

УДК 669.15; 620.179.14

С.Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук, доц.  
заведующий лабораторией металлургии в машиностроении<sup>1</sup>  
E-mail: sand@iaph.bas-net.by

А.Л. ВАЛЬКО  
старший научный сотрудник<sup>1</sup>  
E-mail: valcoalex5@gmail.com

С.П. РУДЕНКО, канд. техн. наук  
ведущий научный сотрудник<sup>1</sup>  
E-mail: sprud.47@mail.ru

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18.05.2020.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЦЕМЕНТАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНУЮ ТОЛЩИНУ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ И МАГНИТНЫЙ ПАРАМЕТР СТАЛИ 18ХГТ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ

*Высоконапряженные детали трансмиссий энергонасыщенных машин изготавливают из сталей, подвергаемых цементации и последующей закалке. В изделии из низкоуглеродистой стали образуется прочный высокоуглеродистый поверхностный слой при мягкой и вязкой сердцеvine. Важным параметром упрочненного слоя является его эффективная толщина  $h_{эфф}$ . Влияние продолжительности процесса цементации на  $h_{эфф}$  образцов из стали 18ХГТ, используемой для изготовления зубчатых колес высоконагруженных трансмиссий, исследовано в статье. Также исследована возможность использования магнитного параметра для неразрушающего контроля  $h_{эфф}$ . Использован прибор «Сортировщик магнитный МС-1», измеряющий градиент нормальной составляющей поля остаточной намагниченности над местом контакта полюса магнита с поверхностью металла. Для определения  $h_{эфф}$  использована интерполяция измерений распределения микротвердости HV по толщине слоя на изготовленных микрошлифах. Значения микротвердости HV пересчитаны в значения твердости HRC по зависимости, рекомендованной международным стандартом. Исследования показали, что  $h_{эфф}$  цементированного слоя стали 18ХГТ после закалки линейно зависит от времени цементации. Между  $h_{эфф}$  исследованных образцов и показаниями прибора МС-1 имеется корреляция. Это предпосылка для разработки неразрушающего метода контроля процесса химико-термической обработки зубчатых колес трансмиссий мобильных машин.*

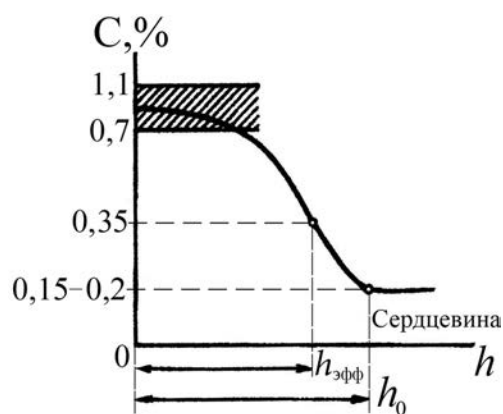
**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение, цементация, твердость, эффективная толщина упрочненного слоя, неразрушающий контроль, полюсное намагничивание

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-71-77>

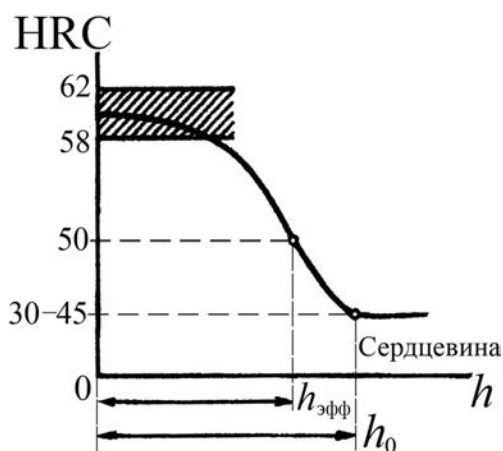
**Введение.** Для обеспечения сопротивления контактной усталости зубчатых колес трансмиссий мобильных машин важна твердость (микротвердость) на определенном расстоянии от поверхности зубьев в зоне действия максимальных глубинных контактных напряжений [1, 2]. Для ее обеспечения используют поверхностное упрочнение металла [3]. Основным методом поверхностного упрочнения стали на необходимую глубину является цементация — процесс насыщения поверхностного слоя низкоуглеродистой стали углеродом — с последующей закалкой [3–5]. В результате такой химико-термической обработки в низкоуглеродистой стали образуется поверхностный слой с концентрацией углерода,

убывающей от поверхности к сердцеvine детали (рисунок 1 а). При закалке в поверхностном слое цементированных изделий формируется высокоуглеродистый мартенсит с высокой твердостью и износостойкостью, а в сердцеvine изделия сохраняется низкая твердость (см. рисунок 1 б) и высокая вязкость.

