



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения  
им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

## **«Разработка научных основ высокоэффективной технологии и оборудования для изготовления в условиях сверхпластичности широкой номенклатуры полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов и сталей»**

*Соглашение о предоставлении субсидии от 08 июля 2014 г. № 14.604.21.0091  
Минобразование России ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным  
направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»  
Приоритетное направление: «Транспортные и космические системы»*

*Научный руководитель, гл. науч. сотр., д.т.н., проф. Ф.З. Утяшев  
Заместитель научного руководителя темы, зав. лабораторией, к.т.н. Р.Ю. Сухоруков*



## Цель выполнения прикладных научных исследований (ПНИ)

***Разработка инновационной технологии и оборудования для раскатки широкой номенклатуры ответственных деталей – полых валов из современных жаропрочных сталей и сплавов для газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения, позволяющих значительно увеличить ресурс валов и коэффициент использования металла при их изготовлении.***

***Реализация проекта направлена на решение проблемы создания высокоэффективного производства полых длинномерных валов широкой номенклатуры для роторов авиационных двигателей и наземных энергетических установок, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, из сталей и жаропрочных сплавов.***

***Выполнение проекта позволит разработать конкурентоспособные технологии сверхпластичной раскатки полых валов ГТД из стали и жаропрочных сплавов.***

**Основание: Соглашение № 14.604.21.0091 о предоставлении субсидии от 08 июля 2014 г.**

**Срок выполнения: 2014-2016 гг.**

**Финансирование: 25 млн. рублей**

**Объем привлеченных внебюджетных средств : 8 млн. рублей**



## Основные задачи, решаемые в проекте

### 1. Разработка математических моделей:

- процесса измельчения зерен в металлах и сплавах для формирования УМЗ структуры,
- деформационно-термического процесса, обеспечивающего формирование УМЗ структуры в заготовках из промышленных сплавов,
- процесса раскатки валов из жаропрочных сплавов и сталей в условиях сверхпластической деформации.

### 2. Верификация режимов обработки, обеспечивающих подготовку в промышленных сплавах УМЗ структуры и режимов окончательной термической обработки, необходимых для реализации процесса раскатки в условиях сверхпластичности.

### 3. Физическое моделирование процесса раскатки с использованием модельного сплава Вуда с целью определения :

- формы и размеров заготовки,
- скорости вращения заготовки и усилия зажима,
- усилия поперечного перемещения инструмента и глубины внедрения раскатного ролика в тело заготовки,
- Усилия и скорости продольного перемещения инструментального узла.

### 4. Разработка ЭКД и изготовление заготовок из промышленных сплавов для сверхпластической раскатки валов.

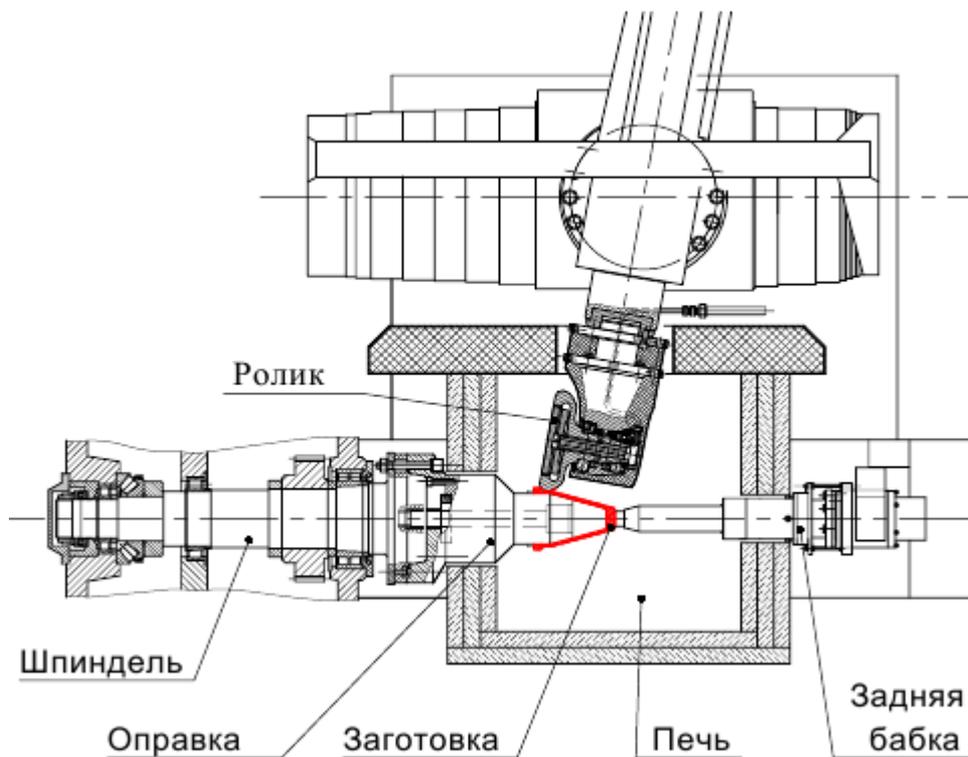
### 5. Разработка ЭКД и изготовление камеры нагрева, инструментального узла, охлаждаемого шпиндельного узла и макета стана для раскатки валов.

### 6. Изготовление двух типов полых валов из промышленных сплавов и разработка ТЗ на создание оборудования для раскатки.

