

УДК 539.3: 621.74: 621.436

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТЛИВОК КОЛЕС ТУРБИН ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ДЛЯ НАДДУВА ДВС НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИХ ВОСКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

О.В. Акимов

*Кафедра литейного производства
Национального технического университета
«Харьковский политехнический институт»
Ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, УКРАИНА*

Приведено решение задачи затвердевания и упругого деформирования восковой модели колеса турбины ТКР-8,5ТВ, которые могут служить основой для совершенствования технологического процесса изготовления колес турбин, а также других отливок со сложной геометрией по выплавляемым моделям. Решена задача нахождения такой исходной формы литейной формы – которая с учетом последующего деформирования обеспечит точно требуемый профиль. Полученные результаты достаточно точно согласуются с практическими данными измерений реальных отливок.

1. Введение.

Турбокомпрессоры (ТКР), утилизирующие остаточную энергию выхлопных газов дизелей, фактически превратились из элемента форсирования в традиционный узел дизеля, позволяющий достичь наилучших показателей удельной топливной экономичности, во многом определяющий его конкурентоспособность. Новые конструкции украинских турбокомпрессоров серии «ТВ» (ТКР-7.5ТВ, ТКР-8.5ТВ и их модификации) для дизелей сельскохозяйственных и транспортных машин по своим конструктивным характеристикам не уступают лучшим зарубежным аналогам. Однако на стадии серийного производства тех же турбокомпрессоров серии «ТВ» возможно некоторое снижение их конечного качества по сравнению с опытными образцами из-за различных технологических погрешностей, в первую очередь погрешностей в геометрии профилей лопаток компрессоров и, особенно, турбин.

В работах [1] и [2] для серийной технологии изготовления рабочих колес турбин (методом литья по выплавляемым моделям) был проведен анализ технологических этапов на предмет возникновения погрешности формообразования, в том числе статистическая оценка погрешностей, вносимых на каждом этапе изготовления с выделением случайной и закономерной составляющих, а также анализ факторов, определяющих закономерные и случайные изменения геометрических размеров. Было показано, что, случайные погрешности геометрии лопаток турбоколеса (особенно отклонения поля толщин) вызывают разночастотность лопаток, что может привести к динамической перегрузке резонансных колебаний лопаточного колеса турбины [2]. Закономерная же составляющая погрешности формообразования профиля, выражающаяся в уменьшении угла выходного потока (β) и площади горлового сечения канала $\Gamma(d)$ (рис.1), может приводить к снижению КПД колеса на 2...4%. При этом в качестве основного источника погрешностей систематического характера выделен

третий этап—изготовление восковой модели колеса [1]. Вносимые погрешности предположительно связывались с усадкой восковой модели и пространственным деформированием восковки рабочих колес ввиду неравномерного отвода тепла от лопаток и ступицы. Ключевое значение имеет низкий уровень теплопроводности восковой модели по сравнению с металлической отливкой, технологически определенная высокая скорость охлаждения восковки, низкий модуль упругости воска.

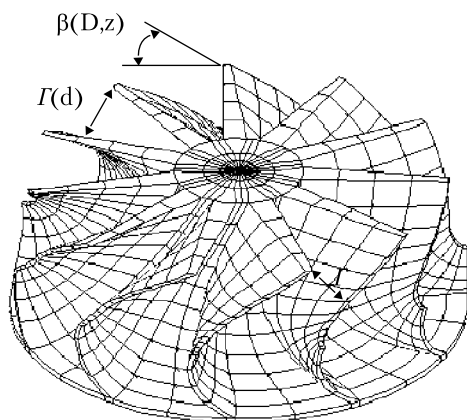


Рисунок 1. Контролируемые параметры геометрии «восковки» турбины ТКР-ТВ:
 $\Gamma(d)$ — «горловое сечение» канала;
 $\beta(D,z)$ — угол наклона лопатки на выходе.

В настоящей работе была поставлена *цель* проанализировать для серийно изготавливаемого колеса турбины ТКР-8,5ТВ процесс деформирования восковки, предварительно определив распределение температурного поля в восковке после ее затвердевания.

2. Постановка задачи.

Для достижения указанной цели последовательно решались две задачи:

1. Затвердевание восковой модели от 56°K в течение 1,5 минут в форме;
2. Термоупругое деформирование в момент выравнивания температур до 20°С из-за последующего погружения восковой модели в воду.

Для упрощения задач вводились следующие предположения, на этапе 1:

- ротация тепла между геометрическими элементами циклической симметрии (секторами, включающими один лопатку и соответствующий сектор ступицы с углом $360^\circ/N$) не учитывалась, т.е. границы секторов, образованные эквидистантными поверхностями между лопатками, теплоизолировались;
- сектор восковки рассматривался без литейной формы; коэффициент конвективного теплообмена на внутренних поверхностях принимался на 20% ниже чем для внешних;
- использовались линейные зависимости для энтальпии и удельной теплоемкости от температуры.

