

Одинаев Е.О., Сафронова Е.А.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Научный руководитель – И.И. Ятло, к.т.н., доцент

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ НАПЛЫВА ВПАДИНЫ МИКРОРЕЛЬЕФА МОДЕЛИРОВАНИЕМ ВНЕДРЕНИЯ КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

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 при накатывании и глубиной впадины. Кроме того, для оценки маслоёмкости такого микрорельефа необходимо учитывать параметры образующихся при этом наплывов.

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

В данной работе 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. Конечно-элементная модель, используемая в расчетах, приведена на рисунке 1. Для построения конечно-элементной сетки был выбран двухмерный элемент объемного напряженно-деформированного 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 u и все узлы нижней грани закреплены. Для осуществления контакта индентора с материалом задавали контактную пару индентор-тело, считая контактирующими элементами верхнюю грань тела и боковую поверхность индентора с контактными элементами TARGET169, CONTA172. На поверхности контакта принимали закон трения Амонтона-Кулона. Поставленную задачу решали с применением процедуры Ньютона-Рафсона и фронтального прямого решателя. Разбиение конечно-элементной сетки было равномерное с областью сгущения под индентором. Алмазный индентор рассматривали как линейно упругий изотропный материал с модулем Юнга $E=1140$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\mu=0,07$. 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 a и b :

$$\sigma = a\varepsilon^b, \quad (1)$$

где σ – напряжение текучести Мизеса; ε – полная деформация по Мизесу; a 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 конечно-элементное моделирование внедрения индентора в материал с разным количеством элементов в теле. Измельчение сетки в окрестностях элемента было проведено с применением команды «EREFINE». Диаграмма вдавливания представляет собой зависимость усилия внедрения P от глубины внедрения индентора h . Она хорошо описывается квадратичной зависимостью в виде закона Кика [6]:

$$P = ch^2 \quad (2)$$

где P – усилие внедрения, h – глубина внедрения, c – числовой коэффициент.

Здесь коэффициент c зависит от угла индентора 2α и упругопластических свойств материала, в который вдавливается индентор, и практически не зависит от глубины вдавливания. Из формулы 2 следует, что напряженно-деформированное состояние при вдавливании конического индентора в упругопластическое полупространство обладает свойством подобия. Т.е. форма распределения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации будет одинакова для всех глубин вдавливания.

На рисунке 1 показана первоначальная геометрия конечно-элементной сетки. Сетку задавали регулярную размерностью 70x70 ячеек и с переменным шагом.

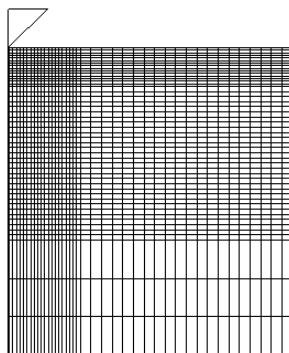


Рисунок 1. Сетка конечно-элементного моделирования

Была проведена серия экспериментов по внедрению. Каждый индентор внедрялся три раза. Внедрение осуществлялось таким образом, чтобы зона пластической деформации не выходила за границы образца.

Критерием проверки адекватности моделирования выступала кривая вдавливания и профиль наплыва металла, образующегося в процессе индентирования. На рисунке 2 для примера сплошными и пунктирными линиями приведены экспериментальные усредненные и расчетные диаграммы вдавливания для стали 45.

Геометрию напльва в двух взаимоперпендикулярных направлениях от центра лунки измеряли профилографом модели 252. На рисунке 3 для стали 45 показаны экспериментальные усредненные профили буртиков (сплошные линии) и расчетные (пунктирные линии) для инденторов 94° и 120° .

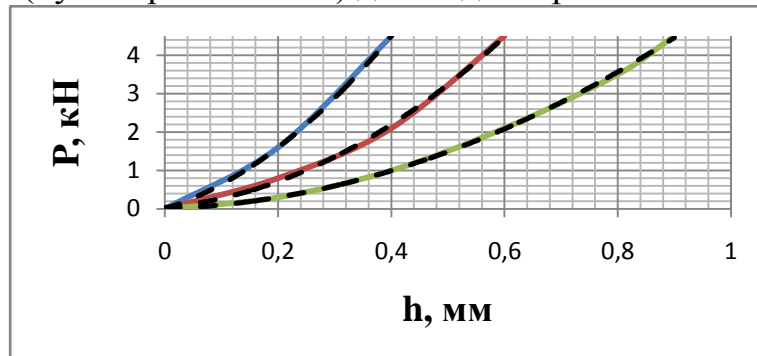


Рисунок 2. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктирные линии) кривые вдавливания для стали 45: 1 – $\alpha = 94^\circ$, 2 – $\alpha = 120^\circ$, 3 – $\alpha = 143^\circ$

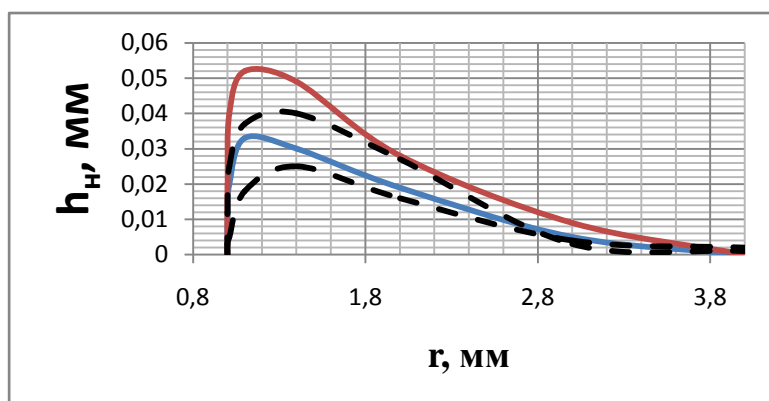


Рисунок 3. Измеренные в экспериментах (сплошные линии) и рассчитанные (пунктирные линии) профили напльвов: 1, 2 – $\alpha = 94^\circ$, 3, 4 – $\alpha = 120^\circ$

Близость кривых вдавливания и профилей буртиков свидетельствует о достаточно точных результатах компьютерного моделирования.

Библиографический список

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 микроиндентированием: 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