### 7. Разработка лабораторного регламента (экспериментальной технологического процесса) для раскатки полых валов.

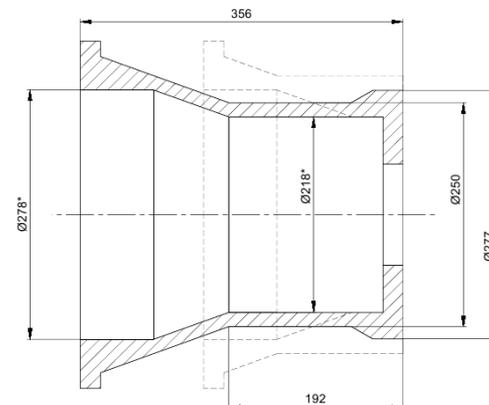


## Макет стана для изотермической раскатки полых валов

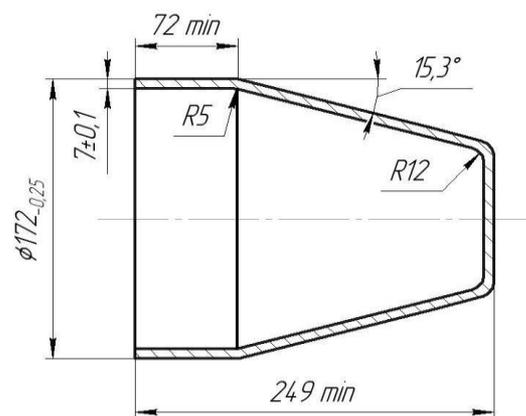


температура в печи 900 ° – 950 ° С  
 материал: - сплав ЭК79, ЭИ962-Ш, ВТ9

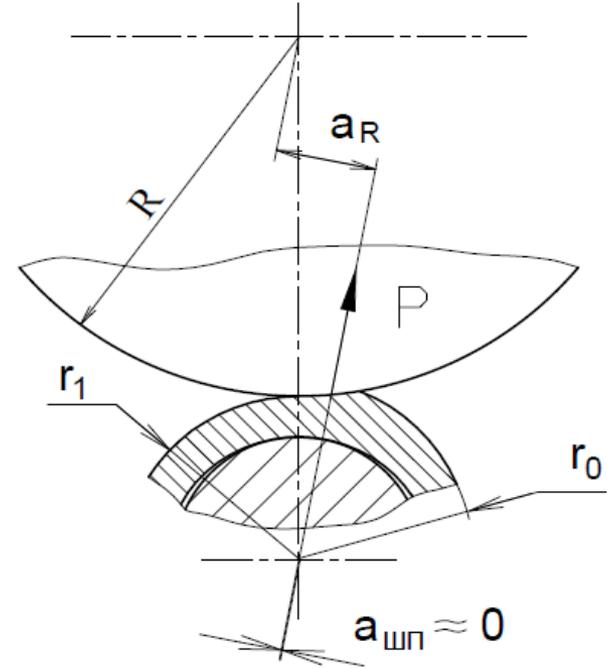
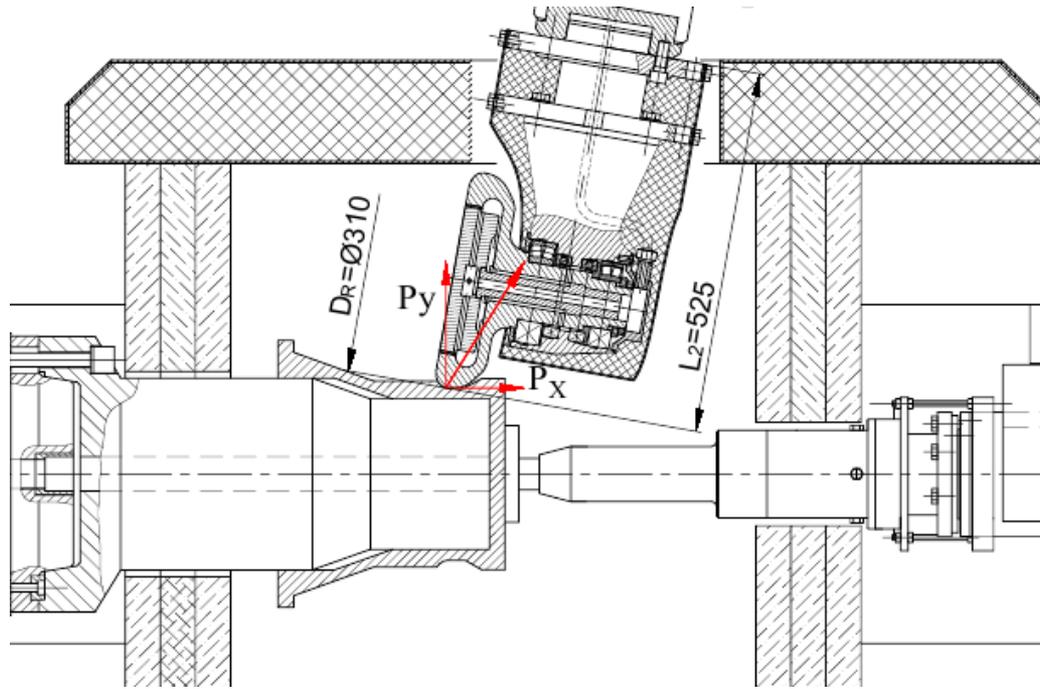
### Образцы валов: из штампованной заготовки



