

**В.М. МАЦЕВИТЬЙ**, д-р. техн. наук, **Г.Я. БЕЗЛЮДЬКО**, канд. техн. наук, **К.В. ВАКУЛЕНКО**, канд. техн. наук, **И.Б. КАЗАК**, канд. техн. наук, **В.В. КАРАБИН**, канд. техн. наук, Институт машин и систем, г. Харьков

## НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ПЛАСТИЧНЫХ (НЕЗАКАЛЕННЫХ) СТАЛЕЙ ПРИ АКТИВНОМ РАСТЯЖЕНИИ

*Legitimacies of change of a coercive force of some constructional steels in a state of delivery are investigated at their fissile tension down to fracture. The linear relation of a gain of a coercive force from  $\sqrt{\rho}$ , where  $\rho$  - a medial dislocation density is confirmed.*

*Вивчені закономірності зміни коерцитивної сили ряду конструкційних сталей у стані поставки при їх активному розтяганні аж до руйнування. Підтверджена лінійна залежність приросту коерцитивної сили від  $\sqrt{\rho}$ , де  $\rho$  – середня щільність дислокацій.*

**Введение.** Давно известная структурная чувствительность коэрцитивной силы служила основанием для активного использования этого свойства ферромагнитных материалов для контроля их структурного состояния. И в настоящее время путем измерения коэрцитивной силы контролируется химический состав и качество ее термообработки, кроме того, при известных химическом составе стали и режиме ее термообработки можно рассчитать ее коэрцитивную силу [1]. В основе влияния структуры сталей на их коэрцитивную силу лежат силовые и энергетические взаимодействия перемещающихся при перемагничивании ферромагнетика доменных границ с дефектами кристаллической решетки, а также участие «виновников» ферромагнетизма – электронов недостроенных  $d$ -оболочек атомов в формировании сил межатомной связи. По этой причине любое нагружение сил межатомной связи сразу же отражается на магнитных свойствах металла. Считают, что величина коэрцитивной силы является функцией расстояния между дислокациями в металле: чем меньше расстояние между дислокациями, тем больше коэрцитивная сила:  $H_c \sim A/S$ , где  $A$  – постоянная для конкретного материала, а  $S$  – расстояние между дислокациями [2]. Нетрудно показать, что в этом случае  $H_c \sim K\sqrt{\rho}$ , где  $\rho$  – средняя плотность дислокаций,  $K$  – постоянная для конкретного материала.

В настоящее время в связи с острой проблемой ресурса дорогостоящего оборудования, большое внимание уделяется возможности определения остаточного ресурса металлоконструкций путем использования методов неразрушающего контроля состояния материалов. В частности, для стальных изделий, материал которых имеет достаточно большой запас пластичности, с успехом применяется коэрцитиметрия, например, в течение уже многих лет,

для этих целей широко используются приборы фирмы «Специальные научные разработки» (г. Харьков), в частности, структуроскоп-коэрцитиметр КРМ-Ц-К2М. В основе метода лежит предположение о том, что пластичные стали (это могут быть стали после нормализации, отжига, либо стали в состоянии поставки после горячей прокатки иликовки) в процессе статического нагружения, а также при циклическом нагружении в области малоцикло-вой усталости, разрушаются после достижения определенного уровня коэрцитивной силы. Предполагается, что этот уровень соответствует максимальной нагрузке при активном растяжении стали, т.е. по существу – достижению  $\sigma_b$ . Нам представляется, что для выяснения физического смысла указанного предположения, справедливость которого, кстати говоря, хорошо оправдывается на практике, необходимы дополнительные специальные исследования.

Цель настоящей работы состоит в изучении закономерностей изменения коэрцитивной силы ряда конструкционных сталей в состоянии поставки при их активном растяжении вплоть до разрушения.

**Методика исследования.** Разрывные образцы, соответствующие эскизу, представленному на рис. 1, были изготовлены из трех сталей (40Х; ШХ15 и 60С2). Микротвердость сталей определялась на полированной рабочей поверхности готовых к испытаниям образцов с помощью ПМТ-3. Она составляет для стали 40Х – 1900 МПа, для стали ШХ15 – 2000 МПа и для стали 60С2 – 3400 МПа.

