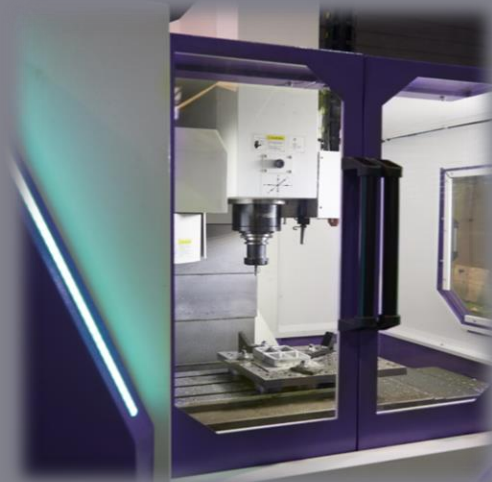
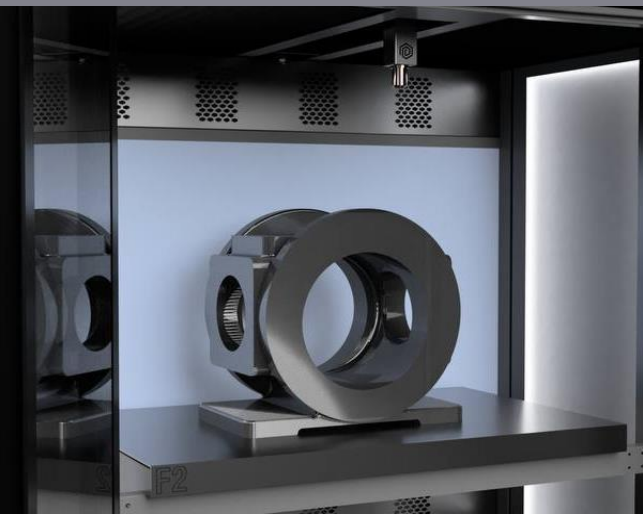


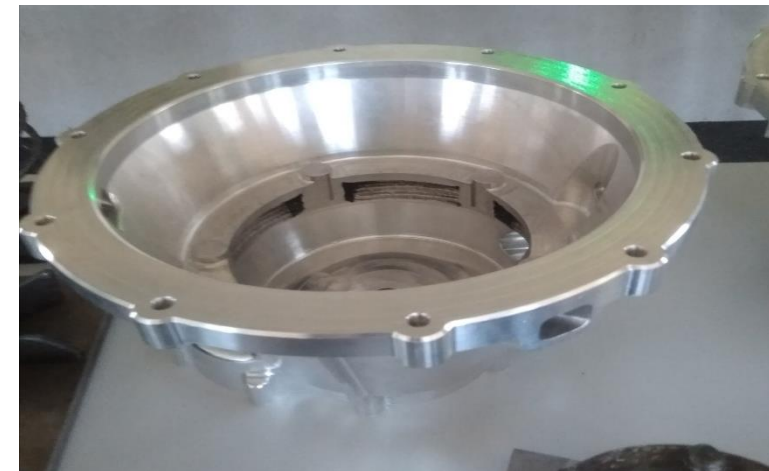
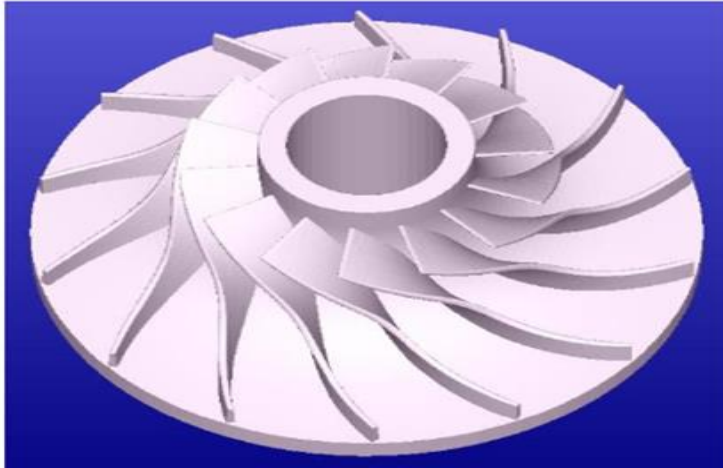


Гибридное аддитивное производство деталей аэрокосмической отрасли



Трушников Дмитрий Николаевич
+7 (919) 478-50-31
trdimitr@yandex.ru

Технология гибридного изготовления изделий объединяет лучшие характеристики аддитивного формирования заготовки и последующего механического удаления материала в процессе создания металлических изделий.



Проблемы изготовления крупногабаритных деталей

Традиционные технологии:

Большая стоимость - 1 млн евро

Низкий коэффициент
использования материала - 1...10%

Большой срок изготовления – 1 год



Предлагаемая технология

Гибридные аддитивные технологии:

Снижение стоимости – **до 50%**

Повышение коэффициента
использования материала – **в три и
более раз**

Снижение сроков изготовления **на
30% и более процентов**



**пермский
политех**

Мировые лидеры по технологии прямой
наплавки

GEFERTEC



Дуговая наплавка:

производство металлических деталей
объемом до 3,0 м³ с максимальной массой
3000 кг.

Размеры камеры построения: стол
1300x1300 мм

Входной формат файлов: STL

Размеры установки: 4500x4500x4000 мм

Вес установки: 16000 кг

Есть 5 осевые меньших областей



**Плазменная
наплавка
титановых изделий**



**Электронно-
лучевая наплавка**



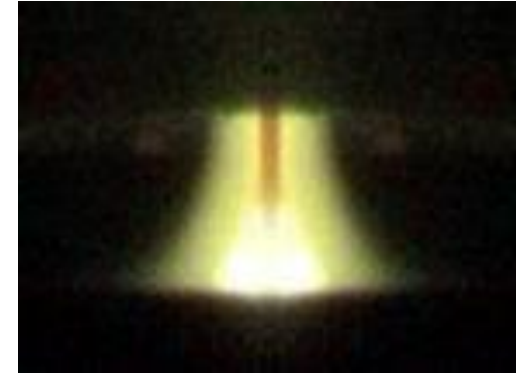
Мировые потребители технологии прямой наплавки: Lockheed Martin, NASA , Boeing, AIRBUS, Rolls-Royce
построения



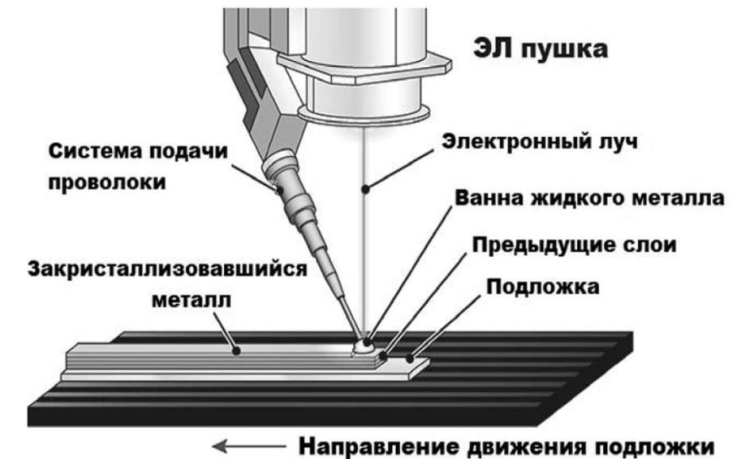
Плазменная наплавка



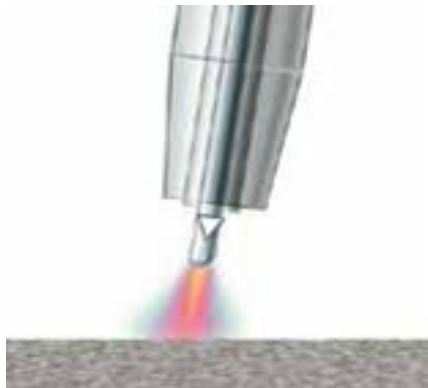
Плазма + МИГ

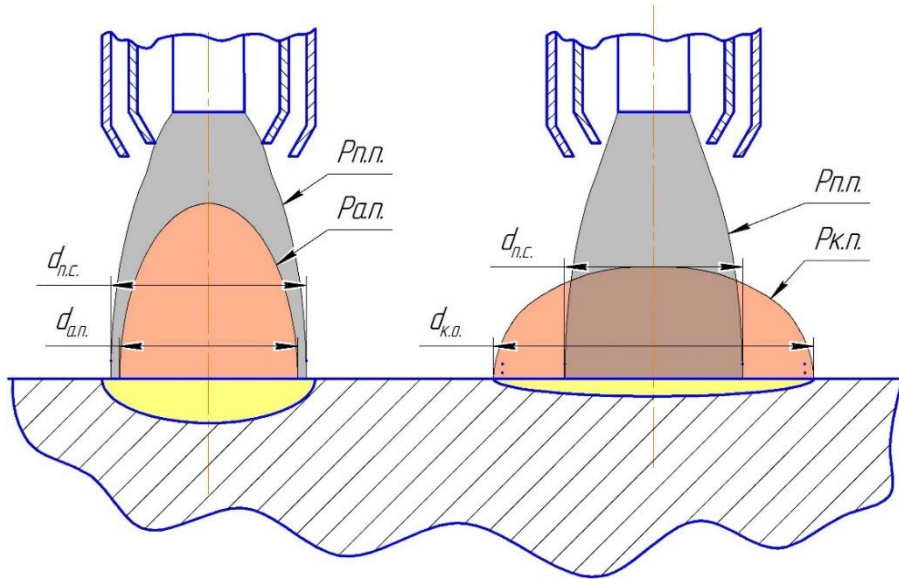


Электронно-лучевая наплавка



Наплавка CMT





Макрошлиф наплавленного валика
на токе прямой полярности



Макрошлиф
наплавленного валика
на токе обратной
полярности

- Высокая производительность
- Уникальные плазмотроны для работы на обратной полярности тока
- Катодная очистка зоны наплавки
- Возможность послойной деформационной обработки
- Возможность механической обработки в составе наплавочного комплекса
- Высочайшие свойства наплавленного материала

Алюминиевые, магниевые сплавы,
стали, бронзы, титановые сплавы



пермский
политех

Материальная база.

Роботизированный комплекс ARC MATE 100IC

Оснащение оборудованием фирмы Fronius (технология CMT)
и разработанного на кафедре СПМ и ТМ Plasma-MIG плазмотрона



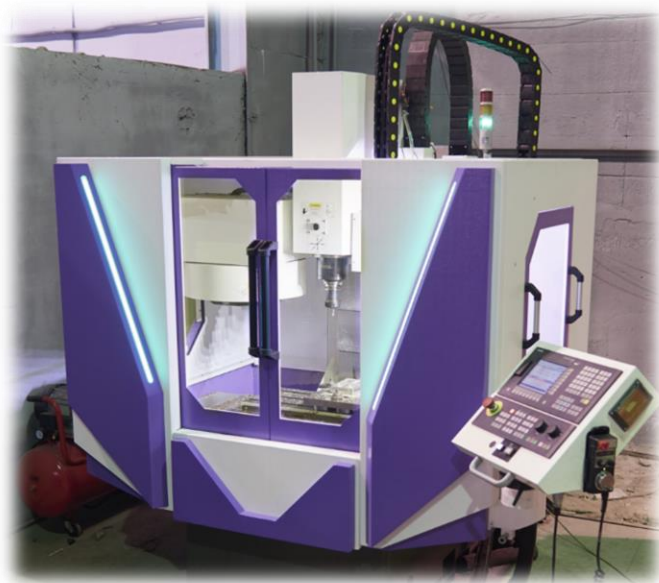
Роботизированный комплекс



Plasma-MIG плазмотрон

Характеристики работа:

Контролируемые оси - 6; Контроллер R-30iB; Грузоподъемность - 10 кг;
Повторяемость - 0,05 мм; Радиус действия 1098 мм.



Количество и тип осей	3 оси (линейные)
Стол	600 × 300 мм
Максимальная нагрузка на стол	100 кг
Рабочая зона X / Y / Z	Аддитивная направка и послойная проковка: 316 / 310 / 400 мм Аддитивная направка, послойная проковка и фрезеровка: 187 / 310 / 400 мм
X / Y / Z рабочая подача	10 м / мин
Частота вращения шпинделя	10000 об/мин
Емкость инструментального магазина	8 инструментов



- ПРОВОЛОЧНАЯ АДДИТИВНАЯ НАПЛАВКА
- ПОСЛОЙНОЕ ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ
- ФРЕЗЕРНАЯ ПОСТОБРАБОТКА



Технические характеристики установки:

Ускоряющее напряжение - 60 кВ; Максимальная мощность электронного пучка - 6 кВт; Давление газовой среды в камере - $1,3 \cdot 10^{-2}$; Рабочий объем - 500x500x600 мм.

