



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 669.15:620.178.1

С.П. РУДЕНКО, канд. техн. наук
ведущий научный сотрудник лаборатории металлургии в машиностроении¹
E-mail: sprud.47@mail.ru

А.Л. ВАЛЬКО
старший научный сотрудник лаборатории металлургии в машиностроении¹
E-mail: valcoalex5@gmail.com

С.Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук, доц.
заведующий лабораторией металлургии в машиностроении¹
E-mail: sand_work@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 01.07.2022.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ЦЕМЕНТОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Рассмотрены методы определения эффективной толщины упрочненного слоя металлических деталей, приведенные в стандартах СТБ 2307-2013 и СТБ ISO 18203-2019. Установлена неоднозначность трактовки понятия эффективной толщины $h_{эф}$ упрочненного слоя до полупереходной зоны для контроля зубчатых колес после химико-термической обработки: цементации и закалки. Практически $h_{эф}$ определяют по распределению твердости по Виккерсу при соответствующей нагрузке. Согласно стандарту ASTM E140-07 величине твердости полупереходной зоны 50 HRC соответствует твердость по Виккерсу 513 HV для конструкционных неаустенитных сталей, которая определяется при испытаниях с нагрузкой 294,2 Н. При испытаниях на твердость по Виккерсу при более малых нагрузках необходимо пользоваться переводными таблицами или зависимостями. Показано, что при низких нагрузках возрастает погрешность таких измерений. Для исключения погрешностей и повышения точности определения $h_{эф}$ диффузионных слоев зубчатых колес после химико-термического упрочнения сопоставлены три метода определения $h_{эф}$: металлографический, механический и химический. Установлено соответствие величин твердости по Виккерсу, определяемых при испытаниях конструкционных неаустенитных сталей с разной нагрузкой, величине твердости 50 HRC. Полученные величины можно применять для определения $h_{эф}$ диффузионных слоев поверхностно упрочненных деталей, соответствующих полупереходной зоне.

Ключевые слова: метод Виккерса, испытание на твердость, аналитическая зависимость, поверхностный слой, полупереходная зона, эффективная толщина

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-61-67>

Зубчатые колеса трансмиссий энергонасыщенных машин при эксплуатации воспринимают широкий спектр изменяющихся статических и динамических нагрузок. Погрешности изготовления зубчатых профилей, зазоры в зацеплении, изнашивание трущихся поверхностей приводят

к изменению пятна контакта между зубьями, что вызывает дополнительное увеличение нагрузок на детали передач. В результате с учетом металлургических и технологических факторов ресурс цементованных зубчатых колес, изготовленных из одной и той же марки стали и упрочненных в оди-

наковых условиях производства, может иметь существенный разброс по долговечности [1, 2].

Учитывая, что подавляющая часть разрушений зубьев зубчатых колес начинается с их поверхности, то, очевидно, проблема повышения сопротивления усталости деталей машин в значительной мере обусловлена возможностью технологического обеспечения качества поверхностного слоя деталей, которое включает в себя как механические свойства, так и его структурно-фазовое состояние. Под поверхностным слоем следует понимать наружный слой детали, имеющий измененные физические, механические и химические свойства по сравнению со свойствами основного материала (сердцевины). Этот слой формируется при изготовлении детали и может составлять до нескольких миллиметров. В целях обеспечения высоких эксплуатационных свойств изделий стремятся получить оптимальное сочетание показателей качества упрочненного слоя и сердцевины.

Наиболее существенное влияние на сопротивление усталости при изгибном и контактном нагружении оказывает толщина диффузионного слоя после химико-термического упрочнения. Единодушное мнение исследователей состоит в том, что за толщину слоя следует брать не общую (до структуры сердцевины), а эффективную толщину, характеризуемую расстоянием от упрочняемой поверхности до зоны с контрольной твердостью выше определенного значения. Единого мнения, какую контрольную точку в диффузионном слое использовать в качестве критерия, нет.

