

УДК 62-24

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАШИНЫ УДАЛЕНИЯ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ С ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СЛИТКА

Д. В. Вавилов¹, Е. Е. Новиков²

¹Сибирский федеральный университет
Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: vavilov@krasec.com
²ООО «Красноярская Инжиниринговая Компания»
660111, г. Красноярск, ул. Башиловская, 2, оф. 118. E-mail: eganee@mail.ru

Представлены результаты моделирования напряженно деформированного анализа машины удаления оксидной пленки с поверхности алюминиевого слитка. Представленная методика анализа может быть использована для анализа напряженно деформированного состояния рабочих органов машин, работающих при высоких температурах методом конечных элементов.

Ключевые слова: моделирование, теплопередача, нестационарный теплообмен.

RESEARCH OF STRESS-STRAIN CONDITION OF WORKING BODY OF THE MACHINE FOR REMOVAL OF OXIDE FILM FROM SURFACES OF ALUMINIUM INGOTS

D. V. Vavilov, E. E. Novikov²

¹Siberian Federal University
26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: vavilov@krasec.com
LLC "Krasnoyarsk Engineering Company"
Office 118, 2 Bashilovskaya Street, Russia, 660111, Krasnoyarsk. E-mail: eganee@mail.ru

In the work the authors present the results of stress-state simulations analysis of the machine for removal of oxide film from surfaces of aluminium ingots. The presented technique of analysis can be used for analysis of stress-strain states of working bodies of machines, operating at high temperatures, by the method of finite elements.

Keywords: numeric simulation, thermal conductivity, transient thermal analyze.

Обеспечение качества выходной продукции при производстве малого алюминия – одна из ключевых задач освоения новых рынков. Наиболее остро стоит проблема образования трещины в центре слитка при усадке. Одна из причин возникновения дефекта при литье – это усадочные раковины и так называемые неметаллические включения (шлак), которые присутствуют на поверхности слитка после его кристаллизации.

Удаление неметаллических включений производится с поверхности слитка в литейной изложнице сразу после заполнения ее жидким металлом, что кроме удаления шлака позволяет также обеспечить равномерное остывание слитка. Таким образом, решается сразу две проблемы: удаление шлака и минимизация образования усадочной раковины [1]. Авторским коллективом разработана конструкция автоматической машины для снятия оксидной пленки с поверхности алюминиевого слитка (рис. 1).

Рабочим органом в разработанной машине является лопатки. Лопатки работают в агрессивной среде расплавленного алюминия и являются наиболее нагруженным элементом машины. Все приводные механизмы вынесены за пределы теплового воздействия жидкого алюминия.

Исследование напряженно-деформированного состояния рабочего органа машины удаления шлака с поверхности алюминиевой чушки позволит на этапе проектирования определить напряжения, возникающие под действием температурных нагрузок.

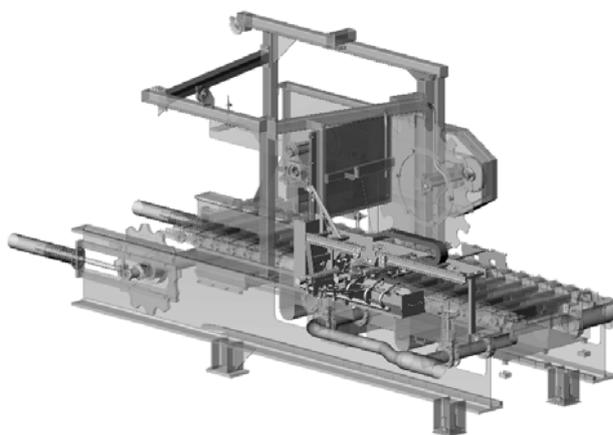


Рис. 1. Машина удаления оксидной пленки с поверхности алюминиевого слитка, установленная на литейном конвейере

Для исследования напряженно-деформированного состояния лопатки под действием тепловых нагрузок необходимо определить распределение температурных полей в теле лопатки.

Процесс теплопередачи в сплошной среде можно описать уравнением для скорости переноса тепла, которое еще называют законом Фурье [2]. Дифференциальная форма этого закона, выражающая плотность теплового потока в положительном направлении оси x , имеет вид

