

EUROASIA JOURNAL

of MATHEMATICS, ENGINEERING, NATURAL & MEDICAL SCIENCES

ISSN 2667-6702

**YEAR
2018**

**VOLUME
5**



**EDITOR
DR. ALMAZ AHMETOV**

**PUBLISHER
IEDSR**

ISSUED IN APRIL 2018

JOURNAL ID

THE NAME OF JOURNAL : **EUROASIA JOURNAL of MATHEMATICS, ENGINEERING, NATURAL & Medical Sciences**

FOUNDED IN : **2014**

ISSN : **2667-6702**

ISSUED IN : **April 15, 2018**

PUBLISHER OF JOURNAL : **IEDSR ASSOCIATION**

EDITOR : **DR. ALMAZ AHMETOV**

DIRECTOR OF JOURNAL : **IEDSR ASSOCIATION**

SCIENTIFIC COMMITTEE

DR. JEAN-Philippe PRAENE : **UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION**

DR. ARTUR ABRAGIN : **BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

DR. JAYANTHINY MAHINTHAN : **EASTERN UNIVERSITY**

DR. GULBAKHAR TAVALDIEVA : **TASHKENT CHEMICAL-TECHNOLOGICAL INSTITUTE**

DR. ZAMIRQUL KAZAKBAEVA : **MANAS UNIVERSITY**

DR. ESBOLOT KULSABIRULY : **EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY**

DR. IRFAN AKHTAR : **PAKISTAN INSTITUTE OF ENGINEERING & APPLIED SCIENCES**

CONTENTS

Д. К. АЛИЕВА

**ТРЕЩИНЫ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ И ПУТИ ИХ
УСТРАНЕНИЯ**

Pages 1-8

БЕГЕНДИКОВ А.А. & Б.М. ОСИПОВ & П.Г. ВЕЛИКАНОВ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 4 МВт С КПД НЕ МЕНЕЕ 38%**

Pages 9-17

ГОРОДКОВА АНАСТАСИЯ ЕВГЕНЬЕВНА

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ
МИКРОШЛИФОВАНИЕМ**

Pages 18-21

РЗАЕВ РАДМИР АДильБЕКОВИЧ &

ЧУЛАРИС АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ
СПОСОБОМ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И УЧЕТОМ
МЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА РАЗНЫХ
СТРУКТУРНО-МАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ**

Pages 22-27

ТРЕЩИНЫ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ И ПУТИ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Д. К. АЛИЕВА

КГУСТА им. Н.Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены причины различных типов трещин в железобетонных конструкциях. На основании выполненных исследований описана технология работ по устранению трещин в железобетонных конструкциях.

Ключевые слова: Трещина, Растрескивание, Водопроницаемость Бетона, Тепловое Движение, Ползучесть Бетона, Коррозия Бетона.

Основными причинами трещин в железобетонных конструкциях являются:

1. Водопроницаемость бетона

Поскольку процесс разрушения в бетоне начинается с проникновения различных агрессивных веществ. Он диктует способность бетона противостоять действию выветривания, химической атаке или любому процессу ухудшения. Таким образом, низкая проницаемость является ключевым фактором устойчивости бетона.

Существует ряд факторов, которые контролируют проницаемость бетона, такую как вода-цементное соотношение, использование примесей, отверждение, воздушные пустоты из-за недостаточного уплотнения, микротрещины из-за нагрузки, циклическое воздействие температурных изменений и возраст бетона.

Первые три связаны с прочностью бетона. Проницаемость цементной пасты является функцией вода-цементного соотношения с учетом материалов хорошего качества, удовлетворительной дозировки и хорошей строительной практики; проницаемость бетона является прямой функцией пористости и взаимосвязи пор цементной пасты.

Устранение причины

Вышеприведенное обсуждение предлагает подходящую меру для уменьшения проницаемости бетона и, следовательно, трещин.

2. Тепловое движение

Тепловое движение является одной из самых сильных причин растрескивания в зданиях. Все материалы более или менее расширяются при нагревании и сокращаются при охлаждении.

Изменение температуры окружающей среды и потеря тепла гидратации в части структуры с разной скоростью приводят к изменениям температуры и последующему тепловому движению.

Тепловое движение в компоненте зависит от ряда факторов, таких как изменения температуры, размеры, коэффициент теплового расширения и некоторые другие физические свойства материалов.

Тепловые изменения внутренних стен и промежуточных полов невелики и, следовательно, не вызывают трещин.

Это главным образом внешние стены, особенно тонкие стены, подверженные прямому солнечному излучению, и крыша, которая подвержена значительным тепловым изменениям, которые могут растрескиваться (Рис.1; Рис 2).

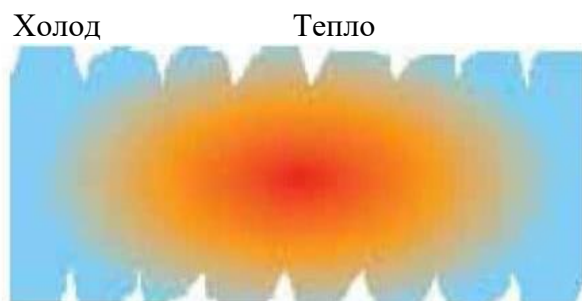


Рис.1: Растрескивание бетона из-за температурных изменений



Рис.2: Растрескивание вследствие теплового движения

Исправительные меры

Соединения должны учитываться при проектировании и строиться надлежащим образом. Например, компенсаторы, соединительные муфты, строительных швов и скользящие соединения (Рис.3).

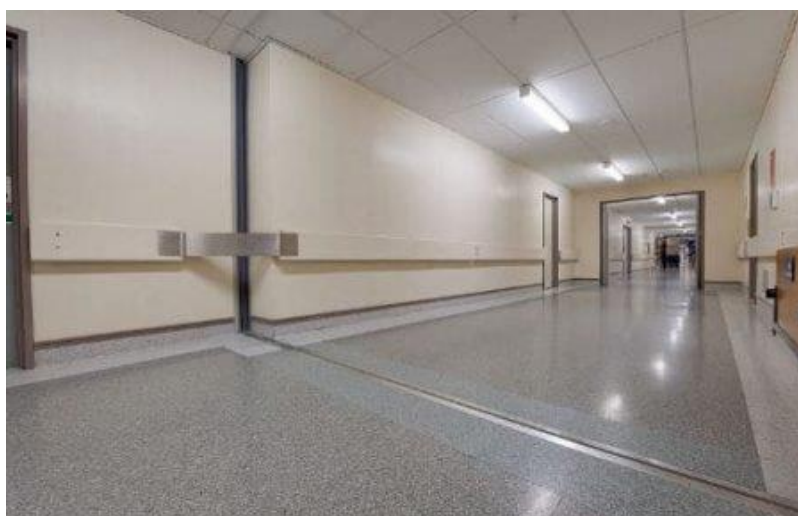


Рис.3: Соединения для предотвращения трещин вследствие теплового движения

3 Ползучесть бетона.

Постепенная и медленная зависящая от времени деформация бетонной структуры при устойчивых нагрузках известна как ползучесть. Это может вызвать чрезмерное напряжение и привести к развитию трещины.

Ползучесть увеличивается с увеличением содержания воды и цемента, соотношения цементного раствора и температуры.

К этому добавляются примеси и пуццоланы. Повышение температуры в стальных прутках также увеличит ползучесть.

Однако он уменьшается с увеличением влажности окружающей атмосферы и возраста материала во время загрузки (Рис.4).



Рис.4: Бетонные строительные трещины из-за движения ползучести

Устранение причины

Использовать минимально возможное количество воды.

Использовать агрегат высокого качества.

Обеспечить сжатие, если возможно

Избегать удаления опалубки в раннем возрасте.

Вылечить бетон должным образом.

Назначить правильное поперечное сечение для конкретного элемента.

4. Коррозия арматуры

Усиленная коррозия арматуры приводит к образованию оксида железа и гидроксид на поверхности стального стержня, следовательно, его объем увеличивается (Рис.5). Это увеличение объема вызывает высокие радиальные разрывные напряжения вокруг арматурных стержней и приводит к локальным радиальным трещинам. Эти щелочные трещины приводят к образованию продольных трещин, параллельных стержню (Рис.6). Коррозия арматуры будет происходить, если она не будет защищена должным образом. Стальная арматура может быть защищена путем обеспечения надлежащего непроницаемого бетонного покрытия. Это предотвратит проникновение влаги и других агрессивных элементов.

Стальная коррозия также не возникает, если бетон, окружающий ее, является щелочным по своей природе, имеющим высокое значение pH.



