

УДК 669.018.25

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-3-37-44

Зависимость свойств твердых сплавов WC–Co от их состава и характеристик микроструктуры

© 2022 г. В.А. Песин, А.С. Осмаков, С.Ю. Бойков

ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 22.02.22 г., доработана 14.04.22 г., подписана в печать 20.04.22 г.

Аннотация: В ходе проведенных исследований субмикронных твердых сплавов системы WC–Co, включавших в себя диагностику твердости, коэрцитивной силы и параметров микроструктуры, а также анализ и сопоставление результатов из современных литературных источников, представлена объединенная модель, согласно которой выражение для твердости по Виккерсу можно представить в виде, позволяющем разделить влияние размера зерна карбида вольфрама и объемного содержания кобальтовой связки. Предложенное выражение дает возможность проводить перерасчет и сопоставлять значения HV для твердых сплавов с одинаковым средним размером зерна и различным содержанием связки. В работе показано, что в отличие от модели Ли-Герланда в рамках представляемой модели твердость сплава определяется твердостью карбидного каркаса (H_{WC}) и его смежностью (C) и задается соотношением $HV = CH_{WC}$. При этом величина H_{WC} зависит только от размера зерна карбида вольфрама и описывается уравнением типа Холла–Петча. По результатам параллельных измерений твердости и коэрцитивной силы (H_c) получено эмпирическое уравнение зависимости величины H_c от размера зерна WC и объемного содержания Co. На основании всей совокупности экспериментальных данных исследованы связи коэрцитивной силы и твердости по Виккерсу и предложено упрощенное соотношение между этими физическими показателями, позволяющее проводить первичную экспрессную оценку величины HV по измеренным значениям коэрцитивной силы. В работе отмечается, что приведенные соотношения справедливы для относительно узкого распределения зерен WC по размерам с коэффициентом вариации не более 0,5.

Ключевые слова: твердый сплав, микроструктура, твердость по Виккерсу, коэрцитивная сила, размер зерна, содержание связки, карбидный каркас, смежность.

Песин В.А. – вед. специалист испытательной лаборатории № 1, ООО «Вириал» (194156, г. Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27 Р, оф. 1-Н). E-mail: PesinVA@virial.ru.

Осмаков А.С. – канд. техн. наук, начальник лаборатории № 1, ООО «Вириал». E-mail: OsmakovAS@virial.ru.

Бойков С.Ю. – зам. начальника лаборатории № 1, ООО «Вириал». E-mail: BoykovSY@virial.ru.

Для цитирования: Песин В.А., Осмаков А.С., Бойков С.Ю. Зависимость свойств твердых сплавов WC–Co от их состава и характеристик микроструктуры. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2022. Т. 16. № 3. С. 37–44. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-3-37-44.

Properties of WC–Co hardmetals as a function of their composition and microstructural parameters

V.A. Pesin, A.S. Osmakov, S.Yu. Boykov

«Virial» LTD, Saint-Petersburg, Russia

Received 22.02.2022, revised 14.04.2022, accepted for publication 20.04.2022

Abstract: Research into WC–Co submicron hardmetals involving measurement of hardness, coercivity and microstructural characterization, as well as analysis and comparison of results from recent literature led to the development of a unified constitutive expression for Vickers hardness in a form that separates the effects of the tungsten carbide grain size from those of the cobalt binder volume fraction. With the proposed expression for HV one may recalculate and compare hardness values for hardmetals featuring the same average grain size but differing in the binder matrix content. The paper shows that, in contrast to the Lee-Gurland model, the proposed constitutive expression framework treats the hardmetal hardness as a function of the carbide skeleton hardness (H_{WC}) and contiguity (C) described as $HV = CH_{WC}$. The carbide skeleton hardness depends on the WC grain size only, and it is

described by the Hall-Petch equation. The results of parallel hardness and coercivity measurements led to an empirical equation relating H_c to the WC grain size and the Co volume fraction. Based on the complete experimental data, the relationship between the coercivity and Vickers hardness was explored, and a simplified relationship between these physical values was proposed to carry out the primary HV evaluation based on the measured coercivity values. As noted in the paper, the above equations are valid for relatively narrow WC grain size distributions with a maximum coefficient of variation of 0.5.

Keywords: hardmetal, microstructure, Vickers hardness, coercivity, grain size, binder fraction, carbide skeleton, contiguity.

Pesin V.A. – Lead expert, Testing laboratory № 1, «Virial» LTD (194156, Russia, Saint-Petersburg, Engelsa pr., 27 R, of. 1-N). E-mail: PesinVA@virial.ru.

Osmakov A.S. – Cand. Sci. (Eng.), Head of testing laboratory № 1, «Virial» LTD. E-mail: OsmakovAS@virial.ru.

