

ОЦЕНКА МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ЛЕДЕБУРИТНОГО КЛАССА МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЕМ

Кенько В.М., Степанкин И.Н.

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

Введение. Определение локального модуля упругости, например, отдельной фазы или тонкого слоя материала, традиционным способом, затрудняется сложностью создания образцов для проведения испытаний на растяжение. Поэтому в последнее время для решения данной задачи используют метод микроиндентирования [1 – 3], в основе которого лежат решения задачи Герца об упругом вдавливании шара в полупространство.

Применение инденторов другой формы, конических или пирамидальных, также обеспечивает высокую точность определения искомых характеристик, так как выявлено, что характер распределения давления при изменении формы индентора не оказывает существенного влияния на упругую реакцию испытуемого материала [2]. Определение модуля упругости осуществляется по углу наклона θ ветви разгрузки диаграммы (рис. 1) [1 – 3]. Линейный характер указанной части кривой свидетельствует об упругом взаимодействии испытуемого материала и индентора.

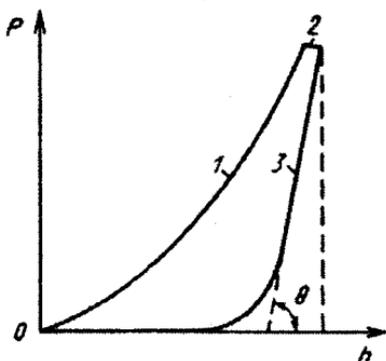


Рисунок 1 – Диаграмма вдавливания: h – глубина вдавливания; P – сила вдавливания; 1 – нагружение; 2 – выдержка; 3 – разгружение

Для расчета модуля упругости используется зависимость 1:

$$E = (1 - \nu^2) \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{A_p} \left(\frac{dw}{dP} - \frac{dh_n}{dP} \right) - \frac{1 - \nu_u^2}{E_u} \right]^{-1} \quad (1)$$

где A_p – площадь проекции упругого контакта, m^2 , зависящая от глубины полученного отпечатка h_c , м; w – максимальная глубина внедрения индентора, м; E и E_u – модули упругости, Па; ν , ν_u – коэффициенты Пуассона двух контактирующих материалов; P – нагрузка, Н.

Величина $\frac{dh_n}{dP}$ – суммарная поправка на податливость нагружающего узла рассчитывается по зависимости 2:

$$\frac{dh_n}{dP} = \frac{dh_u}{dP} + \frac{dh_\delta}{dP}, \quad (2)$$

где, $\left(\frac{dh_u}{dP}\right)$ – податливость измерительного прибора и $\left(\frac{dh_\delta}{dP}\right)$ – податливость системы индентор-державка.

В настоящей работе методика индентирования применена для определения объемного модуля упругости высоколегированной стали ледебуритного класса.

Объекты и методики исследований. В качестве объектов исследований использовали образцы из быстрорежущей стали Р6М5. Твердость образцов составляла 60-61 HRC.

Процесс индентирования проводили на испытательном стенде «Instron». Целесообразность применения данного стенда обусловлена необходимостью приложения на индентор достаточно высоких нагрузок, значительно превышающих возможности других типов подобного оборудования. Усилие, приложенное к индентору должно быть таковым, чтобы площадь, полученного отпечатка в несколько раз превышала размеры структурных составляющих материала [1]. Площадь зерна сталей, соответствующая 10 баллу действительного зерна аустенита по ГОСТ 5639-82 составляет порядка 100 мкм². Длина наиболее крупных овальных и прямоугольных карбидных включений может достигать 20 мкм при ширине 3 мкм [4], а площадь составит порядка 60 мкм².

Для интегральной оценки контактного взаимодействия поверхности индентора с рассматриваемыми материалами, в соответствии с рекомендациями изложенными в [1] приняли, что площадь проекции упругого контакта должна в пять и более раз превышать суммарную площадь зерна и карбидного включения ($A_p = 800 \text{ мкм}^2$). Тогда глубина отпечатка h_c после внедрения индентора Виккерса должна составить не менее чем 5,7 мкм. Для этого усилие индентирования должно превышать 7,3 Н, исходя из того, что микротвердость высоколегированных сталей после закалки и отпуска превышает 8,5 ГПа [4].

Результаты исследований и их обсуждение. Согласно мнению авторов работ [2, 5] значительное влияние на достоверность полученных экспериментальных данных оказывает точность регистрации глубины отпечатка индентора и, как следствие, погрешность в расчете площади упругого контакта A_p . Это подтверждается результатами экспериментов (рис. 2), углубление индентора

на расстояние порядка 10 мкм происходит без значительного возрастания нагрузки. Из-за этого нулевое положение на диаграмме не совпадает с координатой начальной точкой внедрения индентора. Определить её однозначно невозможно. Это не позволяет с необходимой точностью рассчитать глубину индентирования w , глубину отпечатка h_c и площадь упругого контакта A_p .

Кроме того, при исследовании многофазного материала на начальном этапе внедрения индентора, воспроизводится характер его контактного взаимодействия с отдельными структурными составляющими материала.

