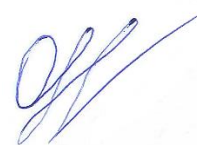


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



САМОЙЛЕНКО ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ МАЛОЖЕСТКИХ
ДЕТАЛЕЙ ТИПА ПЛАСТИН С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ,
УПРОЧНЯЕМЫХ ДРОБЬЮ С ПРЕВЕНТИВНЫМ
ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Специальность 2.5.6. – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

А.Е. Пашков

Иркутск, 2023

Содержание

Введение	4
1 Теория и практика изготовления деталей каркаса типа пластин с подкреплением	4
1.1 Конструктивные особенности подкреплённых деталей каркаса.....	12
1.2 Обеспечение точности формы и ресурса подкреплённых деталей технологическими методами	14
1.3 Теоретические и экспериментальные исследования процесса изготовления упрочняемых дробью подкреплённых деталей	29
1.3.1 Исследования процессов формообразования и правки подкреплённых деталей раскаткой роликами	29
1.3.2 Исследования процессов формообразующей и упрочняющей дробеударной обработки	35
1.4 Постановка цели и задач исследования	43
2 Определение внутренних силовых факторов и структуры зоны упрочняющей дробемётной обработки деталей типа пластин с подкреплением	46
2.1 Определение внутренних силовых факторов процесса	46
2.2 Исследование остаточных напряжений, создаваемых дробемётной обработкой.....	56
2.3 Исследование структуры зоны дробемётной обработки.....	60
2.4 Определение фракционного состава дроби, применяемой при упрочнении деталей	66
Выводы по главе 2.....	70
3 Моделирование формоизменения деталей типа пластин с подкреплением при дробемётном упрочнении	71

3.1 Общие подходы к моделированию.....	71
3.2 Моделирование единичного внедрения дроби в материал детали	72
3.3 Моделирование множественного внедрения дроби в материал детали .	77
3.4 Моделирование формоизменения образцов-пластин после дробемётного упрочнения	84
3.5 Моделирование процесса упрочняющей обработки конструктивно-подобных образцов деталей с целью определения искажения формы	87
Выводы по главе 3.....	95
4 Практическая реализация результатов исследования	96
4.1. Отработка технологического сочетания «Превентивное деформирование – дробемётное упрочнение»	96
4.3 Исследование влияния режимов и условий процесса раскатки рёбер на усталостную долговечность материала деталей, подвергаемых дробемётному упрочнению	105
4.3 Разработка технологических рекомендаций по минимизации коробления деталей при дробемётном упрочнении превентивным деформированием раскаткой рёбер роликами.....	121
Выводы по главе 4.....	128
Заключение	130
Библиографический список	133
Список сокращений и условных обозначений	146
Приложение А	148
Приложение Б.....	173
Приложение В	177
Приложение Г	205

Введение

В конструкцию силового каркаса летательных аппаратов и судов входят детали типа «Шпангоут», «Стенка», «Панель», «Обод» и т.д., представляющие собой пластины с подкреплением. Данные детали имеют значительные габаритные размеры (несколько метров) и изготавливаются фрезерованием из высокопрочных алюминиевых сплавов. В целях снижения веса и повышения жесткости детали, как правило, состоят из полотна и подкрепляющего набора в виде продольно-поперечного оребрения. В целях повышения эксплуатационного ресурса ответственных деталей применяется поверхностное деформационное упрочнение ударными методами. Для деталей с большими габаритными размерами наиболее эффективным способом упрочнения является дробеударная обработка.

При изготовлении подкреплённых деталей, как в процессе фрезерования, так и при последующем упрочнении возникает нежелательная деформация (коробление), выражающаяся в отклонении от плоскостности и саблевидности. После фрезерования коробление устраняют, в основном, правкой прессовой гибкой. Главными недостатками данного метода являются зависимость от квалификации исполнителей и высокая вероятность брака из-за образования трещин. Лучшие результаты дают методы правки местным пластическим деформированием, одним из которых является раскатка роликами элементов подкрепляющего набора деталей, в связи с хорошей управляемостью, отсутствием пружинения и исключением риска трещинообразования.

Серьёзной проблемой является обеспечение точности упрочнённых деталей, поскольку их правка пластическим деформированием недопустима в связи с возможным разупрочнением. Искажение формы маложестких деталей можно рассматривать как проявление технологической наследственности операции дробеударного упрочнения. Вызывая удлинение поверхностных

слоёв упрочняющая обработка ППД неизбежно приводит к нежелательным деформациям деталей.

Единственным разрешенным отраслевыми инструкциями способом снижения коробления, возникающего в процессе дробеударного упрочнения, является последующая правка ручными дробеструйными установками. Однако в связи с наличием пластически деформированного при упрочнении поверхностного слоя, данный способ требует повышенной интенсивности обработки, что ограничивает его возможности и может привести к перенаклепу.

Эффективным решением проблемы нежелательных отклонений пространственной формы маложестких подкреплённых деталей является управление технологическим наследованием в процессе дробеударного упрочнения, путём *превентивного деформирования*, т.е. внесения в деталь расчётного предыскажения формы, компенсирующего её коробление, образующиеся при последующем упрочнении. Использование для превентивного деформирования раскатки роликами элементов подкрепляющего набора деталей обеспечивает преимущества перед существующими способами деформирования подкреплённых деталей по качеству и производительности.

Актуальность темы исследования определяется высокими требованиями к качеству наиболее сложных, ответственных и дорогостоящих деталей каркаса, типа маложестких пластин с подкреплением, применяемых в авиастроении, судостроении, ракетостроении и других отраслях промышленности. При изготовлении данных деталей необходимо обеспечить заданные показатели точности пространственной формы и ресурса. Одновременное достижение данных показателей представляет проблему в связи с тем, что для повышения усталостной долговечности деталей применяется дробеударное упрочнение, имеющее побочный эффект в виде искажения пространственной формы (коробления) деталей. Правка

упрочненных деталей методами упругопластического деформирования недопустима, т.к. может привести к потере упрочняющего эффекта. Разработка технологических решений по минимизации коробления при дробеударном упрочнении обеспечит возможность достижения заданных ресурсных параметров деталей.

Таким образом, была определена **цель работы**: повышение эффективности производства и качества маложестких деталей типа пластин с подкреплением на основе прогнозирования отклонений формы деталей при дробеударном упрочнении и их минимизации путём превентивного деформирования.

Достижение поставленной цели возможно после решения следующих задач:

1. Разработать методику определения внутренних силовых факторов процесса дробеударной обработки в виде растягивающих сил, действующих на конструктивные элементы обрабатываемых деталей, и координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности) конечно-элементным моделированием с учетом структуры зоны обработки применяемого оборудования и фракционного состава рабочей среды;

2. Разработать методику конечно-элементного моделирования процесса дробемётного упрочнения путём нагружения моделей деталей расчетными силами, соответствующими режимам обработки, с целью определения формоизменения обработанных деталей;

3. Предложить способ минимизации искажения пространственной формы деталей в процессе дробеметного упрочнения, заключающийся в превентивном деформировании раскаткой роликами конструктивных элементов деталей, с определением технологических параметров на основе расчетного формоизменения упрочненной детали;

4. Исследовать технологические возможности правки деталей после дробемётного упрочнения дробеструйной обработкой;

5. Разработать и реализовать программы экспериментального исследования по проверке адекватности результатов моделирования процесса дробемётного упрочнения на конструктивно-подобных образцах деталей; по определению влияния операции превентивного деформирования на усталостную долговечность материала деталей.

Представленная диссертация содержит результаты научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, направленных на создание эффективной технологии обработки деталей типа пластин с подкреплением из алюминиевых сплавов в последовательности «Превентивное деформирование – дробеударное упрочнение».