В качестве контрольной предложена твердость 50 HRC, которая соответствует полупереходной зоне при содержании углерода 0,38–0,4 % [3, 4]. По данным [5], для каждой марки стали существует своя оптимальная глубина цементации, при которой наблюдается максимальное сопротивление усталости зубьев. Для достижения наивысшего сопротивления контактной усталости рекомендуют величину эффективной толщины назначать до твердости 550 HV: $(0,18-0,2)m$ [5]. Согласно [6], твердости 550 HV по Виккерсу соответствует твердость 52,5 HRC по Роквеллу, а твердости 50 HRC соответствует твердость 513 HV. Твердость 550 HV принята в качестве контрольной для определения эффективной толщины упрочнения деталей после цементации и закалки по стандарту [7].

Широко применяемый на большинстве белорусских машиностроительных предприятий стандарт [8] еще больше усложняет ситуацию в определении эффективной толщины поверхностно упрочненных деталей химико-термической обработкой (цементации и закалки). В данном стандарте за эффективную толщину слоя, которая соответствует середине переходной зоны, принимается расстояние от поверхности до зоны с твердостью, равной твердости сердцевины плюс 50 HRC [8,

пункт 5.3.1.5]. Данное положение является абсурдным и делает данный стандарт непригодным к применению для контроля цементованных и закаленных деталей. Кроме того, регламентирование нагрузки методом Виккерса не более 1,962 Н в данном стандарте не обоснованно и противоречит [7].

Цель работы — разработка требований и методов контроля эффективной толщины цементованных слоев поверхностно упрочненных зубчатых колес автотракторных трансмиссий.

Методика исследования. Исследовали образцы зубчатых колес, изготовленных из цементуемых сталей после химико-термической обработки, на которых твердость поверхностных слоев изменяется в диапазоне 500–750 HV.

Твердость определяли по Виккерсу на разном расстоянии от поверхности образца в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-4-2009. Испытания при нагрузках 1,961 Н и 4,903 Н (200 и 500 гс) проводили на микротвердомере ПМТ-3М, оснащенном видеокамерой, подключенной к компьютеру. Диагональ восстановленного (после снятия нагрузки и удаления индентора из испытуемого образца) отпечатка d измеряли с погрешностью $1 \cdot 10^{-4}$ мм при оптическом увеличении 800. Измерение твердости по методу Роквелла выполняли на приборе ТК.

Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы МИМ-8М, НЕОРНОТ 32 при увеличениях от 100 до 400. Аппроксимацию экспериментальных данных выполняли с помощью приложения Microsoft Office Excel.

Результаты исследований и их обсуждение. Для высоконапряженных зубчатых колес зона с минимальным запасом контактной прочности расположена в глубине упрочненного слоя вблизи зоны действия максимальных глубинных касательных напряжений [9, 10–12]. Установлено [10–12], что для предотвращения глубинного разрушения нет необходимости увеличивать общую толщину упрочненного слоя, достаточно обеспечить требуемую величину твердости в зоне с минимальным запасом прочности, глубина которой должна быть больше b (полуширины площадки контакта), или она может быть определена по максимальной величине амплитуды отношения касательных напряжений к микротвердости [13].

Из вышесказанного следует, что важным показателем, определяющим технологичность ХТО и работоспособность зубчатых колес, является распределение твердости по упрочненному слою, которое регламентируется эффективной толщиной до зон с требуемой твердостью. Отметим, что в отечественной практике предприятий автотракторной промышленности, как правило, такой показатель, как распределение твердости по толщине упрочненного слоя, регламентируемое ГОСТ 30634-99,

в технической нормативной документации на зубчатые колеса ответственного назначения не проводится.

Испытание на твердость поверхностно упрочненных зубчатых колес выполняют методом Виккерса. Согласно [14], в зависимости от величины нагрузки различают три диапазона по шкале Виккерса. При нагрузке 49,03 Н и более используют термин «твердость по шкале Виккерса» и обозначают HV5 и более или просто HV. При нагрузках от 1,961 до 49,03 Н используют термин «твердость с малой нагрузкой» и диапазон шкал твердости обозначают $HV_{0,2} \leq HV \leq HV_5$. Термин «микротвердость» применяют в диапазоне нагрузок от 0,09807 до 1,961 Н.