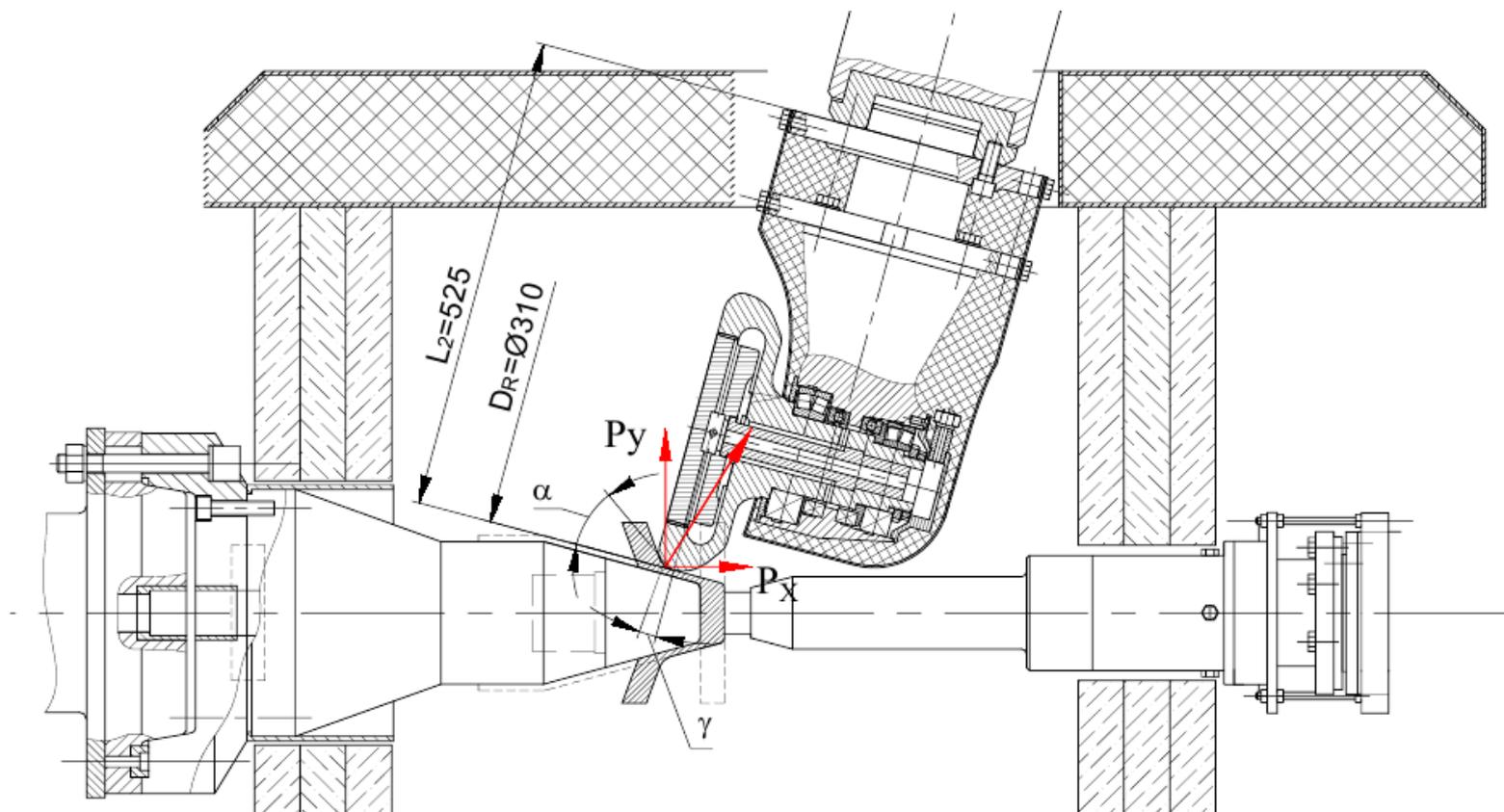
### из листовой заготовки



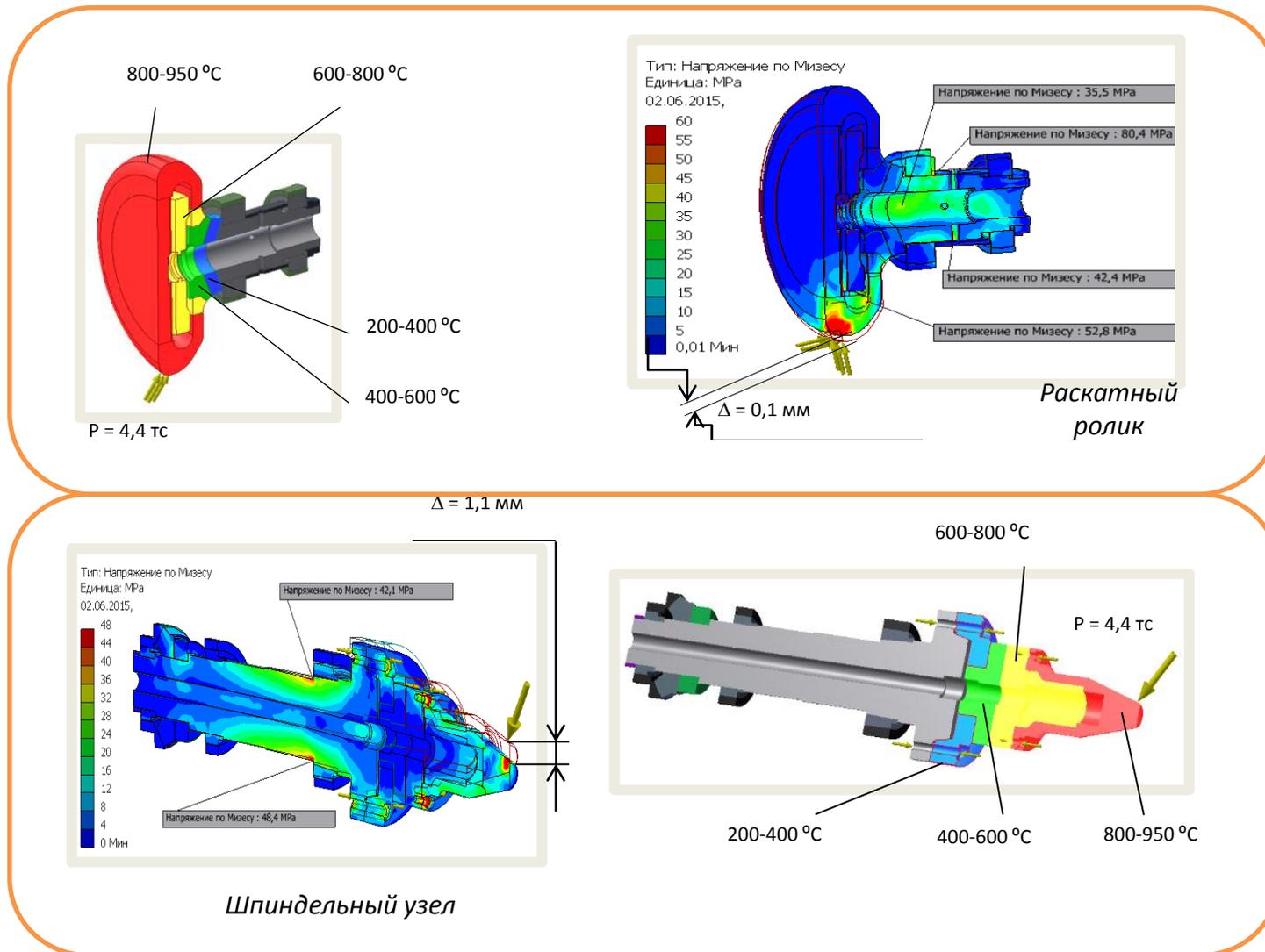
## Раскатка вала с развитым цилиндрическим участком



