	2,54	1,01	0,13	0,019	0,034	0,020	0,001
19	0,24	0,82	0,63	3,06	0,00	0,006	0,017	0,007	0,006
20	0,24	0,82	0,63	3,06	0,07	0,013	0,017	0,007	0,006
21	0,24	0,82	0,63	3,06	0,11	0,017	0,016	0,007	0,006
22	0,24	0,82	0,63	3,06	0,15	0,021	0,022	0,008	0,006



1 – ливарна форма для заливання зразка; 2 – термопара; 3 – датчик лінійних перетворень; 4 – комп'ютер

Рис. 1. Пристрій для вимірювання ливарної усадки сталей

Розміри дендритної структури істотно впливають на величину усадки, тому визначили параметри дендритної структури виливків, які отримували в ливарній формі, що наведена на рис. 1. Результати визначення параметрів дендритної структури приведені в табл. 2.

У процесі охолодження виливка після заливки металу в форму визначали такі параметри вільної ливарної усадки конструкційних сталей, як температура початка ливарної усадки ($t_{нлу}$), максимальна величина перед усадочного розширення ($\varepsilon_{нрр}$), температура початку усадки після перед усадочного розширення ($t_{ну}$), коефіцієнт ливарної усадки аустеніту ($K_{лу}$), що визначали за наступною формулою:

$$K_{лу} = (l_2 - l_1) / (t_{фп} - t_{ну}) \cdot l_1, \quad (1)$$

де l_1 і l_2 – відповідно довжина зразку при температурах початку ливарної усадки після пред усадкового розширення ($t_{ну}$) і розпаду аустеніту ($t_{фп}$).

Таблиця 2 – Параметри дендритної структури виливків

Номер плавки	Зона стовпчастих дендритів			Зона дезорієнтованих дендритів	
	довжина ($l_{ст}$), мм	ширина ($\Delta_{ст}$), мм	відстань між гілками другого порядку (Δ_2), мм	довжина (l_d), мм	ширина (Δ_d), мм
1	4,24	0,21	0,23	1,10	0,24
2	1,51	0,07	0,16	1,17	0,19
3	3,96	0,10	0,15	1,01	0,15
4	2,44	0,11	0,14	0,24	0,12
5	2,28	0,07	0,11	0,21	0,11
6	2,23	0,06	0,10	0,20	0,11
7	4,06	0,19	0,20	0,97	0,23
8	4,98	0,31	0,28	1,31	0,38
9	2,75	0,15	0,19	1,24	0,24
10	2,67	0,14	0,13	1,13	0,21
11	4,58	0,22	0,26	1,20	0,26
12	3,94	0,17	0,18	0,96	0,18
13	3,62	0,13	0,16	0,84	0,14
14	2,05	0,11	0,12	0,72	0,12
15	1,99	0,09	0,10	0,31	0,10
16	3,18	0,16	0,19	0,44	0,21
17	2,39	0,10	0,06	0,24	0,18
18	1,88	0,08	0,04	0,14	0,16
19	2,19	0,05	0,09	0,19	0,10
20	3,50	0,17	0,15	0,84	0,23
21	3,19	0,15	0,12	0,72	0,22
22	3,10	0,13	0,10	0,51	0,21

Результати вимірювань складових вільної ливарної усадки наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри вільної ливарної усадки конструкційних сталей

Номер плавки	$t_{нлу}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{прр}, \%$	$t_{ну}, ^\circ\text{C}$	$K_{лу} \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\varepsilon_{лит}, \%$	Номер плавки	$t_{нлу}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{прр}, \%$	$t_{ну}, ^\circ\text{C}$	$K_{лу} \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\varepsilon_{лит}, \%$
1	1490	0	1490	14,00	3,67	12	1436	0,020	1433	20,00	3,13
2	1480	0	1480	12,35	2,80	13	1431	0,017	1428	21,00	2,60
3	1475	0	1475	14,41	3,09	14	1418	0	1418	20,00	1,72
4	1432	0,033	1430	12,77	2,87	15	1425	0,060	1418	22,78	3,16
5	1480	0	1480	18,98	3,30	16	1446	0	1446	17,59	2,92
6	1460	0	1460	15,60	3,03	17	1442	0	1442	15,46	2,40
7	1440	0	1440	15,62	3,31	18	1437	0	1437	18,82	3,27
8	1475	0,067	1462	19,69	2,40	19	1416	0	1416	15,32	3,51
9	1465	0,033	1455	18,54	2,10	20	1405	0,013	1402	17,70	2,84
10	1455	0,220	1435	16,11	2,61	21	1400	0	1400	14,96	2,55
11	1453	0,027	1438	21,80	2,52	22	1395	0	1395	17,80	2,37

