

Афганділянц Є. Г.
(ФТІМС НАН України, Київ)
ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ЛИВАРНИХ
СТАЛЕЙ ПРИ ЗАТВЕРДІННІ

E-mail: aftyev@yahoo.com



АНОТАЦІЯ. У статті представлено розробку та опис конструкції нового пристрою для дослідження тріщиностійкості ливарних сталей у процесі їх затвердіння в ливарній формі. Автор обґрунтовує необхідність комплексного підходу до оцінки якості виливків, що включає контроль температурних, деформаційних та силових характеристик зародження і поширення тріщин в умовах ускладненої усадки. Розроблений пристрій дає змогу здійснювати високоточний моніторинг процесу утворення тріщин, що мінімізує похибки, характерні для традиційних ступінчастих проб. Описана методика дає змогу глибше вивчити кінетику руйнування металу на стадії кристалізації, що є ключовим для вдосконалення технологій виробництва відповідальних литих деталей та запобігання виникненню гарячих тріщин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: тріщиностійкість, ливарна сталь, затвердіння, ускладнена усадка, гарячі тріщини, виливок, пристрій моніторингу.

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, які 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.

З метою вивчення температурних, деформаційних і силових умов зародження і поширення тріщини розробили пристрій, який дає змогу проводити

№ 7, 2025

комплексометричний контроль процесу зародження та розвитку тріщин в умовах ускладненої усадки металу.

Методичним питанням визначення характеристик тріщиностійкості виливків присвячено численні роботи [1–11]. Аналіз літературних даних показує, що найбільшого поширення набули пристрої, принцип дії яких засновано на одночасній реєстрації температури і деформації зразка в процесі його утрудненої усадки після заливання металу в ливарну форму. В цьому випадку температурні, деформаційні і силові параметри процесу визначаються в результаті аналізу аномальних ділянок залежності «температура – деформація» [5–8]. Однак застосування відомих пристроїв не дає змоги з достатньою точністю фіксувати умови утворення тріщин, оскільки точність вимірювання деформації зразка обмежується чутливістю конструктивного елемента, який гальмує ливарну усадку.

Крім того відомо [12], що утворення тріщин на перших етапах процесу супроводжується повним або частковим їх «заліковуванням» рідким металом, що гальмує в цей момент аномальний розвиток деформації виливка в умовах утрудненої усадки.

Одним із методів визначення мікро- і макродефектів кристалічної будови металу є вимірювання його електричного опору [13–15]. Тому під час проведення експериментів із дослідження тріщиностійкості литих сталей одночасно з вимірюванням деформації і температури металу необхідно визначати зміну електричного опору ділянки зразка, в якій відбувається утворення і розвиток тріщин.

У зв'язку з тим, що експериментально і аналітично складним є визначення умов утворення тріщин в процесі охолодження виливка після затвердіння, необхідною є розробка пристрою для комплексометричного контролю параметрів тріщиноутворення ливарних сплавів, який дає змогу в умовах утрудненої усадки одночасно реєструвати деформацію, електричний опір і температуру виливка і визначити температурні межі інтервалу гарячеламкості,

напруження і відносне подовження, за яких відбувається зародження тріщин, а також деформацію вилівка в інтервалі гарячеламкості.

Розроблений пристрій для комплексного визначення характеристик тріщиностійкості сплавів складається з опоки 1, в якій формується ступінчаста проба 2, ливникової чаші 3, болтів 4 для односторонньої фіксації металу, що затвердіває, термопари 5, тяги 6, що послідовно з'єднує пластину 7, яка пружно деформується, з металом, що твердне, феродинамічного датчика лінійних переміщень 8 (відтарованого на зусилля), який з точністю до 0,1 % перетворює лінійні переміщення в електричні сигнали, потенціометра 10, який реєструє деформацію і температуру (рис. 1).

