

4. Венедиктов, В. Д. Газодинамика охлаждаемых турбин [Текст]/ В. Д. Венедиктов / М., «Машиностроение», 1990г. с. 17-24.
5. Жирицкий, Г. С. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов [Текст]/ Г. С. Жирицкий, В. И. Локай, М. К. Максутава, В. А. Стрункин // М., «Машиностроение», 1971г. с. 93-113.
6. Кривошеев, И.А. Динамика развития и использования математических моделей на различных этапах разработки ГТД [Текст]/ И.А. Кривошеев, Д.А. Ахмедзянов, О.Н.Иванова // Известия вузов. Авиационная техника. 2003г. № 3, с. 71-73.
7. Дружинин, Л.Н. Математическое моделирование ГТД на современных ЭВМ при исследовании параметров и характеристик авиационных двигателей: труды ЦИАМ № 832 [Текст]/ Л.Н. Дружинин, Л.И. Швец, А.И. Ланшин// М.:ЦИАМ, 1979г. – с. 3-4.
8. Walsh, P. Gas Turbine Performance. Second Edition [Текст]/ P. Walsh, P. Fletcher// India: Blackwell Publishing company – 2004. – 631 p.
9. Koval, V.A. Singularities aerodynamic finishing axial compressors of a gas-turbine engines [Текст]/V.A. Koval, V.V. Romanov, A.V. Skvortsov//Eastern-Journal of Enterprise Technologies. – 2007. – № 5/4 (30). – P. 63 – 67.
10. Коваль, В.А. Улучшение характеристик осевого компрессора газотурбинного двигателя путем пассивного управления течением у концов рабочих лопаток [Текст]/В.А. Коваль, В.В. Романов, А.В. Скворцов //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 6/1 (30). – С. 35 – 43.

УДК 621.74.045:669.24:21.981

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ

П. Д. Жеманюк

Кандидат технических наук, технический директор*

В. В. Клочихин

Инженер, начальник лаборатории
специальной металлургии*

E-mail: motor@motorsich.com

Н. А. Лысенко

Инженер *

В. В. Наумик

Доктор технических наук, профессор,
Кафедра «Машины и технология литейного
производства»

Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

e-mail: naumik@zntu.edu.ua

*УГМет АО «Мотор-Сич»

пр. Машиностроителей, 15, г. Запорожье,
Украина, 69068

Під час гарячого ізостатичного пресування лопаток відбувається «загоювання» мікропор та рихлот, які не виходять на поверхню деталей, що сприяє стабілізації структури та властивостей матеріалу. Наступна термообробка сприяє підвищенню однорідності сплаву, релаксації напружень, позитивно впливає на пластичні характеристики сплаву при збереженні властивостей жароміцності. Обробка та наступна гомогенізація забезпечують отримання сприятливого поєднання характеристик пластичності, тривалої міцності

Ключові слова: лопатка, пресування, мікропори, рихлоти, «рафт»-структура, термообробка, однорідність, пластичність, жароміцність

В процессе горячего изостатического прессования лопаток происходит «залечивание» микропор и рыхлот, не выходящих на поверхность деталей, что способствует стабилизации свойств материала. Последующая термообработка приводит к повышению однородности сплава, релаксации напряжений, положительно влияет на пластические характеристики сплава при сохранении жаропрочности. Обработка и последующая гомогенизация обеспечивают получение благоприятного сочетания характеристик пластичности и длительной прочности

Ключевые слова: лопатка, прессование, микропоры, рыхлоты, «рафт»-структура, термообработка, однородность, пластичность, жаропрочность

1. Введение

Литые детали горячего тракта авиационных двигателей, изготавливаемые из жаропрочных никелевых

сплавов, характеризуются сложной конфигурацией и часто отбраковываются по причине наличия внутренних несплошностей усадочного характера [1-3]. Эффективным способом исправления внутренних де-

фектов ответственных отливок из алюминиевых, титановых и жаропрочных никелевых сплавов является метод горячего изостатического прессования (ГИП) [4-9], сущность которого состоит во всестороннем сжатии отливок специальными жидкостями или газами при высоких температурах.