Враховуючи, що вплив легуючих елементів, модифікаторів і домішок на процес ливарної усадки стали пов'язан, в основному, зі зміною ними прихованої теплоти кристалізації ($q_{кр}$), величини перегріву над температурою ліквідусу ($\Delta t_{л}$) і дисперсності дендритної структури ($l_{ст}$, $l_{д}$) встановили, що кількісна закономірність впливу вихідних факторів на температуру початку ливарної усадки ($t_{нлу}$, $^{\circ}\text{C}$) має такий вигляд:

$$t_{нлу} = 892 - 9,53 \cdot \lambda_s + 1,135 \cdot q_{кр} + 77,34 \cdot l_{ст} + 8,691 \cdot \Delta t_{л} + 490,5 \cdot l_{ст} \cdot l_{д} - 81,75 \cdot l_{ст}^2 - 782,6 \cdot l_{д}^2 - 0,02483 \cdot \Delta t_{л} \cdot q_{кр}, \quad (2)$$

$$R = 0,954; \delta = 0,43\%.$$

Величина максимального предусадкового розширення ($\varepsilon_{прр}, \%$) визначається наступною залежністю:

$$\varepsilon_{прр} = 2,2 - 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{кр} + 1,85 \cdot \Delta_2 - 0,924 \cdot l_{д} - 2,09 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta t_{л} + 0,155 \cdot l_{ст} \cdot l_{д} - 5,32 \cdot 10^{-2} \cdot l_{ст}^2 + 2,67 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta t_{л} \cdot q_{кр}, \quad (3)$$

$$R = 0,914; \delta = 9,6\%.$$

Температура початку ливарної усадки після предусадкового розширення ($t_{ну}$) з імовірністю 99 % і похибкою 0,15 % пов'язана з температурою початку ливарної

усадки ($t_{\text{нлу}}$) і величиною максимального перед усадочного розширення ($\varepsilon_{\text{нпр}}$) наступною формулою:

$$t_{\text{нл}} = 29,9 + t_{\text{нлу}} \cdot (0,978 - 0,068 \cdot \varepsilon_{\text{нпр}}),$$

$$R = 0,993; \delta = 0,15\%. \quad (4)$$

Враховуючи, що коефіцієнт ливарної усадки, по фізичному змісту зворотний коефіцієнту лінійного розширення та залежить в основному від сил міжатомних зв'язків елементів, визначили його залежність від ступеня легування аустеніту, тобто від хімічного складу сталі. Кількісна закономірність такого впливу має наступний вигляд:

$$K_{\text{лу}} = (12 + 45 \cdot \text{Si} + 78,25 \cdot \text{Si} \cdot \text{Mn} - 46,84 \cdot \text{Si} \cdot \text{Cr} - 595,5 \cdot \text{C} \cdot \text{Si} \cdot \text{Mn} - 104,6 \cdot \text{Si} \cdot \text{Mn} \cdot \text{Cr} + 748,5 \cdot \text{C} \cdot \text{Si} \cdot \text{Mn} \cdot \text{Cr}) \cdot 10^{-6},$$

$$R = 0,894; \delta = 6,4\%. \quad (5)$$

Ливарна вільна усадка досліджених сталей з імовірністю 95 % описується наступною формулою:

$$\varepsilon_{\text{лит}} = 6,63 - 14,69 \cdot \text{C} - 14,69 \cdot \text{C} - 0,323 \cdot \text{Si} + 0,377 \cdot \text{Cr} + 19,2 \cdot \text{V} - 226,2 \cdot \text{N} - 17,87 \cdot \varepsilon_{\text{нпр}} + 37,5 \cdot K_{\text{лу}} \cdot t_{\text{нл}} + 1226 \cdot \varepsilon_{\text{нпр}} \cdot K_{\text{лу}} \cdot t_{\text{нл}},$$

$$R = 0,828; \delta = 7,4\% \quad (6)$$

Аналіз впливу легуючих елементів на зміну ливарної усадки сталі 20ХГСЛ показує, що з ростом вмісту в сталі марганцю і хрому ливарна усадка збільшується, а в разі вуглецю, кремнію, азоту та спільного легування азотом і ванадієм – зменшується (рис. 2).

