

УДК 621.774

О. В. Нахайчук, д.т.н.

Винницкий государственный аграрный университет

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ПЛОСКОГО ШТАМПА В МЕТАЛЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования процесса внедрения плоского штампа в жёсткопластичный материал с применением различных методов, включая метод конечных элементов, произведена оценка степени использования пластичности наиболее деформированных элементов в зависимости от геометрических и силовых факторов.

Ключевые слова: штамп, пластичность, деформирование, металл, метод конечных элементов, напряжение, деформации.

I. Вступление.

Для осуществления и оптимизации некоторых процессов пластического деформирования (холодного выдавливания полостей деталей пресс-форм, штампов, прямоугольных шлицевых канавок, поперечно-винтовой прокатки) представляется важным всестороннее изучение нестационарного процесса внедрения плоского штампа. Подобную задачу решали с учётом и без учёта контактного трения методом линий скольжения [1], верхней оценки [2, 3], методом конечных элементов (МКЭ) на начальной стадии внедрения как упруго-пластическую задачу [4]. Представляет интерес подход к решению данной задачи Г. А. Смирнова-Аляева [5]. На основании экспериментальных исследований он обосновал, что начиная с величины внедрения $h \approx 0,1a$ (где a - ширина штампа), форма наружной поверхности и внешние размеры зоны пластической деформации, возникающей в области деформируемого тела, мало зависят от формы торца пуансона. Уже на начальном этапе внедрения под штампом образуется застойная область в форме полукруга, следовательно, при решении поставленной задачи Г. А. Смирнов-Аляев рекомен-

дует указанную область считать как бы продолжением пуансона. Таким образом, задача решения вдавливания плоского штампа, начиная с указанной ранее величины глубины, возможна в рассмотрении решения задачи внедрения штампа со сферическим торцом.

II. Постановка задачи.

Анализ работ [1 – 5] указывает на то, что остаются неисследованными ряд вопросов: влияние трения и упрочнения на напряжённно-деформированное состояние и форму прилегающей поверхности, определение границ жёсткопластических областей, кинематики течения металла, мощности и силовых факторов на разных стадиях внедрения. С другой стороны, на современном этапе развития обработки металлов давлением представляет интерес развитие комплексных методов, позволяющих определять напряжения σ_{ij} , скорости частиц u_i , скорости деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}$, использованный ресурс пластичности ψ для опасных областей деформирования с учётом условия пластичности и граничных условий для технологических процессов, основой которых является внедрение в металл плоских штампов.

III. Результаты.

В данной работе предлагается комплексный подход, включающий применением метода определения напряжений в пластической области по распределению твёрдости, метод делительных сеток, МКЭ. На первом этапе исследований были проведены эксперименты на составных образцах, изготовленных из сплава Д1, на поверхности которых была нанесена квадратная сетка размером 1 мм. Вдавливание осуществляли на твердомере типа «Бринель» через специальные переходники с фиксированной нагрузкой. Как показали опыты, наиболее близкая схема кинематики перемещения металла относительно полученной экспериментально отражена в решении Г. А. Смирнова-Аляева, хотя подход Л. Прандтля тоже может быть использован для решения подобных задач методом верхней оценки [2].

Используя полученные в работе [6] уравнения для определения напряжений при внедрении скруглённого индентора, общее усилие вдавливания на единицу длины определялось в виде трёх слагаемых, где F_1 - составляющая от радиальных напряжений, действующих на контактной поверхности; F_2 - составляющая от касательных напряжений на той же поверхности; F_3 - усилие, необходимое для преодоления трения по боковой поверхности наплыва штампа. Результаты расчёта данных усилий применены для разработки программ по МКЭ.

Вариационная форма МКЭ [2], позволяющая определить кинематически допустимое поле скоростей при обеспечении абсолютного минимума функционала, имеет вид:

$$\Phi = \sum_i \int_V (\bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV) - \sum_j \{F\}^T \{u\} + \sum_i \lambda_i \dot{V}_i. \quad (1)$$

Первая часть функционала выражает мощность внутренних сил (мощность пластической деформации), вторая часть – мощность внешних сил.

Для вычисления напряжений в области пластических деформаций был использован метод множителей Лагранжа. Задача нахождения скоростей узлов элементов, перемещающихся на определённой стадии, решалась путём минимизации функционала при заданных линейных ограничениях и граничных условиях в скоростях. Полагалось, что при нахождении точного поля скоростей, множители Лагранжа становились равными компонентам гидростатического давления при достижении функционала минимума.

Варьирование скоростей в некотором узле учитывалось лишь в области влияния этого узла, что существенно сократило время счёта на ЭВМ. Другой особенностью было введение функции упрочнения в первую часть функционала.

