

УДК 629.7

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ АВИАЦИОННЫХ ФЕРМЕННО-РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ 30ХМА

Александр Федорович Николаев

ООО «Научно-технологическая инициатива»

г. Новосибирск, [airnaf@yandex.ru](mailto:airnaf@yandex.ru)

*Была разработана и успешно применена цифровая технология создания сварных авиационных ферменно-рамных конструкций.*

*Ключевые слова: тонкостенные трубы, сталь хромоль, сварка в стапеле, фасонные торцы труб, бесчертежная технология, станок ЧПУ, ферма фюзеляжа, лёгкий многоцелевой самолёт.*

*THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TECHNOLOGY FOR THE  
MANUFACTURE OF WELDED AIRCRAFT TRUSSED-FRAME STRUCTURES  
FROM THIN-WALLED TUBES CHROMOLY*

*Was developed and successfully used digital technology to create aircraft welded trussed-frame structures.*

Keywords: thin-walled pipe, steel chromoly, welding in the stocks, shaped the ends of the pipes, ascertia technology, CNC machine, farm fuselage, light multipurpose aircraft.

Была разработана в 3D-моделях (отечественная САД-программа «Компас-3D») ферма фюзеляжа 6-8 местного лёгкого многоцелевого самолёта (ЛМС), изготовлена в деталях из стали 30ХМА, собрана в стапелях-кантователях и сварена аргоно-дуговой сваркой (TIG) по разработанной технологии.

## СОВРЕМЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СВАРНЫХ АВИАЦИОННЫХ ФЕРМЕННО-РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Несмотря на широкое развитие современных авиационных материалов, ферменные сварные фюзеляжи широко применяются в конструкции легких самолётов благодаря своим неоспоримым преимуществам – высокой прочности, особенно при ударных и сосредоточенных нагрузках, долговечности, невысокому весу и стоимости.

Применение сочетания (композиции) сварной стальной фермы с не несущей обшивкой фюзеляжа из полимерных композитных материалов (ПКМ) целесообразно в конструкции современных пилотажных самолётов и ЛМС внеаэродромного базирования. Такое сочетание позволяет достичь одновременно лёгкости и прочности конструкции, низкой стоимости и хорошей аэродинамической формы поверхности.

На другом конце ряда всех летательных аппаратов (ЛА), расположенных по возрастанию их скорости, находятся космические аппараты (в т.ч. экспериментальный орбитальный самолёт «ЭПОС»), в конструкции каркаса которых применяются сварные фермы из тонкостенных труб. Для изготовления таких космических ферм разработанная технология также может быть применена.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФАСОННЫХ ТОРЦОВ ТРУБ

Ферменно-рамные конструкции из тонкостенных цилиндрических труб, как и весь самолёт, прекрасно моделируются в САД-программах, но имеют свои особенности. Для труб ферм важна точная геометрия фасонных вырезов торцов труб и точное взаимное положение этих вырезов по углу и по расстоянию на обоих торцах в каждой трубе, важно правильно определить для каждого узла фермы – в какой трубе делать вырез.

Кроме того желательно, чтобы исполняемая геометрия фасонного выреза торца трубы отличалась от выреза по исходной 3D-модели по соображениям технологичности, т.е. была модифицирована (рис. 1-2). Если ось фрезы станка с ЧПУ всегда перпендикулярна оси трубы, то это существенно упрощает технологию изготовления фасонного торца. При этом получается как бы разделка острой кромки торца трубы под сварку.

Для сварных соединений любых деталей важно, чтобы размер зазора между ними не превышал допустимой величины. Особенно это важно при сварке пространственных узлов из тонкостенных труб. При сварке тонкостенных труб зазор 0,5 мм можно считать предельно допустимым [1,4]. При сварке соединения труб с большей величиной зазора между ними резко увеличивается нагрев околошовного металла и увеличиваются поводки всей сварной конструкции.

Если учесть, что в ферме фюзеляжа 6-8 местного самолёта более 300 труб, что оба торца каждой трубы нужно обрабатывать за одну установку заготовки в станке, то очевидно, что нужен специализированный станок с ЧПУ с двумя линейными и одной поворотной осью, с большим ходом по одной из линейных осей.

