



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**«ПРОМЕТЕЙ»**

**ИМЕНИ АКАДЕМИКА И. В. ГОРЫНИНА**

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# **Особенности стандартизации технологии сварки трением с перемешиванием и контроля качества сварных соединений в судостроении**

***Никулин Василий Евгеньевич***

Докладчик, инженер I категории, аспирант

***Алифиренко Евгений Анатольевич***

к.т.н., начальник лаборатории

Научно-производственный экспериментальный комплекс  
НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ»



## Цель и задачи исследования

**Цель:** Обеспечение воспроизводимости качественных СТП соединений при сварке СКО-панелей

---

### Задачи:

- 1) Оценка применения методик и способов НК при определении непровара в СТП соединениях;
- 2) Изучение и анализ зарубежного опыта в области контроля качества СТП соединений;
- 3) Внесение изменений в ТУ и ТИ для применения СТП и контроля качества сварных соединений при производстве СКО-панелей;
- 4) Применение метода рентгеновской дифракции при выявлении непровара в СТП соединениях.



## Дефекты при сварке трением с перемешиванием. Непровар.

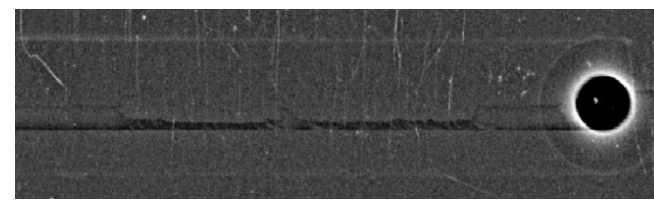
Типы дефектов	Причина возникновения	Способ выявления
Канал или тоннельный дефект, трещины	Отклонения от режимов сварки	Рентгеновский и ультразвуковой контроль, Операционный контроль
Грат, снижение толщины шва, подрез корня шва, недостаточное заполнение лицевой поверхности шва, задиры, неравномерная ширина сварного шва	Отклонения от режимов сварки	Визуально-измерительный контроль, операционный контроль
Смещение свариваемых кромок или провис	Смещение одной или двух кромок относительно подложки из-за нарушения закрепления заготовок	Визуально-измерительный контроль
Твердые включения	Износ сварочного инструмента	Рентгеновский контроль
<b>Непровар корня шва или отсутствие прочной связи по границе соединения</b>	Недостаточное внедрение инструмента, неправильно подобранный наконечник инструмента, недостаточное усилие, смещение инструмента относительно оси стыка и некачественная зачистка кромок	<b>Не выявляется НК,</b> Операционный контроль

Опасность **непровара** заключается в том, что его **невозможно гарантированно выявить** ни одним из стандартных методов НК. **Дефект** является протяженным и значительно **снижает прочностные свойства сварного соединения**.

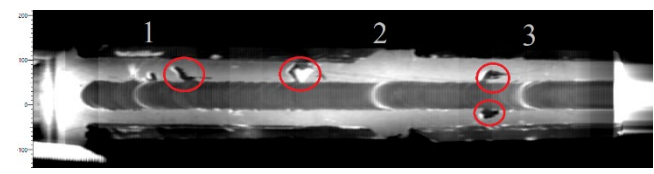


## Выявление непровара методами неразрушающего контроля при СТП.

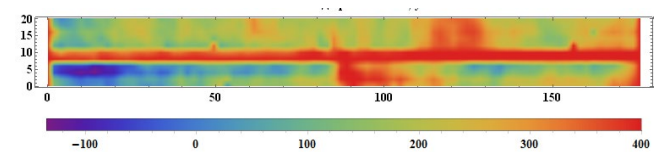
- При освоении технологии получения сварных крупногабаритных облегченных (СКО) панелей из алюминиевых деформируемых сплавов в 2017 году проводились исследования в области НК сварных соединений СТП.
- Рассмотрены визуальный, ультразвуковой, тепловой и вихретоковый методы контроля и разработана методика НК СКО панелей УНКМ.410004.002Д.
- Разрешающая способность методов НК **не позволяет** выявлять непровары с размерами раскрытия от 2 до 100 мкм. Выявление данного дефекта является острой проблемой для широком применении СТП.