электронно-лучевая наплавка

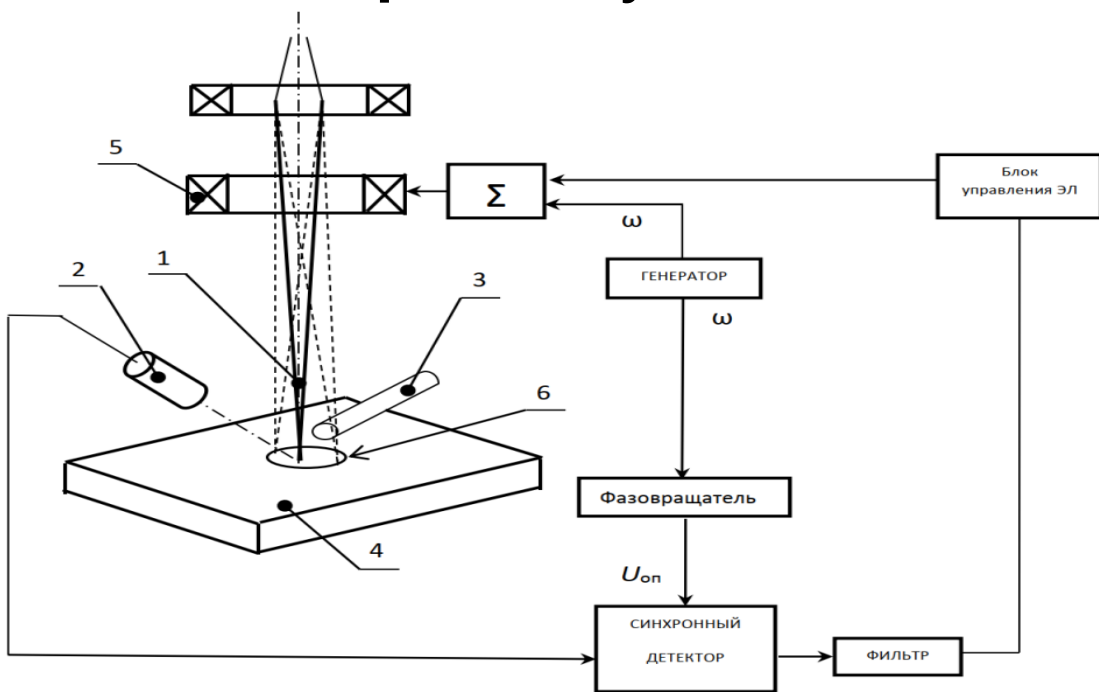
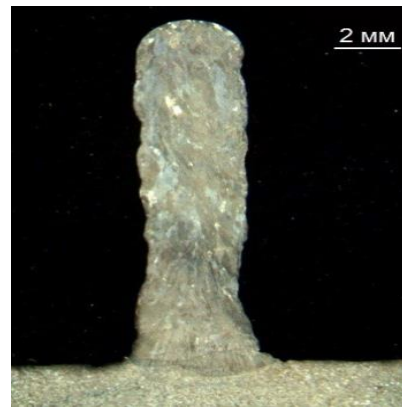
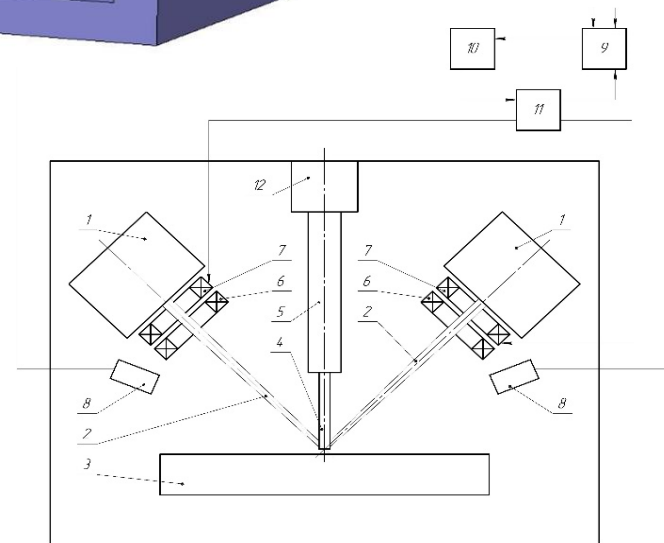
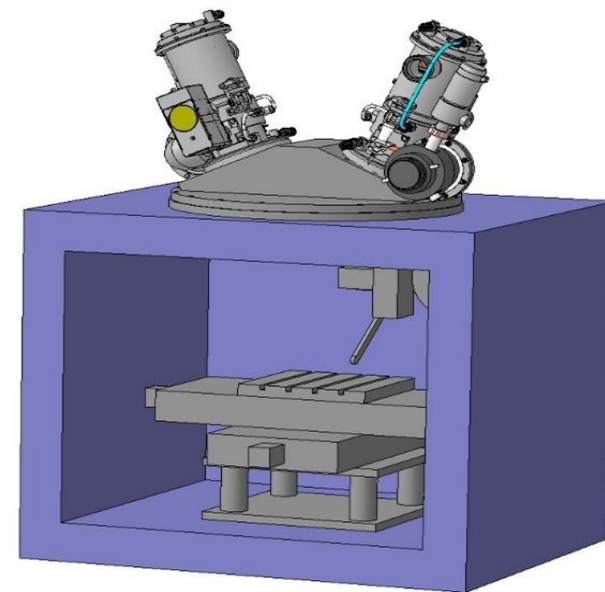


Схема экспериментальной установки ЭЛС для осуществления оперативного контроля:

- 1 – электронный луч;
- 2 – датчик рентгена;
- 3 – присадочная проволока;
- 4 – подложка;
- 5 – отклоняющие катушки;
- 6 – траектория осцилляции электронного луча.



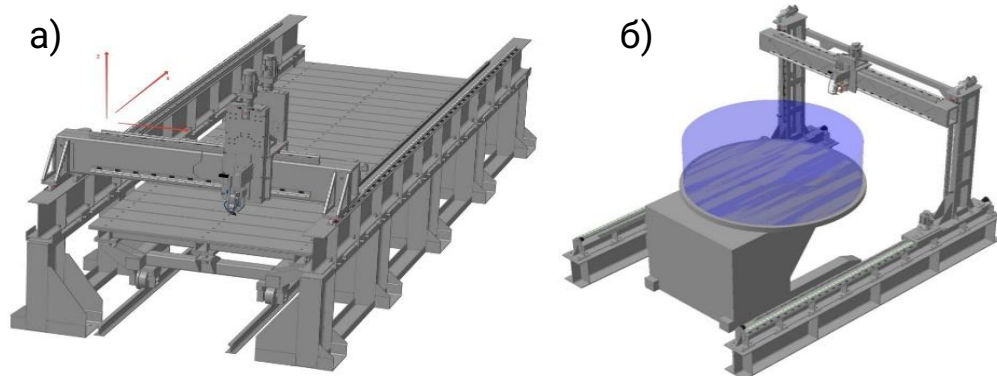
Электронно-лучевая установка с вертикальной подачей проволоки



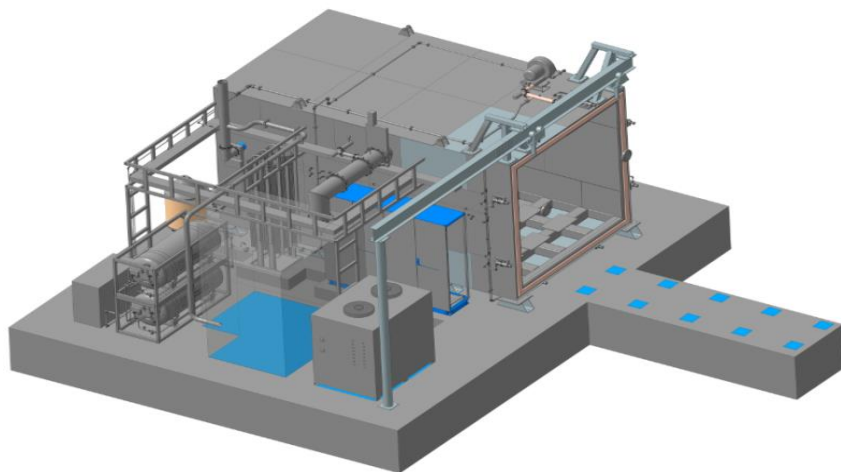


пермский
политех

Разработана рабочая конструкторская документация на 2 установки для 3D-печати



База силовая для 3D печати заготовок:
а) с выкатным столом б) со поворотным столом



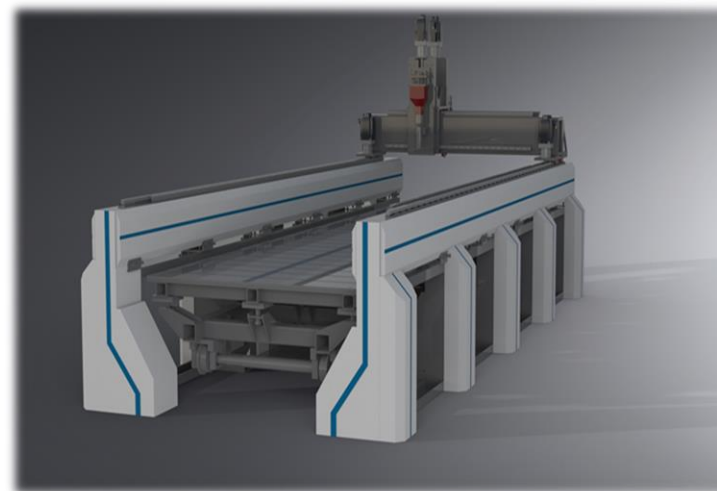
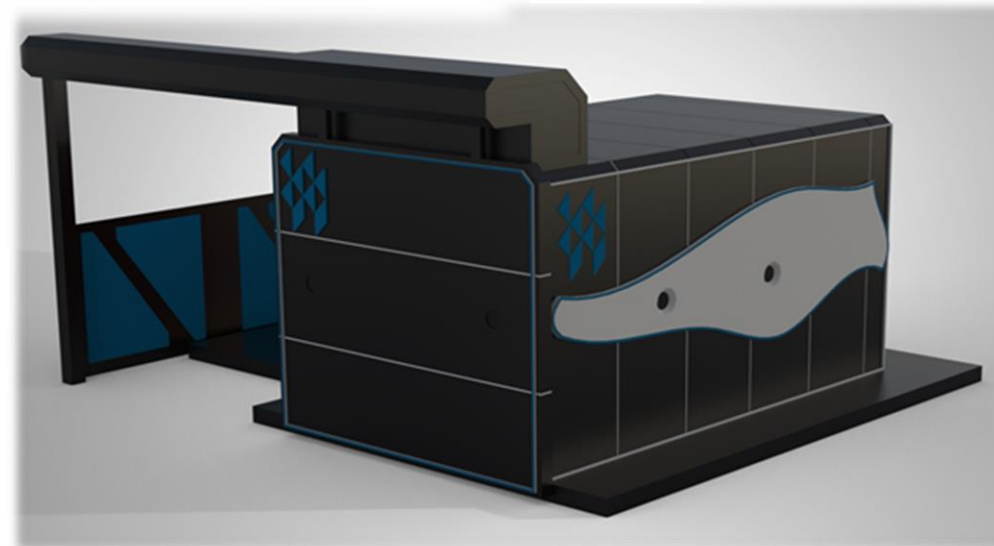
Компоновка оборудования

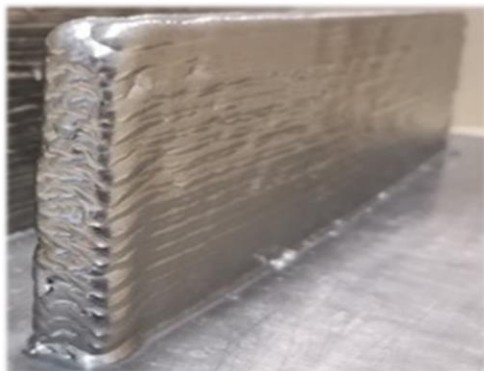


ГИБРИДНОЕ
АДДИТИВНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО



РОСАТОМ



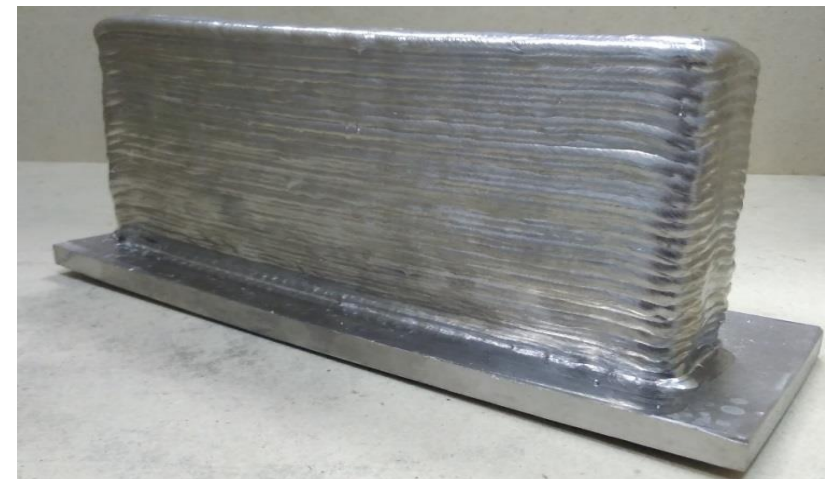


Фотографии стенки, наплавленной для изготовления образцов дополнительных испытаний



Фотография частично обработанного макета изделия «сотовая панель» (Материал – ВТ6ч)

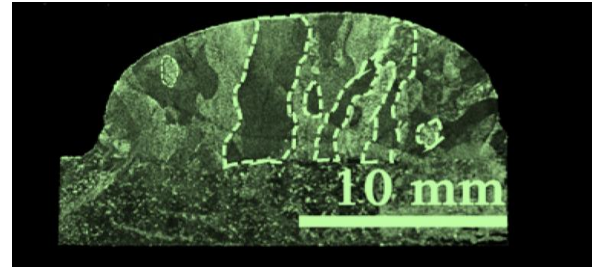
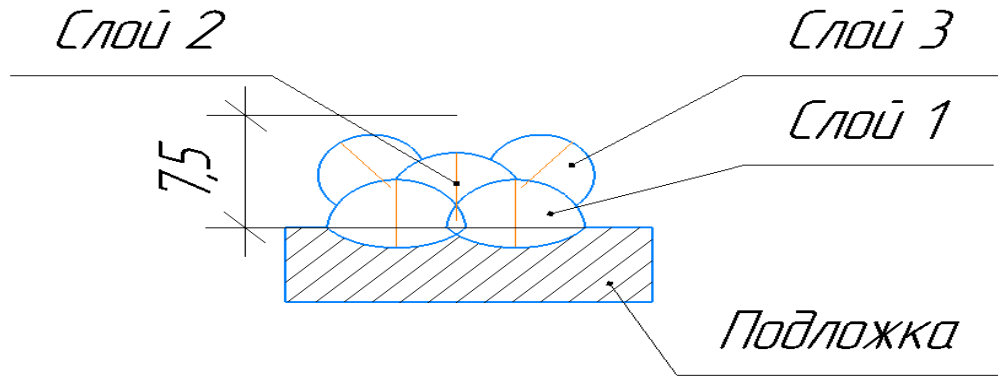
Вид испытания, чертеж	Расположение рабочей части образца	Количество образцов
$\sigma_{\text{в}}, \sigma_{0,2}, \sigma_{\text{пц}}, \delta_5, E,$ (диаграмма $\sigma - \epsilon$)	Горизонтальный (XY)	5
	Вертикальный (Z)	5
	Под 45° к вертикали (Z45)	5
$\sigma_{0,2}^{\text{сж}}, \sigma_{\text{пц}}^{\text{сж}}, E^{\text{сж}},$ (диаграмма $\sigma - \epsilon$)	Горизонтальный (XY)	5
	Вертикальный (Z)	5
	Под 45° к вертикали (Z45)	5
$\tau_{\text{ср}}$	Горизонтальный (XY)	5
	Вертикальный (Z)	5
	Под 45° к вертикали (Z45)	5
$K_{\text{с}}^{\text{У СРТУ}}$	Горизонтальный (XY)	3
	Вертикальный (Z)	3
МЦУ (ПО ($K_t=2,6$))	Горизонтальный (XY)	15
МЦУ (ПР ($K_t=3,2$))	Горизонтальный (XY)	15
$K_{1\text{с}}$	Горизонтальный (XY)	3
	Вертикальный (Z)	3
	Под 45° к вертикали (Z45)	3