### СТАНОК С ЧПУ «ТРУБОФРЕЗЕР»

Такой настольный станок с ЧПУ «Трубофрезер» [5,6] для обработки фасонных торцов стальных труб нами был создан в 2014 г. и прекрасно себя оправдал (рис. 3). Станок сконструирован с применением 3D – моделирования, с монтажом и настройкой электронно-механической части, с отладкой цифрового управления от ПК.

Заготовки труб закрепляются в станке с помощью набора разработанных и изготовленных нами разжимных цанг, осуществляющих фиксацию трубы с обоих концов изнутри (по внутреннему диаметру) одновременно,

позволяющих обрабатывать оба торца трубы без перезакрепления заготовки и в тоже время осуществлять программный поворот заготовки вокруг её оси.

Известные преимущества применения станков с ЧПУ нам удалось в полной мере реализовать в наших экспериментах:

1. Не нужен чертёж трубы, применена бесчертежная технология. Вообще конструктору или фрезеровщику не надо знать углы наклона резов и углы поворота резов торцов трубы.
2. Уменьшено влияние человеческого фактора при изготовлении – не надо вручную выставлять угол наклона реза и угол поворота реза, вылет конца трубы (как в любых ручных приспособлениях).
3. Высокая точность изготовления. В нашем случае по торцу трубы 0,05 мм, по длине трубы 0.1 мм. Высокая взаимозаменяемость деталей и агрегатов в изготавливаемой конструкции.
4. Высокая повторяемость. Программа ЧПУ создаётся один раз на первый экземпляр. Все детали по одной программе получаются одинаковыми.
5. Высокая производительность, особенно при изготовлении нескольких экземпляров. В нашем случае фрезеровка одного торца трубы занимала меньше 1 минуты независимо от сложности этого торца.
6. Высокая гибкость при внесении изменений в конструкцию.
7. Хорошая совместимость станков с ЧПУ (через САМ-программы) с САД-программами.

## ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТРУБ 30ХМА

Для изготовления сварных авиационных конструкций нами были применены тонкостенные бесшовные круглые трубы из стали 30ХМА – отечественного аналога широко распространённой в мире стали 4130 (США). Такие стали имеют общее название хромоль.

Основное преимущество стали хромоль – высокая прочность сварного соединения деталей в нормализованном состоянии без необходимости какой-либо термообработки после сварки при невысокой стоимости стали. Тонкостенные трубы из стали 4130 нашли широкое применение в мире в авиационной промышленности, в производстве рам велосипедов и рам гоночных автомобилей.

В современной России сталь 30ХМА широко распространена в виде кругляка, листов и толстостенных труб. Тонкостенных труб из стали 30ХМА в современной России до 2014 г. не производили.

Для того, чтобы заказать и получить первую партию тонкостенных труб из стали 30ХМА в 2014 г. от Певроуральского новотрубного завода, нашей организации пришлось пойти на определённый риск и выполнить определённую организационно-технологическую работу. Как выяснилось, на этом заводе тонкостенные трубы из стали 30ХМА не производились несколько десятилетий, просто не осталось людей, которые бы помнили все тонкости технологии производства таких труб из этой стали.

Историческая справка. В 30-е годы 20-го века в СССР производство труб для авиационной промышленности из стали 30ХМА было прекращено из-за дефицита легирующего элемента – молибдена. Сталь 30ХМА, применявшаяся в виде тонкостенных труб в сварных фермах фюзеляжей самолётов МиГ-3, Як-1 и др., была заменена на не менее прочную сталь 30ХГСА, не требующую дефицитного легирующего элемента, но требующую термообработку после сварки.

Из полученных труб нами были изготовлены плоские образцы для испытания на хим. анализ состава сплава, цельные и сварные (сваркой TIG) плоские образцы на статическую прочность (растяжение), заказаны в специализированных и аттестованных организациях испытания образцов в

2014-2015 г.г., проведён анализ полученных результатов испытаний (рис. 4, 5).

