



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-64-69>  
УДК 669.15:620.178.1

Поступила 27.06.2022  
Received 27.06.2022

## ПЕРЕВОД ЧИСЕЛ ТВЕРДОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПОВЕРХНОСТНО-УПРОЧНЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

*А. Л. ВАЛЬКО, С. П. РУДЕНКО, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sprud.47@mail.ru*

*Выполнен анализ формул пересчета твердости в единицах HRC в твердость по Виккерсу HV 30 для закаленных и отпущенных конструкционных сталей, приведенных в стандартах ASTM E 140-07 и ISO 18265:2013. По результатам измерения на эталонной мере твердости 62,3 HRC методом Виккерса при нагрузке на индентор 4,903 Н был выполнен пересчет на твердость при нагрузке 294,2 Н и на твердость в единицах HRC с применением формулы ASTM E 140-07. Получено полное совпадение среднего значения твердости HRC с эталонной мерой. Приведены корректирующий коэффициент пересчета на твердость при нагрузке 294,2 Н и аппроксимирующая зависимость между твердостью HV0,2 и твердостью, измеренной в процессе испытаний с нагрузкой 4,903 Н. Приведены зависимости между твердостью по Виккерсу HV, HV0,5, HV0,2 и твердостью в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей.*

**Ключевые слова.** Метод Виккерса, испытание на твердость, аналитическая зависимость, поверхностный слой, полупереходная зона, эффективная толщина.

**Для цитирования.** Валько, А. Л. Перевод чисел твердости при испытаниях поверхностно-упрочненных стальных изделий / А. Л. Валько, С. П. Руденко, С. Г. Сандомирский // *Литье и металлургия*. 2022. № 3. С. 64–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-64-69>.

## TRANSLATION OF HARDNESS VALUES IN TESTING OF SURFACE-HARDENED STEEL PRODUCTS

*A. L. VALKO, S. P. RUDENKO, S. G. SANDOMIRSKI, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: sprud.47@mail.ru*

*Recalculation formulae of hardness transformation in units of HRC into Vickers hardness HV 30 for hardened and tempered structural steels in ASTM E 140-07 and ISO 18265:2013 were analyzed. From a Vickers hardness reading of 62.3 HRC using a 4.903 N indenter, the hardness is converted to 294.2 N and the hardness is converted to HRC using the ASTM E 140-07 formula. Full agreement of average hardness value HRC with reference measure is obtained. Correction factor of conversion to hardness at 294,2N and approximating relationship between hardness value HV0,2 and hardness value measured at 4,903N load during testing is given. The relationship between Vickers hardness HV, HV0.5, HV0.2 and hardness in units of HRC for hardened and tempered structural steels is given.*

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

**For citation.** Valko A. L., Rudenko S. P., Sandomirski S. G. Translation of hardness values in testing of surface-hardened steel products. *Foundry production and metallurgy*. 2022, no. 3, pp. 64–69. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-64-69>.

Испытания на твердость – самый доступный и распространенный вид механических испытаний материалов. Цель испытаний на твердость поверхностно-упрочненных изделий – определение градиента твердости по толщине упрочненного слоя и эффективной толщины  $h_{эфф}$  слоя, которая определяет ресурс ответственных высоконагруженных деталей. Измерения микротвердости используют при изучении свойств отдельных зерен, а также структурных составляющих упрочненных слоев, что имеет большое значение при изучении свойств и превращений в сплавах при их термической обработке в производстве, структурных изменениях в эксплуатации и др.

Согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, при испытании на твердость по шкале Виккерса применяют обозначение, например, HV 5 при нагрузке 49,03 Н, при нагрузках от 1,961 до 49,03 Н – 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.

При определении твердости или микротвердости могут возникать погрешности, связанные с наклепом поверхностного слоя шлифа, а также с состоянием алмазной пирамиды, неточностью в величине

приложенной нагрузки, нестрогой перпендикулярностью плоскости шлифа к оси индентора, дефектами освещения, ошибками измерения диагонали отпечатка. Дефекты алмазной пирамиды (скол вершины, не гладкость граней, выкрашивание ребер и т. д.) приводят к получению неправильных результатов испытания [1].

