

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ПРИМЕНЕНИЕ ПОШАГОВОГО АЛГЕБРАИЧЕСКОГО ИНТЕРПОЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА.

Абрамченков Н.В., Ламин И.И. (каф. КАМ МГТУ "МАМИ", г. Москва, РФ)

В эпоху честной и открытой конкуренции заказчики заинтересованы из множества предложений выбрать оптимальный вариант сборочного оборудования для своего производства, а поставщики, в свою очередь, стремятся выиграть тендер и понести минимальные затраты по подготовке технических предложений для своих потенциальных клиентов. Предлагаемый подход позволяет приблизиться к решению проблем двух сторон - выбора и проектирования сборочного оборудования на предварительном этапе.

В условиях современной экономики при строительстве или модернизации сборочных производств очень важную роль играют этапы формулирования заказчиком задания на проектирование сборочного оборудования и разработки технического предложения потенциальными подрядчиками [1].

Как правило, заказчики для разработки технического задания на поставку оборудования максимально удовлетворяющего требованиям бизнеса привлекают высококвалифицированных специалистов с большим инженерным опытом, а поставщики при разработке технического предложения активно используют САПР. Но и с одной и с другой стороны процессы являются субъективными, потому что, так называемые САПР, на самом деле представляют диалоговую систему, в которой автоматически выполняется очень небольшой объём проектирования. Основная же работа по увязке всех разрозненных вопросов и, главное, принятию ответственных решений остаётся за человеком. Результат применения автоматизации проектирования на этих этапах в общем положительный, но явно избыточный для предварительного этапа переговоров, целью которых является подготовка контракта на поставку оборудования.

Такое положение вещей объясняется отсутствием математических моделей, связывающих технические и экономические характеристики проектируемого сборочного производства. Для решения проблем, возникающих при заказе сборочного оборудования, включая экономические составляющие, в МГТУ «МАМИ» на кафедре «Комплексная автоматизация машиностроения» разрабатывается оптимизационный метод предварительного проектирования.

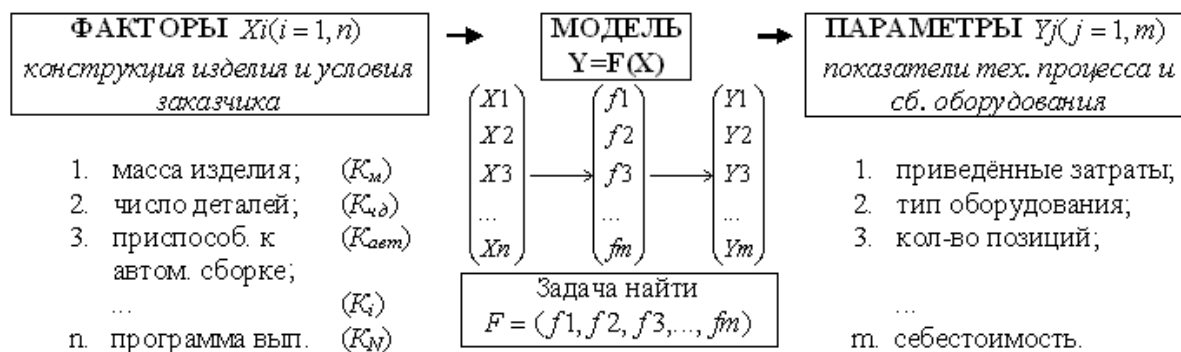


Рис. 1. Имитационная модель предпроектного расчёта.

Базовой составляющей данного метода является имитационная модель предпроектного расчёта (рис.1), задача которой заключается в установлении функциональной связи между факторами, характеризующими конструкцию изделия и условия заказчика, и основными показателями технологического процесса и сборочного оборудования. Таким образом задача сводится к нахождению системы функций, в которой параметры через функцию связаны с n -факторами.

В качестве математического аппарата в модели используется пошаговое алгебраическое интерполирование. Применительно к данной задаче можно выявить ряд преимуществ [2]:

- не ограничивает количество параметров и факторов;
- ранжирует факторы по степени их влияния на значение параметра;
- позволяет обоснованно выбирать требуемую номенклатуру факторов;
- даёт возможность на каждом шаге вычислений применять различные функции;
- обладает возможностью оптимизации параметров.
- требует минимального объёма статистической информации;
- позволяет эффективно исследовать функцию в общем виде;
- нуждается в меньшем количестве операций и операции намного проще.

Суть пошагового интерполирования состоит в том, что искомый параметр вычисляется с помощью многочлена, являющегося функцией нескольких независимых переменных. Многочлен находится путём последовательного исследования влияния каждой независимой переменной на функцию. Таким образом, количество шагов, которые требуются для определения функции какого-либо искомого параметра, равно числу независимых переменных.

Интерполяция алгебраическим двучленом [3] $F(X)=Ax+B$ функции $F(X)$, заданной в двух точках x_0 и x_1 отрезка $[a, b]$, геометрический смысл которой означает замену графика функции $F(X)$ прямой, проходящей через точки $(x_0, f(x_0))$ и $(x_1, f(x_1))$.

Уравнение такой прямой имеет вид: $F(X) \approx Y = F(x_0) + \frac{F(x_1) - F(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0)$ (1)

Для изучения и разработки методики интерполирования функции n -переменных была выведена формула интерполяции функции трёх переменных «в ручную».

При введении новых обозначений $X_1=x$, $X_2=y$; $X_3=\omega$; $Y_j=z$

Таблица 1. Исходные данные для определения функции трех переменных.

$\omega=\omega_1$			$\omega=\omega_2$		
	y_1	y_2		y_1	y_2
x_1	Z_{111}	Z_{121}	x_1	Z_{112}	Z_{122}
x_2	Z_{211}	Z_{221}	x_2	Z_{212}	Z_{222}

Очевидно, что вычисления удобно производить в три шага.

Первый шаг: $Z(x, y_j, \omega_k) = A_{jk}x + B_{jk}$ (2), где $A_{jk} = \frac{Z_{2jk} - Z_{1jk}}{x_2 - x_1}$; $B_{jk} = Z_{1jk} - xA_{jk}$ (3)
 $j = 1, 2; k = 1, 2$

Второй шаг: $A_k(y) = P_k y + Q_k$; $B_k(y) = G_k y + H_k$;
 $A_k(y_i) = A_{jk}$; $B_k(y_i) = B_{jk}$ ($j = 1, 2; k = 1, 2$) (4)

для $z = A_k(y)x + B_k(y)$ (5), получим $Z(x, y, \omega_k) = P_k xy + Q_k x + G_k y + H_k$ (6)

Третий шаг: $P(\omega) = a_1 \omega + a_2$; $Q(\omega) = b_1 \omega + b_2$; $G(\omega) = c_1 \omega + c_2$; $H(\omega) = d_1 \omega + d_2$ (7)

$$Z(x, y, \omega) = a_1 xy\omega + a_2 xy + b_1 x + c_1 y\omega + c_2 y + d_1 \omega + d_2 \quad (8) \text{ или}$$

$$Z = \frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \left[\frac{Z_{222} - Z_{112}}{x_2 - x_1} (x - x_1) + Z_{122} \right] + \frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} \left[\frac{Z_{212} - Z_{112}}{x_2 - x_1} (x - x_1) + Z_{112} \right] + \quad (9)$$

$$+ \frac{\omega_2 - \omega}{\omega_2 - \omega_1} \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \left[\frac{Z_{221} - Z_{121}}{x_2 - x_1} (x - x_1) + Z_{121} \right] + \frac{\omega_2 - \omega}{\omega_2 - \omega_1} \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} \left[\frac{Z_{211} - Z_{111}}{x_2 - x_1} (x - x_1) + Z_{111} \right]$$

Суть метода интерполяции функции нескольких переменных состоит в следующем:

- на первом шаге исходные данные связываются четырьмя функциями переменной x (при этом переменные y и ω фиксированы: $y = y_j, j = 1, 2; \omega = \omega_k, k = 1, 2$).
- на втором шаге исходные данные связываются двумя функциями двух переменных и при фиксированной третьей переменной ω ($\omega = \omega_k, k = 1, 2$).
- результатом третьего шага является одна функция, содержащая все три переменные x, y, ω .

Общая интерполяционная формула для n -переменных будет выглядеть следующим образом:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sum_{m=0}^n A m_1 m_2 \dots m_n X_1^{m_1} X_2^{m_2} \dots X_n^{m_n} \quad (10)$$

$$(m_1 + m_2 + \dots + m_n = m)$$

Исследование пошагового интерполирования показали, что при двух узлах получается многочлен первой степени, очевидно, что с увеличением количества исходных узлов степень увеличивается. Это приводит к очень важному выводу - с увеличением количества исходных узлов точность интерполирования вовсе не растёт автоматически, а может наоборот даже резко снизиться.

Для получения лучших результатов нужно в модели учитывать максимальное количество факторов (рекомендуемое количество 17), но по понятным причинам осуществить моделирование «в ручную» будет очень сложно.

Для решения этой проблемы совместно с научным руководителем профессором Ламиным И.И. разрабатывается программный комплекс, позволяющий производить имитационное моделирование и расчёт параметров технологического оборудования для сборочного производства в автоматическом режиме по заданным условиям и наоборот.

Использование единой имитационной модели и математического аппарата даёт возможность находить решение на основе принципов научного приведения статистических данных путём получения функциональной связи между условиями заказчика и показателями сборочного производства, а не на основе субъективных решений от которых будет зависеть успешность дорогостоящих сделок.

Список литературы: 1. Ламин И.И. Оптимизация параметров сборочного оборудования на основе имитационной модели автомобильного и тракторного производств. - М.: «Сборка в машиностроении, приборостроении» № 7, 2005. 2. Ламин И.И., Абрамченков Н.В. Имитационная модель предпроектного расчёта параметров технологического оборудования сборочного производства. - М.: «Вестник МАМИ 2008», 2008. 3. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений т.1. - М.: Гос. издат. физ.-мат. литературы, 1962. - 464 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТИПОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Астапенков С.Г. (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Актуальность работы. Анализ отказов газотурбинных двигателей (ГТД) в процессе эксплуатации показывает, что большинство повреждений деталей носит усталостный характер, поэтому практическое значение проблемы обеспечения их несущей способности трудно переоценить. Непрерывно растут требования к надежности и материалоемкости ГТД, все более жесткими становятся условия работы и режимы эксплуатационной нагруженности.

При создании новых ГТД приходится сталкиваться с необходимостью обеспечения максимального резерва прочности каждой детали с учетом условий эксплуатации и конструктивных особенностей.

Цель работы. Повышение качества лопаток направляющего аппарата ГТД за счет оптимизации ее геометрических параметров.

В работе решается ряд задач, ключевыми из которых являются: определение условий силового нагружения лопаток газотурбинного двигателя в рабочих режимах, создание твердотельной и конечно элементной модели типовой конструкции лопатки газотурбинного двигателя, исследование напряженно-деформированного состояния лопатки газотурбинного двигателя до и после оптимизации их геометрической модели, разработка рекомендаций по совершенствованию конструкций лопаток газотурбинного двигателя.

В качестве исходных данных принимаются геометрические параметры лопатки газотурбинного двигателя, ее конструкция, материал, из которого изготавливается лопатка газотурбинного двигателя. Задачи решаются с помощью программы ANSYS.

Наиболее нагруженными деталями газотурбинных двигателей, определяющими их ресурс, являются лопатки ротора турбины.

Профильная часть и хвостовики лопаток кроме растяжения и изгиба от центробежных сил, изгиба и кручения от газового потока испытывает переменные напряжения от вибрационных нагрузок, частота и амплитуда которых изменяются в широких пределах, а также от тепловых нагрузок. В этом случае температура на лопатках первой ступени турбины достигает 1200°C. Во время работы двигателя входная и выходная кромки лопаток нагреваются и охлаждаются значительно быстрее, чем средняя часть лопатки. При этом на входной и выходной кромках лопатки возникают напряжения сжатия (при нагреве) и растяжения (при охлаждении).

Кроме того, лопатки турбины работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре, что может вызвать их газовую коррозию. Находясь в запыленном и влажном воздушном потоке, лопатки подвергаются постоянному воздействию абразивных частиц, отчего входные и выходные кромки изнашиваются.

В связи с изложенным, для обеспечения необходимой долговечности деталей и в целом работоспособности двигателей к конструкциям данных деталей предъявляют такие требования, обеспечение которых возможно только при реализации специальных технологий. Технология изготовления лопаток определяется их геометрической формой, свойствами материала и указанными эксплуатационными свойствами.

Перо лопатки имеет сложную пространственную форму с переменными по длине профилями поперечных сечений.

В данном случае лопатка закрепляется цилиндрической частью, на выпуклую часть пера лопатки действует давление 15000 Па.

В качестве исходных данных принимаются геометрические параметры лопатки газотурбинного двигателя, ее конструкция, материал, из которого изготавливается лопатка газотурбинного двигателя. Материал лопатки направляющего аппарата – титановый сплав ВТЗ-1.

Численный анализ методом конечных элементов является методом приближенного решения задач, которые невозможно или сложно решить аналитическим путем. В его основе лежит принцип разбиения сплошной непрерывной среды на конечные элементы, характер взаимодействия которых известен. Результат разбивки приведен на рисунке 2.

