

УДК 621.74

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОБЛЕГЧЕННЫХ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

А. С. ГОРЮХИН¹, Е. С. ГАЙНЦЕВА², О. Б. ДЕМЕНОК³, А. А. ГАНЕЕВ⁴,
Р. Ф. МАМЛЕЕВ⁵, Т. А. ХАЙРУЛЛИН⁶

¹Goruhinas@yandex.ru, ²Gaintsevaes@yandex.ru, ³Dobor999@mail.ru, ⁴Almir.ganeew@yandex.ru,
⁵Rafilmamleev@gmail.com, ⁶Kmitlp@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 14.02.2018

Аннотация. Рассмотрена проблема получения тонкостенных охлаждаемых лопаток на современном автоматизированном оборудовании. Показано, что при переходе на изготовление стержней на пресс-автомате возникают дефекты, связанные с неравномерным распределением огнеупорных составляющих, которые могут быть устранены за счет изменения седиментационных свойств огнеупорной стержневой смеси. Рассмотрены вопросы повышения качества охлаждаемых лопаток, связанные с уменьшением разворота естественно закрученного стержня, формирующего внутреннюю полость лопатки.

Ключевые слова: охлаждаемая лопатка; керамический стержень; литье по выплавляемым моделям; седиментация; точность отливки.

ВВЕДЕНИЕ

Современные охлаждаемые лопатки газотурбинного двигателя отличаются значительной протяженностью (170 мм и выше) и тонкими стенками пера (менее 1 мм). Внутренняя полость пера лопатки изменяется от 0,3 до 4 мм. Получают такие лопатки литьем по выплавляемым моделям без припуска на механическую обработку пера. Внутренняя полость пера отливки формируется керамическим стержнем, к которому предъявляются повышенные требования, так как смещение стержня в отливке даже на 0,2 мм приводит к утонению пера отливки и ее браку.

Апробация имеющихся на производстве стержневых составов для получения стержней выявила ряд недостатков, возникающих как на этапе получения стержней-сырцов,

так и на этапе заливки форм жаропрочным сплавом. При переходе с ручного изготовления стержней на пресс-автомат CLEVELAND STM-25 в некоторых стержнях-сырцах стали возникать дефекты в виде вспучивания, усадки, недоливов, а после обжига – повышенная пористость и растрескивание (рис. 1).

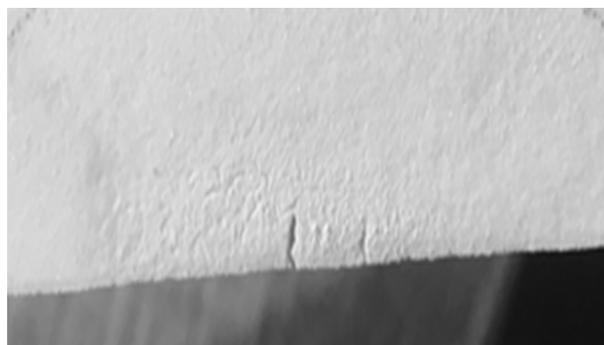


Рис. 1. Дефекты в обожженных керамических стержнях

Одной из причин появления пористости и трещин в готовом стержне является не-

равномерное распределение пластификатора и крупной фракции огнеупорных компонентов. Для определения причин неравномерного распределения фракционного состава были определены седиментационные свойства компонентов стержневой смеси. Скорость седиментации огнеупорных порошков в суспензии зависит от их размеров, формы, разности плотностей частиц, а также от вязкости и плотности среды.

Скорость оседания шарообразных частиц в вязкой жидкости определяется по уравнению Стокса:

$$\omega_0 = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right) \frac{gd^2}{\nu_k}, \quad (1)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности зерен песка и жидкости соответственно; d – диаметр эквивалентного по объему песчинки шара; g – ускорение свободного падения; ν_k – кинематическая вязкость жидкости.

Анализ основного фракционного состава серийной стержневой массы показывает, что 97% массы составляют различные фракции электрокорунда размером от 50 до 120 мкм и только 3% огнеупора размером 7 мкм. Каждая фракция имеет свой коэффициент седиментации или время оседания в нагретой массе на определенную глубину. Рассмотрены седиментационные свойства двух видов основных огнеупорных материалов, применяющихся для получения стержневой массы (электрокорунд и плавленный кварц различных фракций). По уравнению (1) рассчитана скорость оседания огнеупоров в расплавленном парафине при температуре 90°C (рис. 2). Графики, приведенные на рис. 2, позволяют учитывать седиментационные свойства компонентов при разработке новых стержневых композиций и получать стержневые смеси, устойчивые к расслоению их в процессе получения стержней.