Рис.5: Растрескивание из-за коррозии арматуры

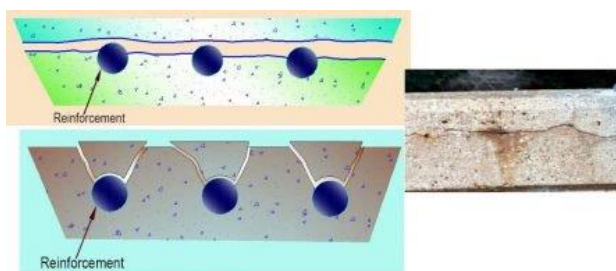


Рис.6: Бетонная трещина из-за коррозии арматур

Устранение причины

Использовать низкопроницаемый бетон

Обеспечить достаточную толщину покрытия

Удостоверьтесь, что соединение из бетона и арматуры как можно лучше. Это связано с тем, что бетон слабо противостоит растягивающим силам, к которым он часто подвергается. В противном случае бетон может расколоться и позволить вредным веществам воздействовать на стальные стержни.

5 Влага.

Большинство строительных материалов с порами в их структуре в виде межмолекулярного пространства расширяются на поглощение влаги и усадки при сушке.

Эти движения являются циклическими по своей природе и вызваны увеличением или уменьшением внутриспорового давления с изменениями влажности.

Усадка может быть пластичной или сухой. Факторы, вызывающие усадку цемента или раствора, включают чрезмерную воду и количество цемента; при увеличении доли цемента, цементные смеси страдают большей усадкой.



Рис.7: Трещина над окном из-за усадки



Рис.8: Бетонная трещина из-за движения влаги

Устранение причины

Обеспечить правильное соединение стыков.

Используйте минимально возможное количество воды для смешивания цементобетона или цементного раствора

Правильно уплотнить бетон, вибрированный бетон имеет меньшую усадку по сравнению с уплотненным вручную бетоном

Наконец, избегать использования чрезмерного количества цемента.

6 Практика строительства.

Существует широкий спектр методов строительства, которые приводят к растрескиванию бетона. Как правило, неправильная практика строительства связана с незнанием, небрежностью или жадностью.

Основные причины плохой практики строительства:

- Неправильный подбор материалов.
- Выбор недорогих материалов низкого качества.
- Неадекватное и неправильное дозирование компонентов смеси бетона, раствора и т. д.
- Неадекватный контроль на различных этапах производства бетона, таких как дозирование, смешивание, транспортировка, размещение, отделка и отверждение
- Перегрузки конструкции, вызванные во время строительства, часто могут быть более серьезными, чем те, которые возникает во время эксплуатации.
- Неадекватный контроль качества и наблюдение, вызывающие большие пустоты и трещины, приводящие к утечкам и, в конечном счете, более быстрое ухудшение качества бетона.
- Неправильные строительные швы между последующими захватками бетона или между бетонным каркасом и кладкой.
- Добавление избыточной воды в бетонные и растворные смеси.
- Наконец, низкое качество сантехнических и санитарных материалов и методов.
-



Рис.9: Бетонный строительный трещины из-за плохой строительной практики; вода добавляется в свежий бетон

Устранение причины

Правильно контролировать технологии процесса строительства.

Использовать материалы хорошего качества во время строительства.

7 Структурная конструкция и спецификации.

Некоторые проблемы могут возникнуть из-за неправильной конструкции, детализации и спецификаций.

Ошибки, которые могут возникнуть на этом этапе, включают в себя неадекватную толщину, недостаточное армирование, неправильную геометрию, неправильное использование материалов и неправильную детализацию.

Проблемы, возникающие из-за этих ошибок, включают растрескивание из-за недостаточного усиления, чрезмерного дифференциального перемещения из-за неправильной конструкции фундамента и т. д. ...

Кроме того, важно, чтобы проектировщик учитывал условия окружающей среды, существующие вокруг строительной площадки.



Рис.10: Основная структурная трещина в балке из-за плохой практики детализации

Устранение причины

Архитекторы, структурные консультанты и спецификаторы должны учитывать следующую меру, чтобы избежать растрескивания и последующего ухудшения качества бетона:

- Правильная спецификация для бетонных материалов и бетона.
- Надлежащие спецификации для ухода за окружающей средой, а также о состоянии почвы.
- Конструктивное и структурное проектирование.
- Правильное качество и толщина защитного слоя бетонного покрытия вокруг арматурной стали.
- Планирование надлежащей компоновки арматуры и ее детализация в тонких конструкциях для обеспечения правильного размещения бетона без разделения.
- Выбор правильных строительных компаний для создания своих рабочих проектов.

8. Техническое обслуживание

Структура должна поддерживаться по прошествии определенного периода времени после завершения строительства.

Некоторым структурам может потребоваться очень ранний анализ проблем их ухудшения, в то время как другие могут хорошо себя зарекомендовать в течение многих лет в зависимости от качества проектирования и строительства.

Более того, регулярная внешняя окраска здания в некоторой степени помогает защитить здание от влаги и других химических атак.

Водонепроницаемость и защитное покрытие на арматурной стали или бетоне являются второй линией обороны, и успех их защиты будет во многом зависеть от качества бетона.

Утечки следует следить как можно раньше, прежде чем коррозия стали внутри бетона начинается и происходит отслаивание бетона.

Кроме того, растрескавшийся бетон потеряет свою силу и жесткость. Кроме того, скорость коррозии увеличивается, потому что ржавая сталь полностью подвержена воздействию агрессивной среды.

Наконец, важно не только ремонтировать изношенный бетон, но также важно предотвратить попадание влаги и агрессивных химических веществ в бетон и предотвратить дальнейшее ухудшение качества.



Рис.11: Утечка из кровельной плиты

9. Движение за счет химических реакций

Бетон может треснуть в результате расширенных реакций между заполнителем, который содержит активный кремнезем, и щелочью, полученной из гидратации цемента.

Реакция щелочного кремния приводит к образованию набухающего геля. Это имеет тенденцию извлекать воду из других частей бетона. Следовательно, происходит локальное расширение и приводит к трещинам в структуре.



Рис.12: Растрескивание из-за щелочно-кремниевых реакций

Устранение причины

Использовать слабощелочный цемент
Использовать пуццолану (гидроцемент)
Выбрать правильный заполнитель.

10. Другие факторы

Жесткая отделка, свободная для снятия несущих стен или отверстий, вызывая трещины.

Пожары, аварии вызванные, пожарами, мягкими землетрясениями и т. д.

Выводы

1. Трещины в бетоне имеют несколько причин. Они могут показать общую степень ущерба или проблемы большей величины.
2. Кроме того, они могут представлять собой критический структурный дискомфорт, отсутствие долговечности или они могут влиять только на внешний вид. Важность трещин зависит от характера растрескивания и типа структуры.

Список литературы

1. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции: Общий курс. – М.: Сройиздат, 1991. – 767 с.
2. Савйовский В.В., Болотских О.Н. Ремонт и реконструкция гражданских зданий. – Харьков: издательский дом "Ватерпасс", 1999. – 287 с.
3. Бойко М.Д. Техническое обслуживание и ремонт зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1993. – 208 с.
4. Филимонов П.И. Технология и организация ремонтно-строительных работ. – М.: Высш. шк., 1986. – 479 с. 5. Физдель И.А. Дефекты в конструкциях, сооружениях и методы их устранения. – М.: Стройиздат, 1987. – 336 с.
5. Маринин, А.Н. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А.Н. Маринин, Р.Б. Гарибов, И.Г. Овчинников. – Саратов: Рата, 2008. – 259 с.
6. СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»
7. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции»
8. СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции»
9. ГОСТ 13015-2012 «Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования».

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 4 МВт С КПД НЕ МЕНЕЕ 38%

БЕГЕНДИКОВ А.А.

к.ф.-м.н., доцент Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева-КАИ, Казань

Б.М. ОСИПОВ

к.т.н., профессор. Казанский государственный энергетический университет, Казань

П.Г. ВЕЛИКАНОВ

к.ф.-м.н., доцент Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева-КАИ, Казань

ТЭЗИС

В статье исследуется возможность проектирования газотурбинного двигателя энергетической установки мощностью 4 МВт с КПД не менее 38% путем варьирования схем двигателя ГТД-004. В результате использования программного комплекса АС «ГРЭТ» были исследованы схемы двигателя с обращенным газогенератором, с рекуперацией тепла и перерасширением на выхлопе с помощью эжектора, получены графические зависимости основных параметров двигателя.

В настоящее время ГТУ активно используются в различных областях техники, например, в авиадвигателестроении и дальнем газоснабжении [1]. На компрессорных станциях магистральных газопроводов ГТУ используются в качестве двигателей для привода газоперекачивающих агрегатов. При этом топливом служит газ, отбираемый из магистральной линии. В стационарной энергетике на тепловых электрических станциях применяются ГТУ в качестве резервных и пиковых источников энергии, а также в составе парогазотурбинных установок. Рассматриваемая установка ГТУ-004 (рис. 1) является одним из основных компонентов газотурбинной электростанции и используется в качестве привода турбогенератора.