$$q'' = -k dT/dx. \quad (1)$$

В терминах теплового потока через поверхность A

$$q = -k A dT/dx. \quad (2)$$

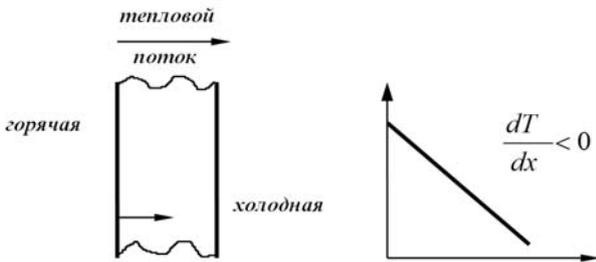


Рис. 2. Градиент теплового потока

Знак «минус» в уравнении указывает на то, что тепло передается в направлении меньшей температуры. Закон Фурье для трех направлений декартовой системы координат записывается следующим образом: в векторной форме для случая изотропной теплопроводности ($\mathbf{k} = k_x = k_y = k_z$) уравнение имеет вид

$$q'' = -k \nabla T, \text{ где} \quad (3)$$

$$q = q''_x i + q''_y j + q''_z k, \quad (4)$$

$$\nabla T = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}. \quad (5)$$

В качестве одного из граничных условий в конечно-элементных пакетах задается конвекция. Свободная конвекция происходит при движении среды вследствие разности плотностей нагретых и холодных слоев среды в поле тяжести. Примером является теплопередача от горячего тротуара к атмосферному воздуху в спокойный, безветренный день. Вынужденная конвекция обусловлена движением среды, которое вызвано некоторыми внешними причинами, такими как действие вентилятора, насоса или атмосферных ветров.

Согласно закону Ньютона теплопередача конвекцией описывается следующей формулой (6):

$$q'' = q / A = h(T_s - T_B), \quad (6)$$

где T_s – температура поверхности; T_B – средняя температура окружающей среды.

Конвективная теплопередача фактически является граничной, или поверхностной, нагрузкой. Конвекция может задаваться несколькими способами:

– вводом элемента конвективной связи (от узла к узлу);

– вводом двумерных и трехмерных элементов с поверхностным эффектом (от поверхности к узлу);

– вводом команд конвективной нагрузки, которые работают только с массивом твердотельных или оболочечных теплопроводящих элементов.

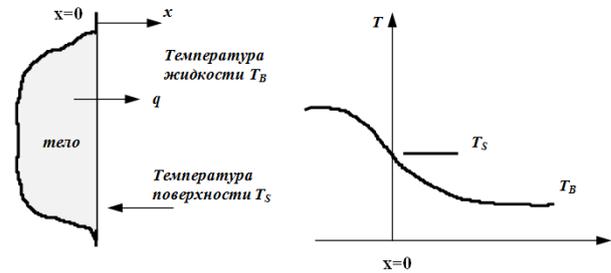


Рис. 3. Градиент теплового потока

Элементы с поверхностным эффектом задаются при моделировании конвекции «от поверхности к узлу», поскольку они содержат дополнительный узел (не принадлежащий базовому элементу), с помощью которого можно задавать среднюю температуру среды.

Нестационарный тепловой анализ рассматривает меняющийся во времени отклик системы, сопровождающийся процессами нагревания или охлаждения. В противоположность стационарному анализу можно видеть, что в этом случае происходит следующее:

- температуры изменяются со временем;
- тепловой поток изменяется со временем;
- тепловые нагрузки могут изменяться со временем;
- изменения внутренней энергии очевидны.

Основой для получения разрешающих уравнений является закон сохранения энергии.

Для некоторой сосредоточенной массы или элементарного объема количество подводимой энергии минус количество отводимой энергии равно изменению внутренней энергии, или в алгебраической форме

$$Q_{\text{подводимая}} + Q_{\text{генерируемая}} - Q_{\text{отводимая}} = Q_{\text{накопленная}}$$

Для элементарного объема это соотношение в дифференциальной форме имеет вид:

$$\rho c \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot q'' = q''' \quad (7)$$

Используя закон Фурье, уравнение можно записать в таком развернутом виде:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q''' = \rho c \frac{dT}{dt}. \quad (8)$$

В соответствии с ранее указанной процедурой можно получить следующую систему уравнений:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\}, \quad (9)$$

где $[K]$ = матрица теплопроводности; $[C]$ = матрица удельных теплоемкостей (или емкостей); $\{T\}$ = узловые температуры; $\{\dot{T}\}$ = производная температуры от времени $\{T\}$; $\{Q\}$ = вектор узлового теплового потока.

Для получения значений температуры $\{T\}$ используется следующий способ интегрирования по времени:

$$\{T_{n+1}\} - \{T_n\} = \Delta t_n (1 - \Theta) \{\dot{T}\} + \Delta t_n \Theta \{\dot{T}_{n+1}\}. \quad (10)$$

Этот прием известен как способ Эйлера (или метод трапеций) для интегрирования по времени. В данном случае $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ – шаг интегрирования по времени между точками n и $n + 1$; $\{T_n\}$, $\{T_{n+1}\}$ – значения температур в моменты времени n и $n + 1$; $\{\dot{T}_n\}$, $\{\dot{T}_{n+1}\}$ – производные температур; Θ – параметр Эйлера.