Научная новизна работы:

1. Впервые установлены характерные для упрочняемых дробеударным методом деталей типа пластин с подкреплением количественные взаимосвязи

- внутренних силовых факторов в виде растягивающих сил и координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности), возникающих в поверхностном слое детали при дробемётном упрочнении и приводящих к короблению детали, с технологическими параметрами процесса обработки;

- параметров коробления в виде стрел прогиба в сечениях деталей с внутренними растягивающими силами, действующими на конструктивные элементы деталей и связанными с режимами дробемётного упрочнения (п. 7 паспорта специальности 2.5.6).

2. Предложена предсказательная модель процесса дробемётного упрочнения смесью дроби регламентированного фракционного состава, представляющая множественное внедрение в обрабатываемую поверхность партий дробин с диаметрами, определёнными на основе анализа реального микрорельефа обработанной поверхности (п. 6 паспорта специальности 2.5.6).

3. Обоснована возможность управления процессом технологического наследования отклонений пространственной формы деталей типа пластин с подкреплением при дробеметном упрочнении, заключающийся в превентивном деформировании конструктивных элементов деталей раскаткой роликами с созданием расчетного предискажения формы деталей в противоположном направлении (п. 6 паспорта специальности 2.5.6).

4. Экспериментально установлена взаимосвязь режимов и условий обработки типовых деталей типа пластин с подкрепляющими рёбрами превентивным деформированием раскаткой рёбер роликами с последующей дробеударной обработкой с усталостной долговечностью материала деталей (п. 7 паспорта специальности 2.5.6).

Теоретическая и практическая значимость:

На основании полученных результатов в ходе выполнения теоретических и экспериментальных исследований установлены основные закономерности процесса обработки деталей типа пластин с подкреплением в технологическом сочетании «Превентивное деформирование – дробеударное упрочнение»; разработан способ минимизации коробления деталей, подвергаемых дробеметному упрочнению, заключающийся в превентивном деформировании путём раскатки роликами конструктивных элементов деталей; разработана и экспериментально подтверждена методика определения технологических параметров процесса превентивного

деформирования типовых подкреплённых деталей на основе их расчетного формоизменения в процессе упрочнения.

Применение разработанного способа обеспечивает повышение точности формы деталей типа пластин с подкреплением, подвергаемых дробементному упрочнению, и, как следствие, снижение монтажных напряжений при дальнейшей сборке узлов и агрегатов.

Методология и методы исследования. Работа сформирована на базе научных основ технологии машиностроения. Теоретические исследования выполнены с применением методов математического анализа, теории упругости и пластичности. Для математического моделирования была использована многоцелевая программа конечно-элементного анализа LS-Dyna, генерация моделей осуществлялась в среде MATLAB. Данные, полученные при моделировании, обрабатывались в программе Microsoft Excel. Исследование поверхности после обработки дробью осуществлялось при помощи оптического профилометра Bruker Contour GT-K1. Для определения фракционного состава дробы был использован стенд машинного зрения NI SMART CAMERA 1764. Исследование остаточных напряжений производилось по методике, разработанной ИРНИТУ, на установке для измерения остаточных напряжений УДИОН-2.

По результатам проделанных работ автор выносит на защиту:

1. Методику определения методом конечно-элементного моделирования внутренних силовых факторов процесса дробементного упрочнения в виде растягивающих сил, действующих на конструктивные элементы обрабатываемых деталей типа пластин с подкрепляющими рёбрами, и координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности), связанных с режимами и условиями дробементной обработки.

2. Результаты численного и экспериментального исследования закономерностей формирования НДС маложестких деталей типа пластин с подкрепляющими рёбрами при дробемётном упрочнении с оценкой влияния данного процесса на форму и остаточное напряженное состояние деталей;

3. Методику расчета режимных параметров процесса превентивного деформирования маложестких деталей типа пластин с подкрепляющими ребрами, подвергаемых дробемётному упрочнению, раскаткой роликами с последующей дробеструйной доводкой;

4. Методику и результаты исследования влияния режимов и условий обработки образцов в последовательности «Превентивное деформирование раскаткой роликами – дробемётное упрочнение» на усталостную долговечность материала.

Внедрение результатов. Полученные результаты использованы при производстве самолета МС-21 на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Корпорация «Иркут».

Достоверность подтверждена сходимостью полученных результатов моделирования и экспериментальных исследований. Действительность выводов подтверждается практической реализацией результатов.

Экспериментальные результаты получены с использованием современного высокоточного аналитического оборудования: оптического профилометра Bruker ContourGT-K1, станда машинного зрения NI SMART CAMERA 1764, универсальной сервогидравлической испытательной машине ENF-EV101K2-04N-1E, установки для измерения остаточных напряжений УДИОН-2.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на восьмой международной конференции

«Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» 4 июля 2022), первой Региональной конференции «iPolytech Conference» (г. Иркутск, ИРНТУ 23-25 ноября 2022), XVI Международной научно-практической конференции «Современные авиационные технологии. «International Conference on Aviation Engineering» (Иркутск, 03–07 июля 2023 года).

Результаты работы представлены в 8 публикациях. В журналах рекомендуемых ВАК перечня опубликовано 5 статей, в международных изданиях, включенных в Scopus – 1 статья.

Диссертация подготовлена на кафедре технологии и оборудования машиностроительных производств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНТУ).

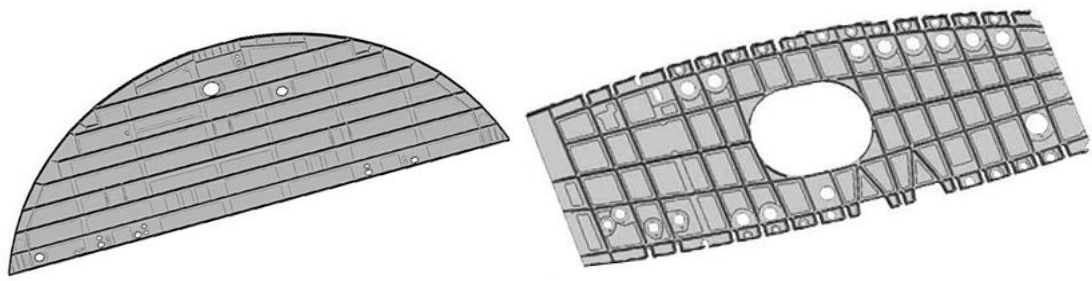
Исследования, представленные в настоящей диссертации, входят в состав работ, выполненных по договору №8/16 от 18.01.2016 г. на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ между ИРНТУ и ПАО «Корпорация «Иркут» на тему «Разработка комбинированной технологии «Превентивное деформирование – дробеметное упрочнение» деталей типа подкрепленных ободов и стенок».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, включая 14 таблиц и 96 рисунков, заключения, списка литературы из 110 наименований, списка сокращений. Работа содержит 147 страниц машинописного текста и 4 приложения.

1 Теория и практика изготовления деталей каркаса типа пластин с подкреплением

1.1 Конструктивные особенности подкрепленных деталей каркаса

Объектами данного исследования являются маложесткие подкрепленные детали конструкций из алюминиевых сплавов, подвергаемые поверхностному деформационному упрочнению ударными методами (см. рисунок 1.1).



а)



б)

Рисунок 1.1 – Типовые подкреплённые детали: а) типа «Стенка» б) типа «Обод»

Данные детали по типу оребрения можно разделить на две группы: с односторонним по отношению к полотну и двухсторонним оребрением. Как правило, для их изготовления используют термоупрочненные алюминиевые сплавы [14, 63, 18].

Основными конструктивными элементами рассматриваемых деталей являются полотно и подкрепляющие его элементы в виде продольных и поперечных ребер (полок), совокупность которых образует карманы. На рисунке 1.2 представлены типовые сечения подкреплённых деталей.