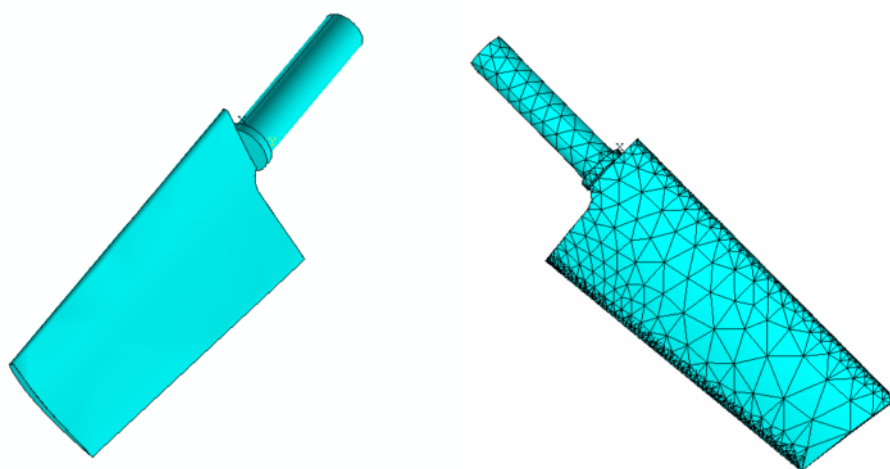


Рис. 1. Геометрическая модель лопатки направляющего аппарата

Рис. 2. Геометрическая модель лопатки, разбитая на конечные элементы

Результаты полученных эквивалентных напряжений до и после оптимизации показаны на рисунках 3 и 4.

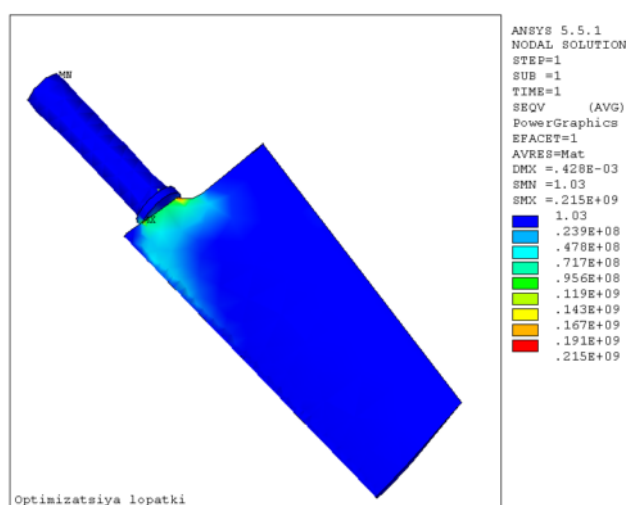


Рис. 3. Эквивалентные напряжения до оптимизации

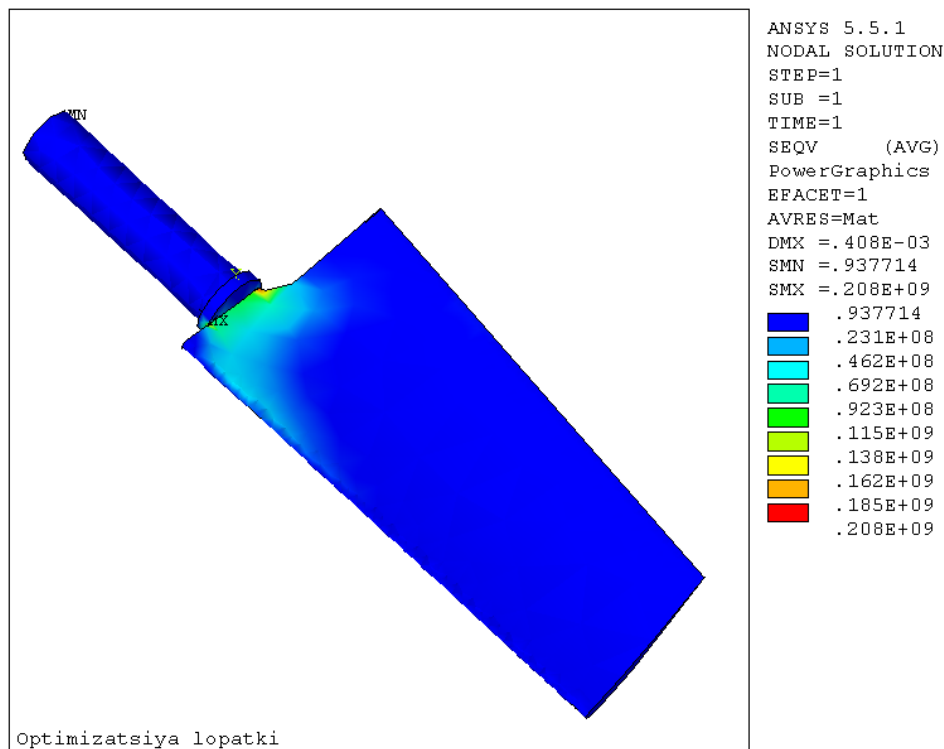


Рис. 4. Эквивалентные напряжения после оптимизации толщины

До оптимизации средняя толщина лопатки составляла:

$$\frac{(0.4039 + 0.9454) + (0.6226 + 0.3957)}{2} = 1.1838 \text{ мм}$$

После оптимизации средняя толщина лопатки составила:

$$\frac{(0.4376 + 0.9791) + (0.6563 + 0.429)}{2} = 1.251 \text{ мм}$$

При этом максимальное напряжение до оптимизации составляло 215 МПа, а после оптимизации толщины лопатки составило 208 МПа.

Таким образом, существует возможность оптимизации различных геометрических параметров для уменьшения различных напряжений и повышения долговечности изделия.

Список литературы: 1. Демин Ф. И., Проничев Н. Д., Шитарев И. Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2002 – 328 с. 2. Анурьев В. И. Справочник конструктора - машиностроителя. - М.: Машиностроение, 1980. - Т1. 3. Руководство по основным методам проведения анализа в программе ANSYS./ www.ans.com.ru – 399 с. 4. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах / под. ред. Д. Г. Красковского. – М.: Компьютер Пресс, 2002 – 224

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ТРЕЩИНЕ В ОБЛАСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

Болдырева О.Н., Звягинцева А.В., Долженкова В.В. (ВГТУ, г. Воронеж, Россия)

В промышленности металлические конструкции функционируют в условиях приложения локальных механических нагрузок – циклических или статических. Это приводит к возникновению локальных напряжений в материале, к появлению дефектов нарушения сплошности и разрушению конструкций. Переход от локальных напряжений к образованию дефектов может происходить в течение короткого времени, недостаточного для их обнаружения традиционными методами неразрушающего контроля, что приводит к снижению надежности конструкций. Трудности диагностики реального технического состояния металлических конструкций заключаются в том, что возникающие концентраторы напряжений не проявляются визуально.

Поэтому задача разработки и внедрения метода оперативного неразрушающего контроля сложных металлических конструкций – актуальна.

При нагружении металлоконструкций в местах концентрации напряжений происходит интенсивная деградация их с деформацией, которая сопровождается выделением тепла [1-3].

Распространение тепла в конструкции приводит к тому, что на ее поверхности возникает сложное распределение температурного поля (4), формально зафиксировав которое и решив обратную задачу нестационарной теплопроводности, можно восстановить распределение источников тепла и определить положение и размер дефекта. Этот подход может быть положен в основу методики диагностики технического состояния металлических конструкций тепловым методом.

Экспериментально показано [5-6], что температура металлического образца в области пластической деформации при распространении трещины может повышаться до 70 °С.

В работе [7,8] рассмотрено аналитическое решение в квадратурах задачи нестационарной теплопроводности для произвольной геометрии конструкции, однако вычисление соответствующих интегралов возможно лишь с помощью численных методов. Ситуация усложняется при применении обратной задачи нестационарной теплопроводности, где аналитическое решение удастся получить лишь для небольшого числа модельных объектов, например бесконечной пластины. Использование численных методов, в случае объектов со сложной геометрией, сопряжено с большими вычислительными затратами, поэтому на практике при решении обратной задачи (тепловой дефектометрии) прибегают к различным приближениям.

Для упрощения математического аппарата без потери общности решения задач, в целях получения достаточно простых оценочных формул, легко применимых при практическом использовании теплового контроля, в том числе тепловой дефектометрии металлоконструкций.

Рассмотрим пластическую деформацию вблизи концентраторов напряжений. Если тело имеет сложную геометрическую форму, то напряжения в нем распределены неоднородно по объему. Для количественной характеристики возрастания напряжений вводят коэффициент концентрации напряжений [3]:

$$K_t = \sigma(r) / \sigma(\infty), \quad (1)$$

где $\sigma(\infty)$, — напряжение в однородной части объекта.

Концентратором напряжений может стать любая неоднородность в конструкции: сварной шов, стык элементов конструкции и т.п. Наиболее опасными считаются концентраторы, возникающие в районе трещиноподобных дефектов, которые могут быть следствием износа конструкции.

Рассмотрим изотропное тело со сквозной трещиной. Выражение для напряжений вблизи ее вершины имеет следующий вид:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \text{регулярные члены}, \quad (2)$$

где σ_{ij} , — тензор напряжений; K — коэффициент интенсивности напряжений; f_{ij} — безразмерная функция, индексы i и j обозначают декартовы координаты x и y ; θ, z — координаты точки в полярной системе координат.

Для получения численных оценок ограничимся рассмотрением трещины нормального отрыва, для которой коэффициент интенсивности напряжений определяется следующим выражением [3]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l}, \quad (3)$$

где σ , — действующее напряжение; l — размер трещины. Размер зоны сингулярности составляет примерно $l/50$, т.е. лишь 0,2 мм при длине трещины 10 мм.

В природе не существует материалов, которые бы выдерживали неограниченно большие напряжения. Поэтому вблизи вершины трещины в реальных телах проявляются нелинейные эффекты, и материал переходит в пластическое состояние. Пластическое течение должно привести к «срезанию» особенности распределения упругих напряжений вблизи вершины трещины.

В основе предлагаемого метода теплового контроля лежит предположение о том, что заметная деформация, сопровождающаяся выделением тепла, возникает в тот момент, когда локальное механическое напряжение достигает условного предела текучести σ_{02} . Это предположение подтверждено экспериментально (5, 6) и является широко распространенным в современной теории упругопластической деформации твердого тела. Таким образом, регистрируя температурное поле поверхности в предполагаемом районе трещины, можно по анализу его изменения определять области механических напряжений и оценивать их величины.

Рассмотрим фрагмент металлоконструкции с концентратором напряжений, который характеризуется коэффициентом концентрации напряжений $K_t(r)$, где r — координата точки на поверхности фрагмента.

Для определения $K_t(r)$ необходимо регистрировать температурное поле в процессе постепенного нагружения исследуемого объекта. Для дальнейшего анализа введем предположение, что напряжение в бездефектной части фрагмента $\sigma_\infty(t)$, известно (либо с помощью непосредственных измерений, либо на основе расчетных данных).

Вблизи концентратора напряжений механическое напряжение

$$\sigma(r, t) = K_t(r) \sigma_\infty(t) \quad (4)$$

При достижении напряжения в некоторой точке вблизи концентратора напряжений значения σ_{02} , здесь начинает выделяться тепло. Обозначим через $R(t)$ координату точки, в которой начинается выделение тепла в момент t . Это распределение температуры поверхности и регистрируется в процессе проведения теплового контроля. Определим коэффициент концентрации напряжений:

$$K_t(R(t)) = \frac{\sigma_{02}}{\sigma_{\infty}(t)} \quad (5)$$

Таким образом, для нахождения пространственного распределения коэффициента концентрации напряжений $K_t(r)$ достаточно нагрузить конструкцию и фиксировать изменение температурного поля на ее поверхности, что позволит установить зависимость $R(t)$.

При использовании предлагаемого способа необходимо учитывать, что металл — хороший проводник тепла, которое быстро распространяется из области концентрации напряжений в бездефектную область. В результате вблизи концентратора напряжений будет наблюдаться повышение температуры, хотя реальное напряжение будет ниже порогового σ_{02} .

Рассмотрим слой металлической пластины, внутри которого имеется трещина шириной d .

Плоскость, где она находится, перпендикулярна к поверхности металла.

В рамках предположения, при решении задачи теплопроводности, область, в которой выделяется тепло, можно считать бесконечно малой и не рассматривать ее внутреннюю структуру. Во-вторых, заменим реальную временную зависимость мощности выделения тепла на меандр:

$$Q(t) = Q_0[\theta(t) - \theta(t - \tau)], \quad (6)$$

где $\theta(t)$ — ступенчатая функция Хевисайда.

Реальная зависимость $Q(t)$ определяется динамикой нагружения образца (рис.1). Функция (8) простейшим образом моделирует динамику выделения тепла в области пластической деформации. Величину τ назовем «длительность тепловыделения».

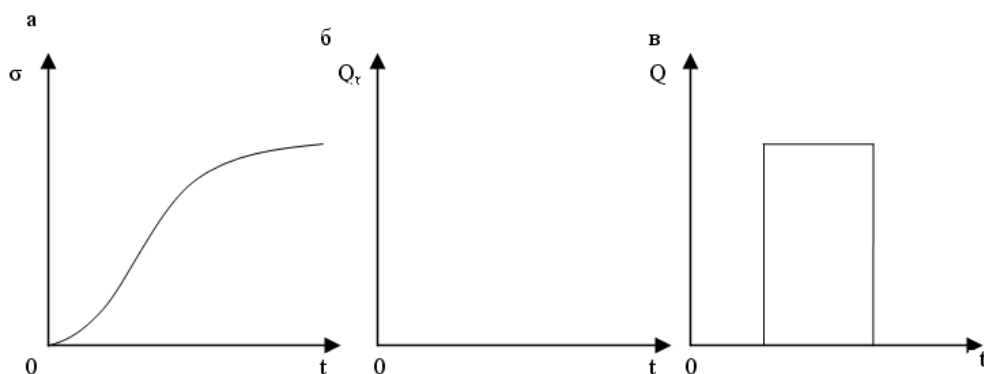


Рис.1. Характеристики нагружения образца:

а — динамика нагружения; б — тепловыделение в области деформации;
в — модельная зависимость

Так как трещина считается бесконечно узкой, то она не влияет на процесс распространения тепла в металле. Кроме того, в целях упрощения анализа расчетов рассмотрим лишь область тепловыделения с центром в точке ($x = 0, y = 0$). Таким образом, чтобы рассчитать температурное поле u в металле, надо решить нестационарное уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{du}{dt} = \lambda \Delta u + Q_0 \theta(\tau - t) (\theta(z) \theta(r - r_p)), \quad (7)$$

где c, ρ и λ – соответственно теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности металла; Δ – оператор Лапласа; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Для решения этого уравнения зададим граничные условия на поверхности металла:

$$\lambda \frac{du}{dz} \Big|_{z=0} = \alpha u \Big|_{z=0}, \quad (8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи поверхности.

