

Расчет ножа-пластины с клиновой заточкой машины импульсной резки металла

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрена последовательность проведения проектировочных расчетов с использованием разработанного математического и программного обеспечения в условиях применения R-функций и эксплуатации программной системы «Поле» для элементов технологической системы импульсного раскроя металла. Показана возможность применения предложенного структурно-вариационного метода при расчете клиновых ножей-пластин для различных расчетных схем, идентичных используемым в технологических блоках импульсных машин для резки металлического проката.

Ключевые слова: высокоскоростная (импульсная) резка, R-функции, моды, структурно-вариационный метод расчета режущего инструмента, напряженно-деформированное состояние

Введение

Ранее в публикациях [1–5] была описана возможность эффективного использования структурно-вариационного метода с применением R-функций в теории обработки металлов давлением.

Анализ выполненных работ, проведенный на основе сформулированных требований к методам проектировочного расчета инструмента для высокоскоростного (импульсного) разделения металла, показал, что для таких задач наиболее перспективно применение граничных методов. При этом для учета временной составляющей решения лучше всего воспользоваться методом разложения по модам с предварительным выделением квазистатических составляющих, а для учета геометрической информации использовать метод R-функций. В этой связи в качестве инструментальной базы для разработки прикладных программ удобно выбрать программную систему «Поле», разработанную в Институте проблем машиностроения НАН Украины.

Проведение проектировочных расчетов в условиях эксплуатации программной системы «Поле»

При проведении проектировочных расчетов с использованием разработанного математического и программного обеспечения можно выделить следующие основные этапы:

1. Постановка задачи, включающая в себя задание сочетаний уравнений, описывающих процесс нагружения проектируемой детали (ножа), условий ее закрепления, целевых функций и различного рода ограничений, накладываемых на варьируемые параметры. На этом же этапе необходимо определить функции, задающие внешнюю нагрузку.

2. Построение уравнений, задающих форму проектируемой детали и характерных участков ее границы с помощью R-функций. При этом величины, подлежащие определению в ходе проектирования (например, диаметр окружности, ширина полосы, угол наклона прямой и т. д.), задают в виде параметров.

Эти уравнения используют для получения структур задач на собственные колебания.

3. Проведение аналитических выкладок для определения временных функций при квазистатических и динамических составляющих компонент перемещения с последующим решением соответствующих краевых задач и определением значения целевой функции (например, максимальное значение эквивалентных напряжений) для рассматриваемого варианта конструкции.

4. Задание или определение с помощью какого-либо алгоритма новых значений параметров проектирования с дальнейшим повторением решения прямой задачи.

Из рассмотренных вариантов выбирают тот, в котором целевая функция имеет экстремальное значение, а параметры проектирования удовлетворяют наложенным ограничениям. На примере ряда прикладных задач можно рассмотреть, как реализуется этот процесс в условиях применения системы «Поле».

Расчет ножа-пластины с клиновой заточкой

Разработанное математическое и программное обеспечение позволяет вести проекторочный расчет такого типа инструмента при резке проката произвольного поперечного сечения и при любых его конструктивных схемах, однако в качестве примера рассмотрим нож для резки прямоугольного проката (рис. 1). Это вызвано тем, что для таких ножей существуют рекомендации по проектированию, полученные в проведенных ранее исследованиях и на основании опыта их эксплуатации в промышленности.

В качестве исходных данных для расчета принимаем следующие значения параметров (таблица).

Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Сторона квадрата (заготовки), м	$200 \cdot 10^{-3}$
Удельное сопротивление резке, Н/м ²	$5 \cdot 10^8$
Начальная скорость ножа, м/с	10
Суммарная масса ножа и траверсы, кг	500
Ход ножа до разделения проката, м	$120 \cdot 10^{-3}$
Механические характеристики материала ножа	
плотность ρ , кг/м ³	7800
модуль упругости E , Па	$2,1 \cdot 10^{11}$
коэффициент Пуассона ν	0,3

В рассматриваемом примере в целях упрощения выкладок удельное сопротивление резке считаем постоянным по сечению разрезаемой заготовки.