По результатам испытаний более 100 образцов можно сделать выводы:

1. По химическому составу и прочности на разрыв образцы из стали 4130 и стали 30ХМА (цельные и сварные) довольно близки друг другу. Характеристики образцов из стали 30ХМА соответствуют стандартам [2, 3].
2. Сварочное соединение деталей из стали 30ХМА, как и стали 4130, не требует термообработки после сварки, прочность такого соединения не зависит от температуры воздуха при сварке и от марки присадочной проволоки.
3. В околошовной зоне образца не происходит ослабления прочности, сварочный шов оказывается прочнее цельного металла – разрушение образцов почти всегда происходило далеко от сварочного шва.
4. Сварные образцы из разных сталей (сталь 30ХМА + сталь 20) хорошо свариваются и имеют удовлетворительную прочность.
5. Раскрой образцов лазером не влияет на прочность образцов.
6. Прочностные характеристики образцов из труб 30ХМА разной толщины, диаметра, партий поставок довольно близки.

### СТАПЕЛИ-КАНТОВАТЕЛИ И СБОРКА-СВАРКА ФЕРМЫ

При серийном производстве сварных авиационных ферменно-рамных конструкций из тонкостенных труб применение сварочных стапелей-кантователей представляется целесообразным (рис. 6). Такие стапели позволяют сваривать конструкцию с высокой точностью, необходимой для обеспечения взаимозаменяемости агрегатов конструкции самолёта, для обеспечения допустимых размеров зазора в сварочном шве. Кантование всей свариваемой конструкции обеспечивает удобство сварки, возможность избежать потолочных и даже вертикальных сварных швов.

Стапели-кантователи нами проектировались, изготавливались и собирались с точностью координат контрольных точек ложементов труб  $\pm 0,1$  мм. Были приняты допустимые отклонения координат узлов (пересечения осей труб) фермы фюзеляжа самолёта  $\pm 0,5$  мм. Допустимая точность геометрии фермы вне узлов была принята  $\pm 1,0$  мм.

В каждом стапеле сначала точно устанавливались и жёстко фиксировались детали (кронштейны, втулки) ответных узлов (рис. 7), соединяющих ферму фюзеляжа с другими агрегатами самолёта, затем в ложементы труб (рис. 8) в определённой последовательности устанавливалась и закреплялась часть труб фермы, остальные трубы устанавливались по месту. Благодаря точным фасонным вырезам торцов труб каждая труба устанавливалась в стапель совершенно однозначно.

Были применены метод поэтапной сборки сварных конструкций, оптические и механические методы контроля точности изготовления стапелей и готовой ферменно-рамной конструкции, отработаны методы, приёмы и последовательность аргоно-дуговой сварки (TIG) конструкции из тонкостенных труб в стапеле. Отработаны методы предупреждения и борьбы со сварочными поводками конструкции. Отработана технология цифрового проектирования сварочных стапелей и изготовления панелей (подборок) стапелей на фрезерном станке с ЧПУ, сборки и юстировки стапелей.

Вся ферма фюзеляжа самолёта была технологически расчленена на хвостовую часть фермы, кабину фермы и переходную зону. Соответственно, были созданы стапели-кантователи хвостовой части фермы и кабины фермы. После сборки этих частей фермы в их стапелях стапели-кантователи хвостовой части фермы и кабины фермы выставлялись точно относительно друг друга. После чего трубы переходной зоны устанавливались по месту, вне стапелей, и кабина фермы сваривалась с хвостовой частью фермы трубами переходной зоны.

Наиболее сложный стапель-кантователь кабины фермы состоит из неразъёмного жёсткого (сваренного из прямоугольных стальных труб) каркаса-параллелепипеда с надетыми и приваренными к нему кольцами для кантования и съёмных панелей (на штифтах и болтах) с несъёмными точными узлами ложементов труб фермы. Каждый стапель-кантователь стоит кольцами на роликах (с фиксаторами положения колец) на своей тележке, которая позволяет перемещать стапель по цеху и устанавливать его точно относительно другого стапеля.