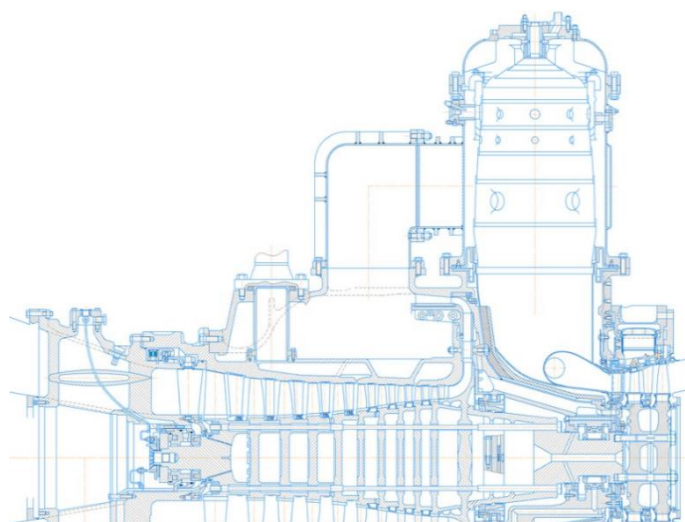


Рис. 1 Двигатель ГТУ-004

По сравнению с дизельными и газопоршневыми двигателями ГТУ-004 имеет ряд преимуществ, главными из которых являются удельная масса двигателя и экономичность.

Для расчетов выбранных схем ГТД были назначены общие для всех схем параметры. Адиабатные КПД компрессоров приняты равными 0.85, а турбин - 0.89. Гидравлические потери, задаваемые в виде коэффициента потерь полного давления, приняты равными: 0.98 на входе в двигатель, 0.97 на выходе из двигателя. На охлаждение сопловых лопаток и дисков отбиралось 3% от суммарного расхода воздуха за компрессором. Топливо - природный газ по стандарту ГАЗПРОМа. Исследование проводилось при температуре газа перед турбиной $T_{г^*}=1320$ К. Полнота сгорания в камере сгорания принята равной 0.995. Гидравлические потери в камере сгорания равны 0.96. При расчете теплообменных аппаратов степень рекуперации принималась равной 0.86, а гидравлические потери - 0.97 с «холодной» и 0.98 с «горячей» сторон.

Выбор схемы и параметров газотурбинной установки ГТУ-004 (рис. 2). Установка ГТУ-004 является одним из основных компонентов газотурбинной электростанции и предназначена для использования в качестве привода турбогенератора и выработки тепловой энергии с изменяемыми параметрами электрической и тепловой мощности в зависимости от потребности пользователя.

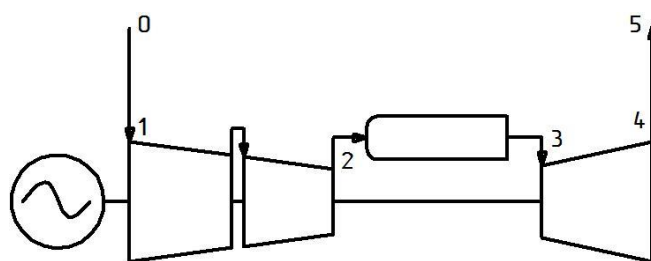


Рис.2. Схема ГТУ-004

Установка ГТУ-004 состоит из следующих основных частей: 0 - входное устройство; 1 - компрессор низкого давления; 2 - компрессор высокого давления; 3 - камера сгорания; 4 - турбина; 5 - выходное устройство.

ГТУ-004 представляет собой одновальную ГТУ с приводом на электрогенератор, состоящий из центробежного компрессора, камеры сгорания и осевой турбины. Расчет параметров рабочего тела (T , P , G) по тракту в характерных сечениях и расчет эффективного КПД проводился для $T_{г^*}=1320$ К в диапазоне степени повышения давления в компрессоре от 6 до 36.

В полном соответствии с методикой, описанной в [2], с использованием программного комплекса АС «ГРЭТ» был проведен термогазодинамический расчет схемы ГТУ-004, представленной на рис. 2, из которого при известной для компрессора двигателя ГТУ-004 степени повышения давления $\pi_{к^*}=9$ не удалось получить искомого КПД (рис. 3).

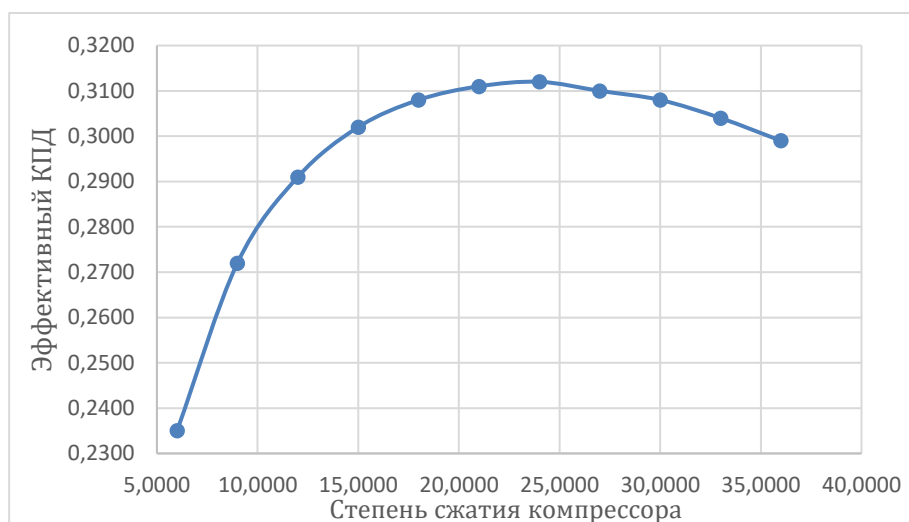


Рис. 3. Изменение эффективного КПД в зависимости от степени повышения давления в компрессоре при $T_{г^*}=1320$ К

Для повышения КПД двигателя ГТД-004 была предложена *одновальная трехпорная схема с обращенным газогенератором (ОГГ)* (рис. 4), которая состоит из следующих составных модулей: турбины низкого давления; передней, средней и задней опор; теплообменника и дожимающего осевого компрессора, соединенного с турбиной при помощи вала.

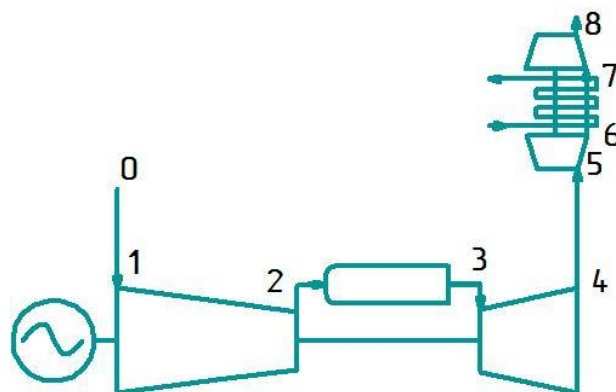


Рис.4. Схема ГТУ-004 с обращенным газогенератором

Установка ГТУ-004 с обращенным газогенератором состоит из следующих основных частей: 0 - входное устройство; 1 - компрессор низкого давления; 2 - компрессор высокого давления; 3 - камера сгорания; 4 - турбина турбокомпрессора; 5 - обращенный газогенератор; 6 - турбина обращенного газогенератора; 7 - теплообменник обращенного газогенератора; 8 - дожимающий компрессор обращенного газогенератора.

Принцип работы ОГГ

Продукты сгорания, покидая выходное устройство турбины через переходной канал, попадают в турбину ОГГ, где происходит срабатывание теплоперепада горячих продуктов сгорания и снижение давления ниже атмосферного. Турбина ОГГ приводит во вращение дожимающий компрессор. Перед дожимающим компрессором ставится теплообменник, который охлаждает продукты сгорания, чтобы затраты дожимающего компрессора были минимальными.

После дожимающего компрессора продукты сгорания выбрасываются в атмосферу. При этом компрессор проектируется так, чтобы давление на выхлопе равнялось атмосферному давлению.

Турбина

Турбина ОГГ одноступенчатая реактивная представляет собой решетку соплового аппарата и решетку рабочих лопаток, собранных на диске турбины. Трактовая часть образуется внутренним и наружным кольцом переходного канала, нижними бандажными полками лопаток направляющих аппаратов, собранных в кольцо, и верхними бандажными полками, крепящимися в промежуточном кольце. Связь деталей, образующих внутреннюю поверхность тракта с деталями наружной поверхности тракта, осуществляется через лопатки соплового аппарата. Далее промежуточное кольцо своим фланцем при помощи болтового соединения крепится к наружному кожуху передней опоры.

Диск турбины болтовым соединением крепится к цапфе и при помощи цапфы соединяется с валом.

