

## Магнітний контроль фазово-структурного стану сталевих виливків

Ю.В.Моїсєєв, доктор технічних наук

С.Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор

К.С. Богдан, доктор технічних наук

І.М. Стась

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*На прикладі сталей 45Л і У7Л показано можливості неруйнівного магнітного контролю фазово-структурного стану по перерізу виливків феромагнітних матеріалів.*

Методи неруйнівного, зокрема магнітного, контролю фазово-структурного стану і фізико-механічних властивостей металевих матеріалів набувають широкого застосування в металургії, ливарному виробництві, машинобудуванні, а також при проведенні експериментальних досліджень.

В даній роботі розглянуто два підходи щодо використання магнітних методів для неруйнівного контролю фазово-структурного стану сталевих виливків.

Перший ґрунтується на вимірюванні характеристик поля магнітного розсіювання в зоні залишкової намагніченості локальної ділянки досліджуваного зразка після короткочасного контакту її з торцем стрижньового постійного магніту. Розподіл нормальної  $B_r^N$  і тангенціальної  $B_r^T$  складових вектора індукції магнітного поля розсіювання по перерізу контактної магнітної зони (рис. 1) вказує на доцільність використання для контролю структури характеристики  $B_r^N$ . Вона має один максимум і однозначна при будь-якому відхиленні від полюса намагніченості. Важливим щодо цієї характеристики є її лінійна залежність від коерцитивної сили досліджуваного матеріалу, висока структурна чутливість та незалежність від форми об'єкта контролю [1].

В якості намагнічуючого пристрою застосовано постійний магніт (на основі РЗМ) циліндричної форми діаметром 5 мм, що забезпечує в зазорі між зразком і магнітом індукцію 0,146 – 0,157 мТл, а в якості датчика напруженості магнітного поля – мініатюрний датчик Холла. Оціночне значення глибини промагнічення 3 – 5 мм.

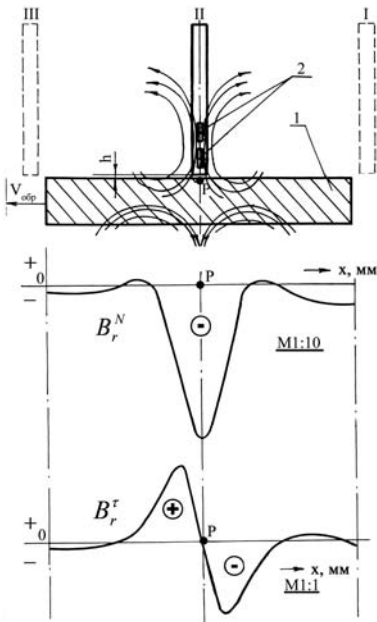


Рис. 1. Фізичні основи методу контролю.  $B_r^N$  – нормальна складова вектору індукції  $B$ ;  $B_r^T$  – тангенціальна складова вектору індукції  $B$ ;  $P$  – полюс намагніченості; 1 – об'єкт дослідження, 2 – датчик магнітного поля.

В якості об'єкта досліджень використано прямокутні виливки сталей 45Л і У7Л (115 x 130 x 200 мм) масою 25 кг, одержані за умов переважаючого одностороннього тепловідбору. Використання ливарних форм з різною тепловідірною здатністю (земляної або комбінованої з мідним водоохолоджуваним кристалізатором) забезпечувало охолодження торця виливків при кристалізації з різною інтенсивністю (нормальне і швидкісне охолодження) і формування відповідно різного фазово-структурного стану. Визначення структурних характеристик здійснювали металографічно на різній відстані від охолоджуваного торця по осі виливків.

Встановлено, що макроструктура виливків в напрямку одностороннього тепловідбору має чотири основні зони: коркову поверхневу (I); стовпчастих кристалів (II), що складається з ділянок короткоосних дендритів ( $a_1$ ) і довгоосних ( $a_2$ ); розгалужених дендритів (III) і рівноосних дендритів (IV) у центральній частині виливків. Протяжність їх закономірно змінюється залежно від умов кристалізації і складу сталей (таблиця).

Фазово-структурний стан приповерхневих об'ємів виливків характеризується більшою дисперсністю структури, наявністю нерівноважних структурних складових (мартенситу, відманштету). По мірі віддалення від торця виливків закономірно змінюється співвідношення фаз на основі  $\alpha$ -твердого розчину і перлітної складової структури (рис. 2). Виходячи з цього, слід очікувати і різну здатність певних ділянок виливків до намагнічування.