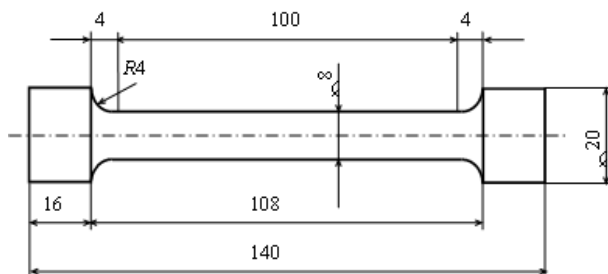


Рис. 1. – Эскиз образцов для испытаний на разрушение

Образцы деформировались растяжением на разрывной машине УИМ-50М. Коэрцитивная сила определялась на структуроскопе-коэрцитиметре КРМ-Ц-К2М (прибор изготовлен Харьковской фирмой «Специальные научные разработки») как среднее трех измерений. Измерения осуществлялись на образцах через двое суток после заданной деформации или разрушения.

В табл. представлены механические свойства образцов и значения коэрцитивной силы до деформации.

Таблица – Механические характеристики и коэрцитивная сила материала образцов

Материал образцов	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$H_c$ , А/см
Сталь 40Х	677	408	18,46	8,1–8,27
Сталь ШХ15	617	298,5	24,3	7,5–7,9
Сталь 60С2	1047	597	12,42	8,4–9,2

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 2–4 представлены кривые изменения растягивающего усилия  $P$  от величины пластической деформации  $\varepsilon_{пл}$  при растяжении образцов из сталей 60С2, ШХ15 и 40Х, а также соответствующие кривые изменения коэрцитивной силы указанных сталей. При построении последних были использованы не только значения  $H_c$ , измеренные непосредственно на образцах после их разгрузки (после достижения конкретных значений  $\varepsilon$ ), но также значения  $H_c$ , соответствующие условному пределу текучести сталей  $\sigma_{0,2}$ , которые удалось получить без непосредственных измерений в результате обработки результатов, о чем будет сказано ниже.

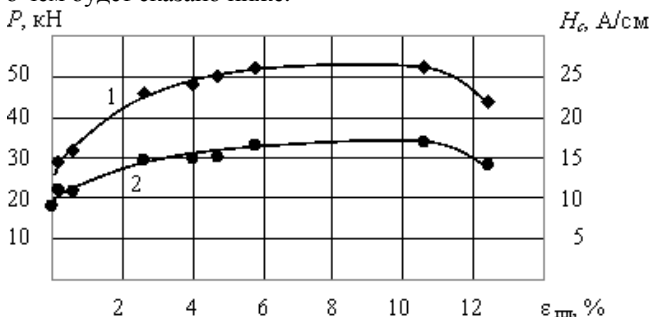


Рис. 2. – Зависимости растягивающего усилия (кривая 1) и коэрцитивной силы (кривая 2) от величины пластической деформации образцов из стали 60С2

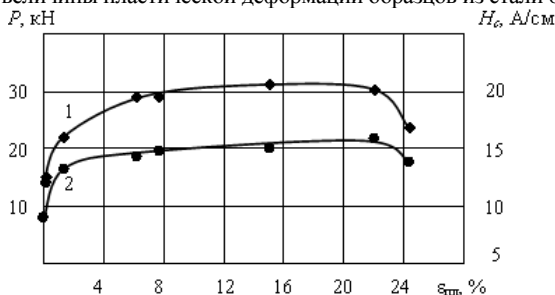


Рис. 3. – Зависимости растягивающего усилия (кривая 1) и коэрцитивной силы (кривая 2) от величины пластической деформации образцов из стали ШХ15

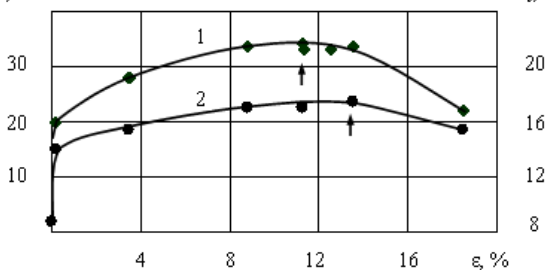


Рис. 4. – Зависимости растягивающего усилия (кривая 1) и коэрцитивной силы (кривая 2) от величины пластической деформации образцов из стали 40Х

Из рис. 2–4 следует, что форма кривых зависимости  $P$  и  $H_c$  от деформации подобна для всех исследованных сталей: сначала быстрый, но затухающий рост этих характеристик, достижение максимума и дальнейшее падение. Но подобие форм не означает полного соответствия. Есть основания считать, что максимумы на кривых  $H_c = H_c(\epsilon)$  иногда достигаются при большей пластической деформации, например, это заметно на стали 40X (максимумы отмечены стрелками). Однако увеличение  $H_c$  на участке между максимумами кривых весьма незначительные, поэтому положения, принятые в практике использования  $H_c$  для определения «критических» состояний материала перед разрушением, заключающиеся в том, что «критическому» состоянию соответствует значение  $H_c$  при достижении предела прочности, весьма близко к истине.