Все этапы создания серийной цифровой технологии для изготовления фермы фюзеляжа (рис. 9) 6-8 местного ЛМС [7] были успешно нами реализованы, получены высокая точность изготовления фермы и высокое качество сварных швов. В работе принимали участие инженеры Клубникин С.В., Федоров Ю.С., Филимонов И.А., Яцкевич А.С. под руководством автора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Производственная инструкция НИАТ ПИ 1.4.75-2000.
2. ГОСТ 8734-75 Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент.
3. ГОСТ 4543-71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия.
4. Кривов Г.А., Рябов В.Р. и др., под ред. Патона Б.Е. Сварка в самолётостроении. Киев: изд-во МИИВЦ, 1998.
5. Клубникин С.В. Разработка трубофрезерного станка с ЧПУ СК-1 для изготовления деталей ферменных конструкций // Сб. докладов конференции «Наука, технологии, инновации». Новосибирск: изд-во НГТУ, 2015.
6. Яцкевич А.С. Разработка специализированной САМ-системы «Ассистент» для изготовления трубных деталей авиационных ферменных конструкций // Сб. докладов конференции «Наука, технологии, инновации». Новосибирск: изд-во НГТУ, 2015.
7. Николаев А.Ф. Концепция семейства однодвигательных лёгких многоцелевых самолётов «Проект-300» внеаэродромного базирования // Сб. докладов XI международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации «Геленджик-2016». М.: Изд-во ЦАГИ, 2016.



## РИСУНКИ

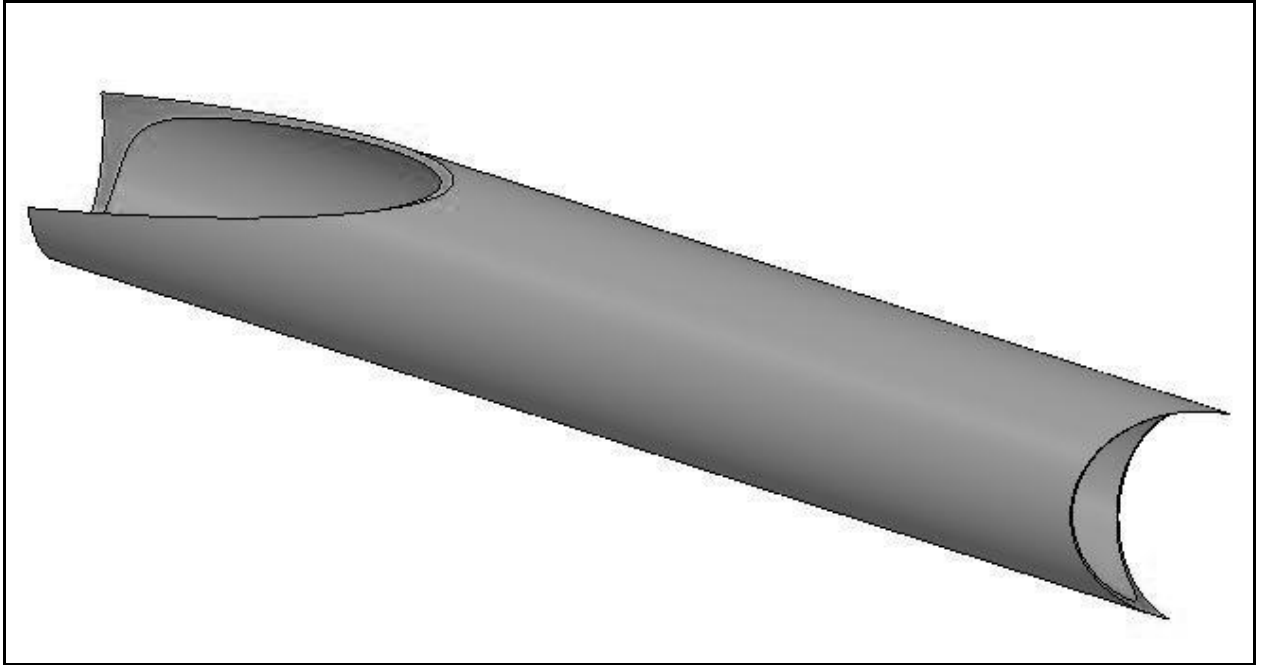


Рис. 1. Исходная 3D-модель фасонных вырезов торцов трубы.