Фотография частично обработанного макета изделия «сотовая панель» (Материал – ВТ6ч)



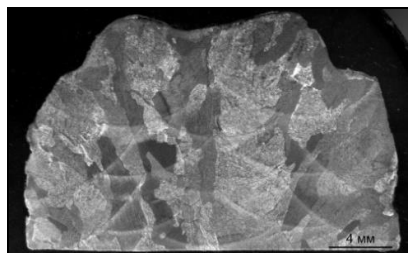
- ❖ Транскристаллическая макроструктура
(проращением первичных зерен через несколько слоев наплавки)
 - анизотропия механических свойств
 - необеспечение заданного уровня механических свойств



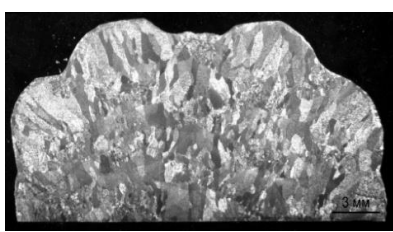
Методы воздействия на структуру и свойства материала

- ✓ Оптимизация термических циклов
- ✓ Тепловые возмущения расплава наплавочной ванны
- ✓ Механические возмущения расплава наплавочной ванны
- ✓ Послойное деформационное упрочнение

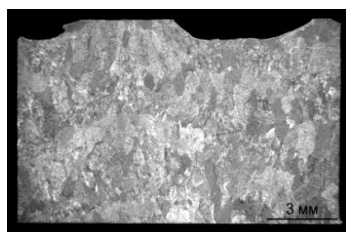
	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное сужение ψ , %	Относительное удлинение δ , %
Вертикальные				
№2	1010	920	21	11
№3	1000	910	25	15
№4	1000	930	19	12
Горизонтальные				
№1	1000	900	29	13
№2	1000	920	25	13
№3	980	870	25	14
№4	1000	930	29	13
№5	1000	920	33	14



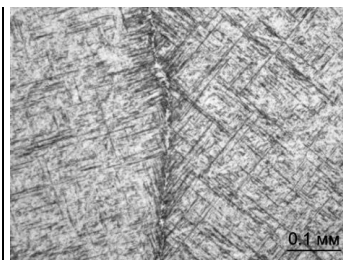
а)



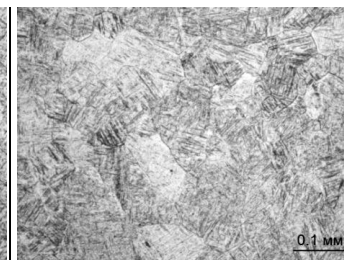
б)



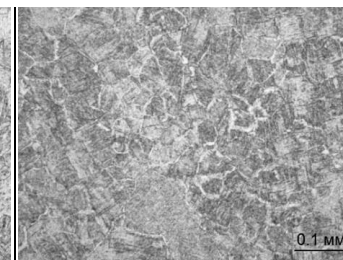
в)



г)



д)

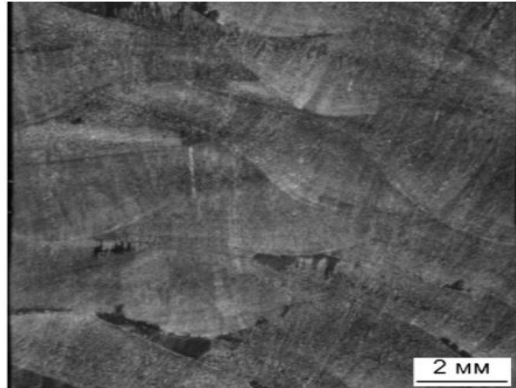


е)

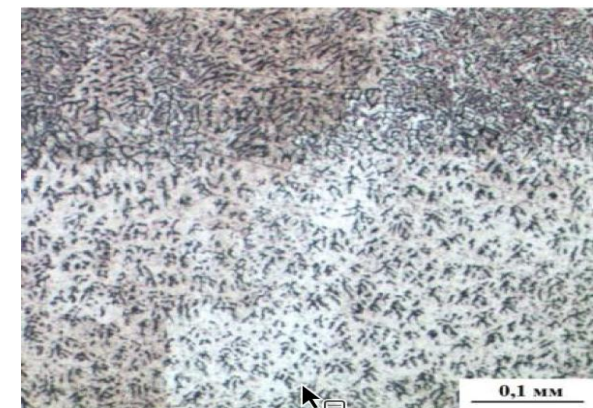
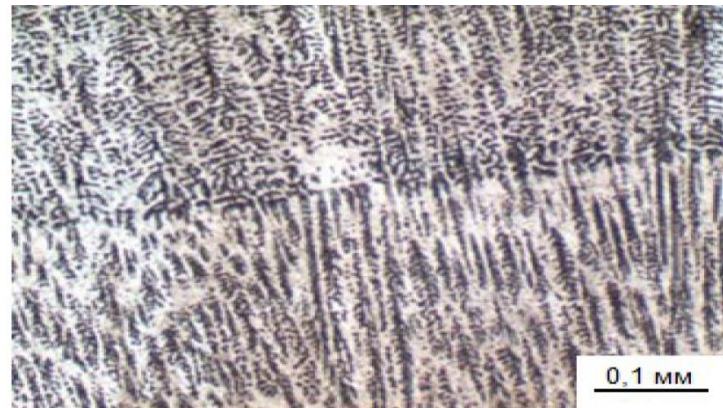
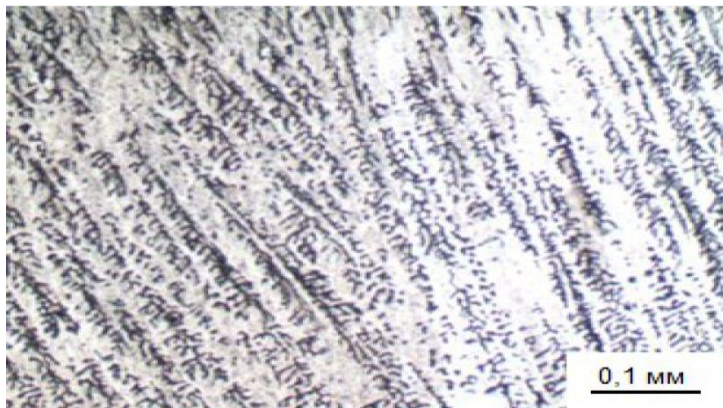
а,г – наплавленный; б,д – наплавка с проковкой; в,е -наплавка с проковкой и с ТО



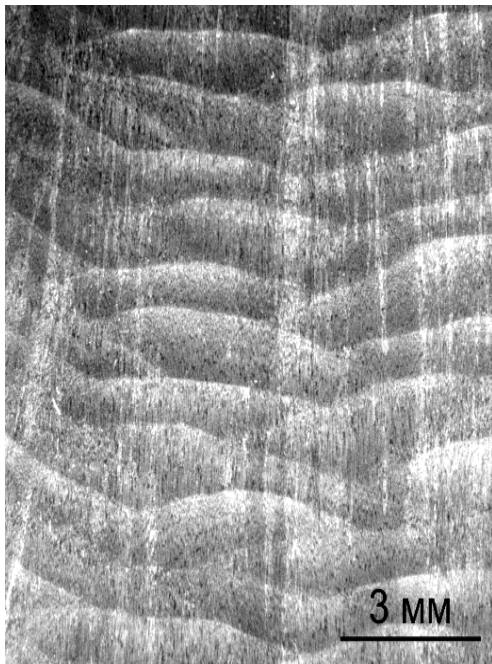
Печать заготовок из нержавеющей хромоникелевых сталей наплавкой проволоки



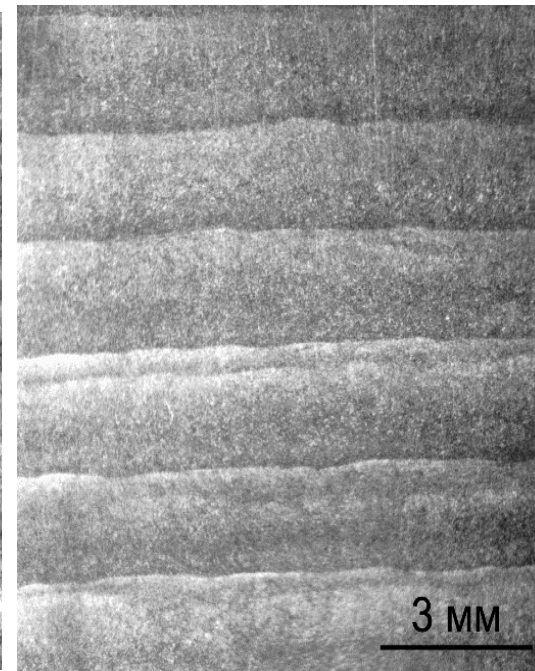
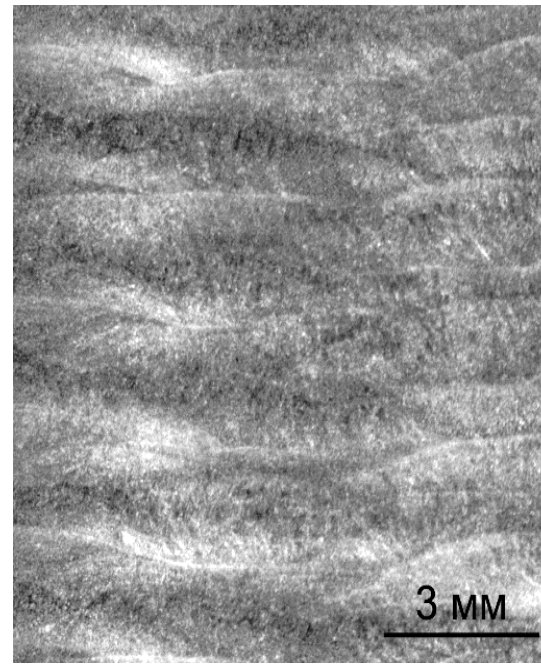
№ образца			1	2
Исследуемый Образец из стали 04X19Н9	σ_B , Н/мм ²	Вдоль	620	600
		Поперек	607	599
	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Вдоль	434	399
		Поперек	425	419



Печать заготовок из нержавеющей хромоникелевых сталей наплавкой проволоки



Без проковки

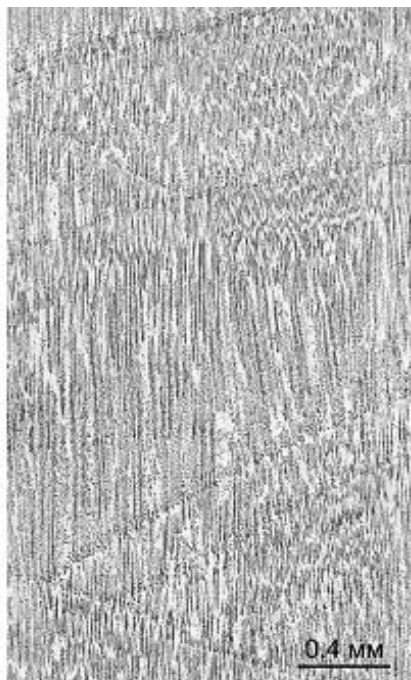


С проковкой

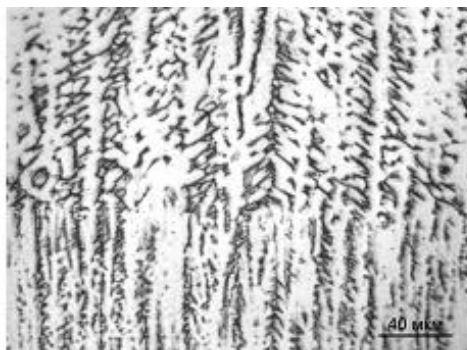


пермский
политех

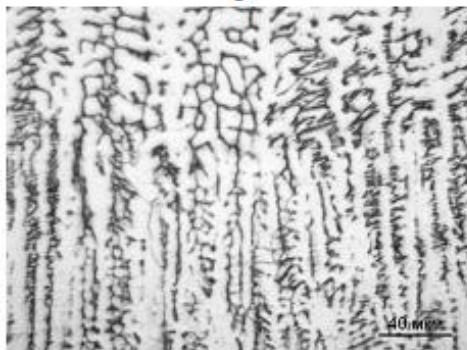
Печать заготовок из нержавеющей хромоникелевых сталей наплавкой проволоки



а



б



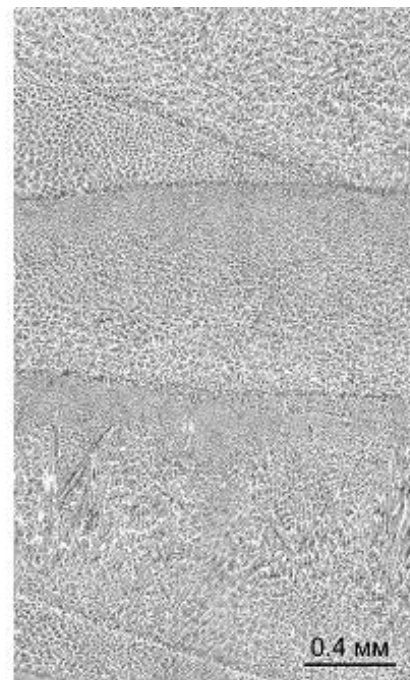
в



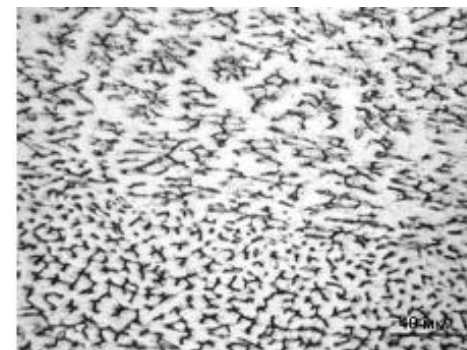
г



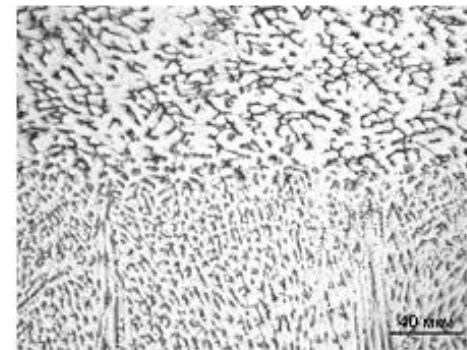
д



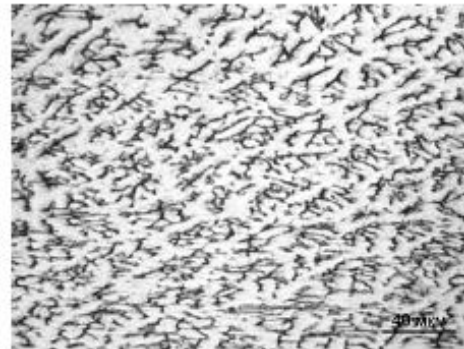
а



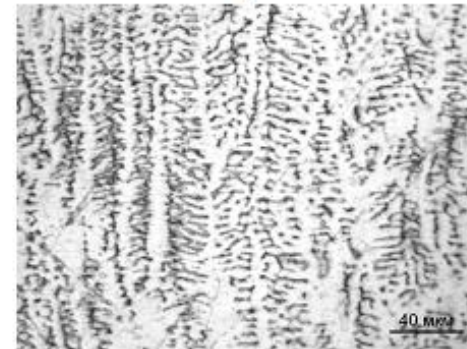
б



в



г



д

Без проковки

С проковкой



пермский
политех

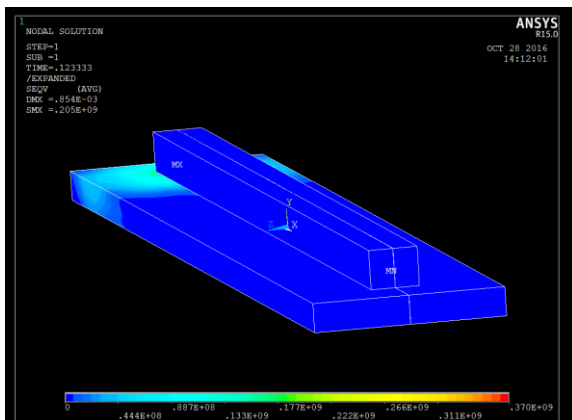
Печать заготовок из нержавеющей хромоникелевых сталей наплавкой проволоки