Следует при этом отметить, что более физичным представляется не растягивающее усилие, и не предел прочности, а истинное напряжение течения  $\sigma_{ист}$ . При условии равномерности макропластической деформации образцов (отсутствие выраженной шейки) это напряжение легко определяется:  $\sigma_{ист} = P/S_{ист}$ , где  $P$  – растягивающая сила, а  $S_{ист}$  – истинная площадь поперечного сечения образца. На кривых зависимости  $\sigma_{ист}$  от  $\epsilon_{пл}$  более четко просматривается упрочнение металла, которое подтверждается и измерением микротвердости (см. рис. 5–7). К моменту начала развития шейки (этому моменту соответствует последняя точка на кривых  $\sigma_{ист} = \sigma_{ист}(\epsilon_{пл})$ ) металл получает значительное упрочнение. Хотя на стадии развития шейки принципиально упрочнение может еще несколько увеличиться, в основном, развитие шейки сопровождается разупрочнением, что хорошо фиксирует коэрцитивная сила. При этом уменьшается и усилие растяжения, однако, в отличие от коэрцитивной силы уменьшение усилия связано, в основном, с быстрым уменьшением площади поперечного сечения образца в шейке, а не с разупрочнением металла.

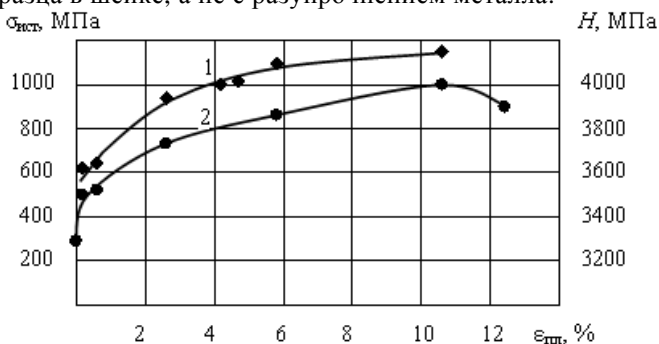


Рис. 5. – Зависимость  $\sigma_{ист}$  (кривая 1) и микротвердости (кривая 2) от пластической деформации растяжением образцов из стали 60С2

Причиной структурного разупрочнения металла, как известно, является уменьшение плотности дислокаций в нем в связи с динамическим отды-

хом, кроме этого, разупрочнению может способствовать увеличение концентрации субмикроразрушений. Оба эти процесса обеспечивают снижение внутренних напряжений, что и приводит к уменьшению коэрцитивной силы.

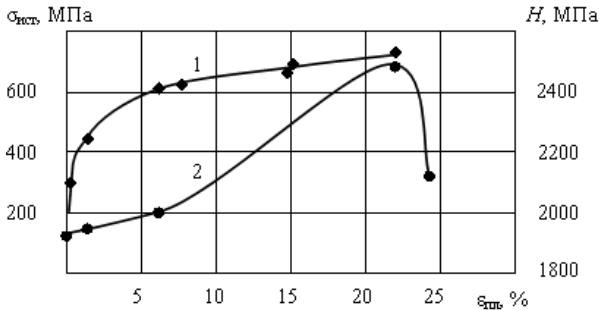


Рис. 6. – Зависимость  $\sigma_{ист}$  (кривая 1) и микротвердости (кривая 2) от пластической деформации растяжением образцов из стали 3Х15

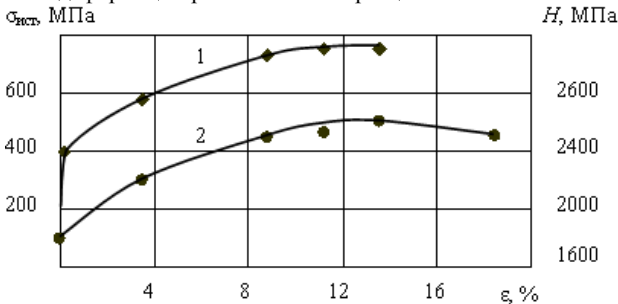


Рис. 7. – Зависимость  $\sigma_{ист}$  (кривая 1) и микротвердости (кривая 2) от пластической деформации растяжением образцов из стали 40X

