

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

МЕТАЛЛУРГИЯ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАТЕРИАЛООБРАБОТКА

УДК 620.171

В. В. Шевельков

ТВЁРДОСТЬ — КРИТЕРИЙ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Показано, что оценка упрочнения металлов и сплавов по критерию твёрдости даёт возможность сравнивать материалы с различным уровнем пластичности, даже абсолютно хрупких с пластичностью, близкой к нулевым значениям. Для оценки упрочнения металлов и сплавов с учётом их плотности введена характеристика — удельная твёрдость HV/ρ . Представлена сравнительная оценка некоторых материалов по удельной твёрдости.

Ключевые слова: твёрдость, упрочнение металлов и сплавов, деформация, удельная прочность, удельная твёрдость, критерий упрочнения.

Обычно о твёрдости как характеристики металлических материалов говорят, когда речь заходит о поверхностном упрочнении, эффективности методов химико-термической обработки, обработке резанием, контроле качества термической обработки.

Однако твёрдость можно рассматривать и как сравнительный критерий упрочнения металлов и сплавов после закалки и отпуска (старения), когда другие методы оценки или неприемлемы, или требуют дорогостоящего оборудования, например, для высококачественных закалённых сталей, высокопрочных лёгких сплавов с умеренными или малыми запасами пластичности. При сравнении прочности дисперсионно-твердеющих сплавов в условиях повышенных температур и, обычно считаемых хрупкими металлами, с температурой хрупко-вязкого перехода в обычных условиях значительно выше комнатной, например, вольфрама, кремния и хрома, твёрдость — единственный показатель, характеризующий способность сопротивляться пластической деформации.

Твёрдость металла измеряют при помощи воздействия на его поверхность наконечником, изготовленным из малодеформирующегося материала (закалённая сталь, алмаз, сапфир или твёрдый сплав) и имеющего форму шарика, конуса, пирамиды или иглы.

Существуют несколько способов измерения твёрдости, различающихся по характеру воздействия. Твёрдость можно измерять вдавливанием наконечника (способ вдавливания), царапанием поверхности (способ царапания), ударом или по отскоку наконечника — шарика. Твёрдость, определённая царапанием, характеризует сопротивление разрушению, определённая по отскоку, характеризует упругие свойства; определённая вдавливанием, — сопротивление пластической деформации.

Наибольшее применение получило измерение твёрдости вдавливанием. В результате вдавливания с достаточно большой нагрузкой поверхностные слои металла, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остаётся отпечаток. Особенность происходящей при этом деформации заключается в том, что она протекает только в небольшом объёме, окружённом недеформированным металлом. В таких условиях испытания, близких к всестороннему сжатию, возникают главным образом касательные напряжения, а доля растягивающих напряжений незначительна по сравнению с получаемыми при других видах механических испытаний (на растяжение, изгиб, кручение, сжатие). Известно [1], что касательные напряжения определяют развитие пластической деформации, а нормальные — хрупкое разрушение. Возникающие при измерении твёрдости в поверхностном слое образца под индентором сложные напряжённые состояния характеризуются наибольшим коэффициентом мягкости (отношение максимальных касательных напряжений к максимальным нормальным) $\alpha = 2$ по сравнению с другими видами механических испытаний, включая и статистическое растяжение ($\alpha = 1/2$) [2, 3]. Поэтому при измерении твёрдости вдавливанием пластическую деформацию испытывают не только пластичные, но и также металлы (например, чугун), которые при обычных механических испытаниях (на растяжение, сжатие, кручение, изгиб) разрушаются хрупко почти без макроскопически заметной пластической деформации.

Таким образом, твёрдость характеризует сопротивление пластической деформации и представляет собой механическое свойство металла, отличающееся от других его механических свойств способом измерения.

