

УДК 621.74.011+621.74.019

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ЛОПАТОК В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© 2015 В. Г. Смелов, Р. А. Вдовин, А. В. Агаповичев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье проведён анализ результатов компьютерного моделирования технологического процесса литья турбинной лопатки 24.400.538-1, в том числе прогнозирования появления литейных дефектов. Проведены расчёты по моделированию напряжённо-деформированного состояния отливки в процессе кристаллизации и после выбивки отливки из формы, была проанализирована внутренняя структура отливки на предмет появления рыхлот и микропористости. Анализ результатов моделирования процесса образования зёрен в отливке позволил спрогнозировать размер и направления роста зёрен отливки при её кристаллизации. На основе проработки групповой технологии комплексного представителя наиболее нагруженной и наиболее сложной в изготовлении турбинной лопатки с учётом полученных результатов компьютерного моделирования технологического процесса литья выявлены и спрогнозированы локальные места появления литейных дефектов, учёт которых позволил снизить объём брака в среднем на 8%.

*Газотурбинный двигатель, заготовительное производство, отливка, литейные дефекты, лопатка, компьютерное моделирование, прогнозирование, кристаллизация, концентраторы напряжений.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-391-399

Проектирование технологического процесса (ТП) литья – сложная задача, требующая учёта влияния многих факторов, основными из которых являются: положение отливки в форме, проектирование литниково-питающей системы (ЛПС), наличие технологических уклонов с целью оптимального заполнения формы при заливке и направленной кристаллизации отливки без образования дефектов. Ошибки на этом этапе могут повлечь за собой в дальнейшем дополнительные затраты на изготовление новых модельных комплектов, производство первой тестовой партии отливок, увеличение времени проектирования технологии и выпуска готовой продукции. Это особенно актуально при производстве крупногабаритного литья (корпуса и опоры двигателя, редукторов, крестовины и пр.), так как затраты в этом случае возрастают многократно, а время на исправление дефектов или переплавку продукции удлиняет производственный цикл изготовления изделия [1].

В соответствии с перечнем номенклатуры изготавливаемых деталей за-

готовительного цеха предприятия ОАО «Кузнецов» и на основе глубокой проработки групповой технологии в качестве комплексного представителя была выбрана турбинная лопатка 24.400.538-1 как наиболее нагруженная и наиболее сложная в изготовлении. На её примере осуществлена разработка методов и средств формирования заданных параметров структуры и кристаллографической ориентации в заготовке, а именно: изучена структура образования зёрен, направление и рост зёрен внутри отливки [2].

На основании предложенной технологии получения отливок турбинной лопатки было осуществлено компьютерное моделирование технологии литья с целью выявления дефектов в заготовке и предложения комплекса мер по их устранению.

В процессе наблюдения за заливкой сплава в форму можно определить характер заполнения, оценить эффективность литниковой системы, определить области турбулентного течения, зоны с высокой скоростью потока, возможные места размыва формы или стержня, места образо-

вания воздушных карманов, которые могут повлиять на возникновение газовых включений в отливке.

На основании картины гидравлики заполнения формы (рис. 1) можно сказать, что была подобрана оптимальная первоначальная скорость заливки, так как уровень металла в литниковой чаше удерживается на постоянном уровне, его течение происходит без лишних всплесков и торможений.

Необходимо обратить внимание на характер заполнения металлом формы (рис. 2): в теле лопатки идёт разделение металла на два потока. При заливке на воздухе при подобной постановке возможно появление газовых пузырей и, как следствие, возникновение оксидных плёнок. В рассматриваемом случае, при заливке в вакууме, возможно прогнозировать появление неспаев [3].