Для уменьшения погрешностей измерений величина нагрузки на индентор должна быть максимально возможной с учетом размеров образца и свойств испытуемого материала. Уменьшение нагрузки при испытании на твердость приводит к увеличению неопределенности результата измерений. Это особенно сильно проявляется при измерениях твердости с малой нагрузкой и микротвердости, при которых возрастает роль повышения точности измерения длины диагоналей отпечатка [15]. Кроме того, при широком диапазоне нагрузок значения измеренной твердости отличаются. В связи с этим возникает необходимость в переводе числа твердости из одной системы испытаний в другую с использованием экспериментально установленных корреляционных зависимостей.

Таблицы пересчета твердости в единицах HRC в твердость по Виккерсу HV30 для закаленных и отпущенных конструкционных сталей приведены в [6]. Зависимость между твердостью в единицах HRC и твердостью по Виккерсу согласно [6] представлена в виде выражения:

$$HRC = 31,49 + 0,0796683 HV - 0,0000355432 HV^2 - 6728,16 / HV, \quad (1)$$

где HV — твердость по Виккерсу при нагрузке 294,2 Н.

Отметим, что при нагрузках от 9,807 до 294,2 Н величина твердости по Виккерсу практически не изменяется. Поэтому при использовании для определения эффективной толщины до полупереходной зоны в качестве контрольной твердости величины 50 HRC соответствующая ей твердость по Виккерсу по [6] равна 513 HV.

При использовании твердости 550 HV по стандарту [7] соответствующая ей твердость по Роквеллу равна 52,5 HRC.

Если в качестве контрольной твердости применяют нагрузку по Виккерсу 1,962 Н [8], то согласно исследованиям [15] в условиях неоднородного строения диффузионного слоя (полосчатость, структурные составляющие различной микротвердости) будет наблюдаться значительно

большой разброс результатов измерения, чем при испытаниях с более высокой нагрузкой, например при 4,903 Н.

Для исключения погрешностей и повышения точности определения эффективной толщины диффузионных слоев зубчатых колес после химико-термического упрочнения (цементация, закалка, низкий отпуск) предлагается методика контроля, которая обеспечивает получение результатов измерений тремя методами: металлографическим, механическим и химическим.

Контроль эффективной толщины диффузионного слоя металлографическим методом. Метод заключается в определении эффективной толщины диффузионного слоя по структуре под микроскопом при увеличении 100 на образцах-свидетелях, прошедших цементацию с последующим медленным охлаждением на воздухе (или отжига). Контролируемыми параметрами эффективной толщины диффузионного слоя является структура, состоящая из 50 % феррита и 50 % перлита (для легированной конструкционной стали — полупереходная зона с содержанием углерода 0,35 %). Образцы-свидетели диаметром от 15 до 30 мм (или стороной квадрата от 15 до 30 мм) и толщиной от 15 до 20 мм изготавливают из стали 18ХГТ.

Структура полупереходной зоны цементованного образца из стали 18ХГТ после быстрого охлаждения на воздухе (нормализация) состоит из 60 % перлита (темная составляющая) и 40 % феррита (светлая составляющая) (рисунок 1).

Из образца-свидетеля готовят микрошлиф с применением шлифовальных бумаг по убывающей зернистости (№ 32, 16, 8 ГОСТ 6456-82) и механической полировки на алмазных пастах по ГОСТ 25593-83 с последовательным понижением зернистости с 60/40 до 1/0, который подвергают травлению в 4-процентном спиртовом или водном растворе азотной кислоты в течение 20–60 с.

Эффективная толщина диффузионного слоя $h_{эф}$, определяемая на образцах-свидетелях, должна соответствовать техническим требованиям конструкторской документации без учета величины поправки на последующее удаление части слоя при шлифовании зубьев (таблица 1).