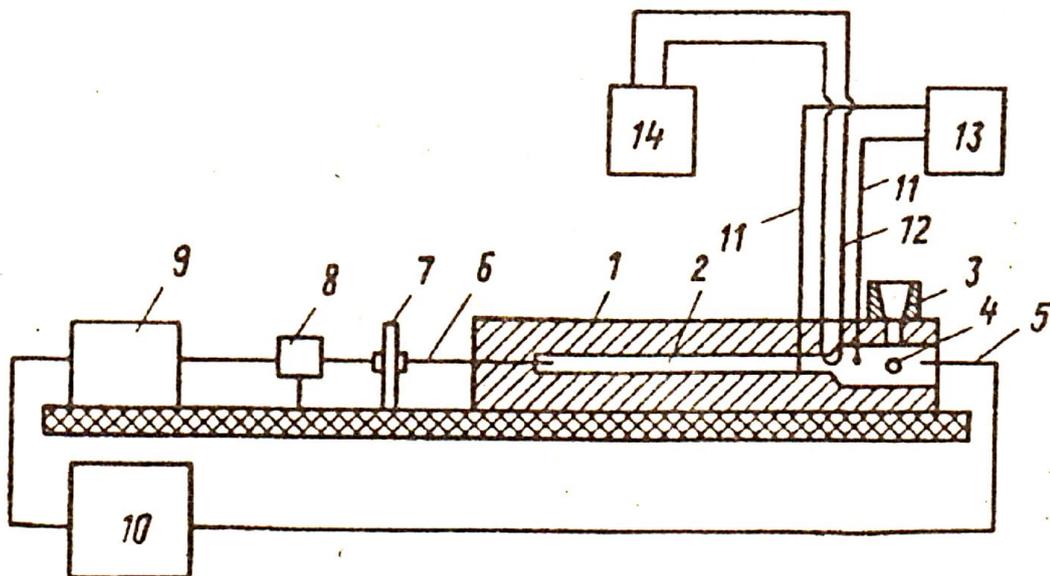


Рис. 1. Схема пристрою для визначення тріщиностійкості ливарного сплаву

На відстані 0,025 довжини проби від центра термічного вузла встановлювали електроди 11 вимірювального ланцюга. У центрі термічного вузла встановлювали дублікат 12 електродів вимірювального ланцюга. Електроди вимірювального ланцюга і дублікат підключали до універсальних вимірювальних приладів 13 і 14.

З метою підвищення точності вимірювань електроди виготовляли з матеріалу з мінімальним електроопором (наприклад дріт діаметром 1,6 мм із

сталі 10) і підключали до універсального вимірювального приладу, який працює за принципом подвійного моста.

Для усунення перешкод і побічних ефектів, не пов'язаних з процесом утворення тріщини, в центрі термічного вузла між дротами вимірювального ланцюга встановлювали дублікат, який фіксував рівень перешкод і побічних ефектів. Різниця між показниками електричного опору дротів вимірювального ланцюга і дублікатором показувала електроопір термічного вузла, пов'язаного з появою тріщини та дозволяла визначити момент утворення тріщини і синхронізувати його з температурними, силовими та деформаційними параметрами процесу тріщиноутворення литого сплаву в процесі затвердіння.

Для підвищення точності вимірювань електроди вимірювального і дублювального ланцюга необхідно виготовляти з однаковим мінімальним електричним опором, оскільки зі зменшенням електричного опору електродів зменшується величина абсолютної похибки вимірювань.

З метою спрощення конструкції установки і отримання синхронної інформації про навантаження і деформацію в процесі утворення тріщин, як пристрій для створення утрудненої усадки використовували пружнодеформувальну пластину (виконану з ресорної сталі), яку встановлювали між ливарною формою і датчиком лінійних переміщень і послідовно з'єднували з металом, що затвердіває, і датчиком за допомогою тяг.

З метою підвищення точності вимірювання, як перетворювач лінійних переміщень в електричні сигнали використовували феродинамічний датчик, який встановлювали після датчика лінійних переміщень і який перетворював сигнали з точністю до 0,1 %.

Центр сполучення порожнини ливарної форми, що утворює перехід від одного діаметра до іншого, визначали, як точка переходу від одного радіуса кривизни до іншого, що віднесена до осі ступінчастою проби (рис. 2 а, точка С).

Електроди 11 вимірювального ланцюга встановлювали на відстані 0,25–0,5 великого діаметра (D_2) порожнини ливарної форми від центру сполучення

(точка С), а в центрі сполучення встановлено дублікат 12 електродів вимірювального ланцюга (рис. 2 б).

Нашими дослідженнями встановлено, що на ділянці виливка на відстані 0,25–0,5 великого діаметру від центру сполучення в бік малого та великого діаметру виникають максимальні напруги, внаслідок сполучення різних діаметрів виливки при затвердінні стали, що призводить до утворення і розвитку тріщин. Установка електродів вимірювального ланцюга на відстані 0,25–0,5 великого діаметру від центру сполучення дозволяє досліджувати оптимальний обсяг металу, в якому відбувається процес зародження і розвитку тріщин і одночасно реєструвати комплекс температурних силових і деформаційних характеристик процесу утворення тріщин.

