

в абсолютном выражении, а изменение степеней принадлежности по остальным критериям значительно меньше.

Таким образом, метод многокритериального анализа с использованием принципа Беллмана – Заде и парных оценок по шкале Саати при тщательной выполненной экспертизе позволяет получить адекватную оценку качества сравниваемых альтернатив. При значимом различии альтернатив результат сравнительного анализа является устойчивым к возможной вариативности парных сравнительных оценок, обусловленной субъективностью мнений эксперта.

Разработанный методико-программный модуль используется в практике проектно-конструкторских работ по системам инициирования в Государственном ракетном центре им. академика В. П. Макеева. Он может также применяться для многокритериального сравнительного анализа в условиях неопределенности и других систем (технических, экономических и пр.), для которых могут быть составлены парные сравнительные оценки их качества.

Библиографические ссылки

1. Силов В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М. : ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.
2. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. литер., 1981. – 208 с.
3. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования. – Рига : Знание, 1990. – 184 с.
4. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедура принятия решений : сб. переводов. – М. : Мир, 1976. – С. 172–215.
5. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с. : ил.
6. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 3. – С. 150–154.
7. Yager P. Multiple objective decision-making using fuzzy sets // Int. J. Man-Mach. Stud. – 1979. – Vol. 9. – No. 4. – P. 375–382.
8. Саати Т. Математические модели конфликтных ситуаций : пер. с англ. – М. : Сов. радио, 1977. – 304 с.
9. Применение аппарата нечеткой логики к решению задачи выбора типа системы инициирования пиросредств ракетного комплекса : отчет о НИР / ЮУрГУ ; рук. Зезин В. Г., исполн. Зезин В. Г., Решетников М. И. – Миасс, 2014. – 141 с. – Библиогр. с. 89. – Инв. № 171249-ГиТ/02.

M. I. Reshetnikov, Academician V. P. Makeev State Rocket Centre, Miass

V. G. Zezin, PhD in Engineering, Associate Professor, South Ural State University (Miass branch)

Method and Software Module for Selection of Type of Rocket Complex Pyrodevices Activation System under Conditions of Essential Uncertainty

The paper presents the method and its software implementation for multi-criteria selection of the type of rocket complex pyro devices activation system within essential uncertainty. The method applies the Bellman-Zadeh fuzzy logic inference approach and Saaty hierarchy method.

Keywords: fuzzy logic inference, pyro devices activation system, Bellman-Zadeh approach.

Получено 22.04.2014

УДК 621.778

И. Б. Покрас, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Г. А. Чикуров, кандидат технических наук, докторант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

М. И. Касимов, магистрант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ СМАЗКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ СМАЗОК

Приведена расчетная схема для волочения проволоки с использованием сборной волоки. Приведены этюры скоростей течения смазки по участкам сборной волоки и формулы для определения давлений на входе в очаг деформации для разных этюров скоростей. Рассмотрен комплексный подход к определению условий, необходимых для создания режима жидкостного трения при волочении в сборной волоке.

Ключевые слова: сборная волока, напорный вкладыш, калибрующий вкладыш, кажущаяся вязкость, упругие деформации, неньютоновская жидкость.

Создание режима жидкостного трения в процессах ОМД обусловлено гидродинамическим эффектом смазки. В процессе волоче-

ния возникновение гидродинамического эффекта смазки связано с относительным скольжением наклоненных друг к другу поверхностей заготовки

и инструмента. Под действием возникающих гидродинамических давлений в предочаговой зоне контактные поверхности деформируются, давая возможность смазке проникать в зону очага деформации.

Также на возникающие гидродинамические давления значительное влияние оказывает вязкость смазки. Величина вязкости, в свою очередь, зависит от величины гидродинамического давления и от температуры смазки.

Таким образом, комплексный подход к определению условий, необходимых для создания режима жидкостного трения при волочении, состоит в совместном решении системы нелинейных дифференциальных уравнений четырех тесно связанных между собой задач [1]:

1. Задача гидродинамики для движущейся жидкости, ограниченной двумя трущимися поверхностями, решение которой дает эпюру гидродинамических давлений.

2. Контактная задача теории упругости, решение которой необходимо для определения деформаций контактных поверхностей инструмента и заготовки под действием определенной эпюры гидродинамических давлений.

