

требующих больших энергетических затрат. Это приводит к значительным потерям, связанным с частой заменой сопел и снижением ресурса работы плазмотрона. То есть существующие плазменные горелки не позволяют получать оптимального соотношения их мощности и протяженности ядра, необходимых для проплавления керамических материалов.

Эффективное использование режимов обработки порошкового керамического материала в плазмотроне возможно обеспечить за счет применения профилированного сопла, позволяющего увеличить протяженность ядра струи, что в свою очередь обеспечивает достаточный прогрев напыляемого материала.

Такой подход обеспечивает увеличение эффективности обработки кристаллических порошковых материалов из тугоплавких окислов с существенным увеличением

скорости, температуры и степени проплавления напыляемых частиц без увеличения мощности самих плазмотронов.

Разрабатываемый плазмотрон с профилированным соплом может использоваться для увеличения эффективности технологии напыления керамических порошковых материалов из тугоплавких окислов, а также любых покрытий из карбидов, металлов и сплавов, применяемых в двигателестроении и других отраслях машиностроения. Использование плазмотрона с профилированным соплом позволит разрабатывать новые виды покрытий с заданной структурой и свойствами для повышения эксплуатационных характеристик деталей, работающих в условиях повышенных температур и нагрузок, например, поршни двигателя беспилотного летательного аппарата, детали горячего тракта газоперекачивающих агрегатов, лопатки и сопловые секции турбин и других.

УДК 621.1.65. 621.438

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ В СОПЛОВОЙ ЛОПАТКЕ С ЦИКЛОННО-ВИХРЕВОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В., Хасанов С.М.

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева

INCREASE THE COOLING EFFICIENCY OF THE NOZZLE VANES WITH A CYCLONE-VORTEX COOLING SYSTEM

Piralishvili Sh.A., Veretennikov S.V., Khasanov S.M. The scientific basis of swirling flow features for the creation of convective and convective-film cooling effective schemes vanes of air-gas channel of gas-turbine engine was developed. Calculated and experimental researches have shown the possibility of reducing the temperature non-uniformity in cross-section turbine vanes and increase its cooling efficiency in the organization of cyclone-vortex cooling system. Recommendations have been developed to optimize the geometry of the nozzle vanes with a cyclone-vortex cooling system. The criterion equations for cooling vanes were obtained that allow the error does not exceed 8% of the expected means heat transfer coefficients on the inner surface of the cooling channel inlet edge and the heat transfer coefficient in cyclone channels placed in the body of the vane with an error of 5-7%. Designed nozzle vanes with a cyclone-vortex cooling system are characterized by high efficiency cooling in all three sections of the vane. A comparison of numerical results with experimental data has shown that the maximum difference was 9% on the flow volume and 5% on cooling efficiency; this fact says about the possibility of using the proposed method of the numerical three-dimensional thermal-hydraulic calculations when designing and evaluating the effectiveness of cooling systems of turbine vanes.

Одним из наиболее эффективных способов интенсификации охлаждения лопаток является закрутка потока охла-

дителя при его движении в радиальных цилиндрических каналах. Характерные особенности закрученного потока наиболее

полно подходят для создания эффективных конвективных и конвективно-пленочных систем охлаждения лопаток проточной части газовых турбин. При этом может реализовываться циклонно-вихревая (с закруткой потока) схема охлаждения, в которой поток поступает в систему цилиндрических каналов через тангенциальные щели, приобретает закрутку и интенсифицирует теплоотдачу. Закрученный поток используется для охлаждения наиболее теплонапряженных участков лопатки (входной кромки), затем он собирается в верхнем ресивере и направляется в менее теплонапряженные участки.

В работе разработаны научные основы применения особенности закрученного потока для создания эффективных схем конвективных и конвективно-пленочных систем охлаждения лопаток проточной части ГТД и получены следующие основные результаты. Расчетными и экспериментальными исследованиями показана возможность снижения температурной неравномерности в поперечном сечении лопатки турбины и повышения ее эффективности охлаждения при организации циклонно-вихревой системы охлаждения. Разработаны рекомендации по оптимизации геометрии проектируемой сопловой лопатки с циклонно-вихревой системой охлаждения. Для лопатки с охлаждаемой входной кромкой при использовании тангенциальных подводов с относительной площадью соплового ввода $\bar{f}_c = 0,1$, расположенных с относительным шагом $\bar{l} = 0,23$ и восемью тангенциальными подводами при перепаде давления $\pi_{\text{охл}}^* = 1,8$ достигается эффективность охлаждения $\Theta = 0,64$, неравномерность температурного поля не превышает $\Delta T = 11$ К, при этом относительный расход охладителя составляет $\bar{G} = 4,1\%$. Среднее значение коэффициента теплоотдачи в канале системы охлаждения по высоте входной кромки для указанного режима составляет 2575 Вт / (м² К), что говорит о достаточно высокой интенсивности теплообмена.

Полученные критериальные уравнения позволяют с погрешностью не превышающей 8% рассчитывать средние коэффициенты теплоотдачи на внутренней поверхности охлаждающего канала входной кромки и коэффициент теплоотдачи в циклонных каналах, размещенных в теле пера лопатки с погрешностью 5-7%. Полученные критериальные уравнения имеют высокую степень корреляции (коэффициент корреляции уравнений составляет $r = 0,87; 0,85$ и $0,89$) с экспериментальными данными в диапазоне чисел Рейнольдса $8000 < Re < 30000$.

