

УДК 621.774

О.В. Нахайчук

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИКИ ВНЕДРЕНИЯ ПЛОСКОГО ШТАМПА В ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Винницкий государственный аграрный университет
ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2003 года

Представлены результаты комплексного исследования процесса внедрения плоского штампа в жесткопластический материал с применением различных методов, включая метод конечных элементов (МКЭ), произведена оценка степени использования пластичности наиболее деформируемых элементов в зависимости от геометрических и силовых факторов.

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 учетом и без учета контактного трения методом линий скольжения [1], верхней оценки [2,3], МКЭ на начальной стадии внедрения как упругопластическую задачу [4].

Несмотря на известность постановки данной задачи, остается неисследованным ряд вопросов: изучение и учет формы прилегающей поверхности, влияние трения и упрочнения на напряженно-деформированное состояние, определение границ жесткопластических 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 учетом условия пластичности и граничных условий для каждой конкретной задачи.

Для решения поставленных задач в данной работе предлагается комплексный подход с применением методов линий скольжения, делительных сеток, метода определения напряжений в пластической области по распределению твердости, МКЭ.

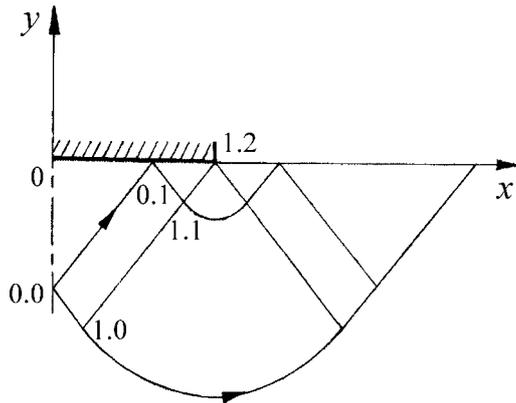


Рис. 1. Обобщенное решение В. Прагера для случая вдавливания плоского штампа

Задача вдавливания штампа в пластическое полупространство имеет 4 известных решения. Первые три можно проиллюстрировать с помощью рис. 1. Если длина отрезка 0–0.1 определяет жесткую (застойную) зону 0–0.1–0.0, движущуюся как твердое тело вместе со штампом, то тогда имеет место обобщенное решение В. Прагера [4]. Если точка 0.1 совпадает со серединой штампа, то это будет решение Р. Хилла; при совпадении с угловой точкой штампа – решение Л. Прандтля. В этих решениях поля напряжений совместимы с полями скоростей, они дают одинаковые давления, действующие на штамп, но различные поля скоростей и размеры (границы) жесткопластических областей.

Несколько иной подход к решению данной задачи предложил Г.А. Смирнов-Аляев [5]. Опираясь на результаты экспериментальных исследований, он обосновал, что, начиная с величины внедрения $h \approx 0.1R$ (рис. 2), форма наружной поверхности и внешние размеры зоны пластической деформации, возникающей в приконтактной области деформируемого тела, мало зависят от формы торца пуансона. Уже на начальном этапе внедрения под штампом образуется застойная область в форме полукруга, поэтому при решении поставленной задачи Г.А. Смирнов-Аляев рекомендует указанную область считать продолжением пуансона. Следовательно, решение задачи вдавливания плоского штампа, начиная с указанной ранее величины глубины, можно свести к решению задачи о внедрении штампа со сферическим торцом.

Для выяснения указанных факторов были проведены эксперименты на составных образцах, изготовленных из сплава Д1, на поверхности которых была нанесена квадратная сетка с шагом 1 мм. Вдавливание осуществляли на твердомере типа «Бринелль» через специальные переходники с фиксированной на-