Вместо неограниченного образца рассмотрим металлический цилиндр, что позволит упростить решение задачи теплопроводности. так как неоднородная часть уравнения обладает аксиальной симметрией. Будем считать, что на радиальных границах цилиндра температура равно нулю. Радиус цилиндра R и его высота L выбираются больше, чем линейный размер области поверхности, в которой наблюдается существенное возмущение температурного поля. Решение задачи внутри цилиндра больших размеров не отличается от решения задачи в полубесконечном слое металла.

Введем безразмерные величины:

$$\bar{z} = \frac{z}{r_p}; \bar{r} = \frac{r}{r_p}; \bar{t} = \frac{\lambda t}{c\rho r_p^2}; \bar{u} = \frac{\lambda u}{Q_0 r_p^2}; \bar{L} = \frac{L}{r_p}; \bar{R} = \frac{R}{r_p}; \bar{\alpha} = \frac{\alpha r_p}{\lambda} \quad (9)$$

Перепишем уравнение (9) в следующем виде:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{z}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{r}} + \theta(\bar{r} - 1) \theta(\bar{t}) \quad (10)$$

Кроме того, необходимо задать граничные условия:

$$\bar{u}(\bar{R}) = 0; \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{z}} \Big|_{\bar{z} = -\frac{\bar{L}}{2}} = -\bar{\alpha} \bar{u} \Big|_{\bar{z} = -\frac{\bar{L}}{2}}; \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{z}} \Big|_{\bar{z} = \frac{\bar{L}}{2}} = -\bar{\alpha} \bar{u} \Big|_{\bar{z} = \frac{\bar{L}}{2}}; \quad (11)$$

Уравнение теплопроводности (12) решим методом разделения переменных, представив его в следующем виде:

$$\hat{u}(\hat{t}, \hat{r}, \hat{z}) = \sum_{m,n} \frac{I_{r,n} I_{z,m} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\left(\frac{\gamma_m}{\hat{L}} \right)^2 + \left(\frac{\beta_n}{\hat{R}} \right)^2 \right) \hat{t} \right] \right\}}{\left(\frac{\beta_n}{\hat{R}} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_m}{\hat{L}} \right)^2} J_0 \left(\frac{\beta_n}{\hat{R}} \hat{r} \right) \cos \left(\frac{\gamma_m}{\hat{L}} \hat{z} \right); \quad (12)$$

где коэффициенты $I_{r,n}$ и $I_{z,m}$ задаются следующими выражениями:

$$I_{r,n} I_{z,m} = \frac{\int_0^1 \hat{z} J_0 \left(\frac{\beta_n}{\hat{R}} \hat{z} \right) d\hat{z}}{\frac{\hat{R}^2}{2} [J'_0(\beta_n)]^2} = \frac{\frac{\hat{R}}{\beta_n} J_1 \left(\frac{\beta_n}{\hat{R}} \right)}{\frac{\hat{R}^2}{2} [J'_1(\beta_n)]^2} = \frac{2 J_1 \left(\frac{\beta_n}{\hat{R}} \right)}{\beta_n \hat{R} [J'_1(\beta_n)]^2}; \quad (13)$$

$$I_{z,m} = \frac{\int_0^{\hat{L}/2} \cos \left(\frac{\gamma_m}{\hat{L}} \hat{z} \right) d\hat{z}}{\int_0^{\hat{L}/2} \cos^2 \left(\frac{\gamma_m}{\hat{L}} \hat{z} \right) d\hat{z}} = \frac{4 \sin \left(\frac{\gamma_m}{2} \right)}{\gamma_m + \sin(\gamma_m)}; \quad (14)$$

Значения γ_m - определяются из решения трансцендентного уравнения

$$\tan \frac{\gamma_m}{2} = \frac{\hat{L} \hat{\alpha}}{\gamma_m} \quad (15)$$

Значение β_n - нуль функции Бесселя нулевого порядка:

$$J_0(\beta_n) = 0; \quad (16)$$

Соотношения между режимами механического нагружения и количеством выделяемого тепла в области концентратора напряжения, что дает возможность: определять оптимальные режимы механического нагружения; оценивать обнаружение областей концентраторов напряжений и дефектов по анализу температурных полей.

Список литературы: 1. Rittel D. Thermomechanical aspects of dynamic initiation / International Journal of Fracture 99. – 1999. – P.201-212. 2. Rittel D., Rabin Y. An investigation of the heat generated during cyclic loading of two glassy polymers / Part II: Thermal analysis, Mechanics of Materials 32. – 2000. – P. 149-159. 3. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 3. Тепловой неразрушающий контроль изделий / О.Н. Будадин, А.И. Потапов, В.И. Колганов и др. – М.: Наука, 2002. – 472 с. 4. Rittel D. Experimental investigation of transient thermoplastic effects in dynamic fracture / International Journal of Solids and Structures 37. – 2000. Bougaut O., Rittel D. On crack-tip cooling during dynamic crack initiation / International Journal of Solids and Structures 38. – 2001. – P.2517-2532. 5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ВХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОКАРНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ

Болтян А.В., Болтян М.А., Лисичкина А.В. (каф. ТМ, ДонНТУ, г.Донецк, Украина)

Оперативное управление технологическим процессом изготовления деталей на станках с ЧПУ заключается в выработке управляющих воздействий, благоприятствующих протеканию самого процесса. В то же время, для рабочего процесса обработки заготовок на станках с ЧПУ характерной особенностью является нестабильность, вызываемая большим количеством внешних возмущений, которые приводят к отклонению параметров обработки от оптимальных, первоначально заданных в управляющей программе. С целью корректировки указанных отклонений рекомендуется использовать адаптивную систему управления станком, которая позволяет решить задачу так называемой внутренней оптимизации режимов обработки.

В адаптивной системе управления станком с ЧПУ технологический процесс задается в виде эталонной модели интеграла свертки, где импульсная переходная функция вычисляется решением однородного дифференциального уравнения с учетом начальных условий, [1]. При этом операция интегрирования выступает в качестве сглаживающего фильтра высокочастотных помех в составе входного сигнала, в качестве которого рекомендуется использовать мгновенное значение силы резания, [2]. В качестве параметра регулирования токарного станка с ЧПУ в [3] предложено использовать скорость продольной подачи.

Таким образом, модель объекта управления в виде интеграла свертки, с использованием методов оценки оптимальных параметров рабочего процесса для импульсной переходной функции, позволяет вычислить выходную переменную (продольную подачу) при любом изменении вектора входной переменной (силы резания) на основе принципов суперпозиции и сглаживания высокочастотной помехи. Процедура коррекции значения скорости продольной подачи выполняется одиночными импульсами с соответствующими тактовыми частотами.

В соответствии с указанным выше нам следует определить необходимый объем информации для системы адаптивного управления станком с ЧПУ. Поскольку процесс на входе в систему управления является случайным, [4], то, исходя из точности оценки корреляционной функции, необходимый объем информации можно определить по выражениям, [5]:

$$\tau_{\max} \geq f_{\min}^{-1}; \quad T_p \geq 16\tau_{\max} / \delta\%; \quad T_\delta = \frac{1}{20f_{\max}}.$$

Здесь τ_{\max} – максимальное смещение; f_{\min} , f_{\max} – соответственно, минимальная и максимальная частота в реализации мгновенной силы резания; T_p – интервал суммирования (продолжительность реализации); T_δ – интервал сканирования (шаг квантования); $\delta\%$ – допустимая ошибка при определении корреляционной функции, %.

С целью определения значений минимальной и максимальной частот в реализации мгновенной силы резания нами были проведены экспериментальные исследования. На токарно-винторезном станке 16К20 производилось наружное точение исходной заготовки из круглого проката диаметром 40 мм. Материал заготовки – сталь 45. Были приняты следующие режимы резания: частота вращения шпинделя станка – 400 об/мин, продольная подача – 0,2 мм/об, глубина резания – 2 мм. Усилие резания фиксировалось с помощью быстродействующего самопишущего прибора. Фиксация силы резания производилась с помощью динамометра УДМ-600. На рис. 1 приведен

фрагмент реализации значений мгновенной силы резания при наружной продольном точении.

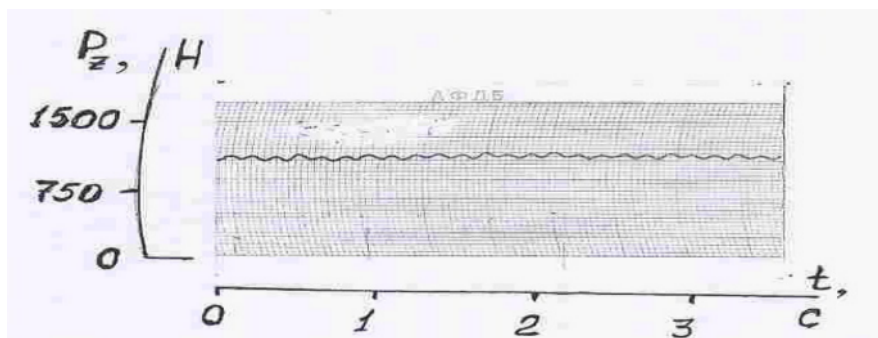


Рис. 1. Фрагмент реализации мгновенной силы резания

Обработка полученного экспериментального материала производилась по специально разработанной программе, позволяющей рассчитать параметры нормированной корреляционной функции и нормированной спектральной плотности зафиксированного параметра, т.е. силы резания. В результате обработки, рис. 2, установлено, что в спектре частот мгновенной силы резания можно выделить минимальную частоту 0,4 Гц и максимальную частоту – 6,5 Гц.

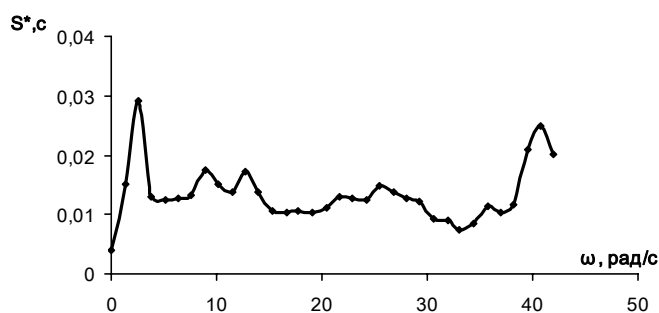


Рис. 2. Нормированная спектральная плотность мгновенной силы резания

Таким образом, приняв $\delta\% = 5\%$, можно рассчитать параметры, характеризующие объем входной информации для системы адаптивного управления токарным станком с ЧПУ: $\tau_{\max} \geq 2,5с$; $T_p \geq 8,0с$; $T_\delta = 0,014с$.

Список литературы: 1. Захидов Б.А., Аюпов Р.Х. Алгоритмы моделирования и управления технологическими процессами. – Ташкент: Фан, 1989. – 116 с. 2. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Маш-ние, 1989. – 296 с. 3. Адаптивная система управления токарным с ЧПУ станком/ Горобец И.А., Голубов Н.В., Болтян А.В., Огинский А.Г. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – Вып. 11. – С. 192-195. 4. Горобец И.А., Шабан К. Параметры регулирования адаптронных систем токарных станков // Известия ТРТУ – ДонНТУ. Материалы Третьего Международного научно - практического семинара «Практика и перспективы развития институционального партнерства». В 2-х кн. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – Кн. 2. – С. 47 – 53. 5. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1960. – 656 с.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ

А.С. Бородин, А.Р. Емельяненко, Г.А.Квашнина, Д.Д. Лапшин (каф. ТОГОЧС ВГТУ, г. Воронеж)

Общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) включает в себя следующие четыре этапа [1,2]: 1) постановка задачи моделирования путем построения специальной структурной схемы функциональной целостности (СФЦ); 2) определение логической функции работоспособности системы (ФРС); 3) построение многочлена расчетной вероятностной функции (ВФ); 4) вычисление вероятностных показателей системы. Современная теория и технология автоматизированного ОЛВМ [3-6] основывается на ручной структурной постановке задачи моделирования, путем построения СФЦ исследуемой системы. Все последующие этапы определения расчетных математических моделей (логической и вероятностной) выполняются автоматически с помощью ЭВМ. Для этого разработаны специальные программные комплексы автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ) [7].

Технологию автоматизированного ОЛВМ проиллюстрируем простым примером построения математических моделей безопасности, аварии и риска гипотетического участка железной дороги (ж.д.). СФЦ системы приведена на рис. 1.