Для обеспечения требуемого ресурса зубчатых колес регламентируют поверхностную твердость и эффективную толщину цементации [6]. Эти величины определяют прочность и технологию термообработки цементируемых зубчатых колес [7–9]. За эффективную толщину  $h_{эфф}$  поверхностно-упрочненного слоя принимают расстояние от поверхности до зоны с твердостью



a



b

Рисунок 1 — Схема изменения содержания углерода  $C$  (a) и твердости HRC (b) от расстояния  $h$  до поверхности насыщения:  $h_{эфф}$  и  $h_0$  — эффективная и полная толщина цементированного слоя соответственно

Figure 1 — Scheme for changing the carbon  $C$  (a) and hardness HRC (b) from the distance  $h$  to the saturation surface:  $h_{эфф}$  and  $h_0$  are the effective and total thickness of the cemented layer, respectively

50 HRC [4, 6], которой соответствует содержание углерода 0,35 %  $C$  для конструкционных легированных сталей.

Сталь 18ХГТ предназначена для изготовления цементруемых деталей силовых передач, обеспечивает высокую поверхностную твердость, прочность и вязкость сердцевины [10, 11]. Химический состав (в процентах) стали 18ХГТ: 0,17–0,23  $C$ ; 0,17–0,33  $Si$ ; 0,80–1,1  $Mn$ ; 1,00–1,30  $Cr$ ; 0,03–0,09  $Ti$  [10]. Примеси, %, не более: 0,035  $P$ ; 0,035  $S$ ; 0,30  $Cu$ ; 0,30  $Ni$ .

Важным технологическим параметром изготовления деталей, определяющим эффективную толщину  $h_{эфф}$  цементированного слоя, наряду с температурой, является время цементации  $t$  [4, 6]. Определить зависимость  $h_{эфф}(t)$  для стали 18ХГТ важно для оптимизации режима ее термической обработки при изготовлении зубчатых колес с заданными свойствами. Кроме того, прямые методы определения эффективной толщины  $h_{эфф}$  цементации являются разрушающими [4] и не могут быть использованы для контроля качества изделий, предназначенных

для эксплуатации. Неразрушающий контроль материалов и изделий физическими методами используют для обеспечения технологической и промышленной безопасности во всех промышленно развитых странах. Эффективным методом такого контроля является магнитный [12]. На его основе созданы приборы для неразрушающего контроля качества поверхностного упрочнения [12–14]. Они могут являться составной частью технологического процесса производства.

Цель статьи — получение функциональной зависимости эффективной толщины цементированного слоя стали 18ХГТ от времени цементации и анализ возможности применения одного из магнитных методов неразрушающего контроля — метода «точечного полюса» — для ее определения.

**Полюсное намагничивание как метод локальной коэрцитиметрии.** Физической основой магнитного структурного анализа является то, что магнитные свойства сталей чувствительны к структурным превращениям, происходящим в них при термических обработках [15, 16]. Неразрушающий метод контроля толщины и механических свойств упрочненного слоя основан на различии физических свойств сердцевины изделия и поверхностного слоя. Чем больше это различие, тем более достоверен метод контроля. Для контроля обычно выбирают магнитную характеристику, имеющую максимальный градиент при переходе от упрочненного слоя к сердцевине изделия. Наибольшее применение для контроля качества поверхностного упрочнения получила коэрцитивная сила  $H_c$  [12–14].

Одним из наиболее распространенных методов контроля свойств изделий из ферромагнитных материалов по результатам косвенного определения  $H_c$  является метод «точечного полюса» [17]. В [18] отмечено, что изделие с размагничивающим фактором  $N$  после намагничивания сохраняет остаточную намагниченность  $M_d$  тела, которая меньше остаточной намагниченности  $M_r$  материала изделия. Во многих практически важных случаях можно считать, что

$$M_d \cong H_c / N. \quad (1)$$

Из (1) следует, что при постоянных размерах изделия ( $N = \text{const}$ ) величина  $M_d$  определяется  $H_c$  материала изделия и является структурно чувствительным параметром. Это явление лежит в основе работы средств контроля механических свойств изделий по остаточной индукции, в том числе при их полюсном намагничивании [17]. Метод «точечного полюса» заключается в контакте одного из полюсов постоянного магнита (электромагнита) с поверхностью изделия и последующем измерении поля остаточной намагниченности (или его градиента) над намагниченным участком изделия. Коэрцитиметрический эффект метода обусловлен большим размагничивающим фактором намагни-

ченного участка при формировании его остаточного намагниченного состояния. Возможность оценки  $H_c$  материала по полю остаточной намагниченности после полюсного намагничивания экспериментально подтверждена в [19], а особенности распределения поля над намагниченной поверхностью исследованы в [20, 21].

**Приборная реализация метода точечного полюса.** Анализ технических характеристик и функциональных возможностей приборов, реализующих метод «точечного полюса», проведен в [17]. Одна из современных реализаций метода «точечного полюса» осуществлена в приборе «Сортировщик магнитный МС-1» [17, 22]. Функциональная схема преобразователя прибора приведена на рисунке 2.