Результаты испытаний механических свойств

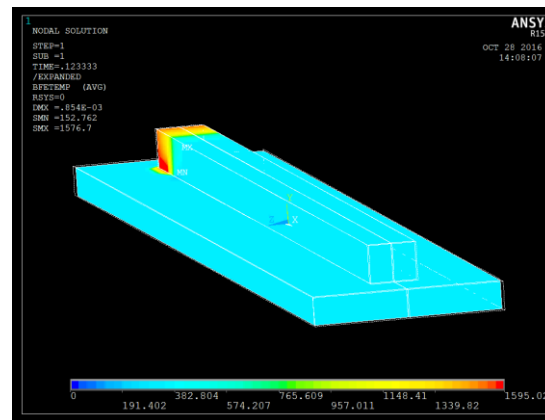
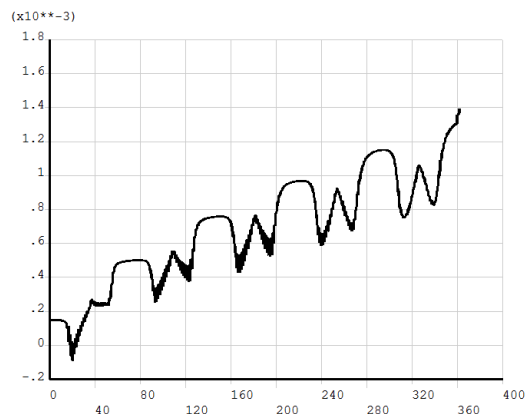
Способ получения	Предел прочности σв, МПа	Предел текучести σт, МПа	Относительно е удлинение δ, %	Относительно е сужение ψ, %
Наплавка Плазма-МИГ	598 ± 7	412 ± 17	39 ± 5	46 ± 5
Наплавка Плазма-МИГ с послойной холодной проковкой	643 ± 40	497 ± 70	39 ± 3	50 ± 2
308LSi по EISO 14343-2017	570	400	36	-
сталь AISI 304 L по ASMT A240 (лист толстый)	≥ 485	≥ 170	40	-

- **Институт электроники Болгарской академии наук** (Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences), Болгария
3 совместных проекта в области электронно-лучевых и вакуумных процессов
- **Хуачжунский университет науки и технологии** (Huazhong University of Science and Technology), Китай
Моделирование процесса
- **Индийский институт технологии Бомбея** (Indian Institute of Technology Bombay (IITB)), Индия
Послойное деформационное упрочнение
- **Институт материаловедения Университет Лейбница в Ганновере (LUN)**
Наплавка магниевых сплавов

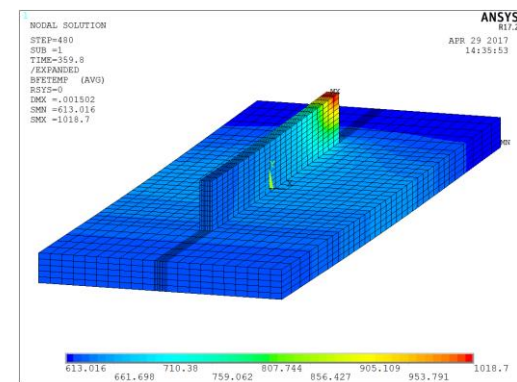
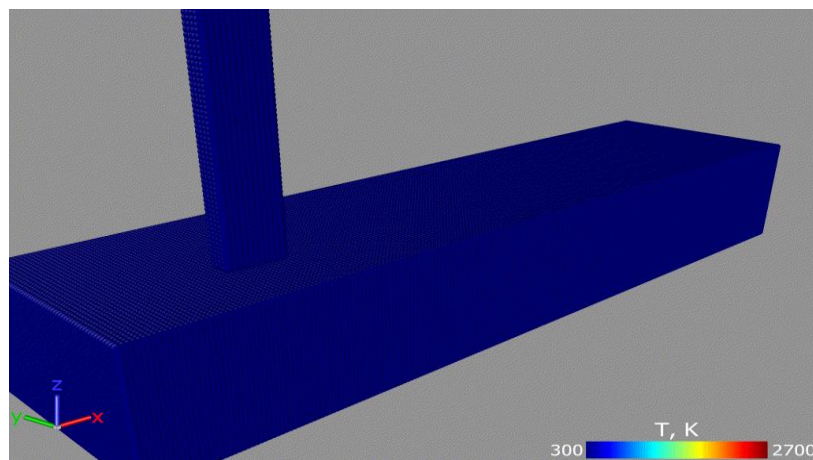
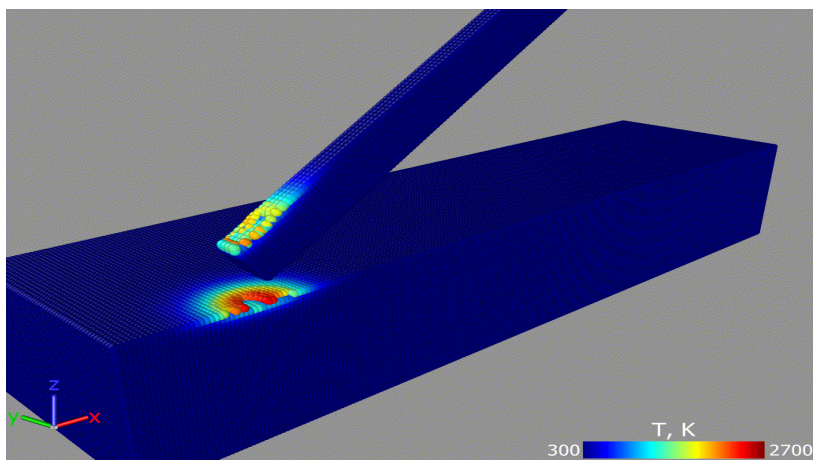
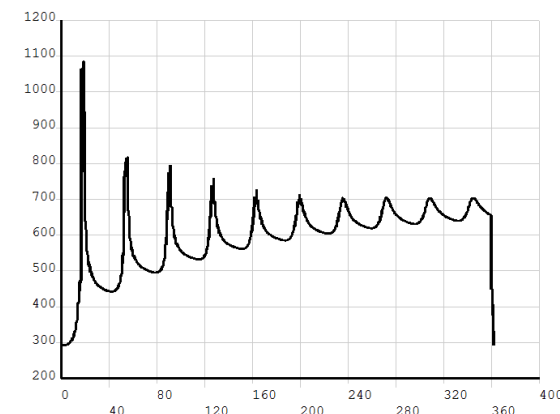




Вертикальные перемещения, мм



Температура, К

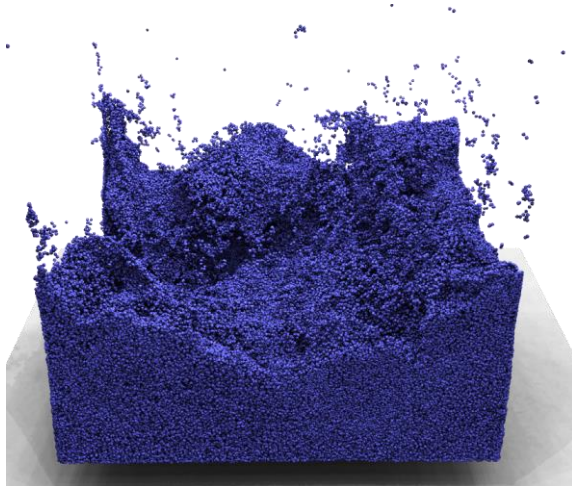
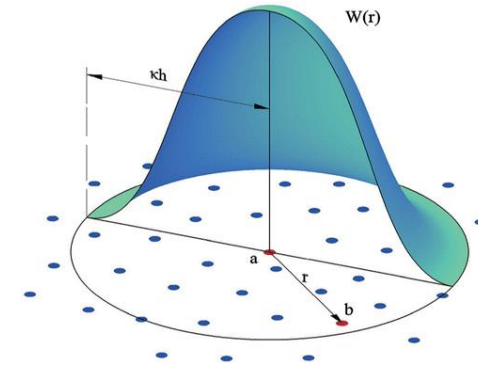




Joe Monaghan

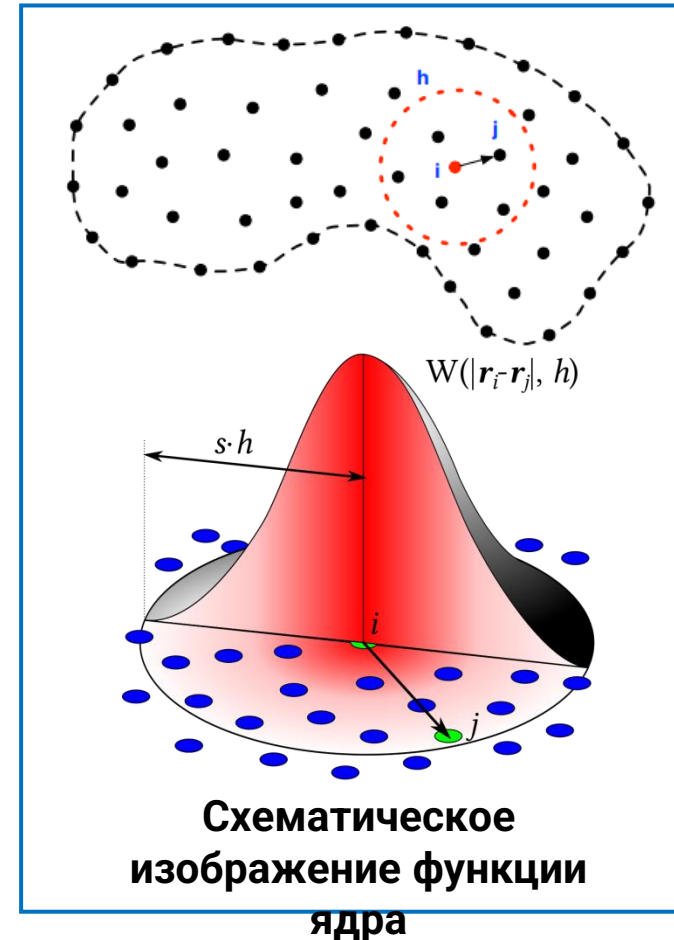
Smoothed Particle Hydrodynamics, R. A. Gingold and
J. J. Monaghan, Mon. Not. Roy. Astr.

Soc. **181**, 375-389, (1977).



Метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH)

- Для решения математической модели в работе используется метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) [1]
- Основная идея метода состоит в представлении исследуемого тела в виде совокупности частиц без связности (сетки)
- Эти частицы имеют пространственное расстояние на котором их свойства «сглаживаются» функцией ядра



Метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH)

Функция ядра:

$$W\left(\frac{r}{h}\right) = \frac{10}{7\pi h^2} \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 < q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 < q \leq 2 \\ 0 & 2 < q \end{cases}$$

Представление произвольной функции и ее пространственной производной в формализме SPH:

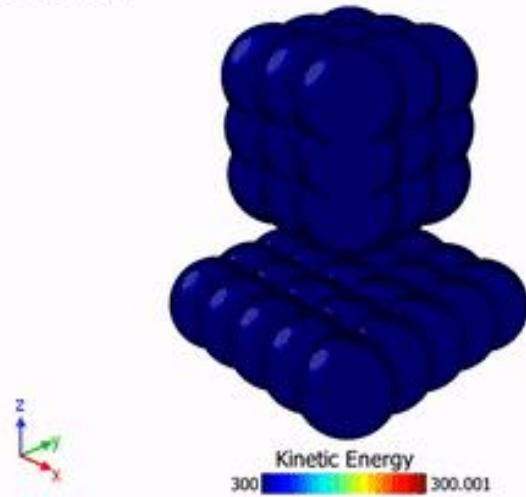
$$\begin{aligned} f_i &= \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W_{ij}, \\ \nabla f_i &= \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} \nabla_j W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} \nabla_j W_{ij}. \end{aligned}$$