Передача крутящего момента на вал передается через болтовое соединение диска с цапфой и шлицевое соединение цапфы с валом. В турбине имеются лабиринтные уплотнения, предотвращающие потерю газа в результате утечек через существующие радиальные зазоры между ротором и статором. На наружных бандажных полках рабочих лопаток имеются гребешки, образующие кольцевое лабиринтное уплотнение, которое предотвращает перетекание газа по тракту движения из области повышенного давления в область пониженного давления. Лопатки турбины на диске крепятся при помощи соединения елочного типа с фиксацией от осевого смещения относительно обода диска пластинчатым замком. Диск турбины в сборе с цапфой и валом опирается на переднюю опору, воспринимающую радиальные нагрузки.

Теплообменник

Состоит из наружного и внутреннего кожухов соединенных между собой 12-ю продольными (вдоль всей длины теплообменника) ребрами, равномерно расположенными в окружном направлении, которые образуют силовой каркас. По тракту теплообменного аппарата расположен противоточный спиралеобразный змеевик. Змеевик представляет собой 10 витков пучка из 13-ти труб одинакового сечения. В начале и в конце трубных пучков расположены входной и выходной патрубки для входа и выхода охлаждающей жидкости. Для обеспечения более жесткой конструкции теплообменника наружный и внутренние кожухи стыкуются фланцевыми соединениями с наружными и внутренними кожухами передней и средней опор.

Компрессор

Компрессор ОГГ - осевой пятиступенчатый, с дозвуковыми ступенями повышения давления. Ротор компрессора - двухопорный. Передней частью в сборе с валом опирается на радиальный подшипник средней опоры, а задней цапфой - на радиально-упорный шариковый подшипник задней опоры, воспринимающий неуравновешенные осевые усилия между роторами компрессора и турбины.

Крутящий момент от ротора турбины передается на ротор КНД через болтовое соединение вала с диском первой ступени.

Статор КНД задним фланцем крепится к задней опоре, а передним фланцем крепится на средней опоре.

С целью обеспечения минимальных радиальных зазоров и исключения трения деталей из титановых сплавов в местах возможного касания ротора и статора нанесен легкообрабатываемый материал АНБ-У.

С использованием программного комплекса АС «ГРЭТ» был проведен расчет схемы ГТУ-004 с обращенным газогенератором (рис. 5 и 6), который также не позволил получить искомый КПД.

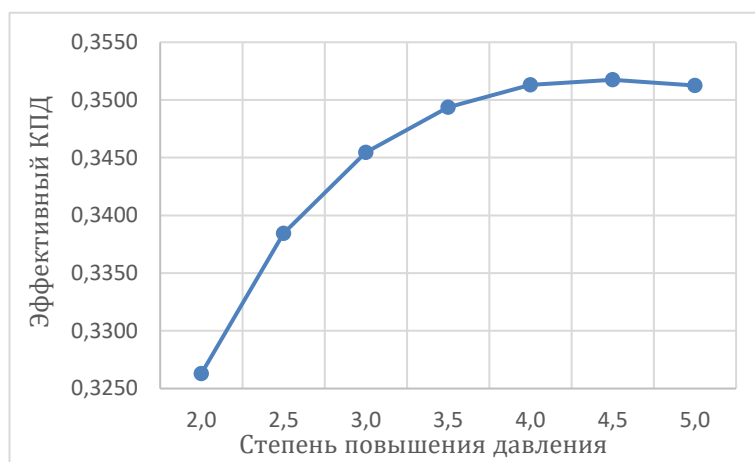


Рис. 5. Изменение эффективного КПД в зависимости от степени повышения давления в компрессоре $\pi_{к*} = 9$ и при разных значениях $\pi_{к*}$ дожимающего компрессора обращенного газогенератора

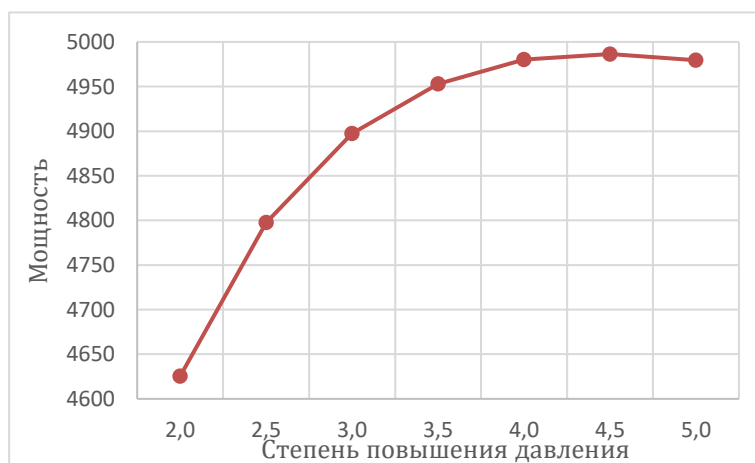


Рис. 6. Изменение мощности при степени повышении давления в компрессоре $\pi_{к*} = 9$ и при разных значениях $\pi_{к*}$ дожимающего компрессора обращенного газогенератора

Для повышения КПД двигателя ГТД-004 была предложена еще одна схема с рекуперацией тепла и перерасширением на выхлопе с помощью эжектора (рис. 7).

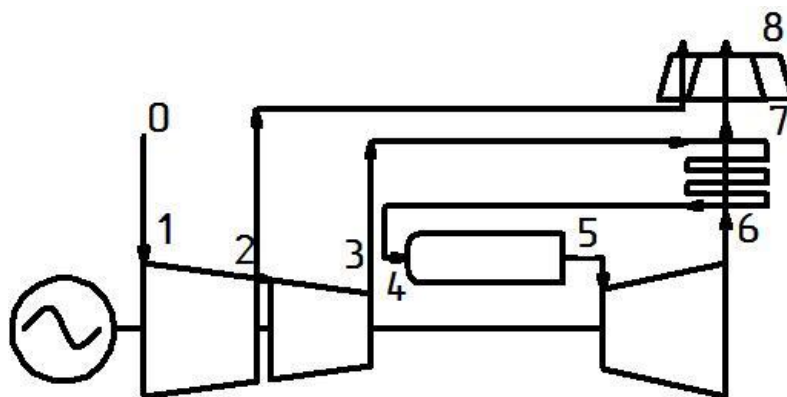


Рис.7. Схема ГТУ-004 с рекуперацией тепла и перерасширением на выхлопе с помощью эжектора

Установка состоит из следующих основных частей: 0 - входное устройство; 1 - компрессор низкого давления; 3 - компрессор высокого давления; 5 - камера сгорания; 6 - турбина турбокомпрессора; 7 - теплообменник; 8 - эжектор.

Особенностью данной схемы является создание разрежения на выходе из турбины (6) за счет эжектирующего насадка (8) на выхлопе, работающего от активного потока, создаваемого первой ступенью компрессора (2) ($\pi_{к*}=4.33$). Расход воздуха для активного потока составляет 16 % от суммарного расхода на входе в двигатель. Для компенсации потерь тепла на выхлопе стоит рекуператор (7) тепла для подогрева воздуха выхлопными газами перед подачей его в камеру сгорания (4).

Описание эжектора

Газовым эжектором называется аппарат, в котором полное давление газового потока увеличивается под действием струи другого, более высоконапорного потока. Передача энергии от одного потока к другому происходит путем их турбулентного смешения. Эжектор прост по конструкции, может работать в широком диапазоне изменения параметров газов, позволяет легко регулировать рабочий процесс и переходить с одного режима работы на другой. Поэтому эжекторы широко применяются в различных областях техники. В зависимости от назначения эжекторы выполняются различным образом.

Во многих случаях эжектор используют в качестве эксгаустера для создания пониженного давления в некотором объеме. Таково, например, назначение эжектора в конденсационных системах паросиловых установок. Для увеличения мощности паровой машины или турбины требуется поддерживать возможно меньшее давление в конденсаторе, куда выпускается отработанный пар. Эжектор создает необходимое разрежение вследствие того, что находящиеся в конденсаторе частицы пара и воздуха подхватываются и уносятся высоконапорной струей пара или воды. В вакуумной технике эжекторы аналогичной схемы, работающие на парах ртути, используются для создания глубокого разрежения порядка миллионных долей атмосферы.

Независимо от назначения эжектора в нем всегда имеются следующие конструктивные элементы: сопло высоконапорного (эжектирующего) газа, сопло низконапорного (эжектируемого) газа, смесительная камера и, обычно, диффузор.

Рабочий процесс эжектора сводится к следующему. Высоконапорный (эжектирующий) газ, имеющий полное давление p_1^* , вытекает из сопла в смесительную камеру. При стационарном режиме работы эжектора во входном сечении смесительной камеры устанавливается статическое давление p_2 , которое всегда ниже полного давления низконапорного (эжектируемого) газа p_2^* .

Под действием разности давлений низконапорный газ устремляется в камеру. Относительный расход этого газа, называемый коэффициентом эжекции $n=G_2/G_1$, зависит от площадей сопел, от плотности газов и их начальных давлений, от режима работы эжектора. Несмотря на то, что скорость эжектируемого газа во входном сечении w_2 обычно меньше скорости эжектирующего газа w_1 , надлежащим выбором площадей сопел F_1 и F_2 можно получить сколь угодно большое значение коэффициента эжекции n [3-5].