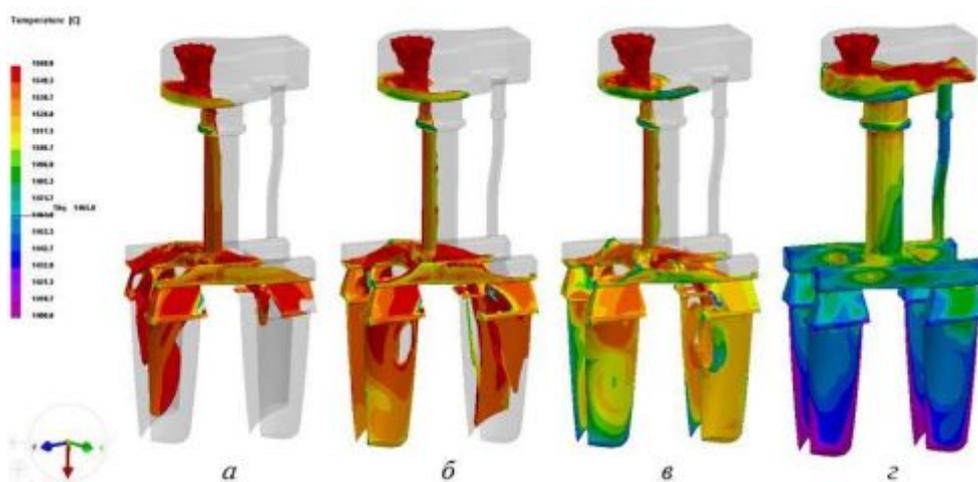


Рис. 1. Картина заполнения жидким металлом формы отливки: а – начальный момент заполнения, г – конечный момент заполнения

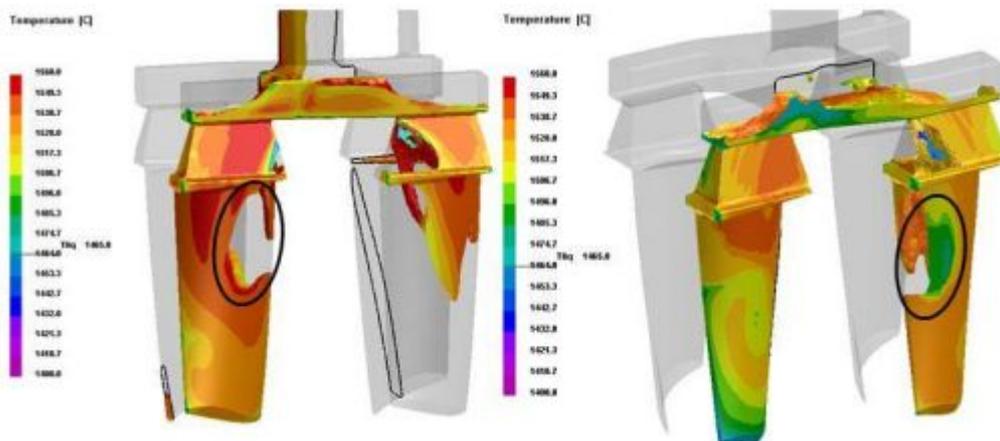


Рис. 2. Образование неспаев в процессе заливки

Процесс кристаллизации начинается с нижней части лопаток (рис. 3, а). Нижняя часть лопаток (самое тонкое место) закристаллизовалась сразу после заполнения. Затвердевание отливки происходит очень быстро, потому что все элементы отливки тонкостенные. Затвердевание от-

ливки произошло за 27,5 с, что свидетельствует о правильности выбранного времени заливки. Лопатки тонкие, затвердевают быстро. Таким образом, в области замков лопаток возникают тепловые узлы (рис. 3, б), где можно прогнозировать образование усадки и рыхлот.