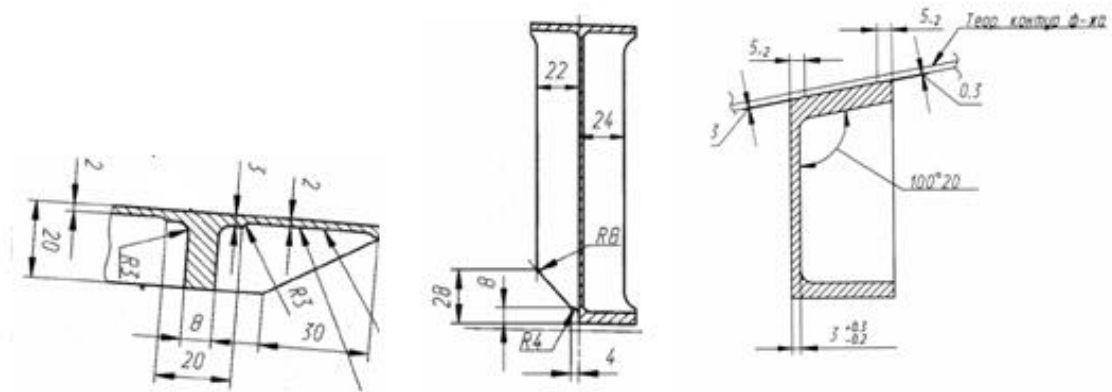


Рисунок 1.2 – Типовые сечения подкреплённых деталей

Применение деталей данного типа в силовом каркасе современных самолетов обусловлено следующими факторами [59, 18]:

- возможность объединения элементов каркаса и обшивки;
- снижение себестоимости изделия при серийном производстве;
- повышение эксплуатационных характеристик и ресурса изделия;
- уменьшения количества основных и крепежных изделий, что позволяет снизить вес изделия, при увеличении прочности.

Однако, производство данных деталей затруднено из-за высокой трудоемкости механической обработки и правки данных деталей, а также для изготовления деталей требуются фрезерные станки и пресса с большими рабочими размерами.

К рассматриваемым деталям предъявляются высокие требования к точности изготовления и шероховатости, допуски на прямолинейность и неплоскостность составляют от 0,1 мм до 0,5 мм.

1.2 Обеспечение точности формы и ресурса подкреплённых деталей технологическими методами

Существующая технология изготовления подкрепленных деталей включает в себя следующие операции: фрезерование, правка различными методами, дробеметное упрочнение [1].

Подкреплённые детали каркаса изготавливают на фрезерных станках с ЧПУ. Основной фрезерной операцией при изготовлении подкрепленных деталей являются торцовое фрезерование при обработке открытых плоскостей и концевое фрезерование при получении рёбер и карманов. Особенностью остаточного напряженного состояния поверхностного слоя детали после фрезерования является то, что направления главных осей поля остаточных напряжений, не совпадают ни с направлением формообразующих движений, ни с осями системы координат детали [4, 110].

Заготовками деталей являются термически упрочняемые плиты из высокопрочных алюминиевых сплавов. Ранее выполненные исследования [2, 6, 25, 50, 66] показали, что распределение термических остаточных напряжений по сечению плиты имеет параболический характер и зависит от единственной переменной – значения поверхностных напряжений. В

большинстве случаев после удаления припуска под действием термических остаточных напряжений возникает коробление деталей. Отклонения после механической обработки, как правило выражаются в виде одноосного изгиба вдоль ребер, величина таких отклонений может превышать 10 мм.

В работах [3, 21] отмечается, что эффективным способом правки деталей после фрезерования является раскатка конструктивных элементов деталей роликами. В процессе раскатки роликами возникает пластическая деформация поверхностного слоя металла под действием прижатых к обрабатываемому ребру роликов. Перемещение устройства для раскатки относительно обрабатываемого ребра детали осуществляется при помощи одного или двух ведущих роликов [36].

Схема нагружения детали при раскатке роликами (см. рисунок 1.3) имеет схожесть со схемой прокатки на прокатном стане. Значение максимальной деформации определяется допуском на толщину ребра детали.

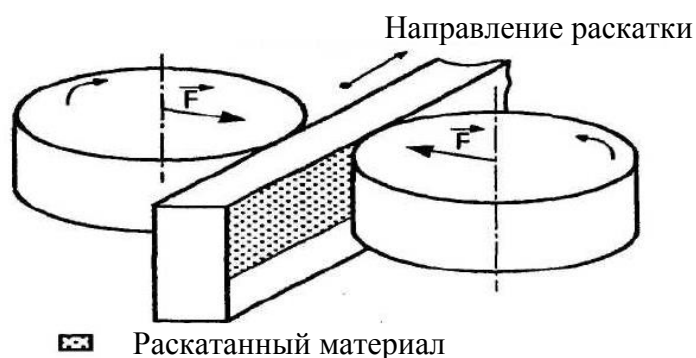


Рисунок 1.3 – Схема раскатки роликами

Первое упоминание устройства для формообразования раскаткой роликами относится к началу двадцатого века [106]. В Великобритании инженеры разработали устройство «Английское колесо» (см. рисунок 1.4). Его конструкция представляет собой раму с закрепленными на ней роликами. Нижний ролик можно регулировать по высоте для обеспечения требуемого зазора, а верхний закреплен на раме установки. Установку используют для

формообразования участков листовых деталей с целью получения криволинейной поверхности за счёт уменьшения толщины заготовки в зоне раскатки.

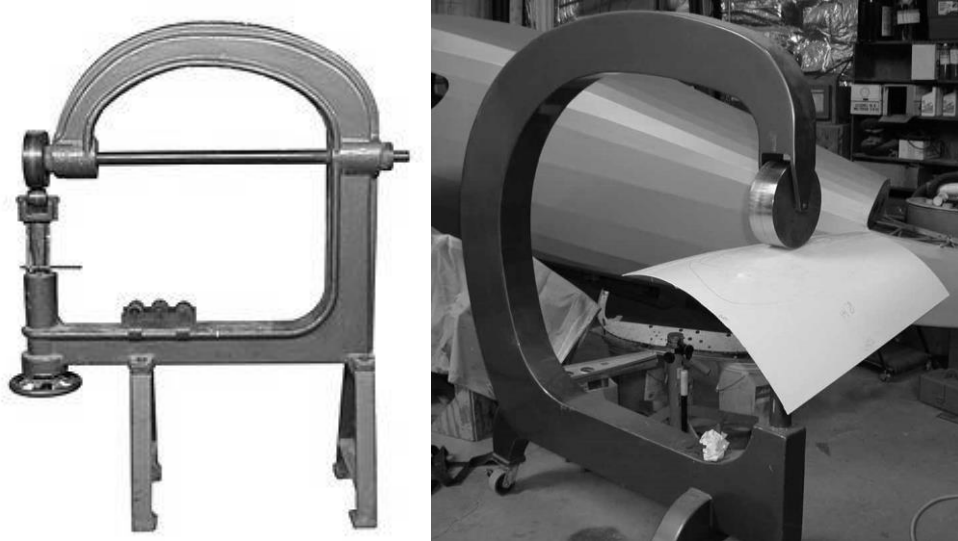


Рисунок 1.4 – Конструкция станка «Английское колесо»

Данный процесс считается трудоемким, а также требуется персонал высокой квалификации. Основные сферы в которых применялся данный метод: автомобилестроение; авиастроение и судостроение.

На российских предприятиях авиационной отрасли для правки – формообразования раскаткой роликами используют ручные раскатные устройства (см. рисунок 1.5) [50].



Рисунок 1.5– Инструмент для раскатки роликами

Основным технологическим параметром процесса раскатывания является сила сжатия роликов. Регулирования данной силы осуществляют затяжкой силового болта устройства динамометрическим ключом. Режимы затяжки определяют по ранее полученным тарировочным графикам в зависимости от толщины ребра.

Известен способ правки деталей типа балок, с короблением в виде двухосного изгиба [44]. В результате локального воздействия на ребра и полотно детали – её форма меняется.

