

УДК 620.19

## ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Крень А.П.<sup>1,3</sup>, Ланцман Г.А.<sup>1</sup>, Мацулевич О.В.<sup>1</sup>, Протасеня Т.А.<sup>1</sup>, Никифоров А.В.<sup>1</sup>, Делендик М.Н.<sup>2</sup>,  
Пантелеев К.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

<sup>2</sup>МИПК и ПК БНТУ

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Установлен характер изменения статической твердости при повышенных температурах для различных металлов. Показано, что для армко-железа наблюдается практически постоянное значение твердости до температуры 300 °С, далее ее снижение с резким повышением при повышении температуры выше линии  $A_3$  на диаграмме железо-углерод. Получены зависимости изменения модуля упругости и динамической твердости. Показано, что изменение модуля упругости менее значительно, чем изменение твердости при повышении температуры.

**Ключевые слова:** твердость, модуль упругости, температура, металл, микроударное индентирование.

## EVALUATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF METALS AT HIGH TEMPERATURES

Kren A.P.<sup>1,3</sup>, Lantsman G.A.<sup>1</sup>, Matsulevich O.V.<sup>1</sup>, Pratasenia T.A.<sup>1</sup>, Delendik M.N.<sup>2</sup>, Pantišaleyeu K.U.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of applied physics of the NAS of Belarus

<sup>2</sup>Branch of the Belarusian National Technical University "Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development"

<sup>3</sup>Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The nature of the change in static hardness at elevated temperatures for various metals has been established. It is shown that for armco-iron there is an almost constant hardness value up to a temperature of 300 °C, then it decreases with a sharp increase as the temperature rises above line  $A_3$  on the iron-carbon diagram. The dependences of the change in elastic modulus and dynamic hardness were obtained. It has been shown that the change in elastic modulus is less significant than the change in hardness with increasing temperature.

**Key words:** hardness, elastic modulus, temperature, metal, micro-impact indentation.

Адрес для переписки: Крень А.П., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь  
e-mail: alekspk@iaph.bas-net.by

Испытание материалов индентированием в настоящее время является одним из наиболее востребованных методов определения механических характеристик. Его большое распространение отчасти обусловлено простотой требований к образцу: чистая и ровная поверхность. Эта простая геометрия обеспечивает значительные преимущества по сравнению с традиционными испытаниями на растяжение или сжатие, которые требуют вырезки материала из изделия и тщательной обработки образцов. Еще большей популярности метода способствовала автоматизация процессов измерений, возможность проведения испытаний в нескольких точках, работа в различных режимах нагружения (циклическом, однократном и др.). В последнее время намечается тенденция к изучению высокотемпературных свойств металлов и сплавов данным методом. Однако статическое индентирование занимает относительно большое время для проведения измерения, за которое образец успевает потерять часть тепла (от укладки на столик до получения результата может пройти несколько минут). При этом установки, которые

имеют термокамеры и позволяют провести локальный нагрев с помощью токов высокой частоты, являются громоздкими и дорогостоящими. В этой связи нами была изучена возможность определения высокотемпературных характеристик металлов с помощью динамического микроударного индентирования, которое позволяет провести измерения безобразцовым методом.

Основным оборудованием при испытаниях являлся прибор типа ТПЦ-7DL с удлиненной насадкой, позволяющей проводить измерения для нагретых до высоких температур металлов. Прибор работает совместно с электронным блоком, обеспечивающим оцифровку исходного сигнала, получение диаграммы вдавливания и расчет таких характеристик как твердость и модуль упругости [1; 2]. В качестве образцов для испытаний были взяты образцы из армко-железа, стали 09X18H10T и алюминиевого сплава Д16 с различной исходной статической твердостью  $H_c$  (таблица 1). Для измерения температуры использовался тепловизор FLIR, откалиброванный по специальной методике на этих же образцах (рисунок 1).

Таблица 1 – Исходные характеристики образцов

Образец	Твердость НВ, ед
Армко-железо (ТЧЖ)	85
09Х18Н10Т	161
Алюминий	94

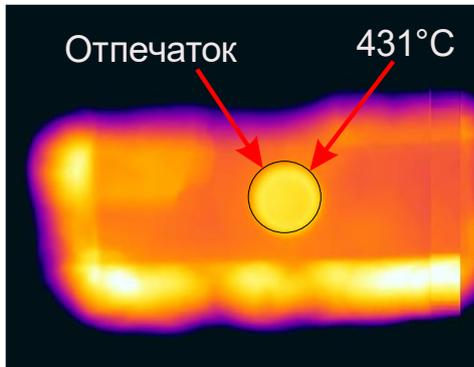


Рисунок 1 – Измерение температуры в отпечатке

На рисунке 2 показано изменение статической  $H_c$  и динамической твердости  $H_d$  для армко-железа в диапазоне температур от 20 до 1100 °С. Как видно из графика, характер их изменения в обоих случаях подобен, однако динамическая твердость имеет большую чувствительность к температуре.