Применение только электрокорундовых порошков в серийной стержневой массе приводит к необходимости постоянного и интенсивного перемешивания ее в пресс-автомате, что не предусмотрено его конструкцией.

С целью снижения скорости оседания и уменьшения расслоения стержневой смеси в баке пресс-автомата была проведена кор-

ректировка стержневого состава путем замены части порошков электрокорунда порошками плавленного кварца и увеличения процентного содержания мелкой фракции в смеси. Корректировка смеси позволила замедлить процесс ее расслоения и получать качественные стержни-сырцы на пресс-автомате в течение всей смены.

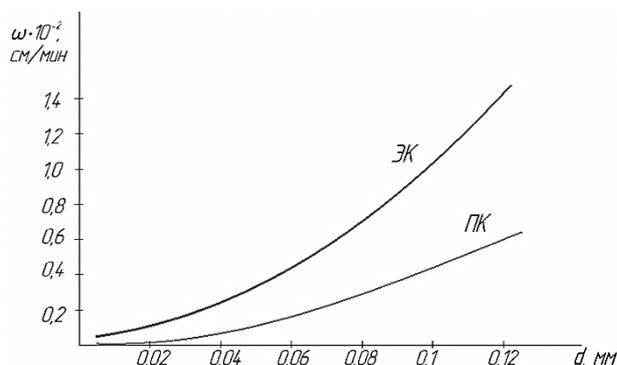


Рис. 2. График зависимости скорости оседания электрокорунда (ЭК) и плавленного кварца (ПК) от размера их частиц – d

Сравнительный анализ количественного изменения огнеупорных составляющих стержней-сырцов, полученных на пресс-автомате, проводился на серийной и опытной массе.

Каждый стержень-сырец, получаемый через заданное время (1, 2 и 3 ч), прокаливался в печи при 800°C в течение 5 мин (до полного выгорания пластификатора), взвешивался и проходил рассеивание по фракциям. Количество каждой фракции определялось взвешиванием на аналитических весах и вносилось в таблицу. После часа работы пресс-автомата на серийной массе количество крупной фракции в стержнях увеличилось на 33%, через 2 ч – на 24%, а через 3 ч – на 18% от первоначального значения. В то же время в стержнях из опытной массы через час работы пресс-автомата крупной фракции увеличилось только на 1%, через 2 ч – на 13%, а через 3 ч – на 1%. Первоначальное количество крупной фракции в обеих массах было одинаково (табл. 1). Изменение содержания крупной фракции по массе в серийных и опытных стержнях показано на графиках (рис. 3).

Изменение содержания мелких фракций в стержнях во время работы пресс-автомата незначительно и не оказывает существенно-

го влияния на качество стержней. Увеличение количества крупной фракции в смеси в начале работы пресс-автомата объясняется тем, что первой оседает самая плотная крупная фракция (более 0,1 мм). Забор смеси в пресс-автомате происходит в нижней части бака, что приводит к увеличению крупной фракции в стержне. В процессе работы пресс-автомата количество крупной фракции в смеси естественно уменьшается. В серийной массе увеличение крупной фракции достигает 33%, тогда как в опытной массе не превышает 13%. Это и объясняет причину возникновения дефектов в керамических стержнях, полученных из серийной массы на пресс-автомате.

Таблица 1

Изменение содержания соотношения огнеупорных фракций в стержне в течение работы пресс-автомата

Время работы пресс-автомата, ч	Масса стержня после выгорания пластификатора, гр	Масса круп. фракции > 0,1мм, гр (%) ²	Масса сред. фракции 0,1–0,05мм, гр	Масса мелк. фракции <0,1 мм, гр
Серийная стержневая масса				
Начало работы	36,00	5,80 (100)	15,06	14,5
1	35,88	7,71 (133)	13,06	14,79
2	36,10	7,19 (124)	14,70	14,10
3	35,99	6,87 (118)	14,13	14,94
Опытная стержневая масса				
Начало работы	34,99	5,81 (100)	11,14	17,82
1	34,97	5,88 (101,2)	11,44	17,63
2	34,73	6,56 (113)	10,13	18,00
3	3495	5,87 (101,1)	10,73	18,10

Корректировка состава стержневой смеси изменила также и теплофизические свой-

ства стержней (теплопроводность, теплоемкость и линейное расширение). Проведенные исследования термических расширений стержней из опытной и серийной массы показали, что расширение опытных стержней на 10–12% меньше, чем расширение серийных стержней, а в диапазоне 1200–1300°C расширение стержня из опытной массы примерно равно расширению керамической формы. Это снижает возможность возникновения термических напряжений в стержне в процессе заливки формы сплавом и повышает геометрическую точность пера лопатки.