Намагничивание контролируемого участка осуществляется магнитом диаметром 6 мм высотой 3 мм из материала SmCo с удлинителем и концентратором из магнитомягкого материала (площадь контактной площадки 0,8 мм<sup>2</sup>). Напряженность намагничивающего поля на торце датчика — не менее 40 кА/м. Помещение магнита после намагничивания в магнитомягкий экран (см. рисунок 2) уменьшило размеры датчика. Конструкция датчика (см. рисунок 2) позволяет измерить градиент  $\nabla H_{\perp}$  нормальной составляющей поля остаточной намагниченности над местом контакта полюса магнита с контролируемой поверхностью. В исходном состоянии магнит находится в верхней части корпуса и поле магнита экранируется его верхней (магнитомягкой) частью. Перед измерением магнит взводится в нижнюю позицию (в немагнитную часть корпуса) и удерживается в ней фиксатором. При этом рычаг с закрепленным на нем феррозондом перемещается в сторону. Корпус устанавливается нижним торцом на изделие вертикально к его поверхности. Глубина промагничивания материала плоской ферромагнитной поверхности

оценивается величиной 3 мм. Удерживая корпус на объекте, нажимают на фиксатор, освобождая магнит. Под действием растянутой пружины магнит перемещается в исходное состояние, а рычаг с феррозондом располагается над местом контакта магнита и изделия. Феррозонд преобразует  $\nabla H_{\perp}$  изделия в электрический сигнал. Результат его измерения поступает на дисплей. Метрологическое обеспечение прибора основано на измерении поля магнита на торце преобразователя и методике поверки феррозондов-градиентомеров. Методика поверки приборов МС-1 утверждена Госстандартом Республики Беларусь. Диапазон измерения  $\nabla H_{\perp}$  — от 0,2 до 150 кА/м<sup>2</sup> (размерность показаний прибора —  $\nabla H_{\perp} \cdot 10^{-5}$ , А/м<sup>2</sup>), погрешность — не более 5 % [22, 17].

**Модельные образцы из стали 18ХГТ и методики измерения их параметров.** Отличительной особенностью исследований является их проведение на образцах из стали 18ХГТ, подвергнутых цементации и закалке по режимам, регламентированным производством зубчатых колес силовых передач. Изготовлено 4 образца диаметром 30 мм и толщиной 10 мм. Для получения разной толщины упрочненного слоя провели цементацию образцов № 11, 00 и 33 в шахтной печи с автоматическим контролем углеродного потенциала. Заданный углеродный потенциал насыщающей атмосферы был обеспечен за счет изменения расхода керосина и воздуха. Формирование разной толщины цементированного слоя определялось временем насыщения образцов. Использована схема двух стадийного процесса цементации: активное насыщение при углеродном потенциале 1,2 % С и диффузионное выравнивание при 0,8 % С. Общее время цементации варьировалось от 13 до 17 часов без учета времени подстуживания садки до 800 °С перед выгрузкой из печи. Далее образцы № 66, 11, 00 и 33 закаливались от 850 °С в масло АКС МЗМ-38.

Твердость поверхности образцов после закалки измеряли при нагрузке 150 кгс [23] на твердомере ТК-2М. Градиент поля остаточной намагниченности образцов после намагничивания методом точечного полюса измерен прибором МС-1. Результаты измерений параметров модельных образцов сведены в таблицу. После проведения измерений твердости HRC и градиента  $\nabla H_{\perp}$  поля остаточной намагниченности на поверхности образцов были изготовлены металлографические шлифы диаметрального сечения образцов, которые исследовали после травления в 4-процентном растворе азотной кислоты. Распределение микротвердости HV0,5 на шлифах по глубине цементированного слоя образцов после химико-термической обработки (ХТО) измеряли при нагрузке 4,9 Н [24] на микротвердомере ПМТ-3М. Результаты этих исследований приведены на рисунке 3.

Для определения эффективной толщины  $h_{эф}$  цементированного слоя образцов № 11, 00 и 33 из-



Рисунок 2 — Функциональная схема преобразователя прибора МС-1

Figure 2 — Functional diagram of converter of the MS-1 device

Таблица — Время цементации, результаты измерения и расчета параметров модельных образцов из стали 18ХГТ  
Table — Cementation time, results of measurement and calculation of parameters of model samples made of 18ХГТ (18KhGT) steel

№ обр.	Время цементации, часов	Твердость HRC на поверхности	№ рисунков с распределением HV0,5 и HRC по толщине слоя	Эффективная толщина $h_{эфф}$ , мм цементированного слоя	Показания $VН1 \cdot 10^{-5}$ , А/м <sup>2</sup> прибора МС-1
66	0	39	№ 3, кривая 4	0	185
11	13	66	№ 3, кривая 1; № 4а	2,029	394
00	14	66	№ 3, кривая 2; № 4б	2,259	393
33	17	66	№ 3, кривая 3; № 4в	2,669	408

меренные значения микротвердости HV0,5 были пересчитаны в единицы твердости HV (при нагрузке 30 Н) с переводным коэффициентом 0,97 и в значения твердости HRC по формуле:

$$HRC = 31,49 + 0,0796683 \cdot HV - 0,0000355432 \cdot HV^2 - \frac{6728,16}{HV}, \quad (2)$$

рекомендованной стандартом [25].