С использованием программного комплекса АС «ГРЭТ» был проведен расчет схемы ГТУ-004 с рекуперацией тепла и перерасширением на выхлопе с помощью эжектора (рис. 8 и 9), который позволил получить искомый КПД.

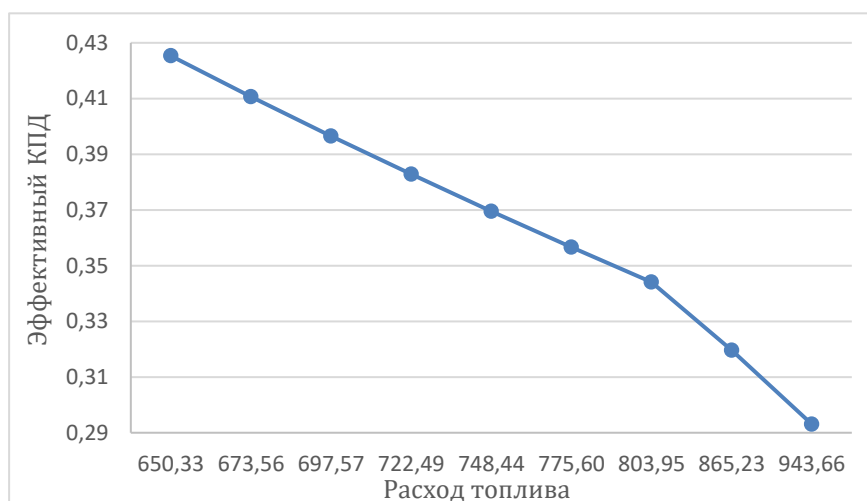


Рис. 8. Изменение эффективного КПД от расхода топлива

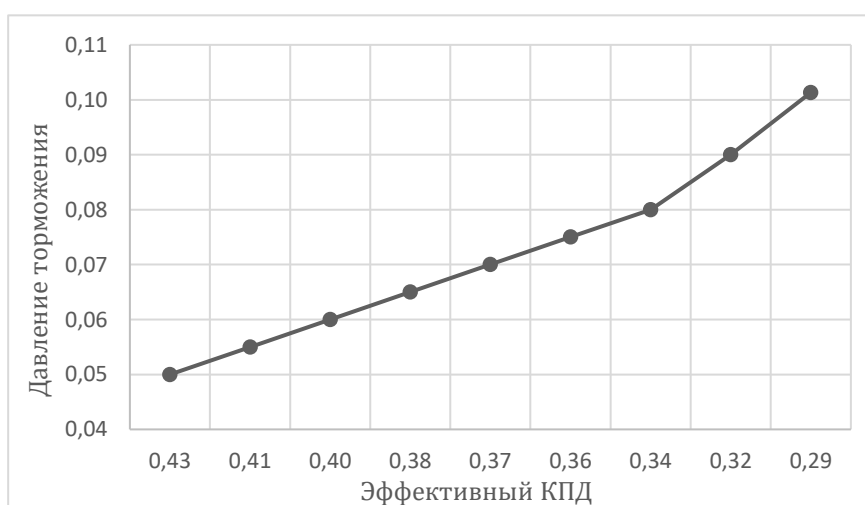


Рис. 9. Изменение эффективного КПД от давления торможения на выходе из ГТУ

Для схемы ГТУ-004 с рекуперацией тепла и перерасширением на выхлопе с помощью эжектора был также выполнен расчет климатических характеристик ГТУ (рис. 10 и 11).

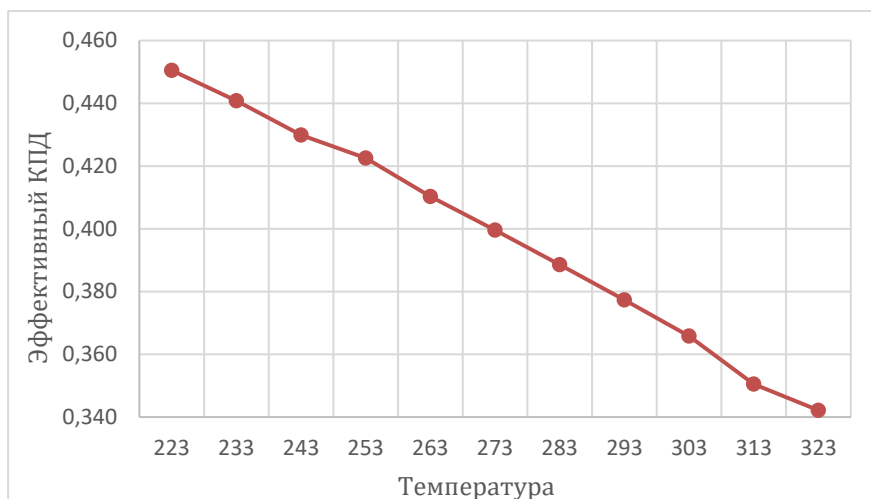


Рис. 10. Изменение эффективного КПД от внешней температуры

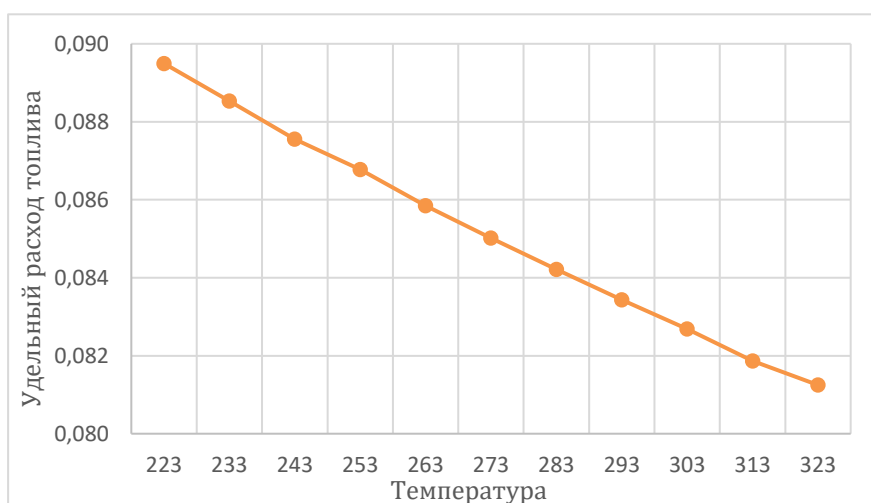


Рис. 11. Изменение удельного расхода топлива от внешней температуры

Наряду с исследованием рабочих процессов рассматриваемых схем ГТУ-004, необходимо выполнить прочностной анализ, включающий расчеты на прочность наиболее нагруженных элементов ГТУ с использованием различных методов расчета [6].

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены 3 варианта схемы ГТУ-004 для привода электрогенератора мощностью 4 МВт.
2. Повышение эффективного КПД возможно при усложненных схемах ГТУ-004. Это цикл с обращенным газогенератором (рис. 4) и цикл с рекуперацией тепла и перерасширением на выхлопе с помощью эжектора (рис. 7).
3. Усложненный цикл (рис. 4) с обращенным газогенератором на выхлопе позволяет получить эффективный КПД порядка 35 %.
4. Усложненный цикл (рис.7.) с рекуперацией тепла и перерасширением на выхлопе с помощью эжектора позволяет получить искомый эффективный КПД порядка 38 %.
5. Усложненный цикл (рис. 7) с эжектированием на выхлопе, для создания за турбиной разряжения порядка 0.065 МПа, требует детального исследования и дополнительных расчетов эжектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л.* Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. пособие. Т.1 / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. - М.: Машиностроение, 2008. - 201 с.
2. *Осипов Б.М., Титов А.В.* Автоматизированная система газодинамических расчетов энергетических турбомашин. Учебное пособие / Б.М. Осипов, А.В. Титов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – 277с.
3. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: Учебное руководство для вузов. – 5-е изд., перераб и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1991. – 600 с.
4. *Кулагин В.В., Кузьмичев В.С.* Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. 3-е изд. В 2 кн. Кн. 1. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ / В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев. – М.: Машиностроение, 2013. – 336 с.
5. *Шляхтенко С.М.* Теория и расчет воздушно – реактивных двигателей / Под ред. С.М. Шляхтенко. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.
6. *Великанова Н.П., Закиев Ф.К., Великанов П.Г.* Расчет на прочность основных деталей ГТД (Лабораторный практикум по дисциплине «Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок»): учебное пособие / Н.П. Великанова, Ф.К. Закиев, П.Г. Великанов. - Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н.Туполева, 2008. - 83 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ
ОБРАБОТКЕ МИКРОШЛИФОВАНИЕМ
COMPARATIVE ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELDS AT PROCESSING
BY MICRO-GRINDING

ГОРОДКОВА АНАСТАСИЯ ЕВГЕНЬЕВНА

Южно-Уральский государственный университет, (национальный
исследовательский университет), Челябинск, 454080, Россия

ТЭЗИС

Описана промежуточная стадия разработки комплексной имитационной модели процесса микрошлифования — апробацию разработанной теплофизической модели с помощью визуализации теплового воздействия режущего инструмента на заготовку. В статье отражены результаты сравнительного анализа температурных полей, построенных по расчетным и экспериментальным данным. Для получения расчетных данных применен программный комплекс «Расчет температуры обрабатываемой заготовки при микрошлифовании на станках с ЧПУ».