Boykov S.Yu. – Deputy head of testing laboratory № 1, «Virial» LTD. E-mail: BoykovSY@virial.ru.

For citation: Pesin V.A., Osmakov A.S., Boykov S.Yu. Properties of WC-Co hardmetals as a function of their composition and microstructural parameters. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2022. Vol. 16. No. 3. P. 37–44 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-3-37-44.

Введение

К настоящему времени имеется большое количество обзоров и оригинальных работ, посвященных влиянию микроструктуры и состава сплавов системы WC—Co на их свойства, в том числе на твердость (HV) и коэрцитивную силу (H_c) [1–4]. В большинстве из них HV и H_c рассматриваются как функции размера зерна WC (d_{WC}) и объемного содержания Co-связки (V_{Co}). На основании получаемых эмпирических зависимостей величин HV и H_c от d_{WC} и V_{Co} делаются попытки построения физических моделей, описывающих эти зависимости [5–10]. Несмотря на то, что измерения d_{WC} проводились, как правило, в рамках единого подхода — метода секущих (linear intercept) в разных вариантах, к сожалению, для сплавов с близкими значениями твердости и коэрцитивной силы в этих работах приводятся сильно различающиеся значения размера зерна WC. Особенно наглядно подобные расхождения проявляются в субмикронном диапазоне зернистости. Например, для сплавов, содержащих 10 мас.% Co, со средним размером зерна $d_{WC} = 0,5$ мкм приписываются значения твердости от 1540 до 1820 HV_{30} , с $d_{WC} = 0,6$ мкм — от 1610 до 1798 HV_{30} , а с $d_{WC} = 0,7$ мкм — от 1431 до 1720 HV_{30} . Поэтому получаемые эмпирические зависимости также сильно отличаются друг от друга и малоприменимы для использования.

Метрологические аспекты измерения размеров зерна WC рассмотрены в работах [11–13]. Полученные авторами [3, 6, 10] результаты представляются весьма надежными, причем приведенные в работах [3, 6] эмпирические зависимости твердости от размера зерна и содержания связки, по нашему мнению, могут быть использованы для уста-

новления связи и с другими свойствами твердых сплавов.

В работе [3] зависимости твердости от величины зерна WC, измеренного методом секущих (d_c), имеют вид соотношения типа Холла—Петча для сплавов с 6 и 10 мас.% Co соответственно:

$$HV = 970 + 540d_c^{-1/2}, \quad (1)$$

$$HV = 850 + 485d_c^{-1/2}. \quad (2)$$

Авторы [6] на основании экспериментальных результатов для сплавов WC—Co в широком интервале содержаний Co (5–25 мас.%) получили эмпирическое уравнение, связывающее твердость, размер зерна карбида вольфрама (d_Φ — максимальный диаметр Фере) и объемное содержание кобальта:

$$HV = \alpha(V_{Co})[729 + 718(d_\Phi + 0,13)^{-1/2}], \quad (3)$$

где первый множитель $\alpha(V_{Co}) = 0,5/(V_{Co} + 0,331)$ характеризует влияние связки, а второй — твердость карбидной составляющей, которая имеет вид соотношения Холла—Петча от сложного аргумента ($d_\Phi + 0,13$), что ограничивает бесконечный рост HV при приближении d_Φ к нулю. Сравнение результатов, полученных по формулам (1), (2) и (3), представляет значительный интерес, но необходимо предварительно установить соотношение между d_c и d_Φ .

Исходя из вышеизложенного, цели работы можно сформулировать следующим образом:

— проанализировать зависимости твердости сплавов системы WC—Co от их состава и микроструктуры;

— на основании измерений HV и H_c для ряда сплавов установить зависимости коэрцитивной силы от их состава и микроструктуры;

— показать возможность согласования при определенных условиях значений HV , H_c и d_{WC} для твердого сплава WC—Co.

Объекты и методы измерений

Объектами измерений были образцы инструментальных твердых сплавов системы WC—Co субмикронного диапазона производства фирм «Sandvik» (Швеция), «Konrad Friedrich» и «Konrad Micro Drill» (Германия), «Iscar» (Израиль), «Gesac» (Китай) и ООО «Вириал» (Россия) с содержанием углерода, близким к стехиометрическому.

Твердость по Виккерсу оценивалась на подготовленных аншлифах на твердомере Falcon 508 (Нидерланды) при нагрузке 294 Н.

Коэрцитивная сила определялась на коэрцитиметре Koerzimat 1.096 CS (Германия). Измерения микроструктурных параметров проводились с помощью программного пакета «Fiji» (США) путем анализа изображений, полученных на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Mira 3 («Tescan», Чехия). Изображения регистрировались с поверхности травленных (предварительно доведенных на алмазных суспензиях) аншлифов. Процесс травления состоял из выдержки образцов в растворе Мураками в течение 60 с с последующей промывкой в проточной воде и 10-минутной обработкой в ультразвуковой ванне. Анализ зернистости производился по пяти РЭМ-изображениям с видимым полем 7,22 мкм и 80 000-кратным увеличением.