Результаты пересчета в практически важном для определения  $h_{эфф}$  диапазоне изменения значений твердости HRC исследованных образцов приведены на рисунке 4.

Полученные зависимости HRC( $h$ ) для образцов № 11, 00 и 33 были интерполированы (см. рисунок 4) соответственно полиномами второй степени:

$$HRC = 8,6607 \cdot h^2 - 44,982 \cdot h + 105,62; \quad (3)$$

$$HRC = 5,922 \cdot h^2 - 37,304 \cdot h + 104,05; \quad (4)$$

$$HRC = 1,6613 \cdot h^2 - 18,426 \cdot h + 87,343. \quad (5)$$

Согласно [4, 5] (см. рисунок 1 б), значению эффективной толщины  $h_{эфф}$  цементированного

слоя сталей после закалки соответствует значение 50 HRC. В соответствии с этим, на основании зависимостей (3)–(5), для определения  $h_{эфф}$  образцов № 11, 00 и 33 были получены следующие приведенные квадратные уравнения:

$$h_{эфф}^2 - 5,194 \cdot h_{эфф} + 6,422 = 0; \quad (6)$$

$$h_{эфф}^2 - 6,299 \cdot h_{эфф} + 9,127 = 0; \quad (7)$$

$$h_{эфф}^2 - 11,091 \cdot h_{эфф} + 22,478 = 0. \quad (8)$$

Результаты решения уравнений (6)–(8), округленные до трех значащих цифр после запятой, приведены в таблице. С учетом высоких значений достоверности аппроксимаций исследованных зависимостей уравнениями регрессии (3)–(5), использованная математическая обработка результатов измерения распределения микротвердости HV0,5 по толщине  $h$  цементированного слоя позволила определить эффективную толщину  $h_{эфф}$  цементированного слоя исследованных закаленных образцов с погрешностью не более 10 мкм.

Результаты расчета параметра  $h_{эфф}$  образцов № 11, 00 и 33 использованы для получения функциональной зависимости эффективной толщины  $h_{эфф}$  цементированного слоя стали 18ХГТ после закалки от времени  $t$  цементации. Эта зависимость приведена на рисунке 5.

Полученные результаты показывают, что между эффективной толщиной  $h_{эфф}$  цементированного слоя стали 18ХГТ после закалки и временем цементации  $t$  (в часах) имеется функциональная зависимость:

$$h_{эфф} = -0,0233 \cdot t^2 + 0,86 \cdot t - 5,2077. \quad (9)$$

Анализ рисунка 5 и зависимости (9) показывает, что требуемая эффективная толщина упрочненного слоя цементированных образцов из стали 18ХГТ формируется при закалке по параболическому закону в рассмотренном диапазоне временного интервала цементации.

Зависимость показаний прибора МС-1 от эффективной толщины  $h_{эфф}$  цементированного слоя образцов № 66, 11, 00 и 33 приведена на рисунке 6. Статистическая обработка результатов исследований проведена в программе Microsoft-XL. Резуль-

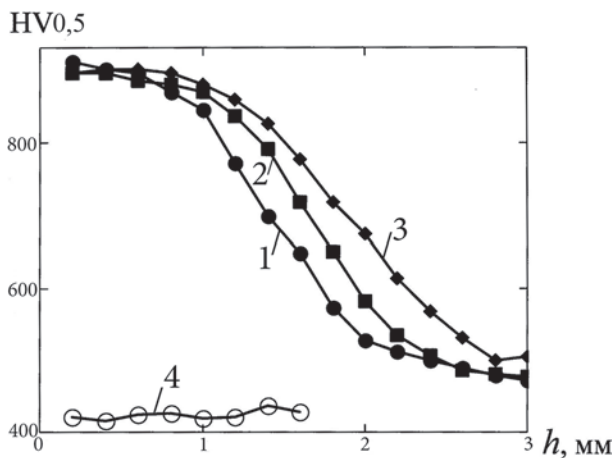
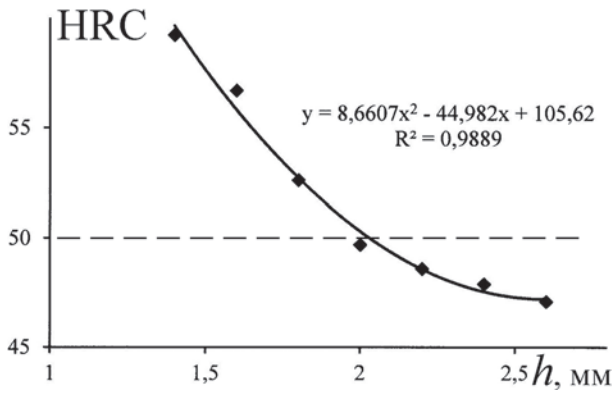
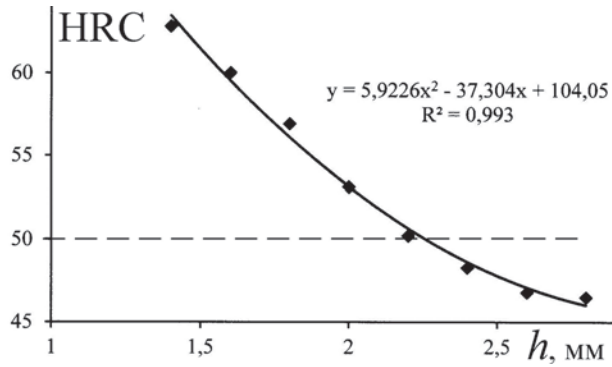