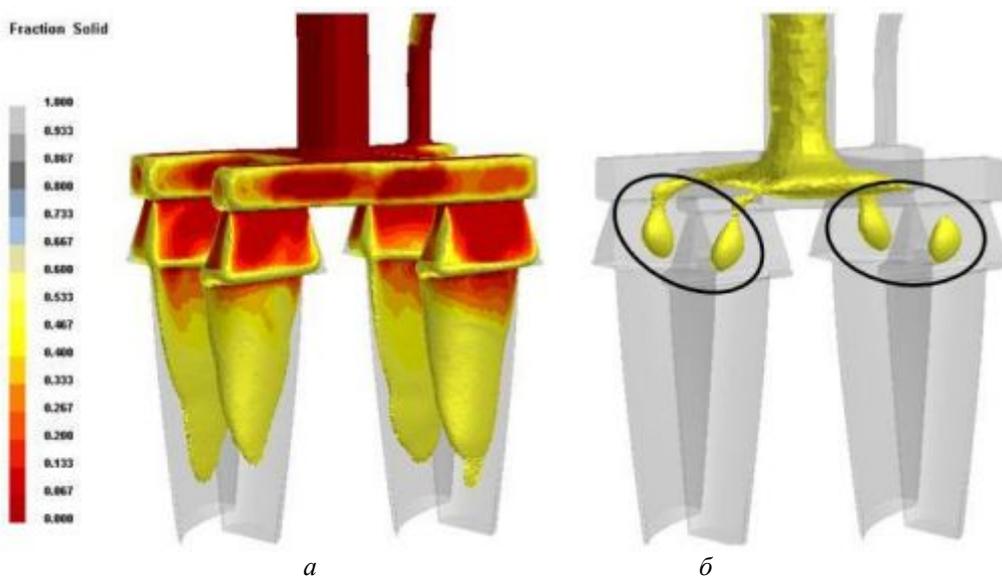


Рис. 3. Кристаллизация отливки турбинной лопатки:  
а – начальный момент; б – образование тепловых узлов

Кристаллизация центральной части пера лопаток происходит достаточно динамично. При подобном характере затвердевания может возникнуть мелкая рыхлота (макропористость), что связано с явлением объёмной кристаллизации. Перо лопатки затвердевает не совсем равномерно, возникают так называемые пики – продолговатый участок жидкого металла, что неблагоприятно сказывается на процессе кристаллизации. Такие зоны считают дефектами отливки.

Перейдём к анализу результатов моделирования напряжённо-деформированного состояния отливки. Рис. 4 показывает средние нормальные напряжения, ха-

рактеризующие поведение тензоров в единицу времени. Отрицательные напряжения – сжимающие, положительные – растягивающие.

В данной задаче наиболее опасными являются растягивающие напряжения, так как они могут привести к появлению холодных трещин. Основные напряжения в отливке сконцентрированы в районе питателей, а также областях нижней и верхней полок (рис. 5). Именно в этих областях происходила деформация отливки в результате образования объёмной усадки. Усадка имела затруднённый характер, так как форма препятствовала дальнейшему развитию усадки.

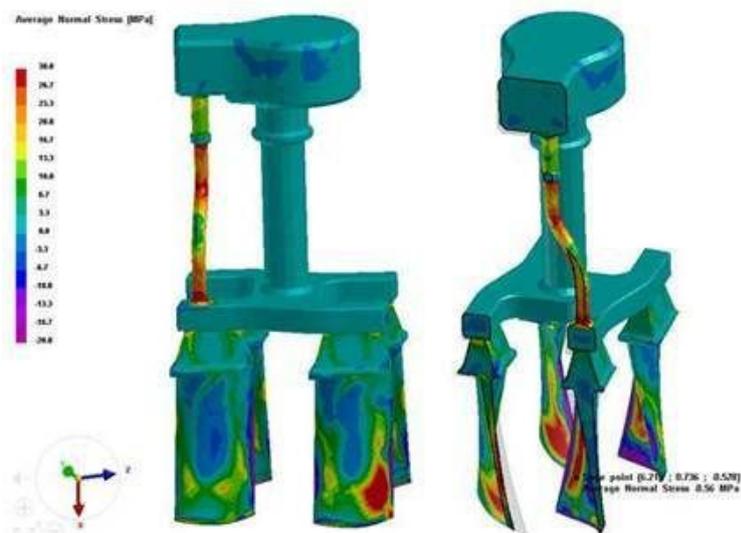


Рис. 4. Средние нормальные напряжения в отливке

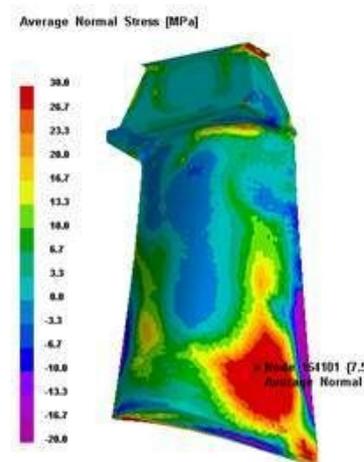


Рис. 5. Картина концентраторов напряжений в отливке

Рассмотрим напряжения в совокупности с деформацией отливки.