Соотношение между напряжением и деформацией для металлических материалов часто исследуют, проводя испытания на растяжение, и при этом получают диаграмму растяжения или кривую течения (рис. 1). Хотя при растяжении поперечное сечение образца уменьшается, напряжение обычно вычисляют, относя силу к исходной площади поперечного сечения, а не к уменьшенной, которая давала бы истинное напряжение. При малых деформациях это не имеет особого значения, но при больших может приводить к заметной разнице. На рис. 1 представлены кривые деформация — напряжение для материалов с неодинаковой пластичностью. Пластичность — это способность материала удлиняться без разрушения, но и без возврата к первоначальной форме после снятия нагрузки. Начальный линейный участок кривой заканчивается в точке предела текучести, где начинается пластическое течение. Для металла с нулевой пластичностью разрушение наступает ещё до достижения своего предела прочности при растяжении (кривая 1), иногда даже на участке упругой деформации. Такая картина при испытаниях на растяжение наблюдается в сплавах с высоким уровнем внутренних напряжений, например, в среднеуглеродистой стали после её закалки в воде, титановом сплаве ВТ22 после закалки и старения при температурах 300–400 °С. Для относительно хрупкого материала ($\delta = 1\text{--}2\%$) высшая точка диаграммы, его предел прочности на растяжение, соответствует разрушению (кривая 2). Для пластичного материала ($\delta = 25\%$) предел прочности на растяжение достигается тогда, когда скорость уменьшения поперечного сечения при деформировании становится больше скорости деформационного упрочнения

(кривая 3). На этой стадии в ходе испытания начинается образование «шейки» (локальное ускоренное уменьшение поперечного сечения). Хотя способность образца выдерживать нагрузку уменьшается, материал в шейки продолжает упрочняться. Испытание заканчивается разрывом шейки образца.

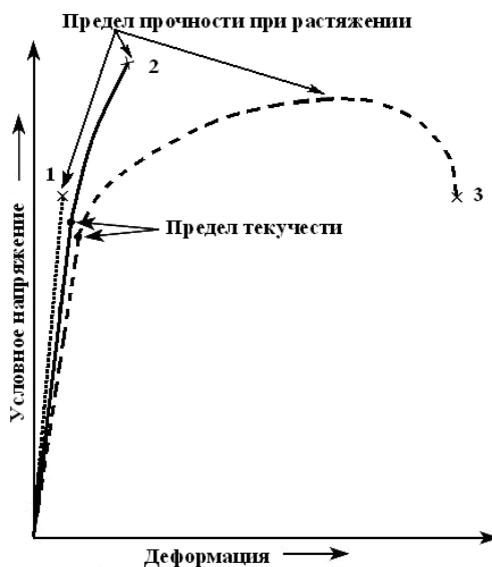


Рис. 1. Диаграммы растяжения для металлов с разной пластичностью 1 — абсолютно хрупкого ($\delta = 0\%$), металл разрушается до достижения своего предела прочности при растяжении; 2 — относительно хрупкого ($\delta = 1,2\%$), металл разрушается по достижении своего предела прочности при растяжении; 3 — пластичного ($\delta = 25\%$), металл разрушается, пройдя через свой предел прочности

Упругие и пластические свойства при сжатии обычно весьма сходны с тем, что наблюдается при растяжении (рис. 2). Кривая соотношения между условным напряжением и условной деформацией при сжатии проходит выше соответствующей кривой для растяжения только потому, что при сжатии поперечное сечение образца не уменьшается, а увеличивается. Если по осям графика откладывать истинное напряжение и истинную деформацию, то кривые практически совпадают, хотя при растяжении разрушение происходит раньше. На форму кривой соотношения между условным напряжением и условной деформацией при растяжении влияет масштабный фактор, размеры образцов для испытаний.