Аппроксимация уравнения Навье-Стокса

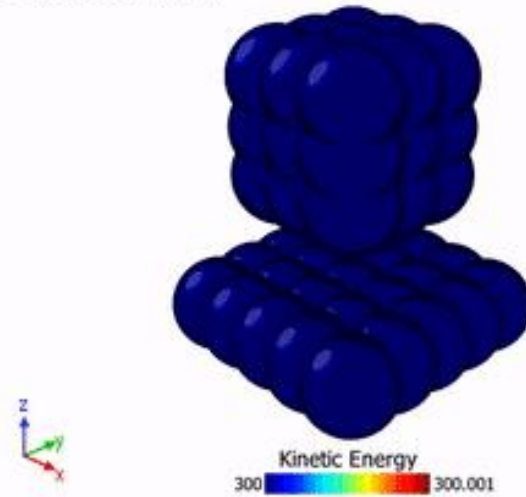
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \mathbf{u}_{ij} \cdot \nabla_j W_{ij}^h, \\ \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = \frac{1}{m_i} [\mathbf{F}_{p,i} + \mathbf{F}_{v,i} + \mathbf{F}_{s,i} + \mathbf{F}_{\nu,i}] + \mathbf{g}_i, \\ \frac{dT_i}{dt} = -\frac{1}{c_i \rho_i} [-(\nabla \cdot \mathbf{q})_i + s_{src,i} - s_{v,i} - s_{env,i} - s_{rad,i}], \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{p,i} + \mathbf{F}_{v,i} &= \sum_j (V_i^2 + V_j^2) \left[-\frac{\rho_j p_i + \rho_i p_j}{\rho_i + \rho_j} \frac{\partial W}{\partial r_{ij}} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} + \frac{2\eta_i \eta_j}{\eta_i + \eta_j} \frac{\mathbf{u}_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial W}{\partial r_{ij}} \right], & \nabla c_i &= \frac{1}{V_i} \sum_j (V_i^2 + V_j^2) \frac{\rho_i}{\rho_i + \rho_j} c_j \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}}, & \mathbf{n}_i &= \frac{\nabla c_i}{\|\nabla c_i\|}, \\ \mathbf{F}_{\nu,i} &= -V_i p_{\nu,i} \mathbf{n}_i, & \mathbf{F}_{s\kappa,i} &= -V_i \alpha_i \kappa_i \mathbf{n}_i = -V_i \alpha_i \left(-\frac{\nabla \mathbf{n}_i}{\|\mathbf{n}_i\|} \right) \mathbf{n}_i = V_i \alpha_i \nabla^2 c_i \frac{\mathbf{n}_i}{\|\mathbf{n}_i\|}, \\ (\nabla \cdot \mathbf{q})_i &= \sum_j 4 \frac{m_j}{\rho_j} \frac{k_i k_j}{(k_i + k_j)} (T_j - T_i) \frac{1}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}}, & \mathbf{F}_{sm,i} &= \alpha_i V_i (\mathbf{I} - \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i) \sum_j V_j (T_j - T_i) \frac{\partial W}{\partial r_{ij}} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}}, \end{aligned}$$

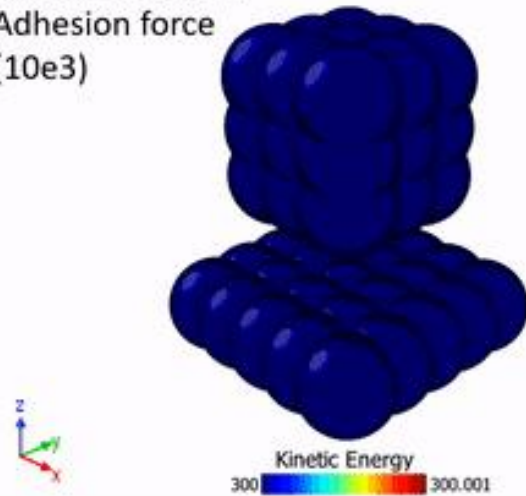
Standard



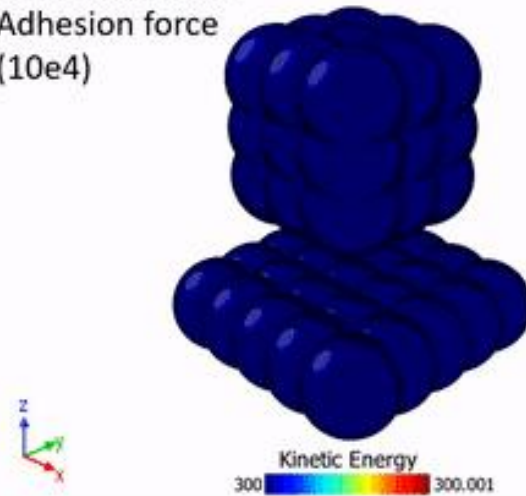
Surface tension

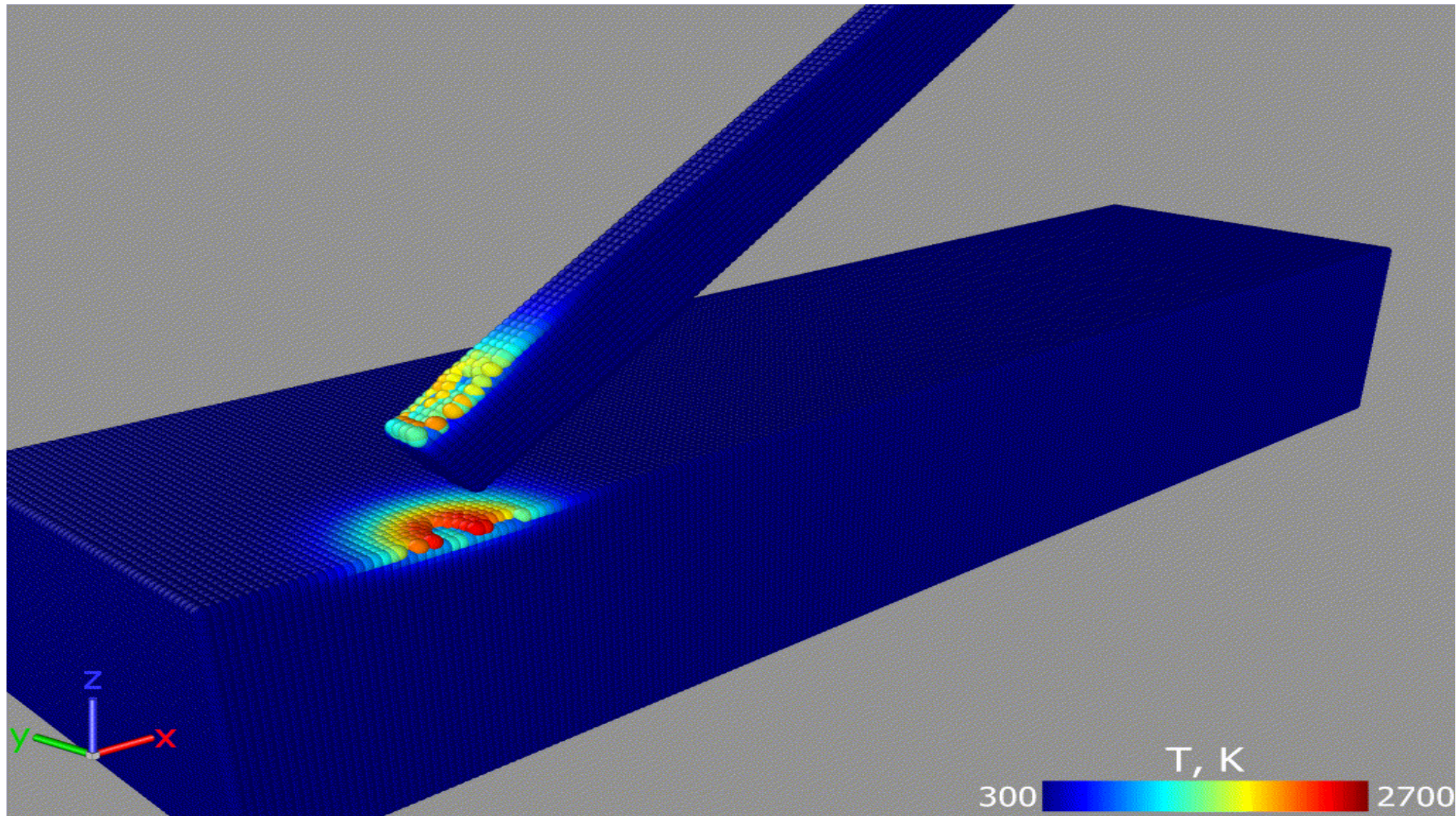


Surface tension +
Adhesion force
(10e3)

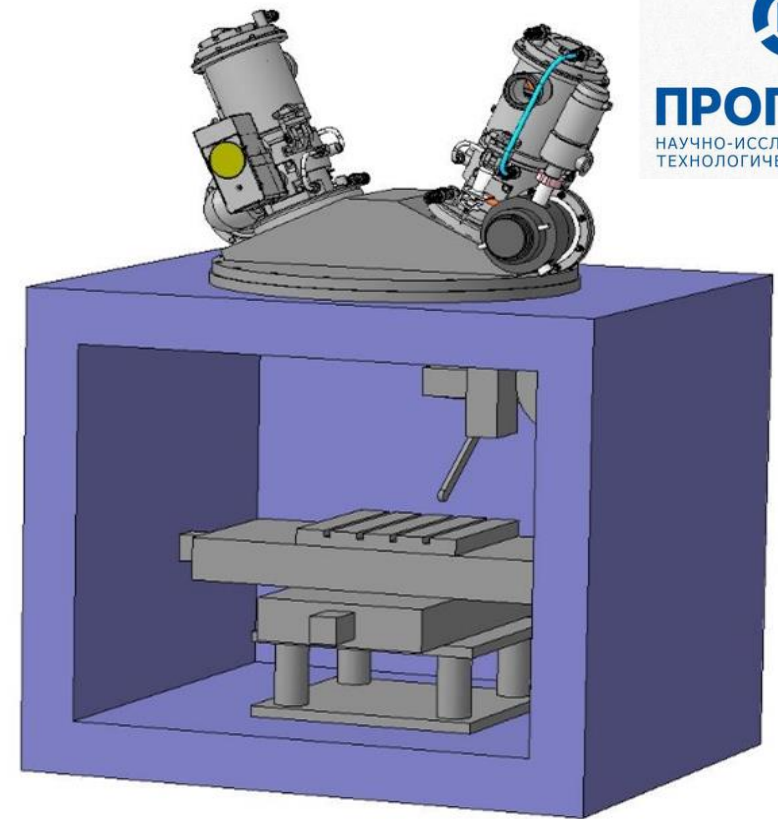
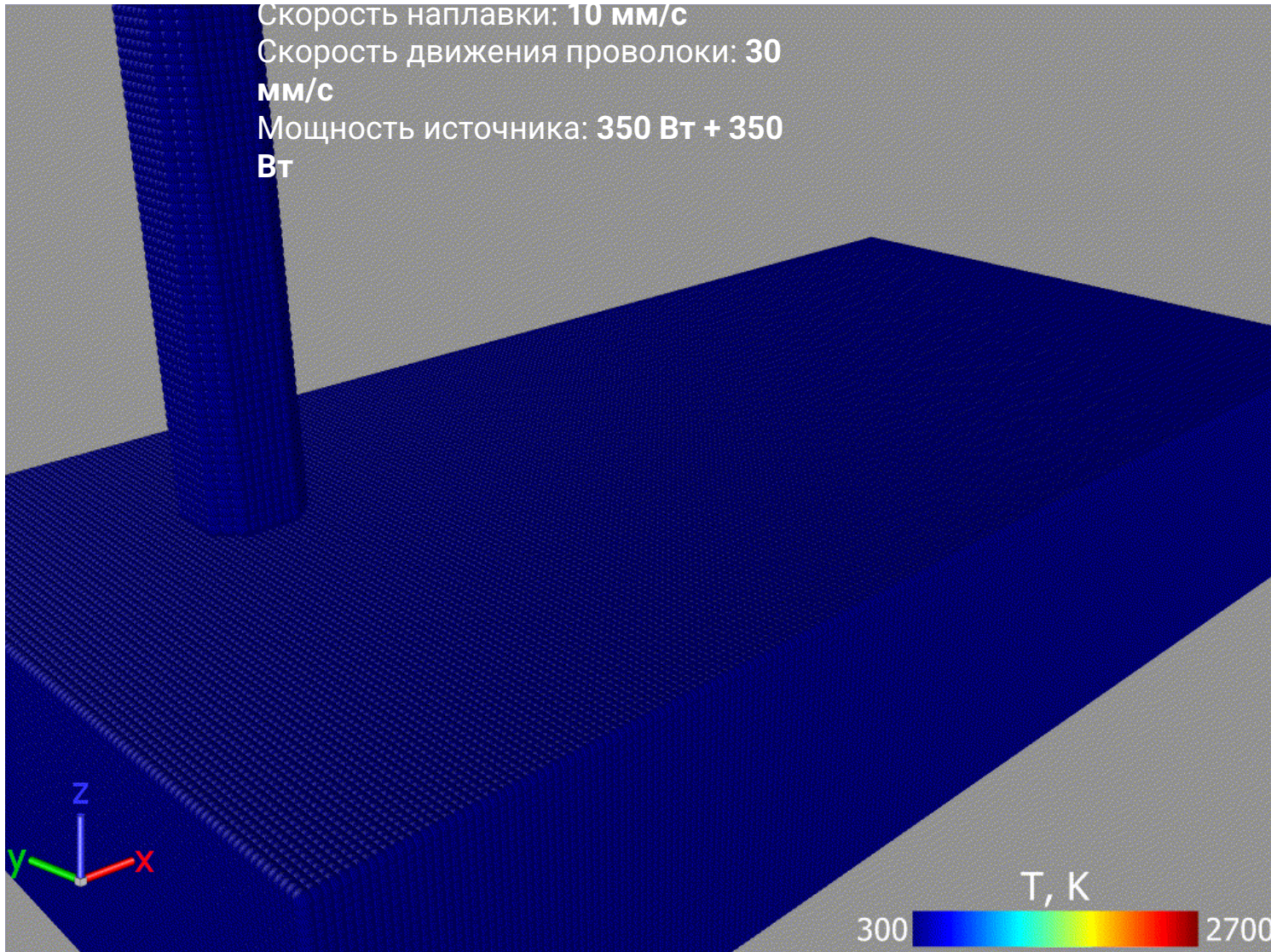


Surface tension +
Adhesion force
(10e4)





Скорость наплавки: 10 мм/с
Скорость движения проволоки: 30
мм/с
Мощность источника: 350 Вт + 350
Вт





МАТЕРИАЛ - 30ХГСА (20Х13, 30Х13 и др)

СНИЖЕНИЕ ВРЕМЕНИ ~ В 5 РАЗ

СНИЖЕНИЕ ЗАГРУЖЕННОСТИ И ИЗНОСА
ОБОРУДОВАНИЯ

ЭКОНОМИЯ НА ИНСТРУМЕНТАХ И
РАСХОДНИКАХ

СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ НА УТИЛИЗАЦИЮ
ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА.

СНИЖЕНИЕ ЗАГРУЖЕННОСТИ
ПЕРСОНАЛА.