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 [1]. Согласно рекомендациям ГОСТ 9450-76, для получения наиболее точного результата измерения микротвердости нагрузка должна быть возможно большей. Поэтому для уменьшения погрешностей измерений, в частности методом Виккерса, величина нагрузки на индентор должна быть максимально возможной с учетом размеров образца и свойств испытуемого материала. Но в ряде случаев при исследованиях поверхностно-упрочненных изделий возникает необходимость в получении результатов измерений твердости при более низких нагрузках на индентор [2–5]. Например, в методике расчета и прогнозирования ресурса поверхностно-упрочненных зубчатых колес с учетом качества химико-термического упрочнения применяют пределы контактной выносливости в зависимости от твердости материала, определяемой методом Виккерса по толщине диффузионных слоев при нагрузке на индентор 1,961 Н [4, 5]. В связи с этим возникает необходимость в переводе числа твердости из одной системы испытаний в другую.

В настоящее время существует множество переводных таблиц и графиков, пригодных для ограниченных групп материалов, однако зачастую не согласующихся друг с другом [6]. В ряде исследований [7, 8] были сделаны попытки установить взаимозависимости между нагрузкой и твердостью (микротвердостью) при испытаниях однородных материалов. Исследования показывают, что каждому методу испытания на твердость свойственна некоторая погрешность, но между результатами измерения твердости разными методами можно найти корреляцию.

В [6] показано, что даже наиболее надежные измерения не могут обеспечить однозначности переводных соотношений твердости для всех материалов. Согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, не существует точного метода перевода из результатов измерения твердости одной шкалы в другую. Необходима надежная база перевода, полученная сравнительными измерениями.

**Цель работы** – установление зависимостей для пересчета твердости упрочненных изделий с неоднородной структурой поверхностных слоев при испытаниях с разной нагрузкой.

**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.

Известно, что поверхностный наклеп оказывает существенное влияние на точность определения микротвердости [9], так как глубина проникновения индентора кратна толщине поверхностного наклепанного слоя. При подготовке образцов применяли тонкое механическое шлифование и полирование с использованием алмазных абразивов разной дисперсности с целью минимизации наклепа поверхности.

Твердость определяли по Виккерсу на разном расстоянии от поверхности образца в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-4-2009. Испытания при нагрузках 1,961 и 4,903 Н (200 и 500 гс) проводили на микротвердомере ПМТ-3М, оснащенный 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.

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

Приблизительные цифры пересчета твердости в единицах HRC в твердость по Виккерсу HV 30 для закаленных и отпущенных конструкционных сталей приведены в стандарте ASTM E 140-07. Аналогичные таблицы пересчета твердости содержатся в международном стандарте ISO 18265:2013, которые были получены в ходе межлабораторных испытаний Немецкого института чугуна и стали (Verein Deutscher Eisenhüttenleute, VDEh) с использованием проверенных и откалиброванных машин для испытания твердости. При сопоставлении известных данных получили аппроксимирующую зависимость между твердостями в единицах HV 30 и HRC (рис. 1) с достоверностью  $R^2 = 1,0$ :

$$HV\ 30 = 0,003\ HRC^3 - 0,1504\ HRC^2 + 8,0107\ HRC + 110,04. \quad (1)$$

Зависимость между твердостью в единицах HRC и твердостью по Виккерсу можно также представить в виде выражения согласно стандарту ASTM E 140-07:

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

где HV – твердость по Виккерсу при нагрузке 294,2 Н (30 кгс).