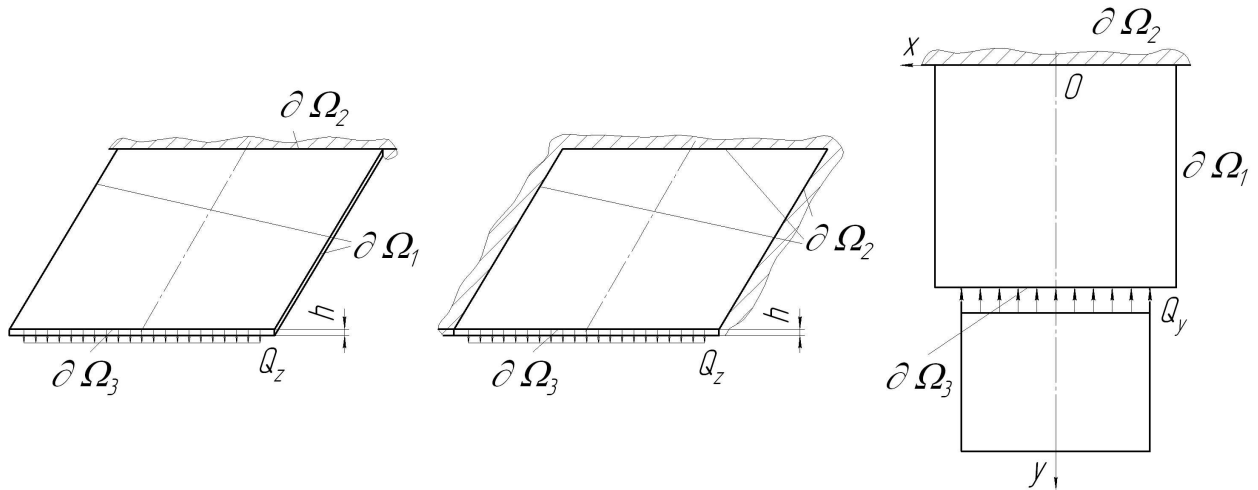


Рис. 1. Расчетная схема для проектировочного расчета ножа-пластины

1. **Процесс нагружения ножа** описывается следующей системой уравнений. При нагружении ножа в своей плоскости:

– уравнения движения:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda^* + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \mu \Delta u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\ (\lambda^* + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \mu \Delta v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \right\} (x, y) \in \Omega,$$

где $\lambda^* = \frac{2\lambda\mu}{\lambda + 2\mu};$

– граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} N_x = 0, \\ N_y = 0, \end{aligned} \right\} (x, y) \in \partial\Omega_1; \quad \left. \begin{aligned} u = 0, \\ v = 0, \end{aligned} \right\} (x, y) \in \partial\Omega_2; \quad \left. \begin{aligned} N_y = -Q_y, \\ N_x = 0, \end{aligned} \right\} (x, y) \in \partial\Omega_3;$$

– начальные условия:

$$\left. \begin{aligned} u(x, y, 0) = v(x, y, 0) &= 0, \\ \dot{u}(x, y, 0) = \dot{v}(x, y, 0) &= 0. \end{aligned} \right\}$$

При изгибе ножа поперечной нагрузкой:

– уравнения движения (нож движется вертикально):

$$\nabla^4 W + \frac{\rho h}{D} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0, \quad (x, y) \in \Omega,$$

– граничные условия (рассматриваем два варианта конструкции – без ребер и с ребрами большой жесткости):

$$\left. \begin{aligned} M_n = 0, \\ Q_n = 0, \end{aligned} \right\} (x, y) \in \partial\Omega_1; \quad \left. \begin{aligned} W = 0, \\ \frac{\partial W}{\partial n} = 0, \end{aligned} \right\} (x, y) \in \partial\Omega_2, \quad \left. \begin{aligned} M_n = 0, \\ Q_n = -Q_y, \end{aligned} \right\} (x, y) \in \partial\Omega_3;$$

– начальные условия

$$W(x, y, 0) = \dot{W}(x, y, 0) = 0.$$

Зависимость нагрузки в плоскости ножа от времени до момента окончания резки задаем в виде

$$Q_y = \begin{cases} 5 \cdot 10^9 t/h & \text{при } 0 \leq t < 0,0866 h, \\ 4,33 \cdot 10^8 & \text{при } 0,0866 \leq t < t_2, \end{cases}$$

где t_2 – момент окончания резки, после которого Q_y падает до нуля. При получении этой зависимости в целях упрощения выкладок была проведена замена $\sin(kt)$ на kt , что допустимо, поскольку при заданных значениях массы траверсы, удельного сопротивления резке и начальной скорости это приводит к незначительной погрешности.

Изгибающая нагрузка на нож в соответствии с [6] может быть принята равной $Q_z = 0,03 Q_y$.

Ширину ножа принимаем равной 0,25 м. Увеличение ширины ножа по сравнению с размерами поперечного сечения проката необходимо для того, чтобы в случае качания слитка в плоскости, перпендикулярной направлению резки, не произошло удара по части ширины заготовки. Высоту ножа принимаем равной 0,115 м для предотвращения соударения встречно движущихся ножей. В результате расчета определяем минимальную толщину ножа h , при которой максимум сжимающего напряжения меньше допускаемого. Согласно [6] примем допускаемое напряжение для данного случая $[\sigma] = 10^9$ Па.