На рис. 6 показана геометрия отливки в исходном состоянии и после кристаллизации и деформации. Важно отметить, что максимальное отклонение геометрии соответствует именно тем областям, где наблюдался максимальный воз-

душный зазор – это элементы литниково-питающей системы. При наличии воздушного зазора отливка может отклоняться, не испытывая никаких затруднений. Чем больше величина воздушного зазора, тем большее отклонение можно прогнозировать.

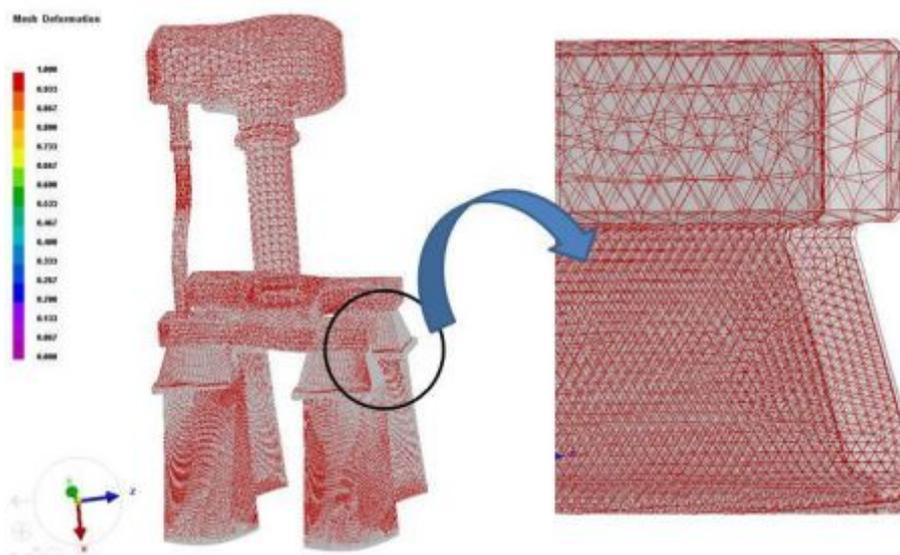


Рис. 6. Изменение геометрии отливки в процессе усадки

Критериальный параметр «Индикатор горячих трещин» (Hot Tearing Indicator) показывает те зоны, в которых возможно горячее растрескивание (рис. 7). Он оценивает, с одной стороны, затвердевание отливки, а с другой стороны – деформацию. В рассматриваемом случае основные места сконцентрированы в питателях и в районе замка отливки лопаток. Этот параметр можно использовать для предварительной оценки возможных мест образования горячих трещин. Однако по этому параметру нельзя определить, какое значение является критическим [4].

Параметр «Индикатор холодных трещин» (Cracking) оценивает ряд факторов: напряжения, которые получили в отливке; зоны пластической деформации в отливке, а также зоны образования пористости в отливке. На рис. 8 выделены зоны, в которых прогнозируется усадочная пористость, где изменяются механические характеристики. Также в этих зонах про-

гнозируется образование концентраторов напряжений.