ВОЗМОЖНОСТЬ СНИЖЕНИЯ МАССЫ

СНИЖЕНИЕ ВРЕМЕНИ НА РАЗРАБОТКУ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ЗА



МАТЕРИАЛ - 12X18H10T

СНИЖЕНИЕ ВРЕМЕНИ ~ ДО 13Ч

МАССА ~ 13 КГ

№ образца	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %
1	604	55	64
2	577	48	69
3	590	56	63
4	611	53	66
Среднее XY	600	50	65
5	564	46	69
6	562	52	69
7	563	48	73
8	588	48	66
Среднее Z	570	49	69



МАТЕРИАЛ - 03X12H9M2C (ЭП659А).

СНИЖЕНИЕ ВРЕМЕНИ ~ НА 70%

СНИЖЕНИЕ СТОИМОСТИ ~ НА 25%



Показатель	Значение
Предел прочности σ_B , МПа	≥ 980 МПа
Предел $\sigma_{0,2}$, МПа	≥ 910 МПа
Относительное удлинение, %	12
Ударная вязкость, KCV-196, Дж/см ²	≥ 39

Плазменная сварка плавящимся электродом токоведущей проволокой, сплав АМг6

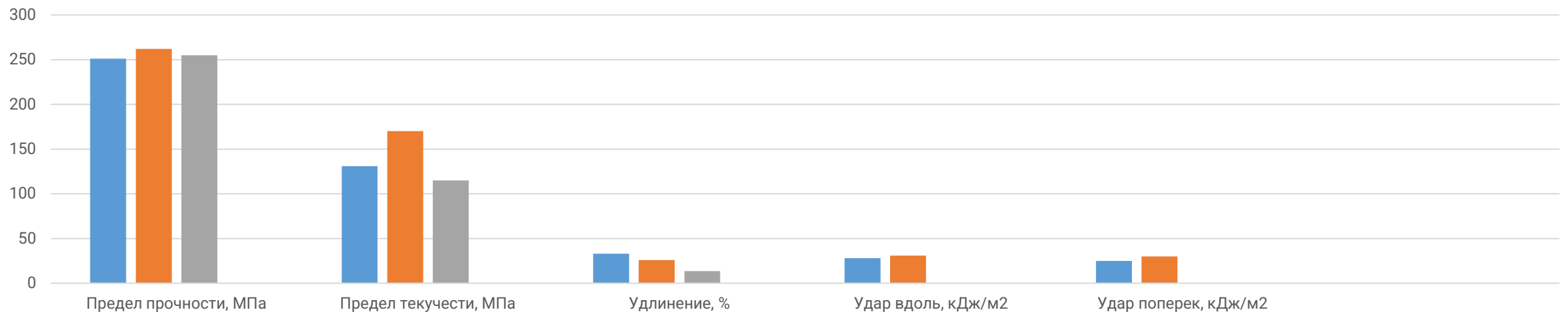


Плазменная сварка заглубленной дугой с плавящегося электрода (АМг6, $\delta \approx 16\text{мм}$)

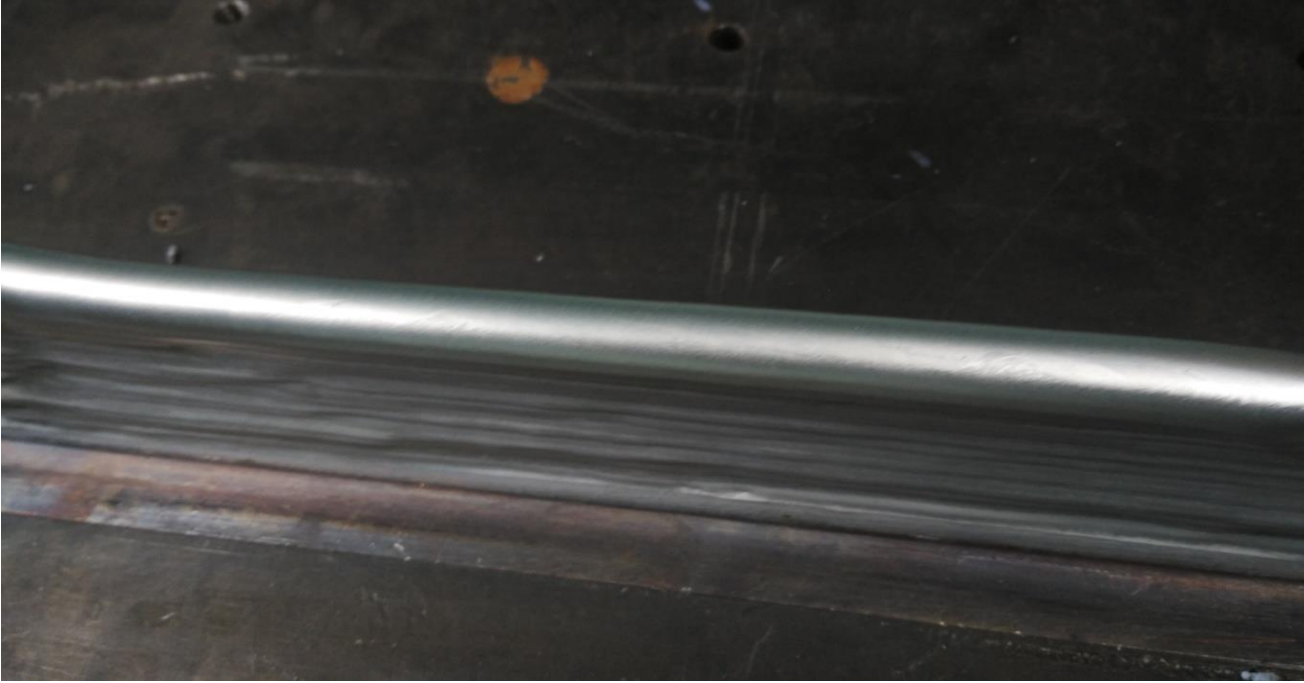


АМг5

	Плазма, О.П.	Плазма, О.П. + проковка	Справ. (пруток)
Предел прочности, МПа	251	261,8	255
Предел текучести, МПа	131	170	115
Удлинение, %	33	26	13,5
Удар вдоль, кДж/м2	28	31	
Удар поперек, кДж/м2	25	30	

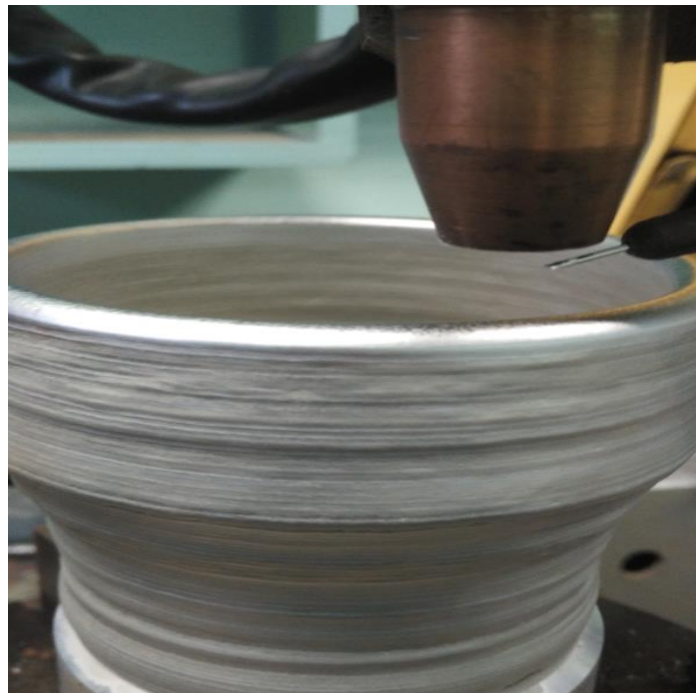


Предварительные результаты исследования возможности применения
плазменной наплавки для изготовления изделий
из высокопрочных скандийсодержащих алюминиевых сплавов



Внешний вид наплавленных образцов (стенка и тело вращения) из сплава 1580

Плазменная наплавка высокопрочных скандийсодержащих алюминиевых сплавов



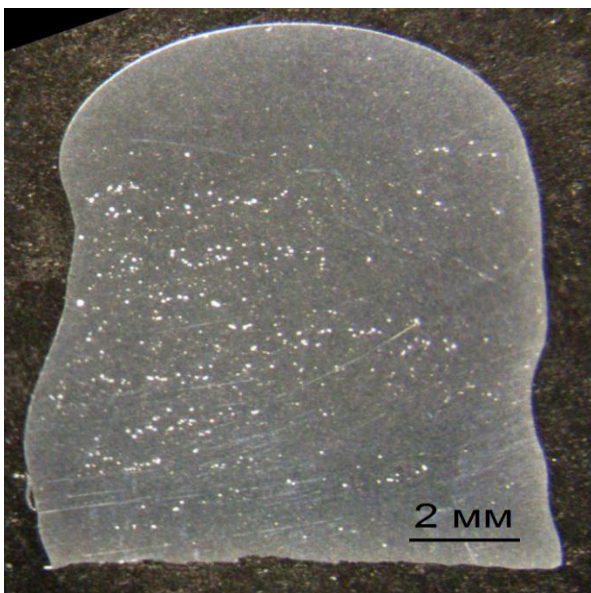
Внешний вид наплавленной детали после токарной обработки внешней поверхности

Влияние послойной ударной деформационной обработки

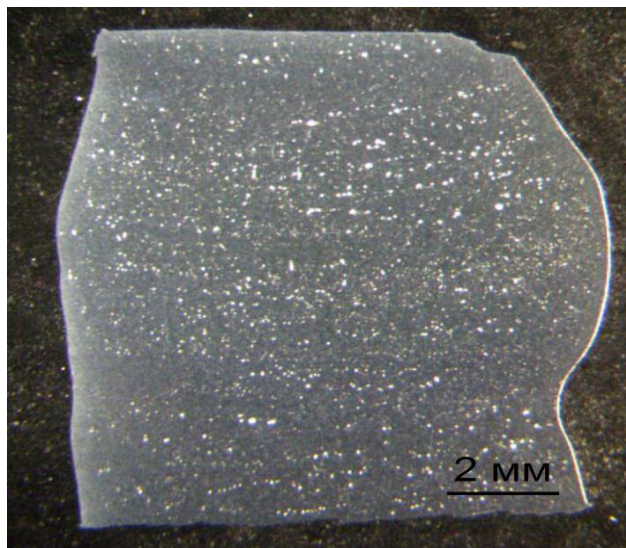
Плазменная наплавка 1580, Структура

без деформационной обработки

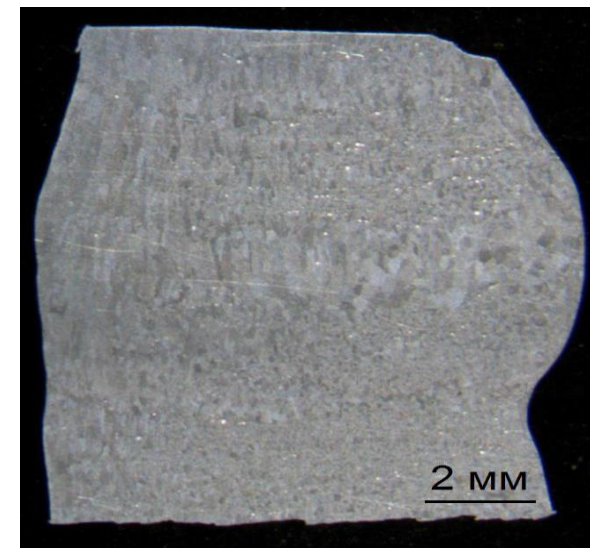
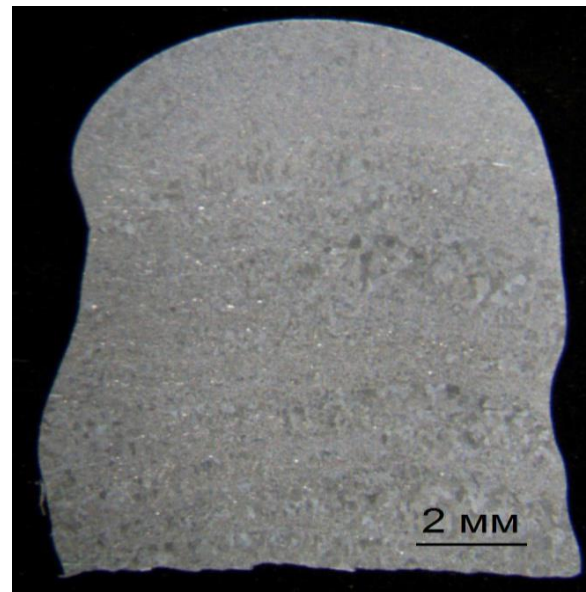
с послойной деформационной обработкой