*образец СТП соединения с дефектом типа канал*



*термограмма с искусственными дефектами при сварке*



*дефектограмма, полученная при вихретоковом контроле*

### Разрешающая способность методов НК

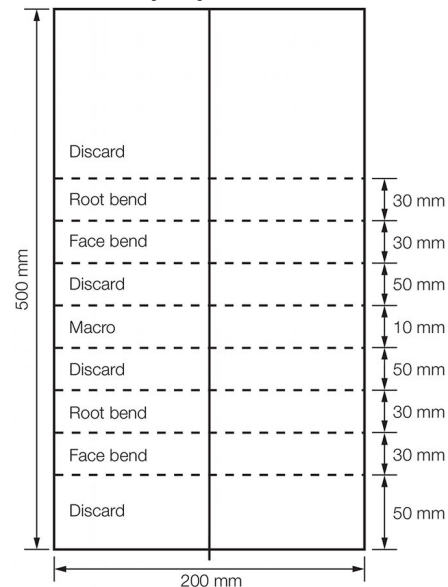
Рентгеновский	Ультразвуковой	Вихретоковый	Капиллярный	Визуальный
50-125 мкм и более	500 мкм и более	100 мкм и более	10 мкм и более	500 мкм и более



## Зарубежный опыт в выявлении непровара. Особенности сертификации технологии СТП.

- В 2011 году опубликован европейский стандарт по СТП в 5 частях ISO 25239 «Friction stir welding—Aluminium» (обновлен в 2020).
- В 2011 году в ABS (American Bureau of Shipping) подготовлено руководство по правилам аттестации технологии СТП и операторов сварки для морского судостроения.
- В 2020 британским обществом Lloyd's Register в «Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials» введены требования к проведению и аттестации технологии и операторов СТП в судостроении.

**Зарубежный опыт в контроле при СТП сводится к изготовлению и испытанию контрольных сварных проб (КСП).**  
При этом, НК носит формальный характер.



*Эскиз типовой контрольной пробы по данным Lloyd's Register*

Опыт НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» показывает, что наиболее достоверным методом в контроле качества СТП соединений является изготовление и испытание контрольных сварных проб (КСП).



## Изготовление и испытание КСП при СТП.

С июня 2022 года НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» внесены изменения по части контроля качества сварных соединений с изготовлением КСП при СТП в следующие документы:

1. **ТУ 24.42.20-189-07516250-2022** - Сварные крупногабаритные облегченные панели из деформируемых алюминиевых сплавов. Опытная партия.
2. **УЕИА.25390.00018 (2-ая редакция)** - Технология сварки трением с перемешиванием сварных крупногабаритных облегченных панелей из деформируемых алюминиевых сплавов. Технологическая инструкция.

КСП изготавливается и испытывается:

- после изменения технологии СТП;
- после изменения или замены оснастки;
- после ремонта или модификации оборудования;
- после обнаружения отклонений от оптимальных параметров СТП;
- при выявлении дефектов методами неразрушающего контроля;
- после выполнения сварных швов суммарной протяженностью более 100 м;
- в течение одной смены и максимальным интервалом между испытаниями 8 ч.

Минимальная длина КСП – 500 мм.

Из КСП изготавливают образцы для проведения следующих исследований:

- 2 образца на статический изгиб с растяжением внешней стороны шва;
- 2 образца на статический изгиб с растяжением корневой стороны шва;
- 2 образца на статическое растяжение сварного соединения;
- 1 образец для проведения металлографических исследований макроструктуры сварного соединения в поперечном сечении.

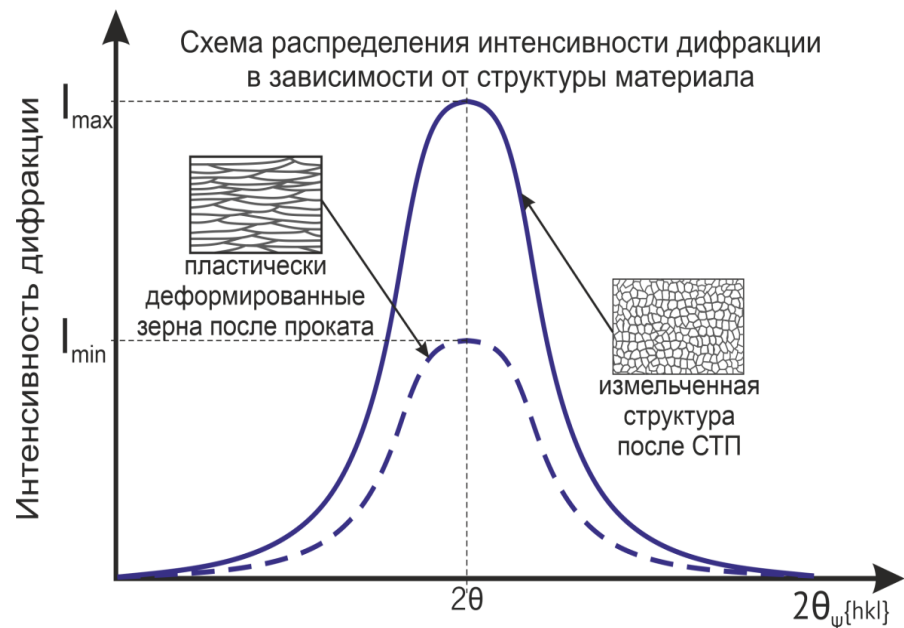


## Применение метода рентгеновской дифракции при выявлении непровара в соединениях СТП.

Одной из особенностей сварного СТП соединения является формирование измельченной структуры равноосных зерен размером от 2 до 6 мкм по всей высоте металла шва, которая отличается от структуры пластически деформированных зёрен с характерным размером 30-40 мкм.