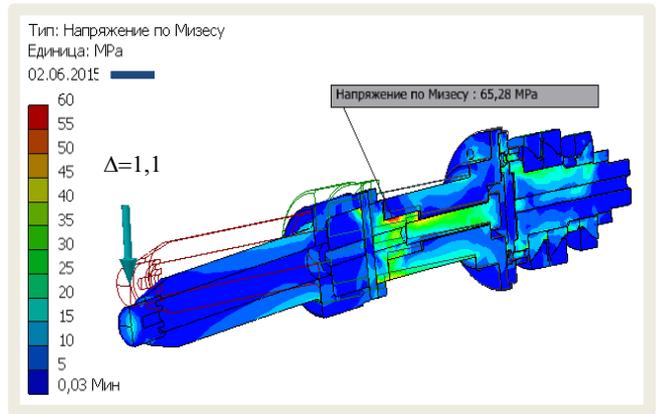
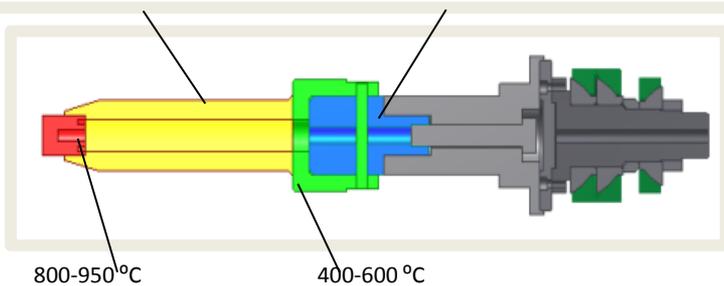
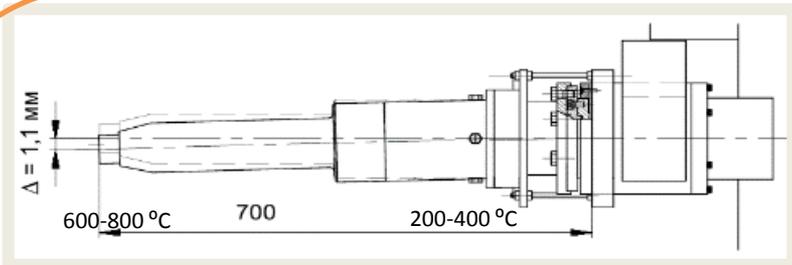
## Раскатка вала с развитым коническим участком