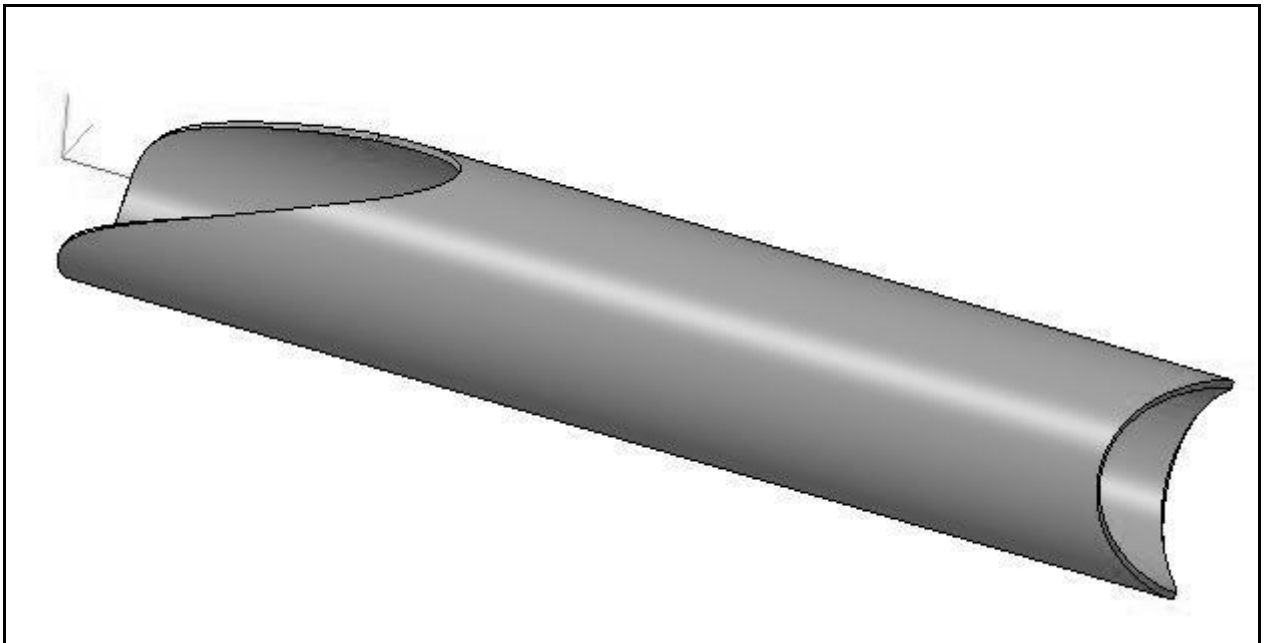


Рис. 2. Модифицированная 3D-модель фасонных вырезов торцов трубы.



Рис. 3. Станок с ЧПУ «Трубофрезер».