Рисунок 3 — Распределение микротвердости HV0,5 по толщине  $h$  цементированного слоя образцов № 11 (1), 00 (2), 33 (3) после химико-термической обработки и № 66 (4) после закалки  
Figure 3 — Distribution of microhardness HV0.5 over the thickness  $h$  of the cemented layer of samples no. 11 (1), 00 (2), 33 (3) after chemical heat treatment and no. 66 (4) after quenching

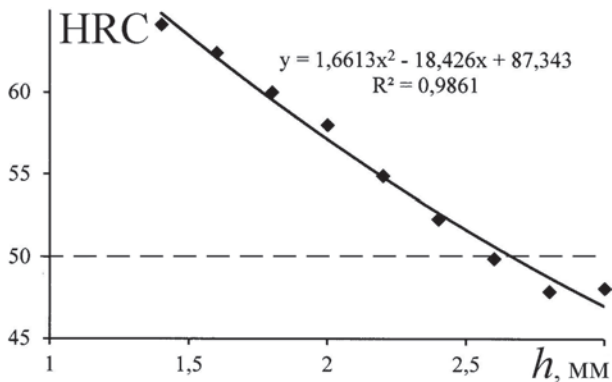




a



b



c

Рисунок 4 — Распределение твердости HRC по толщине  $h$  цементированного слоя образцов № 11 (a), 00 (b), 33 (c) после закалки и интерполирующие их аналитические зависимости с полиномиальными (второй степени) уравнениями регрессии и коэффициентами  $R^2$  достоверности аппроксимации  
 Figure 4 — The hardness HRC distribution over the thickness  $h$  of the cemented layer of samples no. 11 (a), 00 (b), 33 (c) after quenching and their interpolating analytical dependences with polynomial (second degree) regression equations and coefficients of determination  $R^2$

таты показали, что между эффективной толщиной  $h_{эфф}$  цементированного слоя исследованных образцов и показаниями прибора МС-1 имеется корреляционная зависимость, которая может быть использована для контроля качества цементации после закалки изделий из стали 18ХГТ.

**Выводы.** Полученные результаты показывают, что:

1) установлена параболическая функциональная зависимость (9) между эффективной толщиной

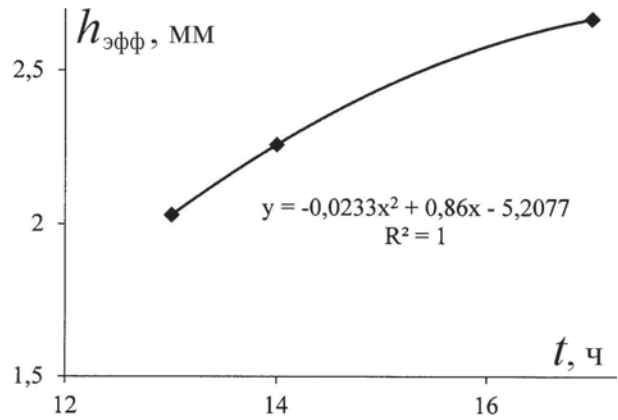


Рисунок 5 — Зависимость эффективной толщины  $h_{эфф}$  цементированного слоя исследованных образцов стали 18ХГТ от времени цементации  $t$

Figure 5 — Dependence of the effective thickness  $h_{эфф}$  of the cemented layer of the studied 18XGT (18KhGT) steel samples on the cementation time  $t$