## Результаты исследования напряженно-деформированного состояния основных узлов стана

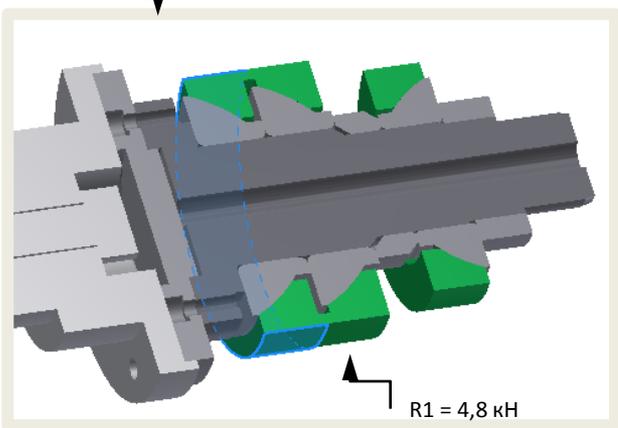


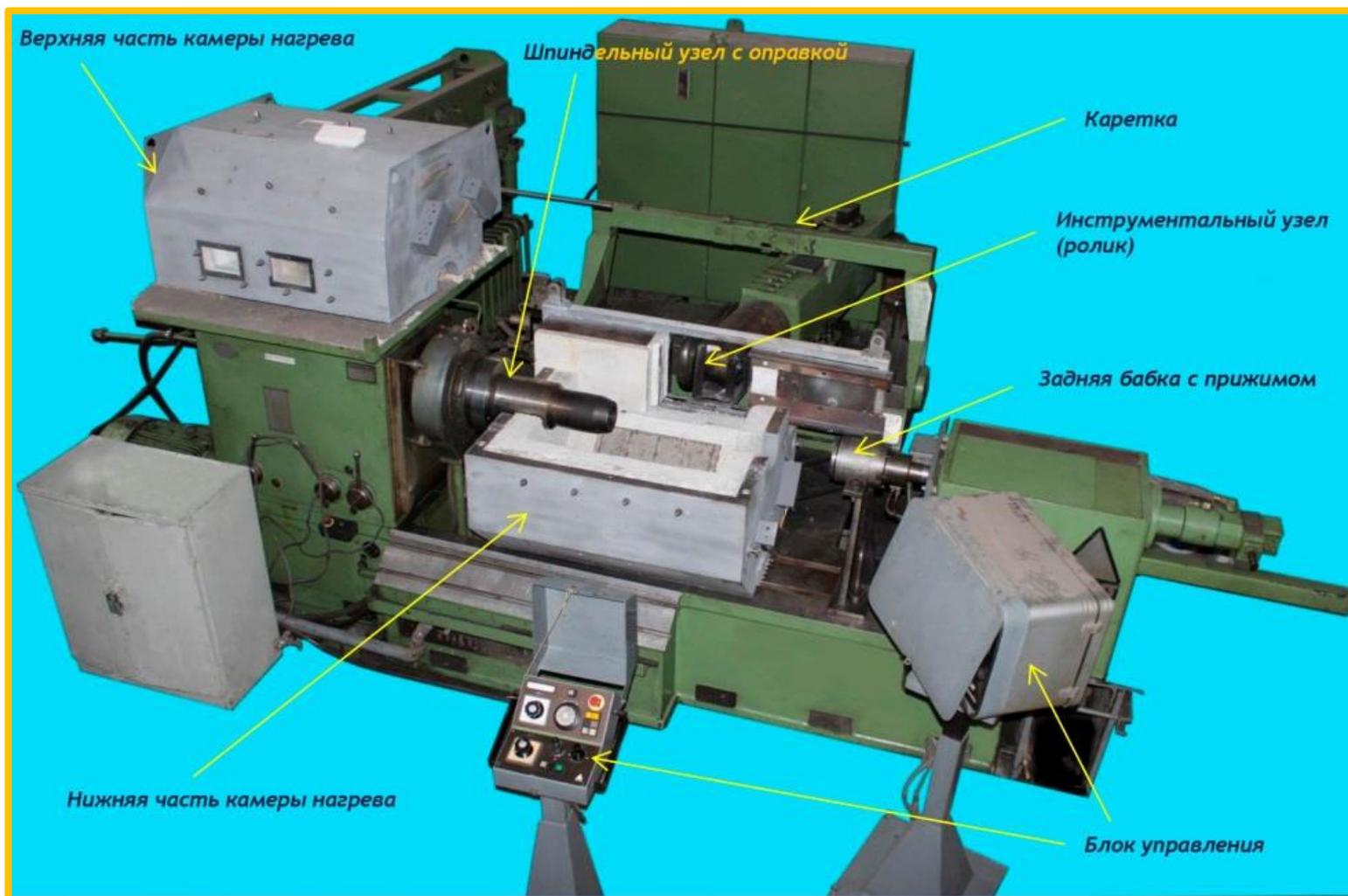
## Результаты исследования напряженно-деформированного состояния основных узлов стана



Задняя бабка

Сила реакции		Реактивный момент	
Всего	4772 Н		2,072e+05 Н мм
X	112,1 Н		-2,059e+05 Н мм
Y	4410 Н		-2383 Н мм
Z	1817 Н		-2,335e+04 Н мм