На этапе 2:

- в момент извлечения из формы восковая модель считалась ненапряженной, но имеющей неравномерное температурное поле;

- задача деформирования восковой модели (аморфного материала) вследствие воздействия неравномерного температурного поля решалась в упругой постановке; не учитывалась последующая релаксация остаточных напряжений.

Для решения задачи была получена пространственная конечноэлементная (КЭ) модель восковки, включающая 17900 узлов и около 84000 конечных элементов тетраэдральной формы (Рис. 2).

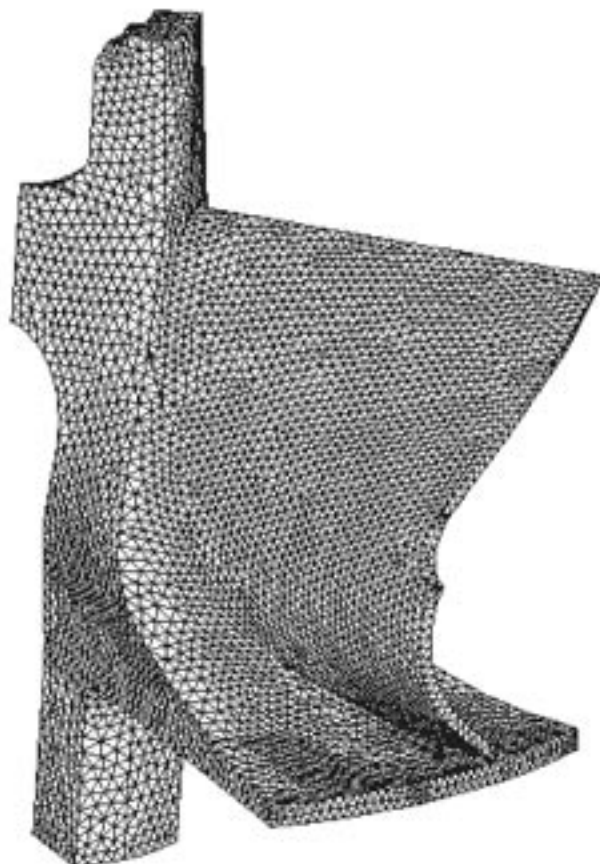


Рисунок 2. Конечноэлементная модель сектора восковки турбины

Для решения температурной задачи использовались известные матричные соотношения (для КЭ):

$$[C_e^t] \cdot \{T_e\} + [K_e^{tc}] \cdot \{T_e\} = \{Q_e^c\} \quad (1)$$

где:

$[C_e^t]$ — матрица удельной теплоемкости,

$[K_e^{tc}]$ — матрица конвективного теплообмена

$\{Q_e^c\}$ — вектор конвективного теплового потока на поверхности элемента.

Решение задачи термоупругости $\bar{\sigma} = D(\bar{\epsilon} - \delta \bar{T})$ (δ — коэффициент теплового расширения) в стандартной матричной форме (2). Проводилось с использованием циклической симметрии восковки турбины [3].

$$K\bar{Y} = \bar{F}_0, \quad (2)$$

где K — матрица упругости, \bar{F} — вектор тепловых нагрузок, \bar{Y} — обобщенный вектор термоупругих пере-

мещений. Физические характеристики материала принимались следующие: плотность – 922 кг/м³, модуль упругости – 1.0·10⁷ Н/м², коэффициент Пуассона – 0.25, коэффициент теплового расширения – 0.3·10⁻⁵, коэффициент теплопроводности – 0.267 Дж/(м·с·град), энтальпия – от 0 (при 0°K) до 0.1149·10¹⁰ Дж/м³ (при 383°K) линейно, удельная теплоемкость – от 3000 (при 293°K) до 3400 Дж/(кг·град) (при 383°K) линейно, коэффициент конвективного теплообмена для внешних поверхностей – 15 Дж/(с·м²·град).

3. Анализ результатов расчетов.

На рис. 3 представлено распределение температур $T(x,y,z)$, °K в рассматриваемом секторе восковой модели турбины через 90 секунд остывания в форме. Видно, что скорость конвективного теплообмена на внешних поверхностях качественно выше скорости процессов теплопроводности по восковке. В результате во внутренней части ступицы находится зона максимальных температур, остывшая лишь на несколько градусов (самая горячая точка остыла на 1°С), в то время как большая часть лопатки лишь на несколько градусов отличается от внешней среды – 20°С (самая холодная точка – 22°С).

Такое неравномерное поле температур (рис.3) приводит к возникновению остаточных напряжений (рис.4), которые, с учетом низкого значения модуля упругости, соизмеримы с усадочными деформациями.

На рис.5 (А,Б,В) показаны несколько видов деформированного сектора восковой модели колеса турбины ТКР-8,5ТВ вследствие усадки и действия остаточных напряжений при застывании. В качестве граничных условий были приняты условия заземления для узлов КЭ модели, расположенных в граничной торцевой плоскости вала. Исходное состояние восковой модели изображено в виде каркасной модели, деформированное – в виде КЭ модели. На рис. 5Г показаны узлы лопатки КЭ модели восковки на выходе турбины до (А,В,С,Д) и после (А',В',С',Д') усадки. В табл.1 представлены их координаты, а в табл.2 их приращения после деформирования.