Составляющие второй части функционала определяли из силового анализа действия контактной области: штамп – пластичный материал с учётом количества

элементов, находящихся в контакте на данной стадии. Для рассматриваемых нестационарных процессов внедрения штампов важную роль играет определение соответствия каждой стадии количеству элементов, принимающих участие в перемещении. Важным является также выбор начального поля скоростей, необходимого для процедуры оптимизации. В данном случае граница жёсткой и пластической областей, а также значения полей скоростей на стадиях определялись с использованием теории подобия Р. Хилла [1]. Сама процедура нахождения поля скоростей заключалась в следующем: задавалось начальное поле скоростей; проводилось дифференцирование функционала по скоростям узлов и результат приравнивался к нулю:

$$\left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial u_1} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial v_1} = 0; \dots; \frac{\partial \Phi}{\partial u_n} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial v_n} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_1} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_2} = 0; \dots; \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_n} = 0; \right. \quad (2)$$

решая совместно систему уравнений (2), определялось допустимое поле скоростей и гидростатическое (среднее) напряжение для каждого элемента.

Граничные условия на контакте определялись с учётом заданных перемещений вершин элементов. С целью определения мгновенного положения инструмента была принята модель относительного движения – полагалось, что инструмент остаётся неподвижным, а перемещается только заготовка.

При расчётах в программной среде Math CAD 2001 PRO учитывались факторы изменения глубины внедрения в зависимости от усилий, коэффициентов трения, времени прохождения каждой стадии. В работах [6 - 8] показано, что характеристики контактного трения влияют на форму свободной поверхности, которая меняется в процессе внедрения штампа от идеального положения (без трения, как показано Р. Хиллом [1]), до некоторого – при сухом трении [9], что было учтено в расчётах. Значения коэффициента трения определяли на различных глубинах внедрения штампа по методикам, изложенных в работах [6 - 10].

Анализ механики процессов внедрения штампов выполнялся на основе деформационной теории пластичности. На ЭВМ реализовалась процедура поэтапного расчёта на последовательных шагах по времени Δt . На каждом последующем этапе в качестве начального приближения использовали поле скоростей, полученное на предыдущем этапе, которое уточняли для нового положения. Далее находились координаты и составляющие тензора деформации для узловых точек в конце каждого этапа:

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t)\Delta t; \quad \varepsilon_{ij}(t + \Delta t) = \varepsilon_{ij}(t) + \dot{\varepsilon}_{ij}(t)\Delta t \quad (3)$$

Упрочнение на стадиях учитывалось функцией:

$$\sigma_u = A e_u^n, \quad (4)$$

где показатели A и n для исследуемого материала были определены, используя метод определения напряжений в пластической области по распределению твёрдости Г. Д. Деля [11]. В расчётах вместо напряжения текучести при чистом сдвиге использована величина интенсивности касательных напряжений $k = \sigma_u / \sqrt{3}$. Величины интенсивности напряжений рассчитывались по зависимости (4).

При проведении исследований определялись составляющие тензора деформаций, значения гидростатических (средних напряжений) σ , накопленной интенсивности деформаций \bar{e}_u и интенсивности напряжений σ_u для каждого элемента, участвующего в перемещениях на соответствующих стадиях. Параметры диаграммы пластичности материалов определялись по результатам испытаний образцов на кручение, растяжение и осадку [12]. Для элементов на различных стадиях были построены пути деформирования в координатах: показатель напряжённого состояния η – накопленная интенсивность деформаций \bar{e}_u , а показатель напряжённого состояния находился как:

$$\eta_1 = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}. \quad (5)$$

Использованный ресурс пластичности вычисляли суммированием этапных значений: $\psi = \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_n$, применяя критерий [13].

Расчёт был закончен, когда исходная область конечных элементов переместилась в область чистого сдвига. На рис. 1 представлены перемещения вершин элементов на стадиях и распределение величин ψ наиболее деформированных элементов.

Анализ приведённых результатов по определению использованных ресурсов пластичности показал, что областями, наиболее близкими к разрушению, являются контактные поверхности с формообразующими инструментами, что согласуется с исследованиями подобных процессов, приведённых в научной литературе.

