

влияющих на точность окончательно обработанной поверхности; поэтому их следует выполнять до операций чистовой обработки.

Обработку поверхностей, на которых возможные дефекты заготовок недопустимы, следует выполнять в начале технологического процесса при выполнении черновых операций.

В первую очередь следует обрабатывать поверхности, при удалении припуска с которых в наименьшей степени снижается жесткость заготовки.

Поверхности детали, связанные между собой точным относительным расположением, необходимо обрабатывать с одной установки и в одной рабочей позиции.

УДК 621.438-226.2.048

### **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАКТОВЫХ ПОЛОК СОПЛОВЫХ БЛОКОВ ТУРБИНЫ НА БАЗЕ ВЕРИФИКАЦИИ 3D РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУЙНОГО ОБДУВА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУГЛЫМИ ВОЗДУШНЫМИ СТРУЯМИ**

Горелов Ю.Г., Горелова Д.В.

КБПР, ФГУП "НПЦ газотурбостроения "Салют", г. Москва

### **DESIGN FEATURES VANE PLATFORMS COOLING SYSTEMS FOUNDED ON 3D VERIFICATION ANALYSIES METHODS OF ROUND JETS IMPINGING TO A FLAT SURFACE**

*Gorelov Yu.G., Gorelova D.V. Carried out heat exchange analysis on flat plate models with air jets impinging, transacted comparison with experimental data. Design 3D model for definition thermal condition vanes in conjugate statement. Carried out optimization jets impinging systems for end-walls of nozzle blocks.*

Высокие температуры газа на входе в турбину достигаются вследствие улучшения свойств материалов, новых покрытий и новых схем охлаждения. Пленочное охлаждение становится типичной технологией охлаждения трактовых полок сопловых блоков турбины. Однако высокие требования к экономичности перспективных турбин требуют применения чисто конвективного охлаждения трактовых полок. Для поддержания высокой эффективности охлаждения полок часто используется конвективное струйное охлаждение. Формой струйных отверстий, их размером и местом расположения достигаются высокие коэффициенты теплоотдачи, с относительно равномерным распределением по поверхности обдува во избежание «горячих» и «холодных» пятен.

Проанализированы последние струйные технологии, например, в работах Nan и

Goldstein [1], Weigand и Spring [2]. В работах Hilgeroth E. [3] и А.А. Смирнова [4] не было отмечено преимуществ ни шахматного, ни коридорного расположения струй. Е.П. Дыбан и А.И. Мазур [5], Florschuetz и др. [6] нашли, что периодические изменения идентичны в передней части обдуваемой пластины для коридорного и шахматного массива струй, но значительно отличаются в выходной части пластины. Treuren и др. [7] при детальном сравнении установили, что при низком  $Re_d$  струи, осредненный по площади коэффициент теплоотдачи незначительно выше для шахматного массива струй. Отличие становится больше при более высоком  $Re_d$ . При шахматном расположении струй числа  $Nu$  снижаются незначительно, что указывает на меньший вклад поперечного потока на выходе из массива струй. Metzger и др. [8] измеряющие ло-

кальные характеристики теплоотдачи для коридорного и шахматного расположения струй отметили, что осредненные по площади коэффициенты теплоотдачи для коридорного массива струй были получены равными или большими, чем коэффициенты теплоотдачи для модели с шахматным расположением.

Авторы работы [8, 9] установили, что в модели с шахматным расположением струй по сравнению с коридорным, поперечный поток вызывает более сильное размывание струй, что ведёт к снижению эффективности теплоотдачи. В [10] показано, что при шахматном расположении струй, в связи с наличием ребер турбулизаторов был частично преодолён характер более сильного размывания при одностороннем выдуве потока. Сравнение теплоотдачи проведено в диапазоне относительных высот расположения экрана  $h/d_{омв.} = 3, 4, 5$ . Минимальным, с точки зрения максимальной теплоотдачи, выбрано относительное расстояние  $h/d_{омв.} = 3$  ( $d_{омв.} = 1$  мм), что очевидно связано с минимальной технологической высотой ребра в полках лопаток - 1 мм при зазоре над ребром - 2 мм. Однако в соответствии с [5] теплоотдача для гладкой пластины при  $h/d_{омв.} = 1$  значительно выше, чем для оребренной пластины при  $h/d_{омв.} = 3$ .

Анализ приведенных статей позволил провести тестирование моделей, разработанных в программном комплексе ANSYS CFX и исследовать особенности течения воздуха при струйном обдуве плоской пластины пучком круглых струй. На основании опытных данных [11] в ANSYS CFX были получены расходные характеристики перфорированных пластин при атмосферных продувках и определены доли расходов, приходящиеся на каждую теплоотдающую пластину. Получено приемлемое совпадение результатов расчёта с экспериментом [11]. Решение сопряжённой тепловой и газодинамической задачи позволило определить коэффициенты теплоотдачи пластины, обдуваемой многорядным пучком воздушных струй на моделях с тетра-, гексаэдрической сеткой и сеткой с призматическими слоями. Результаты расчетных исследований подтвердили экспериментальные данные [11]: местные характеристики теплоотдачи для пластины при

местном значении  $Re_d$  ухудшаются по мере роста влияния «отработанного воздуха». Так, коэффициент теплоотдачи для первой пластины, где отсутствует поток «отработанного воздуха» наибольший; у остальных пластин этот коэффициент меньше. Величины, характеризующие геометрию перфорированной пластины: открытую площадь  $F_{омв.}/F$  или относительный шаг -  $s/d_{омв.}$  и  $h/d_{омв.}$  играют роль определяющего параметра.