Ключевые слова: Высокоскоростные Процессы Резания, Микромеханическая Обработка, Микрошлифование, Теплофизика, Температурные Поля.

ABSTRACT

Approbation of the developed thermophysical model by visualizing the thermal effect of the cutting tool on the workpiece is described in the article. The article reflects the results of a comparative analysis of temperature fields constructed from calculated and experimental data. The software package «Calculation of the workpiece temperature during micro-grinding on CNC machines» was used to obtain calculated data.

Keywords: High-Speed Cutting Processes, Micromechanical Processing, Micro-Grinding, Thermal Physics, Temperature Fields.

Микрошлифование является одним из прогрессивных направлений высокоскоростной обработки. Его суть заключается в обработке особо точных изделий инструментом, диаметр которого не превышает 1 мм. Важным преимуществом метода является отсутствие ограничений со стороны обрабатываемого материала, в отличие от альтернативных методов изготовления микроизделий (нанопринтная литография, обработка лазером и др).

На данный момент ведутся работы по созданию комплексной имитационной модели и ее реализации в виде программного комплекса. Это поспособствует внедрению метода обработки на действующих предприятиях, так как нельзя заранее предопределить все возможные материалы и задачи, а следовательно, составить рекомендации.

Воздействие температур, возникающих в зоне резания, имеет негативное воздействие как на структуру и качество обрабатываемого материала, так и на режущий инструмент. Исследованию теплофизических особенностей процесса микрошлифования посвящены работы Sang Won Lee и Hyung Wook Park [1*3], однако они охватывают узкий спектр обрабатываемого материала. Выявление зависимостей и разработка модели микрошлифования позволит расширить область применения технологии, так как исчезнет необходимость в проведении большого количества экспериментов, что не

всегда возможно из-за темпа работы современных предприятий.

В статье представлен сравнительный анализ температуры, рассчитанной с помощью программы «Расчет температуры обрабатываемой заготовки при микрошлифовании на станках с ЧПУ», созданной по разработанной теплофизической модели микрошлифования, и экспериментальных данных, полученных при микрошлифовании пазов. Данные были собраны в результате прохождения стажировки в Индийском институте технологий Патны (г. Патны, Индия). В качестве обрабатываемого материала выбрано стекло ВК-7, так как оно обеспечивает минимальную погрешность при измерениях температуры тепловизором.

Полученные результаты позволяют наглядно оценить температуру, характер распространения тепла в заготовке и определить потребность в дополнительном охлаждении или изменении режимов резания.

На рис. 1 показаны температурные поля, данные для которых рассчитаны в программе «Расчет температуры обрабатываемой заготовки при микрошлифовании на станках с ЧПУ». Три варианта температурных полей соответствуют различному типу инструмента. Иллюстрации наглядно демонстрируют характер распространения тепла в заготовке. По оси абсцисс и ординат показано расстояние в пикселях: 1 пиксель = 330 мкм. Максимальная температура в 40 °С соответствует радиусу 0,6 мм от точки касания режущего инструмента с заготовкой в случаях а, б и радиусу 0,33 мм в случае в. К расстоянию 1,32 мм тепловое воздействие полностью рассеивается, и температура заготовки остается равной температуре окружающего воздуха.

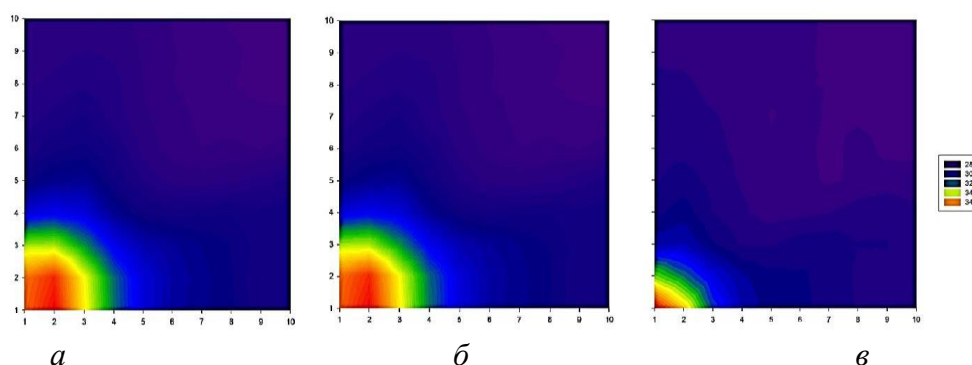


Рис. 1. Визуализация температурных полей при моделировании процесса микрошлифования

На рис. 2 показаны температурные поля, данные для которых получены эмпирическим путем. В некоторых случаях распространение тепла имеет неоднородный характер, по сравнению с расчетными данными, что связано с наличием случайных ошибок при измерениях. В целом диапазон температур и характер распространения тепла в случае экспериментальных и расчетных температурных полей совпадает — это означает адекватность разработанной теплофизической модели и программного комплекса.

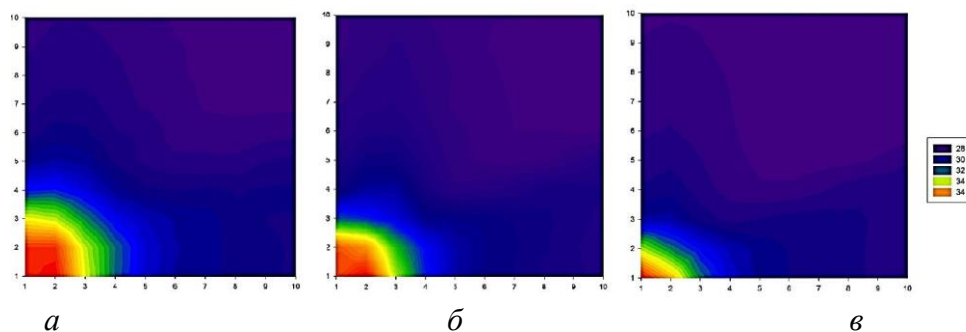


Рис. 2. Визуализация температурных полей при микрошлифовании

На рис. 3 показаны графики распределения температуры в заготовке, построенные по экспериментальным и расчетным данным.

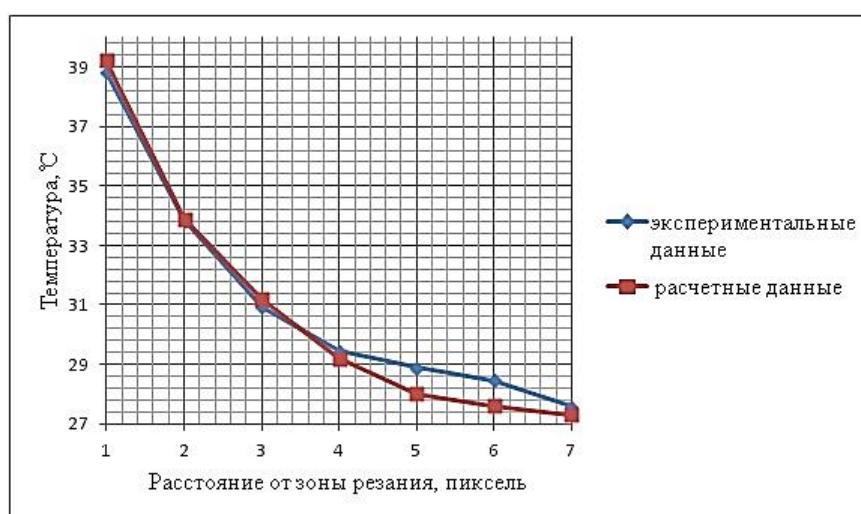


Рис. 3. График распределения температуры в заготовке при микрошлифовании

Полученные результаты показывают хорошую сходимость экспериментальных данных с расчетными, погрешность находится в пределах 5...8 %. Следовательно, позволительно использовать данную модель для прогнозирования температурных полей в зависимости от варьирования режимов резания и технологических параметров процесса микрошлифования.