Дані, які наведені на рис. 2, показують, що за питомою ефективністю впливу елементи можна розташувати в наступній послідовності: Cr, V, Si, Mn, C, V+N, N.

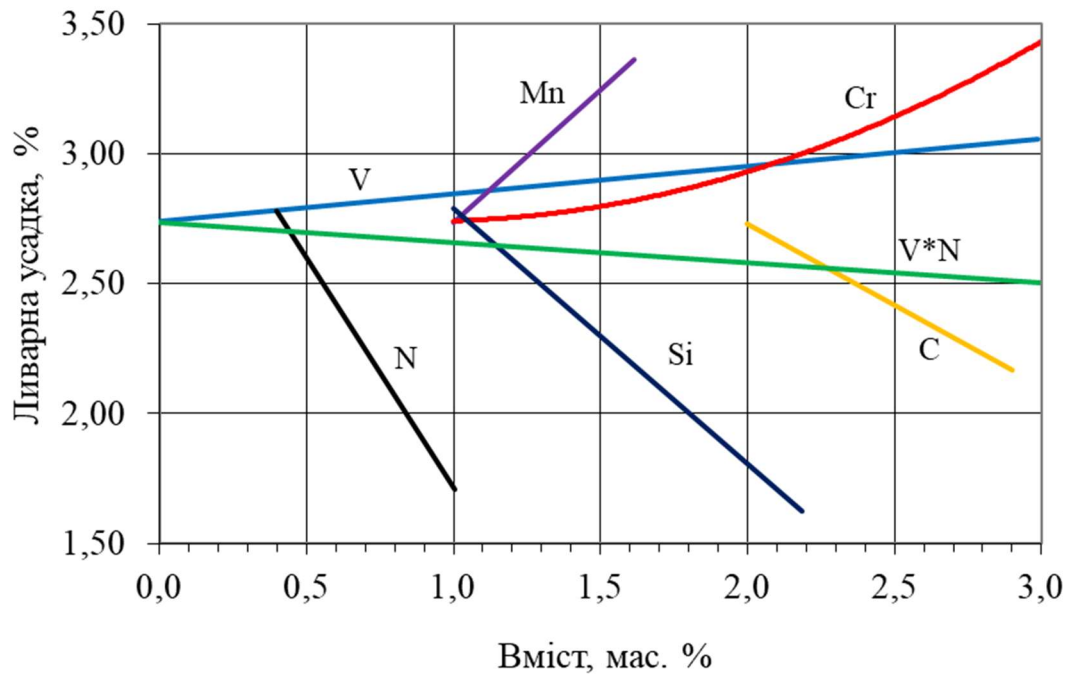


Рис. 2. Вплив елементів на ливарну усадку конструкційної сталі при температурі заливання сталі 1550 °C (вміст C і V становить 0,1; N-0,01; N·V-0001, частки значень наведені на осі абсцис)

Афтанділянц Є. Г.
(ФТІМС НАН України, Київ)
ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ЛИВАРНИХ
СТАЛЕЙ ПРИ ЗАТВЕРДІННІ
 E-mail: aftyev@yahoo.com

Якість виливків визначається не тільки фізико-механічними, а й такою ливарною властивістю, як тріщиностійкість металу, при його затвердінні в ливарній формі.

Тріщиностійкість литого металу визначається температурними, деформаційними і силовими характеристиками процесу утворення і розвитку тріщин в умовах ускладненої усадки. Широко застосовуються ступінчасті проби, що в основному фіксують процес поширення тріщини, оскільки визначення моменту зародження тріщини пов'язано з істотною похибкою, що вноситься конструктивним елементом, який створює ускладнену усадку металу.