Контроль эффективной толщины диффузионного слоя механическим методом. Механиче-

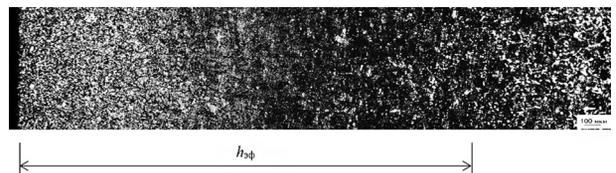


Рисунок 1 — Микроструктура диффузионного слоя образца из стали 18ХГТ после цементации, охлаждения до температуры цеха и травления в 4-процентном спиртовом растворе азотной кислоты

Figure 1 — Microstructure of the diffusion layer of the 18KhGT (18KhGT) steel sample after cementation, cooling to the workshop temperature and etching in a 4 % alcohol solution of nitric acid

Таблица 1 — Эффективная толщина цементованного слоя, определяемая на образцах-свидетелях из стали 18ХГТ без учета припуска на шлифование
 Table 1 — Effective thickness of the carburized layer determined on the control samples made of 18KhGT steel without allowance for grinding

Модуль зубчатого колеса, мм	Эффективная толщина цементованного слоя $h_{эф}$, мм
6–7	1,4–1,8
8	1,6–2,0
9–10	1,8–2,2
12	2,0–2,4

ский метод заключается в определении твердости по поперечному сечению от поверхности к центру образцов-свидетелей, прошедших полный цикл химико-термической обработки. Измерения твердости выполняют на поперечных шлифах с малой нагрузкой 1,962 Н по [14] перпендикулярно к эвольвенте зуба или поверхности шлифа с шагом 0,1 или 0,2 мм. На шлифе проводят серию испытаний не менее чем в двух местах, удаленных друг от друга.

За эффективную толщину диффузионного слоя в измеряемом месте принимают расстояние от края шлифа до зон, в которых получены значения твердости 750 HV0,2; 700 HV0,2 и 542 HV0,2. Полученные значения сопоставляют с указанными в таблице 2 с учетом величины припуска под шлифование зубьев.

При измерении твердости с использованием нагрузки 4,903 Н контрольное значение твердости зон диффузионного слоя (HV0,5) корректируют в соответствии с рисунком 2 или таблицей 3 [15].

Минимальные требования к эффективной толщине диффузионных слоев до зон с твердостью 750 HV0,2 и 700 HV0,2 разработаны на основании результатов прогнозирования ресурса зубчатых колес трансмиссий автомобилей большой грузоподъемности, выполненного в соответствии с методикой [12] с учетом результатов стендовых испытаний при максимальной величине расчетных контактных напряжений в зацеплении в пределах 1330–1430 МПа.

Таблица 2 — Значения эффективной толщины диффузионного слоя зубчатых колес со шлифованными зубьями
 Table 2 — Values of the effective thickness of the diffusion layer of gears with ground teeth

Модуль зубчатых колес, мм	Эффективная толщина диффузионного слоя до участка с твердостью HV0,2, мм		
	750	700	542
6–7	0,5–0,8	0,8–1,1	1,4–1,8
8	0,8–1,1	1,1–1,4	1,6–2,0
9–10	0,9–1,2	1,2–1,5	1,8–2,2
12	1,1–1,4	1,4–1,7	2,0–2,4

Примечание: припуск на шлифование зубьев устанавливается в технологической документации в зависимости от типоразмера зубчатых колес.

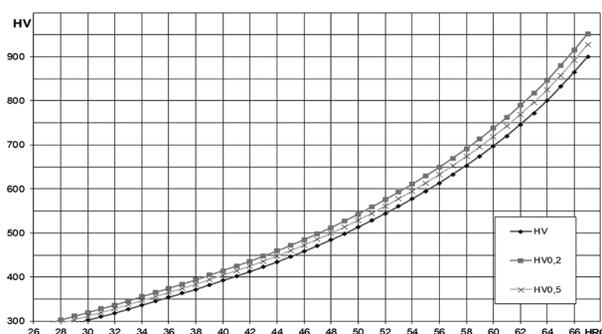


Рисунок 2 — Соотношение твердостей, выраженных в единицах HRC, HV, HV0,5, HV0,2
 Figure 2 — Ratio of hardness expressed in units of HRC, HV, HV0.5, HV0.2

Требования к максимальным величинам эффективной толщины диффузионных слоев разработаны с учетом одинакового допуска в пределах одного модуля. Зубчатые колеса с одинаковым модулем проходят цементацию по конкретной программе ХТО, что обеспечивает после закалки характерный градиент твердости в диффузионном слое. В связи с этим максимальные и минималь-