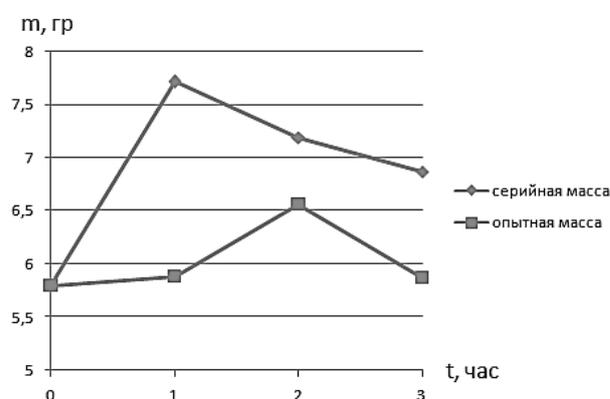


Рис. 3. Изменение крупной фракции в стержневой массе в зависимости от времени работы пресс-автомата

Особенность конструкции внутренней полости охлаждаемой лопатки такая, что стержень, оформляющий внутреннюю полость пера лопатки, имеет первоначальный прогиб, равный 0,6 мм в сторону корыта. Поэтому при возникновении сжимающих усилий в стержне он дополнительно прогибается, что приводит к утонению пера лопатки со стороны корыта. Прогиб стержня подтверждается результатами замера толщины пера лопаток – происходит утонение стенки со стороны корыта и утолщение со стороны спинки. Как показывают проведенные исследования температурного поля формы при заливке сплавом [1, 2], стержень прогревается на 250–300°C выше, чем форма, так как стержень омывается сплавом с двух сторон и имеет среднюю толщину в

² Значения выше 100% отражают процесс дополнительного оседания порошков крупной фракции в баке пресс-автомата

2–3 раза меньше, чем форма. Разность расширений между стержнем и формой приводит к возникновению сжимающих усилий, которые компенсируются зазором, создающимся между стержнем и формой в верхнем знаке стержня. Зазор получается путем наклеивания выгорающей пленки толщиной до 0,05 мм или нанесением на верхний знак тонкой пленки парафина или модельной массы. Такое высвобождение знака стержня не гарантирует полной компенсации разности расширения, так как стержень, как правило, имеет естественно закрученную форму, что при его нагреве приводит к дополнительному развороту и возможному защемлению его в знаковой части. Поэтому часть отливаемых лопаток имеет брак по утонению стенки пера лопатки со стороны корыта или отверстий в виде незаливов (рис. 4).



Рис. 4. Незалив пера лопатки со стороны корыта

Оценку качества стержней из опытной массы проводили в четырехместных блоках. Две отливки в блоке имели стержни из опытной массы, а другие две – из серийной. Такой эксперимент позволил оценить качество отливок с различными составами стержней, находящимися в одинаковых условиях.

Моделирование процесса заливки в ProCast показало, что заливка пера в четырех-

местном блоке проходит неравномерно и в некоторых лопатках отстает (рис. 5). Замедление заполнения пера в отдельных лопатках может быть причиной незалива части пера лопатки.

Анализ толщины пера лопаток, полученных с опытными и серийными стержнями, показывает, что утонение стенки больше допустимого (конструкторской документацией) наблюдается в 20% лопаток с серийными и 12% с опытными стержнями. Характер коробления стержней, полученных из серийной и из опытной массы – одинаковый, что позволяет найти однотипное решение по улучшению качества отливок.