Она состоит из пяти логически связанных бинарных событий: X_1 - излом рельса, X_2 - предмет на рельсах; X_3 - безотказная работа индикатора излома рельса; X_4 - своевременное включение машинистом тормозной системы поезда; X_5 - безотказность тормозной системы, где:

$$\begin{cases} Y_1 = X_1 \\ Y_2 = X_2 \\ Y_3 = X_3 \cdot Y_1 \\ Y_4 = X_4 \cdot (Y_2 \vee Y_3) \\ Y_5 = X_5 \cdot Y_4 \\ Y_6 = Y_1 \cdot Y_2 \\ Y_7 = Y_2 \vee Y_5 \end{cases} \quad \begin{cases} \bar{Y}_1 = \bar{X}_1 \\ \bar{Y}_2 = \bar{X}_2 \\ \bar{Y}_3 = \bar{X}_3 \vee \bar{Y}_1 \\ \bar{Y}_4 = \bar{X}_4 \vee \bar{Y}_2 \\ \bar{Y}_5 = \bar{X}_5 \vee \bar{Y}_4 \\ \bar{Y}_6 = \bar{Y}_1 \vee \bar{Y}_2 \\ \bar{Y}_7 = \bar{Y}_6 \cdot Y_5 \end{cases} \quad (1)$$

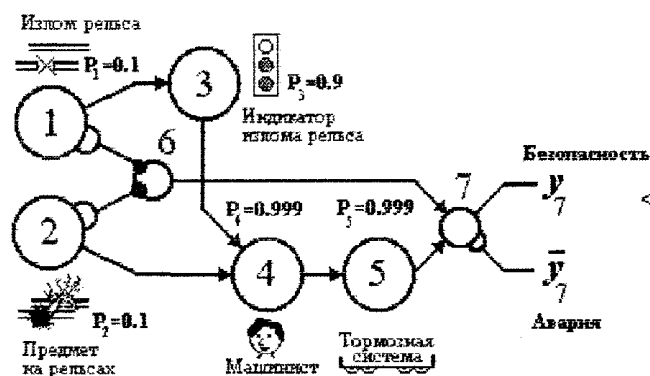


Рис. 1. Схема функциональной целостности системы безопасности, аварии и риска участка железной дороги

Подробное описание постановки и ручного решения данной задачи приведено в [4]. Здесь мы остановимся на технологических аспектах использования ОЛВМ для автоматического построения нескольких видов математических моделей систем, структуры которых могут быть представлены с помощью аппарата схем функциональной целостности.

Технология автоматизированного аналитического ОЛВМ предусматривает ввод в ЭВМ СФЦ системы, вероятностных параметров ее элементов и логического критерия исследуемого режима ее функционирования. В примере критерием безопасности является выходная функция y_7 . Далее, с помощью ПК АСМ [7], автоматически формируются логическая ФРС и многочлен расчетной вероятностной функции безопасности:

$$y_7 = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (2)$$

С помощью ОЛВМ можно автоматически получать логические и вероятностные модели большой размерности, до нескольких сотен и тысяч слагаемых. В отличие от классических монотонных ЛВМ, общий логико-вероятностный метод реализует функционально полный набор операций алгебры логики "И", "ИЛИ", "НЕ". Это позволяет автоматически строить как все виды монотонных, так и новый класс - немонотонные аналитические модели систем произвольной структуры (рис. 2). В настоящее время в автоматизированном ОЛВМ реализованы следующие новые возможности моделирования.

Учет в вероятностной модели системы различных законов распределения вероятностей ее элементов (экспоненциальный, нормальный, Вейбулла-Гнеденко и др.).

1. Расчет показателей роли отдельных элементов в определении общесистемной вероятностной характеристики:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= P_A(\text{при } P_i = 1) - P_A(\text{при } P_i = 0) - \text{значимость}; \\ \pi_i^+ &= P_0(\text{при } P_i = 1) \quad P_0 - \text{положительный вклад}; \\ \pi_i^- &= \text{отрицательный вклад}; \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 2 приведены графики значимости элементов в обеспечение безопасности рассматриваемого участка ж.д.

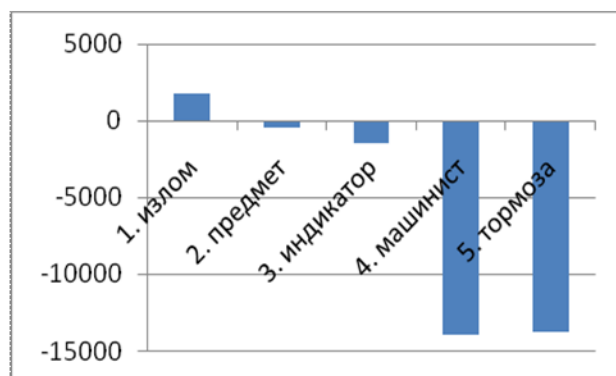


Рис. 2. График значимости элементов в обеспечение безопасности рассматриваемого участка железной дороги

2. Учет групп несовместных (зависимых) событий (ГНС) и множественных (больше двух) собственных состояний элементов системы. Он основывается на нескольких специальных (новых) законах алгебры логики и правилах вычисления вероятностей:

Если $x_i \cdot x_j = 0$, то:

$$\begin{aligned} \overline{x_i} \vee \overline{x_j} &= 1; \\ \overline{x_i} \cdot x_j &= x_j; \\ x_i \vee \overline{x_j} &= \overline{x_j}; \\ p\{x_i \vee x_j\} &= 1; \quad (4) \\ p\{x_i \cdot x_j\} &= P_i \cdot P_j; \\ p\{\overline{x_i} \cdot \overline{x_j}\} &= 1 - (P_i + P_j) \end{aligned}$$

Так, если допустить в рассматриваемом примере, что исходные события x_1 и x_2 несовместные ($x_1 \cdot x_2 = 0$), то вероятностная модели безопасности (2) изменится:

$$P_B = p\{y_2\} = 1 - P_1 - P_2 - P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 + P_2 P_4 P_5 = 0,98964 \quad (5)$$

Учет ГНС позволил существенно повысить качество моделирования и расширить область применения технологии автоматизированного аналитического ОЛВМ.

Технология автоматизированного статистического ОЛВМ предусматривает ввод в ЭВМ тех же исходных данных (СФЦ, параметров элементов и ЛКФ), однако далее, с помощью ПК АСМ [7], автоматически формируется имитационная (статистическая) модель исследуемой системы. В настоящее время реализованы два подхода к автоматизации процессов логико-вероятностного построения статистических моделей систем. Первый подход основывается на так называемом логико-статистическом методе (ЛСМ) академика И. А. Рябинина. В ЛСМ и ОЛВМ первые два этапа совпадают. В результате формируется явная аналитическая форма логический ФРС (например (1)). Далее она рассматривается как основа, для организации проведения машинных статистических испытаний и получения оценок вероятностных показателей исследуемой системы. Таким образом, в ЛСМ исключена необходимость автоматического построения (иногда очень громоздких!) многочленов расчетных ВФ. Второй подход основывается на так называемом итерационном логико-статистическом методе (ИЛСМ), разработанным доцентом А.О.Алексеевым [3]. В ИЛСМ исключена необходимость явного построения на ЭВМ всех аналитических моделей - и многочленов ВФ и логических ФРС. Получение оценок вероятностных характеристик систем в ИЛСМ основывается на специальных машинных процедурах статистического решения любых (монотонных и немонотонных) систем логических уравнений, задаваемых СФЦ (см. например рис. 1), и расчета значимости всех элементов. Так, с помощью ИЛСМ реализованного в [7], были получены результаты статистического вероятностного анализа безопасности участка ж.д. $P_B^* = 0,99066$, $x_1^* = -0,09268$, $x_2^* = 0,00661$, $x_3^* = 0,09547$, $x_4^* = 0,16483$, $x_5^* = 0,117714$. Эти результаты согласуются с аналитическими решениями задачи (см. (2) и рис.2).

Технология автоматизированного ОЛВМ построения марковских моделей систем первоначально была разработана для расчета условных законов живучести систем к воздействию на их элементы различных последовательностей поражающих факторов [2]. Был автоматизирован самый громоздкий и трудоемкий процесс построения, на основе СФЦ и ЛКФ, самой цепи Маркова, т.е. графа переходов

состояний системы и всех допустимых переходов. В ОЛВМ множество марковских состояний работоспособности системы определяется путем автоматического преобразования логической ФРС в совершенную дизъюнктивную нормальную форму (СДНФ). Затем, на основе специальных правил поразрядного сравнения пар конъюнкций полученной СДНФ автоматически определяются допустимые логические функции переходов (ЛФП) между марковскими состояниями системы и рассчитываются их параметры. Например, правила поразрядного сравнения переменных $x_i(j) - x_i(k)$ конъюнкций СДНФ логической ФРС для определения переменных $x_i, i = 1, 2, \dots, N$, ЛФП $\varphi_{j,k}$ между состояниями $S_j \Rightarrow S_k$ цепи Маркова для невозстанавливаемых систем, следующие:

Если $x_i(j) \rightarrow x_i(k)$, то $\varphi_{j,k} = \varphi_{j,k} \cdot x_i$ - не поражение элемента x_i ;

Если $x_i(j) \Rightarrow \bar{x}_i(k)$, то $\varphi_{j,k} = \varphi_{j,k} \cdot \bar{x}_i$ - поражение элемента x_i ;

Если $\bar{x}_i(j) \Rightarrow \bar{x}_i(k)$, то $\varphi_{j,k} = \varphi_{j,k} \cdot 1$ - элемент x_i уже поражен; Если $\bar{x}_i(j) \Rightarrow x_i(k)$, то $\varphi_{j,k} = \varphi_{j,k} \cdot 0$ - элемент x_i не восстанавливается. (6)

Построенная по указанным правилам марковская цепь системы, СФЦ которой приведена на рис. 1, характеризуется 13-ю комбинаторными марковскими состояниями безопасности и 70-ю допустимыми переходами между этими состояниями. Правила, аналогичные (4), и соответствующие машинные программы разработаны для нескольких видов поражающих воздействий, систем с ГНС и восстановлением элементов. Технология ОЛВМ построения цепей Маркова позволяет полностью автоматизировать процессы построения практически всех известных видов и классов дискретных и непрерывных марковских и полумарковских моделей систем большой размерности, состояния которых описываются конъюнкциями простых логических переменных.

Технология автоматизированного ОЛВМ построения моделей реальной эффективности. Способность ОЛВМ строить немонотонные модели устойчивости (надежности, живучести и безопасности) \bar{E} впервые позволила объединить эти модели с множеством других, специальных моделей, характеризующих условную эффективность E_j функционирования систем в различных состояниях [2,5].

$$W_e = \sum_{j=1}^M P_e(Y_j) \cdot E_j \quad (7)$$

Здесь M - количество областей состояний в которых система функционирует с разной эффективностью E_j , а E - вероятность нахождения системы в этих состояниях определяется автоматически ПК АСМ. Тогда W_e - математическое ожидание эффективности системы с учетом ее устойчивости.

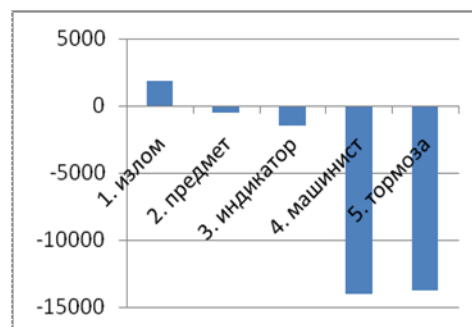


Рис. 3. График значимости элементов по риску системы

$$W_2 = 15000 \cdot P_2(\bar{y}_7, y_1, y_2) + 10000 \cdot P_2(\bar{y}_7, y_1, \bar{y}_2) = 5000 \cdot P_2(y_7, y_1, y_2) = 92,8 \text{ p. e.} \quad (8)$$
$$\overline{y_2} = x_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_2 y_{x1} \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4 y_{x2} \cdot \bar{x}_4 y_{x2} \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 y_{x1} \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \quad (9)$$

Список литературы: 1. Можаяев А.С. Общий логико-вероятностный метод

- анализа надежности структурно сложных систем. Уч. пос. Л.:ВМА, 2000 г. **2.** Можаяев А.С. Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов анализа систем. В сб.: Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. Под редакцией И. А. Рябина. Препринт 101. СПб.: ИПМАШРАН, 2002, С.23-53. **3.** Можаяев А.С., Алексеев А.О. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и вероятностный анализ сложных систем. Там же, Препринт 104. с. 17-42. **4.** Можаяев А.С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование в решении задач вероятностного анализа безопасности. Там же, Препринт 110 с. 16-38. **5.** Mozhaev A.S. Theory and practice of automated structural-logical simulation of system. International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97). Tom 3. St.Petersburg: SPIIRAS, 1997, p. 1109-1 II 8. **6.** Можаяев А.С. Формализмы для автоматизации логико-вероятностного моделирования, Труды семинара "Компьютерные системы интеллектуальной поддержки моделирования" СПб.: СПИИРАН, Ленэкспо, 1999, -12 с. WEB-сайт Ленэкспо: <http://www.ienexpo.ru>. **7.** Можаяев А.С., Алексеев А.О. Громов В.Н. Автоматизированное логико-вероятностное моделирование технических систем. Руководство пользователя ПК АСМ, версия 5.0. СПб.: ВИГУ, 1999.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ В СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Варданян Ю.С., Рыбинская Т.А. *(кафедра механики, ТТИ ЮФУ, г. Таганрог, Россия)*

Стеклопластик обладает многими очень ценными свойствами, дающими ему право называться одним из материалов будущего. Удельный вес стеклопластиков колеблется от 0,4 до 1,8 и в среднем составляет 1,1 г/см³. Это делает стеклопластик особенно удобным для применения на транспорте. Экономия в весе на транспорте переходит в экономию энергии; кроме того, за счет уменьшения веса транспортных конструкций (самолетов, автомобилей, судов и т.п.) можно повысить их полезную нагрузку и за счет экономии топлива увеличить радиус действия.

Стеклопластики являются прекрасными электроизоляционными материалами при использовании как переменного, так и постоянного тока. Стеклопластики как диэлектрики совершенно не подвергаются электрохимической коррозии. Они стойки к различным агрессивным средам, в том числе и к воздействию концентрированных кислот и щелочей. При своем небольшом удельном весе стеклопластик обладает высокими физико-механическими характеристиками. Используя некоторые смолы и определенные виды армирующих материалов, можно получить стеклопластик, по своим прочностным свойствам превосходящий некоторые сплавы цветных металлов и стали.

Существует много способов изготовления стеклопластиковых изделий, большинство из которых требует минимальных вложений в оборудование.

У каждого материала есть свои достоинства и недостатки. Из-за того, что у стеклопластика достоинств в разы больше чем недостатков, он получил столь широкое применение практически во всех сферах деятельности человека. Однако есть несколько общих недостатков у стеклопластика, если мы рассматриваем вопросы применения альтернативных материалов: слабая износостойкость; низкий модуль упругости; чувствительность к процессу изготовления и к режиму последующей эксплуатации; анизотропия прочностных, упругих и других свойств; гетерогенность структуры, способствующая ускоренному проникновению внешней среды в материалы.