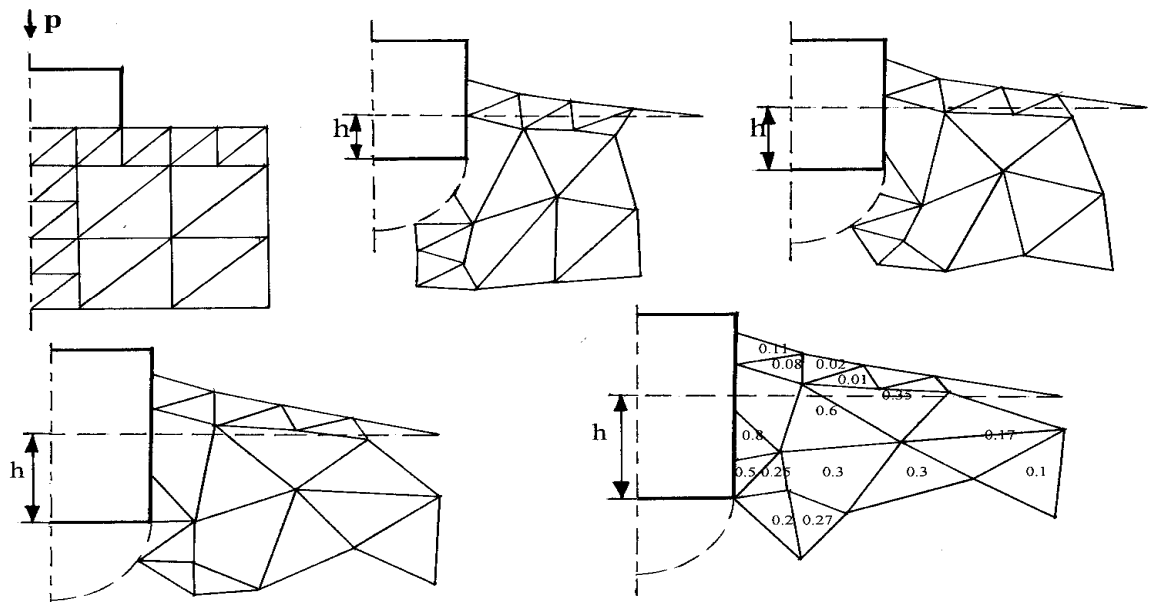


Рис. 1. Перемещения на стадиях и распределение величин ψ наиболее деформированных элементов

IV. ВЫВОДЫ.

1. Разработан комплексный подход к изучению механики внедрения штампа в условиях нестационарного формоизменения, произведена оценка степени использования пластичности наиболее деформированных конечных элементов.

2. Для оценки деформируемости заготовок необходимо наиболее точно определять границу жёсткопластической области на этапах деформирования, учитывать влияние трения как функцию от технологических факторов, изучить историю деформирования материальных частиц заготовок в опасных областях, т. е. иметь информацию о тензорных полях σ_{ij} , ε_{ij} в зависимости от координат материальных точек металла и времени.

3. Показана возможность локального определения использованного ресурса пластичности конечных элементов.

4. Представленные материалы могут быть применены для проектирования и расчёта других нестационарных процессов, включающих внедрение штампов различных форм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – ГИТТЛ, 1956. – 407 с.
2. Унксов Е. П., У. Джонсон и др. Теория пластических деформаций металлов. М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
3. Бровман Т. В. Определение верхних оценок при обработке давлением с определением размеров зоны пластической деформации // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1991. - № 9. – С. 38-39.
4. Друянов Б. А., Непершин Р. И. Теория технологической пластичности. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
5. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ие, 1978. – 368 с.

6. Нахайчук О. В. Напряжённно-деформированное состояние при вдавлива-нии скруглённого индентора в жёсткопластическое полупространство // Удоско-налення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: Зб. наук. пр. – Краматорськ, 1999. – С. 28-32.

7. О. В. Нахайчук. Напряжённно-деформированное состояние при вдавлива-нии в пластичный материал инденторов различных форм // Удосконалення проце-сів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: Зб. наук. пр. Краматорск, 2000. – С. 41-47.

8. Нахайчук О. В. Исследование контактного трения при вдавливании кли-новидного инструмента // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії. – Краматорськ: ДДМА. – 2001. – С. 331-336.

9. Унксов Е. П., В. Л. Колмогоров, В. А. Огородников и др. Теорияковки и штамповки. М.: Машиностроение, 1992. – 710 с.

10. Нахайчук О. В. Напружено-деформований стан при вдавлюванні плоско-го індентора в жорсткопластичний напівпростір // Машинознавство.– 2001. – №7. – С. 6-9.

11. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распре-делению твёрдости. М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.

12. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пла-стическом формоизменении. - Киев: УМК 130, 1989. – 152 с.

13. Дель Г. Д., Огородников В. А., Нахайчук В. Г. Критерий деформируемо-сти металлов при обработке давлением // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. – № 4. - С 135-140.