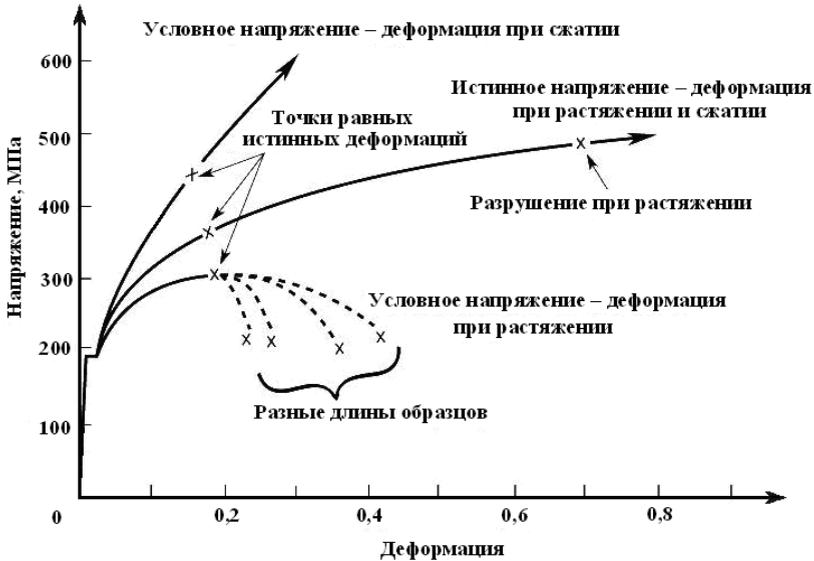


Рис. 2. Диаграммы растяжения и сжатия

Между твёрдостью пластичных металлов, определяемой способом вдавливания, и другими механическими характеристиками (главным образом, пределом прочности), существует количественная зависимость. Величина твёрдости характеризует предел прочности металлов, получающих в испытаниях на растяжение сосредоточенную пластическую деформацию (шейку). Это связано с тем, что при испытаниях на растяжение наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению и отнесённой к его первоначальной площади (предел прочности), отвечает сосредоточенная пластическая деформация (образование шейки), а не разрушение образца. Такая пластическая деформация аналогична деформации, создаваемой в поверхностных слоях металла при измерении твёрдости вдавливанием наконечника.

Между пределом прочности и твёрдостью существует для многих материалов линейная связь [4–6]. Ещё в 1912 году Н. А. Минкевич в Журнале Русского металлургического общества привёл следующие зависимости между пределом прочности и числом твёрдости **НВ** для различных металлов:

Сталь с твёрдостью **НВ**:

120–175	$\sigma_B \approx 0,34НВ,$
175–450	$\sigma_B \approx 0,35НВ.$

Медь, латунь, бронза:

Отожженная	$\sigma_B \approx 0,55НВ,$
Наклепанная	$\sigma_B \approx 0,40НВ.$

Алюминий и алюминиевые сплавы с твердостью НВ:

20–45	$\sigma_B \approx (0,33 \div 0,36)НВ.$
-------------	--

Дуралюмин:

отожженный	$\sigma_B \approx 0,36НВ,$
после закалки и старения	$\sigma_B \approx 0,35НВ.$

Подобные количественные зависимости не наблюдаются для хрупких материалов, которые при испытаниях на растяжение (или сжатие, изгиб, кручение) разрушаются без заметной пластической деформации, а при измерении твёрдости получают пластическую деформацию.

Таким образом, оценка упрочнения металлов и сплавов по критерию твёрдости даёт возможность сравнивать материалы с различным уровнем пластичности, даже абсолютно хрупких с пластичностью, близкой к нулевым значениям. Испытания на растяжение таких материалов не дают возможности определить их уровень прочности, т. к. разрушение наступает ещё до достижения предела прочности, иногда даже на участке упругой деформации.

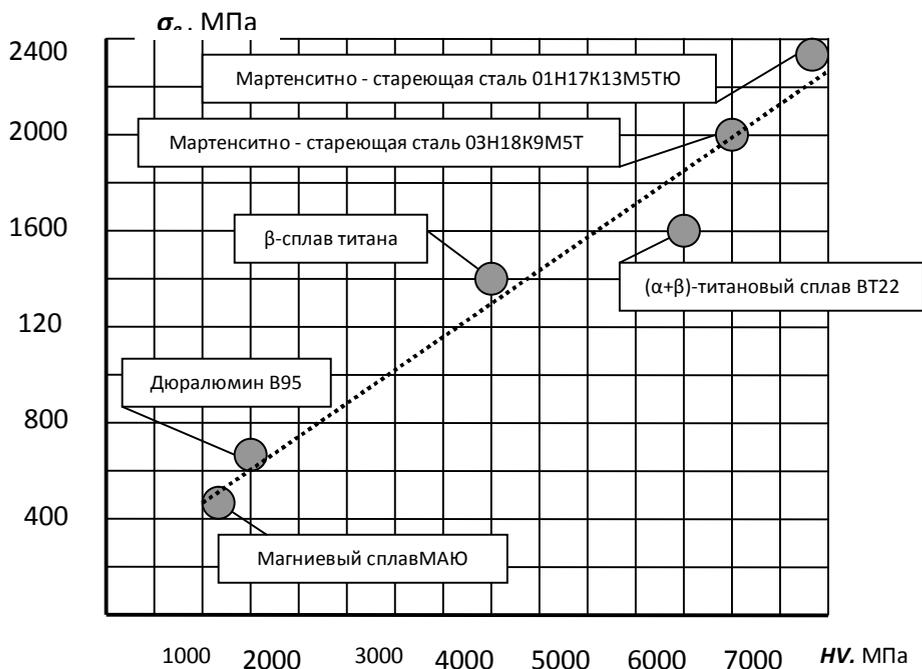


Рис. 3. Сравнительная оценка упрочнения материалов

Такая оценка может быть произведена путём сравнения твёрдости материалов по Виккерсу (рис. 3). Измерение твёрдости методом Виккерса имеет ряд преимуществ. Алмазная пирамида в методе Виккерса позволяет определить твёрдость практически любых металлических материалов. Ещё более важное преимущество метода Виккерса перед методом Бринелля — геометрическое подобие отпечатков при любых нагрузках (для данного материала и данной пирамиды). Числа твёрдости HV и НВ хорошо совпадают до НВ450. При более высокой твёрдости метод Бринелля даёт искажение результатов из-за деформации стального шарика.