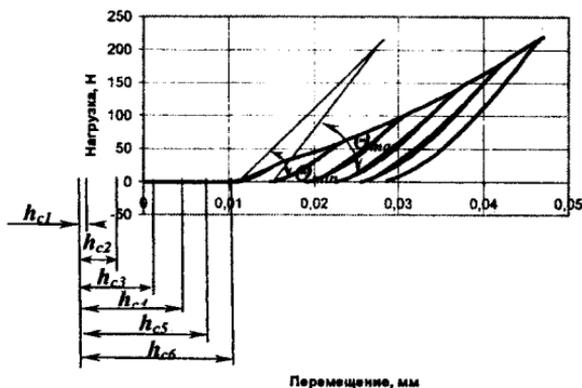


Рисунок 2 – Кривые упругопластического взаимодействия, полученные при испытании быстрорежущей стали Р6М5 индентором Виккерса

Следует также обратить внимание на тот факт, что при малых глубинах индентирования трудно учесть погрешность, обусловленную закруглением вершины индентора [6].

Для достижения необходимой точности при определении контактной глубины, испытания проводили многократным вдавливанием индентора, не изменяя его положения. В каждом последующем цикле индентирования нагрузку на индентор увеличивали. Величину контактной глубины h_c рассчитывали как разность между координатой, полученной по окончании испытания в текущем цикле и условной начальной координатой индентора, зафиксированной в первом цикле испытаний. Таким образом, дискретное увеличение абсолютного значения контактной глубины сопровождалось уменьшением относительной погрешности, рассматриваемой величины. Очевидно, что при достижении определенного числа циклов нагружения индентора величина контактной глубины a , следовательно, и рассчитываемая по её значению площадь упругого контакта максимально приближается к своему истинному значению.

Рассчитанное по зависимости (1) значение модуля упругости стали Р6М5, по результатам первых циклов внедрения индентора значительно превышает истинную величину упругой константы (рис. 3). Это обусловлено описанными выше затруднениями в определении координаты начальной точки внедрения индентора в первом цикле. Поэтому за начальную координату индентирования приняли величину, которая однозначно отражается на диаграмме первого цикла испытаний, как величина, соответствующая началу внедрения.

Совершенно очевидно, что такой подход приводит к некоторому занижению глубины индентирования в первом цикле испытаний. Это связано с тем, нами не могут быть учтены погрешности, отражающие взаимодействие индентора с микрошероховатостями образца, а также проявление упругости или же, наоборот, податливости отдельных фаз композиционного материала, подвергаемого испытанию.



Рисунок 3 – Зависимость расчетного значения модуля упругости от величины приложенной к индентору нагрузки; максимальное (1) и минимальное (2) значения рассчитанной величины для одного и того же цикла нагружения.

Кроме того, линейная аппроксимация начального участка ветви разгрузки не дает однозначного положения касательной к графику. В результате угол наклона данной ветви – Θ , в каждом цикле нагружения находится в некотором диапазоне ограниченном максимальным и минимальным значениями (см. рис. 2). В результате рассчитываемая по полученным данным величина модуля упругости также находится в диапазоне между кривыми 1 и 2 (рис. 3). Индентирование с нагрузками 140 Н и более обеспечивает получение стабильных результатов в диапазоне $1,81 \dots 2,4 \cdot 10^{11}$ Па. Среднее значение величины модуля упругости, полученного расчетным путем, составляет $2,11 \cdot 10^{11}$ Па. Как видно, оно несколько отличается от величины модуля упругости опре-

делённого при стандартном растяжении образцов, которое составляет $2,25 \cdot 10^{11}$ Па [7]. Эта погрешность, по-видимому, обусловлена податливостью нагружающей системы.

Обратный расчет из условия, что модуль упругости исследуемого материала составляет стандартную величину, показал, что суммарная поправка на податливость составляет 6,12 нм/Н, т.е. податливость нагружающей системы стэнда «Instron» составляет величину порядка 4 нм/Н.

Заключение. Уточнена методика определения модуля упругости посредством индентирования и проведены экспериментальные исследования на образцах из инструментальной стали Р6М5.

Показано, что метод индентирования обеспечивает высокую достоверность при определении объемных свойств многофазных материалов.

Выявлено, что расчетное значение модуля упругости во многом зависит от точности определения начальной координаты индентора при его углублении в испытуемый материал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булычев, С.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Булычев, В.П. Алехин. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
2. Булычев, С.И. Соотношение между восстановленной и невосстановленной твердостью при испытании наномикроиндентированием // С.И. Булычев // ЖТТ.– 1999. – Т. 69. – Вып. 7.– С. 42 – 48.
3. Oliver, W.C. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.P. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – V. 7, № 6. – P. 1564 – 1575.
4. Кенько, В.М. Износостойкость матриц холодновысадочной оснастки / В.М. Кенько, И.Н. Степанкин, А.И. Столяров // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 3. – С. 402 – 406.
5. Malzbender, J. The P-h² relationship in indentation / J. Malzbender, G. de With, J. den Toonder // Journal of Materials Research. – 2000. – Vol.15, № 5. – P. 1209 – 1212. (рассматривается влияние закругления конического индентора на точность получаемых при индентировании результатов).
6. Hay, Jach C. A critical examination of the fundamental relation used in the analysis of nanoindentation data / Jach C. Hay, A. Bolshakov, G.M. Pharr. // Journal of Materials Research. – 1999. – Vol. 14, № 6. – P. 2296 – 2305.
7. ГСССД 9-79: Сталь инструментальная быстрорежущая. Механические свойства. Таблицы стандартных справочных данных. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 7 с.