3. Тепловая задача для смазки и трущихся поверхностей заготовки и инструмента, решение которой позволяет учесть зависимость вязкости смазки не только от давлений, но и от температуры.

4. Задача определения вязкости смазки с учетом ее зависимости от гидродинамического давления и температуры.

При расчетах используются следующие допущения [1].

1. В зоне деформации скорость материала на контактной поверхности пропорциональна квадрату его диаметра.

2. Толщина смазочного слоя мала по сравнению с диаметром заготовки.

3. Применяется уравнение О. Рейнольдса для установившегося несжимаемого потока.

Расчетная схема для волочения с использованием сборной волокни приведена на рис. 1.

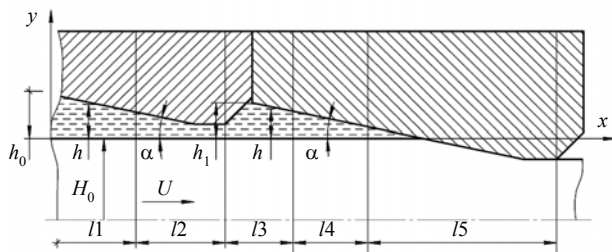


Рис. 1. Расчетная схема для волочения с использованием сборной волокни

Сборная волокна состоит из напорного вкладыша (волокни) и калибрующего. Рабочую поверхность волокни можно разделить на пять участков (рис. 1). Первые четыре участка характеризуют течение смазки в предочаговой зоне.

Эпюра распределения скоростей по сечению слоя смазки первого участка (l_1 – напорного вкладыша) и третьего участка (l_3 – калибрующего вкладыша) представлена на рис. 2, б.

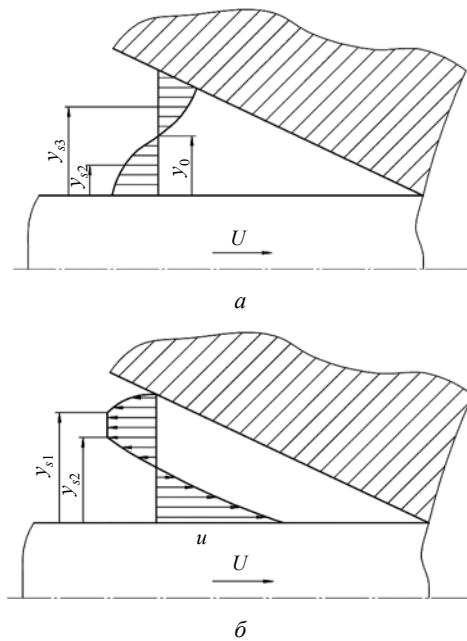


Рис. 2. Эпюры распределения: а – напряжения сдвига по толщине слоя смазки; б – скоростей по сечению слоя смазки первого и третьего участков

Изменение давления по длине данного участка в работе [2] описывается следующим уравнением:

$$\frac{dp}{dx} = 2 \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{1}{3} \left(\frac{12\mu}{h^3} \left(Q - \frac{Uh}{2} \right) \right)^2 \right)^3}{27}} \times \left(\arccos \frac{27 \left(\frac{4\tau_s}{h} \right)^3}{4 \left(\frac{12\mu}{h^3} \left(Q - \frac{Uh}{2} \right) \right)^3} - 1 \right) \times \cos \left(\frac{\arccos \left(\frac{27 \left(\frac{4\tau_s}{h} \right)^3}{4 \left(\frac{12\mu}{h^3} \left(Q - \frac{Uh}{2} \right) \right)^3} - 1 \right)}{3} \right). \quad (1)$$

При этом зона первого участка (l_1 и l_3) ограничена по длине. Расчет по формуле (1) ведется до выполнения условия

$$y_{s1} = h. \quad (2)$$

В работе [2] отмечено, что координаты y_{s1} , y_{s2} (рис. 2, а) зависят от скорости волочения U . Скорость волочения U , при которой выполняется условие (2), определяется следующей формулой:

$$U = \frac{h^2 dp}{2 dx \mu}.$$

Отсюда определим значение толщины слоя смазки – границы первого участка (l_1, l_3):

$$h = \sqrt{\frac{2U\mu}{\frac{dp}{dx}}} \quad (3)$$

Эюра распределения скоростей по сечению слоя смазки второго l_2 и четвертого l_4 участков представлена на рис. 3.