Таблица 1

Узел		Координаты, м·10 ⁻³		
т.	N узла	X	Y	Z
A	2937	21,018	28,000	34,032
B	3067	20,472	27,746	34,342
C	4909	20,582	27,662	34,267
D	2938	20,652	28,000	33,438

Таблица 2

Узел		Приращение координат, м*10 ⁻⁴		
т.	узел	ΔX	ΔY	ΔZ
A'	2937	.18687	.41435	.22241
B'	3067	.18213	.41179	.22510
C'	4909	.18314	.41111	.22440
D'	2938	.18361	.41441	.21716

Расчет изменения угла наклона срединной поверхности лопатки на внешнем выходном диаметре по точкам А', В', С' (Табл. 2) показал его уменьшение на

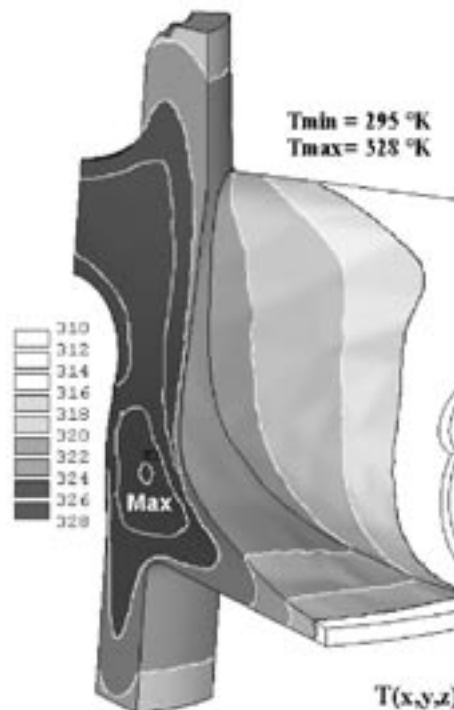


Рисунок 3. Поле температур $T(x,y,z)$, °K в секторе восковой модели турбины через 90 с остывания.

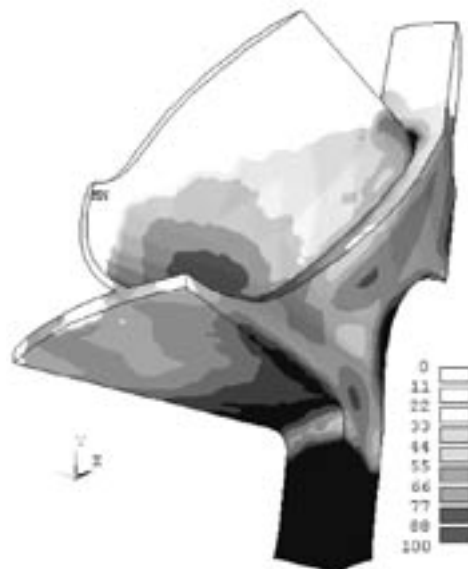


Рисунок 4. Поле интенсивности остаточных температурных напряжений в секторе восковой модели

4,2 град., что достаточно точно согласуется с измерениями реальных отливок (см. [1]).

На втором этапе была поставлена и решена «обратная задача» – нахождения такой исходной формы восковки (литейной формы), которая с учетом последующего деформирования обеспечит точно требуемый профиль. Для этого на восковую модель с требуемым профилем лопатки наложили действие «обратного температурного поля», полученного вычитанием начальных температур из конечных. Результат представлен на рис. 6 (каркасная модель – исходная, КЭ модель – конечная).