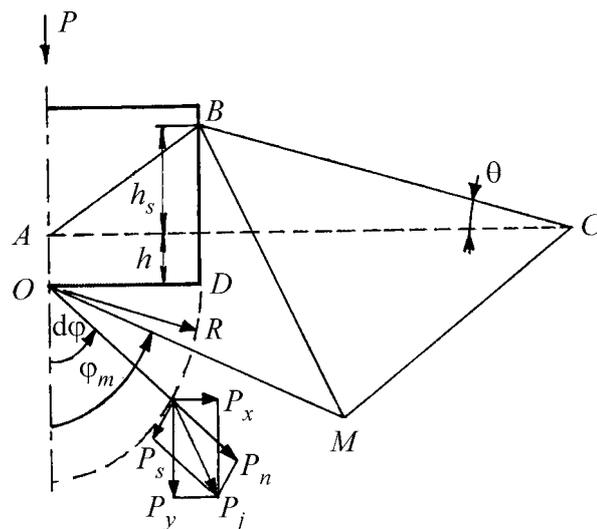


Рис. 2. Расчетная схема вдавливания штампа

72

грузкой. Как показали опыты, наиболее близкое описание возможно в рамках подхода Г.А. Смирнова-Аляева, хотя подход Л. Прандтля тоже может быть применен для решения подобных задач методом верхней оценки [3].

Используя полученные в работе [6] уравнения для определения напряжений при внедрении скругленного индентора, общее усилие вдавливания на единицу длины определяли в виде трех слагаемых:

$$P = P_1 + P_2 + P_3. \quad (1)$$

Здесь P_1 , P_2 – составляющие соответственно от радиальных и касательных напряжений, действующих на контактной поверхности; P_3 – усилие, необходимое для преодоления трения по боковой поверхности напыла штампа:

$$P_1 = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_r R \sin \varphi d\varphi; \quad P_2 = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau_{r\varphi} R \cos \varphi d\varphi; \quad P_3 = 2 f \tau_{r\varphi} (h_s + h), \quad (2)$$

где h_s – высота напыла по этой поверхности.

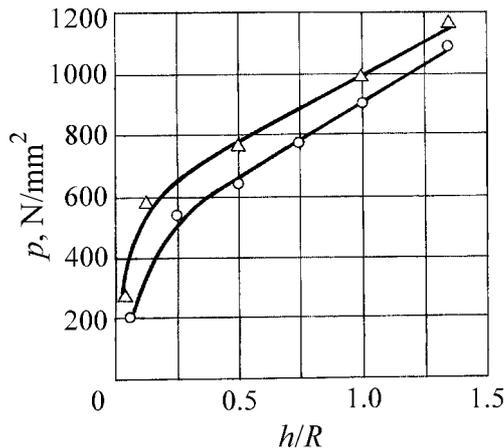


Рис. 3. Сравнение расчетных (○) и экспериментальных (△) данных по определению удельных усилий вдавливания

При определении усилия P_3 полагалось, что распределение касательных напряжений по боковой поверхности напыла штампа (рис. 2) изменяется по линейному закону от нуля в точке B до граничного в точке D , где f – коэффициент пропорциональности, значение которого при сухом трении можно принять $f = 0.1$ [5]. Сравнение теоретических и экспериментальных данных, приведенных на рис. 3, показало хорошую сходимость результатов, что явствует о приемлемости данного подхода.

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

$$\Phi = \sum_i \int \bar{\sigma} \dot{\epsilon}(u_1, u_2, \dots) dV - \sum_j \{F\}^T \{u\}. \quad (3)$$

Первый член функционала является мощностью внутренних сил (пластической деформации), второй член – мощностью внешних сил. Для вычисления напряжений в очаге деформации был использован метод множителей Лагранжа, который применительно к нашей задаче заключался в следующем: оптимизация вещественной функции $\Phi(u_1, u_2, \dots, u_n)$ достигает минимума

при наличии ограничивающих условий и эквивалентна определению условия стационарности функционала:

$$\Phi = \sum_i \int_V (\bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV) - \sum_j \{F\}^T \{u\} + \sum_i \lambda_i \dot{V}_i, \quad (4)$$

где λ_i – множители Лагранжа, \dot{V}_i – скорости изменения объема каждого элемента.

Задачу нахождения скоростей узлов элементов, перемещающихся на определенной стадии, решали путем минимизации функционала при заданных линейных ограничениях и граничных условиях в скоростях. При этом полагали, что при определении точного поля скоростей множители Лагранжа становились равными компонентам гидростатического давления при достижении функционала минимума, т.е. $\lambda_i = \sigma_{mi}$, тогда

$$\Phi = \sum_i \int (\bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV)_i - \sum_j \{F\}^T \{u\} + \sum_i \sigma_{mi} \dot{V}_i. \quad (5)$$

Сама процедура нахождения поля скоростей состояла в следующем:

- задавали затравочное поле скоростей;
- проводили дифференцирование функционала по скоростям узлов и по σ_{mi} и результат приравнивали к нулю:

$$\left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial u_1} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial v_1} = 0; \dots; \frac{\partial \Phi}{\partial u_n} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial v_n} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_1} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_2} = 0; \dots; \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_n} = 0; \right. \quad (6)$$

– решая совместно систему уравнений (6), находили кинематически допустимое поле скоростей и гидростатическое (среднее) давление для каждого элемента. При составлении данной системы уравнений применяли подход В.М. Сегала [7], при котором варьирование скоростей в некотором узле проводили в области его влияния.

