

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА УСТАНОВКАХ ТИПА УВНК И ПМП

©2018 В.Н. Толорайя, С.Н. Некрасов

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов  
Государственный научный центр Российской Федерации, г. Москва

### COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF CASTINGS FROM SUPERALLOYS PRODUCED ON UVNK- AND PMP-TYPE UNITS

Toloraya V.N., Nekrasov S.N. (All-russian scientific research institute of aviation materials, State Research Center of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation)

*The report presents a review of data showing the influence of technology of the high-gradient directional solidification (HGDS) with cooling of casting mold in molten low-melting metal - aluminum or tin - on structure and properties of single-crystals of nickel-base superalloys in comparison with the directional solidification method (DS) with radiant cooling of the mold.*

Приводится обзор данных по влиянию технологии высокоградиентной направленной кристаллизации (ВНК) с охлаждением литейной формы в расплаве легкоплавкого металла – алюминия или олова на структуру и свойства монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов в сравнении с технологией направленной кристаллизации (НК) с радиационным охлаждением литейной формы.

Рассмотрены параметры роста, определяющие структуру монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов, полученных методом Бриджмена–Стокбаргера.

Показано, что повышение ростового термического градиента  $G_z$  позволяет резко снизить вероятность образования посторонних кристаллов при монокристалльном литье в процессе формирования пера турбинной лопатки, что особенно важно при применении безуглеродистых жаропрочных сплавов для монокристалльного литья. Повышение  $G_z$  и, соответственно, скорости охлаждения в процессе роста при ВНК позволяет получить структуру с междендритным расстоянием  $\lambda_{001} \sim 100$  мкм и в  $\sim 2$  раза снизить продолжительность гомогенизирующего отжига для монокристаллических отливок.

Сравнительные испытания длительной прочности и монокристаллов жаропрочных сплавов, полученных в печах с радиационным (НК) и жидкометаллическим охлаждением (ВНК), показали, что преимущества последних в наибольшей степени проявляются

для углеродсодержащих жаропрочных сплавов.

Для безуглеродистых жаропрочных сплавов повышение этих характеристик практически наблюдается в меньшей степени, что связано с длительной термической обработкой, практически полностью снимающей дендритную ликвационную неоднородность, сформированную в процессе литья.

Проанализировано влияние градиента кристаллизации  $G_z$  на микропористость, объёмную рекристаллизацию и структурные дефекты типа «струйчатая ликвация» и полосчатость в монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов.

Показано, что объёмная доля пор снижается при увеличении температурного градиента  $G_z$  на фронте роста. Увеличение скорости роста  $R$  даёт обратный эффект.

В установках ВНК полосы струйчатой ликвации практически не встречаются, даже при получении отливок из наиболее склонного к образованию полос струйной ликвации сплава, в составе которого отсутствуют тяжёлые нормально сегрегирующие элементы, такие как тантал и присутствуют обратно сегрегирующие рений и вольфрам. Полосчатость характерна только для ВНК безуглеродистых сплавов при формировании структуры с  $G_z > 8-10^\circ\text{C}/\text{мм}$ . Объёмная рекристаллизация наблюдается преимущественно в монокристалльных отливках из безуглеродистых жаропрочных сплавов, полученных в

условиях достаточно высоких ростовых градиентов  $G_z$  в процессе их гомогенизирующего отжига при температурах выше температуры растворения  $\gamma'$ -фазы.

Результаты проведённых исследований используются в технологиях получения ло-

патов ГТД с монокристаллической и однонаправленной структурой.

Работа выполнена в рамках Комплексного научного направления 9.5. «Направленная кристаллизация, высокотемпературные жаропрочные сплавы».

УДК 621.438; 629.735

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛЁНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЗА РЯДОМ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ V-ОБРАЗНЫХ ВЫЕМОК

©2018 О.В. Лебедев, В.В. Лебедев

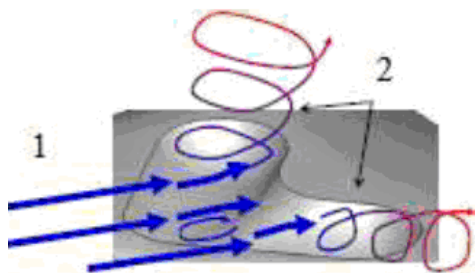
Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А.Соловьёва

### STUDY OPPORTUNITIES TO IMPROVE LOCAL EFFICIENCY AND UNIFORMITY OF DISTRIBUTION OF FILM COOLING FOR A NUMBER OF HOLES WHEN USING THE V-SHAPED DIMPLES

Lebedev O.V., Lebedev V.V. (P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation)

*Experimental studies of film cooling behind a series of discrete holes on a flat wall are carried out. The range of angles formed by the axes of the injection holes with a shielded wall from 45 to 90 degrees, the parameters of the injection from 0.3 to 1.2 is covered. The Mach number has not been modelled. Local increase of efficiency and uniformity of distribution of film cooling is revealed when using V-shaped dimples connected in continuous lines behind a number of holes.*

Известны методы интенсификации теплообмена между потоком и обтекаемой стенкой с помощью расположенных на стенке V-образных выемок [1] (рис. 1).



1 – основной поток,

2 – пара вихрей противоположного вращения [1]

Рис.1. Схема V-образной выемки, генерирующей парный вихрь

Если расположить такие V-образные выемки на стенке за рядом отверстий для вдува охлаждающего воздуха в горячий поток, то возникающая на V-образной выемке пара вихрей будет способствовать концентрации охладителя у стенки. Для проверки изложенной идеи проведены экспериментальные исследования на плоской адиабатной стенке, с углами вдува 45°, 60°, 90°, ори-

ентированных по основному потоку. Режимы исследуемых завес задавались параметром вдува  $m = \rho_g V_g / \rho_z V_z$ , эффективность завесного охлаждения определялась по формуле  $\theta = (T_z - T_{cm}) / (T_z - T_g)$ . Температуры газа  $T_z$  и воздуха  $T_g$  контролировались с погрешностью в 1°C. Поле температур на стенке наблюдалось и фиксировалось с помощью тепловизора FLIR-E64501, с матрицей 320x240 с разрешением 76800 пикселей, с чувствительностью 0.05° С.

Полученные результаты привели к идее использовать вместо V-образной выемки ряды сплошных зигзагообразных выемок, как это показано на рис. 2.

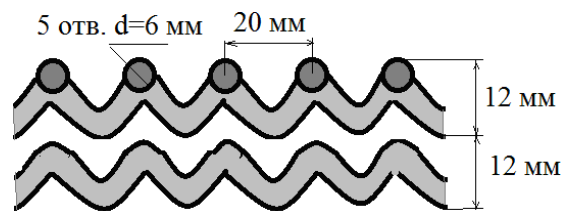


Рис. 2. Система из двух зигзагообразных выемок за рядом отверстий