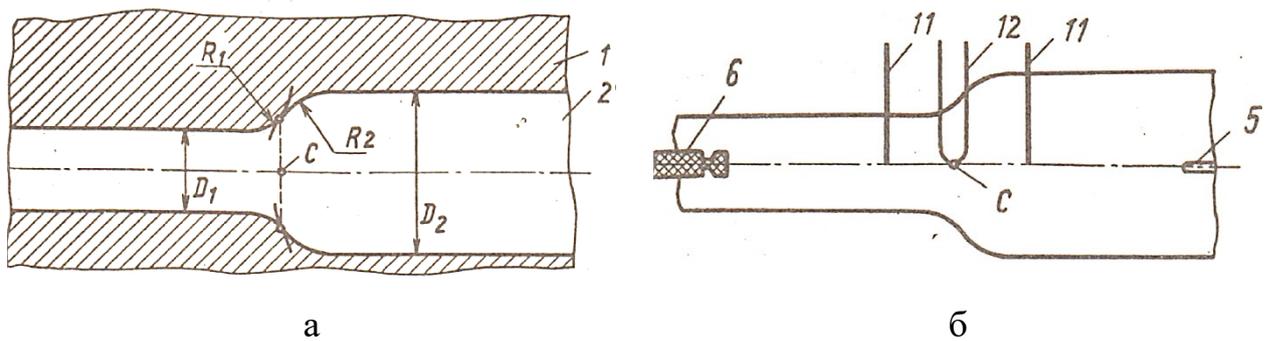


Рис. 2. Схема сполучення (а) і установки електродів (б) у ливарній формі

Реєстрація струму розбалансу моста, показів датчика температури (попередньо відтарованого за показниками термопари, встановленої в місці зародження тріщини) і величини ускладненої усадки Δ на багатопозиційному реєстраторі 14 дає можливість фіксувати процес утворення та розвитку тріщини за ускладненої усадки литого металу. Для реєстрації силового параметра використовується тарувальна залежність деформації пружнодеформованої пластини (Δ , мм) від прикладеного навантаження (P , Н), що має такий вигляд:

$$\Delta = 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot P + 1,2 \cdot 10^{-7} \cdot P^2, \quad (1)$$

Пристрій для вивчення тріщиностійкості ливарних сталей в процесі затвердіння працює наступним чином. Розплавлений метал заливають крізь ливникову чашу 3 в ливарну форму 1 для отримання ступінчастої проби 2. Метал, що кристалізується, фіксується з одного боку болтами 4, з іншого – пружнодеформованою пластиною 7, а через тягу 6 створюється ускладнена усадка, яка у вигляді деформації реєструється датчиком 8 (попередньо відтарованим на навантаження) та перетворюється датчиком 9 і записується потенціометром 10 одночасно з показниками термопари 5 (попередньо відтарованою за показами термопари, встановленої в термічному вузлі). Це дає можливість одночасно визначати температурні, силові і деформаційні характеристики процесу утворення та поширення тріщини.

Для одночасного визначення температурних і силових параметрів процесу утворення тріщини під час заливання металу вмикається вимірювальний електричний ланцюг, який реєструє електричний опір термічного вузла, і дублювальний електричний ланцюг, який реєструє рівень перешкод, пов'язаних з температурою металу.

За різницею електричного опору вимірювального та дублювального ланцюга визначається справжній електричний опір термічного вузла, який після появи тріщини збільшується у 2–3 рази. Фіксація моменту утворення тріщини в часі за показниками приладів 13 і 14 дає змогу пов'язати процес тріщиноутворення з температурними, деформаційними і силовими характеристиками ускладненої усадки реєструвальним потенціометром 10.

В результаті одного заливання одночасно визначається комплекс температурних, силових і деформаційних характеристик процесу утворення тріщин литого сплаву в процесі затвердіння.

Для оцінки ефективності застосування розробленого пристрою визначили параметри процесу утворення та розвитку тріщин у процесі ускладненої усадки сталі 50Л після заливання в сиру піщано-глинясту форму за температури 1600 °С. Результати експериментів наведено на рис. 3.

Видно, що за величиною деформації (Δ) момент утворення тріщини можна визначити наближено. У той же час поява горизонтальної площадки (А) на кривій I_p свідчить про порушення суцільності металу в місці сполучення ступінчастої проби.

Наступна експериментальна точка (В) на кривій I_p пов'язана з остаточним руйнуванням металу, що збігається з точкою (С) на кривій деформації.

Результати виконаних досліджень показують, що розроблений пристрій дає змогу проводити комплексометричний контроль умов утворення та розвитку тріщин в литому металі в процесі охолодження після затвердіння.

В результаті виконаної роботи розроблено пристрій для комплексометричного контролю параметрів тріщиноутворення ливарних сплавів, який дає змогу в умовах ускладненої усадки одночасно реєструвати деформацію, електроопір і температуру вилівка, а також визначати температурні межі інтервалу гарячеламкості, напруження і відносне видовження, за яких відбувається зародження тріщин, деформацію вилівка в інтервалі гарячеламкості та процес поширення тріщин в процесі охолодження вилівоків після затвердіння.