Відомо, що чисте залізо характеризується мінімальною коерцитивною силою порівняно із залізобуглецевими сплавами. Зростання її величини пов'язано з легуванням фериту, наявністю в структурі певних фаз (мартенсит, перліт, ледебурит, карбіди тощо), з підвищенням дисперсності структурних складових, зміною їх форми, напруженим станом, кількістю і дисперсністю магнітних і немагнітних складових структури [2].

Виходячи з цього, розглянуто можливості використання магнітної характеристики для оцінки особливостей макроструктури у різних зонах виливків досліджуваних сталей. Вимірювали нормальну складову напруженості магнітного поля розсіювання на висоті 2,5 м по нормалі до поверхні повздовжнього макрошліфа виливка у точці магнітного полюса.

Встановлено (рис. 3), що для всіх досліджуваних виливків максимальні значення залишкової намагніченості ( $B_r^N$ ) відповідають поверхневим об'ємам з високою дисперсністю і нерівноважністю структури, підвищеною

Протяжність структурних зон сталей залежно від умов кристалізації

	Протяжність структурних зон, мм			
	Сталь 45Л		Сталь У7Л	
	земля	кокіль	земля	кокіль
Коркова зона (I)	0,3	0,8	0,35	0,5
Зона стовпчастих дендритів (II)	49	85	31	72
Зона розорієнтованого росту дендритів (III)	81	48	36	34
Зона рівноосних дендритів (IV)	70	66,2	132,65	93,5

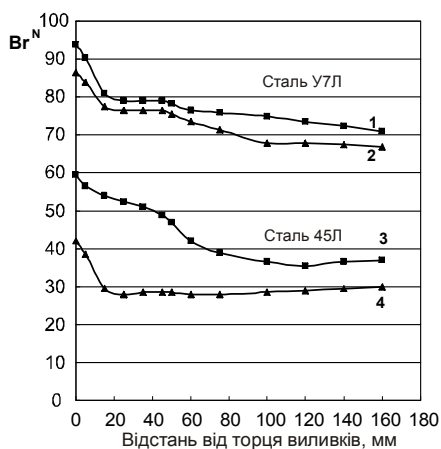


Рис. 2. Зміна характеристики залишкової намагніченості ( $B_r^N$ ) по перерізу виливків сталей 45Л і У7Л залежно від їх фазово-структурного стану.