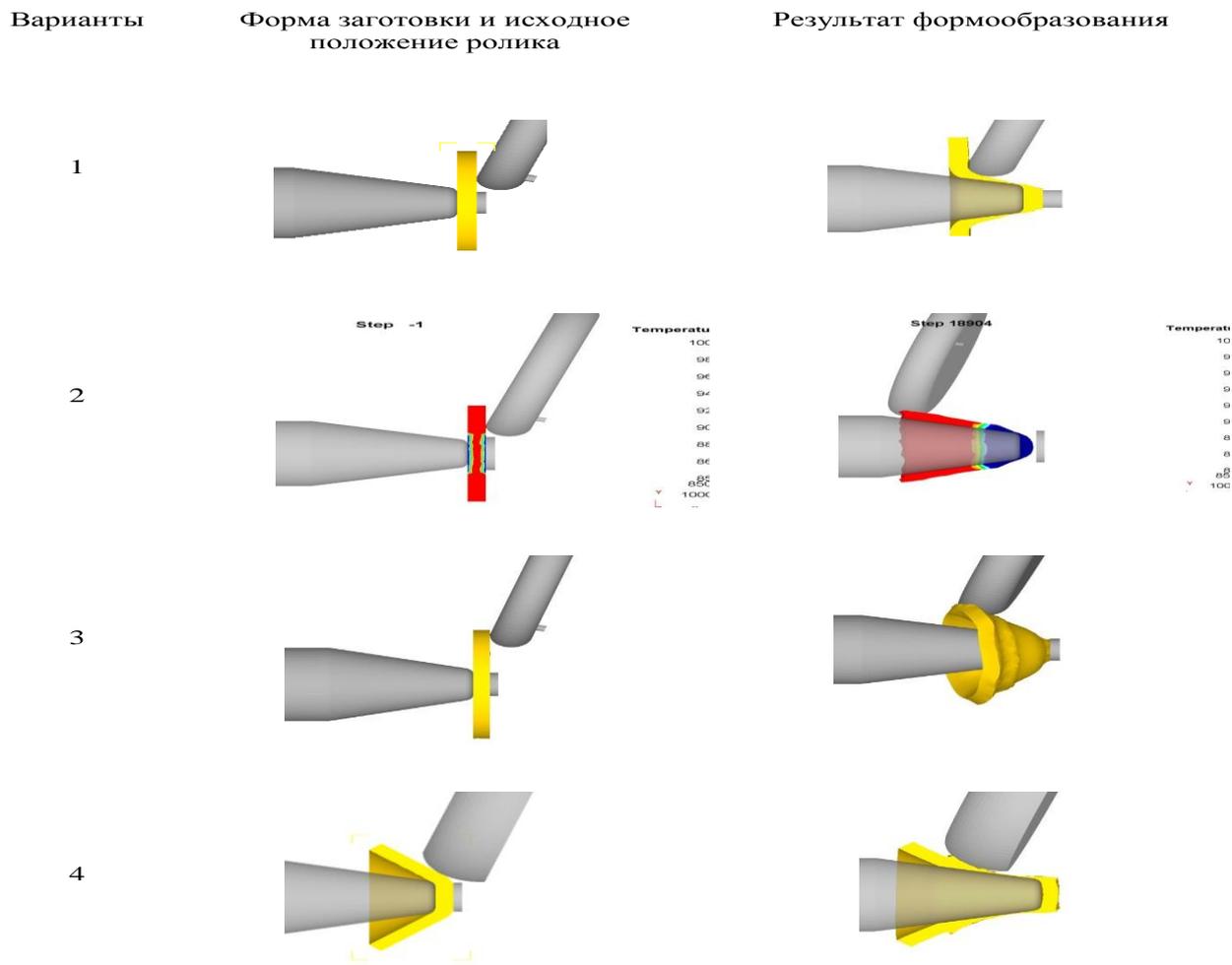
Макет стана для раскатки полых валов

## Результаты компьютерного моделирования:

варианты 1 и 2 – степень утонения заготовки в переходной зоне при различных значениях температуры: вариант 1 – 900 С, вариант 2 – 1000 С;

вариант 3 - раскатка заготовки без контактов ролика с оправкой – «гофрообразование» при температуре 900 С;

вариант 4 - утонение заготовки в зоне конического участка при температуре 900 С.



## Физическое моделирование процесса раскатки модельного вала

Изготовление модельной заготовки из сплава Вуда в виде «чашки».



Оснастка для  
штамповки



Штамповка  
заготовки



Осевой разрез  
заготовки

**Раскатка модельного вала из сплава Вуда на токарном станке:**

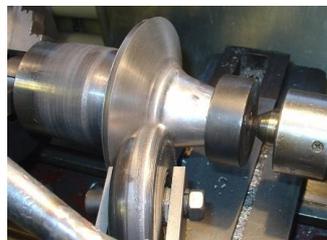
а – начало процесса раскатки заготовки в виде «чашки»;

б – завершение процесса раскатки;

в – разрез модельного вала в осевом сечении.



а)



б)



в)