Свойства композитных материалов на основе стеклопластика зависят как от характеристик наполнителя и связующего, так и от способа изготовления стеклопластика. Изменяя ориентацию волокон, можно в широких пределах регулировать механические свойства стеклопластиков. Наибольшей прочностью и жесткостью обладают стеклопластики, содержащие ориентированно расположенные непрерывные волокна.

Большой изотропией механических свойств обладают стеклопластики с неориентированным расположением волокон: гранулированные и спутанно-волокнистые пресс-материалы; материалы на основе рубленых волокон, нанесённых на форму методом напыления одновременно со связующим, и на основе холстов (матов). Из стеклопластика изготавливают корпуса яхт, катеров, гребных лодок, гидроциклов, маломерных судов, спасательных шлюпок; мачты и надстройки из стеклопластика; резервуары, обтекатели, буи и другое оборудование из стеклопластика. Стеклопластик используется для изготовления подкрылков, бамперов, накладок, элементов кузова, фургонов, багажников на крыши, кабин. Также стеклопластик используется в изготовлении передних и задних панелей кузовов автобусов, троллейбусов, трамваев; элементов внутреннего интерьера.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что в современной технике и быту стеклопластики различных марок находят весьма широкое применение, что объясняется их достаточно хорошими механическими свойствами в сочетании со сравнительно низкой стоимостью, на порядки меньшей, чем у традиционных металлических конструкционных материалов.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

Васьковский А.Н. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Ресурс и надежность авиационных двигателей в основном определяются несущей способностью лопаток компрессора (рис. 1), являющихся наиболее ответственными и высоконагруженными деталями, испытывающими в процессе эксплуатации значительные знакопеременные и циклические нагрузки, которые воздействуют на них с большими частотами. Лопатки компрессора самая массовая, высоконагруженная и ответственная деталь авиационного двигателя. Особенностью лопаток компрессора является то, что они первыми встречаются с инородным телом (птица, град и др.), попавшим в тракт двигателя.

Риски, забоины, эрозионные повреждения и др. дефекты значительно увеличивают уровень локальных вибронапряжений, что резко снижает прочностные характеристики лопаток. Поэтому создание благоприятного сочетания свойств поверхностного слоя на финишных отделочно-упрочняющих операциях оказывает большое влияние на повышение несущей способности лопаток ГТД. Актуальной задачей является оценка влияния поверхностного деформационного упрочнения на ударную прочность лопаток при соударении с посторонними предметами.

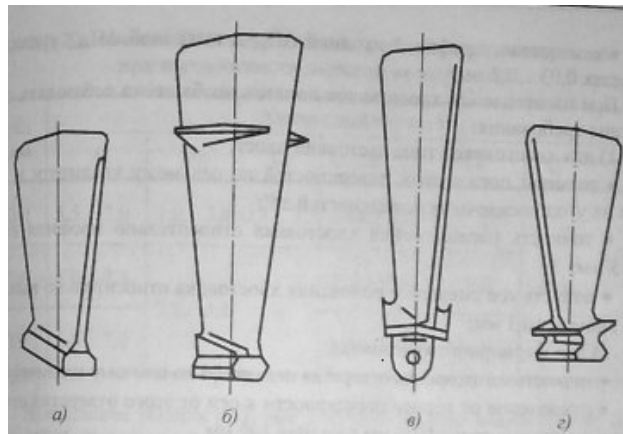


Рис. 1. Примеры конструкций лопаток компрессора: а) с хвостовиком типа ласточкин хвост; б) с антивибрационными полками; в) с шарнирным хвостовиком; г) с трапецидальным хвостовиком

В настоящее время при изготовлении лопаток компрессора широкое применение получили методы пластического деформирования и механической обработки, а также комплексные технологии на финишных операциях технологического процесса (Виброабразивная обработка; Ультразвуковая обработка шариками; Пневмодробеструйная обработка; Магнитно-абразивное полирование).

Также на сегодняшний день актуальной проблемой является повышение износостойкости лопаток компрессора. В связи с этим все более широкое применение получили различные виды комплексных технологий — нанесение плазменных покрытий в сочетании с различными отделочно-упрочняющими методами.

Целью данной работы является повышение долговечности и качества лопаток компрессора ГТД за счет совершенствования структурного и технологического обеспечения процессов изготовления лопаток компрессора ГТД. В соответствии с поставленной целью в работе планируется решить следующую задачу: провести анализ современного состояния структурного и технологического обеспечения процессов изготовления лопаток компрессора ГТД.

Лопатки ГТД работают в условиях высоких температур, достигающих для турбины свыше 1200 °С, для компрессора свыше 600 °С. Многократное изменение тепловых режимов работы двигателя - быстрый нагрев в момент запуска и быстрое охлаждение при остановке двигателя -

вызывает циклическое изменение термических напряжений, характеризуемое как тепловая усталость. Кроме этого, профильная часть пера и хвостовик лопатки, помимо растяжения и изгиба от центробежных сил, изгиба и крутящего момента от скоростного газового потока, испытывают знакопеременные напряжения от вибрационных нагрузок, амплитуда и частота которых изменяются в широких пределах.

Надежность работы рабочих лопаток компрессора и турбины зависит не только от их конструктивной прочности, сопротивления циклическим и длительным статическим нагрузкам, но и от технологии их изготовления, которая непосредственно влияет на качество поверхностного слоя хвостовика и пера лопаток. В поверхностном слое образуются конструктивные и технологические концентраторы напряжений, он испытывает влияние наклепа и внутренних остаточных напряжений от механической обработки. Кроме того, поверхностный слой подвергается воздействию внешних нагрузок, при основных видах напряженного состояния (изгибе, растяжении, кручении) внешней среды. Эти негативные факторы могут привести к разрушению лопатки, и, следовательно, к выходу из строя газотурбинного двигателя.

Производство лопаток ГТД занимает особое место в авиадвигателестроении, что обуславливается рядом факторов, главными из которых являются:

- сложная геометрическая форма пера и хвостовика лопаток;
- высокая точность изготовления;
- применение дорогостоящих материалов, таких, как легированные стали и титановые сплавы;
- массовость производства лопаток;
- оснащённость технологического процесса дорогостоящим специализированным оборудованием;
- высокая трудоемкость изготовления.

Для производства лопаток ГТД на сегодняшний день характерны следующие виды механической обработки:

- протягивание;
- фрезерование;
- валцевание;
- полирование;
- виброполирование или виброшлифование;
- термообработка.

Повышенные требования к точности исполнения отдельных элементов деталей и сборочных единиц, к качеству поверхностей и соединений определили следующие основные направления совершенствования технологических процессов производства.

1. Создание новых и совершенствование традиционных методов получения заготовок:

отливок из жаропрочных сплавов с направленной кристаллизацией или монокристаллических отливок в оболочковые формы по выплавляемым моделям для формирования бесприпусковых заготовок по перу для лопаток первых ступеней турбины; со сложными пространственными поверхностями из труднообрабатываемых материалов, полученных горячим деформированием материалов в условиях сверхпластичности; лопаток с высокой точностью профиля пера для различных ступеней компрессора с использованием высокоскоростной штамповки; лопаток горячей и холодной валцовки; штамповкой в закрытых штампах; колец больших диаметров с малой толщиной стенки раскаткой при непрерывном нагреве зоны раскатки токами высокой частоты; близких к форме готовой детали с использованием эффекта сверхтекучести материала; методами порошковой и гранульной технологий.

2. Создание новых и совершенствование традиционных методов обработки заготовок:

лазерной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов, имеющих ажурную тонкостенную конструкцию высокой точности; высокоточной сварки заготовок из тонколистовых материалов для крупногабаритных конструкций; электрохимической обработки (ЭХО) материалов при формировании сложных пространственных профилей заготовок; электроискровой (ЭИ) и электроимпульсной (ЭИМ) обработки для получения отверстий малого диаметра в жаропрочных титановых сплавах; ультразвуковой обработки для интенсификации процесса резания металлов при точении, шлифовании, нарезании резьб, а также в процессе сборки и контроля качества продукции; деформационно-упрочняющей обработки поверхностей деталей.

3. Использование и создание нового оборудования и оснастки для производства деталей современных ГТД:

многоцелевого оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ); гаммы станков для ЭХО-, ЭИ-, ЭИМ-методов обработки заготовок; универсально-сборных приспособлений (УСП) - установочных кассет для ориентирования заготовок в технологической системе.

4. Создание и применение высокоточных методов контроля и устройств геометрических параметров деталей, качества поверхностей, качества материала и элементов соединения сборочных единиц; оптико-электронных бесконтактных устройств с приборами с зарядной связью (ПЗС) для контроля и хранения в памяти ЭВМ фактических значений параметров деталей и сборочных единиц; лазерных установок для контроля труднодоступных и высокоточных элементов деталей и сборочных единиц; универсальных и специализированных координатно-измерительных машин (КИМ) с ЧПУ; неразрушающих методов контроля для оценки качества материала и соединений; контрольно-измерительных электронных головок для контроля качества заготовок и управления технологическим процессом и т.д.

5. Развитие технологий по созданию термостойких и термобарьерных покрытий деталей высоконагруженного тракта ГТД:

плазменного напыления многослойных покрытий; электронно-лучевой технологии при создании термостойких покрытий; вакуумно-плазменного напыления многослойных покрытий; термического упрочнения многослойного керамического покрытия и т.д.

Таким образом, большое значение в решении проблемы обеспечения ресурса и надежности авиационных ГТД, а также создания двигателей новых поколений имеет разработка, совершенствование и создание новых технологических процессов, методов обработки деталей и оборудования, которые повышают не только производительность, но и качество изготовления.

Появление современных типов и модификаций авиационных двигателей непрерывно сопровождается новыми конструкторскими решениями, влекущими за собой технологические трудности. Для их своевременного преодоления и сокращения разрыва между «идеальной», с точки зрения конструкции, и «реальной», с точки зрения технологии изготовления детали, необходимо активно внедрять в производство прогрессивные методы механической и отделочно-упрочняющей обработки.

Список литературы: 1. Демин Ф. И., Проничев Н. Д., Шитарев И. Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. — М.: Машиностроение. 2002. — 328 с.; ил. 2. Богуслаев В. А., Яценко В.К., Прищенко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. -К.: Издательская фирма «Манускрипт», 1993.-332с. 3. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Жеманюк П.Д., Пухальская Г.В., Павленко Д.В., Бень В.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД – Запорожье, изд. ОАО «МоторСич», 2005 г. – 559 с. 4. Скубачевский Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели: Учебник для студентов авиационных вузов. М.: Машиностроение, 1969—544 с. 5. <http://www.nfmz.ru/lopatki.htm> ОАО «Наро-Фоминский машиностроительный завод» Компрессорные лопатки ГТД 6. <http://www.nfmz.ru/lopatki.htm> Д.т.н. Юрий Елисеев, генеральный директор ФНПЦ ММПП "Салют", Перспективные технологии производства лопаток ГТД.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОЙ МАССЫ

Вислобокова А.В., Уванов С.А., Яковлев Д.А. (каф. МАПП, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Одним из базовых процессов технологии влажного фракционирования является механическое обезвоживание. На этом этапе происходит разделение растительного материала на жидкую (сок) и волокнистую (жом) фракции. При этом отжатая масса широко используется в малых фермерских хозяйствах, как зеленый корм она закладывается в сенаж или сушится на высокотемпературных сушилках типа АВМ с последующей переработкой в муку, гранулы или брикеты. Зеленый сок добавляется в рационы свиней и птицы. Малые фермерские хозяйства испытывают нехватку оборудования малой производительности. Пресс производительностью 350-500 кг/час мог бы обеспечить хозяйства собственным цехом для обеспечения кормами животных [1].

Исходя из этого, перед нами была поставлена цель – разработать шнековый пресс производительностью $Q=350$ кг/час для отжима сока из зеленой массы рапса.

Созданию шнекового пресса предшествовали статические экспериментальные исследования по обезвоживанию зелёной массы рапса на компрессионной камере. В ходе этих испытаний было выявлено, что наибольший выход сока обеспечивают следующие параметры рабочего органа. Давление прессования $3,5 < P < 5$ МПа, диаметр отверстий дренирующего контура 3 мм и скорость вращения шнека $4 < n < 13$, об/мин.

Нами разработан шнековый пресс (рис. 1), который ориентирован на обезвоживание зеленой массы рапса. Отличительной особенностью этого пресса являются конструктивно-кинематические параметры (рабочее давление, частота вращения шнека, диаметр отверстий дренирующего контура), которые обоснованы исходя из физико-механических свойств зелёной массы рапса. Выбор рапса в качестве основного материала связан с постоянно увеличивающимися посевными площадями и высокой питательной ценностью данной культуры [2,3].

