

УДК 620.178.1

ЗАВИСИМОСТИ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ ОТ СТЕПЕНИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© В. И. Болобов, В. С. Бочков, С. А. Чупин, П. П. Бондаренко, Цинянь Сюй¹*Статья поступила 22 апреля 2014 г.*

Представлены результаты экспериментов по измерению твердости поверхности дна отпечатков от вдавливания шарика разных диаметров при варьированных нагрузках в пластины различных сталей и сплавов. Показано, что при выражении степени пластической деформации ε в виде обычно используемого отношения диаметров отпечатка и шарика полученные зависимости приращения твердости $\Delta HB = f(\varepsilon)$ не соответствуют аналогичным зависимостям, установленным при деформировании соответствующих материалов прокаткой. В то же время при выражении ε в виде отношения площади поверхности отпечатка (M) к половине площади поверхности вдавливаемого шара (M') указанные зависимости достаточно близки.

Ключевые слова: деформирование; прокатка; вдавливание шара; твердость дна отпечатка; степень пластической деформации.

Имеющиеся в литературе экспериментальные данные о твердости НВ упрочненных пластической деформацией металлов в подавляющем большинстве (например, [1 – 3]) относятся к случаю их деформирования сжатием при прокатке. При этом способе деформирования за степень пластической деформации ε принимают [1] отношение разности площадей сечения заготовки до (F_0) и после (F_k) прокатки к исходной площади сечения, т.е.

$$\varepsilon = (F_0 - F_k)/F_0, \quad (1)$$

а зависимость твердости от величины ε представляют в виде уравнения

$$HB = HB_0 + \Delta HB = HB_0 + A\varepsilon^x. \quad (2)$$

Целью исследования являлось определение возможности использования установленных [1 – 3] зависимостей $\Delta HB = f(\varepsilon)$ (2) для других способов деформирования, в частности, для случая вдавливания в металл сферического индентора. В работе представлены результаты измерения твердости дна отпечатка от шарика, вдавливаемого в различные металлические материалы с разной интенсивностью, которые сопоставлены с литературными данными об изменении твердости подобных материалов в результате их деформирования методом прокатки.

Для получения представительных данных исследовали металлические конструкционные материалы различных классов: углеродистую и легированную стали (45, 30ХГСА, 110Г13Л), технические никель и титан (НП2, ВТ1-0), промышленные сплавы меди и алюминия (Л62, АМг3, АМц) составов, близких к со-

ставам соответствующих сталей и сплавов, сведения о зависимости $\Delta HB = f(\varepsilon)$ для которых обнаружены в литературе.

Из листов и прутков в состоянии поставки указанных сталей и сплавов изготавливали шлифованные образцы в виде пластин размером $20 \times 40 \times 4$ мм. (Для изготовления образцов из стали 30ХГСА использовали два вида листового проката, существенно отличающегося по твердости. Пластины из стали 110Г13Л получали литьем с последующей закалкой отливок с температуры 1100 °С в воде.)

Эксперименты проводили следующим образом. С использованием универсального твердомера Zwick ZHU187.5 измеряли исходную твердость HN_0 поверхности образцов материалов. В различные точки поверхности образцов с использованием нагружающей части устройства по замеру твердости по методу Бринелля вдавливали шарики из закаленной высокоуглеродистой стали диаметром D от 2,5 до 10 мм при нагрузках P , изменяющихся от 600 до 30000 Н (60 – 3000 кгс), что обеспечивало различную степень деформации металла образца в месте вдавливания шара (рис. 1). С помощью микроскопа МПБ-2 (цена деления 0,05 мм) и универсального твердомера (при нагрузках 30 Н) определяли диаметр d полученных лунок и твердость HN поверхности в центральной точке их донной части. Поскольку радиус кривизны получаемых лунок в 10 – 50 раз превосходил размер отпечатков x (рис. 2), остающихся в результате вдавливания пирамидки по методу Виккерса, считали, что при измерении твердости дна лунок поправку на кривизну поверхности можно не учитывать.