В 2021 году в ИРНИТУ была разработана автоматизированная установка для формообразования и правки подкреплённых рёбрами деталей раскаткой роликами УФП-1. Установка УФП-1 [54] включает (см. рисунок 1.6):

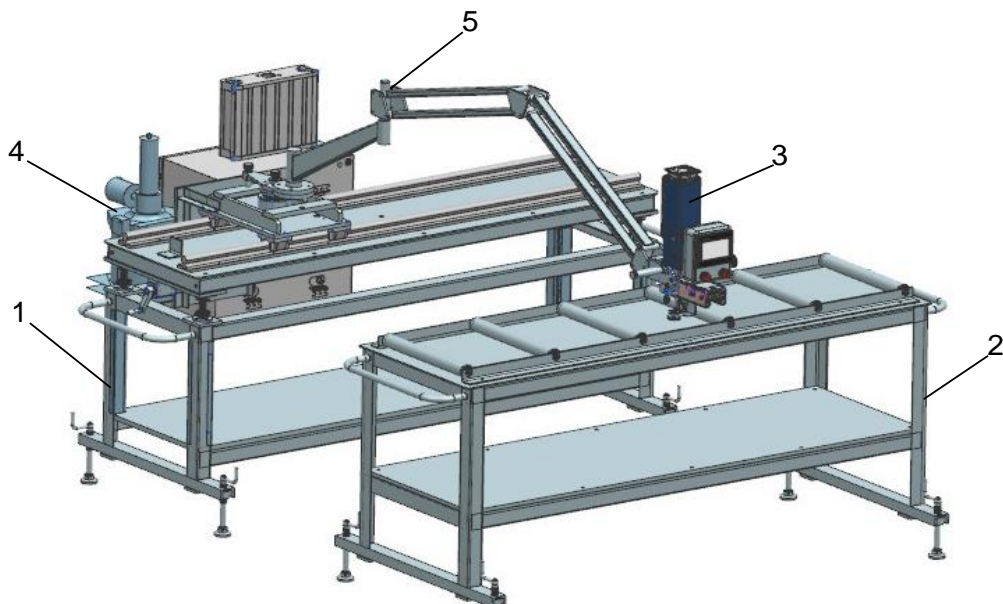


Рисунок 1.6 – Установка УФП-1

- стол-тележку с направляющими (поз. 1), на которой размещаются все механизмы и системы установки, а также осуществляется перемещения ее в межцеховом пространстве;

- стол-тележку с рольгангом (поз. 2) для установки и перемещения легких деталей;

- раскатную головку (поз. 3), являющуюся рабочим органом установки;

- мультипликатор (пневмогидроусилитель) (поз. 4) - для создания необходимого давления рабочей жидкости в гидроцилиндре раскатной головки путем увеличения входящего давления воздуха;

- механизм продольно-поперечного перемещения (поз. 5) - предназначенный для перемещения рабочего органа при его установке и в процессе обработки крупногабаритных деталей.

Установка для формообразования и правки раскаткой роликами УФП-1 предназначена для образования продольного контура деталей типа длинномерных монолитно-фрезерованных продольно оребренных панелей методом раскатки ребер. Установка также может применяться для правки подкрепленных деталей каркаса, получивших отклонения контура в процессе изготовления. Данная установка была успешно внедрена на одном из авиационных заводов России.

О зарубежном опыте применения технологии раскатки роликами, известно, что данная технология используется в авиастроительной компании Airbus. Описания применяемого для реализации данной технологии в открытой печати нами не найдено.

После раскатки роликами деталь с отклонениями формы значения которых находятся в технологическом допуске, подвергается дробеметному

упрочнению [5, 10, 15, 17, 43]. Его проводят с целью повышения усталостной долговечности материала детали. Сущность метода упрочнения дробью заключается в том, что деталь, прошедшую термическую и механическую обработку, подвергают воздействию потока дроби. Дробинки, разгоняемые воздушным напором или лопатками быстро вращающегося ротора, производят поверхностный наклеп детали. При обработке происходит изменение физических свойств поверхностного слоя металла, повышаются его твердость, улучшаются прочностные характеристики, создается благоприятное распределение остаточных напряжений по сечению детали, а также видоизменяется форма и ориентация кристаллических зерен поверхностных слоев так, что сопротивление этих слоев пластической деформации и разрушению повышается [7].

Впервые обработка дробью, с целью повышения ресурсных характеристик описана в работе [72], Геберт предложил метод обработки при котором, дробь диаметром 3 миллиметра падая с определенной высоты, осуществляла поверхностный наклеп. Затем в 1929 году в публикации [69] было экспериментально доказано, что в процессе обработки дробью повышается усталостная долговечность. Данный метод упрочнения быстро получил широкое распространение на промышленных предприятиях, так как имеет ряд весомых технологических преимуществ – высокая производительность, относительно невысокая цена на оборудования, отсутствие предварительной обработки [101].

В 30-х годах прошлого века технология дробеударного упрочнения начала активно применяться на зарубежных промышленных предприятиях. Мировые лидеры в области разработки оборудования и технологии дробеударного упрочнения являются:

- США: Wheelabrator, Pangborn Corporation, General Dynamics, Curtiss-Wright Corporation [90-92, 94, 96];

- Великобритания: Vickers-Armstrong;
- Германия: Rosler, KSA (Kugelstrahlzentrum Aachen) [93, 95].

Далее приведены примеры современного зарубежного оборудования для упрочнения дробью.

Авиаконцерн Boeing для упрочнения дробью деталей размер которых не превышает 36000x3700 мм использует дробеметную установку проходного типа. Установка представляет собой закрытую камеру, в которой, напротив, друг друга расположены дробеметы, это позволяет проводить двухстороннюю обработку. Для обеспечения различной интенсивности обработки все электродвигатели приводов работают с изменяемой скоростью вращения. Такое оборудование очень эффективно с экономической точки зрения в сравнении с общепринятыми воздушными дробеструйными установками, в которых приходится применять компрессор. В установке предусмотрен сепаратор с целью сортировка разбитой и целой дроби, подающейся для обработки.

Компания Wheelabrator выпускает установку MPF 20000 (см. рисунок 1.7) для двухсторонней обработки.



Рисунок 1.7 – Установка для дробеударного упрочнения MPF 20000 [87]

Максимальные размеры обрабатываемой детали: 20 000 мм в длину х 2 500 мм в ширину и весом в 2000 кг. Обработка осуществляется при помощи двух симметричных 4-координатных роботов, имеющих по 6 дробеструйных сопел каждый. Производительность дробеструйных аппаратов позволяет подавать до 240 кг дроби в минуту. Установка имеет систему ЧПУ типа CNC: Fanuc, что дает широкий диапазон режимов обработки. На установке предусмотрен предварительный контроль формы детали путем 3D сканирования. Так же помимо упрочнения, данная установка применяется для дробеударного формообразования.

В отечественном машиностроении технология упрочнения дробью широко используется в различных отраслях, в частности на авиастроительных предприятиях. На Иркутском авиационном заводе в качестве оборудования для поверхностного упрочнения, используется установка дробеметная программная УДП-2-2,5 (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Установка дробеметная программная УДП-2-2,5

Техническая характеристика УДП-2-2,5

Наибольшие размеры обрабатываемых деталей, мм 24000×2500

Наибольшая масса упрочняемой детали, кг	1200
Число дробемётных аппаратов, шт	8
Скорость дроби, м/с	15...53
Производительность дробемётного аппарата (расход дроби), кг	160
Масса дроби, загружаемой в установку, т	10
Габаритные размеры, (длина, ширина, высота), мм	58700×8500×7500

Схема дробёмётной упрочняющей обработки деталей на установке УДП-2-2,5 приведена на рисунке 1.9.