Последующая термическая обработка позволяет снять остаточные напряжения и повысить пластичность материала при сохранении уровня прочностных свойств [10, 11].

Провели исследования качества материала рабочих лопаток, отлитых из жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ после горячего изостатического прессования, а также после ГИП и термической обработки по стандартному режиму (гомогенизация при температуре 1210 ± 10 °С в течение 4 часов в вакууме) в сравнении с аналогичными лопатками без проведения операции ГИП.

Процесс горячего изостатического прессования проводили по следующему режиму. При начальном давлении 38 МПа лопатки нагревали от комнатной температуры до 1040 ± 10 °С со скоростью $8...10$ °С/мин и выдерживали 1,5 часа. Далее давление поднимали до 120 МПа, нагревали лопатки до температуры 1210 ± 10 °С со скоростью 4 °С/мин и выдерживали их в течении 2 часов. После давление поднимали до 160 МПа и охлаждали отливки до температуры 300 °С со скоростью 26 °С/мин.

Анализ химического состава материала исследуемых лопаток показал, что содержание элементов в них находится на одном уровне и отвечает требованиям ОСТ190126-85.

Люминесцентным контролем методом ЛЮМ1-ОВ в осевом сечении хвостовика и поперечном сечении пера лопаток до проведения операции ГИП выявлено точечное свечение. В аналогичных сечениях лопаток после проведения операции ГИП, а также после ГИП и термической обработки по стандартному режиму свечения люминофора не обнаружены.

2. Основная часть

Металлографическими исследованиями нетравленных микрошлифов, изготовленных в осевом сечении хвостовика и поперечном сечении пера лопаток без проведения операции ГИП, обнаружены единичные микропоры, а также усадочные рыхлоты размером до 250 мкм (рис. 1, табл. 1).

Проведение операции горячего изостатического прессования способствует «залечиванию» пор и рыхлот. В структуре исследованных лопаток после ГИП микропоры и рыхлоты практически отсутствуют. Размер выявленных после ГИП единичных микропор составляет ~ 6 мкм, что более чем в 40 раз меньше по сравнению с порами, обнаруженными в лопатках до проведения операции ГИП (рис. 1, табл. 1).

Карбиды типа MeC выделяются, в основном, в виде дискретных глобулярных частиц с наличием пластин эвтектических карбидов, располагающихся преиму-

щественно на границах зерен и в междендритных пространствах; проведение операции ГИП и термической обработки существенно не влияет на их размеры и распределение (рис. 2).

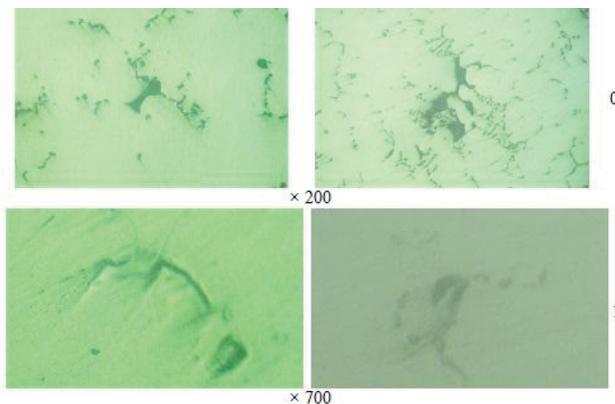


Рис. 1. Усадочная рыхлота и микропористость в материале исследованных лопаток без проведения ГИП (0) и зоны их «залечивания» после ГИП (1)

Таблица 1
Параметры структурных составляющих в лопатках из сплава ЖСЗДК-ВИ

Состояние материала и место сечения		Размеры структурных составляющих, мкм			
		карбиды		эвтектика типа (γ-γ')	Микропоры и рыхлота
		глобулярные типа MeC	эвтектические типа MeC		
литое	пера	2...10	6...30 (единичные до 45)	5...10	15...250
	хвостовик	3...20	10...40 (единичные до 80)	15...50	15...220
после ГИП без т/о	пера	2...8	6...30 (единичные до 50)	–	единичные до 4
	хвостовик	2...20	10...40 (единичные до 76)	–	единичные до 6
после ГИП и т/о	пера	1,5...6	6...25 (единичные до 40)	–	единичные до 4
	хвостовик	2...15	8...30 (единичные до 65)	–	единичные до 6