Сравнение обобщающих опытных значений  $Nu_d Pr^{-1/3}$  [11] - с расчетными данными ANSYS CFX показало удовлетворительное совпадение опытных и расчетных величин. Для модели с коридорным расположением струй рассмотрена возможность дополнительной защиты струй от встречного потока треугольными ребрами, расположенными между струями.

Подходы, используемые при верификации моделей струйного обдува плоской пластины, были использованы при проектировании системы охлаждения сопловых блоков турбины.

Для верификации гидродинамической 3D модели сопловых блоков проведен 1D гидравлический расчет системы охлаждения, получено удовлетворительное совпадение 3D и 1D расходных характеристик. Выбор схемы охлаждения и оптимизация конструкции сопловых блоков осуществлялась с помощью программы совместного решения гидравлической и тепловой задачи в 1D постановке гидравлики и 2D тепловой модели. При этом используемые критериальные уравнения теплообмена по газу и воздуху позволили получить базовую оценку температурного состояния блока. Для учёта влияния конструктивных особенностей на пространственное течение воздуха (газа) и температурное состояние блока в программном комплексе ANSYS CFX была разработана 3D модель, проведены сопряженные тепловые и газодинамические исследования различных вариантов охлаждения трактовых полок сопловых блоков турбины при их конвективном охлаждении и толщине теплозащитного покрытия ~ (100–150) мкм. Расчеты проводились для струйного обдува полок при отсутствии пленочного

охлаждения и минимально возможных расходах охлаждающего воздуха,  $Re_d = (2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5)$ . Расстояние от струйной до обдуваемой пластины изменялось в диапазоне от одного до двух диаметров отверстий. Рассматривались схемы, как с односторонним выпуском воздуха, так и выпуском воздуха в передний и задний торцы полки.

Наилучшая эффективность теплоотдачи была получена при минимальном расстоянии от струйной пластины до обдуваемой гладкой -  $h/d_{омв.} = 1$ . Наличие поперечных ребер турбулизаторов на обдуваемой пластине при расстоянии от струйной до обдуваемой пластины  $h/d_{омв.} = 2$  не привело к выполнению требований по допустимой температуре полки. Проведенные расчетные исследования позволили выявить на 3D моделях локальные зоны перегревов, оптимизировать конструкцию соплового блока турбины, исходя из требований по допустимой температуре металла и критериев прочности конструкции.

#### Библиографический список

1. Han, B. Jet-Impingement Heat Transfer in Gas Turbine Systems / B. Han, R.J. Goldstein // *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 934, 2001. -pp. 147-161.
2. Weigand, B. Multiple Jet Impingement / B. Weigand, S. Spring // "A Review," International Symposium on Heat Transfer in Gas Turbine Systems, Antalya, Turkey. 2009.
3. Hilgeroth, E. Wärmeübergang bei Düsenströmung senkrecht zur Austauschfläche / E. Hilgeroth. - *Chem.- Ing.- Techn.*, 1965, 37, N 12, S. 1264-1272.
4. Смирнов, А.А. Исследование конвективного теплообмена при взаимодействии струйных потоков воздуха с плоскими и цилиндрическими поверхностями / А.А. Смирнов // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук.- Куйбышев. 1974.-22с.
5. Дыбан, Е.П. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур. – Киев: Наукова Думка, 1982. – 303с.
6. Florschuetz, L.W. Periodic Streamwise Variations of Heat Transfer Coefficients for Inline and Staggered Arrays of Circular Jets with Crossflow of Spent Air / L.W.Florschuetz, R.A. Berry, D.E. Metzger // *ASME J. Heat Transfer*, Vol.102, 1980. – pp. 132-137.
7. Van Treuren, K.W. Comparison and Prediction of Local and Average Heat Transfer Coefficients under an Array of Inline and Staggered Impinging Jet / K.W. Van Treuren, Z. Wang, P. Ireland, T.V. Jones, S.T. Kohler // *ASME paper No. 96- 1996. GT-163.*
8. Metzger, D.E. Heat Transfer Characteristics for Inline and Staggered Arrays of Circular Jets with Crossflow of Spent Air / D.E. Metzger, L.W. Florschuetz, D.I. Takeuchi, R.D. Behee, R.A. Berry // *ASME J. Heat Transfer*, Vol.101, 1979. - 526-531.
9. Florschuetz, L.W. Periodic Streamwise Variations of Heat Transfer Coefficients for Inline and Staggered Arrays of Circular Jets with Crossflow of Spent Air / L.W. Florschuetz, R.A. Berry, D.E. Metzger // *ASME J. Heat Transfer*, Vol.102, 1980. - 132-137.
10. Yunfei, Xing Experimental Investigation on Staggered Impingement Heat Transfer on a Rib Roughened Plate with Different Crossflow Schemes / Xing Yunfei, Bernhard, Weigand // *ASME Turbo Expo*, Glasgo, Scotland, ASME, 2010. GT2010-22043.
11. Керчер, А.А. Теплоотдача плоской поверхности, обдуваемой падающим перпендикулярно ей прямоугольным пучком круглых воздушных струй, с учетом влияния на теплоотдачу отработанного воздуха / А.А. Керчер, А.Н. Табаков // *Энергетические машины и установки*, Изд-во «Мир», №1, 1970. - с. 87.