Для каждого соотношения диаметра шарика D и усилия вдавливания P проводили три параллельных опыта, по результатам которых определяли средне-

¹ Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: Boloboff@mail.ru

Таблица 1. Твердость поверхности донной части отпечатка (лунки) от вдавливания шарика при различной степени пластической деформации металла

Марка материала (HV_0 , кгс/мм ²)	Диаметр шарика D , мм	Нагрузка P , кгс	Диаметр отпечатка d , мм	HV , кгс/мм ²	ΔHV , кгс/мм ²	Степень деформации		
						$\varepsilon = d/D$, %	$\varepsilon = (M - F)/M$, %	$\varepsilon = M/M'$, %
Сталь 45 (153)	7	60	0,79	162,7	9,70	11,22	0,32	0,63
		100	0,97	167,7	14,73	13,85	0,48	0,96
		150	1,19	169,9	16,90	17,06	0,73	1,47
	9	60	0,85	161,7	8,68	9,43	0,22	0,45
		100	1,01	163,9	10,90	11,26	0,32	0,64
		150	1,14	165,3	12,33	12,64	0,40	0,80
Сталь 30ХГСА (142 и 220)	7	60	0,79	146,0	3,30	11,26	0,32	0,64
		100	0,98	148,0	5,30	14,03	0,49	0,99
		150	1,18	149,0	6,30	16,85	0,72	1,43
	9	60	0,82	145,0	2,30	9,13	0,21	0,42
		100	1,02	145,9	3,23	11,32	0,32	0,64
		150	1,22	147,8	5,10	13,61	0,47	0,93
	2,5	187,5	1,08	257,4	39,53	43,39	4,95	9,90
	10	250	1,43	261,3	5,40	14,25	0,51	1,02
		500	2,00	259,9	10,15	20,00	1,01	2,02
		1000	2,93	225,4	24,15	29,25	2,19	4,37
		2000	4,09	230,3	39,75	40,88	4,37	8,74
		3000	5,00	230,0	56,20	50,00	6,70	13,40
Сталь 110Г13Л (198)	2,5	62,5	0,64	233,8	36,23	25,60	1,67	3,33
		100	0,85	252,1	54,50	33,99	2,98	5,95
		150	1,02	268,1	70,57	40,87	4,37	8,73
		187,5	1,11	287,1	89,53	44,25	5,16	10,32
	5	150	1,12	232,5	34,97	22,45	1,28	2,55
	7	150	1,18	222,5	24,99	16,80	0,71	1,42
Никель НП2 (115)	10	250	1,89	132,9	17,63	18,92	0,90	1,81
		500	2,64	135,7	20,40	21,58	1,77	2,42
		750	3,16	136,7	21,47	23,92	2,56	2,97
		1000	3,52	138,8	23,50	26,40	3,19	3,55
		1250	3,93	143,0	27,73	28,23	4,01	4,11
		1500	4,43	145,7	30,40	29,82	5,16	4,58
		1750	4,80	149,43	34,13	31,58	6,14	5,12
Латунь Л63 (57)	2,5	60	1,18	74,40	17,66	47,11	5,89	11,79
	5	60	1,28	65,57	8,83	25,50	1,65	3,31
		100	1,63	67,67	10,93	32,60	2,73	5,46
	7	60	1,36	63,23	6,49	19,43	0,95	1,91
		100	1,73	65,00	8,26	24,78	1,56	3,12
	9	60	1,37	60,27	3,53	15,25	0,58	1,17
Сплав АМг3 (56)	2,5	60	1,13	64,20	8,10	45,21	5,40	10,81
	5	60	1,23	60,27	4,17	24,68	1,55	3,09
		100	1,53	60,53	4,43	30,59	2,40	4,79
		150	1,84	61,80	5,70	36,73	3,49	6,99
	7	60	1,29	58,23	2,13	18,49	0,86	1,73
		100	1,62	59,80	3,70	23,14	1,36	2,72
Сплав АМц (56)	10	187,5	2,60	35,60	0,60	26,00	1,72	3,44
		250	3,26	36,17	1,17	32,58	2,73	5,46
		500	4,59	37,43	2,43	45,92	5,58	11,16
		750	5,59	39,47	4,47	55,92	8,55	17,09
Титан ВТ-1-0 (131)	10	500	2,24	140,73	9,83	22,37	1,27	2,53
		1000	3,13	143,73	12,83	31,27	2,51	5,01
		1250	3,52	146,97	16,07	35,20	3,20	6,40
		1500	3,87	149,15	18,25	38,65	3,89	7,77
		1750	4,09	150,30	19,40	40,90	4,37	8,75