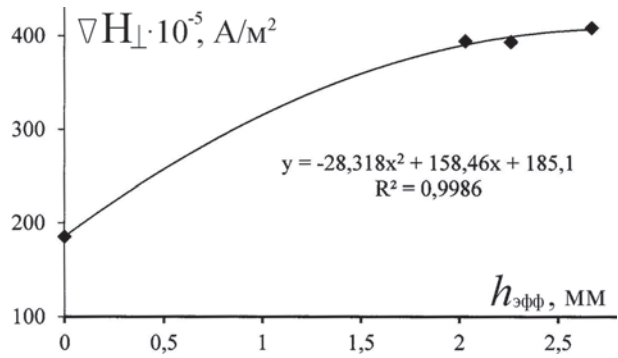


Рисунок 6 — Зависимость показаний ( $\nabla H_{\perp} \cdot 10^{-5}$ , А/м<sup>2</sup>) прибора МС-1 от эффективной толщины  $h_{эфф}$  цементированного слоя после закалки исследованных образцов из стали 18ХГТ, линия тренда этой зависимости, ее уравнение (полином второй степени) и достоверность аппроксимации ( $R^2$ )  
 Figure 6 — Dependence of readings ( $\nabla H_{\perp} \cdot 10^{-5}$ , А/м<sup>2</sup>) of the MS-1 device on the effective thickness  $h_{эфф}$  of the cemented layer after quenching the studied samples of 18XGT (18KhGT) steel, the trend line of this dependence, its equation (second degree polynomial) and the coefficient of determination ( $R^2$ )

$h_{эфф}$  цементированного слоя стали 18ХГТ после закалки и временем цементации  $t$  в практически важном диапазоне его изменения. Полученный результат позволяет обоснованно выбирать режим цементации деталей трансмиссий энергонасыщенных машин из стали 18ХГТ исходя из необходимой эффективной толщины цементированного слоя;

2) имеется корреляционная зависимость между эффективной толщиной  $h_{эфф}$  цементированного слоя исследованных образцов из стали 18ХГТ после закалки и градиентом нормальной составляющей поля остаточной намагниченности над местом контакта полюса постоянного магнита прибора МС-1 с поверхностью образца. Полученный результат является предпосылкой для разработки метода магнитного неразрушающего контроля эффективной толщины цементированного слоя закаленных зубчатых колес трансмиссий мобильных машин.

## Список литературы

1. Анализ применения комплексно-легированных сталей для зубчатых колес карьерных самосвалов / С.П. Руденко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2018. — № 2(43). — С. 55–60.
2. Руденко, С.П. Применение перспективных экономно-легированных марок сталей для зубчатых колес мобильных машин. / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 4. — С. 61–69.
3. Гуляев, А.П. Материаловедение: учеб. для вузов / А.П. Гуляев. — 6-е изд., доп. и перераб. — М.: Металлургия, 1986. — 544 с.
4. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учеб. для машиностроительных вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Машиностроение, 1980. — 493 с.
5. Сусин, А.А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А.А. Сусин. — Минск: Беларус. наука, 1999. — 175 с.
6. Поверхностно-упрочненные слои металлических деталей. Методы измерения толщины: СТБ 2307-2013. — Минск: Госстандарт, 2013. — 16 с.
7. Руденко, С.П. Разработка режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономно легированной стали / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 2(39). — С. 34–38.
8. Руденко, С.П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько. — Минск: Беларус. наука, 2014. — 126 с.
9. Руденко, С.П. Сопротивление контактной усталости цементованных зубчатых колес из хромоникелевых сталей / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Материаловедение и термическая обработка металлов. — 2017. — № 1. — С. 58–62.
10. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В.Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
11. Металлопродукция из конструкционной легированной стали: ГОСТ 4543–2016. — Взамен ГОСТ 4543–71; введ. 25.10.2016. — М.: Стандартиформ, 2019. — 53 с.
12. Неразрушающий контроль: справ.: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2006. — Т. 6: в 3 кн. / В.В. Клюев [и др.]. — Кн. 1. Магнитные методы контроля. — 848 с.
13. Электромагнитные методы и средства контроля качества поверхностного упрочнения / Э.С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. — 1988. — № 7. — С. 7–13.
14. Горкунов, Э.С. Магнитные приборы контроля структуры и механических свойств стальных и чугунных изделий (обзор) // Дефектоскопия. — 1992. — № 10. — С. 3–35.
15. Вонсовский, С.В. Магнитный структурный анализ / С.В. Вонсовский, М.Н. Михеев // Заводская лаборатория. — 1957. — № 10. — С. 1221–1226.
16. Михеев, М.Н. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества — физическая основа магнитного структурного анализа (обзор) / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. — 1981. — № 8. — С. 5–21.
17. Сандомирский, С.Г. Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. — 2006. — № 9. — С. 36–64.
18. Сандомирский, С.Г. Расчет и анализ намагничивающего фактора ферромагнитных тел / С.Г. Сандомирский. — Минск: Беларус. наука, 2015. — 244 с.
19. Загидулин, Р.В. К оценке коэрцитивной силы материала над величине поля остаточной намагниченности / Р.В. Загидулин, В.Ф. Мужичкий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2005. — Т. 71, № 2. — С. 25–28.
20. Нормальная составляющая остаточного магнитного поля над поверхностью массивного тела / Э.Э. Федорищева [и др.] // Дефектоскопия. — 1982. — № 2. — С. 23–29.
21. Сандомирский, С.Г. Анализ чувствительности поле- и градиентометрических датчиков к коэрцитивной силе материала изделия с плоской поверхностью после полюсного намагничивания / С.Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. — 2008. — № 5. — С. 31–41.
22. Универсальный магнитный сортировщик и его применение для решения задач неразрушающего контроля / С.Г. Сандомирский [и др.] // Контроль. Диагностика. — 2004. — № 8. — С. 27–31.
23. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу: ГОСТ 9013–59 (ИСО 6508–86). — Введ. 01.01.69. С изменениями № 1, 2, 3, утвержденными в мае 1979 г., октябре 1984 г., мае 1989 г. (ИУС 7–79, 1–85, 8–89). — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 10 с.
24. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения: ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 — Введ. 01.08.2008. — М.: Стандартиформ, 2008. — 16 с.
25. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness [Electronic resource] / Designation: E140 – 07. — Published January 2007. — 21 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/E0140-07>.