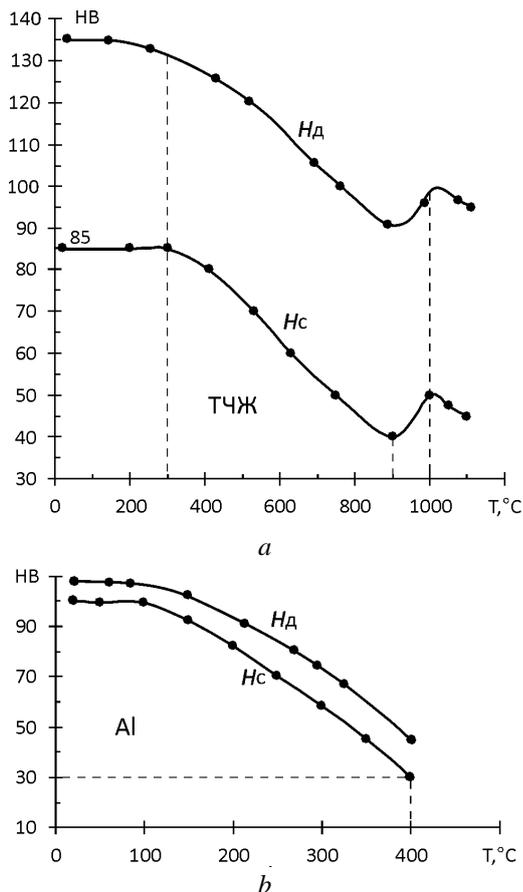


Рисунок 2 – Результаты измерения твердости при повышенной температуре: а – армко-железо, б – Д16

Для ТЧЖ снижение твердости происходит уже при 200 °С, в то время как  $H_c$  начинает уменьшаться только при 300 °С. При этом в обоих случаях наблюдается повышение твердости при  $T > 900$  °С, что может свидетельствовать о полиморфных превращениях в металле. Также можно отметить, что коэффициент динамичности  $H_d/H_c$  тем больше, чем меньше твердость, что полностью соответствует существующим данным. Для алюминия разница между твердостями также имеется, однако она не так значительна.

Изменение модуля упругости показано на рисунке 3. Здесь можно отметить, что модуль упругости  $E$ , измеренный динамическим индентированием, менее чувствителен к температуре. Наименьшее изменение можно отметить для нержавеющей стали. Этот факт также указывает на то, что измерение статической твердости по коэффициенту восстановления скорости становится невозможным, поскольку динамическая твердость является функцией как пластических, так и упругих свойств. И в случае непропорционального снижения модуля упругости пересчетные коэффициенты будут изменяться и являться функцией температуры.

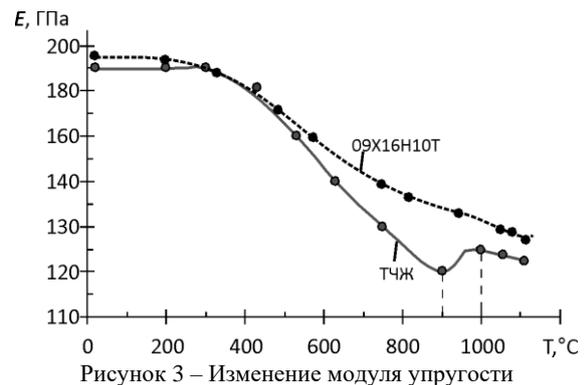


Рисунок 3 – Изменение модуля упругости

Полученные результаты – определение величины «горячей твердости» и модуля упругости – могут использоваться при разработке режимов пластической деформации металлов (прокатке, штамповке, вытяжке и др.), для подбора оптимальных температур технологических процессов на прокатных станах с целью снижения энергетических затрат и износа оборудования.

#### Литература

1. Influence of the dynamic indentation parameters on the behavior of metals during the penetration of an indenter with a spherical tip / A.P. Kren [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2021. – № 4. – P. 563–569.
2. Kren, A.P. Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation / A.P. Kren, M. Delendik, A. Machikhin // International Journal of Impact Engineering. – 2022. – V. 162. – P. 104141.