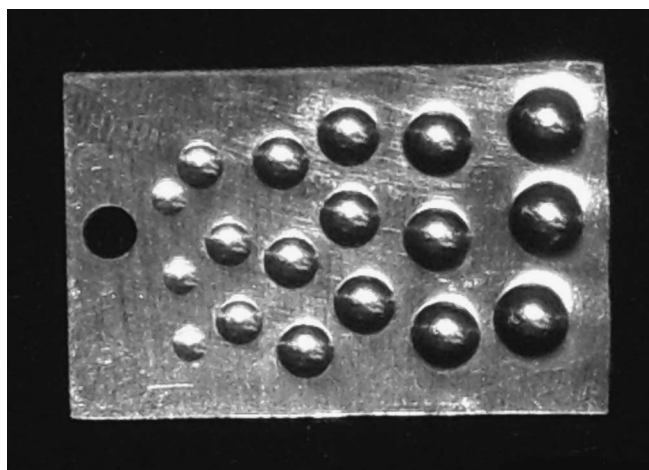


Рис. 1. Вид пластины стали 30ХГСА после деформации вдавливанием шарика

арифметические значения d и HV лунок (погрешность определения d составляла $\leq 4\%$, а HV — $\leq 3\%$). Далее рассчитывали разность ΔHV между полученной усредненной величиной твердости HV поверхности дна лунки и исходным значением HV_0 поверхности образца.

Установленные значения d , HV , ΔHV материалов представлены в табл. 1. Там же приведены значения средней деформации поверхностных слоев лунок (степени пластической деформации) ε , достигаемой в результате вдавливания шарика, рассчитанные несколькими известными способами.

Наиболее широкое распространение [4, 5] получило значение ε , рассчитанное как отношение диаметров лунки d и вдавливаемого шарика D :

$$\varepsilon = (d/D) \cdot 100\%. \quad (3)$$

Другой способ расчета ε предложен М. П. Марковцом [6]:

$$\varepsilon = \frac{M - F}{M} \cdot 100\%, \quad (4)$$

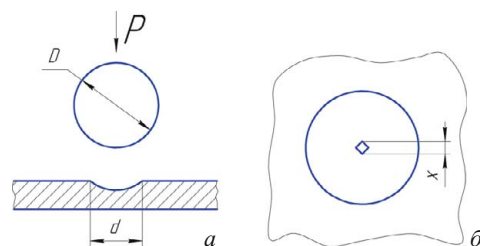


Рис. 2. Схемы вдавливания шарика с измерением диаметра d лунки (а) и определения твердости ее донной части путем замера диагоналей пирамидки (б)

где $M = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$ — площадь поверхности

сферического отпечатка (лунки); $F = \pi d^2/4$ — площадь проекции отпечатка.

В трудах В. М. Матюнина [7, 8] ε рассмотрено как отношение площади поверхности сферического отпечатка M к половине площади поверхности вдавливаемого шара M' :

$$\varepsilon = (M/M') \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $M' = \pi D^2/2$.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости $\Delta HB = f(\varepsilon)$ при различных способах выражения ε (после перевода HV в HB по табличным данным [1]) и их аппроксимации степенными зависимостями (линии тренда) средствами программы Excel в сравнении с аналогичными зависимостями [1–3], установленными при прокатке металлов и сплавов таких же или близких наименований.

Можно заключить, что выражение степени пластической деформации ε при вдавливании шарика в виде отношения d/D (3) приводит для всех материалов к полному несоответствию $\Delta HB = f(\varepsilon)$ (■) аналогичным зависимостям, установленным при прокатке (—). Например, для повышения HB стали 45 на 10 единиц (см. рис. 3, а) при выражении ε в виде d/D требуется деформация $\varepsilon = 10\%$, в то время как при прокатке — только 1%.

Таблица 2. Значения параметров A , x аппроксимационного уравнения $HB = HB_0 + Ae^x$ для вдавливания шара в сравнении с литературными данными для прокатки