SANDOMIRSKI Sergei G., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering<sup>1</sup>

E-mail: sand@iaph.bas-net.by

VALKO Aleksandr L.

Senior Researcher<sup>1</sup>

E-mail: valcoalex5@gmail.com

RUDENKO Sergei P., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher<sup>1</sup>

E-mail: sprud.47@mail.ru

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 18 May 2020.

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF CEMENTATION DURATION ON THE EFFECTIVE HARDENED LAYER THICKNESS AND MAGNETIC PARAMETER OF 18XГТ (18KHGT) STEEL AFTER QUENCHING

*Highly stressed transmission parts of energy-saturated machines are made of steels subjected to carburization and subsequent hardening. A low-carbon steel product forms a strong, high-carbon surface layer with a soft and viscous*

core. An important parameter of the hardened layer is its effective thickness  $h_{эфф}$ . The article studies the effect of the duration of the cementation process on  $h_{эфф}$  of samples from 18XГТ (18KhGT) steel used for the manufacture of gear wheels of highly loaded transmissions. The possibility of using a magnetic parameter for non-destructive testing  $h_{эфф}$  was also investigated. The device "Magnetic Sorter MS-1" was used, which measures the gradient of the normal component of the remanent magnetization field above the point of contact of the magnet pole with the metal surface. To determine  $h_{эфф}$  interpolation of measurements of the distribution of microhardness HV over the layer thickness on manufactured microsections was used. HV microhardness values are converted to HRC hardness values according to the dependence recommended by the international standard. Studies have shown that  $h_{эфф}$  of the cemented layer of 18XГТ (18KhGT) steel after quenching linearly depends on the cementation time. There is a correlation between the  $h_{эфф}$  of the samples studied and the readings of the MS-1 device. This is a prerequisite for the development of a non-destructive method for controlling the process of chemical heat treatment of gear wheels of transmissions of mobile machines.

**Keywords:** surface hardening, cementation, hardness, effective thickness of the hardened layer, non-destructive testing, pole magnetization