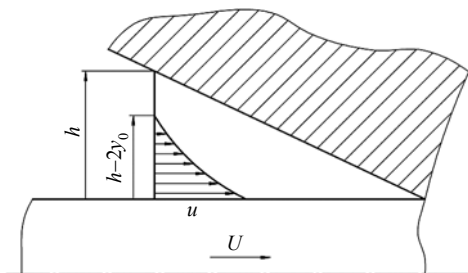


Рис. 3. Эюра распределения скоростей по сечению слоя смазки второго и четвертого участков

Изменение давления по длине данных участков (l_2 и l_4) описывается следующим уравнением [2]:

$$\frac{dp}{dx} = \left(Q - U \left(\frac{h}{2} - 2 \frac{y_0}{h} \right) \right) \frac{\mu}{\left(-\frac{1}{12} h^3 + h y_0^2 - \frac{4}{3} y_0^3 \right)} \quad (4)$$

Расчет по формуле (4) ведется до выполнения условия

$$y_{s2} = h. \quad (5)$$

Скорость волочения U , при которой выполняется условие (5), определяется по формуле [2]

$$U = \frac{h^2}{\mu} \frac{dp}{dx} + \frac{2h\tau_s}{\mu}.$$

Тогда значение толщины слоя смазки на границе второго и четвертого участков будет определяться следующим выражением:

$$h = \sqrt{\left(\frac{2\tau_s}{\frac{dp}{dx}} \right)^2 + \frac{2\mu U}{\frac{dp}{dx}} - \frac{2\tau_s}{\frac{dp}{dx}}}. \quad (6)$$

Эюра распределения скоростей по сечению слоя смазки пятого участка l_5 представлена на рис. 4.

Изменение давления по длине пятого участка определяется по формуле

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\left(\frac{Uh}{2} - Q \right)}{h^3} 12\mu, \quad (7)$$

$$Q = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{dp}{dx}, \quad (8)$$

где Q – расход смазки. Расход смазки является постоянным на всех участках сборной волоки ($Q = \text{const}$).

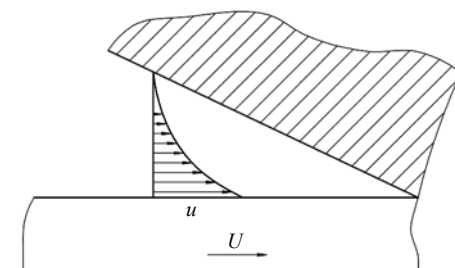


Рис. 4. Эюра распределения скоростей по сечению слоя смазки пятого участка

Толщина слоя смазки на данном участке будет определяться упругими деформациями инструмента и заготовки:

$$h = h_1 - x \text{tg} \alpha + w_1 + w_2, \quad (9)$$

где w_1, w_2 – упругие деформации контактных поверхностей инструмента и заготовки соответственно под действием гидродинамических давлений.

Для определения деформации можно воспользоваться гипотезой Винклера, согласно которой деформации пропорциональны приложенному давлению [2]:

$$w_1 = k_1 p; \quad (10)$$

$$w_2 = k_2 p,$$

где $k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} l_5, k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{2E_2} H_0.$

Здесь ν_1 и ν_2 – коэффициенты Пуассона материала инструмента и заготовки соответственно; E_1 и E_2 – модули упругости материала инструмента и заготовки при сжатии.

При расчете гидродинамических давлений по формулам (1), (4) и (7) необходимо учитывать изменение вязкости смазки от давления и температуры.

Получение изменяющейся величины вязкости, которая привязана к соответствующим скоростям сдвига, может быть осуществлено при измерении реологических свойств исследуемой жидкости и, далее, при расчете значений напряжения и скорости сдвига для нескольких точек на нелинейной кривой (рис. 5).

Определение кажущейся вязкости означает, что характер течения неньютоновской жидкости сравнивают с ньютоновской (точка 3 на рис. 5). Кажущаяся вязкость определяет характер течения при данной скорости сдвига, но на ее основе нельзя представить, каким образом вязкость изменится при более высоких или более низких скоростях сдвига. Для получения дополнительной информации можно использовать тангенс угла наклона касательной к кривой течения в точке 3, который дает истинную вязкость неньютоновской жидкости [3].