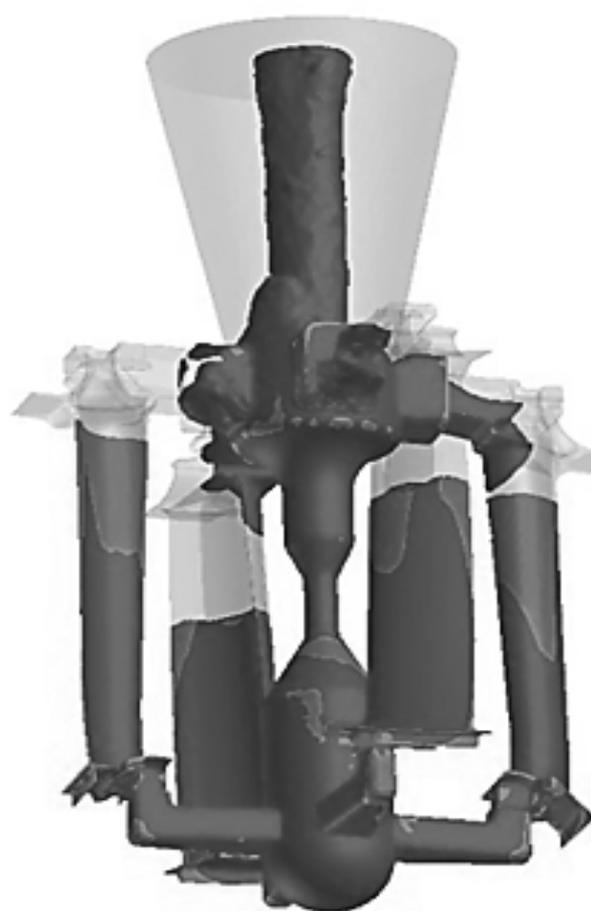


Рис. 5. Моделирование процесса заполнения пера лопатки в ProCast

Особенность естественно закрученного стержня, применяемого для оформления внутренней полости лопатки, заключается в том, что каждое сечение расположенное выше нижнего (корневого) смещено на заданный конструктором угол (рис. 6). При сжатии такого стержня происходит его до-

полнительное скручивание [3]. Возникающее в процессе заливки формы скручивание стержня приводит к его смещению и утонению стенки пера лопатки. Оценка практического разворота стержня в реальных отливках определялась измерением толщин стенок разрезанных лопаток в крайних точках контрольных сечений по перу лопатки, где $S1$ и $S2$ – толщина стенок по спинке, а $S'1$ и $S'2$ – толщина стенок по корыту (рис. 7).

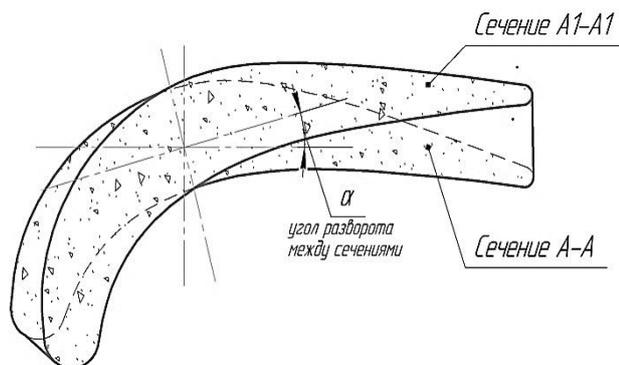


Рис. 6. Схема разворота естественно закрученного стержня, оформляющего внутреннюю полость отливки

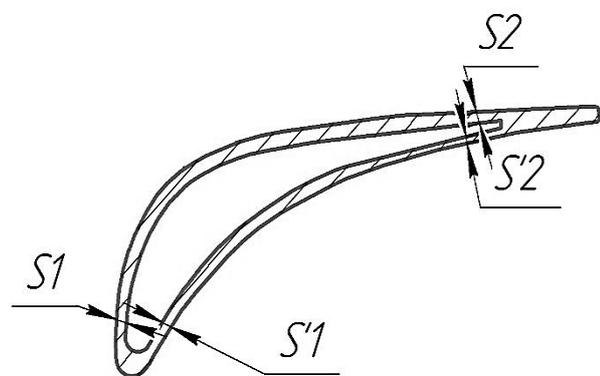


Рис. 7. Расположение дополнительных мест контроля стенок лопатки

Определение дополнительного разворота стержня в различных сечениях лопатки проводилось путем вычисления смещения положения оси стержня в отливке по входной кромке: $\Delta_{вх} = (S'1-S1)/2$, а смещение оси стержня по выходной кромке: $\Delta_{вых} = -(S2-S'1)/2$. Зная величину смещения оси и радиус вращения $R = 15$ мм, вычисляется дополнительный угол разворота стержня по входной и выходной кромке. Величина дополнительного разворота стержня колеблется от 20' до одного градуса, что дает сме-

щение стержня от 0,1 до 0,3 мм. Такое смещение стержня в отливке может привести к утонению стенки пера лопатки на величину больше допустимого, т.е. привести к браку.