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-71-77>

## References

- Rudenko S.P., Sandomirski S.G., Valko A.L., Shishko S.A., Karpovich P.G. Analiz primeneniya kompleksno-legirovannykh staley dlya zubchatykh kolez karernykh samosvalov [Analysis of application of complex-alloyed steels for gear wheels of career dump trucks]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2018, no. 2(43), pp. 55–60 (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirski S.G. Primenenie perspektivnykh ekonomno-legirovannykh marok staley dlya zubchatykh kolez mobilnykh mashin [Application of promising sparingly alloyed steels for gears of mobile machines]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 4, pp. 61–69 (in Russ.).
- Gulyaev A.P. *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 544 p. (in Russ.).
- Lakhtin Yu.M., Leonteva V.P. *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 493 p. (in Russ.).
- Susin A.A. *Khimiko-termicheskoe uprochnenie vysokonapryazhennykh detaley* [Chemical-thermal hardening of highly stressed parts]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 1999. 175 p. (in Russ.).
- Standard of Belarus 2307-2013. *Poverkhnostno-uprochnennyye sloi metallicheskiykh detaley. Metody izmereniya tolschchiny* [Surface hardened layers of metal parts. Thickness measurement methods]. Minsk, Gosstandart Publ., 2013. 16 p. (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L. Razrabotka rezhimov khimiko-termicheskoy obrabotki zubchatykh kolez iz ekonomno legirovannoy stali [Development of the regimes of chemical heat treatment of gear wheels from sparingly alloyed steel]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2017, no. 2, pp. 34–38 (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L. *Kontaktnaya ustalost zubchatykh kolez transmissiy energonasyshchennykh mashin* [Contact fatigue of power transmission gears of energy saturated machines]. Minsk, Belaruskaya nauka Publ., 2014. 126 p. (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L. Soprotivlenie kontaktnoy ustalosti tsementovannykh zubchatykh kolez iz khromonikelevykh staley [Contact fatigue resistance of carburized gears from chromium-nickel steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2017, no 1, pp. 58–62 (in Russ.).
- Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. *Marochnik staley i splavov* [Grade guide of steels and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 640 p. (in Russ.).
- State Standard 4543–2016. *Metalloproductsiya iz konstruktsionnoy legirovannoy stali* [Structural alloyed steel products]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 53 p. (in Russ.).
- Klyuev V.V., Muzhitskiy V.F., Gorkunov E. S., Shcherbinin V.E. *Nerazrushayushchiy kontrol. T. 6. Kn. 1. Magnitnye metody kontrolya* [Nondestructive testing. Volume 6. Book 1. Magnetic testing methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 848 p. (in Russ.).
- Gorkunov E.S., Lapidus B.M., Zagaynov A.V. Elektromagnitnye metody i sredstva kontrolya kachestva poverkhnostnogo uprochneniya [Electromagnetic methods and means of quality control surface hardening]. *Defektoskopiya*, 1988, no. 7, pp. 7–13 (in Russ.).
- Gorkunov E.S. Magnitnye pribory kontrolya struktury i mekhanicheskikh svoystv stalnykh i chugunnykh izdeliy (obzor [Magnetic devices for monitoring the structure and mechanical properties of steel and cast iron products (Review)]. *Defektoskopiya*, 1992, no. 10, pp. 3–35 (in Russ.).
- Vonsovskiy S.V., Mikheev M.N. Magnitnyy strukturnyy analiz [Magnetic structural analysis]. *Industrial laboratory*, 1957, no. 10, pp. 1221–1226 (in Russ.).
- Mikheev M.N., Gorkunov E.S. Svyaz magnitnykh svoystv so strukturnym sostoyaniem veshchestva – fizicheskaya osnova magnitnogo strukturnogo analiza (obzor) [Relationship of magnetic properties with the structural state of matter – physical basis of magnetic structural analysis (review)]. *Defektoskopiya*, 1981, no. 8, pp. 5–21 (in Russ.).
- Sandomirski S.G. Primenenie polyusnogo namagnichivaniya v magnitnom strukturnom analize (obzor) [Application of pole magnetization in magnetic structural analysis (review)]. *Defektoskopiya*, 2006, no. 9, pp. 36–64 (in Russ.).
- Sandomirski S.G. *Raschet i analiz razmagnichivayushchego faktora ferromagnitnykh tel* [Calculation and analysis of the demagnetizing factor of ferromagnetic bodies]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2015. 244 p. (in Russ.).
- Zagidulin R.V., Muzhitskiy V.F. K otsenke koertsitivnoy sily materiala po velichine polya ostatochnoy namagnichennosti [On the assessment of the coercive force of a material by the value of the remanent magnetization]. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2005, vol. 71, no. 2, pp. 25–28 (in Russ.).
- Fedorishcheva E.E., Fridman L.A., Tabachnik V.P., Chernova G.S. Normalnaya sostavlyayushchaya ostatochnogo magnitnogo polya nad poverkhnostyu massivnogo tela [The normal component of the remanent magnetic field above the surface of a massive body]. *Defektoskopiya*, 1982, no. 2, pp. 23–29 (in Russ.).
- Sandomirski S.G. Analiz chuvstvitelnosti pole- i gradientometricheskikh datchikov k koertsitivnoy sile materiala izdeliya s ploskoy poverkhnostyu posle polyusnogo namagnichivaniya [Analysis of sensitivity of field- and gradiometric sensors to the coercive force of the material of a product with a flat surface after pole magnetization]. *Testing. Diagnostics*, 2008, no. 5, pp. 31–41 (in Russ.).
- Sandomirski S.G., Tsukerman V.L., Linnik I.I., Sandomirskaya E.G. Universalnyy magnitnyy sortirovshchik i ego primeneniye dlya resheniya zadach nerazrushayushchego kontrolya [Universal magnetic sorter and its application for solving non-destructive testing tasks]. *Testing. Diagnostics*, 2004, no. 8, pp. 27–31 (in Russ.).
- State Standard 9013–59 (ISO 6508–86). *Metally. Metod izmereniya tverdosti po Rokvellu* [Metals. Rockwell Hardness Test Method]. Moscow, Standartov Publ., 2001. 10 p. (in Russ.).
- State Standard R ISO 6507-1-2007. *Metally i splavy. Izmereniye tverdosti po Vickersu. Chast 1. Metod izmereniya* [Metals and alloys. Vickers hardness measurement. Part 1. Measurement method]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 16 p. (in Russ.).
- ASTM E140 – 07. *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*. 2007. 21 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/E0140-07>.