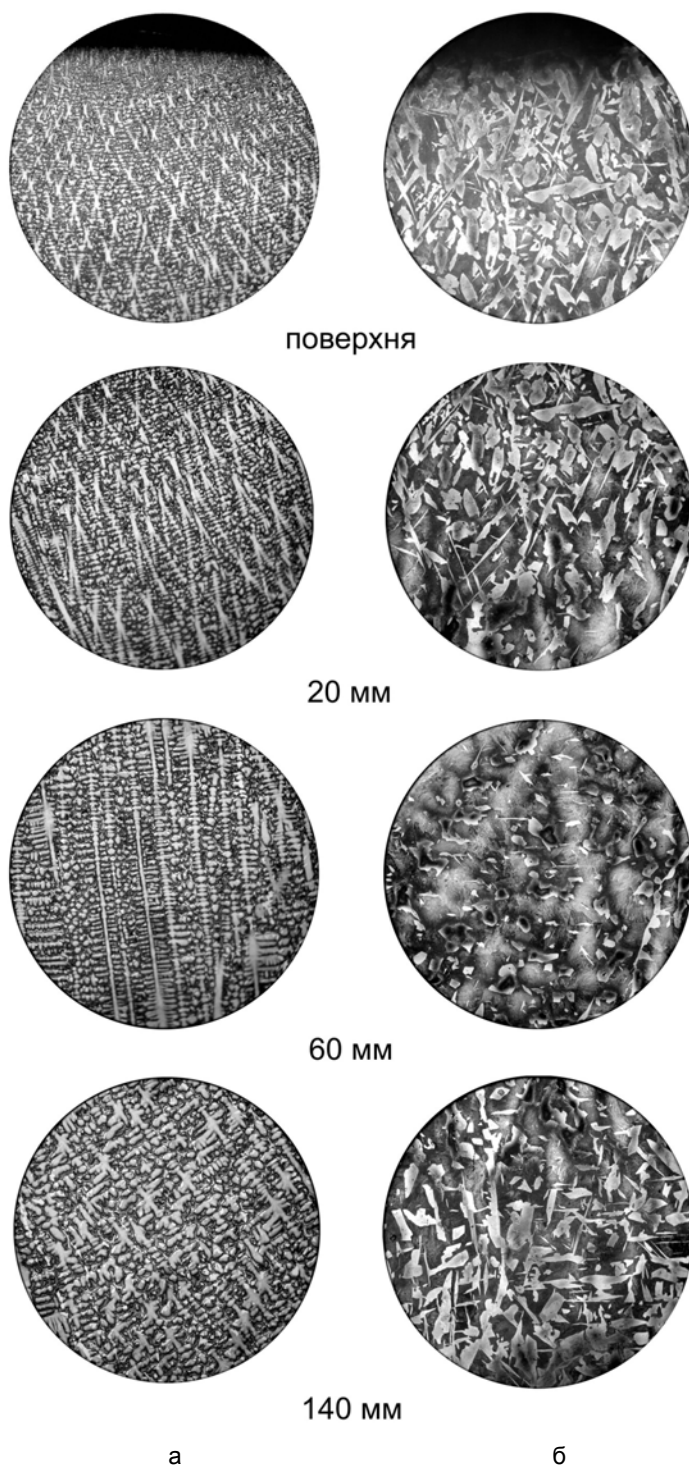


Рис. 3. Лита структура сталі 45Л по перерізу виливків за умов швидкісного (а) та нормального (б) охолодження. Цифри біля зображень структур – відстань від торця виливків.  $\times 100$ .

легованістю твердого розчину значними структурними напруженнями, зумовленими значним градієнтом температур при формуванні структури зони I. Показано, що тепловідбірна здатність ливарної форми є домінуючим фактором, що визначає рівень значень намагніченості не тільки в поверхневих зонах, але й по всьому перерізу виливків. Так, у виливках сталі 45Л при нормальному охолодженні під час кристалізації показник змінюється з віддаленням від поверхні до центра виливка від 42 до 28, а при швидкісному охолодженні відповідно від 59 до 36. Для виливків сталі У7Л цей показник значно вищий (пов'язано з більшим вмістом вуглецю) і змінюється за умов нормальної кристалізації від 87 до 66, а за умов швидкісної – від 95 до 72.

Аналіз ходу кривих зміни значень намагніченості свідчить, що її зменшення пов'язано з процесами транскристалізації (II зона), зростанням розмірів структурних складових (III зона) і зміною співвідношення фаз різного ступеня нерівноважності (мартенсит, перліт, ферит).

Утворення більш рівноважних ферито-перлітних структур у центральних об'ємах виливків (IV зона) характеризується низьким рівнем значень залишкової намагніченості як за умов нормального, так і швидкісного тепловідбору.

Другий підхід щодо контролю фазово-структурного стану сталевих виливків (пондеромоторний метод) базується на використанні силової взаємодії джерела магнітної енергії (постійний магніт або електромагніт) з об'єктом контролю [3].

Виходячи з встановленого раніше кореляційного зв'язку між силою взаємодії постійного магніту з феромагнітним матеріалом, його структурним станом і фазовим складом [4], розроблено магнітотензометричний прилад, за допомогою якого проведено дослідження впливу фазово-структурного стану виливків сталей 45Л і У7Л, одержаних за умов нормального і швидкісного охолодження під час кристалізації (описано вище).

Магнітний пристрій для неруйнівного контролю феромагнітних матеріалів (рис. 4) має тензорезисторний силівимірювальний датчик 5 з пружним елементом подвійного згину, закріплений одним кінцем на прямокутному корпусі 4 з немагнітного матеріалу. Другий кінець датчика 5 має силовий вихід, на якому змонтовано стрижень 7 з постійним магнітом 9, розташованим в корпусі 8 з немагнітного матеріалу. Корпус 8 жорстко з'єднаний з корпусом 4, який установлюють на плоский феромагнітний об'єкт контролю 3, розташований на основі 1 через немагнітну пластину 2. Між магнітом 9 і об'єктом контролю 3 є повітряний зазор 11, величина котрого залежить від магнітної сили магніту 9 і номінального навантаження датчика 5. Електричний вихід датчика 5 підключений до мікропроцесорного приладу 10 вимірювання сили притягування магніту 9 до об'єкта контролю 3, яка, за інших рівних умов, залежить від співвідношення магнітної та немагнітної фаз в структурі феромагнітного матеріалу об'єкта контролю 3. Підставка 6, яка закріплена на силовому вході датчика 5, слугує для торування силівимірювальної схеми.