Теоретические исследования разворота естественно закрученного стержня, выполненные на кафедре МиТЛП УГАТУ [1], позволяют рассчитать величину ожидаемого разворота стержня как в любом его сечении, так полного разворота в верхнем сечении при условии, что в нижнем сечении (знаке) стержень жестко закреплен. Полный угол разворота стержня определяется в момент заливки формы металлом, когда сплав еще не затвердел, а стержень и форма прогрелись жидким сплавом максимально. Как показывают экспериментальные исследования, стержень нагревается на 200–250°C выше, чем среднее значение формы. Большой нагрев стержня приводит к большему его расширению и развороту. Угол полного разворота стержня определяется по следующему уравнению:

$$\varphi_{пол} = \left\{ l_0 + \frac{2M_{кр} b}{3GJ_p} + \frac{\omega_n M_z}{GJ_p} \right\} \times \frac{1}{1 - \frac{P}{P_\phi} - \frac{3 \cdot M_z^2}{P_\omega P_\phi \omega_n^2 r^2 (1 - \frac{3P}{P_\omega})}} \quad (2)$$

где l_0 – величина угла разворота естественно закрученного стержня, заданная конструктором; $M_{кр}$ – критический момент инерции стержня; b – длина стержня; G – модуль сдвига; J_p – полярный момент инерции сечения стержня; P – действующая сила; P_ϕ – критическая сила потери устойчивости по Вагнеру; P_ω – критическая сила потери устойчивости по Эйлеру; ω_n – дополнительный прогиб стержня в результате сжатия; M_z – изгибающий момент, возникающий от неравномерного распределения температуры по высоте стержня и формы; r^2 – площадь сечения стержня в точке замера его разворота.

Составляющие формулы (2) вносят различный вклад в формирование полного разворота стержня в форме при заливке сплавом и последующей кристаллизации лопатки:

• l_0 – первоначальный, заданный конструктором, разворот стержня (в середине пера лопатки составляет 22°);

• $\frac{2M_{кр} b}{3GJ_p}$ – дополнительный разворот

стержня от перепада температуры по его высоте (равен $0,05^\circ$);

• $\frac{\omega_n M_z}{GJ_p}$ – дополнительный разворот

стержня в результате перепада температуры по его толщине (составляет $0,01^\circ$);

• $\frac{P}{P_\phi}$ – влияние разности расширения

стержня и формы на величину дополнительного разворота (составляет $0,19^\circ$);

• $\frac{3 \cdot M_z^2}{P_\phi P_\omega r^2 (1 - \frac{3P}{P_\omega})}$ – этим составляющим

можно пренебречь, так как его значение не превышает $0,001^\circ$.

Суммарный угол расчета дополнительного разворота стержня составляет $0,25^\circ$, что приводит к смещению стержня в середине пера лопатки примерно на $0,1$ мм. Расчет величины разворота стержня в верхнем знаке будет в два раза больше и составит порядка $0,2$ мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный расчет разворота естественно закрученного стержня, оформляющего внутреннюю полость отливки охлаждаемой лопатки, и проведенные замеры реальных толщин отливок пера лопатки в контролируемых сечениях показали, что стержень в процессе заливки дополнительно разворачивается и смещается на $0,1$ – $0,2$ мм. Применяемое высвобождение верхнего знака пленкой толщиной $0,035$ – $0,05$ мм не гарантирует полного высвобождения стержня, что и является причиной коробления некоторых стержней и выхода их на поверхность отливки. Основной причиной коробления стержня технологи считают его прогиб в результате разности расширения стержня и формы и не учитывают его дополнительный разворот. Решение задачи снижения короб-

ления стержня лежит в более совершенном высвобождении знаков стержня, позволяющем компенсировать прогиб и разворот его в процессе заливки и затвердевания отливки.