Величина параметра θ определяет метод интегрирования по времени. В САЕ пакетах параметр θ удовлетворяет соотношению $1/2 \leq \Theta \leq 1$. При $\Theta = 1/2$ имеет место схема интегрирования Кранка–Николсона, при $\Theta = 1$ – обратный метод Эйлера. Метод Кранка–Николсона также называют правилом средней точки, а обратный метод Эйлера – методом обратных разностей.

Когда используются указанные методы интегрирования по времени, система уравнений для нестационарной теплопроводности принимает вид:

$$[\bar{K}]\{\Delta T\} = \{Q\}, \quad (11)$$

где $\{\Delta T\} = \{T_{n+1}\} - \{T_n\}$; $[\bar{K}]$ – эквивалентная матрица теплопроводности, которая зависит от матрицы теплопроводности $[K]$ и удельной теплоемкости $[C]$; $\{Q\}$ – эквивалентный вектор теплового потока, учитывающий $\{Q\}$, $\{T_n\}$ и $\{\dot{T}_n\}$.

Конкретный вид указанных эквивалентных величин следующий:

$$[\bar{K}] = \frac{1}{\Theta \Delta t} [C] + [K], \quad (12)$$

$$\{Q\} = \{Q\} + \frac{1 - \Theta}{\Theta} [C] \{\dot{T}_n\} - [K] \{T_n\}. \quad (13)$$

Наиболее нагруженным элементом конструкции установки является рабочий орган – лопатка. Верхняя лопатка находится в контакте с металлом более продолжительное время, следовательно, более уязвима.

Для моделирования воздействия высоких температур на рабочий орган машины необходимо определить распределение температурного поля в лопатке при длительном контакте лопатки с жидким металлом. Также необходимо определить величину напряжений возникающих в лопатке под действием температурных нагрузок. Для решения вышеописанной задачи проведено моделирование нестационарного теплообмена.

Лопатки контактируют с металлом в самых неблагоприятных условиях не более 1 с затем 2 с они выходят из контакта и остывают в атмосфере. На рис. 4 показана диаграмма циклического изменения конвективной теплопередачи при контакте лопатки и алюминия. Величина конвективной теплоотдачи 210 Вт/м К получена экспериментальным путем [3].

В качестве свойств материала задано:

- теплопроводность: 60,5 Вт/м К;
- удельная теплоемкость: 434 Дж/кг К;
- коэффициент температурного расширения: $1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/К;
- модуль упругости: $2,1 \cdot 10^{11}$ Па;
- коэффициент Пуассона: 0,28;
- плотность: 7 800 кг/м³;
- предел текучести: 240 МПа;
- предел прочности: 400 МПа.

Время моделирования нестационарного процесса 70 с.

В результате моделирования получены графики изменения температуры активной части лопатки во времени (рис. 5).