Рис. 2. Нетравленная структура исследованных лопаток × 100: 0 – без проведения операции ГИП; 2 – после проведения операции ГИП и термической обработки

Металлографическим исследованием установлено, что микроструктура исследованных лопаток без проведения операции ГИП представляет собой γ -твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' -фазы, карбидов, карбонитридов и небольшого количества эвтектической фазы (γ - γ'); соответствует литому состоянию сплава ЖСЗДК-ВИ (рис. 3). Размер карбидов типа МС, а также расстояние между осями дендритов второго порядка в пере лопаток примерно в 1,5...2,5 раза меньше, чем в хвостовой части. Эвтектика типа (γ - γ') в пере в ~ 3...5 раз меньше, чем в хвостовике (рис. 3, табл. 1).

В процессе горячего изостатического прессования при температуре 1210 °С и давлении 160 МПа произошло полное растворение эвтектической фазы (g - g') в γ -матрице (рис. 3, табл. 1). Микроструктура материала рабочих лопаток после ГИП удовлетворительная и соответствует шкале микроструктур, утвержденной ВИАМ.

При микроструктурном исследовании методами оптической (микроскоп «Неорфот-32») и растровой электронной микроскопии (микроскоп «JSM T-300») на травленных микрошлифах, вырезанных из рабочих лопаток после ГИП в местах полного либо частичного «залечивания» микропор, усадочной рыхлоты, а также вокруг некоторых карбидов типа МС выявлены зоны кратерообразной формы с наличием концентрически расположенных вытянутых частиц упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы, характерных для «рафт»-структуры (рис. 4).

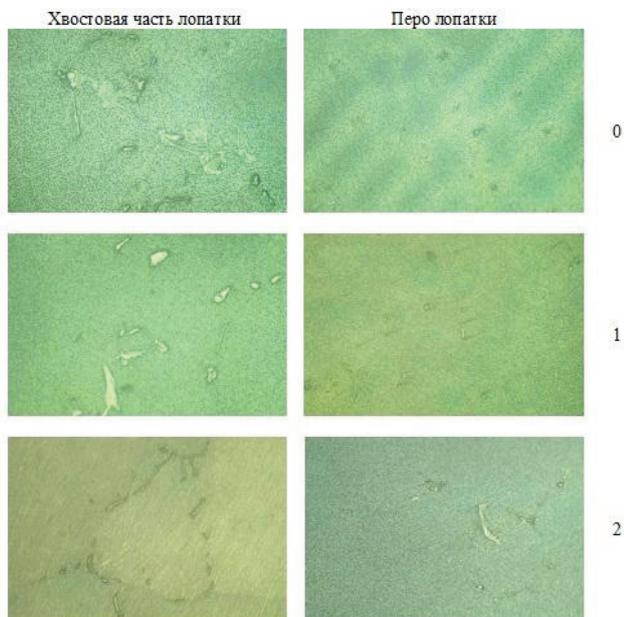


Рис. 3. Микроструктура исследованных лопаток $\times 500$: 0 – без проведения операции ГИП; 1 – после ГИП; 2 – после проведения операции ГИП и термической обработки

Установлено, что по мере приближения к центру указанных областей, соответственно направлению результирующих напряжений, наблюдается увеличение плотности и искажения интерметаллидных частиц, размер которых находится на уровне 0,15...0,25 мкм. Следовательно, в результате пластической деформации, инициируемой процессом горячего изостатического прессования, концентрация искажений струк-

турных компонентов в локальном объеме материала, в прилежащих к микропорам, карбидам и т.д. зонах, существенно возрастает. В зонах «залечивания» микропор наряду с мелкими интерметаллидными частицами также наблюдается скопление скоагулированных частиц γ' -фазы размером 1,4...5,2 мкм.