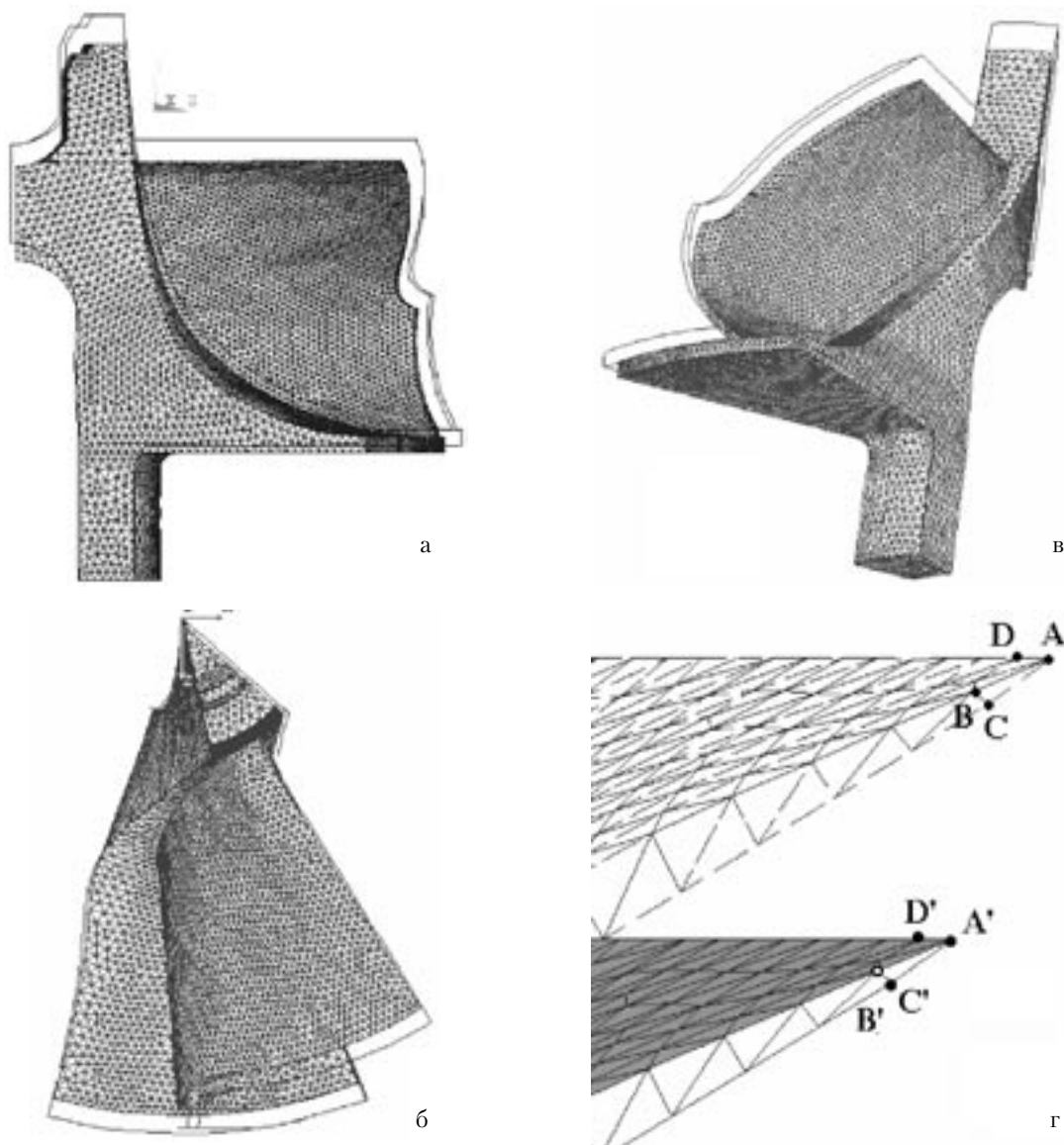


Рисунок 5. Деформирование сектора восковой модели колеса турбины ТКР-8,5ТВ вследствие усадки и действия остаточных напряжений при застывании.

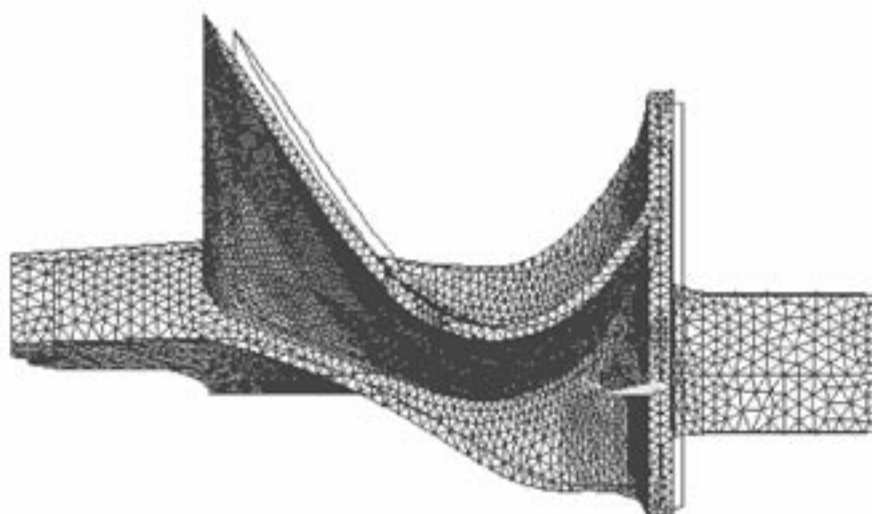


Рисунок 6. Результат решения «обратной задачи» — изменения геометрии мастер-формы с целью получения точной геометрии восковой модели с учетом её деформирования.

4. Выводы.