Зависимость твердости от величины зерна WC и содержания Co-связки

За размер индивидуального зерна WC в методе секущих (d_c) принимается длина хорды, проведенной фактически в произвольном направлении, и следовательно, размер зерна представляет собой «среднюю» хорду. Соответственно, средний размер зерна в сплаве, определяемый методом секущих, является результатом двойного усреднения и не слишком сильно зависит от формы зерен WC. Если за размер зерна принимается диаметр эквивалентной окружности ($d_{эКВ}$), то среднее его значение не зависит от формы зерен WC, и соотношение

между d_c и $d_{эКВ}$ слабо зависит от морфологии зерен: $d_{эКВ} \approx 1,15d_c$ [13].

В случае, когда за размер зерен принимается максимальный диаметр Фере, т.е. наибольшая хорда, средний размер зерен (d_Φ) сильно зависит от их изометричности в сплаве. Однако можно ожидать, что для серийных промышленных сплавов степень изометричности зерен изменяется в относительно узких пределах. Поэтому для определения соотношения d_c/d_Φ выбрали 6 сплавов от различных производителей со средним размером зерна $d_c = 0,39 \div 0,68$ мкм, на которых были проведены измерения d_c и d_Φ и получено соотношение $d_c/d_\Phi = 0,70 \pm 0,04$.

В связи с тем, что разброс значений не превышал 10 %, полученный результат был использован для модификации уравнения (3):

$$HV = [0,5/(V_{Co} + 0,331)] \times [729 + 601(d_c + 0,09)^{-1/2}], \quad (3a)$$

тогда для сплава с 6 и 10 мас.% Co соответственно получаем

$$HV = 842 + 694(d_c + 0,09)^{-1/2}, \quad (4)$$

$$HV = 735 + 606(d_c + 0,09)^{-1/2}. \quad (5)$$

В таком виде более удобно проводить сопоставление зависимостей твердости сплавов от размеров зерна WC, полученных в работах [3] и [6].

На рис. 1 для сплавов с 6 и 10 мас.% Co показаны зависимости твердости от размера зерна, рассчитанные на основании уравнений (1), (4) и (2), (5) соответственно. Кроме того, на рисунках точками представлены экспериментальные результаты собственных измерений и заимствованные из работ [3, 6, 10].

В пределах наблюдаемого разброса экспериментальных данных для интервала зернистости 0,2—5,0 мкм аппроксимации авторов [3] и [6] дают близкие результаты. При переходе к наноразмерному диапазону ($d_c < 0,2$ мкм) происходит изменение механизмов пластической деформации, и уравнения (1) и (2) перестают выполняться. Поэтому предпочтительнее использовать модифицированное уравнение (3a). Так, для сплавов с 10 мас.% Co и размерами зерна 0,14 мкм [14] и 0,061 мкм [15] расчет по уравнению (3a) дает значения твердости 2000 и 2294 HV соответственно, что удовлетворительно согласуется с ее экспериментальными значениями (2036 и 2356 HV).

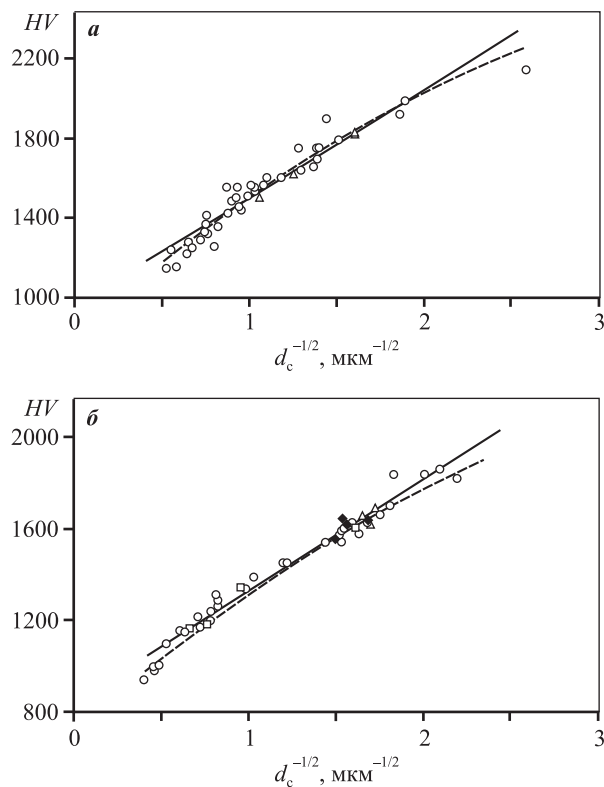


Рис. 1. Зависимость твердости сплавов с 6 мас.% (а) и 10 мас.% Со (б) от величины зерна WC