Оценка упрочнения металлов и сплавов с учётом их плотности вызывает необходимость введения такой характеристики как удельная твёрдость HV/ρ , имеющей размерность, как и удельная прочность — километры. Сравнительная оценка

упрочнения материалов с учётом их плотности будет выглядеть уже несколько иначе (рис. 4).

Выбор в качестве характеристики сравнения именно удельной твёрдости обусловлен тем, что до температур 400–5000 °С сплавы титана по удельной прочности превосходят все другие металлические материалы, кроме бериллия. Однако временное сопротивление разрыву, как характеристика, полученная в условиях одноосного растяжения, является функцией пластичности и не отражает истинного упрочнения сплава при пластичности близкой к нулю, что и наблюдается при старении закаленного сплава BT22 в интервале температур 300–4000 °С [7, 8].

Возможность получения высоких прочностных характеристик сплавов титана определяется их способностью подвергаться упрочняющей термической обработке. С ростом содержания β -стабилизирующих элементов склонность к упрочнению возрастает. Сплавы вблизи критической концентрации могут быть термически обработаны до наибольших значений временного сопротивления разрыву (>1200 МПа) и по удельной прочности могут превосходить даже высокопрочные стареющие стали. Так, среди ряда дисперсионно-твердеющих сталей и сплавов титановые сплавы, особенно двухфазные критического состава, к которым относится и представленный сплав BT22, имея низкую плотность, обладают и наибольшей удельной твёрдостью.

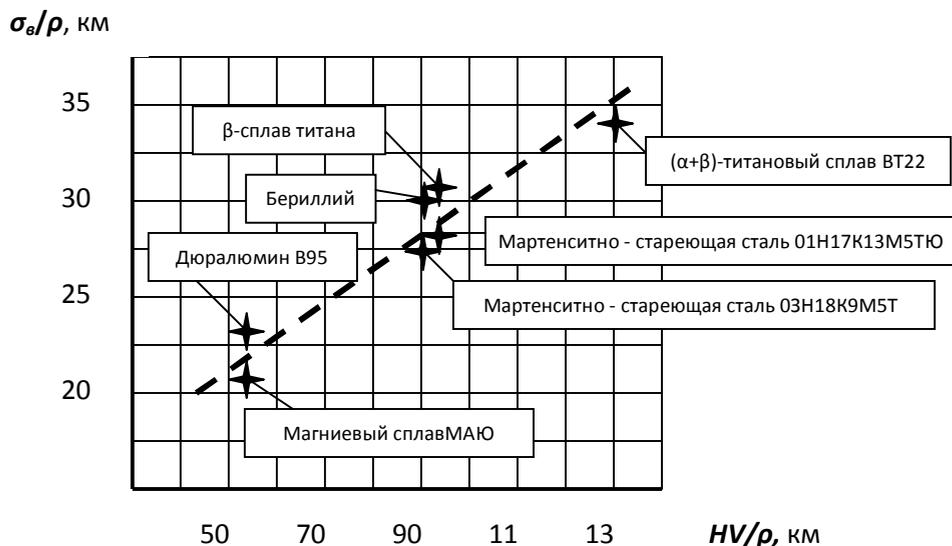


Рис. 4. Сравнительная оценка материалов по критериям удельной прочности и удельной твёрдости

Повышение удельной твёрдости (прочности) дисперсионно-твердеющих сталей и сплавов сопровождается соответствующим снижением вязко-пластических свойств, которые могут достигать, как в сплаве BT22, практически нулевых значений при максимальной удельной твёрдости. Поэтому для двухфазных титановых сплавов типа BT22 остро стоит задача повышения вязко-пластических характеристик

при сохранении достаточно высоких прочностных свойств ($\sigma_b=1000-1150$ МПа, $\sigma_{0,2}=950-1100$ МПа) [7, 8].

Титановые сплавы, кроме высокой удельной прочности, обладают и высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, низкими коэффициентами термического расширения и теплопроводности, немагнитностью, высокой температурой плавления и хорошей технологичностью.