Таблица 3 — Соответствие твердостей по Виккерсу HV, HV0,5, HV0,2 и твердости в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей
 Table 3 — Correspondence of Vickers hardness values to the HV, HV0.5, HV0.2 and hardness in HRC units for hardened and tempered structural steels

HRC	HV	HV0,5	HV0,2	HRC	HV	HV0,5	HV0,2
20	238	245	252	44	434	447	459
21	243	251	257	45	446	460	472
22	248	256	262	46	458	472	484
23	254	262	269	47	471	486	498
24	260	268	275	48	484	499	512
25	265	273	280	49	498	513	527
26	272	280	288	50	513	529	542
27	279	288	295	51	528	544	558
28	286	295	302	52	544	561	575
29	294	303	311	53	560	577	592
30	302	311	319	54	577	595	610
31	310	320	328	55	595	613	629
32	318	328	336	56	613	632	648
33	327	337	346	57	633	653	669
34	336	346	355	58	653	673	690
35	345	356	365	59	674	695	713
36	354	365	374	60	697	719	737
37	363	374	384	61	720	742	761
38	372	384	393	62	746	769	789
39	382	394	404	63	772	796	816
40	392	404	414	64	800	825	846
41	402	414	425	65	832	858	880
42	412	425	436	66	865	892	915
43	423	436	447	67	900	928	952