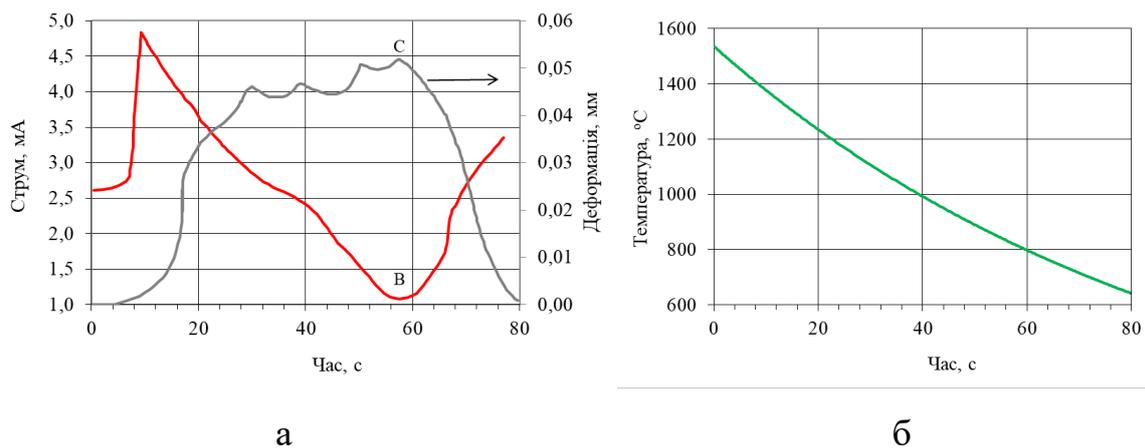


Рис. 3. Зміна деформації, струму розбалансу (а) і температури (б) в процесі утворення та розвитку тріщин внаслідок ускладненої усадки сталі 50Л після заливання в сиру піщано-глинясту форму

Література

1. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки, т 2. – москва: Машиностроение, 1979. – 335 с.
2. Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. – москва: Наука, 1966. – 300 с.
3. Константинов Л. С., Трухов А. П. Напряжения деформации и трещины в отливках. – москва: Машиностроение, 1981. – 199 с.
4. Бокштейн С. З. Строение и свойства металлических сплавов. – москва: Metallurgy, 1971. – 496 с.
5. Трубицын Н. А. Усадка стали при охлаждении в форме и образование горячих трещин в отливках // Взаимодействие литейной формы и отливки. – москва: Наука, 1962. – С. 99–108.
6. Ван Эгем Ж., Де Си А. О механизме образования горячих трещин в стальном литье. Практический образец для изучения склонности к трещинообразованию // Труды 32-го международного конгресса литейщиков. – москва: Машиностроение, 1969. – С. 14–32.
7. Изучение кинетики разрушения металла в процессе формирования отливки / А. Г. Крючков, Л. Г. Грибов, А. В. Овчинников // Литейное производство, 1981. – С. 22–23.
8. Михайлов А. М., Тимофеев А. А., Требухин В. В. Температурный интервал чувствительности сплавов к литейным напряжениям и деформациям // Литейное производство, 1982. – С. 4–5.
9. А. с. 123292 СССР, МКИ G01 В 7/02. Прибор для определения линейной усадки сплава и стойкости против образования горячих трещин / Н. А. Трубицын (СССР). – С. 2 с.
10. А. с. 204510 СССР, МКИ В22 Д 35/00. Устройство для определения линейной усадки сплава и стойкости против образования горячих трещин / Г. П. Зырин, Я. Г. Ашуха (СССР). – 3 с.

11. А. с. 885877 СССР, МКИ G 01 N 33/20. Устройство для определения трещиностойчивости и линейной усадки сплава / А. П. Лысов, Б. Ш. Танкелевич, Р. П. Бродовских (СССР). – 4 с.
12. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. – ленинград: Машиностроение, 1976. – 216 с.
13. Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. – москва: Металлургия, 1980. – 320 с.
14. Черепин В. Т. Экспериментальная техника в физическом металловедении. – К.: Техника, 1968. – 280 с.
15. Чернобровкин В. П. Механические свойства литого металла. – москва: Наука, 1963. – 308 с.
16. Электрические измерения / В. Н. Малиновский, Р. М. Демидова-Панферова, Ю. И. Евланов – москва: Энергоатомиздат, 1985. – 416 с.



ABSTRACT. The article presents the development and design description of a new device for studying the crack resistance of foundry steels during their solidification in a casting mold. The author substantiates the need for an integrated approach to assessing the quality of castings, which includes monitoring the thermal, deformation, and force characteristics of crack initiation and propagation under conditions of hindered shrinkage. The developed device allows for high-precision monitoring of the crack formation process, minimizing the errors typical of traditional stepped tests. The described methodology enables a deeper study of the kinetics of metal fracture at the crystallization stage, which is crucial for improving the manufacturing technologies of critical cast parts and preventing the occurrence of hot cracks.

KEYWORDS: crack resistance, foundry steel, solidification, hindered shrinkage, hot cracks, casting, monitoring device.