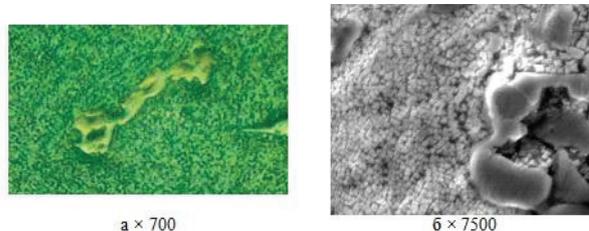


Рис. 4. «Рафт»-структуры в материале лопаток после ГИП: а – оптическая микроскопия; б – электронная растровая микроскопия

Таким образом, материал рабочих лопаток после ГИП характеризуется структурной неоднородностью вследствие образования «рафт»-структуры в виде зональных участков, сосредоточенных в местах «залечивания» пор, рыхлоты, а также вокруг некоторых карбидов. «Залечивание» микропор, располагающихся на поверхности деталей, не происходит.

Термообработка по стандартному режиму (1210 °С, 4 часа) после газостатирования способствует практически полной перекристаллизации упрочняющей γ' -фазы. Интерметаллидная γ' -фаза растворяется в γ -матрице и повторно выделяется в виде дисперсных частиц кубической формы с наличием небольшого количества скоагулированных частиц. В результате указанных структурных изменений происходит устранение зональных участков «рафт»-структуры, образовавшейся в процессе ГИП в местах «залечивания» пор и вокруг карбидов, что приводит к повышению структурной однородности сплава (рис. 3).

Состояние упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы в осях и межосных пространствах дендритов пера и хвостовика рабочих лопаток в литом состоянии и после проведения ГИП изучали на микрошлифах после электролитического травления в реактиве, состоящем из 80 мл H_3PO_4 и 10 г CrO_3 , с использованием электронного растрового микроскопа «JSM T-300».

Исследованиями установлено, что до проведения ГИП частицы γ' -фазы имеют кубическую форму и образуют блоки, состоящие из четырех частиц. Размер γ' -частиц, измеренный по стороне эквивалентного по площади квадрата, в осях дендритов составляет 0,17...0,29 мкм (табл. 2).

Существенных различий в морфологии и величине интерметаллидной фазы, выделившейся в межосных пространствах и осях дендритов, как в хвостовой части, так и в пере лопатки, не наблюдается (табл. 2).

В структуре лопаток после газостатирования наблюдается измельчение интерметаллидной g' -фазы (рис. 5) примерно в 1,5 раза в сравнении с исходным сплавом (табл. 2). Кроме того, в материале лопаток после изостатического прессования обнаружено выделение небольшого количества микрочастиц γ' -фазы размером 0,07...0,12 мкм, а также зональные междендритные выделения скоагу-

лированных интерметаллидных частиц, размер которых достигает 5,2 мкм в зонах «залечивания» микропор и усадочной рыхлоты (рис. 3).

Таблица 2

Размеры частиц γ' -фазы в материале рабочих лопаток из сплава ЖСЗДК-ВИ, в литом состоянии и после проведения ГИП

Зона замера		Размер частиц γ' -фазы, мкм	
		до ГИП	после ГИП
перо	оси	0,17...0,29	0,11...0,20 (микрочастицы – 0,07...0,10 мкм)
	межосья	0,17...0,31	0,12...0,23 (микрочастицы – 0,07...0,10 мкм)
хвостовик	оси	0,19...0,33	0,12...0,22 (микрочастицы – 0,09...0,12 мкм)
	межосья	0,20...0,35	0,14...0,25 (микрочастицы – 0,09...0,12 мкм)

В результате ГИП под воздействием высокого давления преимущественно в межосных пространствах дендритов формируются γ' -частицы с неравновесной морфологией, заметно отличающейся от кубической, с наличием 60-градусных углов по их сечениям, а также в виде зональных участков «рафт»-структуры в местах «залечивания» пор, рыхлот и вокруг некоторых карбидов типа МС.