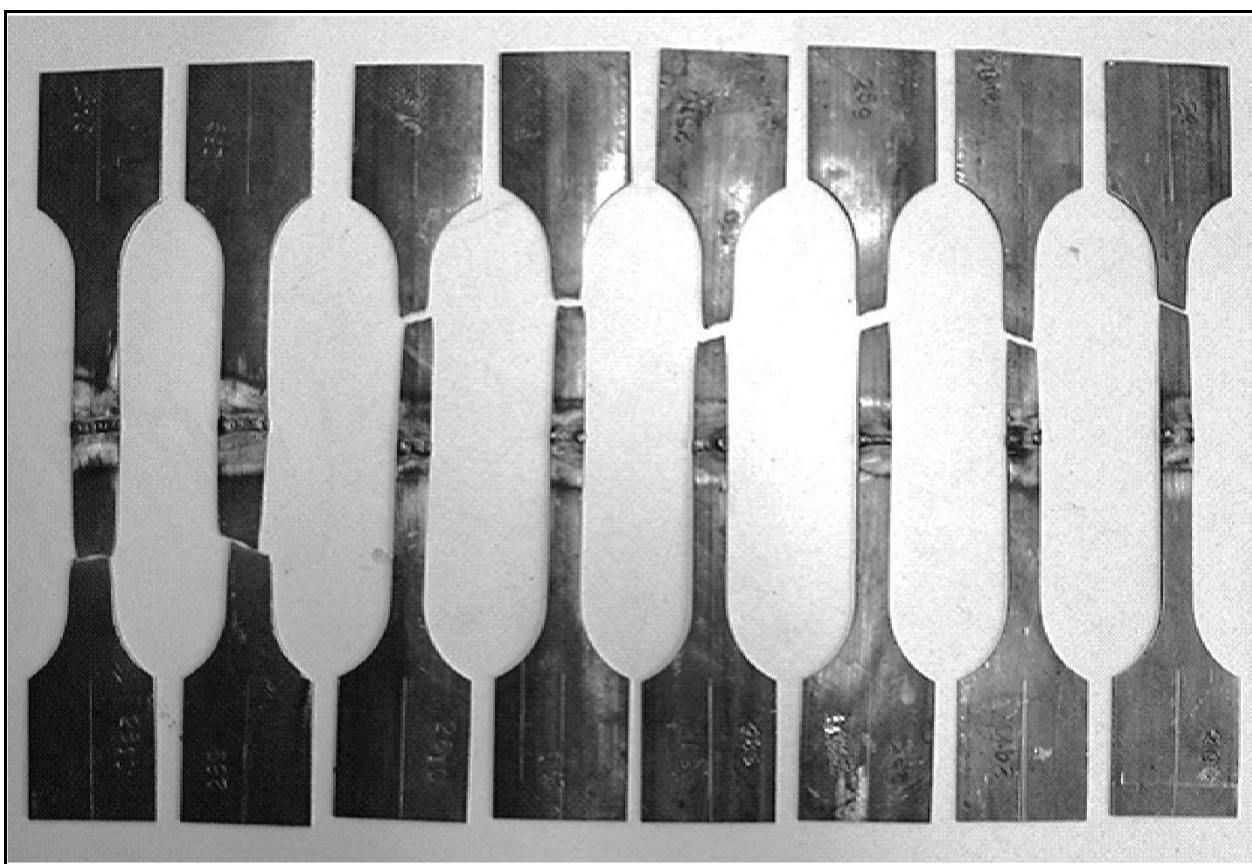


Рис. 4. Образцы после испытания на растяжение.