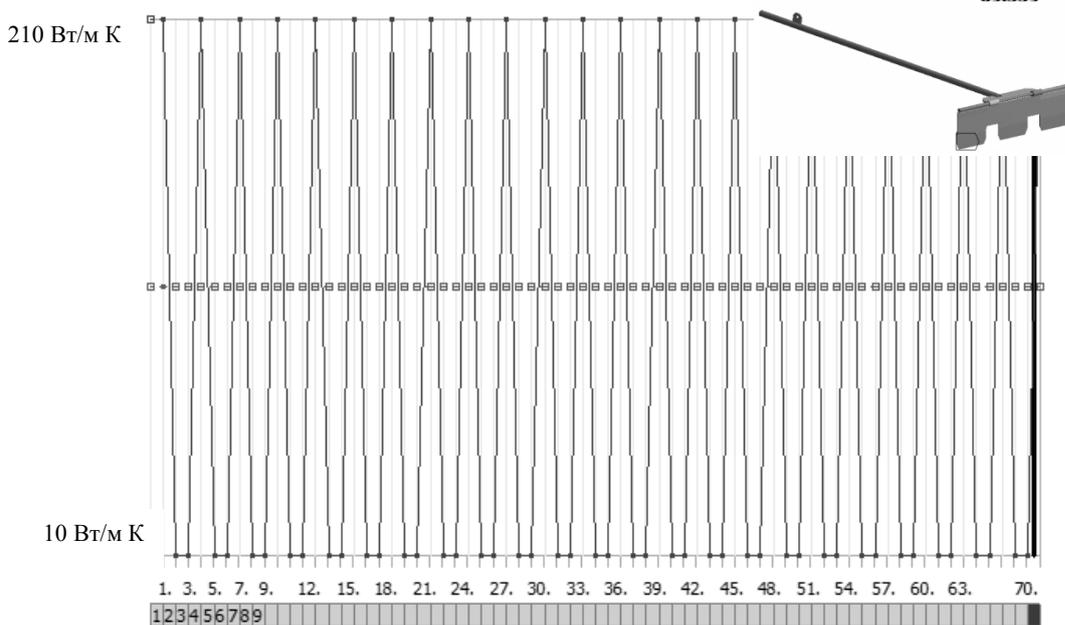


Рис. 4. График циклического изменения теплового потока

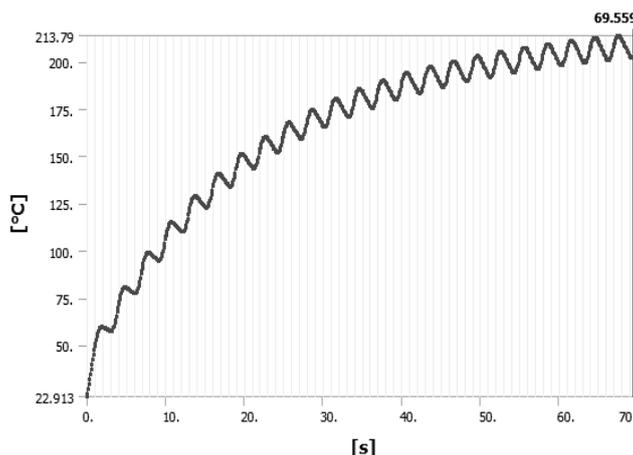


Рис. 5. График изменения температуры активной части лопатки

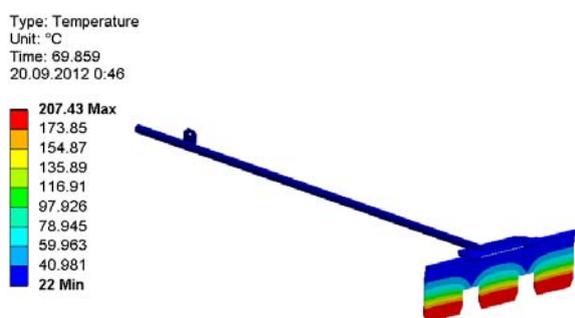


Рис. 6. Температура лопатки в конце моделирования

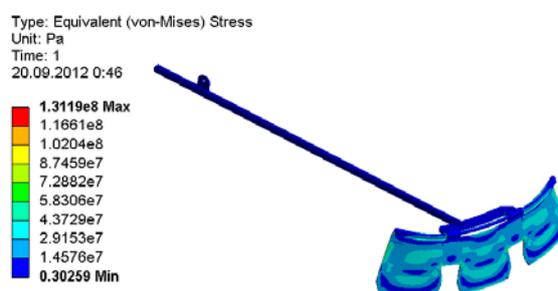


Рис. 7. Распределение напряжений в лопатке

В результате моделирования видно, что максимальная температура составляет 213 °С. При этом максимальное значение температуры асимптотически приближается к 220 °С. На рис. 6 представлено распределение температурного поля в теле лопатки.

Из рисунка видно, что высокие значения температур не распространяются за пределы лопатки.

Распределение напряжений в лопатке в конце процесса моделирования на 70 с показано на рис. 7. Высокий температурный градиент в лопатке формирует высокие напряжения, вызванные температурными деформациями.

Максимальные напряжения возникают в кронштейне крепления лопатки и составляют 130 МПа. Максимальные деформации модели составляют 0,58 мм. Полученная величина напряжений не является критичной для обеспечения заданной выносливости лопатки.

В заключении стоит отметить, что представленная методика расчета позволяет получить картину напряженно-деформированного состояния методом конеч-

ных элементов на этапе проектирования. В результате исследования напряженно-деформированного состояния рабочего органа машины удаления оксидной пленки с поверхности алюминия значения максимальных напряжений не превышают допустимых. В случае превышения допустимых напряжений данная методика позволяет оптимизировать геометрию изделия для достижения заданных характеристик.

Библиографические ссылки

1. Дубровин В. К. Повышение качества отливок из жаропрочных сплавов путем фильтрационной очистки // Вестник ЮУрГУ. 2008. № 24. С. 55–59.
2. Thermal modelling of ingot chain production / C. Sztur et al. // TMS Light Metals. 2001. P. 1099–1105.
3. Remelt ingot mold heat flow and deformation / J. Grandfield, D. Mortensen, H. Fjær et al. // TMS Light Metals. 2006. P. 869–876.

© Вавилов Д. В., Новиков Е. Е., 2013