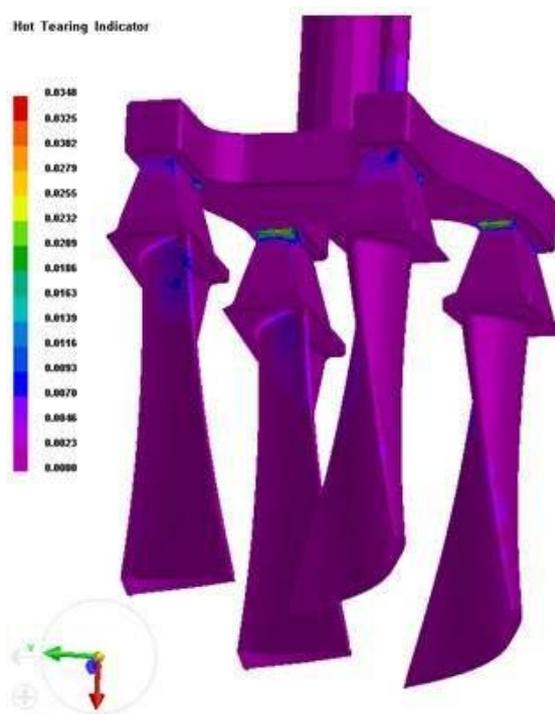


Рис. 7. Индикатор горячих трещин

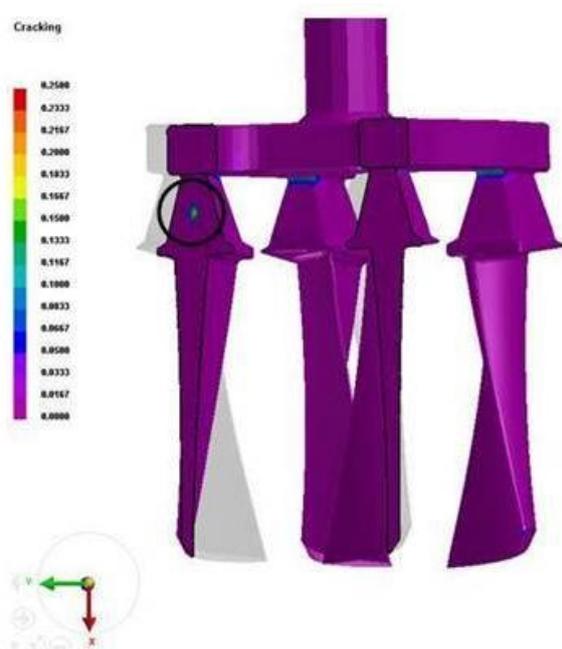


Рис. 8. Индикатор холодных трещин (места образования пористости в отливке)

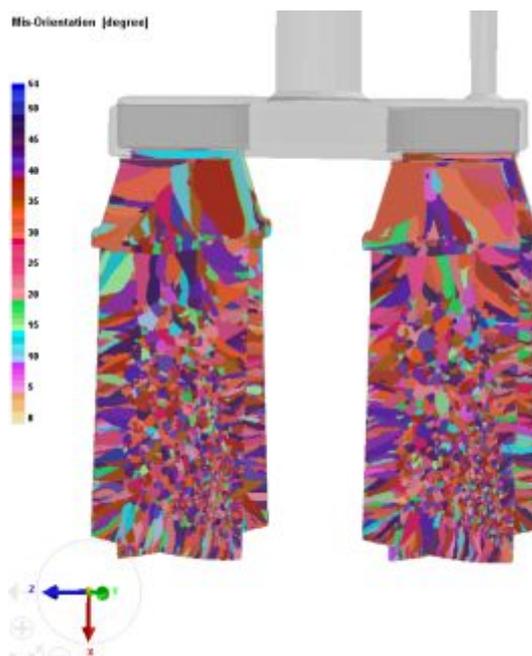


Рис. 9. Структура зерна турбинной лопатки

Проведём анализ моделирования микроструктуры в отливке. В процессе моделирования использовался модуль САФÉ (модуль расчёт микроструктуры). Модуль применяется для моделирования отливок ответственного назначения, к которым предъявляются требования по структуре зерна отливок. САФÉ модуль прогнозирует размер и направления роста зёрен отливки при её кристаллизации.

Отображение идёт по сетке клеточных автоматов (рис. 9). В итоге получается столбчатая структура с центром роста зерна в области замка лопатки.

Направление роста зёрен сверху вниз соответствует направлению заливки. Однако картина рентгеноконтроля свидетельствует о слишком большой скорости опускания залитой отливки, так как скорость зарождения зёрен неодинакова в различных сечениях отливки. По центру тела лопатки можно наблюдать появление равноосных зёрен. Цветовая шкала позволяет определить структуру направления роста зерна, т.е. можно поставить в соответствие направление одной из трёх осей (x, y или z) росту конкретно зерна – для визуальной оценки структуры.

Существует несколько вариантов просмотра роста зёрен: на поверхности и внутри отливки (рис. 10).



