МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВПАДИНЫ ЧАСТИЧНО-РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

И. С. Буканова, И. И. Ятло, Е. О. Одинаев

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Для определения площади, занимаемой частично-регулярным микрорельефом (ЧРМР) в виде конусных впадин шахматного расположения по ГОСТ 24773-81, необходимо знание зависимости между усилием вдавливания деформирующего элемента и глубиной впадины. Микрорельеф наносится центробежно-инерционным накатыванием на внутренней поверхности охватывающей детали неподвижного соединения типа «корпус-втулка».

В настоящее время широкое применение нашло использование метода конечных элементов для восстановления диаграммы σε по данным индентирования (диаграмма вдавливания P-h). При индентировании применяют разнообразные типы инденторов (шар, пирамиды, конусы) с разными углами заточек этих инденторов.

Моделирование внедрения индентора в упругопластический материал было выполнено с применением программного комплекса ANSYS. Индентор и образец рассматривались как тела вращения и задачу решали в осесимметричной постановке. Конечноэлементная модель, используемая в расчетах, приведена на рис. 1. Для построения конечно-элементной сетки был выбран двухмерный элемент объемного напряженнодеформированного состояния PLANE183 с восемью узлами, который может использоваться для моделирования осесимметричного деформированного состояния [4]. Геометрические размеры моделируемого образца выбирались такими, чтобы пластическая деформация не достигала боковых границ образца. Граничные условия задавались в перемещениях. Узлы вдоль оси вращения могут перемещаться только вдоль оси у и все узлы нижней грани закреплены. Для осуществления контакта индентора с материалом задавали контактную пару индентор-тело, считая

элементами контактирующими верхнюю грань тела и боковую поверхность индентора С контактными элементами TARGE169. СОNTA172. На поверхности контакта принимали закон трения Амонтона-Кулона. Поставленную задачу решали с применением процедуры Ньютона-Рафсона и фронтального прямого решателя. Разбиение конечноэлементной сетки было равномерное с областью сгущения под индентором. Алмазный индентор рассматривали как линейно упругий изотропный материал с модулем Юнга Е=1140 ГПа и коэффициентом Пуассона µ=0,07. Материал, в который осуществляется внедрение индентора, - упругопластический. Чисто упругая деформация имеет место только в начале процесса индентирования и подчиняется закону Гука. В пластическом состоянии материал подчиняется условию текучести Мизеса в виде степенной функции от двух эмпирических коэффициентов а и b:

(1

где σ - напряжение текучести Мизеса; ε полная деформация по Мизесу; а и b – числовые коэффициенты. В исходном состоянии в материале отсутствуют внутренние напряжения. Максимальную величину вертикального перемещения индентора изменяли от 25 нм до 500 нм. Для обеспечения оптимального соотношения между точностью расчета и временем вычисления выполнили конечноэлементное моделирование внедрения индентора в материал с разным количеством элементов в теле. Измельчение сетки в окрестностях элемента было проведено с применением команды «EREFINE». На рис. 1 приведены разные варианты конечноэлементной сетки, которые использовали при расчетах.

 $\sigma = a \varepsilon^{b}$,

В таблице 1 представлены параметры конечно-элементной сетки и результаты расчета. Диаграмма вдавливания представляет собой зависимость усилия внедрения P от глубины внедрения индентора h. Она хорошо описывается квадратичной зависимостью в виде закона Кика [6]:

$$P = ch^2 \tag{2}$$

где *P* - усилие внедрения, *h* - глубина внедрения, *c* - числовой коэффициент.

Здесь коэффициент ^С зависит от угла индентора 2^{*α*} и упругопластических свойств материала, в который вдавливается индентор, и практически не зависит от глубины

вдавливания. Для проверки адекватности конечно-элементного моделирования процесса внедрения конического индентора в упругопластический материал были проведены эксперименты по внедрению конического индентора в цилиндрические образцы из стали 40Х диаметром и высотой по 20 мм со шлифованными торцевыми поверхностями на испытательной машине. Индентор был изготовлен из твердого сплава ВК-5 с углом при вершине 120⁰.



Было произведено 25 вдавливаний на глубину до 1,6 мм, при этом фиксировали изменения усилия вдавливания и глубины внедрения индентора. По результатам экспериментов построили диаграмму вдавливания.

Вариант конечно-элементной сетки на рисунке 1.	а	б	В	Г
Размер элемента, мкм	0,8-1,6	0,3-0,6	0,1-0,2	0,03-0,06
Количество элементов	600	1996	6484	19656
Коэффициент с	9,476	9,248	8,951	8,789
Время расчета, сек	410	890	2064	60880

Таблица 1- Параметры конечно-элементной сетки и р	рез	ультаты	расчета
---	-----	---------	---------

Деформационное упрочнение описывали степенной зависимостью (1) с коэффициентами а=637,4 МПа и b=0,186, определенной экспериментально по результатам испытания образцов на растяжение, изготовленных из того же материала [5], с модулем Юнга E=206 ГПа и коэффициентом Пуассона μ =0,34. Для стали 40Х на рис. 2 приведены экспериментальная и расчетная диаграмма вдавливания. Среднее отличие экспериментальных и расчетных данных составляет 6,68 %, что подтверждает адекватность построенной конечно-элементной модели.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВПАДИНЫ ЧАСТИЧНО-РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА



Рисунок 2 – Экспериментальная (П-2) и расчетная (Δ-1) диаграммы вдавливания

По результатам моделирования для индентора с углом 2α=120° и стали 40Х HB=217-249 была получена зависимость :

$$h = \sqrt{\frac{P}{HB^{0,404}}} \tag{3}$$

Таким образом, зависимость (3) может служить для определения площади единичной микронеровности и площади, занимаемой ЧРМР.

Список литературы:

1. Булычев С.И., Алехин В.П. Метод кинетической твердости и микротвердости в испытаниях вдавливанием индентором // Заводская лаборатория, 1987, № 11. С. 76 – 79

2. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроин-

дентированием: Современные зарубежные методики. М.: Физический факультет МГУ, 2004. 100 с.

3. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.

4. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. - М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

5. Смирнов С.В., Смирнов В.К., Солошенко А.Н., Швейкин В.П. Определение сопротивления деформации по результатам внедрения конического индентора // Кузнечно-штамповочное производство, 2000, №8. С. 3 – 6.

6. Chollacoop N., Dao M., Suresh S. Depth-sensing instrumented indentation with dual sharp indenters. Acta Materialia, 2003. № 51. P.3713-3729.