Марка материала (HV_0 , кгс/мм ²)	A				x			
	Эксперимент при выражении ε в виде			По данным [1–3] для прокатки* (HV_0 , кгс/мм ²)	Эксперимент при выражении ε в виде			По данным [1–3] для прокатки*
	d/D	$(M - F)/M$	M/M'		d/D	$(M - F)/M$	M/M'	
Сталь 45 (153)	0,57	21,1	13,9	12,9 (145)	1,2	0,6	0,6	0,52
Сталь 30ХГСА (142 и 220)	0,036	9,8	5,2	8,5 (180)	1,88	0,93	0,92	0,7
Сталь 110Г13Л (198)	0,67	29,2	19,1	6,9 (200)	1,26	0,62	0,62	0,92
Никель НП2 (115)	0,33	17	11,42	21,6 (115 для НП4)	1,33	0,34	0,65	0,46
Латунь Л63 (57)	0,11	5,9	3,7	3,8 (100 для Л62)	1,33	0,65	0,65	0,82
Сплав АМг3 (56)	0,052	2,7	1,7	2,1 (49 для АМг1)	1,32	0,64	0,64	0,64
Сплав АМц (56)	0,0001	0,32	0,14	0,2 (30)	5,56	1,21	1,22	1,1
Титан ВТ1-0 (131)	0,27	8,3	5,7	10 (185 для ВТ1-1)	0,15	0,56	0,56	0,28

* Для стали 110Г13Л по данным [3], для остальных материалов по данным [1, 2].