Метод рентгеновской дифракции позволяет выявлять различия в зерновой структуре металла, что дает возможность определять в корне СТП шва наличие характерной измельченной структуры, либо исходную структуру деформированного металла.

Это позволяет рассмотреть метод рентгеновской дифракции для выявления непровара в корне СТП шва.





## Постановка эксперимента для выявления неговара в соединениях СТП методом рентгеновской дифракции.

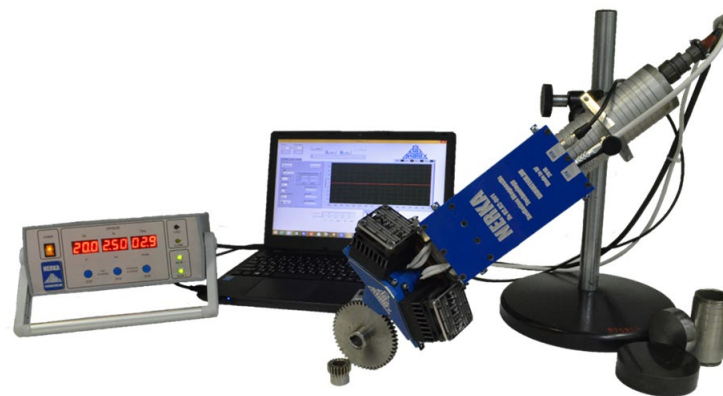
Для выявления неговара были изготовлены КСП размером 500x300x2,7 мм из алюминиевого сплава 1561. Параметры сварки при изготовлении КСП:

Скорость сварки	Частота вращения	Осевое усилие	Угол атаки
1000 мм/мин	1000 об/мин	1500 кг	1,5 град.

КСП выполнялись инструментом с укороченным наконечником – формируя неговар от 20 до 150 мкм, и наконечником стандартной длины – для КСП без неговара.

Корневую сторону КСП исследовали методом рентгеновской дифракции, а образцы из КСП испытали на статический изгиб и провели металлографический анализ.

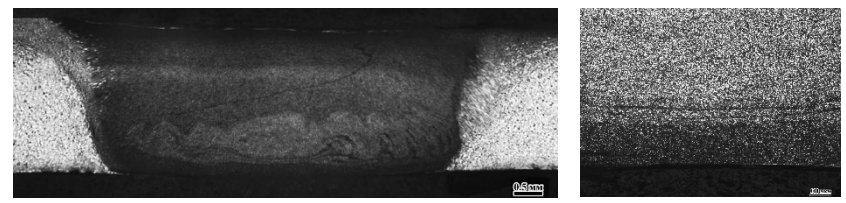
Выявление неговара методом рентгеновской дифракции проводили портативным рентгеновским кристалл-дифракционным анализатором «HePKA».



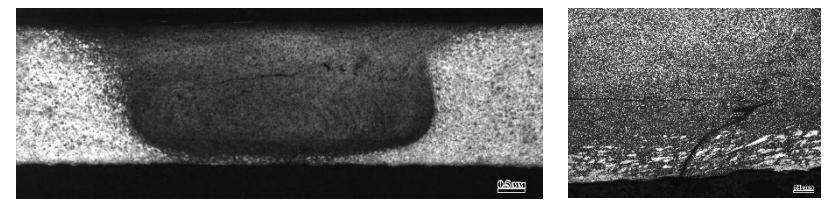
Портативный рентгеновский кристалл-дифракционный анализатор «HePKA» (ООО «РаДиаТех»)