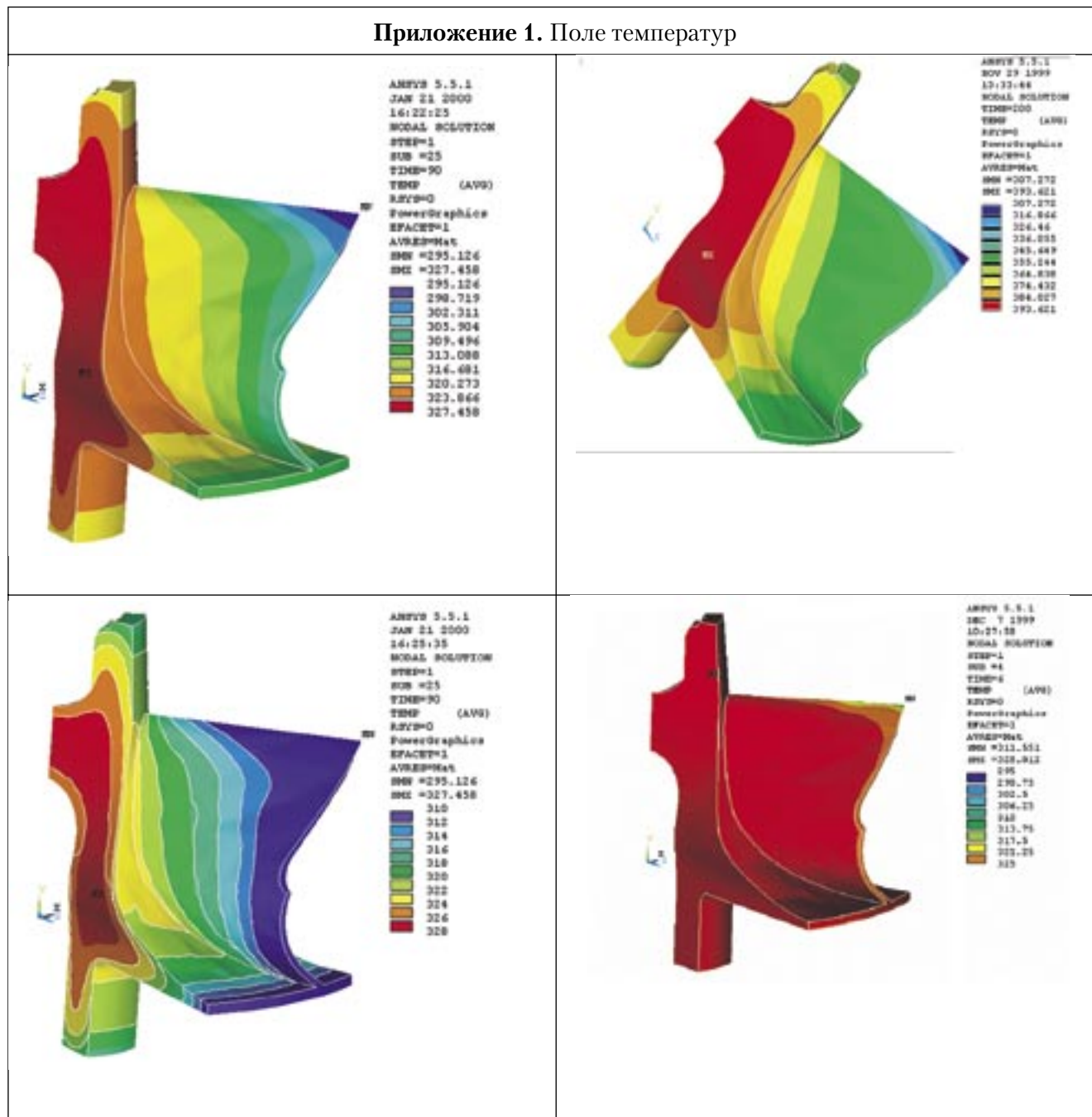
Литейная технология изготовления колес турбин и компрессоров, обладая несомненными достоинствами (низкой себестоимостью и высокой производительностью), требует учета и моделирования вносимых ошибок формообразования закономерного характера на стадии формирования фазового перехода и охлаждения восковой модели.

Рассмотренные решения задач затвердевания и упруго деформирования восковой модели колеса турбины ТКР-8,5ТВ могут служить основой для совершенствования технологического процесса изготовления колес турбин, а также других отливок со сложной геометрией по выплавляемым моделям.

Так для уменьшения погрешностей формообразования можно рекомендовать:

- выравнивание температурного поля при застывания восковки (введение охлаждения ступицы, увеличение времени процесса);
- стабилизацию технологических параметров и предварительный учет термдеформаций и усадки при изготовлении мастер-формы каналов – вытеснителей;
- улучшение литейных характеристик воскового состава, снятие остаточных термонапряжений;
- переход на новые технологии (например, пластмассовые модели).