### Образец полого вала из модельного сплава ЭИ 962-Ш после раскатки



### Эскиз детали из никелевого сплава ЭК79.

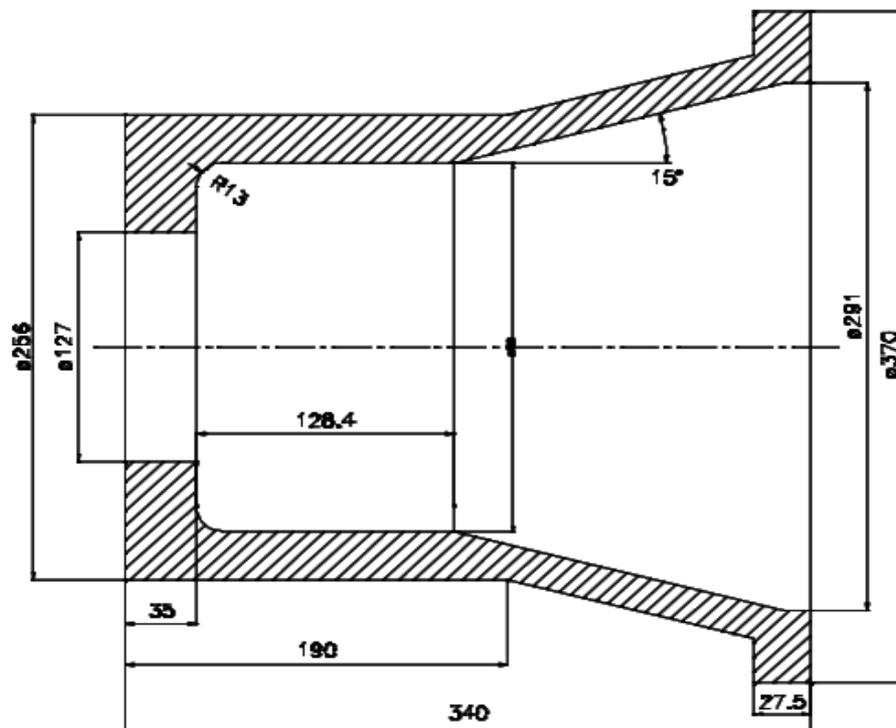
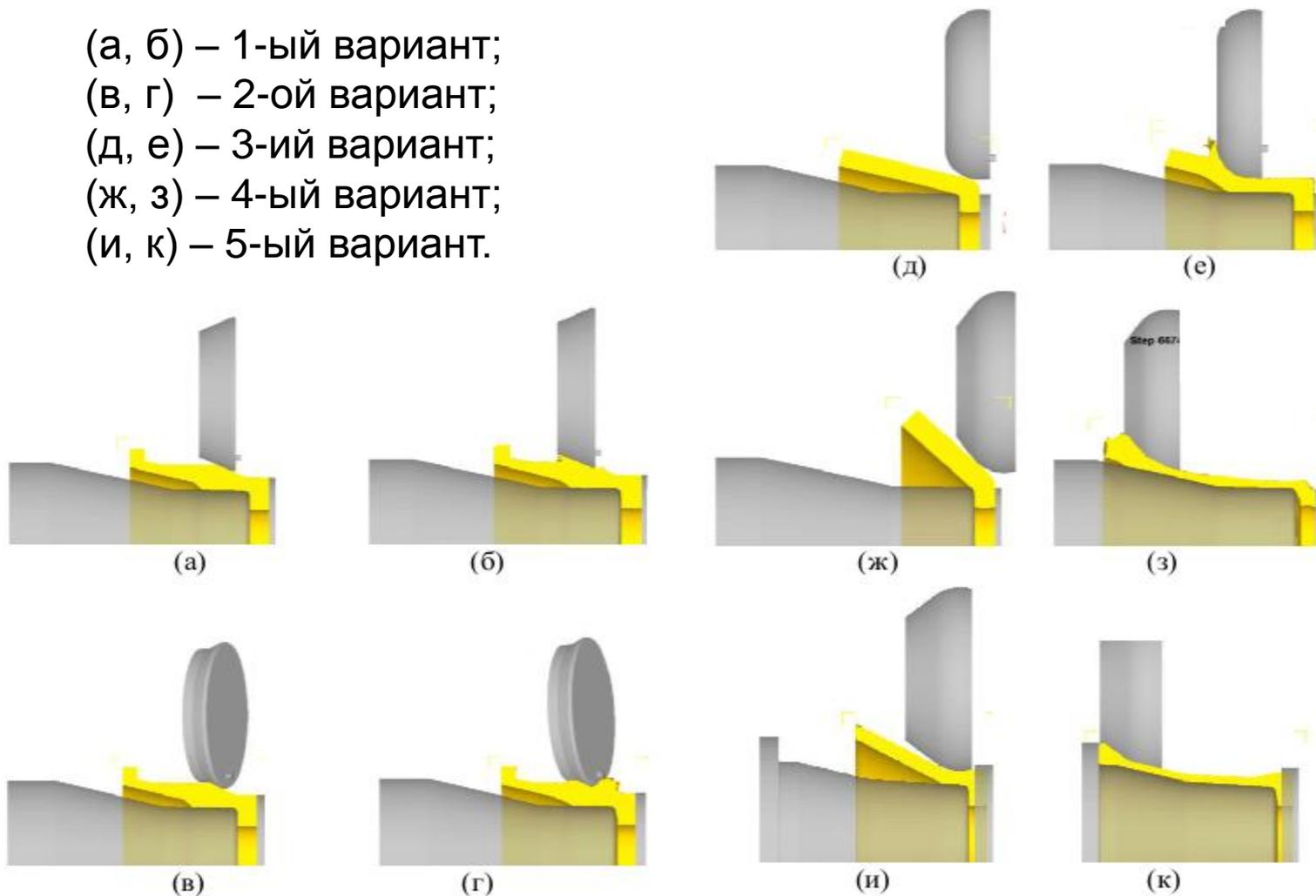


Таблица. Химический состав никелевых сплавов.

Сплав	Mo	Co	Al	W	Ti	Cr	Nb	V	Fe	Ni
ЭК79	4,0- 5,0	12,5- 16,0	2,8- 3,3	2,0- 3,0	2,4- 2,8	10,0- 12,0	2,5- 3,0	0,4- 0,8	<1,0	Осн.
FGH96	4,0	13,0	2,2	4,0	3,7	16,0	0,8	-	-	Осн.

### Моделирование процесса раскатки полого вала из никелевого сплава ЭК79.

- (а, б) – 1-ый вариант;
- (в, г) – 2-ой вариант;
- (д, е) – 3-ий вариант;
- (ж, з) – 4-ый вариант;
- (и, к) – 5-ый вариант.



## Схема технологического процесса изготовления вала (лабораторный регламент)



## Механические свойства материала раскатанного вала из сплава ЭИ 962-Ш

Марка сплава	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Отн. удлинение, $\delta$ , %	Отн. сужение, $\psi$ , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость по Бринелю (d отпечатка, мм)
ЭИ962-Ш (среднее значение)	1162	1018	13	68	180	3,2
ЭИ962-Ш (исходный материал по ТУ)	980	835	12	50	60	3,10-3,45

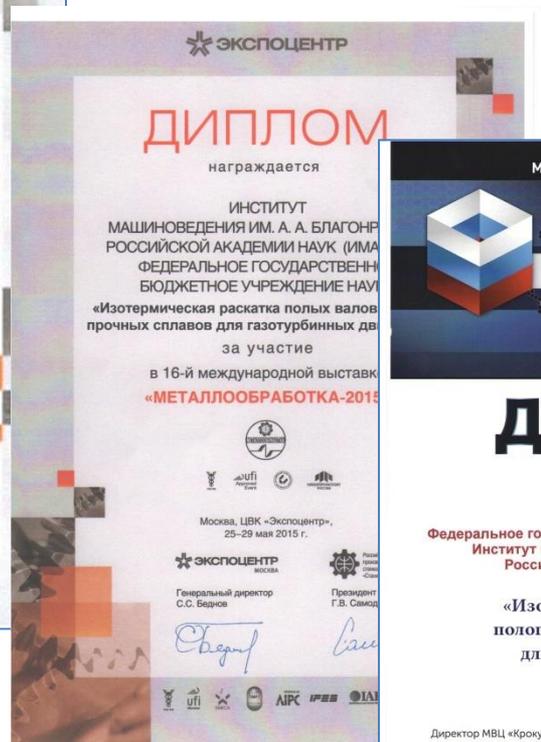
## ПОКАЗАТЕЛИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Значение		
			2014 год	2015 год	2016 год
Индикаторы					
1	Число публикаций: - WEB of Science - Scopus - РИНЦ	единиц	1	11	6
2	Число патентных заявок, поданных по результатам исследований и разработок, не менее	единиц	0	1	2
3	Доля исследователей в возрасте до 39 лет в общей численности исследователей – участников проекта, не менее	процентов	35	35	35
4	Объем привлеченных внебюджетных средств	млн. рублей	2,5	3	2,5

## ПОКАЗАТЕЛИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА

Показатели					
1	Средний возраст исследователей – участников проекта, не более	лет	47	46	45
2	Количество мероприятий по демонстрации и популяризации результатов и достижений науки, в которых приняла участие и представила результаты проекта организация – исполнитель проекта, не менее	единиц	0	7 докладов на 4 международных конференциях	9 на 2 международных конференциях
3	Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных по результатам исследований и разработок	единиц	0	0	1
4	Международные выставки	единиц	2	2	3
5	Использование при выполнении ПНИ научного оборудования центров коллективного пользования научным оборудованием	единиц	1	0	1

## МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ ( 2014 – 2016 )



Итого 7 дипломов на международных выставках



## Выводы

- **Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили:**
  - определить условия деформирования при раскатке, влияющие на структурообразование;
  - **обосновать термомеханические и энергосиловые параметры процесса раскатки в условиях сверхпластичности;**
  - разработать технические требования к оборудованию для раскатки валов- определить оптимальную температуру раскатки, обеспечивающую получение требуемых структур;
  - Разработать математическую модель раскатки валов в условиях сверхпластичности.
- **Проведена верификация режимов обработки, обеспечивающих подготовку УМЗ структуры в промышленных сплавах.** В результате проведенных испытаний были установлены оптимальные режимы обработки никелевых сплавов в изотермических условиях с величиной относительной деформации от 10 до 85 % и со скоростью деформации 10-5-10-3с-1. Для сплава ЭК79 температура составляет 1075-1080оС, скорость деформации 10-4-10-3с-1, коэффициент  $m=0,53$ , а при скорости 10-3-10-2с-1 ,  $m=0,48$ . Размер зерна  $\gamma$ - фазы лежит в пределах 2-10 мкм,  $\gamma'$ -фазы 1,4-5 мкм. Структура однородна. **Напряжение течения материала при установленных режимах раскатки практически не зависит от степени деформации.**
- **Выполнена верификация на лабораторном оборудовании режима окончательной термической обработки.** Температура деформации составляла для сплава ЭК79  $1075\pm 25$ оС. Заготовка с предварительно подготовленной структурой деформировалась на 50-70% со скоростью 10-2с-1. Проведённый анализ показал, что в образцах сохранилась УМЗ структура типа микродуплекс. Средний размер зерна  $\gamma$  и  $\gamma'$ -фазы в сплаве ЭК79 составлял 6,3 и 3,1 соответственно. **Прочностные свойства сплава ЭК79 после сверхпластической деформации и окончательной термообработки превышал уровень ТУ на 10-20%, а пластические свойства в 1,5 раза.**
- **Разработана методика физического моделирования процесса раскатки.** Для этого был выбран легкоплавкий сплав Вуда, который при комнатных температурах находится в состоянии сверхпластичности и обладает близкими характеристиками к используемым промышленным сплавам ЭК79 и ЭП742, находящихся при температуре сверхпластичности. Физическое моделирование позволяет установить термомеханические и энергосиловые характеристики процесса раскатки, а также размеры и форму заготовок под раскатку.
- **Разработанная технология раскатки валов в условиях сверхпластичности и окончательной термической обработки** позволяет обеспечить требуемый размер зерна  $\gamma$ - фазы и  $\gamma'$ -фазы и обеспечить прочностные свойства на 10-20% выше, чем в существующих технических условиях на эти материалы. При этом пластичность материала возрастает практически в 4,5 раза.



## Выводы (продолжение)

- **При исследовании структуры и механических свойств на тестовых образцах раскатанного полового вала были получены:** предел прочности - до 1167,8 МПа, при значениях ТУ – 980 МПа; предел текучести – до 1020,3 МПа при значениях ТУ – 835 МПа; ударная вязкость (КСУ) - 70-72 Дж/см<sup>2</sup> при значениях ТУ – 60 Дж/см<sup>2</sup>. Проведенные испытания показали превышение механических свойств материала образцов (более 10%) от значений, указанных в ТУ, а исследование микроструктуры сплава ЭИ962-Ш показало, что размер  $\gamma$  зерен менее 15 мкм, что соответствует требованиям ТЗ.
- **Результаты исследовательских испытаний Макета СРВ подтвердили получение требуемых кинематических, термомеханических и энергосиловых параметров,** обеспечивающих сверхпластическую раскатку валов из промышленного сплава: усилие на инструменте - ролике – до 100 кН, скорость перемещения инструмента - ролика в продольном направлении – до 10 мм/мин, скорость внедрения ролика в тело заготовки от 1,2 до 2,0 мм/мин, скорость вращения шпиндельного узла – от 0,5 до 5 об/мин, температуру в зоне контакта инструмента - ролика и заготовки – от 850 до 1150оС с точностью  $\pm 10$ оС. Полученные результаты были использованы при разработке ТЗ на создание промышленного образца.

# Благодарю за внимание !