Для рассматриваемого нестационарного процесса, как и для других, где применяются МКЭ, важную роль играет правильное определение соответствия каждой стадии количества элементов, участвующих в перемещении. В данном случае границу жесткой и пластической областей определяли с применением теории подобия Р. Хилла [1]. Такой же подход можно рекомендовать и для других нестационарных процессов.

Для второй части функционала составляющие транспонированной матрицы $\{F\}^T$ определяли из силового анализа действия контактной области штампа на пластический материал с учетом количества элементов, находящихся в контакте на данной стадии в такой последовательности:

- учитывая условие симметрии и используя эквивалентную схему [8], определяли усилие P_i в узле;

– учитывая, что $P_i = \sqrt{P_n^2 + P_s^2}$ и полагая $P_s = \mu P_n$, по составленной схеме действия сил на узел элемента находили:

$$P_x = \frac{P_i}{\sqrt{1+\mu^2}}(\mu \cos \varphi - \sin \varphi), \quad P_y = -\frac{P_i}{\sqrt{1+\mu^2}}(\mu \sin \varphi + \cos \varphi). \quad (7)$$

Для расчетов использовали зависимости $h = f(t, P, \mu)$, где μ – коэффициент трения.

Упрочнение на стадиях учитывали следующим образом. Проведенный анализ изотропного и анизотропного упрочнения изотропного материала [9] показывает, что свойства начально-изотропного и изотропно упрочняющегося материала полностью характеризуются экспериментально установленной функцией $\sigma_u(e_u)$, которую обычно аппроксимируют степенными зависимостями типа

$$\sigma_u = A e_u^n, \quad (8)$$

где показатели A и n для различных материалов приводятся в справочниках, хотя для любого исследуемого материала эти зависимости можно получить, используя метод определения напряжений в пластической области по распределению твердости Г.Д. Деля [10]. Тогда в расчетах вместо напряжения текучести при чистом сдвиге необходимо использовать величину интенсивности касательных напряжений $k = \sigma_u / \sqrt{3}$. Для исследуемого материала (дюралюминия Д1) коэффициенты $A = 560$ МПа; $n = 0.174$. Расчет проводили с использованием теории конечных деформаций:

– по найденному полю скоростей и коэффициентам матрицы функции формы определяли деформации элементов на стадиях:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\Delta t_i (b_i u_i + b_j u_j + b_m u_m)}{2S}, & \varepsilon_y &= \frac{\Delta t_i (c_i v_i + c_j v_j + c_m v_m)}{2S}, \\ j_{xy} &= \frac{\Delta t_i (c_i u_i + c_j u_j + c_m u_m + b_i v_i + b_j v_j + b_m v_m)}{2S}, \end{aligned} \quad (9)$$

где S – площадь элемента; $b_i, c_i, b_j, c_j, b_m, c_m$ – коэффициенты матрицы функции формы;

– вычисляли накопленную интенсивность деформации

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + 1.5 j_{xy}^2}; \quad (10)$$

– используя (8), определяли значения σ_u .

Компоненты тензора σ_{ij} находили через скорости деформаций и значения найденных гидростатических давлений [2].

В подобных задачах представляется важным корректное определение коэффициентов и сил трения. В настоящее время нет единой теории трения для процессов обработки металлов холодным пластическим деформированием, но, исходя из ранее проведенных нами исследований, можно предложить следующий подход. В работах [6,11,12] показано, что характеристикой контактного

трения может быть положение свободной поверхности, которое в процессе внедрения штампа изменяется в зависимости от трения [1,11]. Коэффициент трения следует рассматривать не как постоянную величину (что иногда принимается в расчетах по МКЭ), а как переменную, зависящую от условий деформирования и перечисленных выше факторов. Такой подход дает возможность существенно повысить нижнюю оценку при использовании метода линий скольжения, а с другой стороны, принимая в расчетах во второй части функционала (2) найденные значения μ , несколько «понизить» верхнюю оценку. Поэтому коэффициент трения считался величиной переменной и определялся в зависимости от глубины по методикам, изложенным в работах [6,11,12].

Деформирование тел в процессе обработки давлением сопровождается активным накоплением микроповреждений. Иногда степень такого накопления в процессе изготовления изделий может быть настолько значительной, что их эксплуатация становится нежелательной по причине недостаточной надежности или появления признака брака в виде макротрещины. Поэтому прогнозирование предельных возможностей заготовок, обрабатываемых давлением, представляет большой интерес. Мерой накопления микроповреждений принято считать использованный ресурс пластичности. Полагают, что в необработанных материалах микроповреждения отсутствуют ($\psi = 0$). Изделие в процессе обработки, а затем эксплуатации накапливает микроповреждения. Считают, что ко времени исчерпания работоспособности накапливается критическое количество микроповреждений. В таком случае $\psi = 1$.

Для наиболее деформированных элементов был найден использованный ресурс пластичности ψ с применением критерия [13], учитывающего нелинейный характер накопления повреждений. Диаграмма пластичности для исследуемого материала была построена по результатам испытания образцов на кручение, растяжение и осадку по методике, изложенной в работе [14]. Для каждого элемента на различных стадиях был построен путь деформирования в координатах показатель напряженного состояния η –накопленная степень деформации e_u . Показатель η определяли по соотношению

$$\eta_1 = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}, \quad (11)$$

а величину e_u – суммированием этапных значений.

Общий (суммарный) ресурс пластичности находили для каждого элемента суммированием этапных значений:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_n. \quad (12)$$

На рис. 4 представлены результаты расчета перемещений вершин МКЭ и использованных ресурсов пластичности. Расчет был закончен, когда исходная