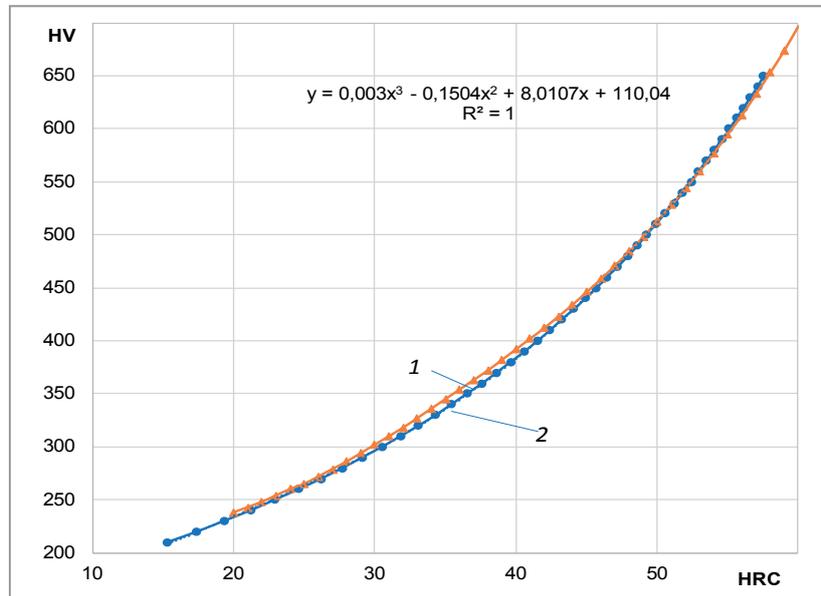


Рис. 1. Зависимость между твердостью по Виккерсу HV 30 и твердостью в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей: 1 – по стандарту ASTM E 140-07; 2 – по стандарту ISO 18265–2013

Зависимость по уравнению (2) имеет большое значение при проведении испытаний на твердость поверхностно-упрочненных изделий из конструкционных цементуемых сталей с использованием микротвердомеров, которые используют, как правило, нагрузку 4,903 Н или 1,961 Н. Важную роль при таких испытаниях имеет проблема точности замеров и перевод величин твердости, определенных с разной нагрузкой.

В [1] приведены результаты сравнительных испытаний на твердость методом Виккерса при нагрузке на индентор 1,961 и 4,903 Н образца зубчатого колеса из стали 14ХНЗМА, прошедшего полный цикл химико-термической обработки. Установлено, что результаты испытаний на твердость при нагрузке 1,961 Н имеют больший разброс величин твердости, чем при нагрузке 4,903 Н. Показано, что увеличение разброса результатов измерений при испытаниях с меньшей нагрузкой обусловлено структурной неоднородностью (полосчатостью) образца. Получена аппроксимирующая зависимость между твердостью HV<sub>0,2</sub> и твердостью, измеренной в процессе испытаний с нагрузкой 4,903 Н, способствующая повышению точности измерений твердости поверхностно-упрочненных стальных изделий. Полученные результаты представляют интерес при расчете и прогнозировании ресурса поверхностно-упрочненных зубчатых колес с учетом качества химико-термического упрочнения. В разработанной методике [7, 8] пределы глубинной контактной выносливости определяют в зависимости от твердости материала диффузионных слоев при нагрузке на индентор 1,961 Н [8, 9]. Поэтому при испытании на твердость, например, с нагрузкой 4,903 Н можно использовать зависимость для пересчета на твердость с нагрузкой 1,961 Н:

$$H_{HV0,2} = 1,0256\ H_{HV0,5} - 2E-12. \quad (3)$$

Качество химико-термической обработки контролируется в основном по наиболее объективному показателю упрочнения – распределению твердости по толщине цементуемого слоя. В конструкторской документации указывают требования к эффективной толщине  $h_{эфф}$  диффузионного слоя зубчатых колес, которая характеризуется расстоянием от поверхности до зон с определенной твердостью. Для полупереходной зоны эта твердость равна 50 HRC [11]. Практически эффективную толщину  $h_{эфф}$  определяют по распределению твердости по Виккерсу при соответствующей нагрузке. Согласно стандарту ASTM E 140-07, 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 более малых нагрузках необходимо пользоваться переводными таблицами или зависимостями. При этом следует помнить, что при низких нагрузках возрастает погрешность измерений [1].

По результатам измерения на эталонной мере твердости 62,3 HRC методом Виккерса при нагрузке на индентор 4,903 Н был выполнен пересчет на твердость при нагрузке 294,2 Н с применением корректирующего коэффициента 0,97, полученного с учетом накопленного опыта авторов. Затем с применением формулы (2), подставляя в нее полученные значения HV, получаем значения твердости по Роквеллу (табл. 1). Среднее значение твердости из 16 замеров составляет 62,3 HRC, что совпадает с эталонной твердостью меры. Полученный результат указывает на полное соответствие формулы (2) экспериментальным данным и на справедливость коэффициента 0,97 при переводе твердости HV 0,5 в HV. В табл. 1 приведены также значения твердости HV 0,2, полученные пересчетом по формуле (3).