2. Геометрическая форма ножа описывается уравнением

$$\omega(x, y) = f_1 \Lambda_0 f_2 \Lambda_0 f_3,$$

где функции f_i задаются выражениями: $f_1 = \frac{1}{0,25}(0,125^2 - x^2)$; $f_2 = 0,115 - y$; $f_3 = y$.

Угол заточки ножа принят равным 60° .

Для определения собственных частот и форм колебаний ножа в своей плоскости используем упрощенную структуру

$$\left. \begin{aligned} u &= f_3 P_1, \\ v &= f_3 P_2 \end{aligned} \right\}$$

а для случая поперечных колебаний ножа структура решения задачи имеет вид $W = \omega_1^2 P_3$, где $\omega_1 = f_3$ для ножа без ребер жесткости; $\omega_1 = f_1 \Lambda_0 f_3$ для ножа с ребрами большой жесткости. В приведенных выражениях компоненты P_i – системы полиномов.

3. Решение при однократном выделении квазистатики для нагружения ножа в своей плоскости может быть записано в виде

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0^{(1)} + u_0^{(2)}, & u_0^{(1)} &= u_{01} T + u_1, & u_1 &= u_1^{(1)} + u_1^{(2)}, \\ v &= v_0^{(1)} + v_0^{(2)}, & v_0^{(1)} &= v_{01} T + v_1, & v_1 &= v_1^{(1)} + v_1^{(2)}, \end{aligned} \right\}$$

$$\text{где } \left. \begin{aligned} u_0^{(2)} &= -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i 4,33 \cdot 10^8}{\rho p_i^2} u_i H(t-t_2) (1 - \cos p_i(t-t_2)), \\ v_0^{(2)} &= -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i 4,33 \cdot 10^8}{\rho p_i^2} v_i H(t-t_2) (1 - \cos p_i(t-t_2)), \end{aligned} \right\};$$

$$\left. \begin{aligned} u_1^{(2)} &= -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i \cdot 10^9}{h p_i^3} u_i H(t-t_1) \sin p_i(t-t_1), \\ v_1^{(2)} &= -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i \cdot 10^9}{h p_i^3} v_i H(t-t_1) \sin p_i(t-t_1), \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} u_1^{(1)} &= -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i \cdot 10^9}{h p_i^3} u_i \sin p_i t, \\ v_1^{(1)} &= -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i \cdot 10^9}{h p_i^3} v_i \sin p_i t \end{aligned} \right\},$$

а для задачи об изгибе ножа

$$W = W_0^{(1)} + W_0^{(2)}; \quad W_0^{(1)} = W_{01} T + W_1; \quad W_1 = W_1^{(1)} + W_1^{(2)},$$

где $W_0^{(2)} = -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i 1,3 \cdot 10^7}{p_i^2} W_i H(t-t_2) (1 - \cos p_i(t-t_2));$

$$W_1^{(2)} = -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i 1,5 \cdot 10^8}{h p_i^3} W_i H(t-t_1) \sin p_i(t-t_1);$$

$$W_1^{(1)} = -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i 1,5 \cdot 10^8}{h p_i^3} W_i \sin p_i t; \quad T(t) = \begin{cases} 5 \cdot 10^9 t / h & \text{при } 0 \leq t < 0,0866h, \\ 4,33 \cdot 10^8 & \text{при } 0,0866 \leq t. \end{cases}$$

Для определения u_{01}, v_{01}, W_{01} необходимо решить соответствующие статические задачи при $Q_y = 1, Q_z = 1$.

4. Поскольку сжимающее напряжение в данном случае линейно зависит от толщины ножа, для ее вычисления оказывается достаточным один раз решить задачу расчета суммарных напряжений для произвольно выбранного значения h , после чего искомую величину определяем как

$$h_{\min} = \frac{h \sigma_{\max}}{[\sigma]}.$$

В результате проведенных расчетов при $h = 0,03$ м было установлено, что для обеих конструктивных схем ножа (без ребер и с жесткими ребрами) сжимающие напряжения достигают максимальных значений в заделке. На рис. 2 изображены графики зависимости сжимающего напряжения в точке, расположенной посередине между осью симметрии и краем ножа, от времени.