Сплошные линии – расчет на основании уравнений (1) (а) и (2) (б) [3], штриховые – расчет по уравнениям (4) (а) и (5) (б); значки – экспериментальные данные [3] (○), [6] (△), [10] (□) и собственные измерения ООО «Вириал» (◆)

Fig. 1. Hardness of 6 wt.% Co grades (a), and 10 wt.% Co grades (b) as a function of WC grain size

Solid lines mean calculation as per Equation (1) (a) and Equation (2) (b) [3], dashed lines mean calculation as per Equation (4) (a) and Equation (5) (b); symbols mean ○ – experimental data from [3]; △ – experimental data from [6]; □ – experimental data from [10]; ◆ – Virial's own measurements

Модель авторов [6], в которой твердость сплава определяется твердостью карбидного каркаса, а влияние содержания Со проявляется в виде нормирующей функции, позволяет для $d_c > 0,2$ мкм привести к единому виду коэффициенты соотношений типа Холла–Петча для разных концентраций Со:

$$HV = [0,5/(V_{Co} + 0,331)](850 + 485d_c^{-1/2}). \quad (6)$$

Так, для 10 мас.% Со коэффициент $\alpha(V_{Co}) \approx 1$, и получается уравнение (2), для сплава с 6 мас.% Со значение $\alpha(V_{Co}) \approx 1,155$, тогда $HV = 982 + 560d_c^{-1/2}$, что практически совпадает с (1).

При $V_{Co} = 0$ уравнение (6) приобретает вид

$$HV_{WC} = 1284 + 733d_c^{-1/2}, \quad (7)$$

где значения коэффициентов близки к соответствующим результатам [16] (1382 и 731) и [17, 18] (1112 и 911). Использование уравнений (3а) и (6) позволяет сопоставлять значения твердости сплавов с различным объемным содержанием связки (по крайней мере для диапазона $0,08 \leq V_{Co} \leq 0,24$) и проводить оценку размеров их зерна.

Физический смысл показателя $\alpha(V_{Co})$ становится понятным при его сравнении с коэффициентом смежности C (связностью) карбидного каркаса. В работе [12] для его определения было предложено следующее выражение:

$$C = 1 - 1,27V_{Co}^{0,75}. \quad (8)$$

Сравнение численных значений $\alpha(V_{Co})$ и C для сплавов WC–Со с объемным содержанием кобальта $V_{Co} \leq 0,24$ показано на рис. 2, из которого следует, что

$$\alpha(V_{Co}) \approx 1,5C, \quad (9)$$

и тогда выражение для твердости можно записать в виде

$$HV = C(1284 + 733d_c^{-1/2}). \quad (10)$$

Таким образом, зависимость твердости HV сплавов WC–Со от размера зерна карбида вольфрама и содержания связки хорошо описывается наглядной феноменологической моделью, в ко-

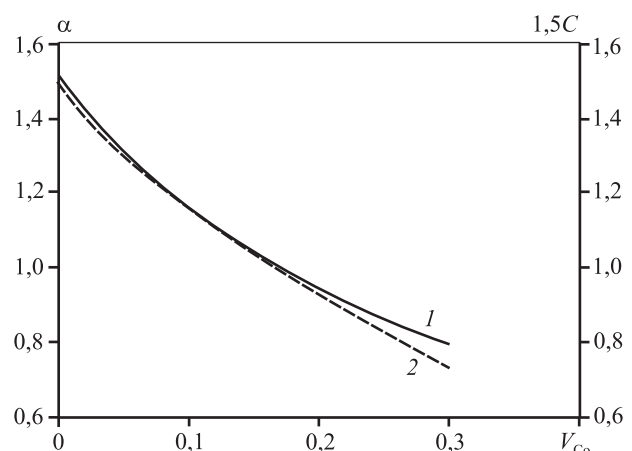


Рис. 2. Соотношение между коэффициентом $\alpha(V_{Co})$ (1) и смежностью C (2) в зависимости от содержания Со-связки

Fig. 2. Ratio between the coefficient $\alpha(V_{Co})$ (1) and contiguity C (2) depending on Co binder fraction

торой твердость сплава определяется твердостью карбидного каркаса (скелета), а объемное содержание связки определяет связность этого каркаса.

Необходимо отметить, что в зависимости от содержания углерода, как показано в [19], границы WC—WC могут содержать либо не содержать прослойки Co толщиной от 3 до 30 нм. Пока не понятно, как влияет присутствие таких нанопрослоек на механические свойства материала и следует ли менять представление о карбидном каркасе (скелете) и его связности в сплавах с близким к стехиометрическому содержанием углерода.