Таблица 1

Характеристики некоторых металлов и сплавов

Материал	Прочность σ_b , МПа	Удельная прочность σ_b/ρ , км	Твёрдость HV , МПа	Удельная твёрдость HV/ρ , км	Удельная жёсткость, E/ρ , км
Магниевый сплав <i>МАЮ</i>	430	21	1000	55,4	2,3
Дюралюмин <i>B96</i>	700	23	1500	55	2,4
($\alpha+\beta$)-титановый сплав <i>BT22</i>	1600	34	6000	132	2,6
β -сплав титана Ti-13V-11Cr-3Al-Zr- Mo	1440	31	4000	95	2,6
Мартенситно ста- реющая сталь <i>03Н18К9М5Т</i>	2000	27	6500	92	2,6
Мартенситно ста- реющая сталь <i>01Н17К13М5ТЮ</i>	2400	30	7600	95	2,6
Бериллий чистотой 99,5 %	554	30	1670	91	16,1

Удельная прочность (твёрдость) любых материалов, используемых в транспортных средствах, всегда является важной характеристикой в результате её прямой связи с энергетическими расходами, эксплуатационными характеристиками и коммерческими соображениями. Современная техника характеризуется высокой энергонапряженностью в связи, с чем основной задачей конструкторов и технологов становится снижение массы машины, приходящейся на единицу получаемой или потребляемой мощности — кг/кВт. Материалы с высокой удельной прочностью (твёрдостью) находят широкое применение в авиации, ракетной и космической технике, а также в автомобилестроении, судостроении и других отраслях промышленности. Наибольшей удельной прочностью (твёрдостью) обладают сплавы титана, бериллия, высокопрочные мартенситно-старееющие стали (табл. 1).

Бериллий и сплавы на его основе выгодно отличаются от сплавов титана высокой удельной жёсткостью.

Удельная жёсткость — это важнейшая характеристика современных конструкционных материалов. Высокая удельная жёсткость в сочетании с хорошей удельной прочностью позволяет снизить массу конструкции при повышении её прочности и жёсткости. Это особенно важно в самолёто- и ракетостроении. По удельной жёсткости бериллий превосходит даже металлы, обладающие наибольшим модулем упругости (вольфрам и молибден). К тому же высокий модуль упругости бериллия ($E = 310$ ГПа) мало изменяется при увеличении температуры до 450 °С, поэтому бериллий является одним из лучших материалов для деталей конструкций, где особенно важна собственная масса конструкции, жёсткость её силовых элементов.

По удельной теплоёмкости бериллий в 2,5 раза превосходит алюминий, в 4 раза — титан и в 8 раз — сталь; по электропроводности и теплопроводности занимает место за алюминием. Все эти свойства способствуют успешному применению бериллия в качестве теплозащитного материала в ракетной и космической технике.

Однако бериллий относится к числу редких металлов. Содержание его в земной коре небольшое — 0,0005 %. Малая распространённость в природе, сложная и дорогая технология извлечения из руд, получения из него полуфабрикатов и изделий определяют высокую стоимость бериллия. Помимо высокой стоимости, малой пластичности, низкой технологичности и анизотропии свойств к недостаткам следует отнести и токсичность бериллия. В связи с этим обработку его на металлорежущих станках проводят в специальных помещениях и в специальных пылезащитных костюмах и масках.

Мартенситно-стареющие стали с высоким содержанием никеля, кобальта и молибдена, например 01Н17К13М5ТЮ, а также стали подобных композиций, но не содержащие кобальта, относятся к числу наиболее высокопрочных свариваемых конструкционных материалов. После закалки (охлаждение в воде или на воздухе) стали отмеченного класса, как правило, имеют мартенситное строение с высокой плотностью дислокации (10^{10} – 10^{12} см²). Окончательной термообработкой сталей является старение в интервале температур 480 – 5500 °С длительностью 3–5 часов, обеспечивающие достижение высоких прочностных свойств ($\sigma_{\text{в}} = 1800$ – 2200 МПа, $\sigma_{0,2} = 1600$ – 2000 МПа). При этом удельная прочность их равна 27–30 км.

Интенсивное упрочнение мартенситно-стареющих сталей в процессе старения в основном связано с протеканием ранних стадий формирования вторичного интерметаллида Ni_3Ti или $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ в безуглеродистом мартенсите ($C \leq 0,01$ %). Природа упрочнения таких сталей в процессе старения и сопутствующее ему снижение пластичности и ударной вязкости ещё не достаточно исследованы [9].