Весьма интересным представляется анализ зависимости приращения коэрцитивной силы при деформации от величины  $(\sigma_{ист} - \sigma_{0,2})$  – см. рис. 8. Как видно из рисунка указанная зависимость имеет линейный характер для всех исследованных сталей, хотя углы наклона прямых для разных сталей отличаются. Линейный характер этих зависимостей позволяет не только определить значения  $\Delta H_c$ , соответствующие условному пределу текучести  $\sigma_{0,2}$  сталей (это достигается экстраполяцией прямых до пересечения с осью ординат), но и получить косвенное подтверждение того, что коэрцитивная сила, действительно, пропорциональна  $\sqrt{\rho}$ , где  $\rho$  – средняя плотность дислокаций.

Действительно, линейную зависимость  $\Delta H_c$  от  $(\sigma_{ист} - \sigma_{0,2})$  можно представить в виде  $\Delta H_c = (\sigma_{ист} - \sigma_{0,2}) \beta + (\Delta H_c)_{\sigma_{0,2}}$ . Поскольку известно [см. например 3], что напряжение течения  $\sigma_t = \sigma_0 + \alpha Gb\sqrt{\rho}$ , где  $\sigma_0$  – предел теку-

чести материала,  $G$  – модуль сдвига,  $b$  – вектор Бюргерса,  $\alpha$  – коэффициент, то можно утверждать, что  $\Delta H_c = \alpha G b \beta \sqrt{\rho} + (\Delta H_c)_{\sigma_{0,2}}$ .

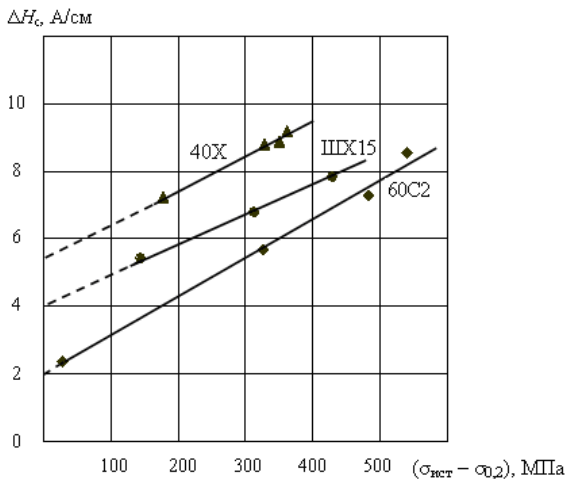


Рис. 8. – Зависимости приращения коэрцитивной силы от величины  $\sigma_{ист} - \sigma_{0,2}$

**Выводы:** 1) Показано, что для сталей 40X, ШХ15 и 60С2 в состоянии поставки характер зависимостей растягивающего усилия и коэрцитивной силы от пластической деформации одинаков: быстрый, но затухающий рост в начале деформации сменяется очень медленным ростом, достижением максимума и дальнейшим уменьшением характеристик к моменту разрыва образцов; 2) Установлено, что положение, принятое в практике использования  $H_c$  для определения критических состояний незакаленных сталей перед разрушением, заключающееся в том, что критическому состоянию соответствует уровень  $H_c$ , достигаемый при максимальной растягивающей нагрузке, можно считать обоснованным; 3) Анализ поведения истинного растягивающего напряжения при растяжении показывает, что эта характеристика нагляднее отражает динамику упрочнения и разрушения металла. При этом установлено, что для рассматриваемых сталей прирост коэрцитивной силы линейно зависит от  $\sqrt{\rho}$ , где  $\rho$  – средняя плотность дислокаций.

**Список литературы:** 1. Богачева Н.Д. Расширение возможностей применения коэрцитивной силы /Н.Д. Богачева // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – №2. – С.8-10. 2. Энциклопедия неорганических материалов. В 2 т. Т.1 – Киев, 1977. – 840 с. 3. Трефилов В.И. Физические основы прочности тугоплавких металлов. / В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирстов. – Киев: «Наукова думка», 1975. – 313 с.

Поступила в редколлегию 29.01.2010