Механические и жаропрочные свойства определяли на пальчиковых образцах (\varnothing и 12 мм), отлитых методом равноосной кристаллизации из сплава ЖСЗДК-ВИ, как до термообработки, так и после гомогенизации при температуре 1210 ± 10 °С в течение 4 часов с охлаждением на воздухе (табл. 3).

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что механические и жаропрочные свойства всех исследованных образцов отвечают требованиям ОСТ1 90126-85.

Термическая обработка по стандартному режиму после газостатирования способствует повышению пластичности сплава за счёт повышением структурной однородности сплава и релаксацией напряжений, возникших в процессе горячего изостатического прессования.

Механические и жаропрочные свойства сплава ЖСЗДК-ВИ до и после операции горячего изостатического прессования

Состояние материала	Механические свойства при 20 °С					Время до разрушения под нагрузкой 35 кгс/мм ² при 850 °С, час.
	σ_B , кгс/мм ²	d, %	Ψ , %	КСУ, кгс·м/см ²	НВ, МПа	
литое + т/о	114,5	18,0	18,5	3,00	341	477
	113,0	15,6	15,4	2,88	341	398
после ГИП	108,3	16,0	18,3	3,13	321	335
	103,7	12,8	18,3	3,00	321	361
после ГИП + т/о	113,0	26,8	17,2	3,50	321	292,5
	105,4	15,2	15,4	3,13	321	377
ОСТ1 90126-85	$\geq 95,0$	$\geq 7,0$	–	$\geq 3,0$	–	$\geq 50,0$

3. Выводы

В процессе горячего изостатического прессования лопаток при температуре 1210 °С и давлении 160 МПа происходит «залечивание» микропор и рыхлот, не выходящих на поверхность деталей (располагающихся во внутренних объёмах металла), что способствует стабилизации структуры и свойств материала. Размер единичных микропор, выявленных после ГИП, уменьшился более чем в 40 раз.

Для материала рабочих лопаток и образцов (сплав ЖСЗДК-ВИ) после ГИП характерна структурная неоднородность вследствие образования «рафт»-структуры в виде зональных участков, сосредоточенных в местах «залечивания» пор и вокруг некоторых карбидов типа МС.

Термообработка по стандартному режиму (гомогенизация при температуре 1210 °С, 4 часа) после газостатирования способствует повышению структурной однородности сплава, релаксации напряжений и оказывает положительное влияние на пластические характеристики сплава при сохранении прочностных и жаропрочных свойств.

Обработка ГИП и последующая гомогенизация при температуре 1210 °С в течение 4 часов обеспечивают получение наиболее благоприятного сочетания прочностных, пластических характеристик и длительной прочности при температуре 850 °С и напряжении 35 кгс/мм².

Микроструктура рабочих лопаток после гомогенизации при температурах 1220...1265 °С в течение от 1 ч 30 мин до 5 ч 30 мин с охлаждением в потоке аргона со скоростью от 60 до 200 °С в минуту соответствует нормально термообработанному состоянию сплавов ЖС6К-ВИ и ЖС26-ВИ (ВНК) согласно утверждённой ВИАМ шкале микроструктур.

Литература

1. Орлов, М.Р. Образование пор в монокристаллических рабочих лопатках турбины в процессе направленной кристаллизации [Текст]/ М.Р. Орлов // Металлы. – 2008. – № 1. – С. 70 – 75.
2. Орлов, М.Р. Физико-химические особенности образования пор термического происхождения и работоспособность монокристаллических лопаток турбины [Текст]/ М.Р. Орлов // ДиРМ. – 2008. – №6. – С. 43 – 48.
3. Орлов, М.Р. Образование пор в монокристаллических охлаждаемых рабочих лопатках турбины в процессе эксплуатации [Текст]/ М.Р. Орлов // ЖФМ– 2007. – № 8. – С. 306 – 312.
4. Галдин, Н.М. Цветное литьё: справочник [Текст]/ Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук и др.; под общ. ред. Н.М. Галдина. – М.: Машиностроение, 1989. – 528 с.
5. Бокштейн, Б.С. Диффузионная модель вакансионного растворения пор в условиях газостатического прессования монокристалла жаропрочного сплава на никелевой основе [Текст]/ Бокштейн Б.С., Есин В.А., Ларионов В.Н. и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 3. – С. 5 – 9.