Верхняя часть

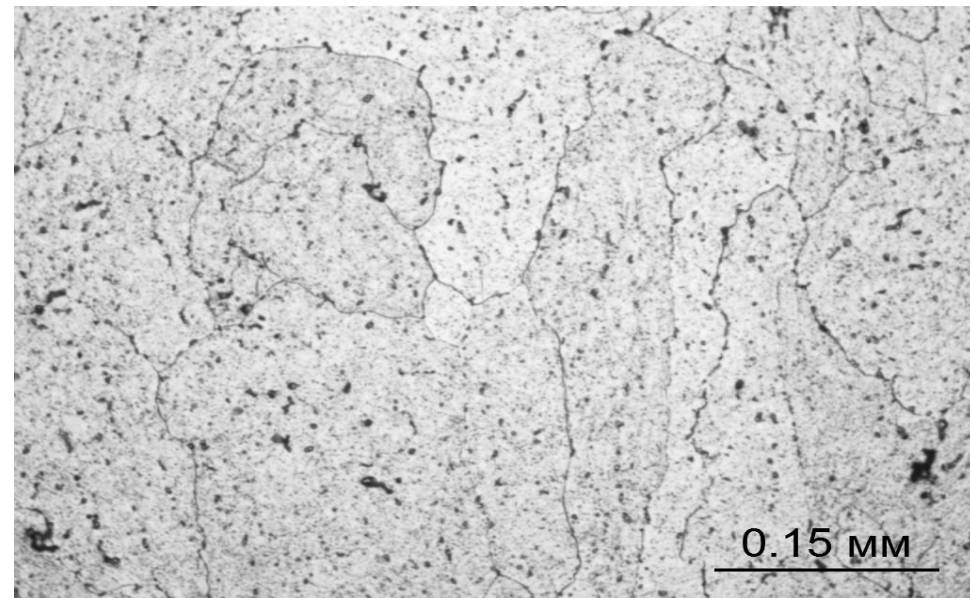
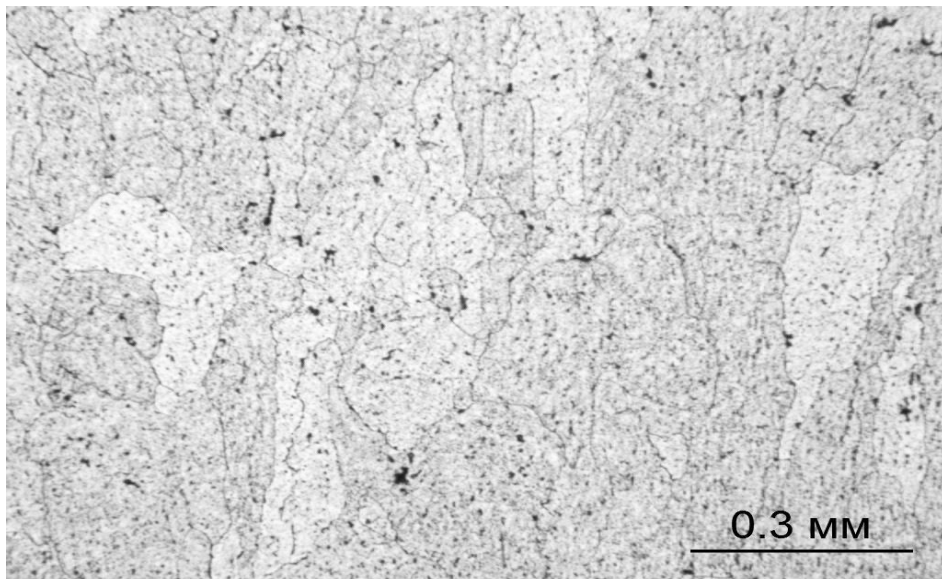
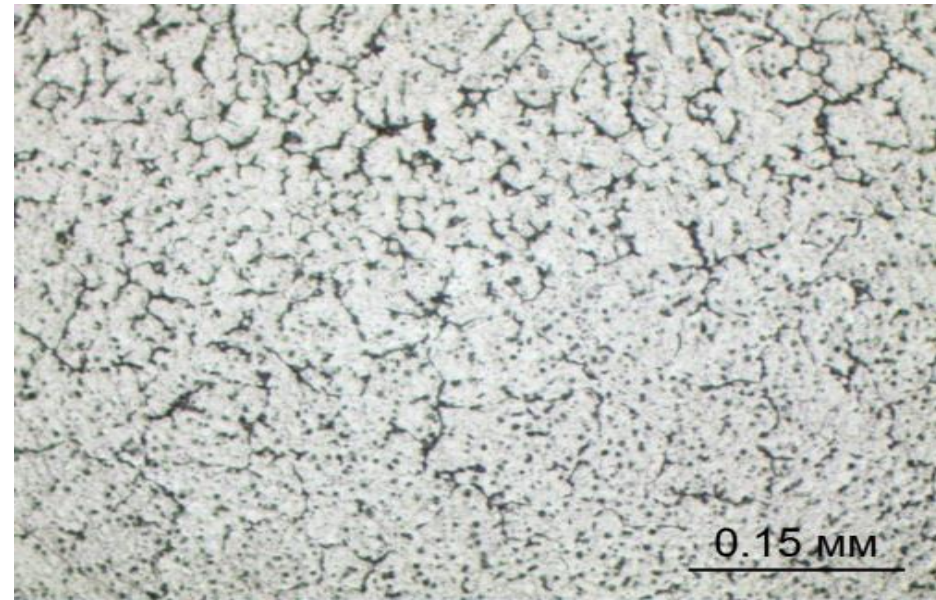
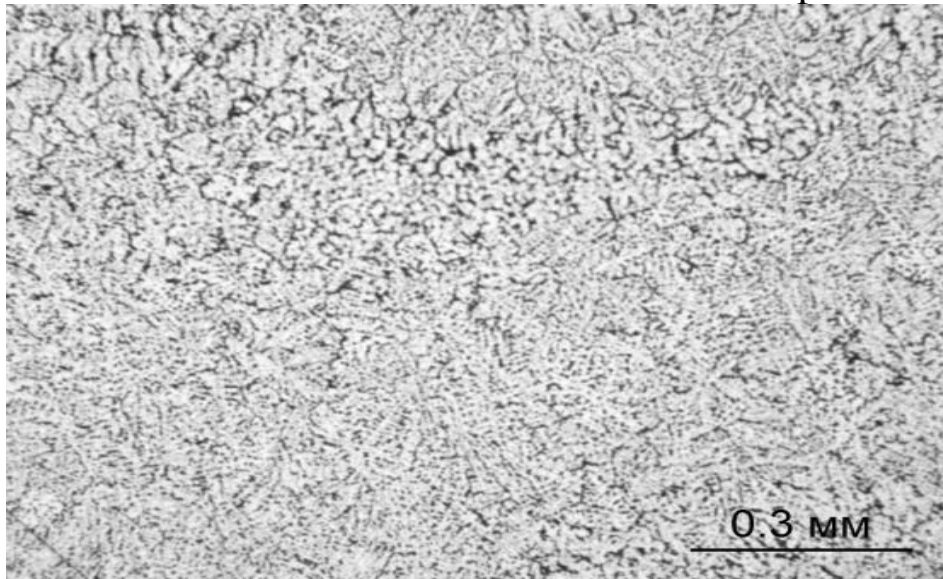


Нижняя часть



Образец без деформационной обработки в процессе наплавки

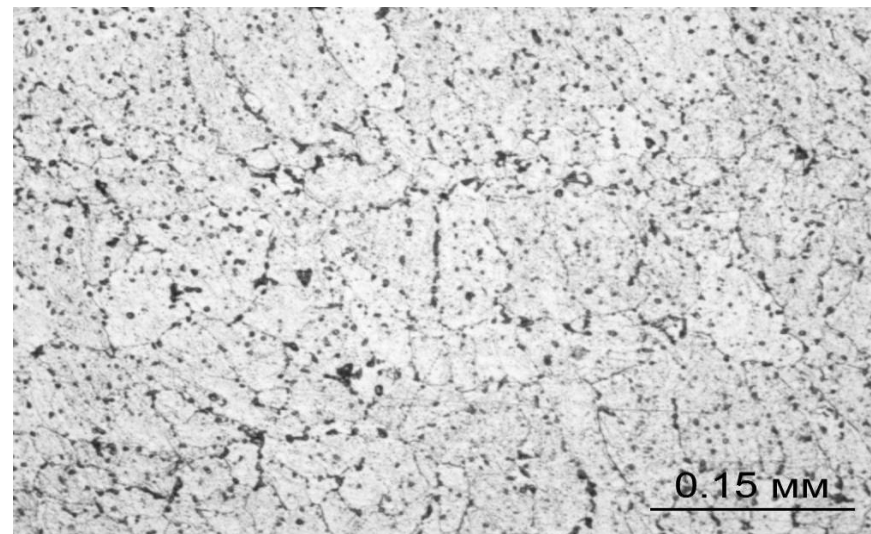
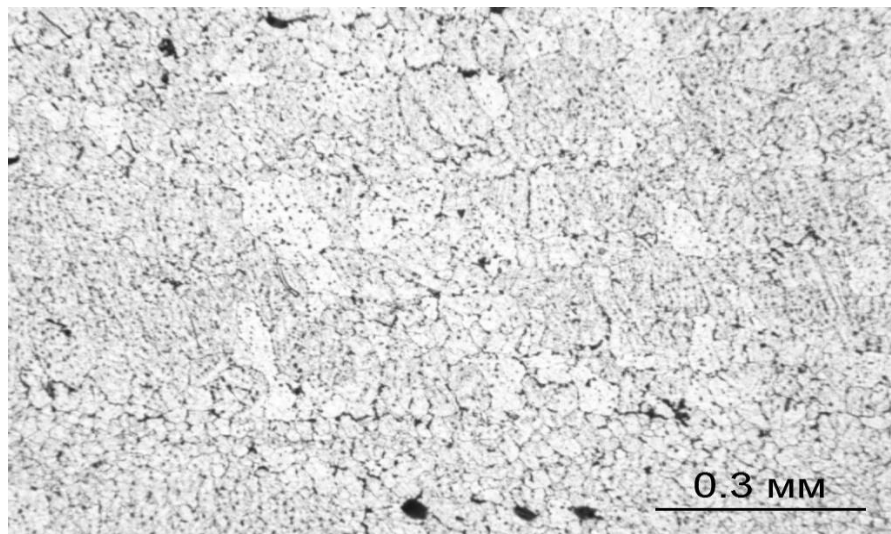
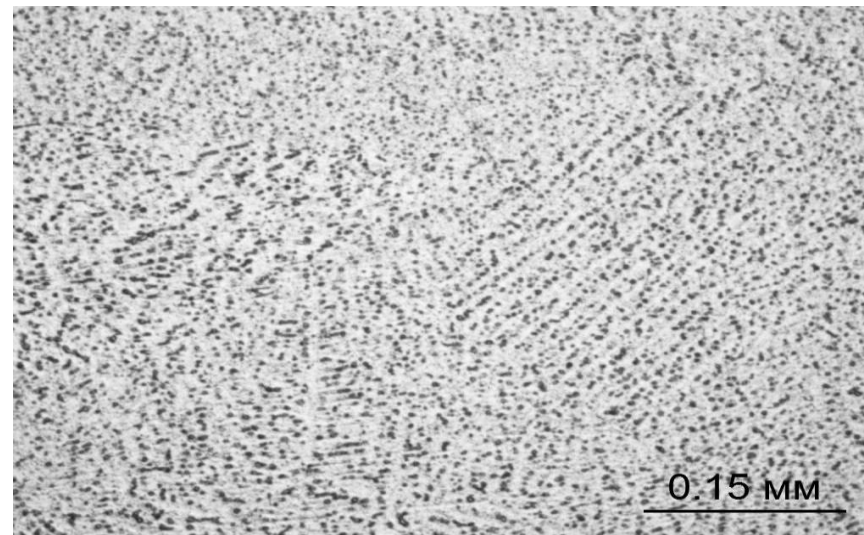
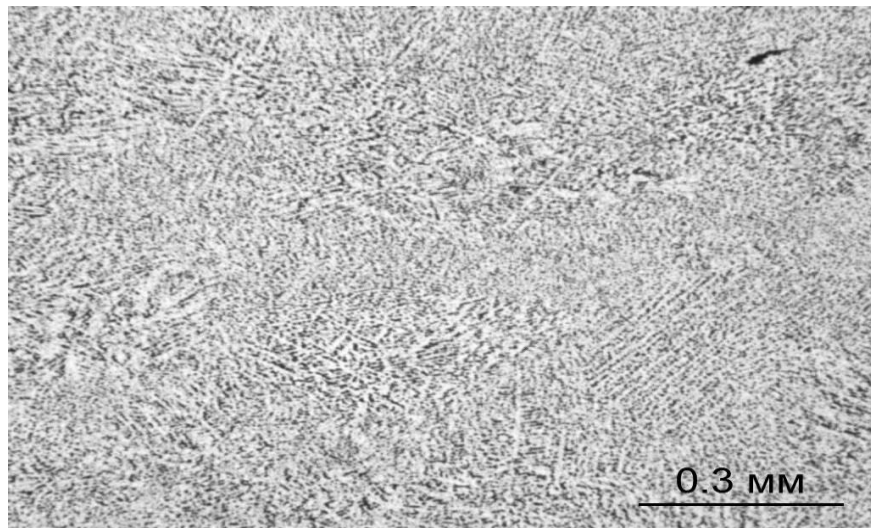
Верхняя часть



Нижняя часть

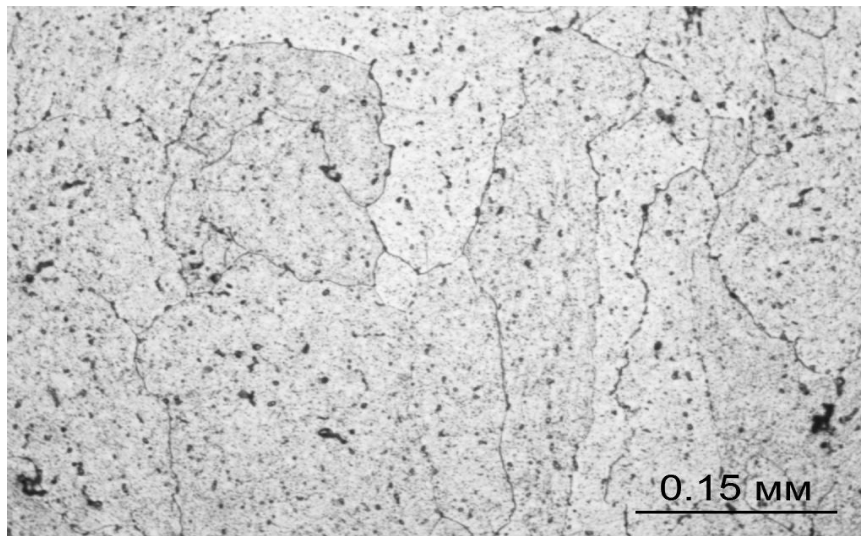
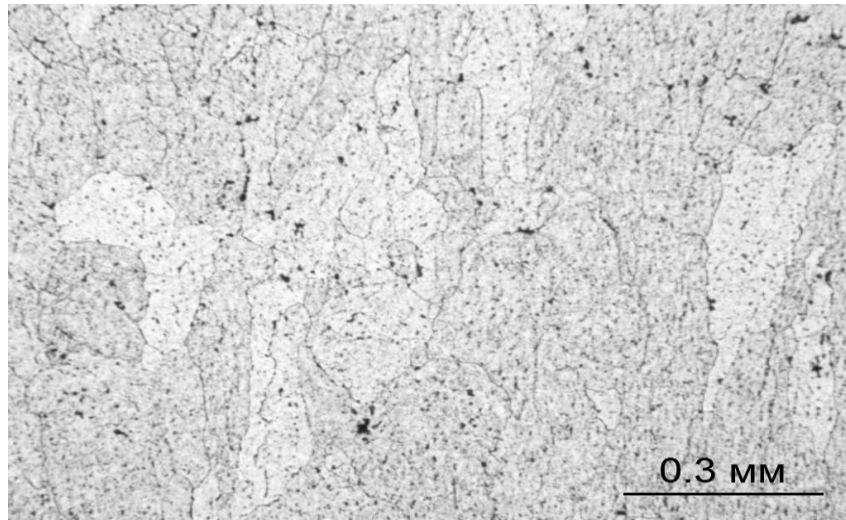
Образец с послойной деформационной обработкой (проковкой)