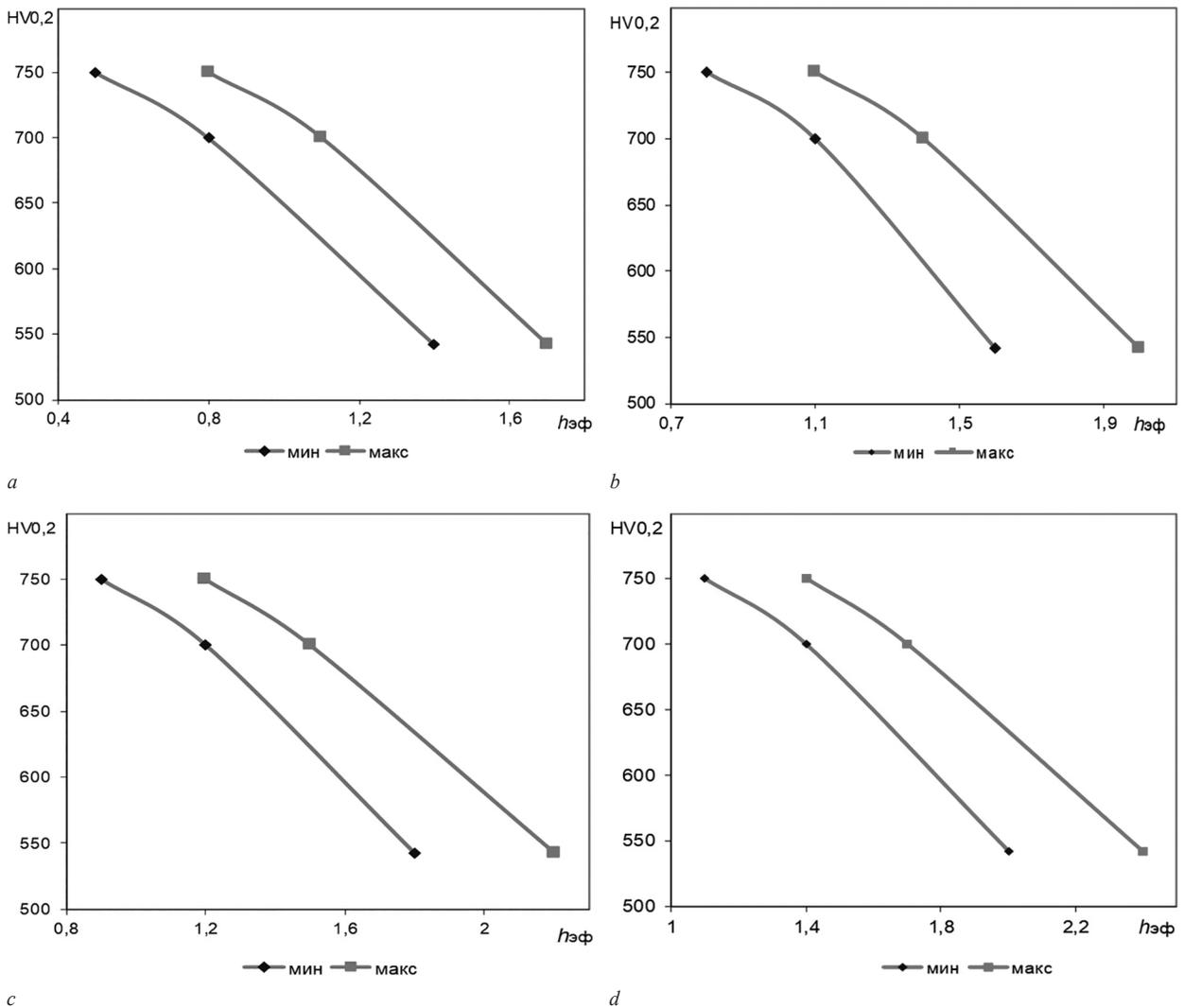


Рисунок 3 — Значения эффективной толщины диффузионного слоя зубчатых колес с модулем: *a* — 6–7 мм; *b* — 8 мм; *c* — 9–10 мм; *d* — 12 мм

Figure 3 — Values of the effective thickness of the diffusion layer of gears with a module: *a* — 6–7 mm; *b* — 8 mm; *c* — 9–10 mm; *d* — 12 mm

ные пределы эффективной толщины диффузионных слоев должны соответствовать этому градиенту. На рисунке 3 в графическом виде приведены требования к эффективной толщине диффузионных слоев зубчатых колес с модулем от 6 до 12 мм после химико-термического упрочнения, полученные на основании таблицы 2.

Контроль эффективной толщины диффузионного слоя химическим методом. Метод заключается в определении толщины диффузионного слоя по содержанию углерода. Для цементованных деталей определяют эффективную толщину диффузионного слоя до полупереходной зоны, которой соответствует содержание углерода 0,35 % применительно к конструкционным легированным сталям. Содержание углерода по толщине упрочненного слоя определяют путем полного снятия стружки с цилиндрического образца и последующего установления их среднего содержания в стружке каждого слоя кулонометрическим методом или методом инфракрасной спектроскопии по ГОСТ 12344-2003. Допускается определять

содержание углерода на шлифах образцов-свидетелей спектральным или иным методом, обеспечивающим необходимую точность установления содержания углерода.

Оценка точности определения эффективной толщины диффузионного слоя. Точность определения эффективной толщины диффузионного слоя оценивают путем сравнения результатов испытаний разными методами. Результаты контроля толщины диффузионного слоя до полупереходной зоны металлографическим методом, выполненным на образцах-свидетелях после цементации и охлаждения до температуры цеха, должны совпадать с результатами определения толщины диффузионного слоя химическим методом по содержанию углерода 0,35 %, а также с результатами испытаний методом Виккерса образцов-свидетелей после полного цикла ХТО при контрольных значениях твердости зон диффузионного слоя 513 HV, или 530 HV_{0,5} или 542 HV_{0,2}, что соответствует 50 HRC.

Заключение. Качество химико-термической обработки контролируется в основном по наибо-

лее объективному показателю упрочнения — по распределению твердости по толщине цементованного слоя. В конструкторской документации указывают требования к эффективной толщине $h_{\text{эф}}$ диффузионного слоя зубчатых колес, которая характеризуется расстоянием от поверхности до зон с определенной твердостью. Для полупереходной зоны эта твердость равна 50 HRC. Практически $h_{\text{эф}}$ определяют по распределению твердости по Виккерсу при соответствующей нагрузке. Согласно [6], величине твердости 50 HRC соответствует твердость по Виккерсу 513 HV для конструкционных неаустенитных сталей, которая определяется при испытаниях с нагрузкой 294,2 Н. При испытаниях на твердость по Виккерсу при малых нагрузках необходимо пользоваться переводными таблицами или зависимостями. При этом следует иметь в виду, что при низких нагрузках возрастает погрешность измерений. Установлено, что величине твердости 50 HRC соответствуют твердости по Виккерсу 513 HV, или 529 HV_{0,5}, или 542 HV_{0,2} для конструкционных неаустенитных сталей, которые определяются при испытаниях с нагрузкой 294,2, 4,903 и 1,961 Н соответственно. Полученные величины можно применять для контроля эффективной толщины диффузионных слоев поверхностно упрочненных деталей, которая соответствует полупереходной зоне.