Зависимость коэрцитивной силы от размера зерна WC и содержания Co-связки

Для получения зависимости коэрцитивной силы от размера зерна WC на ряде инструментальных твердых сплавов различных производителей с содержанием Co 6, 10 и 12 мас.% проводили параллельные измерения H_c и HV . Затем по измеренным значениям HV с использованием объединенного уравнения (6) рассчитывали соответствующие значения размера зерна (d_p). На рис. 3 сплошными линиями показаны полученные зависимости для сплавов с 6, 10 и 12 мас.% Co, которые хорошо

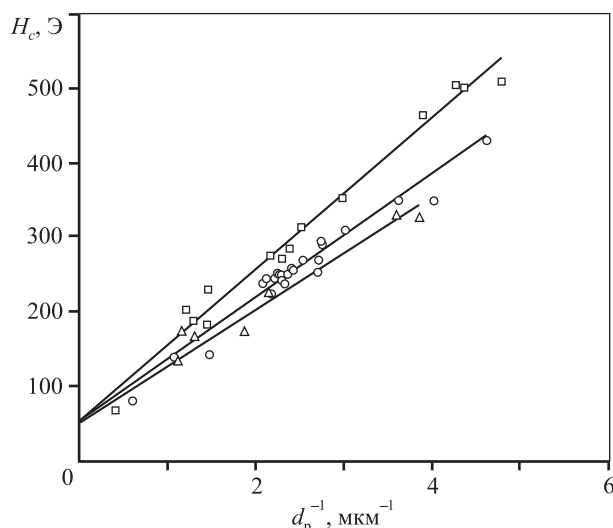


Рис. 3. Зависимость коэрцитивной силы от размера зерна WC в сплавах с различным содержанием Co-связки, мас. %: 6 (□), 10 (○) и 12 (△)

Fig. 3. Coercivity H_c as a function of WC grain size in grades with different Co binder content: □ — grades with 6 wt.% Co; ○ — grades with 10 wt.% Co; △ — grades with 12 wt.% Co

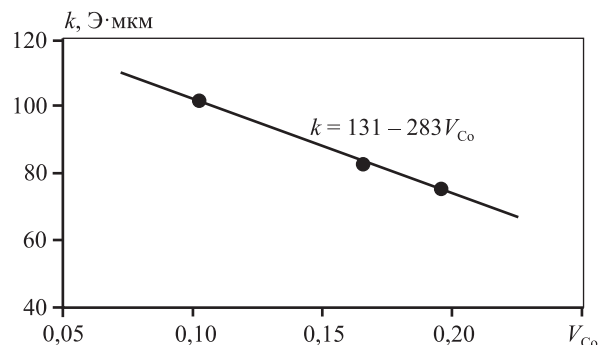


Рис. 4. Зависимость коэффициента k от объемного содержания кобальта

Fig. 4. Coefficient k as a function of cobalt volume fraction

описываются следующими эмпирическими уравнениями:

$$H_c = 54,7 + 102d_p^{-1}, \quad (12)$$

$$H_c = 50,8 + 83d_p^{-1}, \quad (13)$$

$$H_c = 53,0 + 76d_p^{-1}. \quad (14)$$

В пределах погрешности можно принять, что свободные члены в уравнениях (12)—(14) одинаковы и равны 53 Э, а коэффициент k при d_p^{-1} линейно зависит от объемного содержания связки (рис. 4): в пределах 6—12 мас.% Co эта зависимость может быть записана в виде $k = 131 - 283V_{Co}$.

Заменив расчетное d_p на d_c в уравнениях (12)—(14), можно получить следующее выражение для зависимости коэрцитивной силы H_c от размера зерна и содержания связки:

$$H_c = 53 + (131 - 283V_{Co})d_c^{-1}. \quad (15)$$

Так как эмпирические зависимости (12)—(14) и, соответственно, (15) были получены на основании расчетов размера зерна (d_p) по уравнению (6), то они справедливы при зернистости 0,2—5,0 мкм.