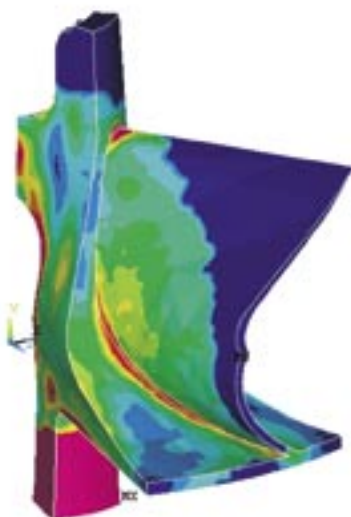
Приложение 1. Поле температур



Приложение 2. Поле интенсивности остаточных температурных напряжений

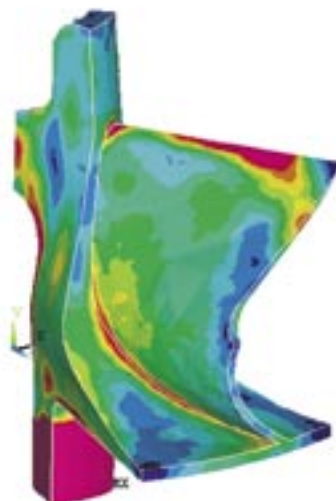
Прямая задача

Обратная задача



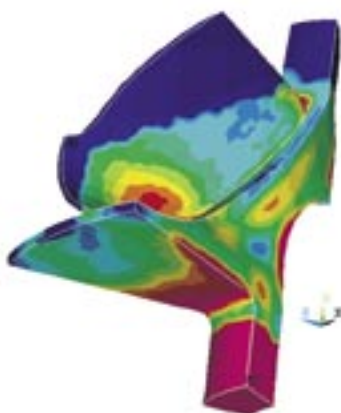
ANSYS 5.5.1
 JAN 21 2000
 19:29:55
 MODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 EINT (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Max
 SMX =.544E-04
 SMN =-21883

0
11.111
22.222
33.333
44.444
55.556
66.667
77.778
88.889
100



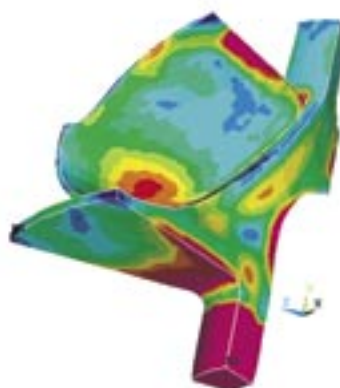
ANSYS 5.5.1
 JAN 21 2000
 18:32:04
 MODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 EINT (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Max
 SMX =.544E-04
 SMN =-2.119

0
11.111
22.222
33.333
44.444
55.556
66.667
77.778
88.889
100



ANSYS 5.5.1
 JAN 21 2000
 19:46:40
 MODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 EINT (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Max
 SMX =.544E-04
 SMN =-11883

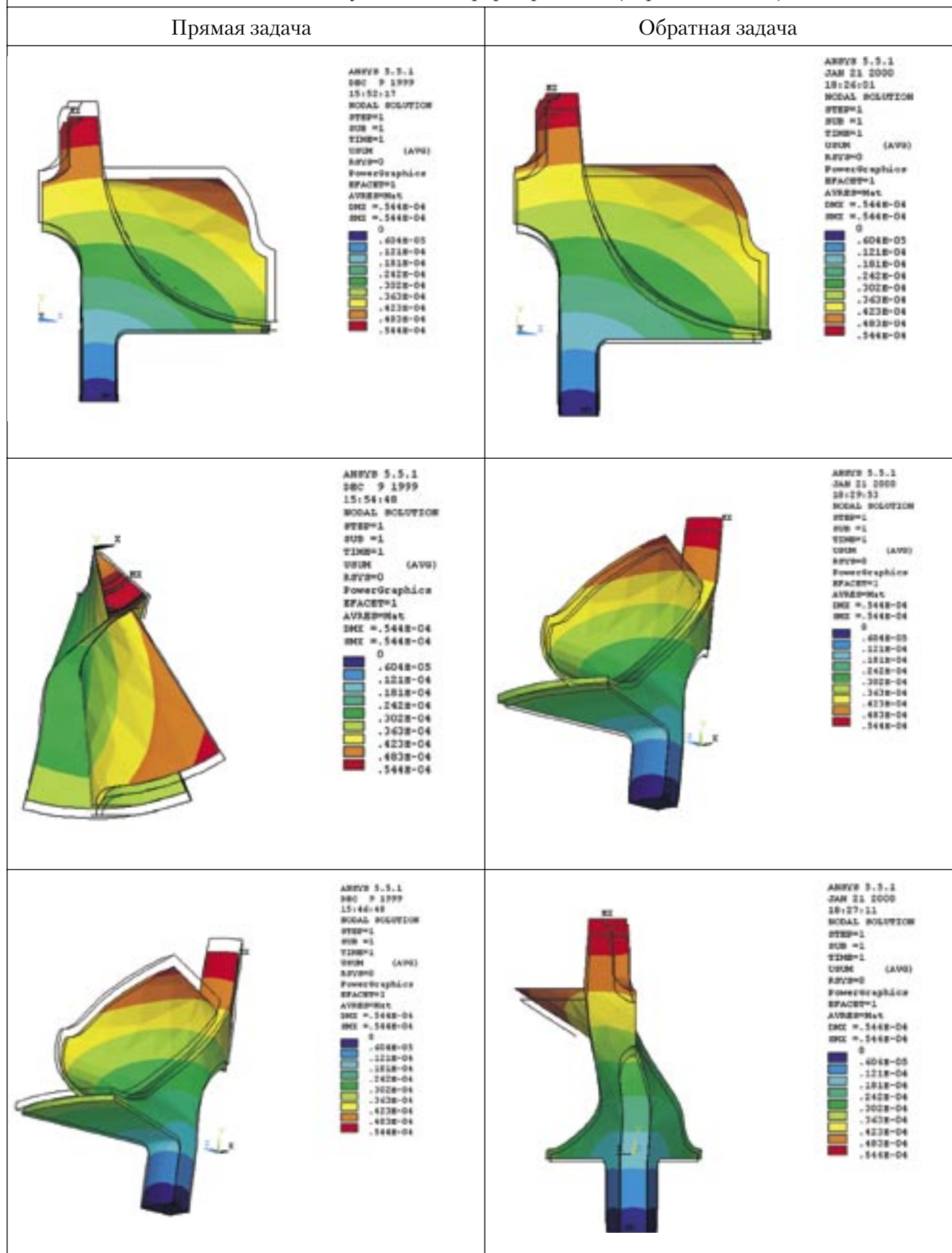
0
11.111
22.222
33.333
44.444
55.556
66.667
77.778
88.889
100