В целом предложенная опытная стержневая масса имеет ряд преимуществ: она более технологична при использовании ее в пресс-автоматах для получения стержней-сырцов, стержни из нее имеют меньший коэффициент термического расширения и лучше удаляются из отливки за счет содержания в них плавящего кварца. Отливки, полученные с применением стержней из опытной массы, имеют меньше отклонений по геометрии пера лопатки, чем отливки, полученные со стержнями из серийной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гайнцева Е. С.** Автоматизированная система технологической подготовки производства лопаток ГТД на базе экспертной системы: дисс. канд. техн. наук: Защ. 20.11.2013; Утв. 20.01.2014. Уфа: УГАТУ, 2013. 146 с. [E. S. Gaintseva, *Automated system of technological preparation of production of gas turbine blades on the basis of the expert system*, diss. cand. tech. sciences: prot. 20.11.2013; Approved. 20.04.2014, (in Russian). Ufa: UGATU, 2013.]
2. **Каблов Е. Н.** Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. М.: МИСИС, 2001. 632 с. [E. N. Kablov, *Molded blades of gas turbine engines. Alloys, technologies, coatings*, (in Russian). Moscow: MISIS, 2001.]
3. **Прочность. Устойчивость. Колебания:** Справочник. В 3 т. / под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. Т. 3. М.: Машиностроение, 1968. 463 с. [Strength. Stability. Oscillations: A Handbook. In 3 tons / ed. I. A. Birger, G. G. Panovko. Moscow: Machine-building, 1968.]

ОБ АВТОРАХ

ГОРЮХИН Александр Сергеевич, доц. каф. МиТЛП. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1965). Канд. техн. наук по литейному производству (МВТУ им. Баумана, 1979). Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиапроме.

ГАЙНЦЕВА Екатерина Сергеевна, доц. каф. МиТЛП. Дипл. инж. (УГАТУ, 2008). Канд. техн. наук по автоматизации и управлению (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. иск. интеллекта и технологии получения сложных отливок в авиапроме.

ДЕМЕНКО Олег Борисович, доц. каф. МиТЛП. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1992). Канд. техн. наук по литейному производству (УГТУ-УПИ, 1999). Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиапроме, материаловедения и синтеза сплавов.

ГАНЕЕВ Альмир Амирович профессор, проф. каф. МиТЛП. Дипл. инж.-металлург (УПИ им. Кирова, 1963). Доктор техн. наук по литейному производству (УГТУ-УПИ, 2001). Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиапроме, материаловедения и синтеза сплавов.

МАМЛЕЕВ Рафил Фаритович, доц. каф. МитЛП. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1970). Канд. техн. наук по литейному производству (МАТИ им. Циолковского, 1981). Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиапроме.

ХАЙРУЛЛИН Тимур Артурович, студ. каф. ВВТиС. Иссл. в обл. высокопроизводительных вычислительных технологий и систем.

METADATA

Title: Features of technology of production of the facilitated cooled blades of gas-turbine engines from heat-resistant alloys

Authors: A. S. Gorukhin¹, E. S. Gaintseva², O. B. Demenok³, A. A. Ganeev⁴, R. F. Mamleev⁵, T. A. Khairullin⁶

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹GorukhinAS@yandex.ru, ²Gaintsevae@yandex.ru, ³Dobor999@mail.ru, ⁴Almir.ganeew@yandex.ru, ⁵Rafilmamleev@gmail.com, ⁶Kmitlp@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 2 (80), pp. 3-9, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The problem of obtaining thin-walled cooled blades on modern automated equipment is considered. It is shown that in the transition to the manufacture of rods on the press machine there are defects that can be eliminated by changing the sedimentation properties of the refractory core mixture. The issues of improving the quality of cooled blades associated with a decrease in the reversal of the naturally twisted rod forming the inner cavity of the blade are considered.

Key words: cooling blade; ceramic rod; investment casting; sedimentation; precision casting.

About authors:

GORUKHIN, Alexandr Sergeevich, Associate professor, Dept. of Casting Engineering and Technology. Dipl. Engineer (UAI, 1965). Cand. of Tech. Sci. (MVTU Bauman, 1979).

GAYNTSEVA, Ekaterina Sergeevna, Associate professor, Dept. of Casting Engineering and Technology. Dipl. Engineer (UGATU, 2008). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2013).

DEMENOK, Oleg Borisovich, Associate professor, Dept. of Casting Engineering and Technology. Dipl. Engineer (UAI, 1992). Cand. of Tech. Sci. (UGTU-UPI, 1999).

GANEV, Almir Amirovich, Professor, Dept. of Casting Engineering and Technology. Dipl. Engineer (UPI, 1963). Dr. of Tech. Sci. (UGTU-UPI, 2001).

MAMLEEV, Rafil Faritovich, Associate professor, Dept. of Casting Engineering and Technology. Dipl. Engineer (UAI, 1970). Cand. of Tech. Sci. (МАТИ, 1981).

KHAIRULLIN, Timur Arturovich, Student, Dept. of High-performance Computing Technologies and Systems.