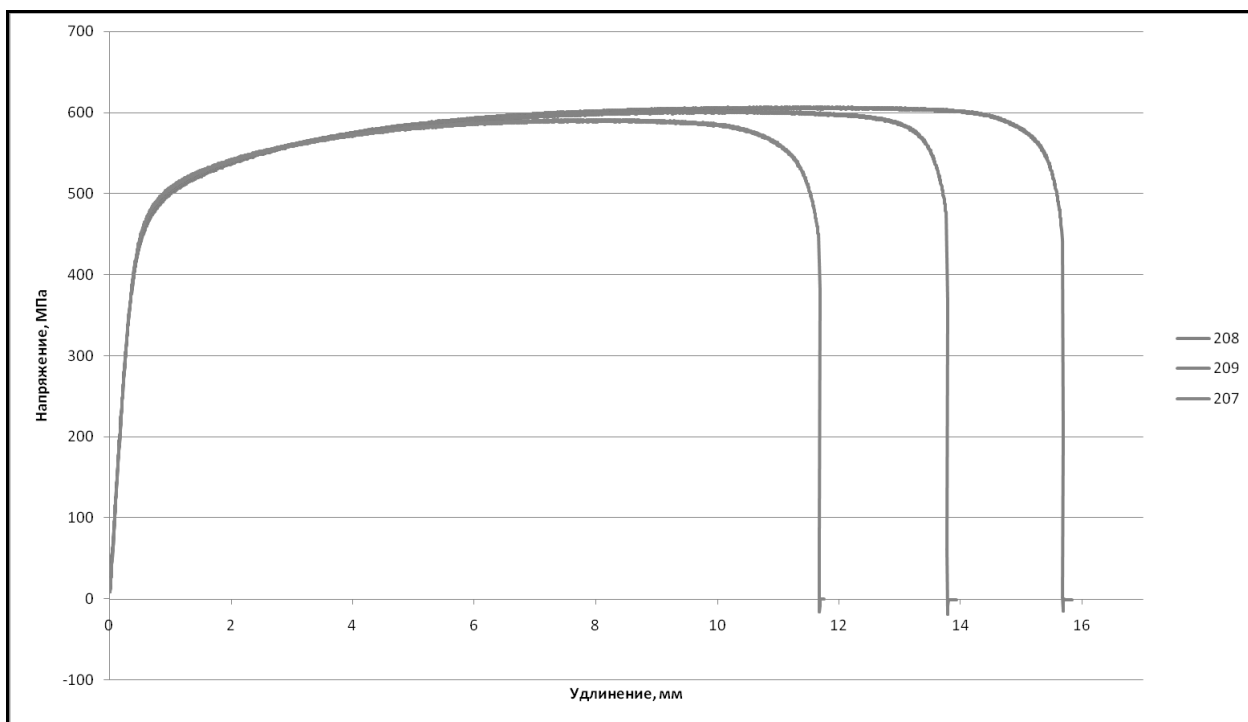


Рис. 5. Диаграмма растяжения цельных образцов из трубы 20х1 сталь 30ХМА (3 экземпляра образцов).

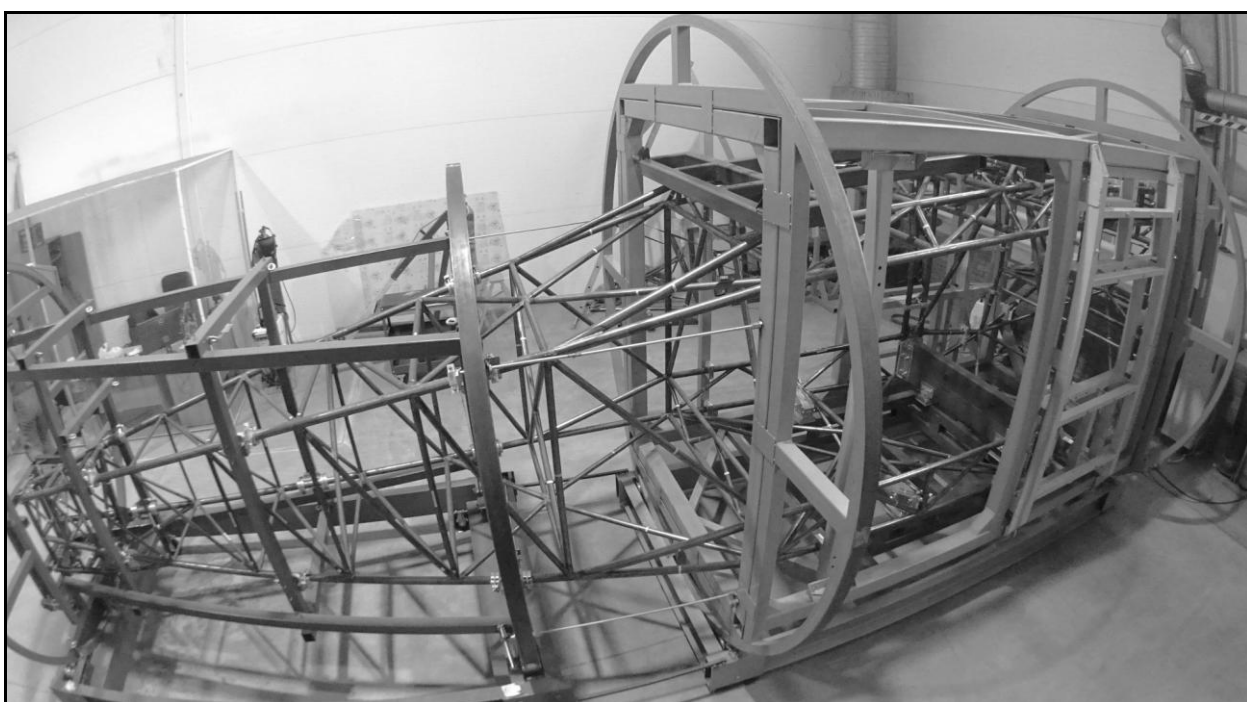


Рис. 6. Сборка-сварка фермы в стапелях-кантователях.



Рис. 7. Сварной узел фермы.



Рис. 8. Ложемент труб фермы в стапеле-кантователе.



Рис. 9. Готовая ферма фюзеляжа самолёта.