Соотношение между твердостью и коэрцитивной силой

Полученные нами на основании параллельных измерений H_c и HV экспериментальные данные для сплавов с 6, 10 и 12 мас.% Co приведены на рис. 5. Там же сплошными линиями показаны соответствующие расчетные соотношения между твердостью и коэрцитивной силой на основе уравнений (6) и (15). Как следует из рисунка, расчетные

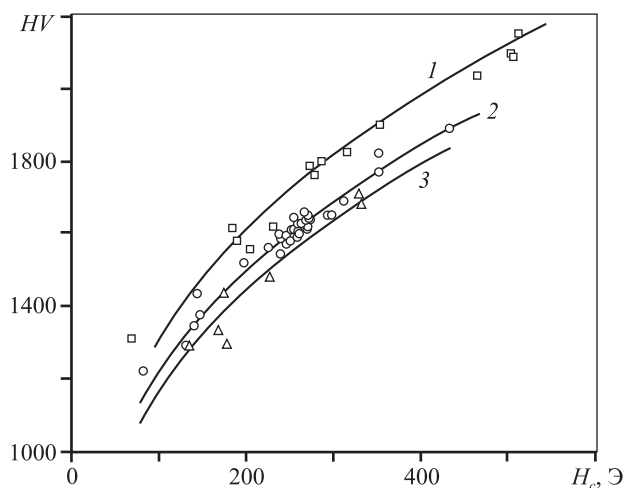


Рис. 5. Соотношение между твердостью и коэрцитивной силой в исследованных сплавах. Сплошные линии — расчетные данные для HV и H_c сплавов с 6 (1), 10 (2) и 12 мас.% Co (3) по уравнениям (6) и (15) соответственно; значки — экспериментальные данные для сплавов с 6 Co (□), 10 Co (○) и 12 мас.% Co (△)

Fig. 5. Relationship between hardness and coercivity in the researched grades

Solid lines mean HV and H_c calculated as per Equation (6) and Equation (15), respectively, for grades with 6 wt.% Co (1); 10 wt.% Co (2); 12 wt.% Co (3); symbols mean experimental data: □ — grades with 6 wt.% Co; ○ — grades with 10 wt.% Co; △ — grades with 12 wt.% Co

соотношения удовлетворительно описывают экспериментальные зависимости. Наблюдаемый разброс значений обусловлен определенными вариациями технологических параметров производства твердых сплавов. Как правило, производители [20–25] в спецификациях производимых сплавов указывают достаточно широкие интервалы допустимых значений твердости и коэрцитивной силы: ± 50 HV и ± 35 Э соответственно. Поэтому при анализе их соотношений для большого количества различных сплавов следует учитывать возможность такого разброса.

В практике производства твердых сплавов измерение магнитных свойств является одним из первых этапов экспрессного неразрушающего контроля полученных после спекания изделий. Как видно из рис. 6, для сплавов с 10 мас.% Co при экспрессной оценке величины твердости по величине коэрцитивной силы (в пределах 110–350 Э) можно использовать линейную аппроксимацию их соотношения

$$HV = 1,932H_c + 1112. \quad (16)$$

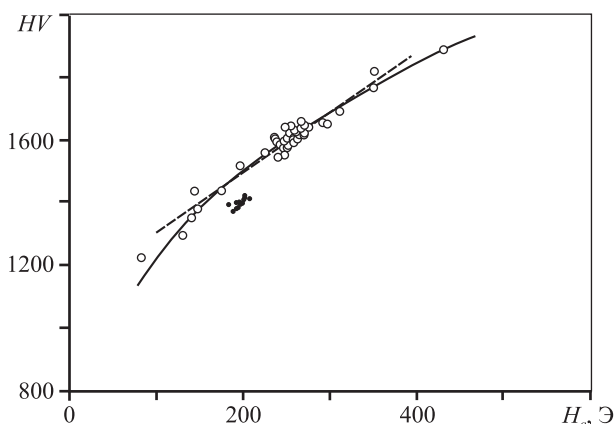


Рис. 6. Соотношение $HV(H_c)$ для сплавов с 10 мас.% Co (фрагмент рис. 5)

Сплошная линия соответствует расчетной кривой 2 на рис. 5, штриховая — линейная аппроксимация согласно уравнению (16); ● — экспериментальные данные для сплава VHS11 (ООО «Вириал»)

Fig. 6. $HV(H_c)$ ratio for grades with 10 wt.% Co (part of Fig. 5)

Solid line corresponds to theoretical curve 2 in Fig. 5, dashed line corresponds to linear approximation as per Equation (16); ● — mean experimental data for VHS11 grade (Virial)

Следует отметить, что твердость и коэрцитивная сила сплавов WC—Co зависят не только от среднего размера зерна и содержания Co-связки, но и от целого ряда других факторов [3]. Поэтому можно ожидать отклонение от полученных зависимостей для сплавов с широким или бимодальным распределением зерен WC по размерам [26]. Например, сплав с 10 мас.% Co марки VHS11 (ООО «Вириал»), создававшийся как материал с относительно высокими твердостью (≈ 1400 HV) и вязкостью разрушения ($\geq 13,5$ МПа·м^{1/2}), имеет широкое распределение зерен WC по размерам. Это привело, как показано на рис. 6, к заметному изменению соотношения между HV и H_c по сравнению со сплавами с более узким распределением зерен по размерам (коэффициент вариации менее 0,5).