# Результат выявления непровара в СТП соединениях



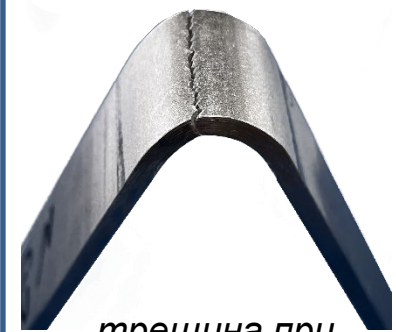
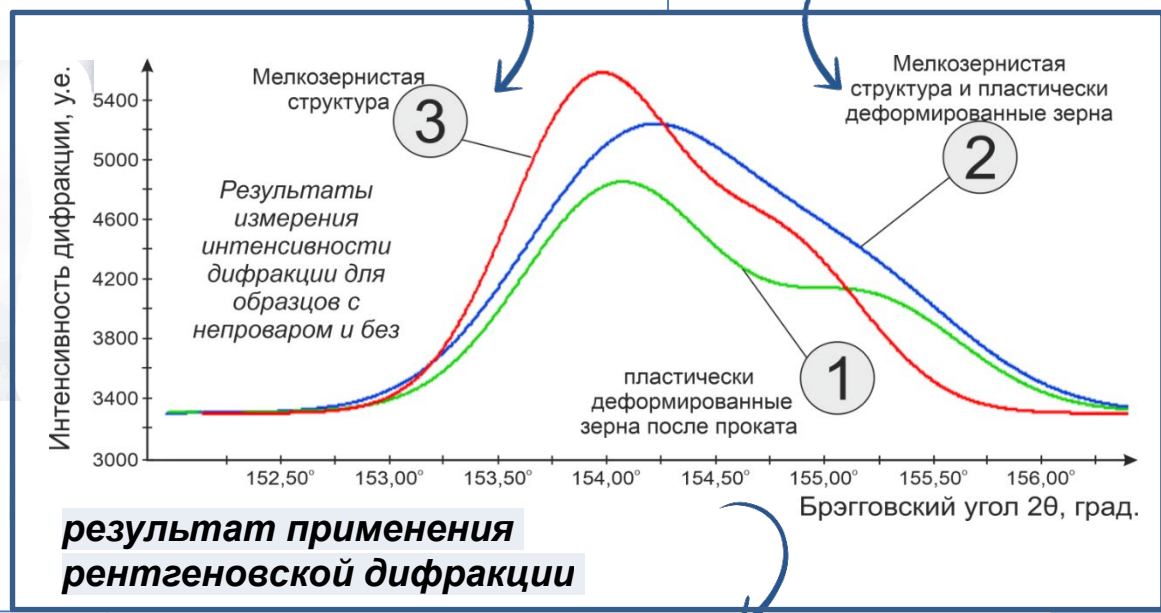
отсутствие непровара



непровар 20 мкм



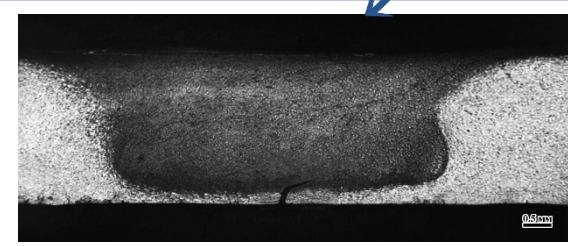
изгиб без трещины



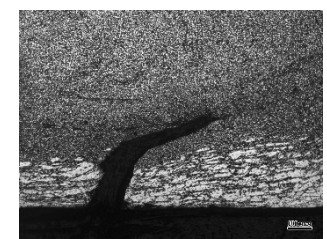
трещина при изгибе



разрушение при изгибе



непровар 150 мкм





## Применение СКО-панелей



Судно на воздушной Хаска-10  
СКО-панели изготовлены в 2019 г



Высокоскоростной катер специального назначения  
СКО-панели в процессе изготовления 2022 г



Пассажирские суда катамаранного типа  
Изготовление СКО-панелей в 2022 г



Десантный катер на воздушной подушке  
Проект 2023-2024



Экранопланы серии ES  
Проект 2023-2024



## Заключение

1	Стандартные методы НК не позволяют выявить непровар в СТП соединениях.
2	Изготовление и испытание КСП позволяют гарантировать качество СТП соединений, включая выявление непровара.
3	Внесены изменения в ТУ и ТИ для производства СКО-панелей, включая контроль стабильности процесса СТП с применением КСП.
4	Получена зависимость между структурой и непроваром в корне СТП соединения, по результатам применения рентгеновской дифракции. Результаты подтверждены металлографией и испытаниями на статический изгиб.
5	Перспективное применение рентгеновской дифракции совместно с изготовлением и испытанием КСП позволит снизить трудоемкость проведения контроля.

# Благодарю за внимание!

Никулин Василий Евгеньевич  
Инженер I категории, аспирант  
Лаборатория 129, сектор 129-1

Научно-производственный экспериментальный комплекс  
НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ»

*Автор благодарит коллектив лаборатории 129 и коллег участка рентгено-структурного анализа за помощь в консультации при подготовке материалов доклада.*

*Отдельная благодарность Косьяненко Сергею Викторовичу («НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ», ООО «РаДиаТех») за разработку и предоставление портативного оборудования для проведения рентгеновского дифракционного анализа.*