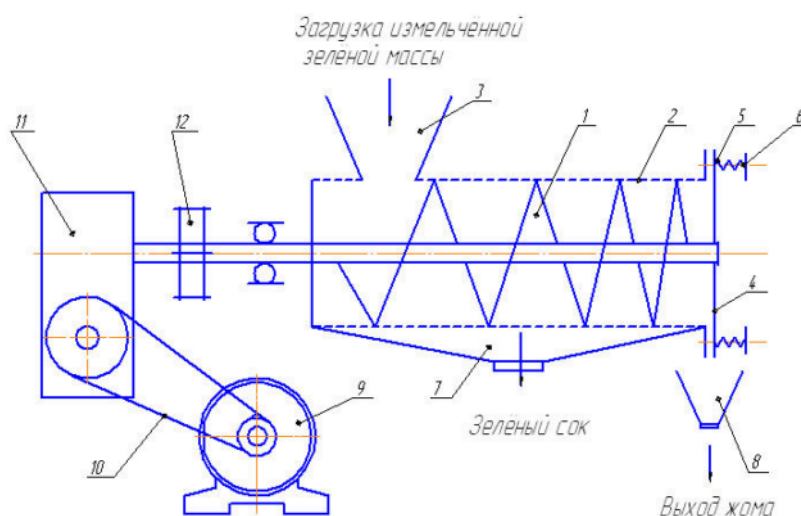


Рис. 1. Схема экспериментального шнекового пресса

Рабочий орган шнекового пресса (рис. 2) состоит из цилиндрического шнека переменного шага 1, зеерной камеры 2 и дросселя 4, усилие запираания которого реализуется посредством пружин 5 и регулируется винтами 6. Для загрузки исходного материала имеется приёмный патрубок 3. Отжатый зелёный сок собирается в ёмкости 7 и удаляется через отверстие внизу сборника. Жом, после выхода из рабочей камеры попадает в сборник 8, откуда позже удаляется через отверстие. Привод осуществляется от электродвигателя 9 через клиноремённую передачу 10 и через червячный редуктор 11. Число оборотов шнека можно менять в диапазоне 4...13 об/мин за счёт сменных шкивов. Мощность привода данного пресса составляет 2,2 кВт, что позволяет развить рабочее давление до 5 МПа. Давление на последнем витке шнека также можно изменять, посредством регулировки винтов 6, сжимая или ослабляя пружины 5. Основной особенностью данного, пресса является разборная реактивная камера 2, позволяющая менять зеерный цилиндр, в зависимости от выбранных геометрии и диаметра отверстий дренирующего контура [4,5].

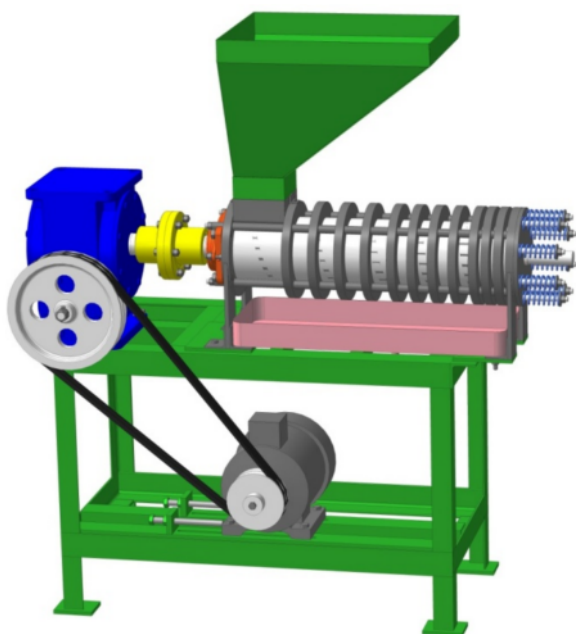


Рис. 2. Экспериментальная установка для механического обезвоживания растительной массы рапса.

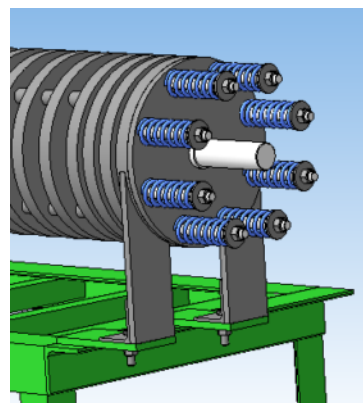


Рис. 3. Запорное устройство, экспериментальной установки для механического обезвоживания

Для повышения качества отжима сока шнековым прессом были проведены исследования по определению рациональных параметров давления прессования. Для варьирования давлением было использовано 3 набора пружин со следующими усилиями сжатия (1,7кН; 1,9 кН; 2,1кН), которые соответствуют следующим давлениям (3МПа; 4МПа; 5МПа) (табл. 1). Запорное устройство представлено на рис. 3.

Эксперименты проводились на свежескошенной зелёной массе рапса озимого «Метеор» в стадии бутонизации, влажностью $W - 88\%$. Масса составляла 10 кг.

Зеленая масса рапса была измельчена на универсальном измельчителе кормов УИК – 5.

Таблица 1

№	Давление, МПа	Усилие одной пружины, кН	Выход сока, %	Содержание сухого вещества в зеленом соке, %
1	3	1,7	41	6
2	4	1,9	47	7
3	5	2,1	52	9

Результаты эксперимента представлены на графике (рис. 4).

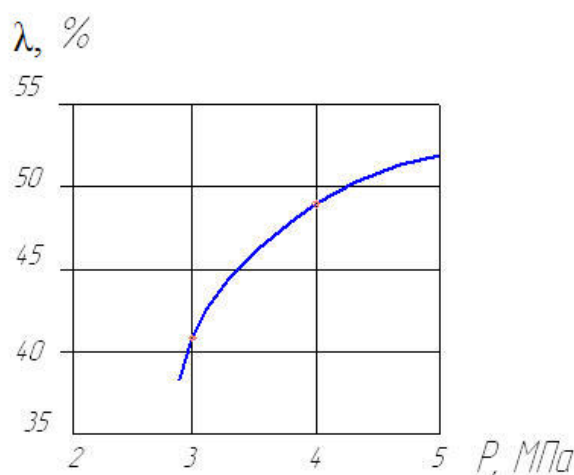


Рис. 4. Зависимость выхода сока от давления

В результате проведенных испытаний был разработан шнековый пресс производительностью 350 кг/час. Выявлена зависимость выхода сока от давления прессования.

Список литературы: 1. Долгов И.А. Техническая политика в сфере кормопроизводства // Вестник ДГТУ. 2001. Т.1. № 3(9). С. 302-315. 2. Фомин В.И. К вопросу механического обезвоживания травянистых растений. Науч. техн. и произв. журнал «Тракторы и сельхозмашины». М.: Машиностроение, 1972. Вып 6. С. 27-28. 3. Мурадян А. Биорапс // Электронная версия региональной газеты делового сообщества «Просторы России». 2008. № 7. 4. Фомин В.И. и др. Исследования процесса механического обезвоживания люцерны на двухпиндельном шнековом прессе. «Тракторы и сельхозмашины». 1973. № 4. 5. Антонов Н.М., Матюшев В.В., Смирнов В.Л. Механическое обезвоживание зелёных растений при заготовке прессованных кормов. Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск. 2004. 188 с.

ВПЛИВ РОЗТАШУВАННЯ ТЕПЛОВОГО ДЖЕРЕЛА НА ОБРОБЛЮВАНІЙ ПОВЕРХНІ НА ЇЇ ТЕМПЕРАТУРУ

Войтов М.С., Матюха П.Г. (каф. МВ, ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)

Температура на оброблюваній поверхні при шліфуванні впливає на фізико-механічні властивості поверхневого шару та точність оброблення, тому цьому питанню приділяється достатньо уваги дослідниками. В той же час, при визначенні температури на оброблюваній поверхні, як правило, не враховується розташування на ній теплового джерела. [1,2]

Метою роботи є дослідження впливу розташування теплового джерела на оброблюваній поверхні на її температуру при плоскому глибинному шліфуванні з використанням програми ANSYS.

Вхідними даними для розрахунку температури є: характеристика шліфувального круга, а саме теплофізичні властивості зв'язки і надтвердого матеріалу, геометричні розміри деталі і режими оброблення. Глибинне шліфування швидкорізальної сталі Р6М5Ф3 кубонітовим кругом на металевій зв'язці 1А1 250х76х15х5 КВ 100/80-4-М1-01 виконується на режимах [3,4] – швидкість круга $V_k = 30$ м/с, позадвжняя швидкість столу $V_{ст} = 0,1$ м/хв, глибина шліфування $t = 0,5$ мм. Шліфування виконується без охолодження. Теплофізичні властивості компонентів шліфувального круга і деталі, що оброблюється, наведені в табл. 1 [5,6]. Зв'язка круга складається зі сплаву міді (77%) і олова (23%).

Таблиця 1. Теплофізичні властивості компонентів шліфувального круга та оброблюваної деталі

Компоненти ШК та оброблюваної деталі	Коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$
Кубоніт	-	41
Олово	-	67
Мідь	-	361
Сталь Р6М5Ф3	$4,1 \cdot 10^{-6}$	19,5

Для визначення долі тепла, що йде в оброблювану деталь, використовується коефіцієнт вводу α_e , який знаходиться за формулою [7]

$$\alpha_e = \frac{1}{1,25 \frac{\lambda_k}{\lambda_d} \sqrt{\frac{a_d}{h\nu}} + 1},$$

де λ_d - коефіцієнт теплопровідності деталі, $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$;

λ_k - коефіцієнт теплопровідності круга, $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$;

α_d - коефіцієнт температуропровідності деталі, $\text{м}^2/\text{с}$;

h - середній радіус площадки контакту зерна с виробом, м.

Для визначення розподілу температури в середовищі ANSYS, необхідно знати щільність теплового потоку (рис. 1), що виникає при шліфуванні, який треба прикласти до поверхні заготовки і переміщувати її, тим самим імітувати теплові явища, що виникають в процесі оброблення.

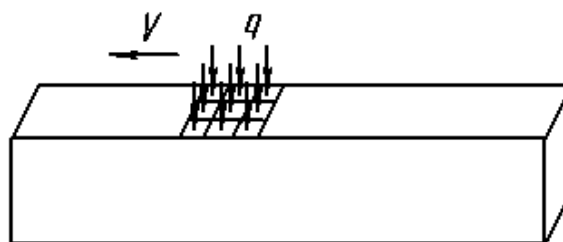


Рис. 1. Тепловая схема плоского глубинного шлифования

Процедура проведення теплового аналізу в середовищі ANSYS містить наступні основні етапи:

- визначення типу аналізу;
- задання фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу;
- побудова оброблюваної моделі зразка;
- розбивка твердотільної моделі на кінцеві елементи;
- задання граничних умов і проведення розрахунку;
- перехід на аналіз міцності;
- закріплення зразка і проведення розрахунку;
- обробка результатів.

Після послідовного виконання зазначених етапів, на основі отриманих результатів значень температур, побудований графік розподілу температур в зразку в залежності від місця знаходження джерела теплоти (рис. 2).

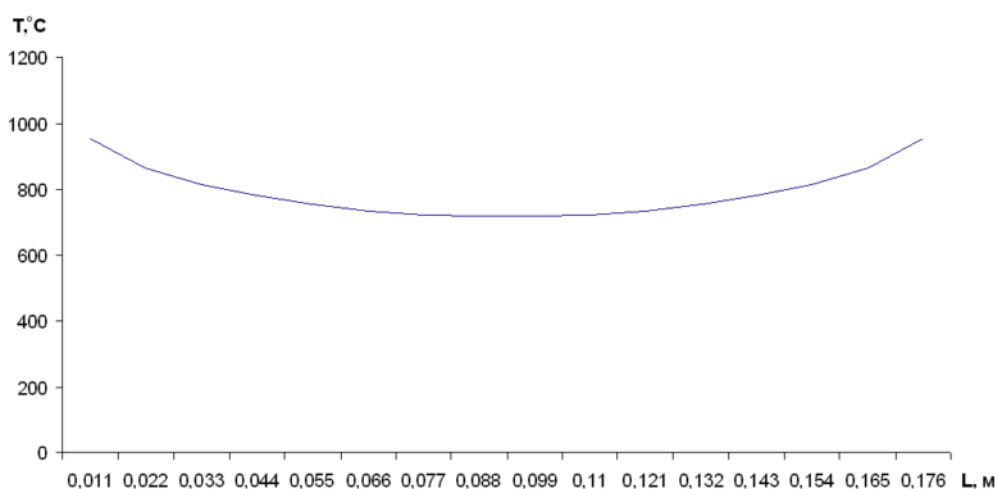


Рис. 2. Графік розподілу температури в залежності від місця знаходження джерела теплоти

Як видно з рис. 1, максимальна температура виникає на початку і кінці зразка, що визвано меншим об'ємом металу, в якому може розповсюджуватися тепло (рис. 3).

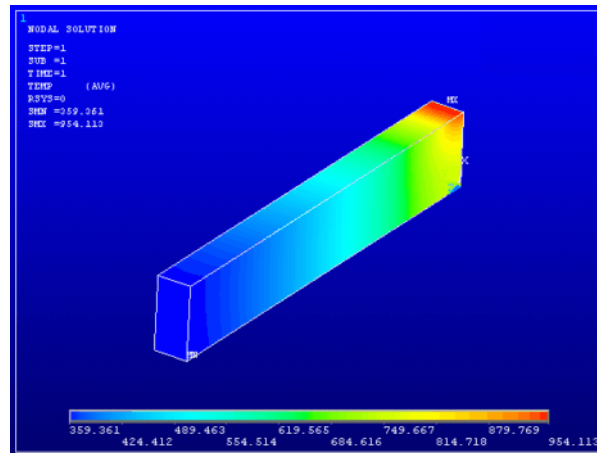


Рис. 3. Розподіл температури на початку зразка

Мінімальна температура виникає посередині зразка, тому що тепло може розповсюджуватися в обидві сторони і тому його концентрація біля джерела тепла зменшується (рис. 4).

Таким чином температура зразка, при знаходженні джерела тепла на початку і в середині деталі, в умовах дослідження відрізняється на 33%, що потрібно враховувати при назначенні режимів, тому що це може вплинути на якість оброблюваної поверхні.

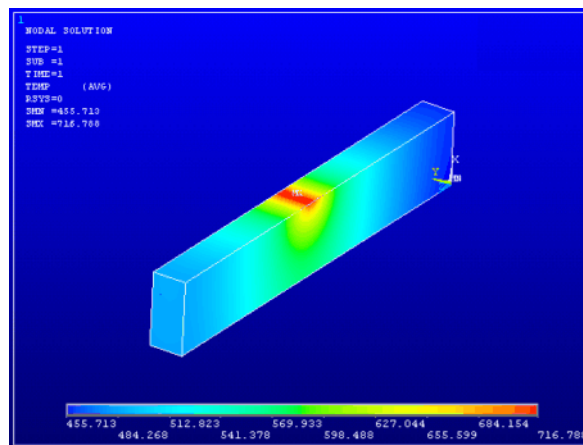


Рис. 4. Розподіл температури в середині зразка

Дослідимо, як ця різниця температури буде впливати на точність оброблення. Враховуючи те, що максимальна різниця температур виникає при знаходженні джерела теплоти на початку і середині зразка, дослідження теплових деформацій проведемо для цих двох положень джерела теплоти. Для цього закріплюємо деталь по нижній поверхні від пересування в усіх напрямках, тобто імітуємо магнітну плиту.