Таблица 1. Соответствие экспериментального и расчетного определения твердости на эталонной мере 62,3 HRC различными методами испытаний

Твердость	Номер измерения																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Среднее
HV 0,5	760	764	768	764	768	756	772	772	781	790	790	777	781	777	772	777	773
HV	737	741	745	741	745	733	749	749	758	766	766	753	758	753	749	753	750
HRC	61,8	61,9	62,1	61,9	62,1	61,6	62,2	62,2	62,6	62,9	62,9	62,4	62,6	62,4	62,2	62,4	62,3
HV 0,2	783	788	792	788	792	779	796	796	805	814	814	801	805	801	796	801	797

На основе результатов исследований получены зависимости для перевода чисел твердости упрочненных изделий из цементуемых марок сталей с неоднородной структурой поверхностных слоев при испытаниях с разной нагрузкой (табл. 2). По данным таблицы, построены зависимости между твердостями HV, HV 0,5 и HV 0,2 и твердостью единицах HRC (рис. 2).

Из полученных результатов видно, что величине твердости 50 HRC соответствует твердость 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.

Таблица 2. Соответствие твердостей по Виккерсу HV, HV 0,5, HV 0,2 и твердости в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей

HRC	HV	HV 0,5	HV 0,2	HRC	HV	HV 0,5	HV 0,2
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

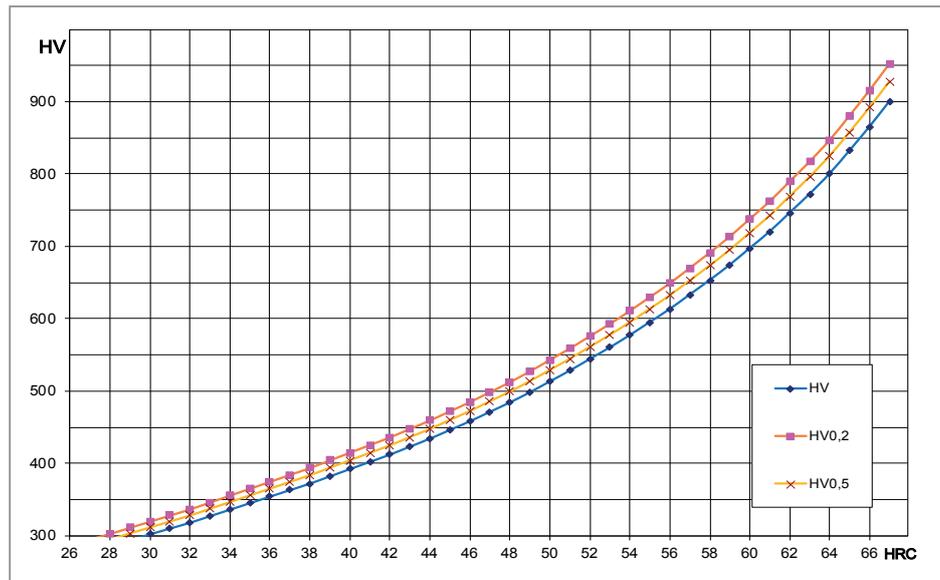


Рис. 2. Зависимость между твердостью по Виккерсу HV, HV 0,5, HV 0,2 и твердостью в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей

### Выводы

На основании анализа формул пересчета твердости в единицах HRC в твердость по Виккерсу HV 30 для закаленных и отпущенных конструкционных сталей, приведенных в стандартах ASTM E 140-07 и ISO 18265:2013, получена аппроксимирующая зависимость между твердостями в единицах HV 30 и HRC с достоверностью  $R^2 = 1,0$ . По результатам испытаний на эталонной мере твердости 62,3 HRC методом Виккерса при нагрузке на индентор 4,903 Н выполнен пересчет на твердость при нагрузке 294,2 Н (30 кгс) и на твердость в единицах HRC с применением формулы ASTM E 140-07. Получено полное совпадение среднего значения твердости HRC с эталонной мерой. Установлены корректирующий коэффициент пересчета на твердость при нагрузке 294,2 Н (30 кгс) и аппроксимирующая зависимость между твердостью HV0,2 и твердостью, измеренной в процессе испытаний с нагрузкой 4,903 Н. Установлены соответствия между твердостью по Виккерсу HV, HV0,5, HV0,2 и твердостью в единицах HRC для закаленных и отпущенных конструкционных сталей. Результаты исследований могут быть полезны при контроле эффективной толщины диффузионных слоев поверхностно-упрочненных деталей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко, С. П. Повышение точности измерения твердости поверхностно-упрочненных стальных изделий / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. Г. Сандомирский // *Сталь*. 2022. № 6. С. 38–42.
2. Измерение твердости тонких пленок / Ю. А. Быков [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003. № 10. С. 32–35.
3. Головин, Ю. И. Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикроразмерах / Ю. И. Головин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009. Т. 75. № 1. С. 45–58.
4. Руденко, С. П. Расчет ресурса зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин с учетом качества химико-термического упрочнения / С. П. Руденко // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2010. № 4. С. 58–60.
5. Руденко, С. П. Особенности расчета зубчатых колес трансмиссий на глубинную контактную выносливость / С. П. Руденко, А. Л. Валько // *Вест. машиностроения*. 2015. № 11. С. 5–7.
6. Кальнер, В. Д. Переводные таблицы твердости / В. Д. Кальнер, Ф. И. Шор // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1977. № 9. С. 59–61.
7. Григорович, В. К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
8. Interpretations of Indentation Size Effects / W. W. Gerberich, N. I. Tymiak, J. C. Grunlan et al. // *Journal of Applied Mechanics*. 2002. Vol. 69. P. 433–442.
9. Глазов, В. М., Вигдорович В. Н. Микротвердость металлов. М.: Metallurgizdat, 1961. 224 с.
10. Пат. 15273 Респ. Беларусь. МПК С 23 F 1/28 / А. Л. Валько, С. П. Руденко, Е. И. Мосунов, А. И. Михлюк; опубл. 30.12.2011.
11. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: справ. / А. Л. Белинский [и др.]; под общ. ред. В. Д. Кальнера. М.: Машиностроение, 1984. 384 с.

### REFERENCES

1. Rudenko S.P., Val'ko A.L., Sandomirskij S.G. Povyshenie tochnosti izmereniya tverdosti poverhnostno uprochnennyh stal'nyh izdelij [Improving the hardness measurement accuracy of surface hardened steel products]. *Stal' = Steel*, 2022, no. 6, pp. 38–42.

2. **Bykov Yu.A., Karpuhin S.D., Panfilov Yu.V., Bojchenko M.K., Chepov V.O., Osipov A.V.** Izmerenie tverdosti tonkih plenok [Measuring the hardness of thin films]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metallurgy and heat treatment of metals*, 2003, no. 10, pp. 32–35.
3. **Golovin Yu.I.** Nanoindentirovanie kak sredstvo kompleksnoj ocenki fiziko-mekhanicheskikh svojstv materialov v submikroob'edah [Nanoindentation as a tool for comprehensive assessment of physical and mechanical properties of materials in submicro-volumes]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2009, vol. 75, no. 1, pp. 45–58.
4. **Rudenko S.P.** Raschet resursa zubchatyh koles transmissij energonasyshchennyh mashin s uchetom kachestva himiko-termicheskogo uprochneniya [Calculation of the service life of transmission gears of energy-saturated machines with regard to the quality of chemical-thermal hardening]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of mashins, mechanisms and materials*, 2010, no. 4, pp. 58–60.
5. **Rudenko S.P., Val'ko A.L.** Osobennosti rascheta zubchatyh koles transmissij na glubinnuyu kontaktную vynoslivost' [Calculation of transmission gears for deep contact endurance]. *Vestnik mashinostroeniya = Engineering Bulletin*, 2015, no. 11, pp. 5–7.
6. **Kal'ner V.D., Shor F.I.** Perevodnye tablicy tverdosti [Translated hardness tables]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metallurgy and heat treatment of metals*, 1977, no. 9, pp. 59–61.
7. **Grigorovich V.K.** *Tverdost' i mikrotverdost' metallov* [Hardness and microhardness of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 230 p.
8. **Gerberich W.W., Tymiak N.I., Grunlan J.C.** Interpretations of Indentation Size Effects. *Journal of Applied Mechanics*, 2002, vol. 69, pp. 433–442.
9. **Glazov V.M., Vigdorovich V.N.** *Mikrotverdost' metallov* [Microhardness of metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961, 224 p.
10. Pat. 15273 Resp. Belarus'. MPK S 23 F 1/28. A. L. Val'ko, S. P. Rudenko, E. I. Mosunov, A. I. Mihlyuk; opubl. 30.12.2011.
11. **Belinkij A.L.** *Kontrol' kachestva termicheskoy obrabotki stal'nyh polufabrikatov i detalej: Cpravochnik* [Quality control of heat treatment of steel semi-finished products and parts: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 384 p.