Спроектированная сопловая лопатка с циклонно-вихревой системой охлаждения характеризуется высокой эффективностью охлаждения по всем трем сечениям пера: в корневом сечении $\Theta_{\text{ср}} = 0,59-0,61$; в среднем – $\Theta_{\text{ср}} = 0,56-0,59$; в периферийном – $\Theta_{\text{ср}} = 0,52-0,53$ при относительном расходе охладителя $\bar{G} = 6-7\%$. Максимальная средняя эффективность охлаждения $\Theta_{\text{ср}} = 0,56$ по профилю пера лопатки достигается при режимах течения охладителя: относительном расходе охладителя $\bar{G} = 4-6\%$ и перепаде давления $\pi_{\text{охл}}^* = 1,6...1,8$. Сопоставление результатов численных расчетов с экспериментальными данными показало, что максимальное расхождение составило 9 % по расходу и 5% по эффективности охлаждения, данный факт говорит о возможности использования предложенного метода численных трехмерных теплогидравлических расчетов при проектировании и оценке эффективности систем охлаждения лопаток турбин. Выявлен скачкообразный характер изменения эффективности охлаждения по профилю пера лопатки, который объясняется возникновением экстремумов в области расположения охлаждающих циклонных каналов в пера лопатки. Снижение величины эффективности охлаждения в области выходной кромки связано с поступлением более прогретого охладителя из верхнего коллектора в вихревую матрицу. Численное моделирование спроектированной лопатки на реальных режимах выявила высокие показатели по эффективности охлаждения:

$\Theta_{\text{ср}} = 0,57$ по поверхности пера лопатки при $\bar{G} = 3,7\%$ и $\pi_{\text{охл}}^* = 1,8$.

Библиографический список

1. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 5 – Тепломассообмен и

теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков / А. А. Халатов, И. И. Борисов, С. В. Шевцов. – Киев.: Ин-та технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 500 с.

УДК 593.3

ЗАДАЧА О ЦАРАПИНЕ ПОСТОЯННОЙ ГЛУБИНЫ В ТОНКОЙ ПЛАСТИНЕ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ПО СХЕМАМ ЖЁСТКОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

Степанов С.Л.¹, Яковлев А.С.²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

В настоящем сообщении предлагается рассмотреть задачу о царапине постоянной глубины a в тонкой пластине толщиной h , но

с учётом изменения геометрии и локализации деформации по схемам жёсткопластического течения (рис. 1).

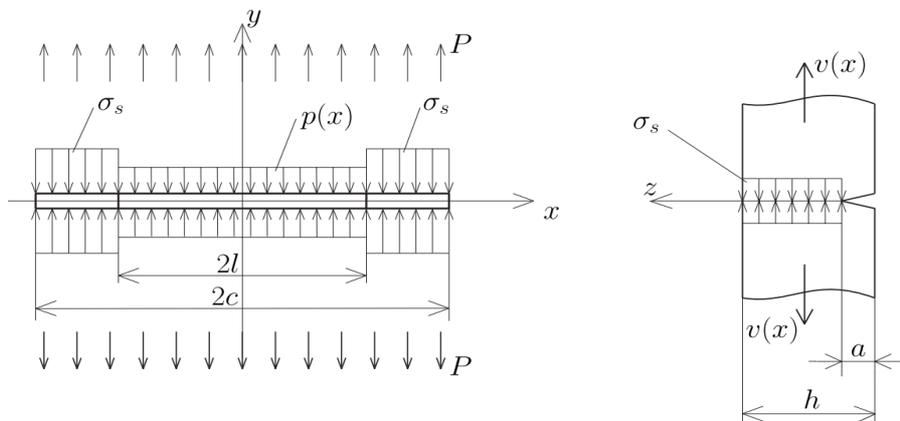


Рис. 1. Схема нагружения берегов царапины с постоянной глубиной

На берега царапины действуют сжимающие напряжения $p_1(x)$ и $p_2(x)$. $p_1(x)$ определяется из жёсткопластической схемы несимметричного течения в виде:

$$p_1(x) = \sigma_s \left[\left(1 - \frac{a}{h} - \frac{2v(x)}{\bar{W}_* \cdot h} \right) \right] \quad (1)$$

где $\bar{W}_* = \frac{W}{k}$ - предельное значение объёмной плотности диссипации энергии при переходе через линию скольжения, k – предел текучести на сдвиг.

Предельное состояние реализуется при условии:

$$c + v = h - a \quad (2)$$

Условие равновесия в данном случае запишется в виде:

$$\begin{aligned} h \cdot p(x) &= \sigma_s (h - a + v(x)) = \\ &= \sigma_s \left(h - a - \frac{2v}{\bar{W}_*} + v - v \right) = \sigma_s \left(h - a - \frac{2v}{\bar{W}_*} \right) \end{aligned}$$

Тогда получаем выражение для $p_1(x)$:

$$p_1(x) = \sigma_s \left[\left(1 - \frac{a}{h} - \frac{2v(x)}{\bar{W}_* \cdot h} \right) \right] \quad (3)$$

$p_2(x)$ определяется из схемы симметричного течения с ростом внутренней трещины.

$$c = v \left(\frac{2}{\bar{W}_*} - 1 \right).$$