На точність обробки будуть впливати температурні деформації в вертикальному напрямку, тобто в напрямку шліфувального круга, тому при дослідженні будемо враховувати деформації тільки в напрямку осі x . Спочатку розглянемо варіант, коли джерело теплоти знаходиться на початку зразка (рис. 5)

Максимальна деформація в напрямку осі x складає 0,314 мм, що значно перевищує допуск на розмір при чистовій обробці. Тепер перемістимо джерело теплоти на середину зразка, і визначмо деформації (рис. 6)

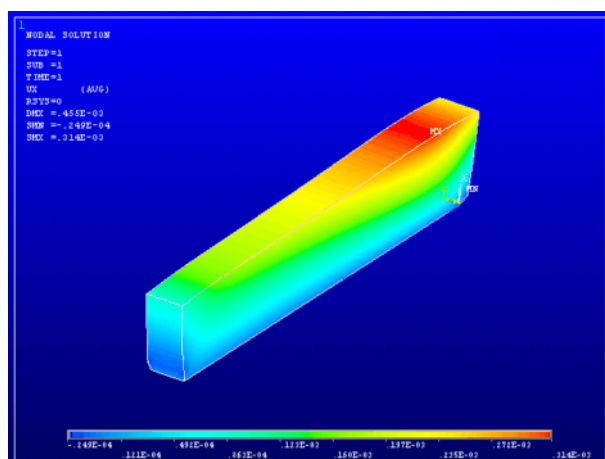


Рис. 5. Температурні деформації зразка

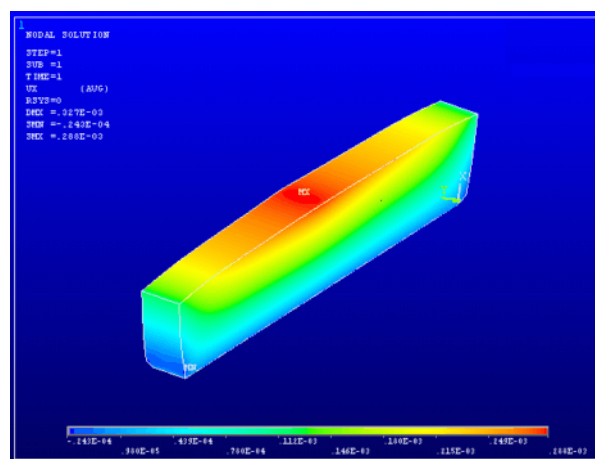


Рис. 6. Температурні деформації зразка

В цьому положенні джерела теплоти, максимальні деформації в напрямку шліфувального круга складають 0,288 мм, що теж перевищує допустимі.

Отже, різниця між максимальними температурними деформаціями складає 9%, що може визивати вгнутість поверхні, внаслідок чого, в місцях з максимальними деформаціями буде зрізатися більше металу і після охолодження в цих місцях буде зменшуватися лінійний розмір.

Висновки:

1. Температура на початку і в кінці зразка перевищує температуру в середині зразка на 33%.
2. Температурні деформації на початку і кінці зразка перевищують температурні деформації в середині зразка на 9%, що призводить до випуклості обробленої поверхні.
3. При визначенні критичної температури на поверхні зразка, під час призначення режимів плоского глибинного шліфування, необхідно враховувати місце розташування теплового джерела на оброблюваній поверхні.

Список літератури: 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов/ Е.Н. Маслов. - М.: Машиностроение, 1974. – 320 с. 2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности/ В.А. Сипайлов – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. 3. Глубинное шлифование кругами из сверхтвёрдых материалов/ И.П. Захаренко, Ю.Я. Савченко, В.И. Лавриненко. – М.: машиностроение, 1988. – 56 с. 4. Глубинное алмазное шлифование/ Е.С. Землянский, И.С. Накул. – К.:УкрНИИТИ, 1969. – 14 с. 5. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов/ А.Н. Резников - М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 6. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах// Справочник. - М.: Машиностроение, 1975. – 216 с. 7. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности/ В.А. Сипайлов – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР МИКРОПРОВОЛОКИ ДЛЯ ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Дерменжиев В.И., Скачков В.А., Иванов В.И. (каф. МЦМ, ЗГИА, г. Запорожье, Украина)

Представлены требования, предъявляемые к материалам для щеточных уплотнений в зависимости от условий их эксплуатации, а также методика и результаты испытаний механических свойств микропроволоки из сплавов ЭИ-708А-ВИ и HAYNES25 в исходном состоянии и после экспериментальных нагревов при различных температурах, имитирующих условия работы данных уплотнений. На основании результатов испытаний в качестве оптимального материала для щеточных уплотнений деталей газотурбинных двигателей выбрана микропроволока из сплава HAYNES25.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений совершенствования конструкций газотурбинных двигателей является внедрение щеточных уплотнений. Щеточные уплотнения представляют собой кольцевые статорные детали с находящейся между ними щеткой из микропроволоки.

Основные требования, предъявляемые к материалу микропроволоки для щеточных уплотнений:

- сохранение упругих и прочностных свойств в интервале рабочих температур (550...750°C);

- сопротивление окислению при указанных температурах;

- минимальный износ в процессе эксплуатации.

Если для кольцевых деталей в зависимости от условий их работы применяются традиционные материалы (коррозионная сталь 12X18H10T или жаропрочный никелевый сплав ЭИ868), то выбор материала микропроволоки для собственно щеточных уплотнений предполагает проведение экспериментальных работ с целью определения их свойств.

В экспериментах использовали два вида микропроволоки:

- холоднотянутая микропроволока диам. 0,09 мм из сплава на железной основе ЭИ708А-ВИ;

- холоднотянутая микропроволока диам. 0,07 мм из сплава на кобальтовой основе HAYNES25.

Микропроволока из сплава HAYNES25 имеет структуру на основе твердого раствора Co_{α} , стабилизаторами которой служат хром и вольфрам. Кобальтовые сплавы, имеющие структуру гексагональной плотноупакованной решетки, показывают лучшие результаты при работе в условиях трения и износа. Этот факт соответствует материалам с гексагональной плотноупакованной структурой [1].

Образцы обоих видов микропроволоки подвергали испытаниям на разрыв в исходном состоянии и после нагревов, имитирующих условия работы щеточных уплотнений.

Микропроволоку из сплава ЭИ708А-ВИ подвергали нагреву при температурах 600 и 650°C в течение 50 и 100 часов, микропроволоку из сплава HAYNES25 – при температурах 650, 700, 750, 800, 850 и 900°C в течение до 100 часов. Нагрев осуществляли в камерной печи МП-2УМ в воздушной среде.

Испытания микропроволоки на разрыв проводили по стандартной методике.

Условия испытаний:

- длина рабочей части испытываемой микропроволоки – 150 ± 5 мм;

- температура испытаний – $19 \pm ^\circ\text{C}$;
- скорость приложения нагрузки – 199 мм/мин;
- количество образцов для испытаний по каждому варианту нагрева – 6...10 штук.

Предел прочности при растяжении определяли по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{\pi \cdot r^2}, \quad (1)$$

где P – усилие разрыва, Н;

r – радиус поперечного сечения микропроволоки, мм.

После нагрева на поверхности микропроволоки обоих видов отмечены признаки окисления, интенсивность которых возрастает с повышением температуры.

При этом микропроволока из сплава HAYNES25 показала лучшую стойкость к окислению, сохраняя металлический блеск при нагревах вплоть до температуры 750°C .

Результаты испытаний микропроволоки обоих типов отражены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты испытаний микропроволоки из сплава ЭИ708А-ВИ

Режим термообработки		Величина прочности, МПа	
$T_0, ^\circ\text{C}$	τ_0 , час	эксперимент	расчет
600	50	1347,5	1256,6
600	100	675,5	715,4
650	50	566,4	624,2
650	100	577,0	443,9
0	0	1384,3	1471,3

Таблица 2. Результаты испытаний микропроволоки из сплава HAYNES25

Режим термообработки		Величина прочности, МПа	
$T_0, ^\circ\text{C}$	τ_0 , час	эксперимент	расчет
650	1,0	1440	1441
650	10,0	1270	1360
650	100,0	1510	1530
700	100,0	1440	1450
750	100,0	1450	1350
8000	100,0	1060	1150
0	0	1560	1510

Влияние режимов термообработки описывали в виде кубических сплайнов, задающих прочность на растяжение в зависимости от температуры нагрева T и длительности выдержки τ . Для этих условий математическое представление будет иметь вид [2]:

$$\sigma_B = \sum_{m=1}^N \left[\sigma - \sum_{i=1}^2 (C_{0i} + C_{1i} \cdot X_{1i} + C_{2i} \cdot X_{2i} + C_{3i} \cdot X_{3i}) \right], \quad (2)$$

где C_{ij} - коэффициенты сплайнов ($i = 0...3; j = 1,2$);

$$X_{11} = t; \quad X_{21} = t^2; \quad X_{31} = t^3; \quad t_i = \tau_0 / 293;$$

$$X_{12} = t; \quad X_{22} = t^2; \quad X_{23} = t^3; \quad t_i = \tau_0 / 20;$$

Определение коэффициентов C_{ij} в модели (2) осуществляется по условию минимума суммарной квадратичной невязки экспериментальных и вычисленных значений прочности микропроволоки во время испытаний

$$\Phi = \sum_{m=1}^N \left[\sigma - \sum_{k=1}^2 (C_{0k} + C_{1k} \cdot X_{1k}^m + C_{2k} \cdot X_{2k}^m + C_{3k} \cdot X_{3k}^m) \right]^2, \quad (3)$$

где N – количество экспериментальных значений;

m – номер эксперимента.

Значения коэффициентов сплайнов представлены в таблице 3. Расчетные значения, полученные с использованием выражения (3), для микропроволоки ЭИ708А-ВИ и NAYNES25 приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 3. Значения коэффициентов сплайнов в модели (2)

Микропроволока	C_{01}	C_{02}	C_{11}	C_{12}	C_{21}	C_{22}	C_{31}	C_{32}
ЭИ708А-ВИ	129,3	129,3	181,5	445,4	274,5	-220,7	256,65	-86,1
NAYNES25	189,6	189,6	324,6	50,94	95,86	-151,5	401,4	-12,8

Анализ данных таблиц 1 и 2 показывает, что микропроволока из сплава NAYNES25 сохраняет высший уровень свойств при нагреве до температуры 750°C в отличие от микропроволоки из сплава ЭИ708А-ВИ, у которой процесс снижения свойств происходит уже при температуре 600°C.

Учитывая, что для большинства сплавов пределы прочности и упругости находятся в прямой зависимости, поэтому тенденция изменения предела прочности в процессе провоцирующих нагревов справедлива и для модуля упругости.

Заключение. Экспериментально установлены преимущества микропроволоки из сплава NAYNES25 в процессе нагревов до рабочих температур, как по прочностным характеристикам, так и по стойкости к окислению. На основании результатов экспериментов именно данная проволока была выбрана в качестве материала щеточных уплотнений.

Список литературы. 1. Суперсплавы: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Ч.Т.Симса, Н.С.Столоффа, У.К.Хагеля: пер. с англ. В 2-х книгах. Кн.1. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с. 2. Альберт Дж., Никольсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложение. – М.: Мир, 1972. – 312 с.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОЛОЛЁДООБРАЗОВАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

А.В. Звягинцева, Тринеев Е.А. (*ВГТУ, Воронеж, Россия*)

Климат в настоящее время характеризуется резкой изменчивостью температурных условий зимы и лета, отсутствием четкой выраженности всех времен года. Температурный режим определяется тем количеством тепла, которое поступает с солнечной радиацией. Зимние и летние отклонения (минимум и максимум) достаточно значительны. Зимой они достигают -30°C , а летом $+35^{\circ}\text{C}$. Средняя продолжительность безморозного периода равна 150 дням с колебаниями от 135 до 185.

Осадки — важнейший климатический показатель. Их средняя годовая сумма составляет 550 мм. По сезонам года осадки распределяются неравномерно. На лето приходится около 350 мм, а на зиму 150-200. Зимой осадки, как правило, выпадают в твердом виде, формируя снежный покров, глубина которого достигает 25 см. Неблагоприятными климатическими явлениями выступают и заморозки, особенно весной, град и засухи летом, метели и оттепели зимой. Весенние заморозки регулярно повторяются из года в год. Приурочены они к последним числам апреля (30 апреля — средняя дата). Самые ранние возможны во второй декаде апреля (11 апреля), а поздние — во второй декаде мая (17 мая). Как правило, заморозки сопровождается образованием гололёда.

Гололед представляет собой слой плотного льда, нарастающего на транспортных магистралях, аэродромных сооружениях, подъездных дорогах, взлетно-посадочных полосах. Он покрывает провода и опоры линий связи и электропередач, телевизионные мачты, высотные краны, ветви деревьев и многие другие предметы и сооружения. Гололед в Воронеже и в области образуется с октября по апрель. Наиболее часто он наблюдается с декабря по февраль, в октябре и апреле гололед бывает не ежегодно. В среднем в Воронеже наблюдается 14 дней с гололедом. От года к году число дней колеблется от 4 до 35.