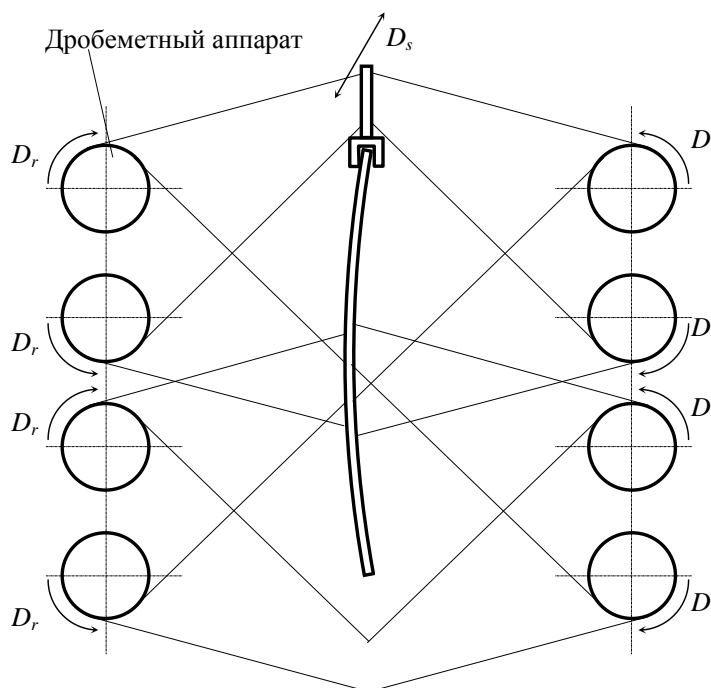


Рисунок 1.9 – Схема процесса упрочнения детали на дробемётной установке УДП-2-2,5

Обработка дробью на установке производится восемью центробежными дробемётными аппаратами типа 4Б114 производства завода «Амурлитмаш» с двух сторон при прохождении детали через рабочую камеру. Управление режимами обработки – частотой вращения дробемётных аппаратов и скоростью подачи детали осуществляется системой ЧПУ.

В процессе упрочняющей дробеобработки применяется дробь диаметром 0,4 – 1,4 мм. Важным является, что на установках с ЧПУ используют смесь дроби, диаметры которой отличаются не более чем на 0,2 мм.

На российских предприятиях контроль процесса упрочнения осуществляется в три этапа: до упрочнения, в процессе упрочнения и после него. Перед обработкой измеряют геометрическую форму и размеры изделия, исходную шероховатость подвергаемых упрочнению поверхностей, форму, а также качество рабочих тел.

В процессе упрочнения производится контроль силовых параметров и режимов обработки. После упрочнения контролируемыми параметрами являются: шероховатость поверхности, сплошность покрытия поверхности отпечатками дробинок, интенсивность обработки, форма и размеры детали [52].

Для контроля интенсивности упрочнения в отечественной и зарубежной практике, как правило используют контрольные пластины [56, 73, 76]. Для контроля шероховатости упрочненной поверхности применяют эталоны или профилометры. Равномерность обработки контролируется внешним осмотром. После упрочнения поверхность должна быть полностью покрыта отпечатками от деформирующих тел и не иметь следов предшествующей обработки. При обнаружении неупрочненных мест, в зависимости от их размеров, числа и размещения на детали может производиться повторное упрочнение всей детали или местное упрочнение необработанных участков. В случае обнаружения при визуальном контроле местные риски, царапины, забоины и другие дефекты подлежат местной зачистке в пределах допуска и при съеме металла более 0,05 мм последующему местному упрочнению. Форму и размеры деталей

контролируют с учетом возможного коробления поверхностей, например, изменения диаметра упрочненного отверстия по длине [64].

Сплошность и интенсивность упрочнения контролируют по изменению физико-механического состояния поверхностных слоев. При упрочнении дробью качество образцов-свидетелей используют плоские контрольные пластины (рисунок 1.10). Основным параметром для оценки интенсивности процесса упрочнения деталей дробью является прогиб контрольной пластины со стороны обработки.

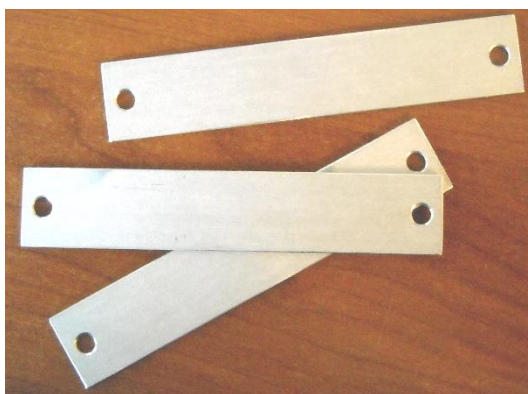


Рисунок 1.10 – Алюминиевые контрольные пластины, используемые на отечественных заводах авиационной техники [34]

Измерение стрелы прогиба контрольных пластин производится на базе ее длины (100 мм) в приспособлении с индикатором часового типа (рисунок 1.11) как разность прогибов до и после упрочнения. Предварительный прогиб КП, который учитывается при последующем измерении интенсивности обработки, допускается не более 0,2 мм

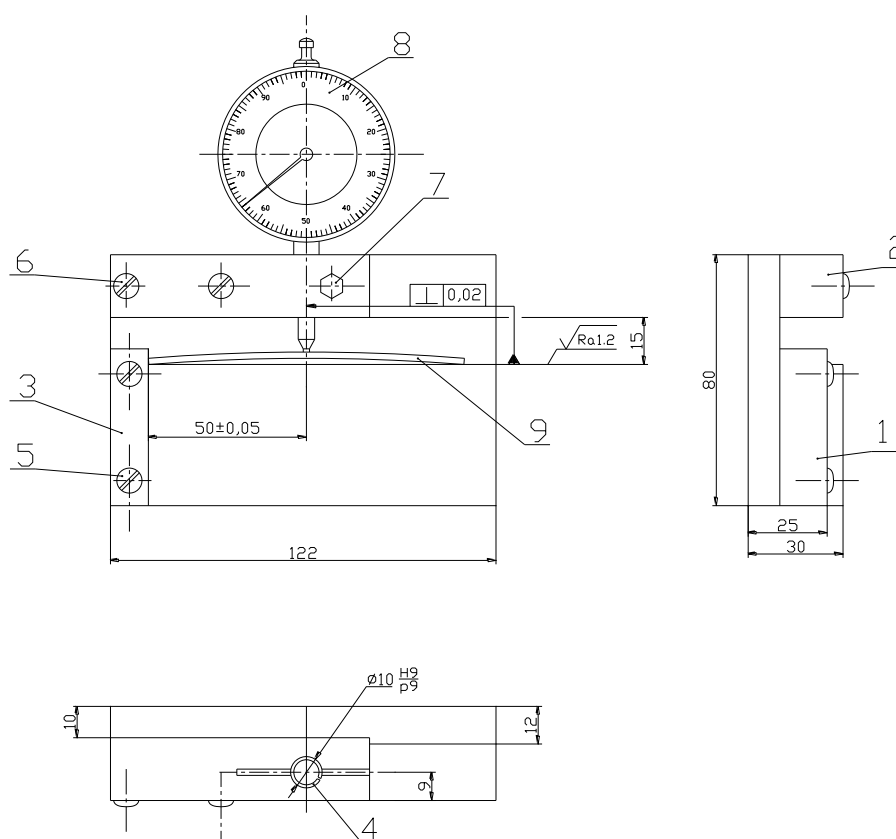


Рисунок 1.11 – Индикаторное приспособление для измерения контрольных пластинок: 1 – корпус; 2 – зажим; 3 – упор; 4 – втулка; 5 – винт; 6 – винт; 7 – болт; 8 – индикаторная головка, 9 – контрольная пластина

В итоге после упрочнения контрольные пластины приобретают деформацию изгиба, пластина со стороны упрочнения имеет выпуклую форму. Интенсивность упрочняющей обработки оценивают по полученному прогибу и при неизменных условиях обработки позволяет контролировать её результаты и стабильность процесса упрочнения.