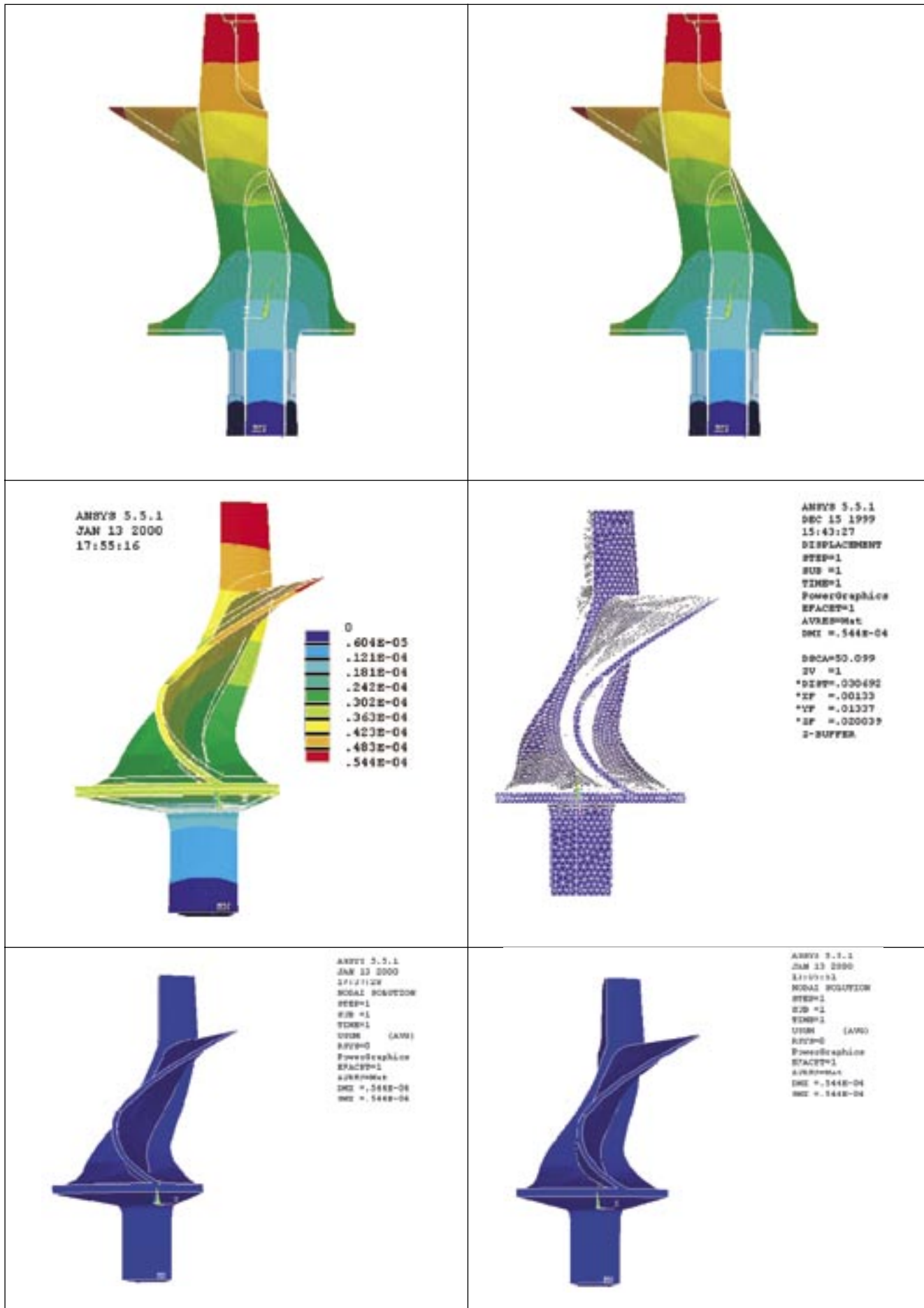


ANSYS 5.5.1
 JAN 21 2000
 18:44:34
 MODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 EINT (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Max
 SMX =.544E-04
 SMN =-2.119