Обсуждение результатов

Как ранее отмечалось, работа [3] служит той экспериментальной базой, на основе которой возможно построение моделей, описывающих зависимость твердости от размера зерна WC и содержания связки. Авторами [6] предложена полуэмпирическая модель, в которой твердость сплава определяется твердостью карбидного каркаса,

нормируемой на коэффициент, зависящий от содержания связки. Твердость каркаса в этой модели имеет вид соотношения Холла—Петча от сложного аргумента, при этом за размер зерна WC принят максимальный диаметр Фере, что делает невозможным напрямую сравнивать результаты работ, так как в большинстве публикаций используется средний размер зерна, определяемый по методу секущих.

Экспериментально определенное в настоящей работе соотношение между величинами средних размеров зерна WC методом секущих (d_c) и по максимальному диаметру Фере (d_{ϕ}) позволило модифицировать уравнение (3) и привести его к виду (3а), в котором используется величина d_c . Такая модификация позволяет проводить сравнение между большим количеством экспериментальных данных различных авторов и расчетными значениями. В результате такого сравнения оказалось, что модель (3) [6] хорошо описывает зависимость твердости от среднего размера зерна и объемного содержания связки для диапазона зернистости сплава от наноразмерного до крупного.

В случае $d_c > 0,2$ мкм использование нормировочного коэффициента $\alpha(V_{Co})$ позволило получить уравнение (6), описывающее твердость сплавов в виде единой зависимости Холла—Петча для разных содержаний Co-связки. Установленное соотношение между величинами $\alpha(V_{Co})$ и C твердого сплава сделало более наглядной объединенную модель: твердость сплава с близким к стехиометрическому содержанием углерода определяется произведением твердости каркаса на его смежность.

Для получения зависимости коэрцитивной силы от размера зерна использовалась величина d_p , которая рассчитывалась из значений твердости, определенных по уравнению (6). Разброс значений HV для одного и того же размера зерна может приводить к погрешности в определении d_p . Мы оценили среднее отклонение экспериментальных значений твердости от линии тренда в [3] — оно не превысило 30 HV, что дает неопределенность менее 9 % в оценке размера зерна. Так как отклонения в значениях твердости носят случайный характер, то и погрешности в расчетных значениях d_p будут носить тоже случайный характер. Этот эффект будет приводить к дополнительному разбросу точек относительно линии тренда при анализе зависимости коэрцитивной силы от размера зерна, но при достаточном количестве образцов

не повлияет на уравнение самой линии тренда. Это также подтверждается тем, что расчетные и экспериментальные соотношения между HV и H_c , как показано на рис. 5, хорошо согласуются между собой.

Выводы

1. На основании проведенного анализа работ [3] и [6] предложена объединенная модель, позволяющая записать выражение для HV в виде

$$HV = [0,5/(V_{Co} + 0,331)](850 + 485d_c^{-1/2})$$

и сопоставлять твердости сплавов с одинаковым размером зерна и различным объемным содержанием связки в диапазонах $0,08 \leq V_{Co} \leq 0,24$ и $d_c > 0,2$ мкм.

2. В рамках этой модели получено простое соотношение, связывающее твердость сплава с твердостью карбидного каркаса (HV_{WC}) и его смежностью (C):

$$HV = C \cdot HV_{WC},$$

$$HV_{WC} = 1284 + 733d_c^{-1/2}.$$

3. Для сплавов с содержанием Co в пределах 6—12 мас.% установлена зависимость коэрцитивной силы от размера зерна и содержания связки:

$$H_c = 53 + (131 - 283V_{Co}) d_c^{-1}.$$

4. Предложено уравнение для оценки соотношения между коэрцитивной силой и твердостью сплавов с содержанием кобальтовой связки 10 мас. %:

$$HV = 1,932H_c + 1112.$$

Литература/References

1. Shatov A.V., Ponomarev S.S., Firstov S.A. Hardness and deformation of hardmetals at room temperature. In: *Comprehensive hard materials* (ed. Vinod K. Sarin). Oxford: Elsevier, 2014. P. 267—299.
2. Topić I., Sockel H., Göken M. The influence of microstructure on the magnetic properties of WC/Co hardmetals. *Mater. Sci. Eng. A*. 2006. Vol. 423. Iss. 1-2. P. 306—312. DOI: 10.1016/J.MSEA.2006.02.018.
3. Roebuck B. Extrapolating hardness-structure property maps in WC/Co hardmetals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2006. Vol. 24. Iss. 1. P. 101—108. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2005.04.021.