Для достижения максимального эффекта по увеличению сопротивляемости металлических деталей усталости необходимо определить правильное соотношение режимов и времени упрочняющей обработки. При дробемётной обработке определение этого соотношения заключается в установлении времени обработки, обеспечивающего достижение требуемой

интенсивности, при полной сплошности покрытия поверхности отпечатками дробинок при заданных и неизменных частоте вращения и производительности дробеметного аппарата. Полная сплошность покрытия поверхности достигается в состоянии насыщения, когда удвоение времени обработки вызывает повышение значения интенсивности не более чем на 10 %.

Согласно требованиям отраслевой нормативной технологической документации контрольные пластины должны быть изготовлены из алюминиевого листа Д16Т (Д16чТ) размерным химическим травлением. Плакированный слой при его наличии на исходном материале должен быть полностью удален, заусенцы по контуру и отверстиям – сняты. Тектурные волокна материала должны быть направлены вдоль большего размера пластинки.

За рубежом используются аналогичные способы контроля деталей, упрочняемых дробью. Контрольные операции также выполняют до упрочнения, в процессе обработки и после нее. До упрочнения проверяют форму и размеры детали, исходную шероховатость упрочняемых поверхностей, форму, размеры и качество поверхности деформирующих элементов.

Общепринятым способом определения интенсивности дробеударного упрочнения за рубежом является тест Альмена, названный по имени его изобретателя – инженера компании «General Motors», Дж. О Альмена [102, 103, 105]. Интенсивность обработки определяют, измеряя прогибы контрольных пластин Альмена, при помощи стандартизованных датчиков (см. рисунок 1.12).

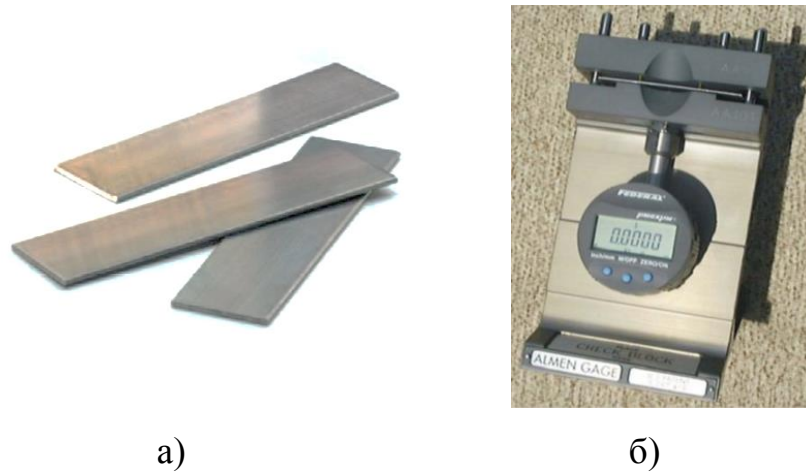


Рисунок 1.12 – Контрольные пластины Альмена (а) и цифровой датчик Альмена TSP-3А

Измерение интенсивности производится разными типами пластин (в зависимости от обрабатываемого материала и уровня необходимой интенсивности). Алюминиевые контрольные пластины изготавливаются пяти типов: AA, W, X, Y, Z.

Согласно зарубежным стандартам измерение прогибов пластин производится с помощью индикаторного приспособления), цена деления 0,001 мм, тип индикатора с отсчетом против часовой стрелки (обратный).

Известен ряд производителей контрольных пластин и других аксессуаров для контроля процессов упрочнения дробью с применением теста Альмена, таких как Electronics Inc. [91] и Associated Spring-Raymond [89].

Режимы упрочняющей дробеударной обработки определяется путем проведения усталостных испытаний упрочненных образцов с заданным количеством циклов нагружения до момента их разрушения, максимальная скорость дроби ограничивается исходя из требований, предъявляемых к шероховатости поверхности деталей [7, 11].

Важным требованием к упрочнённым деталям является сохранение их пространственной формы в связи с недопустимостью пластического деформирования (правки) деталей, подвергнутых поверхностному упрочнению [51].

Как известно, упрочняющая обработка дробью, вызывая деформацию удлинения поверхностных слоев, в общем случае приводит к короблению самой детали.

Величина коробления упрочняемых деталей зависит от их конструктивных особенностей. Если равномерная двухсторонняя обработка дробью листовых деталей, одинаково удлиняющая поверхностные слои, практически не влияет на форму, то для деталей типа пластин с подкреплением такая же обработка из-за удлинения рёбер нарушает равновесие внутренних сил и приводит к изгибу [45].

Для обеспечения гарантированного ресурса конструкции необходимо сохранить остаточное напряженное состояние упрочненных деталей в собранных агрегатах. Поэтому, после упрочнения недопустимо применение правки и нежелательно применение упругой сборки как операций, которые приводят к образованию в деталях напряжений, влияющих на остаточные напряжения, полученные при упрочняющей обработке [7, 51]. Таким образом, непосредственно при упрочнении надо получать детали с высокой точностью формы, принимая меры по минимизации их возможного коробления. Известны разработки в области технологии поверхностного упрочнения мало жестких деталей, направленные на снижение их коробления [51]. Согласно [56] назначение режимов упрочняющей обработки должно осуществляться в зависимости от конструктивных особенностей и остаточного НДС обрабатываемых деталей.

При анализе искажения формы детали типа «Стенка», возникающие в процессе дробеметного упрочнения на установке УДП-2-2,5, было установлено, что отклонения от плоскостности детали, перед упрочнением находившиеся в пределах допуска $\pm 0,4$ мм, в процессе упрочнения возрастают до 12 мм, что является недопустим при изготовлении деталей авиационной техники. Данные отклонения являются следствием неравномерной интенсивности обработки полотна и ребер детали.

1.3 Теоретические и экспериментальные исследования процесса изготовления упрочняемых дробью подкреплённых деталей

1.3.1 Исследования процессов формообразования и правки подкреплённых деталей раскаткой роликами

Процесс раскатки роликами как способ местного пластического деформирования в целях формообразования и правки подкреплённых деталей рассмотрен рассматривался в работах российских и зарубежных исследователей Викуловой С.В., Захарова В.А., Макарука А.А., Минаева Н.В., Сикульского В.Т., Скосоренко К.Н., L.X. Lu и др. [16, 26, 34, 40, 41, 55, 57, 61, 83, 84, 92].

В работе [37] предложена методика расчета технологических параметров формообразования и правки раскаткой роликами. Данная методика основывается на теории тонкостенных стержней, для определения продольных растягивающих сил, требуемых для получения заданной формы при раскатке роликами, определяются геометрические характеристики поперечного сечения (момент инерции и координата центра тяжести), а также крутильные характеристики поперечного сечения (секториальный

момент инерции и координата центра кручения) – при расчете угла закручивания (см. рисунок 1.13).