Список литературы

1. Зинченко, В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В.М. Зинченко. — М.: МГТУ им. Баумана, 2001. — 301 с.
2. Сусин, А.А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А.А. Сусин. — Минск: Беларус. навука, 1999. — 174 с.
3. Козловский, И.С. Химико-термическая обработка шестерен / И.С. Козловский. — М.: Машиностроение, 1970. — 232 с.
4. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справ. / В.И. Алексеев [и др.]; под ред. Э.Б. Вулгакова. — М.: Машиностроение, 1981. — 374 с.
5. Технология термической обработки стали. / Р. Бернет [и др.]; пер. с нем. Б.Е. Левина; под ред. Бернштейна. — М.: Металлургия, 1981. — 608 с.
6. Standard hardness conversion tables for metals relationship among brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, superficial hardness, Knoop hardness, and scleroscope hardness: ASTM E140-07. — 2007. — 21 p.
7. Сталь. Измерение толщины поверхностно-упрочненного слоя: СТБ ISO 18203-2019. — Введ. 01.11.2019. — Минск: Госстандарт, 2019. — 16 с.
8. Поверхностно-упрочненные слои металлических деталей. Методы измерения толщины: СТБ 2307-2013. — Введ. 01.11.2013. — Минск: Госстандарт, 2013. — 16 с.
9. Тескер, Е.И. Современные методы расчета и повышения несущей способности поверхностно-упрочненных зубчатых передач трансмиссий и приводов / Е.И. Тескер. — М.: Машиностроение, 2011. — 433 с.
10. Руденко, С.П. Детерминированная аналитическая модель сопротивления глубинной контактной усталости напряженного материала / С.П. Руденко, С.Г. Сandomirский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 3(56). — С. 52–60. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-52-60>.
11. Руденко, С.П. Исследование сопротивления контактной усталости поверхностно упрочненных зубчатых колес / С.П. Руденко // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2009. — № 4. — С. 48–53.
12. Руденко, С.П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 126 с.
13. Фудзита, К. Влияние глубины цементованного слоя и относительного радиуса кривизны на долговечность при контактной усталости цементованного ролика из хромо-молибденовой стали / К. Фудзита, А. Йохида // Труды американского общества инженеров-механиков. — 1981. — Т. 103, № 2. — С. 115–124.
14. Материалы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения: ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. — Введ. 01.08.2008. — М.: Стандартинформ, 2008. — 15 с.
15. Руденко, С.П. Повышение точности измерения твердости поверхностно упрочненных стальных изделий / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сandomirский // Сталь. — 2022. — № 6. — С. 38–42.

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

Leading Researcher of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering¹

E-mail: sprud.47@mail.ru

VALKO Aleksandr L.

Senior Researcher of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering¹

E-mail: valcoalex5@gmail.com

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

Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering¹

E-mail: sand_work@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 01 July 2022.

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE THICKNESS OF HARDENED LAYER OF CARBURIZED GEARS

The methods are considered for determining the effective thickness of the hardened layer of metal parts listed in the standards STB 2307-2013 and STB ISO 18203-2019. The ambiguity of interpretation of the concept of effective thickness $h_{\text{эф}}$ of the hardened layer up to the half-transition zone is established for control

of gears after the chemical heat treatment: carburizing and hardening. In practice, $h_{\text{эф}}$ is determined by the Vickers hardness distribution under the relevant load. In accordance with the standard ASTM E140-07, the Vickers hardness value of 50 HRC represents the Vickers hardness of 513 HV for non-austenitic structural steels when tested at 294.2 N. When testing Vickers hardness at lower loads, conversion tables or dependencies must be used. It has been shown that such measurements are more inaccurate at lower loads. To eliminate errors and increase accuracy of determining $h_{\text{эф}}$ of diffusion thickness of gear wheels after chemical-hardening, techniques are compared to determine $h_{\text{эф}}$ three: metallographic, mechanical and chemical. The Vickers hardness values determined during tests of structural non-austenitic steels with different loads correspond to the hardness value of 50 HRC. The values obtained can be applied to determine $h_{\text{эф}}$ of diffusion layers of surface-hardened parts corresponding to the half-transition zone.