4. Love A., Luyckx S., Sacks N. Quantitative relationships between magnetic properties, microstructure and composition of WC—Co alloys. *J. Alloys Compd.* 2010. Vol. 489. No. 2. P. 465—468. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.09.087.
5. Engqvist H., Jacobson S., Axén N. A model for the hardness of cemented carbides. *Wear.* 2002. Vol. 252. Iss. 5–6. P. 384—393. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00866-3.
6. Kresse T., Meinhard D., Bernthaler T., Schneider G. Hardness of WC—Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modelling. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2018. Vol. 75. P. 287—293. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.05.003.
7. Makhele-Lekala L., Luyckx S., Nabarro F.R.N. Semi-empirical relationship between the hardness, grain size and mean free path of WC—Co. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2001. Vol. 19. Iss. 4–6. P. 245—249. DOI: 10.1016/S0263-4368(01)00022-1.
8. Golovchan V.T. Some analytical consequences of experimental data on properties of WC—Co hardmetals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2008. Vol. 26. Iss. 4. P. 301—305. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2007.07.001.
9. Roebuck B. Terminology, testing, properties, imaging and models for fine grained hardmetals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 1995. Vol. 13. Iss. 5. P. 265—279. DOI: 10.1016/0263-4368(95)92673-8.
10. Tarrago J.M., Coureaux D., Torres Y., Jimenez-Pique E., Schneider L., Fair J., Llanes L. Strength and reliability of WC-Co cemented carbides: understanding microstructural effects on the basis of R-curve behavior and fractography. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2018. Vol. 71. P. 221—226. DOI: 10.1016/J.IJRMHM.2017.11.031.
11. Mingard K.P., Roebuck B., Bennett E.G., Gee M.G., Nordenstrom H., Sweetman G., Chan P. Comparison of EBSD and conventional methods of grain size measurement of hardmetals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2009. Vol. 27. Iss. 2. P. 213—223. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.06.009.
12. Roebuck B., Mingard K.P., Jones H., Bennett E.G. Aspects of the metrology of contiguity measurements in WC based hard materials. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2017. Vol. 62. P. 161—169. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2016.05.011.
13. Tarragó J.M., Coureaux D., Torres Y., Wu F., Al-Dawery I., Llanes L. Implementation of an effective time-saving two-stage methodology for microstructural characterization of cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2016. Vol. 55. P. 80—86. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.10.006.
14. Vornberger A., Potschke J., Gestrich T., Herrmann M., Michaelis A. Influence of microstructure on hardness and thermal conductivity of hardmetals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2020. Vol. 88. Art. 105170. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105170.
15. Peng Y., Wang H., Zhao C., Hu H., Liu X., Song X. Nanocrystalline WC—Co composite with ultrahigh hardness and toughness. *Composites Pt. B.* 2020. Vol. 197. Art. 108161. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108161.
16. Lee H.C., Gurland J. Hardness and deformation of cemented tungsten carbides. *Mater. Sci. Eng.* 1978. Vol. 33. P. 125—133. DOI: 10.1016/0025-5416(78)90163-5.
17. Nino A., Takahashi K., Sugiyama S., Taimatsu H. Effects of carbon addition on microstructures and mechanical properties of binderless tungsten carbide. *Mater. Trans.* 2012. Vol. 53. Iss. 8. P. 1475—1480. DOI: 10.2320/mater-trans.M2012148.
18. Nino A., Izu Y., Sekine T., Sugiyama S., Taimatsu H. Effects of TaC and TiC addition on microstructures and mechanical properties of binderless WC. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2019. Vol. 82. P. 167—173. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.04.012.
19. Konyashin I., Zaitsev A.A., Sidorenko D., Levashov E.A., Ries B., Konischev S.N., Sorokin M., Mazilkin A.A., Herrmann M., Kaiser A. Wettability of tungsten carbide by liquid binders in WC—Co cemented carbides: Is it complete for all carbon contents? *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2017. Vol. 62. P. 134—148. DOI: 10.1016/J.IJRMHM.2016.06.006.
20. German Carbide. URL: <https://german-carbide.com/en/products-2/> (accessed: 30.03.2022).
21. Boehlerit. URL: <https://www.boehlerit.com/en/> (accessed: 30.03.2022).
22. Hyperion cemented carbide grades. URL: <https://www.hyperionmt.com/products/Carbide-rods/product-series-grade/> (accessed: 17.12.2021).
23. Ultra Carbide Grade Chart. URL: <https://ultracarbide.com/> (accessed: 17.12.2021).
24. Iscar. URL: <https://www.iscar.com/> (accessed: 17.12.2021).
25. Gesac. URL: <https://gesac.ru> (accessed: 17.12.2021).
26. Engqvist H., Uhrenius B. Determination of the average grain size of cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2003. Vol. 21. Iss. 1. P. 31—35. DOI: 10.1016/S0263-4368(03)00005-2.