Представленное исследование является частью общей модели микрошлифования, разработка которой позволит адаптировать технологию микрошлифования для ее реализации на станках с ЧПУ.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-932.2017.8

Литература

- [1] Lee P-H., Lee S.W., Lim S-W. Lee S-H., Ko H.S., Shin S-W. A Study on Thermal Characteristics of Micro-Scale Grinding Process Using Nanofluid Minimum Quantity Lubrication (MQL). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 1899-1909. DOI: 10.1007/s12541-015-0247-2.
- [2] Lee P-H., Lee S.W. Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, no.51, pp. 201-209. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.11.010.
- [3] Park H.W., Liang S.Y. Force modeling of microscale grinding process incorporating thermal effects. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, no. 44 (5), pp. 476-486. DOI: 10.1007/s00170-008-1852-3

**ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНОГО
СОЕДИНЕНИЯ СПОСОБОМ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С
ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И УЧЕТОМ МЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ НА РАЗНЫХ СТРУКТУРНО-МАСШТАБНЫХ
УРОВНЯХ**

**РЗАЕВ РАДМИР АДильБЕКОВИЧ
ЧУЛАРИС АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Астраханский государственный университет, Астрахань, 414056, Россия

ТЭЗИС

Исследовано формирование сварного соединения с учетом механизмов пластической деформации при сварке трением с перемешиванием. Выявлены зависимости между углом наклона инструмента на мощность при такой сварке. Зависимость позволяет утверждать, что на третьем участке кривой свариваемый металл находится в сверхпластическом состоянии. При стремлении к увеличению теплового вклада пина в соединение представлены изменения конфигурации и формы пина инструмента. Рассмотрен вопрос об изменении механизмов пластической деформации на разных структурно-масштабных уровнях.

Ключевые слова: Сварка Трением С Перемешиванием, Мощность, Механизм Образования, Сверхпластическое Состояние, Однородное Соединение.

ABSTRACT

This article is devoted to research of the formation of a welded joint with allowance for the mechanisms of plastic deformation in friction stir welding (FSW). Dependences between the angle of inclination of the instrument on the power at the FSW are revealed. The dependence allows us to state that in the third section of the curve the weld metal is in the superplastic state. With the desire to increase the thermal contribution of the pin to the connection, changes in the configuration and shape of the tool pin are presented. The problem of changing the mechanisms of plastic deformation at different structural-scale levels is considered.

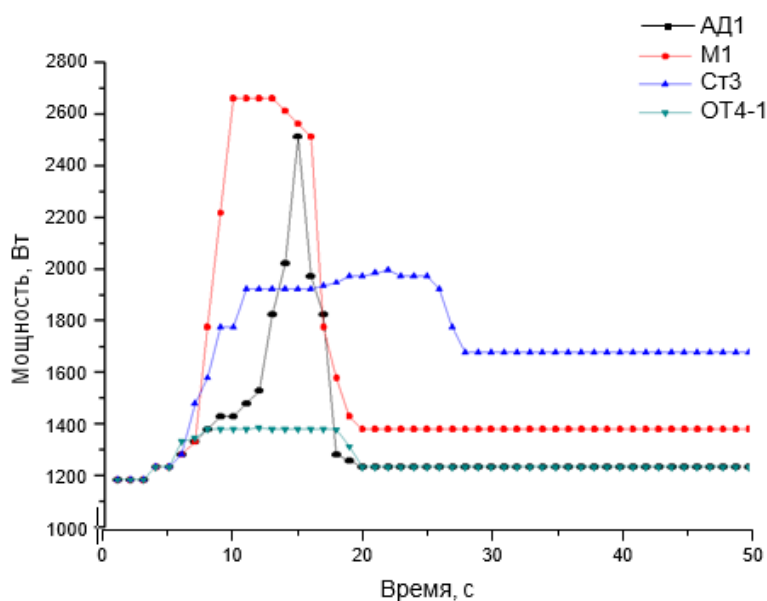
Keywords: Friction Stir Welding, Power, Formation Mechanism, Superplasticity State, Similar Joining.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) металлов и сплавов предполагает введение вращающегося пина инструмента в поверхностные слои свариваемых материалов для генерации (выделения) тепла в первые секунды (3...5 с.) процесса трения пина и торца заплечика. В месте контакта в результате процесса «сухого» трения этих частей инструмента со свариваемым металлом появляется тепловой поток. На структурно-микромасштабном уровне поверхностные зерна вовлекаются в пластическую деформацию, которая реализуется за счет движения скольжением решеточных дислокаций вследствие наличия градиента деформации [1, 2]. Однако в крупнокристаллических металлах большинство дислокаций заблокированы атмосферами Коттрелла и Судзуки, вследствие чего их старт затруднен и для распространения пластической деформации требуются источники подвижных дислокаций, в качестве которых могут выступать большеугловые границы зерен — их тройные стыки. Запуск последних осуществляется вводимым в свариваемый металл инструментом, с помощью которого в пластическую деформацию вовлекаются соседние в слое и по глубине упругоде-

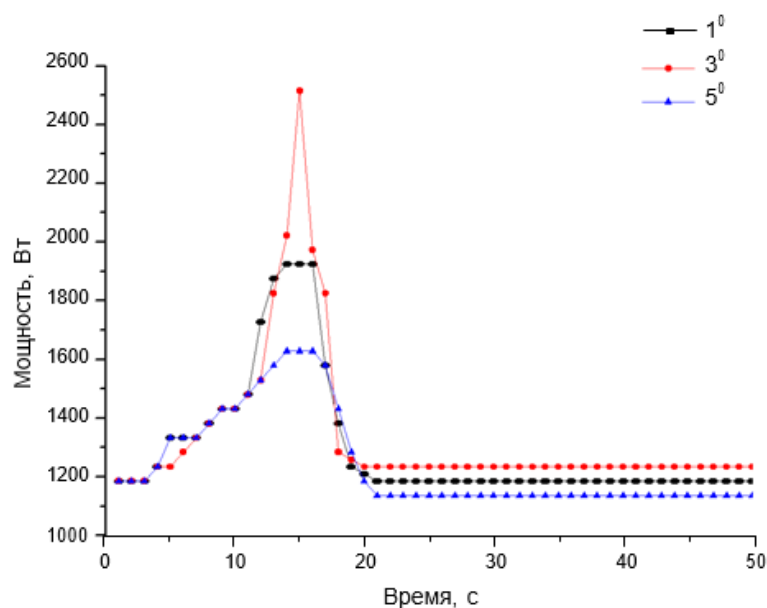
формированные зерна, обеспечивая расширение зоны пластической деформации уже на глубинные слои металла, располагающиеся на первом или втором структурно-мезоскопическом масштабном уровнях[3–5].

Благодаря заглоблению вращающегося и перемещающегося вдоль кромок пина инструмента происходит формирование нескольких (по толщине свариваемых пластин) мезозон локализаций пластической деформации и их расширение на все поперечное сечение или толщину свариваемых деталей. Этот этап характеризует переход локальной пластической деформации с мезо- на макромасштабный уровень, т. е. на завершение стадии микропластической деформации по толщине изделия. Переход на структурно-мезомасштабный уровень, когда совместно деформируются конгломераты, блоки зерен благодаря запуску ротационных механизмов пластической деформации и переходу к механизму адгезионного трения и, как результат, повышения температуры, в зоне сварки, особенно в области торца пина, начинают функционировать основные механизмы сверхпластичности мезоуровня — зернограничная диффузия и зернограничное проскальзывание [6–8].

Поэтому кривая, описывающая изменение энергозатрат на различных этапах образования соединений при СТП (рис. 1) имеет три характерных участка распределения энергии. Первый — левый, возрастающий, отвечает за энергозатраты в период ввода инструмента в свариваемые детали и возникновения «сухого» трения на микро- и первом мезомасштабном уровнях пластической деформации. Второй — средний, крутопадающий, демонстрирует наступление стадии адгезионного трения на втором мезомасштабном уровне при непрерывающейся тепловой подпитки, особенно в зоне пина, пластической деформации металла под действием пина в направлении вектора сварки и перехода в состояние сверхпластичности и термической стабилизации сварного соединения. Третий — правый, «гладкий» участок кривой, параллельный оси абсцисс, указывает на протекание процесса образования сварного соединения СТП в установившемся режиме сверхпластичности на последнем макромасштабном (по всей толщине свариваемых деталей) уровне пластической деформации при экономном и стабильном в энергетическом отношении режиме СТП.



а



б

Рис. 1. Зависимость мощности от времени:

а — при угле наклона инструмента 3° для алюминиевого АД1, медно-го М1, титанового ОТ4-1 сплавов и стали Ст.3пс; *б* — для углов наклона инструмента 1° , 3° , 5° алюминиевого сплава АД1

Описанный характер изменения энергозатрат при образовании сварных соединений СТП был установлен при сварке алюминиевого сплава АД1, медного сплава М1, сталей разных структурных классов (Ст.3, Сталь 20, Сталь 12Х18Н10Т), технического ВТ1-0 и псевдо-□-сплава титана ОТ4-1 (см. рис. 1).