0
11.111
22.222
33.333
44.444
55.556
66.667
77.778
88.889
100

Приложение 3. Деформирование вследствие усадки и остаточных температурных напряжений (прямая задача) и изменение геометрии мастер-формы с целью получения точной геометрии восковой модели с учетом её деформирования (обратная задача).







Акимов Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Литейного производства Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»

Круг научных интересов: Системы управления качеством отливок, разработка и внедрение компьютерных и кибернетических методов управления технологиями литейного производства, управление качеством на этапе проектирования технологии производства сложного фасонного литья.

Литература

1. Акимов О.В., Петросянц В.А., Солошенко В.А. Проблемы обеспечения качества отливок малоразмерных колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС. (Часть 1. Рабочие характеристики.) // Вестник ХГПУ. Сер. «Новые решения в современных технологиях». – 1999. – №30. – с.48-51.
2. Акимов О.В., Петросянц В.А., Солошенко В.А. Проблемы обеспечения качества отливок малоразмерных колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС. (Часть 2. Прочностные характеристики) // Вестник ХГПУ. – 1999. – №46. – с.46-50.
3. Кириллова Н.А. Расчет и анализ чувствительности в оптимальном проектировании циклически симметричных конструкций : Автореф. дис.... канд. техн. наук. -Х.: Харьков, 1992. -17с.

РЕФЕРАТИВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОТВЕТСТВЕННЫХ ОТЛИВОК СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Цикл исследований посвящен проблеме обеспечения качества ответственных отливок сложной геометрической формы в рамках «системного подхода». Исследования проведены для отливок «Блок-картер рядного четырехцилиндрового сельскохозяйственного дизеля СМД-18» и «Малоразмерное колесо турбины турбокомпрессора для наддува ДВС» в следующих аспектах:

- Анализ статического нагружения отливки блок-картера и моделирование несущей способности отливки [1-2]
- Анализ собственных колебаний [3]

- Моделирование фазового перехода и остывания отливки блок-картера [4]
- Физико-химические свойства расплава отливки [5]
- Размерно-геометрический анализ отливок и стабилизация геометрических параметров [6]
- Моделирование рабочих и прочностных характеристик колеса турбины турбокомпрессора для наддува ДВС [7-8]
- Система управления качеством отливок в структуре автоматизации предприятия [9]

Литература

1. О.В. Акимов, В.А. Солошенко. Анализ статического нагружения блок-картера дизеля «СМД-18» // Вісник Харківського державного політехнічного університету. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - №100. - с. 3-6
2. Акимов О.В., Ткаченко Г.В., Ребик А.А., Пелых С.Г. Моделирование несущей способности отливки // Литейное производство. - 1991. - №10. - с.5-6
3. Акимов О.В., Анацкий Ю.П., Солошенко В.А. Анализ собственных колебаний отливки блок-картера дизеля «СМД» // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - №66. - с. 40-47
4. Акимов О.В. Компьютерное моделирование фазового перехода и остывания блок-картера двигателя «СМД» // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - №75. - с. 65-73
5. Акимов О.В., Баронин Б.И., Головня А.Б., Хайме Чавес. Влияние фактора времени на эффект модифицирования чугуна в ковше // Вестник Харьковского политехнического института - Харьков: ХПИ. - 1988. - №261. - с. 67-68
6. Акимов О.В., Гудзенко А.А. Применение ЭВМ для размерно-геометрического анализа отливок // Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье». - Харьков: ХГПУ. - 1997. с. 144-146
7. Акимов О.В., Петросянц В.А., Солошенко В.А. Проблемы обеспечения качества отливок малоразмерных колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС. (Часть 1. Рабочие характеристики.) // Вестник ХГПУ. Сер. «Новые решения в современных технологиях». – 1999. – №30. – с.48-51.
8. Акимов О.В., Петросянц В.А., Солошенко В.А. Проблемы обеспечения качества отливок малоразмерных колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС. (Часть 2. Прочностные характеристики) // Вестник ХГПУ. – 1999. – №46. – с.46-50.
9. О.В. Акимов. Система управления качеством отливок в структуре автоматизации предприятия // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - №83. - с. 31-34

О. В. Акимов
 Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
 Украина, г. Харьков, кафедра литейного производства,
 тел. +38 (0572) 400-320