Кривые течения и вязкости, построенные в двойных логарифмических координатах, представляют

собой прямые линии и могут быть надежно аппроксимированы уравнением Оствальда – де Вилля:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \rightarrow \tau = \mu\dot{\gamma}. \quad (11)$$

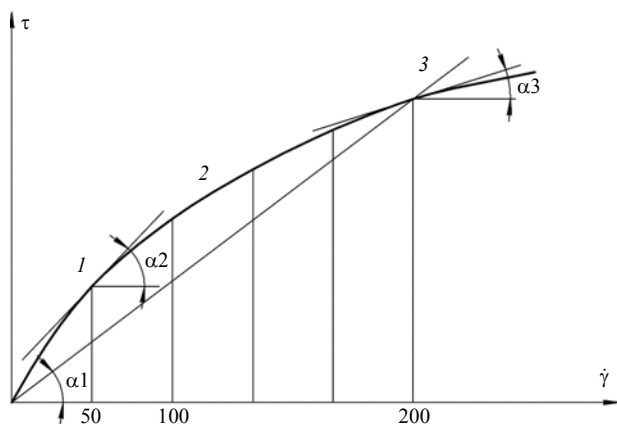


Рис. 5. Кривая течения неньютоновской жидкости

При $n = 1$ коэффициент K превращается в μ , и приведенное уравнение описывает поведение ньютоновской жидкости. Чем больше показатель степени n отклоняется от 1, тем сильнее зависимость вязкости от скорости сдвига.

Для описания характера течения отдельных неньютоновских жидкостей часто применяют другие уравнения. Особенно широкое признание нашло уравнение Карро

$$\mu = \frac{\mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty})}{\left(1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_b}\right)^2\right)^{n/2}}, \quad (12)$$

которое требует определения четырех коэффициентов: $\mu_0, \mu_{\infty}, \dot{\gamma}_b, n$.

Вязкость смазки как функция от давления и температуры описана в работе [4] следующей формулой:

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p + \beta \frac{p}{T} + \gamma T}, \quad (13)$$

где μ_0 – вязкость смазки при нормальных условиях; p – давление смазки; T – температура смазки; α, γ, β – некоторые эмпирические коэффициенты.

Для численного определения значения вязкости смазки при переменных давлениях и температурах в предочаговой зоне определим изменяющуюся температуру смазки по длине предочаговой зоны по формуле [1]

$$T = \frac{1}{240\mu\lambda} \left(\frac{dp}{dx}\right)^2 h^4 + \frac{\mu U^2}{12\lambda} + \frac{T_{\text{инстр}} + T_{\text{пр}}}{2}, \quad (14)$$

где $T_{\text{инстр}}$ – температура инструмента; $T_{\text{пр}}$ – температура проволоки; λ – коэффициент теплопроводности.

Для определения толщины слоя смазки на входе в очаг деформации ведется расчет гидродинамического давления по участкам сборной волоки по формулам (1), (4), (7) с учетом изменения толщины слоя смазки (9) и изменения вязкости от давления и температуры (13). В итоге толщина слоя смазки на входе в очаг деформации определяется упругими деформациями инструмента и заготовки (10).

Библиографические ссылки

1. Покрас И. Б., Чикуров Г. А. Гидродинамический эффект смазки в процессах обработки металлов давлением : монография. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2007. – 140 с.
2. Покрас И. Б., Кулаков К. В. Исследование течения вязкопластической смазки на входе в очаг деформации при волочении // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 4. – С. 38–41.
3. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / пер. с англ. И. А. Лавыгина ; под ред. В. Г. Куличихина. – М. : КолосС, 2003. – 312 с.
4. Покрас И. Б., Плеваков Д. С. Исследование реологических свойств мыльных смазок при волочении : дис. ... магистра / ИжГТУ. – Ижевск, 2011. – 83 с.

I. B. Pokras, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

G. A. Chikurov, PhD in Engineering, DSc Applicant, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

M. I. Kasimov, Master's Degree Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Hydrodynamic Lubrication Effect in Drawing with Application of Visco-Plastic Lubricants

The calculated scheme for wire drawing with application of the assembled die is given. Diagrams of lubrication flow velocities for segments of the assembled die are shown and formulae are given to determine the pressure at the inlet of the deformation zone for different velocity diagrams. A complex approach to defining the conditions necessary for the creation of the fluid friction mode when drawing by the assembled die is considered.

Keywords: assembled die, pressure pad, sizing liner, apparent viscosity, elastic deformations, non-Newtonian fluid.

Получено 18.06.2014