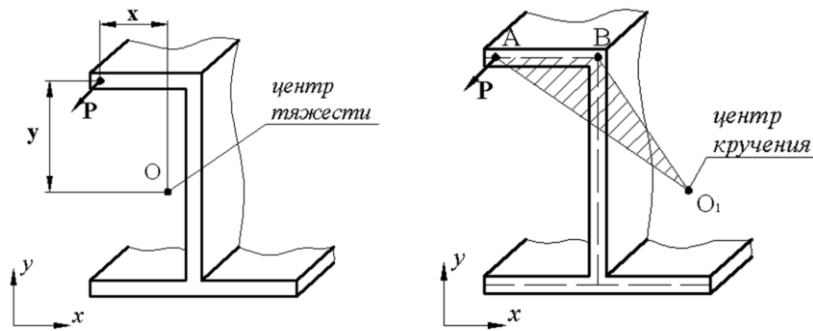


Рисунок 1.13 – Центры тяжести и кручения несимметричных поперечных сечений [9]

Расчет требуемой растягивающей силы выполняется с помощью решения систем уравнений:

$$\pm P_1 \cdot x_1 \pm P_2 \cdot x_2 \pm \dots \pm P_n \cdot x_n = \frac{8EJ_x}{a^2} \cdot \Delta f_x;$$

$$\pm P_1 \cdot y_1 \pm P_2 \cdot y_2 \pm \dots \pm P_n \cdot y_n = \frac{8EJ_y}{a^2} \cdot \Delta f_y;$$

$$P_1 \cdot \omega_1 + P_2 \cdot \omega_2 + \dots + P_n \cdot \omega_n = -\frac{GJ_d}{2(1 - ch\beta l / 2)} \cdot \Delta \theta;$$

где P_1, P_2, P_n – образующиеся в процессе раскатки роликами продольные растягивающие силы, действующие на участок поперечного сечения детали; $x_1, y_1; x_2, y_2; x_n, y_n$, – координаты точек приложения продольных сил; ω – секториальная площадь (удвоенная площадь сектора O_1AB на рисунке 5); E – модуль упругости материала детали первого рода; G – модуль сдвига; $J_x; J_y$ – осевые моменты инерции комплексного сечения детали; J_d – момент инерции на кручение поперечного сечения; a – база измерения стрелы

прогиба; l – расстояние между поперечными сечениями; β – коэффициент пропорциональности, зависящий от механических свойств материала.

Кононенко В.Г., в рамках исследований [27] сформулировал методику расчета основных технологических параметров формообразования ребристых панелей раскаткой ребер. Остаточная кривизна участка ребра панели с присоединенным с двух сторон полотном полной ширины, равной расстоянию между двумя соседними ребрами определяется в зависимости от обжатия Δh раскатанного участка ребра. Расчетная схема, использованная в [28], приведена на рисунке 1.14.

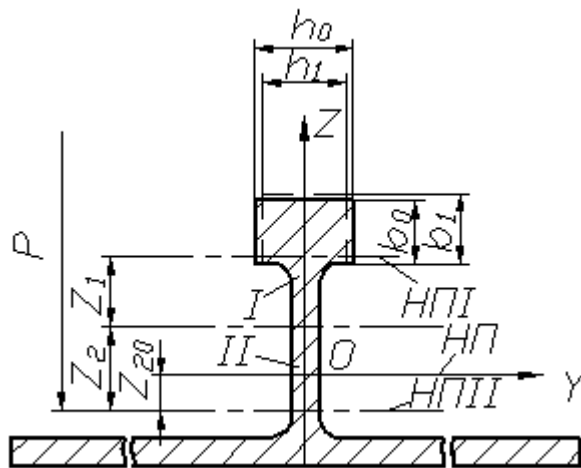


Рисунок 1.14 - Расчетная схема для определения остаточной кривизны

Схема процесса раскатки показана на рисунке 1.15.

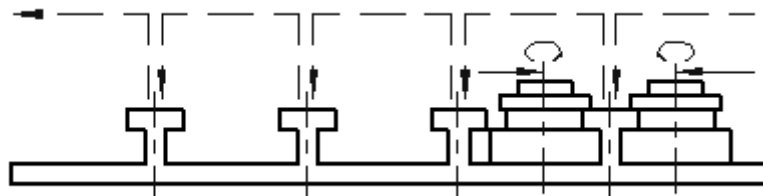


Рисунок 1.15 - Схема процесса раскатки

Для технологических расчетов предлагаются формулы:

$$\rho = R \cdot \left(1 - \frac{I_1 + I_2}{I} \right)$$

$$b_0 \left(\frac{\Delta h}{h_0} - \frac{z_1 + z_2}{\rho} \right) = C_b C_0 a \left(\sqrt{r \Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \ln \frac{h_0}{h_1}$$

где z_1 и z_2 – расстояние от границы раскатываемого и нераскатываемого участков до нейтральных поверхностей соответствующих участков (см. рисунок 1.21); ρ – радиус кривизны нейтральной поверхности участка II до разгрузки; Δh – обжатие,

$$\Delta h = h_0 - h_1$$

C_b – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы на уширение; C_0 – коэффициент, учитывающий влияние натяжения, - коэффициент, зависящий от относительного обжатия,

$$a = 2 \frac{1 - \varepsilon}{2 - 1.5\varepsilon}$$

μ – коэффициент трения; R – остаточный радиус гибки; I_1, I_2 – моменты инерции участков I и II относительно своих нейтральных поверхностей; r – радиус раскатного ролика.

Для решения задачи первым шагом определяют значение ρ по известным параметрам с помощью выражения (1.3), а затем, решая уравнение (1.4), методом подбора находят искомый параметр Δh .

Представленные аналитические модели сложны в практическом применении и не могут обеспечить достаточной адекватности расчетов применительно к реальным деталям.

Более точные результаты по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей, подвергнутых раскатке роликами обеспечивает моделирование методом конечных элементов (МКЭ).

В работе [83] приведены результаты моделирования процесса раскатки роликами детали типа пластины (см. рисунок 1.16).

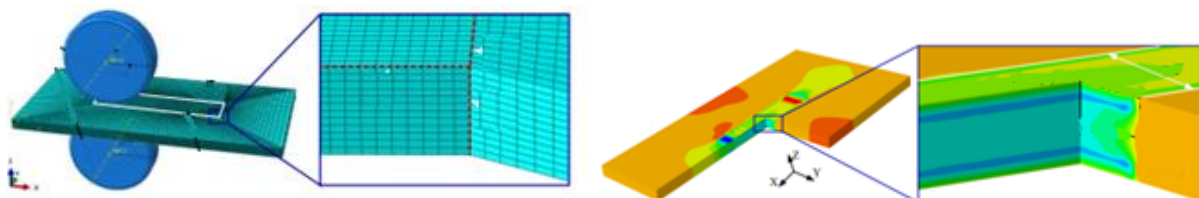


Рисунок 1.16 – Результаты моделирования процесса раскатки образцов пластин

Подобное исследование провели авторы [82] применительно к тавровым образцам (см. рисунок 1.17).

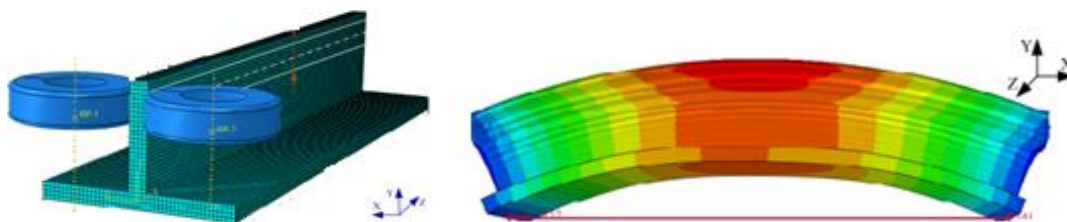


Рисунок 1.17 – Результаты моделирования процесса раскатки тавровых образцов

Результатами моделирования в работах [82, 83] являются распределения остаточных напряжений и деформаций в образцах небольших размеров.

Для решения задачи определения формоизменения реальных деталей в целях экономии вычислительных ресурсов применяют косвенные методы, заключающиеся в приложении к конечно элементным моделям эквивалентных воздействий.

Сикульский В.Т. в работе [104] для определения получения скрутки поперечного сечения ребристой панели после раскатки роликами использует приложение изгибающего момента (см. рисунок 1.18).