Важной составляющей процесса СТП является инструмент, его размеры и конфигурация. Необходимость создания при СТП термомодеформационных условий перевода определенного объема металла свариваемых кромок при заданной их толщине в СПС предопределила геометрические формы и размерные соотношения составных частей сварочного инструмента: выступающей части — пина — на толщину свариваемых деталей и пропорциональной ей диаметру; утолщенной части инструмента, генерирующей основной тепловой поток в свариваемые детали, — заплечика диаметром $D_{зп} = (2 - 2,5)d_{пин}$, реально приближающейся к ширине стыкового сварного шва, выполненного дуговыми способами сварки. Обычно используют заплечик с плоской или рельефной торцевой поверхностью, воздействующей на поверхностные объемы металла кромок свариваемых деталей, вовлекаемых в объем сварного шва. Необходимость накопления металла в СПС для формирования плотного без пор сварного шва с гарантированным проваром по толщине при значительном термическом и пластическом градиенте в начальные моменты образования шва потребовала разработки конструктивных решений и отхода от гладкой цилиндрической формы пина инструмента. Выполнение требования обеспечения стартового провара при минимальном значении аксиальной силы, прикладываемой при введении инструмента в стык между свариваемыми деталями, трансформировал цилиндр в усеченный конус. Стремление к увеличению теплового вклада пина в соединение (более 10 %), вначале было реализовано путем нарезания резьбы с крупным шагом, а в последствии перехода от кругового цилиндра, последовательно к пину треугольного, квадратного, шестигран-

ного поперечного сечения. Стремление вовлечь в СПС повышенный объем свариваемого металла привело к созданию на боковых гранях многогранного пина цилиндрических сегментов (рис. 2).

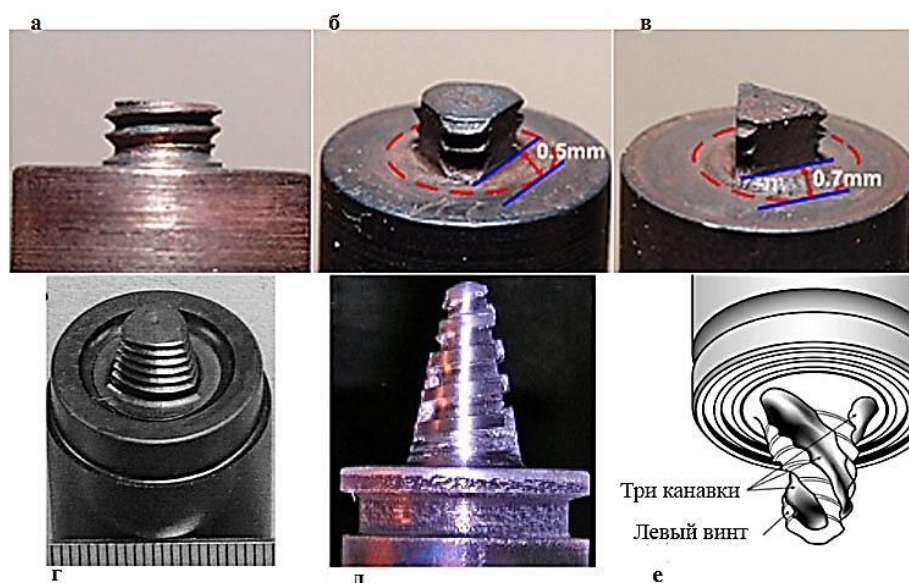


Рис. 2. Эволюция изменения формы инструмента для СПП:

a — цилиндрический с резьбой; *б* — трехгранная с плавным переходом с резьбой; *в* — трехгранник с резьбой; *г* — конус с малым шагом резьбы; *д* — конический с резьбой; *е* — конусообразный с тремя канавками с резьбовой

Значительное влияние на объем металла, вовлекаемого в формирование сварного шва и его ядра, оказывает такой параметр процесса СПП, как угол отклонения оси инструмента от вертикали «углом назад». Так как от размера угла зависит эффективность превращения фрикционной энергии трения в тепловую, напряжение пластического течения твердого металла (сплава) в направлении сварки, объем пластифицированного под воздействием вращающегося пина свариваемого металла, принимающего участие в формировании геометрии сварного шва, в том числе провара по толщине, и его чешуйчатости.

В практике СПП различные исследователи использовали углы наклона от одного до пяти градусов. Замеры энергозатрат при указанных углах атаки (см. рис. 1), при идентичных значениях остальных параметров процесса СПП в условиях соединения алюминия, меди, стали и титана, показали, что кривая, описывающая закономерность изменения энергозатрат имеет различия только на начальных стадиях процесса СПП в виде длительностей и амплитуд зафиксированной энергии первой и второй стадий до достижения стабильности процесса. Вероятно, это можно объяснить кинетикой преодоления различных мезомасштабных уровней пластической деформации на всех экспериментальных материалах, с разной вязкостью и напряжениями пластического течения свариваемых материалов.

Анализ относительных энергозатрат при СПП алюминия, меди, сталей и титана показал на первый взгляд парадоксальный результат в отношении титана (см. рис. 1). Однако если принять во внимание основные механизмы, ответственные за переход в СПС [7–10], то следует учесть, что в отличие от остальных металлов, где в достижении сверхпластичности, кроме динамической или постдинамической непрерывной рекристаллизаций, аномальной и/или статической — собирательной рекристаллизации

и при переходе на мезомасштабный уровень пластической деформации, и зернограницного проскальзывания, получают развитие процессы (небольших кристаллографических сдвигов по всему объему материала) ограниченного смещения атомов на расстояния менее 20 % параметра кристаллической решетки, которые наблюдаются при двойниковании и полиморфном ($\beta \leftrightarrow \alpha'(\alpha'')$) превращении, имеющем место в титановых сплавах [7]. В результате этих превращений структура титанового сплава становится более дисперсной, что повышает эффект сверхпластичности за счет образования множественных зон межзеренного скольжения [7, 9-11], а также в 3–5 раз меньшего значения напряжения пластического течения, характерного для алюминия, стали, меди в условиях сверхпластичности [12].

Таким образом, привлечение современных представлений о многоуровневой пластической деформации металлов позволило раскрыть этапы формирования сварных соединений в условиях твердофазной сварки трением с перемешиванием пластичных черных и цветных конструкционных металлов и сплавов.

Анализ данных энергетических и металлофизических исследований позволил выявить основные механизмы пластической деформации, способствующие переходу свариваемых материалов в СПС в условиях процесса сварки.

Литература

- [1] Дударев Е.Ф., Почивалова Г.П., Колобов Ю.Р., Бакач Г.П., Скосырский А.Б., Жоровоков М.Ф. Микропластическая деформация субмикроструктурного титана при комнатной и повышенной температурах. *Известия вузов. Сер. Физика*, 2012, т.55, № 7, с. 88-97.
- [2] Дударев Е.Ф., Почивалова Г.П., Колобов Ю.Р., Галкина Е.Г., Кашин О.А., Гирсова Н.В. Влияние глубокой пластической деформации и последующего отжига на истинное зернограницное проскальзывание в крупнокристаллическом и субмикроструктурном титане *Физическая мезомеханика. Спец. выпуск*, 2004, № 7, с. 30-33.
- [3] Панин А.В. *Масштабные уровни деформации в поверхностных слоях нагруженных твердых тел и тонких пленках*. Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. Наук, Томск, 2006, 19 с.
- [4] Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. *Структурные уровни деформации твердых тел*. Новосибирск, Наука, 1985, 229 с.
- [5] Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Природ локализации пластической деформации твердых тел. *Журнал физической физики*, 2007, т. 77, вып. 8, с. 62-69.
- [6] Грабовецкая Г.П. *Зернограницная диффузия и ползучесть субмикроструктурных ме-таллических материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации*. Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук, Томск, 2008, 34 с.
- [7] Бабарэко А.А., Эгиз И.В., Хорев А.И., Мартынова М.М., Самарин Е.Б. Сверхпластичность титановых сплавов разных классов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1995, № 6, с. 30-35.
- [8] Боголюбова Д.Н., Гвоздев А.Е., Пантюхин О.В. Исследование закономерностей проявления эффекта динамической рекристаллизации в металлах. *Известия ТулГУ. Сер. Металловедение*, 2001, вып. 4, с. 276-286.
- [9] Галеев Р.М., Валиахметов О.Р., Салищев Г.А. Динамическая рекристаллизация крупнокристаллического титанового сплава ВТ 30 в ($\alpha + \beta$) области. *Металлы*, 1990, № 4, с. 97-103.

- [10] Нестерова Е.В., Рыбин В.В. Механическое двойникование и фрагментация технически чистого титана на стадии развитой пластической деформации. ФММ, 1985, т. 59, вып. 2, с. 396-406.
- [11] Манохин С.С. *Закономерности фазовых и структурных превращений в нелегированном титане марки ВТ1-0*. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, Белгород, 2012, 19 с.
- [12] Моисеева И.В., Пищак В.К. Деформация железа и титана в области температур полиморфного превращения. ФММ, 2008, № 2, с. 51-57.