Все рассмотренные выше материалы с высокой удельной прочностью (твёрдостью) в настоящее время находят применение в ответственных конструкциях специального машиностроения. Однако, чтобы добиться преимущественного применения того или иного сплава, необходимо повысить его прочность (значительно снизить плотность не реально) без потери пластичности и вязкости (надёжности): у сплавов магния надо достичь прочности 500, у сплавов алюминия — 750, титана — 1300 и железа — 2200 МПа [10]. Решение этой задачи должно основываться на знании физической картины упрочнения и охрупчивания сплавов, изменения их свойств, механизмов, кинетики протекания фазовых и структурных превращений в процессе термической обработки.

Выводы:

1. Твёрдость можно рассматривать как сравнительный критерий упрочнения металлических материалов.

2. Твёрдость характеризует сопротивление пластической деформации и представляет собой механическое свойство металла, отличающееся от других его механических свойств способом измерения. При измерении твёрдости вдавливанием пластическую деформацию испытывают не только пластичные, но и металлы, которые при обычных механических испытаниях (на растяжение, сжатие, кручение, изгиб) разрушаются хрупко без макроскопически заметной пластической деформации.

3. Оценка упрочнения металлов и сплавов по критерию твёрдости даёт возможность сравнивать материалы с различным уровнем пластичности, даже абсолютно хрупких с пластичностью, близкой к нулевым значениям.

4. Оценка упрочнения металлов и сплавов с учётом их плотности вызывает необходимость введения такой характеристики как удельная твёрдость HV/ρ . Наибольшей удельной твёрдостью обладают сплавы титана, бериллия, высокопрочные мартенситно-стареющие стали.

Литература

1. Бернштейн М. Л., Зайковский В. А. Структура и механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1970. 280 с.
2. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов, 3-е изд., переработ. В двух частях. М.: Машиностроение, 1974. Ч. 1. 472 с., Ч. 2. 368 с.
3. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
4. Дроз М. С., Славский Ю. И., Барон А. А. Развитие методов определения твёрдости металлов // Заводская лаборатория, 1978, Т. 44, № 5, С. 612–615.
5. Павлов И. М., Тарасович Ю. Ф., Лешкевич Г. Г., Шелест А. Е. Связь между твёрдостью титановых сплавов и их прочностью // Заводская лаборатория, 1978. Т. 44, № 5. С. 605–608.
6. Павлов И. М., Лешкевич Г. Г. Изучение зависимости между твёрдостью и механическими свойствами титановых сплавов // Пластическая обработка металлов и сплавов. М.: Наука, 1979. С. 94–105.
7. Паршин А. М., Барсуков В. Н., Шевельков В. В. Влияние термоциклической обработки на повышение пластичности и вязкости крупнозернистых полуфабрикатов титанового сплава ВТ22 // Повышение качества, надёжности и долговечности изделий из конструкционных, жаропрочных, порошковых и инструментальных сталей и сплавов. Л.: ЛДНТП, 1986. С. 33–37.
8. Шевельков В. В. Структурные превращения в титановом сплаве ВТ22 при старении // Металловедение и термическая обработка металлов. № 8. 1992. С. 33–37.
9. Паршин А. М., Оленин М. И. Упрочнение и охрупчивание мартенситно-стареющих сталей в связи с особенностями изменений физических свойств // Оптимизация структуры и свойств сталей и сплавов в свете реализации программы «Интенсификация-90». Л.: ЛДНТП, 1987. С. 12–15.
10. Шевельков В. В. Оценка упрочнения металлических материалов по критерию удельной твёрдости // Труды Псковского государственного политехнического института. Псков. Издательство ППИ, 2005, № 9.3. С. 290–294.

Об авторе(ах)

Шевельков Валерий Владимирович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теория механизмов и машин», механико-машиностроительный факультет, Псковский государственный университет, Россия.

HARDNESS — CRITERION HARDENING OF METALLIC MATERIALS

It is shown that estimation of hardening of metals and alloys on hardness criterion makes it possible to compare materials with different levels of plasticity, even absolutely fragile with the plasticity close to zero. For the evaluation of hardening of metals and alloys with regard to their density introduced a feature — specific hardness HV/ρ . Presents a comparative assessment of some materials on specific hardness.

Keywords: *hardness, hardening of metals and alloys, deformation, strength, specific hardness, criterion hardening.*

About the author(s)

Shevelkov Valery Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theory of Mechanisms and Machines, Faculty of Mechanical Engineering, Pskov State University, Russia.