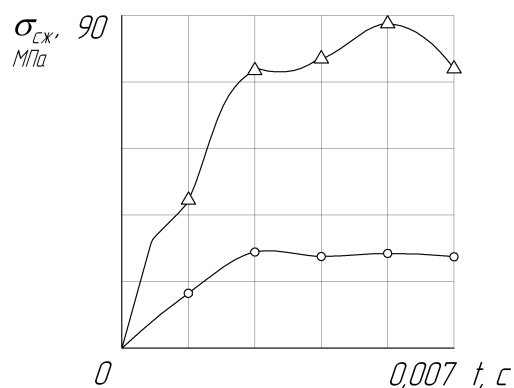


Рис. 2. Зависимость сжимающего напряжения в заделке от времени при различных конструктивных схемах ножа-пластины:
 \circ – нож с жесткими ребрами;
 Δ – нож без ребер

Напряжения для случая ножа с жесткими ребрами оказываются в 3,56 раза меньше, чем для ножа без ребер. Соответственно искомая толщина h_{\min} для ножа с жесткими ребрами составила $7,75 \cdot 10^{-3}$ м, а для ножа без ребер – $27,6 \cdot 10^{-3}$ м.

В работе [6] были проведены аналогичные расчеты для ножа без ребер и ножа с упругими ребрами с жесткостью, равной суммарной жесткости на изгиб ножа без ребер. При этом динамическая задача сводилась к статической. Результаты вычислений достаточно хорошо согласуются. Так, для ножа без ребер в указанной работе получено значение

$22,3 \cdot 10^{-3}$ м. Кроме того, было установлено, что введение упругих ребер приводит к уменьшению максимальных сжимающих напряжений в три раза.

Путем незначительных изменений в частях программы, описывающих геометрию ножа и граничные условия, программа может быть приспособлена для расчета инструмента, применяемого при сдвиговой (клиново-сдвиговой) резке слитков (проката).

Выводы

1. Разработанное математическое и программное обеспечение позволяет проводить проектировочные расчеты инструмента для высокоскоростной резки слитков и может быть применено для расчета элементов конструкций, процесс нагружения которых описывается системами уравнений, аналогичными системам, которые были приняты для моделирования инструмента.

2. Рекомендации по выбору характерных размеров существующего инструмента, полученные при проведении расчетов, могут быть использованы при разработке проектной документации машин импульсной резки.

Список литературы

1. Лимберг Э. А. Использование R-функций в технологии пластического формоизменения / Э. А. Лимберг // *Обработка металлов давлением в машиностроении: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та.* – Вып. 21. – Х., 1985. – С. 67–70.

2. Лимберг Э. А. Метод анализа обратного выдавливания с применением R-функций / Э. А. Лимберг, В. К. Ярмолюк, О. П. Голубничий // *Обработка металлов давлением в машиностроении: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та.* – Вып. 23. – Х., 1987. – С. 3–6.

3. Исследование динамического напряженно-деформированного состояния элементов высокоскоростного оборудования для ОМД структурно-вариационным методом / С. И. Планковский, Л. В. Курпа, С. Г. Кушнарченко, А. Н. Шевченко // *Импульсная обработка металлов: тез. докл. всесоюз. науч.-техн. конф.* – Х., 1990. – С. 138.

4. Планковский С. И. Расчет динамического напряженного состояния плит импульсных машин // *Обработка металлов давлением в машиностроении: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та.* – Вып. 28. – Х., 1992. – С. 24–27.

5. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения / В. Л. Рвачев. – К.: Наук. думка, 1982. – 552 с.

6. Кононенко В. Г. Исследование режущего инструмента импульсных машин / В. Г. Кононенко, Н. Ф. Углицкий // *Высокоскоростная обработка материалов давлением: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та.* – Вып. 2. – Х., 1972. – С. 103–114.

Рецензент: д. ф.-м. н., профессор А. Г. Николаев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 02.06.10

Розрахунок ножа-пластини з клиновим заточуванням машини імпульсного різання металу

Розглянуто послідовність проведення проектувальних розрахунків з використанням розробленого математичного і програмного забезпечення в умовах використання R-функцій та експлуатації програмної системи «Поле» для елементів технологічної системи для імпульсного розкрюювання металу. Показано можливість використання запропонованого структурно-варіаційного методу при розрахунках клинових ножів-пластин для різноманітних розрахункових схем, які ідентичні тим, що використовують у технологічних блоках імпульсних машин для різання металічного прокату

Ключові слова: високошвидкісне (імпульсне) різання, R-функції, моди, структурно-варіаційний метод розрахунку різального інструменту, напружено-деформований стан

V-Shaped Planar Cutting Tools Calculations For Impulse Cutting Machines

The sequence of designing calculations by use of developed mathematical and program support with R-functions application in the «Field» system includes a number of main steps which were analyzed. This sequence allows to design the elements of technological system for impulse cutting of metal. A structural variation method can be used for V-shaped planar cutting tools calculations and different design models which are identical to the ones used in technological units of impulse cutting machines

Keywords: high-speed (impulse) cutting, R-functions, modes, structural variation method of cutting tools calculations, deflected mode