Таблица 3

6. Оспенникова, О.Г. Повышение свойств жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ путем горячего изостатического прессования и последующей термической обработки [Текст]/ О.Г. Оспенникова, М.Р. Орлов // Материало-ведение. – 2007. – № 9. – С. 32 – 36.
7. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. Монография. Изд. 2-е, переработанное и дополненное [Текст]/ Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. – г. Запорожье, изд. ОАО „Мотор Сич“. – 2007. – 496 с.
8. Орлов, М.Р. Аналитическая оценка кинетики релаксационных процессов в никелевом жаропрочном сплаве ЖС6У-ВИ [Текст]/ М.Р. Орлов, Е.М. Орлов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 1/17. – С. 26 – 29.
9. Жеманюк, П.Д. Особенности механизма пластической деформации сплава ЖС6У-ВИ при нормальной и повышенной температурах [Текст]/ Жеманюк П.Д., Яценко В.К., Орлов М.Р., Рубель О.В. // Металлознавство та обробка металів. – 2000. – № 3. – С. 31 – 37.
10. Химушин, Ф.Ф. Легирование, термическая обработка и свойства жаропрочных сталей и сплавов [Текст]/ Ф.Ф. Химушин – М.: Оборонгиз, 1962. – 336 с.
11. Гуляев, А.П. Металловедение [Текст]/ А.П. Гуляев – М.: Металлургиздат, 1948. – 556 с.

Наведено чисельне моделювання в ANSYS CFX плівкового охолодження плоскої пластини при однорядній системі циліндричних отворів та порівняння їх з експериментальними даними. За рахунок корегування констант виконано адаптацію SST моделі турбулентності, що дозволяє збільшити достовірність результатів розрахунків ефективності плівкового охолодження. Розглянуто вплив адаптації моделі на розрахунок теплообміну та гідравлічного опору

Ключові слова: охолодження лопатки, плівкове охолодження, чисельне моделювання, SST модель турбулентності, теплообмін

Представлены результаты численного моделирования в ANSYS CFX пленочного охлаждения плоской пластины при однорядной системе цилиндрических отверстий и сравнение их с экспериментальными данными. Путем корректировки констант выполнена адаптация SST модели турбулентности, позволяющая повысить достоверность результатов расчета эффективности пленочного охлаждения. Рассмотрено влияние адаптации модели на расчет теплообмена и гидравлического сопротивления

Ключевые слова: охлаждаемая лопатка, пленочное охлаждение, численное моделирование, SST модель турбулентности, теплообмен

УДК 621.438-226.2:536.24

АДАПТАЦИЯ SST МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ

В. Ю. Петельчиц

Инженер-конструктор, сектор тепловых и гидравлических расчетов*

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

А. А. Халатов

Доктор технических наук, профессор, академик НАН Украины, заведующий отделом высокотемпературной термогазодинамики

Институт технической теплофизики НАН Украины
Ул. Желябова, 2а, г. Киев, Украина, 03057

E-mail: khalatov@vortex.org.ua

Д. Н. Письменный

Кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор, сектор тепловых и гидравлических расчетов*

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

Ю. Я. Дашевский

Кандидат технических наук, начальник сектора тепловых и гидравлических расчетов*

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

*Отдел турбин

ГП Научно-производственный комплекс газотурбостроения
«Зоря»-«Машпроект»

Пр. Октябрьский, 42а, г. Николаев, Украина, 54018

1. Введение

Для расчета температурного состояния охлаждаемых лопаток турбин, в настоящее время широко

применяется CFD-моделирование, базирующееся на решении системы уравнений сохранения массы и энергии, уравнений движения Навье-Стокса, которые полностью описывают нестационарное турбулентное