Keywords: Vickers method, hardness test, analytical dependence, surface layer, half-transition zone, effective thickness.

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-61-67>

References

- Zinchenko V.M. *Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoy obrabotki* [Surface engineering of gears by methods of chemical-thermal treatment]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. Baumana Publ., 2001. 303 p. (in Russ).
- Susin A.A. *Khimiko-termicheskoe uprochnenie vysokonapryazhennykh detaley* [Chemical heat reinforcement of heavily stressed components]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 1999. 175 p. (in Russ).
- Kozlovskiy I.S. *Khimiko-termicheskaya obrabotka shesterev* [Chemical-thermal treatment of gears]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 232 p. (in Russ).
- Alekseev V.I., Ananov V.M., Bulygina M.M. *Aviatsionnye zubchatye peredachi i reduktory* [Aircraft gears and gearboxes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 374 p. (in Russ).
- Bernst R., et al. *Technologie der Waermebehandlung von Stahl*. Leipzig, VEB Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie, 1976.
- 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.
- Standard of Belarus STB ISO 18203–2019. *Stal. Izmerenie tolshchiny poverkhnostno-uprochnennogo sloya* [Steel. Measuring the thickness of the surface-hardened layer]. Minsk, Gosstandart Publ., 2019. 16 p. (in Russ).
- Standard of Belarus STB 2307–2013. *Poverkhnostno-uprochnennyye sloi metallicheskikh detaley. Metody izmereniya tolshchiny* [Surface-strengthened layers of metal parts. Thickness measuring methods]. Minsk, Gosstandart Publ., 2013. 16 p. (in Russ).
- Tesker E.I. *Sovremennyye metody rascheta i povysheniya nesushchey sposobnosti poverkhnostno uprochnennykh zubchatykh peredach transmissiy i privodov* [Modern methods of calculating and increasing the load-bearing capacity of surface-hardened gears of transmissions and drives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 434 p. (in Russ).
- Rudenko S.P., Sandomirski S.G. Determinirovannaya analiticheskaya model soprotivleniya glubinnoy kontaktnoy ustalosti napryazhennogo materiala [Deterministic analytical model of resistance to deep contact fatigue of a stressed material]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 3, pp. 52–60 (in Russ).
- Rudenko S.P. Issledovanie soprotivleniya kontaktnoy ustalosti poverkhnostno uprochnennykh zubchatykh koles [Study of contact fatigue resistance of surface-hardened toothed wheels]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2009, no. 4, pp. 48–53 (in Russ).
- Rudenko S.P., Valko A.L. *Kontaktnaya ustalost zubchatykh koles transmissiy energonasyshchennykh mashin* [Contact fatigue of power transmission gears of energy saturated machines]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2014. 126 p. (in Russ).
- Fudzita K., Yokhida A. Vliyanie glubiny tsementovannogo sloya i otnositelnogo radiusa krivizny na dolgovechnost pri kontaktnoy ustalosti tsementovannogo rolka iz khromomolibdenovoy stali [Influence of carburized layer depth and relative radius of curvature on the contact fatigue life of a cemented chromium-molybdenum steel roller]. *Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov*, 1981, vol. 103, no. 2, pp. 115–124 (in Russ.).
- State Standard R ISO 6507-1-2007. *Materialy i splavy. Izmerenie tverdosti po Vikkersu. Chast 1. Metod izmereniya* [Materials and alloys. Measurement of Vickers hardness. Part 1. Measurement method]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 15 p. (in Russ).
- Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirski S.G. Povyshenie tochnosti izmereniya tverdosti poverkhnostno uprochnennykh stalnykh izdeliy [Improving the accuracy of hardness measurement of surface-hardened steel products]. *Stal*, 2022, no. 6, pp. 38–42 (in Russ.).