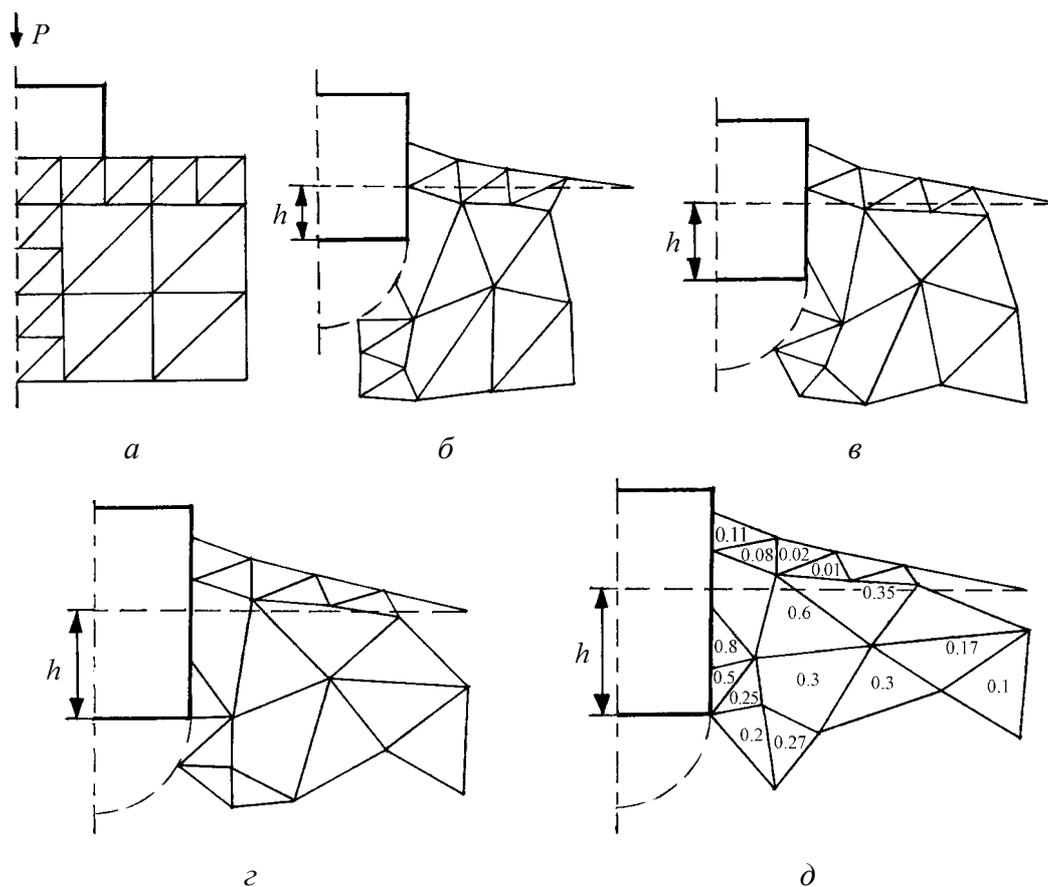


Рис. 4. Результаты расчета внедрения плоского штампа: *a* – исходная схема расположения элементов и характерных узлов, *б–д* – схемы искаженных элементов на последовательных стадиях внедрения штампа; числами указаны значения использованных ресурсов пластичности в каждом из элементов

область конечных элементов переместилась в область чистого сдвига, где использованные ресурсы пластичности элементов можно считать конечными. Сравнение с экспериментальными данными показало хорошую сходимость.

Выводы

1. Разработан комплексный подход к изучению механики внедрения штампа в условиях нестационарного формоизменения, произведена оценка степени использования пластичности наиболее деформируемых конечных элементов.
2. Установлено, что для оценки деформируемости заготовок необходимо наиболее точно определять границу жесткопластической области на этапах деформирования, учитывать влияние трения как функцию от технологических факторов, знать историю деформирования материальных частиц заготовок в опасных областях, т.е. знать тензорные поля σ_{ij} , ε_{ij} как функции координат и времени.
3. Показана возможность локального определения использованного ресурса пластичности в конечных элементах.

1. Р. Хилл, Математическая теория пластичности, Гос. изд-во техн.-теорет. лит., Москва (1956).
2. Е.П. Унксов, У. Джонсон и др., Теория пластических деформаций металлов, Машиностроение, Москва (1983).
3. Т.В. Бровман, Изв. вузов. Черная металлургия № 9, 38 (1991).
4. Б.А. Друянов, Р.И. Непершин, Теория технологической пластичности, Машиностроение, Москва (1990).
5. Г.А. Смирнов-Аляев, Сопротивление материалов пластическому деформированию, Машиностроение, Ленинград (1978).
6. О.В. Нахайчук, в зб.: Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, Краматорськ (1999), с. 28.
7. Е.П. Унксов, В.Л. Колмогоров, В.А. Огородников и др., Теорияковки и штамповки, Машиностроение, Москва (1992).
8. Я. Шмельтер, М. Дацко и др., Метод конечных элементов в статике сооружений, Стройиздат, Москва (1986).
9. В.А. Огородников, Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении, УМК 130, Киев (1989).
10. Г.Д. Дель, Определение напряжений в пластической области по распределению твердости, Машиностроение, Москва (1971).
11. О.В. Нахайчук, в зб.: Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, Краматорськ (2001), с. 331.
12. В.А. Огородников, О.В. Нахайчук, А.В. Мазуренко, Вибрации в технике и технологиях № 2, 50 (2001).
13. Г.Д. Дель, В.А. Огородников, В.Г. Нахайчук, Изв. вузов. Машиностроение № 4, 135 (1975).
14. В.А. Огородников, Оценка деформируемости металлов при обработке давлением, Вища школа, Киев (1983).

O.V. Nakhaichuk

INVESTIGATION OF THE MECHANICS OF FLAT STAMP INTRODUCTION INTO RIGID-PLASTIC MATERIAL BY USING THE FINITE-ELEMENT METHOD

In the work, the results of complex research of the process of introduction of a flat stamp in rigid-plastic material with application of various methods, including the finite-element method (FEM), are submitted, the estimation is made of a degree of use of plasticity of the most deformable elements depending on the geometrical and force factors.

Fig. 1. A generalized solution by W. Prager for a case of flat stamp forcing-in

Fig. 2. A scheme of stamp forcing-in calculation

Fig. 3. Comparison of calculation (\circ) and experimental (Δ) data on defining the specific force of pressing-in

Fig. 4. Calculation results for flat-stamp introduction: *a* – initial scheme of the location of elements and characteristic units, *b–d* – schemes of distorted elements at successive stages of stamp introduction; numerals stand for values of the utilized plasticity resources in each element