Рис. 10. Направление роста зёрен внутри отливки

Параметр Nucleation показывает центр кристаллизации, т.е. области, с которых начинается рост зёрен (рис. 11).

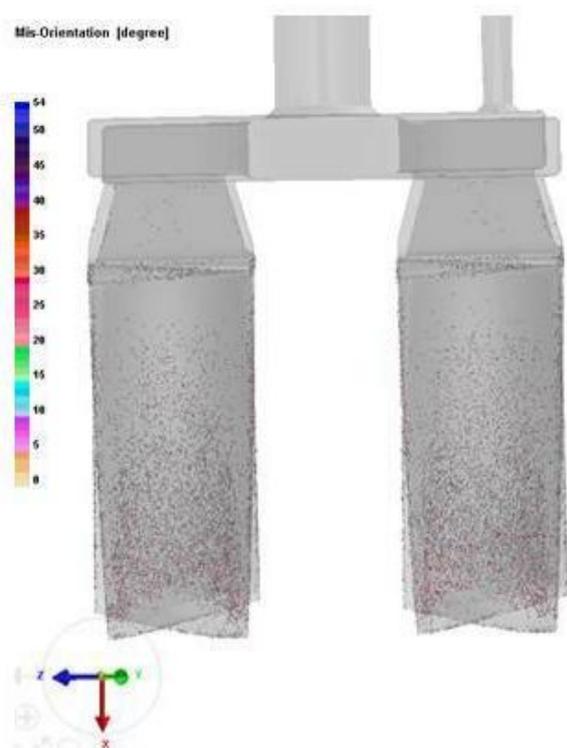


Рис. 11. Направление центров роста зёрен

Из рис. 11 видно, что много центров кристаллизации расположено по кромкам лопаток, а также в середине тела лопатки, что благоприятно отражается на формировании микроструктуры лопаток.

Параметр переохлаждения металла (Undercooling) показывает зоны (рис. 12), где было максимальное и минимальное переохлаждение металла. Подобная информация может дать представление о тех зонах, где в первую очередь начинается зарождение кристаллов.

Из картины рентгеноконтроля, представленной на рис. 12, видно, что максимальное переохлаждение соответствует кромкам и средней части пера лопаток.

На рис. 13 показан анализ микроструктуры отливки при компьютерном моделировании и в реальной отливке. Оба результата показали схожую картину, что свидетельствует об адекватности применяемого программного обеспечения.