Проведені за допомогою такого приладу експерименти щодо впливу фазово-структурного стану на силу  $F_m$  притягування постійного магніту до об'єкта контролю дозволили встановити закономірні зміни цієї характеристики у напрямку повздовжньої осі від

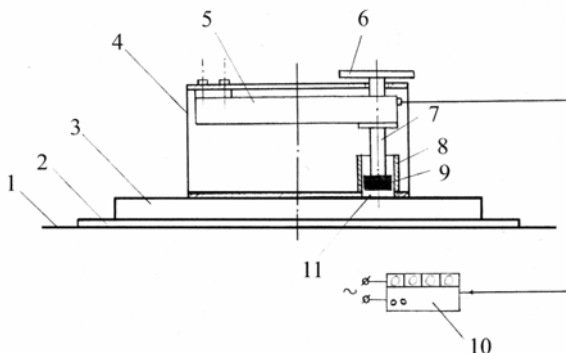


Рис. 4. Магнітотензометричний пристрій для неруйнівного контролю фазового складу феромагнітних матеріалів.

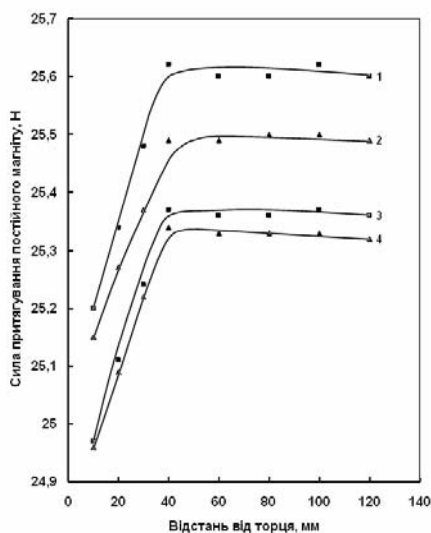


Рис. 5. Зміна сили притягування постійного магніту по перерізу виливків сталей 45Л (криві 1 і 2) і У7Л (криві 3 і 4) залежно від їх фазово-структурного стану. Криві 1, 3 - нормальне охолодження при кристалізації; 2, 4 - швидкісне охолодження.

охолоджуваного торця до центральної зони виливків (рис. 5). По мірі віддалення від охолоджуваного торця (до 60 мм) спостерігається підвищення значень сили  $F_m$  притягування, що пов'язано із зростанням ступеня намагніченості сталей, зумовленого відповідними змінами їх фазово-структурного стану.

У більш глибоких об'ємах виливків суттєвих змін сили  $F_m$  не виявлено, що свідчить про відносну стабілізацію фазово-структурного стану виливків у цих зонах.

Таким чином, проведені дослідження показали кореляційний зв'язок фазово-структурних характеристик локальних зон виливків, зумовлених особливостями температурно-часових параметрів їх кристалізації, з локальними магнітними характеристиками. Це відкриває перспективи використання методів магнітного неруйнівного контролю та діагностики змін фазово-структурного стану сталей в межах виливків та оцінки їх експлуатаційного ресурсу, обумовленого неоднорідністю цього стану.

## Література

1. Дорфман А.Л., Ершов Р.Е. Физические основы электромагнитной структуроскопии. – Новосибирск: Наука, 1985. – 181 с.
2. Бида Г.В., Ничупурук А.П. Коэрциметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 3 – 28.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: Справ./ В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
4. Богдан К.С., Моисеев Ю.В., Санкін А.О. Магнітний пристрій пондеромагнітної дії для розбракуння ферромагнітних матеріалів за фазовим складом // Металознавство та обробка металів. – 2007. – № 2. – С. 45 – 48.

Одержано 10.12.08

**Ю.В. Моисеев, С.Е. Кондратюк, К.С. Богдан, И.М. Стас**  
**Магнитный контроль фазово-структурного состояния стальных отливок**  
**Резюме**

На примере сталей 45Л и У7Л показаны возможности неразрушающего магнитного контроля фазово-структурного состояния по сечению отливок ферромагнитных материалов.

**Yu.V. Moiseev, S.Ye. Kondratyuk, K.S. Bogdan, I.M. Stas**  
**Magnetic control of phase-structural state of the steel castings**  
**Summary**

The capabilities of the non-destructive magnetic control of phase-structural state over the section of casting ferromagnetic materials are shown by the example of steels 45L and U7L.