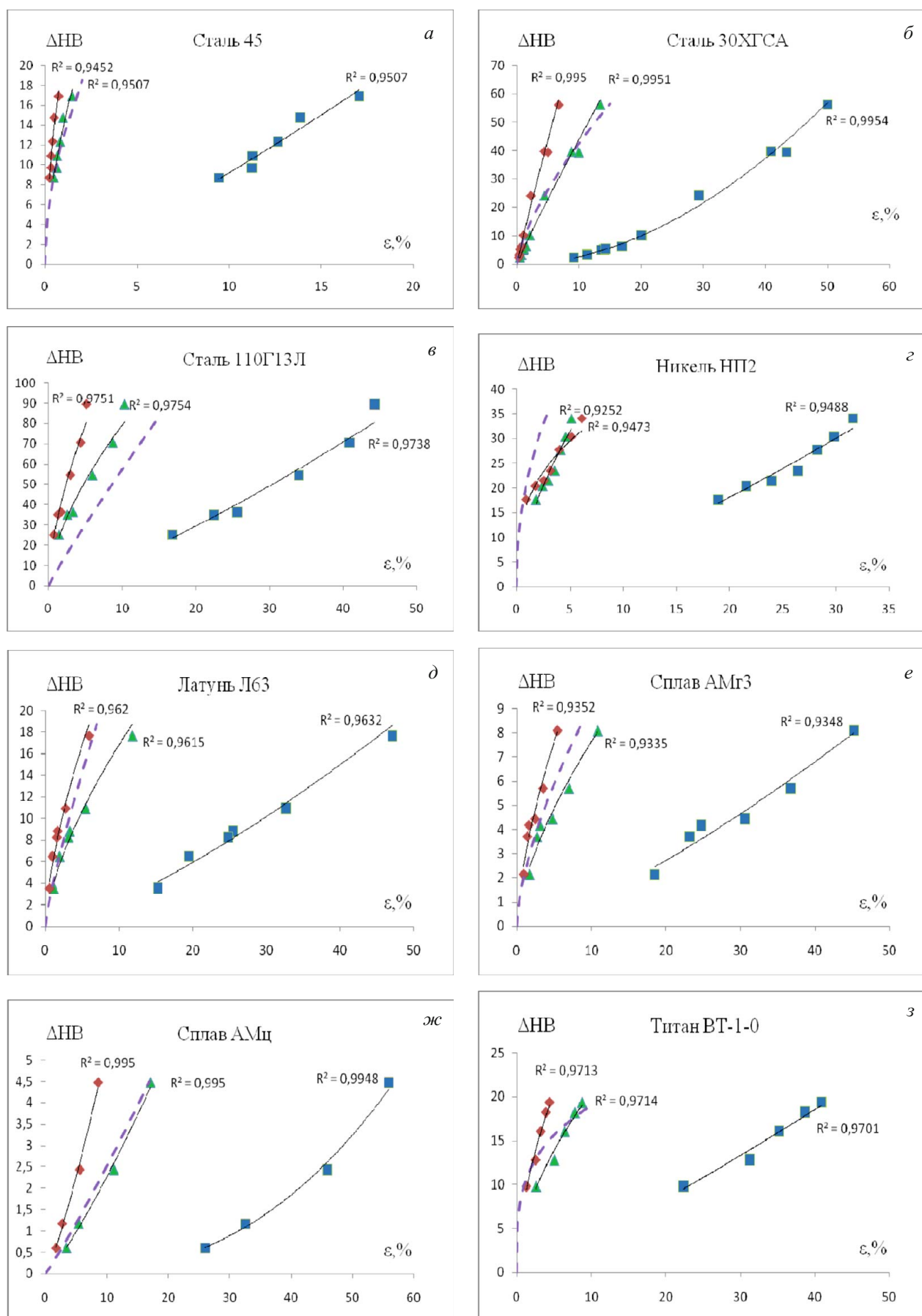


Рис. 3. Зависимости приращения твердости ΔHB дна отпечатка сталей и сплавов от степени деформации при выражении ε в виде d/D (■), $(M-F)/M$ (◆) и M/M' (▲), описываемые соответствующими линиями тренда (—), а также аналогичные зависимости (---), установленные при прокатке материалов близкого состава

В случае выражения ϵ в виде отношения площадей M/M' по формуле (5) полученные зависимости ($\blacktriangle$) оказываются достаточно близкими к установленным при прокатке [1 – 3], особенно для сталей и сплавов одинаковых марок. При этом обращает на себя внимание, что при существенном различии в исходной твердости двух видов образцов из стали 30ХГСА (143 и 220 HV) полученные для них значения ΔHV (ΔHB) удовлетворительно ложатся на общую для образцов обоих видов зависимость $\Delta HB = f(\epsilon)$.

Подобным образом соотносятся с представленными в литературе и значения постоянных A , x (табл. 2) аппроксимационной зависимости $\Delta HB = A\epsilon^x$.

Указанные обстоятельства могут свидетельствовать о том, что имеющиеся в литературе зависимости $\Delta HB = f(\epsilon)$, установленные для прокатки металлов, с достаточной достоверностью могут быть использованы для определения твердости поверхности дна отпечатка от вдавливания шарика в случае представления ϵ для этого способа деформирования в виде отношения площадей отпечатка M и полусферы M' . Например, для степени пластической деформации $\epsilon = 5\%$, вычисленной по формуле (5), расхождение между величинами ΔHB , рассчитанными по формуле (2) при значениях A , x из табл. 2, для прокатки и вдавливания шарика составляет: 6,7 кгс/мм² (18,4 %) для стали 45; 3,4 кгс/мм² (12,8 %) для стали 30ХГСА; 0,2 кгс/мм² (15 %) для алюминиевого сплава АМц. Можно предположить, что такое расхождение при определении твердости вполне допустимо при проведении инженерных расчетов.

Таким образом, исходя из результатов экспериментов по замеру твердости дна отпечатков, получаемых при вдавливании с различной интенсивностью в образец шарика, установлены зависимости приращения твердости ΔHB от степени пластической деформации ϵ для широкого круга сталей и сплавов.

Показано, что при выражении ϵ в виде отношения диаметров отпечатка и шарика полученные зависи-

мости $\Delta HB = f(\epsilon)$ находятся в полном несоответствии с аналогичными зависимостями, установленными при деформировании соответствующих материалов прокаткой. В то же время при выражении ϵ в виде отношения площадей поверхности отпечатка M и полусферы M' указанные зависимости достаточно близки. Поэтому можно заключить, что в случае представления степени пластической деформации ϵ при вдавливании шарика в виде (5) получаемые зависимости $\Delta HB = f(\epsilon)$ с достаточной точностью могут быть перенесены на случай деформирования прокаткой, и наоборот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. — М.: Металлургия, 1973. — 224 с.
2. Третьяков А. В., Трофимов Г. К., Гурьянова М. К. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. Справочник. — М.: Машиностроение, 1971. — 250 с.
3. Марганцовистая сталь / Пер. с англ. Б. А. Белоуса; под ред. М. Е. Блантера. — М.: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1959. — 60 с.
4. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. — М.: Машиностроение, 1987. — 328 с.
5. Кудрявцев И. В., Петушков Г. Е. Влияние кривизны соприкасающихся поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом / Повышение прочности деталей машин поверхностным деформированием / Материалы II научно-технической конференции. — Пермь: Пермский политехнический институт, 1967. С. 40 – 52.
6. Марковец М. П. Построение диаграмм истинных напряжений по твердости и технологической пробе / ЖТФ. 1949. Т. XIX. Вып. 3. С. 371 – 382.
7. Матюнин В. М. Деформационные характеристики и константы материалов при испытаниях ступенчатым и непрерывным вдавливанием индентора / Заводская лаборатория. 1992. Т. 52. № 11. С. 56 – 58.
8. Матюнин В. М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 216 с.