Верхняя часть

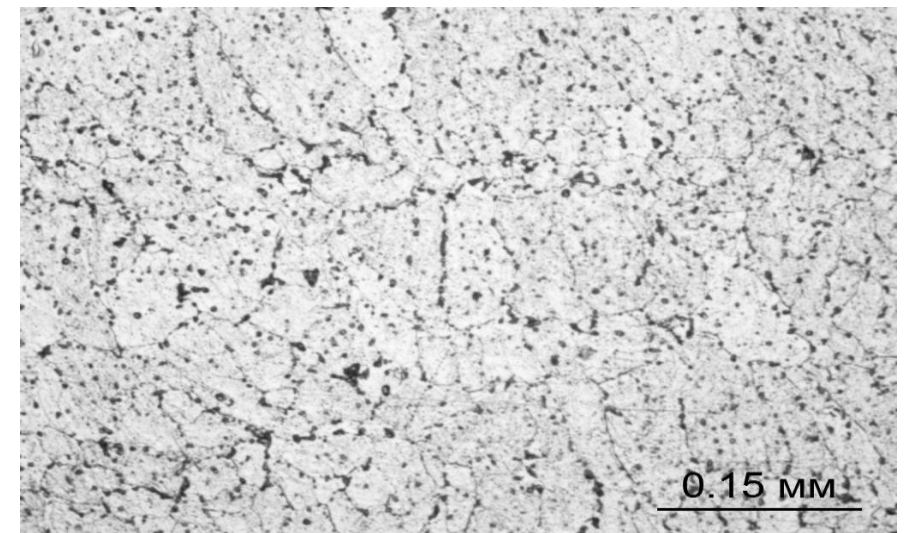
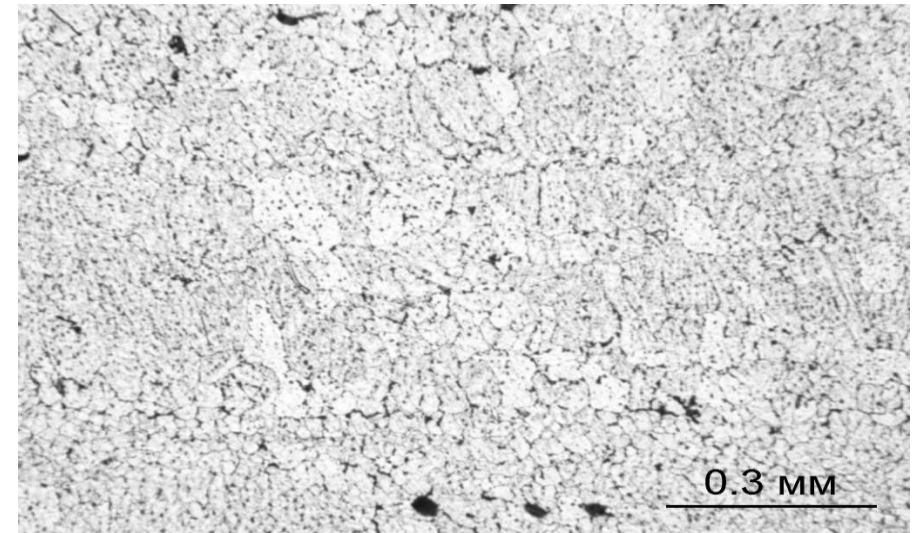


Нижняя часть

без деформационной обработки

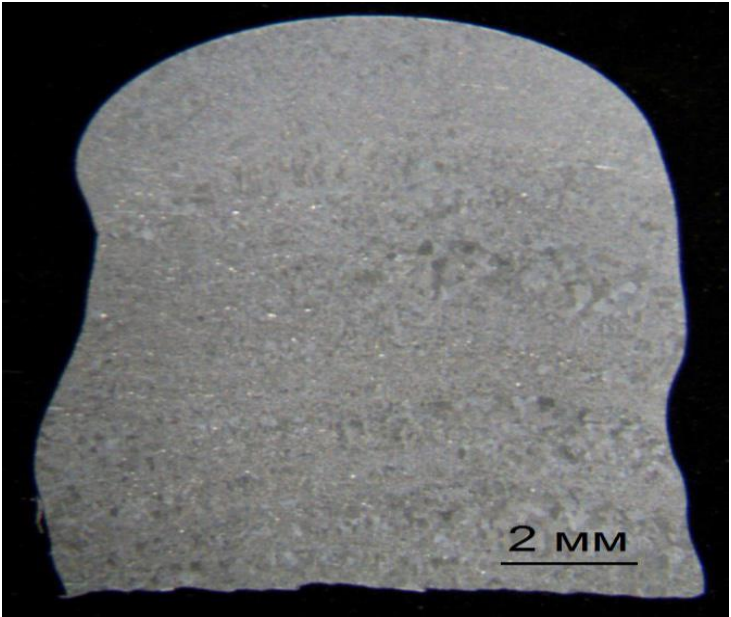


с послойной деформационной обработкой

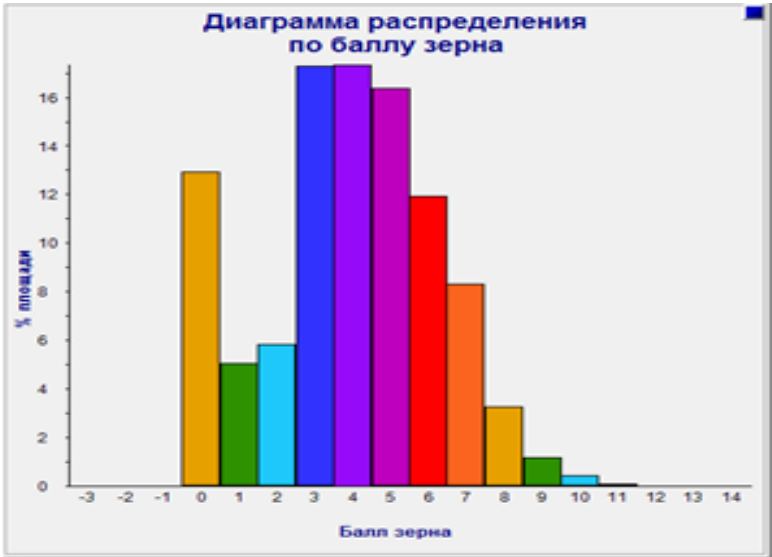


ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПРОКОВКИ НА ЗЕРНИСТОСТЬ СТРУКТУРЫ СПЛАВА 1580

Наплавка без проковки



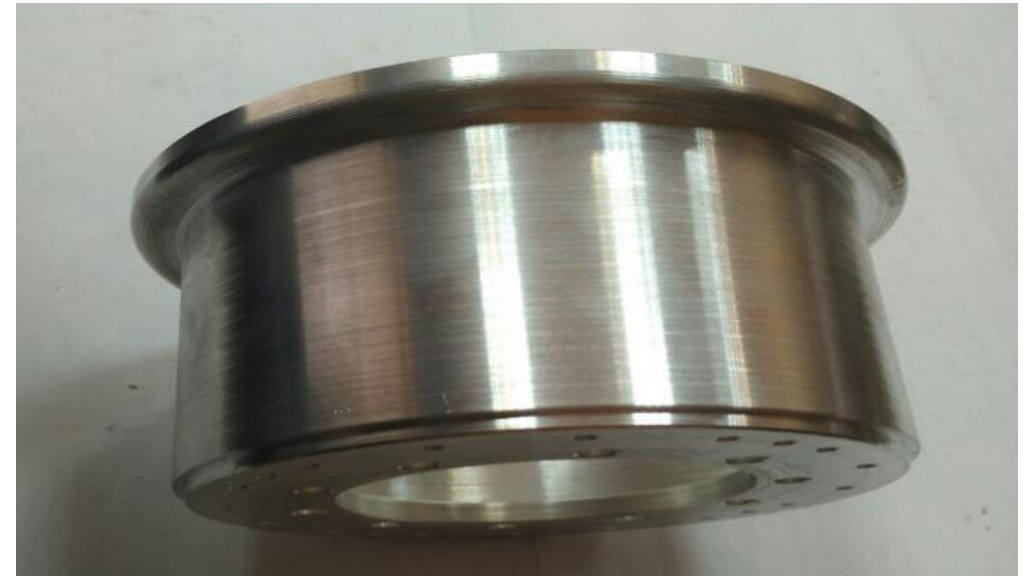
Наплавка с проковкой

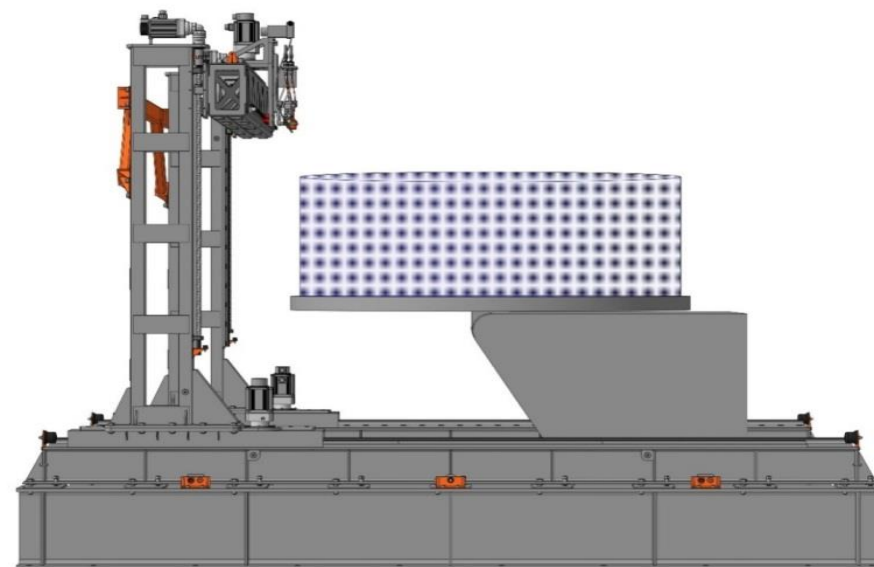
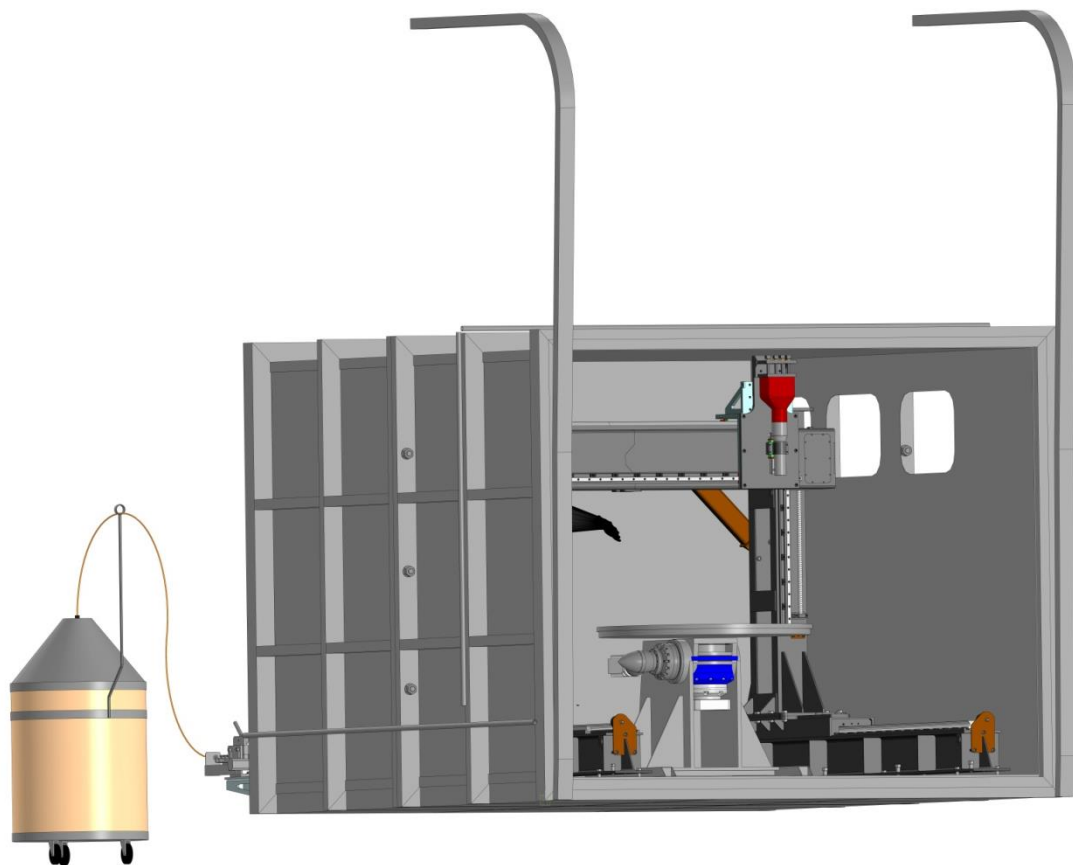


Влияние послойной ударной деформационной обработки

СМТ 1580

	СМТ	СМТ + термообработка	СМТ+проковка + ТО1	СМТ + проковка+ТО2
Предел прочности, МПа	239...246	249..268	266...277	319..337
Предел текучести, МПа	134...136	141..146	154...152	172...185
Удлинение, %	16	15...18	16...21	16...19





Пяти осевой аддитивный обрабатывающий центр (диаметр рабочей области до 1 метра)



**пермский
политех**

Аддитивный наплавочный центр ProM для сталей и алюминия



**ГИБРИДНОЕ
АДДИТИВНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО**

Оборудование портального типа
позволяет выполнять трехмерную
наплавку заготовок деталей
сложной пространственной формы.

Собственная электроника, ПО
и интуитивно понятный интерфейс
с автокалибровкой делают процесс
печати простым и быстрым.

Станок выполнен в формате моноблока
размером 2200x1200x2100 мм.
Размер области построения 800x600x600.

800x600x600

Установка содержит
сканирующую головку
для проверки геометрии в процессе печати.

Прецизионные направляющие и ШВП
гарантируют высокую точность
перемещения и повторяемость изделий.

В базовой комплектации обрабатывающий
центр оснащён наплавочной системой
использованием дуговой наплавки.

При наплавке применяются
собственные способы и режимы наплавки,
в том числе не имеющие аналогов.

ОСНОВНЫЕ НАПЛАВЛЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ



Конструкционные стали



Коррозионностойкие стали и сплавы



Жаропрочные стали и сплавы



Алюминиевые сплавы



 пермский
политех



Спасибо за внимание!
Трушников Дмитрий Николаевич
+7 (919) 478-50-31
trdimitr@yandex.ru



ГИБРИДНОЕ
АДДИТИВНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО