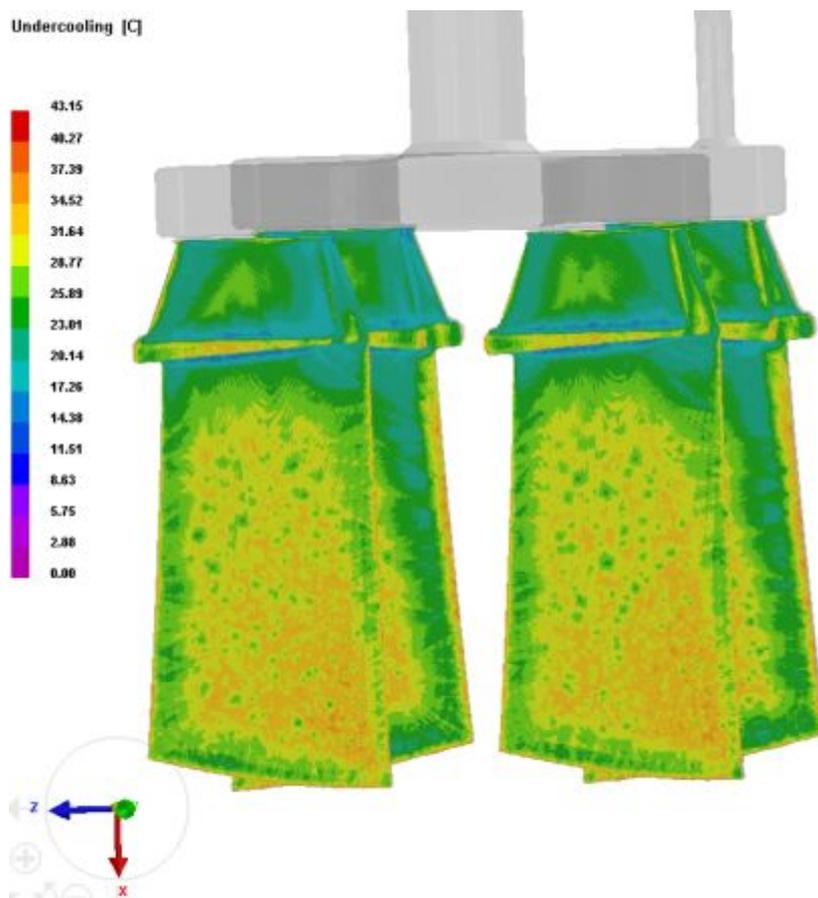


Рис. 12. Картина переохлаждения отливки лопатки

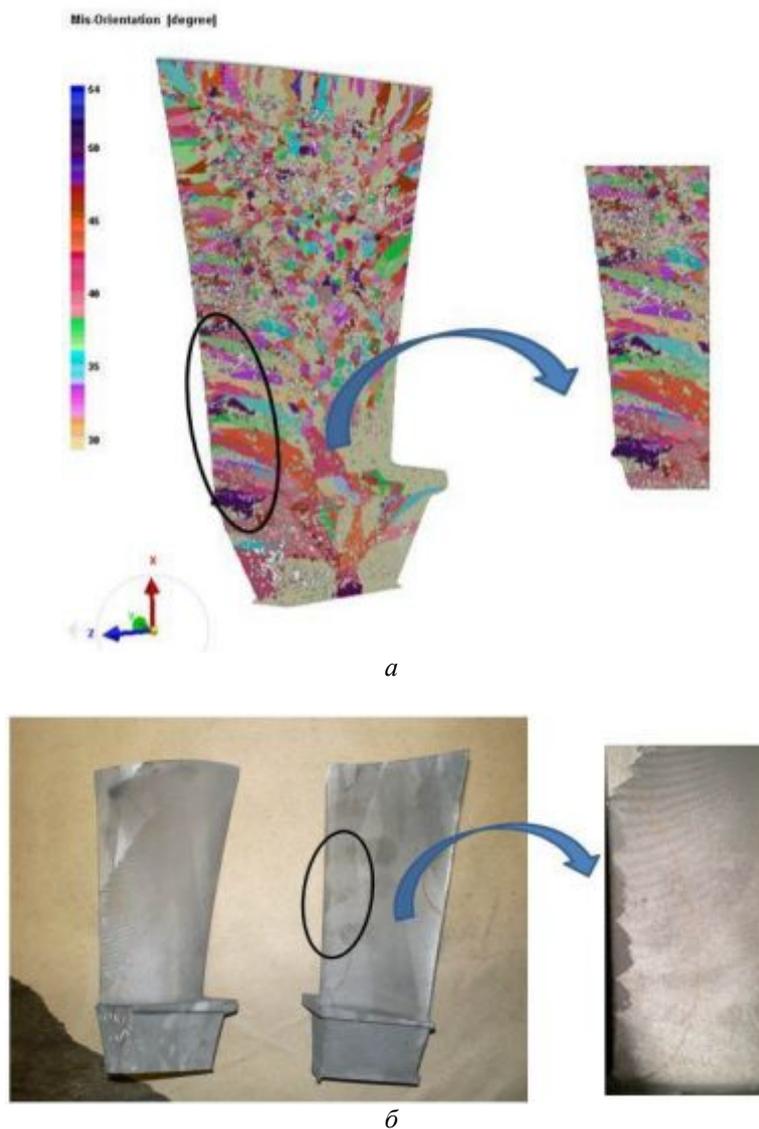


Рис. 13. Проверка адекватности компьютерного моделирования:  
 а – результаты микроструктуры при компьютерном моделировании;  
 б – результаты микроструктуры отливки

Таким образом, компьютерный анализ ТП литья турбинной лопатки 24.400.538-1 позволил лучше понять механизм получения отливки, структуру и причины образования литейных дефектов. В качестве оптимизации ТП литья лопатки целесообразно предложить немного видоизменить конструкцию ЛПС – сделать принудительный стояк с подводом металла снизу, что позволит избежать неспаев, образования тепловых узлов и рыхлот в районе нижней кромки и достичь более равномерного заполнения пера лопатки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г. (шифр темы 2013-218-04-4777). Исследования, представленные в работе, были проведены на оборудовании ЦКП САМ-технологий (RFMEF I59314X0003). Эта работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

### Библиографический список

1. Балякин А.В., Смелов В.Г., Чемпинский Л.А. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3(34), часть 2. С. 47-52.
2. Вдовин Р.А., Смелов В.Г. Совершенствование технологического процесса многономенклатурного производства // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 6(3). С. 612-619.
3. Smelov V.G., Vdovin R.A., Golanov S.P. Analysis of results of computer simulation of the casting process // Applied Mechanics and Materials. 2015. V. 770. P. 223-228. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.770.223
4. Vdovin R.A., Smelov V.G. Elaboration of a casting defects prediction technique via use of computer-aided design systems // International Journal of Engineering and Technology. 2014. V. 6, Issue 5. P. 2269-2275.

### Информация об авторах

**Смелов Виталий Геннадиевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru). Область научных интересов: использование CAD/CAM/CAPP систем при подготовке специалистов.

**Вдовин Роман Александрович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный ис-

следовательский университет). E-mail: [vdovin.ssau@gmail.com](mailto:vdovin.ssau@gmail.com). Область научных интересов: виртуальное CAD/CAE компьютерное моделирование технологических процессов литья.

**Агаповичев Антон Васильевич**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru). Область научных интересов: использование CAD / CAM / CAE / CAPP систем в опытных и аддитивных технологиях.

## APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION SYSTEMS FOR THE RESEARCH OF THE BLADE CASTING PROCESS IN BLANK PRODUCTION

© 2015 R. A. Vdovin, V. G. Smelov, A. V. Agapovichev

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The article focuses on the analysis of the results of computer simulation of the process of casting the turbine blade 24.400.538-1, including prediction of occurrence of casting defects. Engineering calculations have been carried out to model the stress-strain state of the casting during solidification and after the knockout of the casting from the mold. The internal structure of the casting was analyzed for the presence of microporosity. The analysis of the results of modeling the process of grain formation in the casting made it possible to predict the size and direction of grain growth in the casting during its crystallization. Thus, on the basis of in-depth research of the group technology of a complex representative of the most loaded turbine blade and the one most difficult to produce local places of occurrence of casting defects were identified and predicted taking into account the obtained results of simulating the casting process. This made it possible to reduce the amount of defects at the stage of actual production by 8% on the average.

*Gas turbine engine, blank production, casting, casting defects, blade, computer simulation, forecasting, crystallization, stress concentrators.*

### References

1. Balyakin, A.V., Smelov V.G., Chempinsky L.A. Additive technology application details of combustion. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 3(34), part 2. P. 47-52. (In Russ.)
2. Vdovin R.A., Smelov V.G. Multiproduct manufacture process improvement. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2013. V. 15, no 6(3). P. 612-619. (In Russ.)
3. Smelov V.G., Vdovin R.A., Golanov S.P. Analysis of results of computer simulation of the casting process. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. V. 770. P. 223-228. doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.770.223
4. Vdovin R.A., Smelov V.G. Elaboration of a casting defects prediction technique via use of computer-aided design systems. *International Journal of Engineering and Technology*. V. 6, Iss. 5. P. 2269-2275.

### About the authors

**Smelov Vitaliy Gennadievich**, Candidate of Science (Engineering), associate professor of Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru). Area of Research: using CAD / CAM / CAPP systems for training engineers.

**Vdovin Roman Alexandrovich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [vdovin.ssau@gmail.com](mailto:vdovin.ssau@gmail.com). Area of

Research: virtual reality CAD/CAE computer modeling of the processes of aerospace component casting.

**Agapovichev Anton Vasilievich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru). Area of Research: the use of CAD / CAM / CAE / CAPP systems in pre-production and additive technologies used in the manufacture of parts.