Исследование метеорологических условий образования гололеда с использованием архивного материала за последние 100 лет (1901-2002) позволило выявить ряд необходимых и достаточных признаков образования этого опасного явления погоды. Наиболее часто гололед образуется в области циклонов, смещающихся с Атлантики и Средиземного моря. В 74% случаев он наблюдается на теплых фронтах и волновых возмущениях, как правило, в тех случаях, когда в зоне фронтов отмечается выпадение осадков в виде мокрого снега, переохлажденного дождя и мороси. Ледяные отложения обычно образуются при температуре воздуха 0°C и ниже, чаще всего этот интервал заключен в пределах 0°C - -5°C . Но отмечались случаи образования гололеда и при более низких температурах вплоть до -16°C . Это происходит в тех случаях, когда происходит выпадение переохлажденных осадков. Скорость замерзания капель влаги зависит не только от температуры воздуха, но и от их размеров, как правило, процесс нарастания льда в тумане и при выпадении морозящих осадков занимает большой отрезок времени, такие ситуации отмечаются в ночные и ранние утренние часы. Как установлено, интенсивность гололедообразования, его продолжительность зависит не только от погодных условий, но и от таких факторов, как абсолютная и относительная высота объекта, форма рельефа, степень защищенности объекта от основных влагонесущих потоков. Вот почему для правильной оценки возможного обледенения необходимо учитывать весь комплекс погодных и физикогеографических факторов. Для

определения гололедной нагрузки на провода линий электропередач крайне важно учесть высоту подвеса провода, его диаметр и скорость ветра (ветровой напор) на высоте подвеса провода. Общий материальный ущерб, только хозяйствам Воронежской области, исчислялся в несколько десятков миллионов рублей. До настоящего времени еще нет надежной методики для объективного прогноза гололеда и особенно прогноза его интенсивности.

Гололед можно предсказать, используя уравнение вида:

$$G = 0,4T_{850} - 0,2T + 0,2(H - 100) - 0,25 D + 3,5$$

Условие: $G \geq 3$ - сильный гололед.

Таблица 1. Условия возникновения гололёдообразования

Тип гололёда	Физика явления	Условия возникновения	Климатические характеристики	
			Максимальная повторяемость	Средняя ширина зоны
1	2	3	4	5
Фронтальный	Замерзание переохлаждённых капель дождя или мороси на поверхности и предметах при t (0°) – (-5°) С в приземном слое	1. Приближение тёплого фронта, ТФО с переохлаждённым дождём, моросью или мокрым снегом. 2. Наличие над инверсионной слоистообразной облачности и морозящих осадков в холодное время года. 3. Адвекция тепла на AT_{950} AT_{750} и слабая адвекция холода у земли. 4. Устойчивая стратификация воздушных масс с $\gamma=0,4-0,6^{\circ}/100$ м	Декабрь-февраль	200-300 км
Внутримассовый		1. Адвекция тёплого влажного воздуха. 2. Наличие под инверсионной St, Sc облачности 3. Периферия малоподвижного циклона и антициклона. 4. Хорошо выраженная инверсия температуры (t у земли $-2^{\circ} - -10^{\circ}$ С, а на высоте верхней границы $0^{\circ} - 5^{\circ}$ С). 5. $H_{1000}^{850} > 126$ дам, а $AT_{950} > 1^{\circ}$ С. 6. Выпадение переохлаждённых осадков.	Декабрь-февраль	50-150 км

Предлагаемая методика прогноза гололеда и определения его интенсивности на территории Воронежской области базируется на использовании пяти параметров:

а) температура воздуха на АТ (T_{800});

- б) относительный геопотенциал слоя Н
- в) суммарный дефицит точки росы в слое земли - 700 мб
- г) показатель гололедообразования (G);
- д) максимальная скорость ветра на уровне АТ. Прогноз гололеда и его интенсивности предлагаемым способом можно составлять заблаговременно за 12-24 ч.

Эта методика может быть применена при наличии фактических и прогностических карт, принятых по фототелеграфу (приземная, АТ₉₂₅ АТ₈₅₀ АТ₇₀₀).

Прогнозирование гололеда и его интенсивности сводится к следующему:

1. По фактическим, прогностическим картам (приземная, АТ₉₂₅ АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀) общепринятым способом определяются координаты воздушных частиц, которые будут проходить над пунктом в интересующий нас момент времени.

2. Определяются по приземной карте и картам АТ АТ и АТ₇₀₀ входные данные для номограммы:

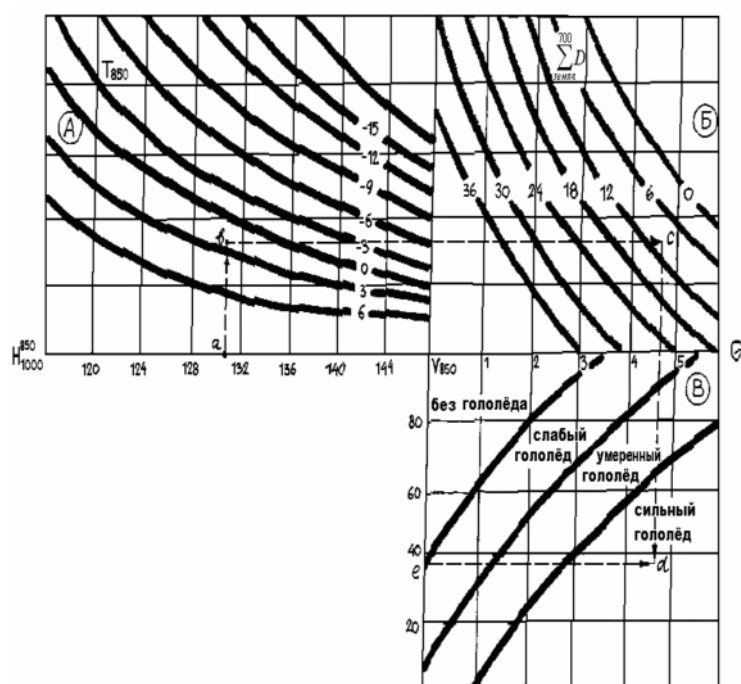


Рис. 1. Номограмма для определения интенсивности гололеда

параметров при проектировании различных объектов с тем, чтобы избежать аварий и не допустить неоправданных материальных затрат.

Список литературы: 1. Борщ С. Б. Гидрологические речные прогнозы и их эффективность в обеспечении экономики страны. // Проблемы и перспективы гидрометеорологических прогнозов. Материалы всероссийской научной конференции. - М.: Триада, 2000. - 21 с. 2. Васильев А.А., Белинский О.Н. Проблемы прогнозирования экстремальных гидрометеорологических явлений. // Проблемы и перспективы гидрометеорологических прогнозов. Материалы всероссийской научной конференции. - М.: Триада, 2000. - 23 – 24 с.

3. По входным данным с помощью номограммы прогнозируется гололед и его интенсивность. Порядок расчета интенсивности гололеда показан на номограмме прерывистой линией со стрелками.

$V=36$ км/ч - ожидается сильный гололед.

Средняя годовая продолжительность обледенения проводов на территории Воронежской области зависит от рельефа и колеблется от 400-560 ч в равнинной части области до 800-850 ч. на станциях Среднерусской возвышенности.

Таким образом, развитие электроэнергетики и средств связи в Российской Федерации и в нашей области требуют глубоких знаний и правильного использования климатических

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВАРКИ В СОЕДИНЕНИИ «ТРУБА – ТРУБНАЯ РЕШЕТКА»

Изосимов С.И., Ямилев М.З., Гизатуллин А.А. (каф.ТНА УГНТУ г.Уфа РФ)

В статье приводятся результаты исследования НДС металла сварного соединения и распределения остаточных сварочных напряжений в соединении «труба – трубная решетка».

Для решения указанной задачи применение обычных расчетных методов возможно только при больших допущениях, что может привести к значительным отклонениям полученных результатов. Поэтому данная задача была решена с применением конечно-элементного программного комплекса ANSYS. Для этого был произведен температурный, а затем структурный анализ поведения материала обечайки в процессе сварки и при последующем остывании сварного шва.

Так как сварку труб в трубные решетки ведут с применением дуговой сварки в среде защитных газов, был произведен расчет режимов сварки для заложения их в расчетную модель.

Затем была создана конечно-элементная модель трубной решетки с установленными трубками (рисунок 1). Каждой детали были присвоены их теплофизические свойства.

В результате расчета были получены распределение температур после сварки центральной трубки, после сварки последней трубки и во время остывания шва (рисунок 2).

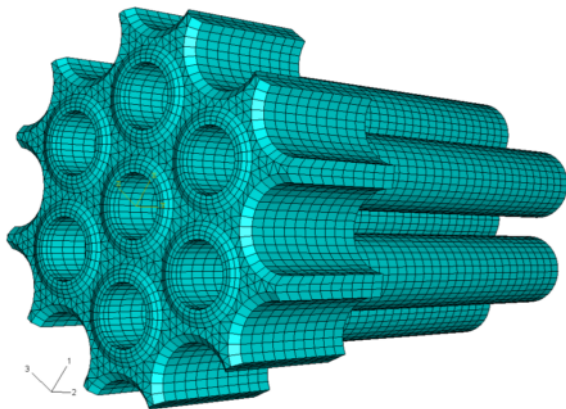


Рис. 1. Конечно-элементная сетка расчетной модели

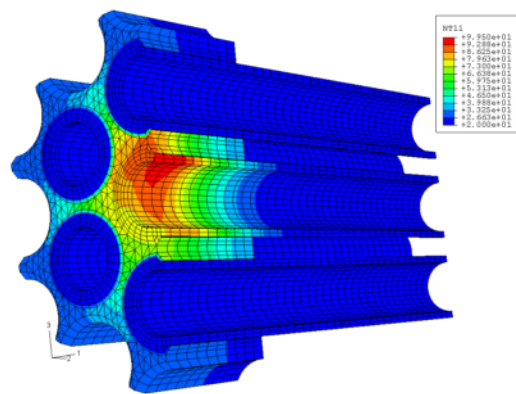


Рис. 2. Через 5 секунд после окончания сварки центральной трубки

Также получены НДС сварного соединения после процесса сварки центральной трубки, а также наложение напряжений после приварки соседних трубок к трубной решетке.

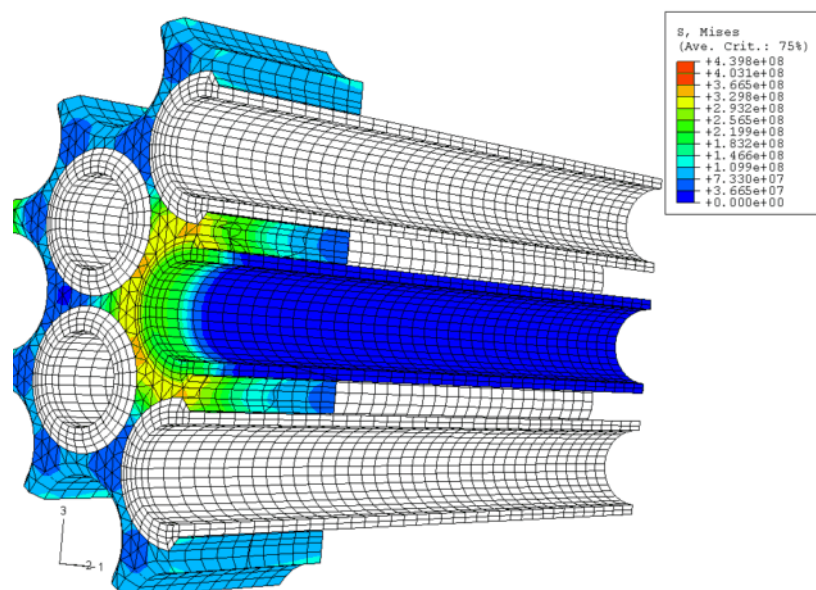


Рис. 3. Распределение остаточных эквивалентных напряжений после приварки первой трубки

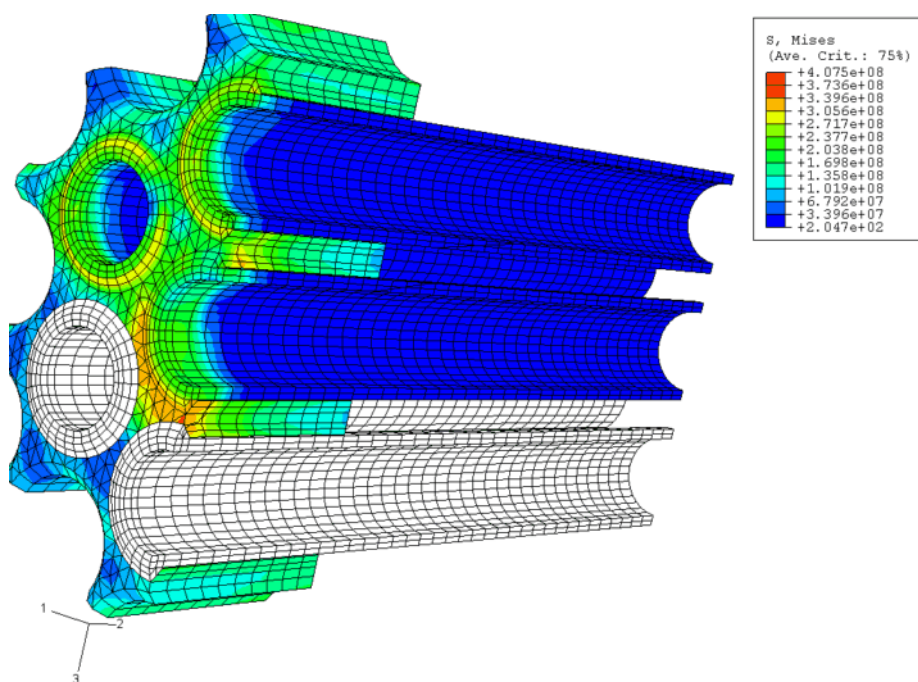


Рис. 4. Распределение остаточных эквивалентных напряжений после приварки третьей соседней трубки

Вывод: Из полученных результатов видно что при приварке первой трубки значение эквивалентных напряжений составляет 439,8 МПа, а после приварки соседней трубки напряжения уменьшаются до 406,5 МПа и далее практически не изменяется. Несмотря на это напряженное состояние соединения остается на довольно высоком уровне, что требует дальнейшее снятие остаточных напряжений.