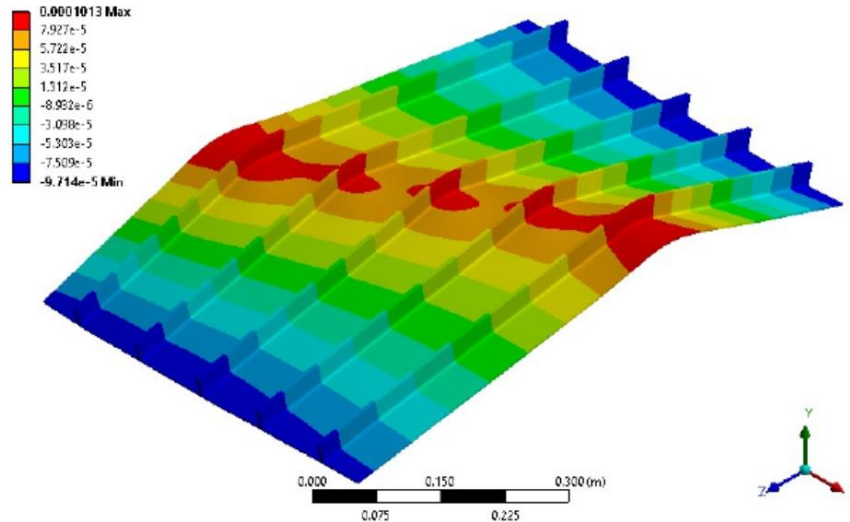


Рисунок 1.18 – Модель ребристой панели, деформированной под воздействием изгибающего момента, созданного раскаткой роликами

Минаев Н.В. в работе [39] для расчета общей деформации панели использует значения стрел изгиба конструктивно подобных образцов (КПО), представляющих ребро с прилегающей частью полотна (см. 1.19).

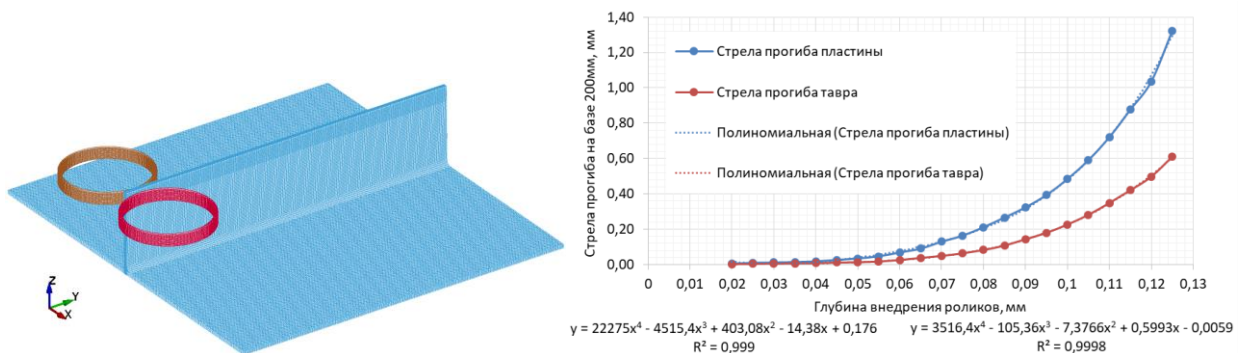


Рисунок 1.19 – Моделирование раскатки тавровых образцов

1.3.2 Исследования процессов формообразующей и упрочняющей дробеударной обработки

Исследование процесса дробеударной обработки как способа поверхностного деформационного упрочнения деталей ведётся с начала 20-го века.

Одним из экспериментальных методов для определения характеристик упрочнения дробью был предложен Альменом, в данном методе параметры упрочения контролируются по величине прогиба контрольной пластины в состоянии насыщения. Критерием достаточности упрочнения детали считается насыщение покрытия поверхности отпечатками дроби 98-100%. Для определения степени насыщения строят график зависимости стрелы прогиба контрольных пластин от времени обработки (см. рисунок 1.20) при неизменных режимных параметрах. Состояние насыщения определяется путем построения кривой насыщения – экспериментальной графической зависимости стрелы прогиба пластины от времени обработки при прочих фиксированных режимных параметрах, характерных для конкретного типа оборудования.

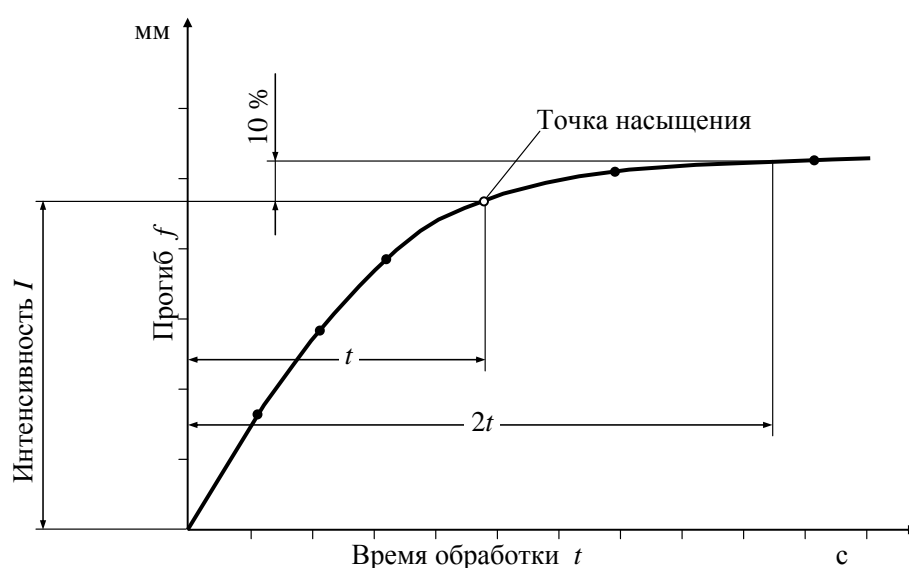


Рис. 1.20 – Кривая насыщения при обработке дробью по Альмену

Построение кривой насыщения осуществляется путем закрепления исследуемой пластины в зажимном приспособлении, её обработки на одном режиме с измерением после каждого рабочего хода (заданного интервала времени) стрелы прогиба. Известны различные аппроксимации экспериментальных кривых насыщения. В работе [45] для этого предлагается следующая формула

$$f_{об} = a[1 - \exp(-bt^c)]$$

где a , b , c – параметры аппроксимации, определяемые на основе экспериментальных данных, t – время обработки.

Влиянию дробеметного упрочнения на ресурсные характеристики деталей из алюминиевых сплавов посвящен ряд исследований отечественных и зарубежных авторов [7, 13, 17, 30, 52, 70, 67, 78, 108].

Результаты моделирования роста усталостной трещины в образцах подвергнутых дробеструйной обработке, представленной в работе [74] было установлено, что обработка дробью улучшает усталостную долговечность, главным образом, за счёт замедления трещинообразования, при этом наблюдается ускоренный процесс распространения трещины.

В работе [45] приведены результаты исследования усталостной долговечности алюминиевых сплавов, применяемых в авиастроении. Усталостные испытания стандартных образцов, подвергнутых дробемётному упрочнению, показали, что упрочнение образцов из сплава В95 на заводских режимах, практически не влияет на усталостную долговечность сплава, а для сплава 1163 наблюдалось увеличение усталостной долговечности в 4-6 раз. Следует отметить, что указанные исследования проведены при ограниченном объеме испытаний, тем не менее, они свидетельствуют о необходимости тщательного анализа технологических факторов при назначении режимов упрочняющей обработки деталей самолетов.

Обработка дробью, как процесс поверхностного пластического деформирования, освещается в исследованиях [8, 29, 33, 60, 65,79, 81, 107], основной целью которых является установление зависимостей между НДС и режимными параметрами процесса.

В ряде работ, посвященных исследованию НДС при обработке дробью, используется понятие степени поверхностной деформации, которая характеризуется критериями d_o/D или h_o/d_o , где D – диаметр дроби; h_o – глубина отпечатка; d_o – диаметр отпечатка.

М.М. Савериным в работе [53] определяется отношение d_o/D :

$$\frac{d_o}{D} = \left(\frac{2 \rho n_{дин} + 2}{3 g H_{дин}} V^2 \right)^{\frac{1}{n_{дин}+2}}, \quad (1.1)$$

где $H_{дин}$, $n_{дин}$ – истинные динамическая твердость и показатель динамического упрочнения; ρ – плотность материала дроби; g – ускорение силы тяжести; V – скорость удара.

В.А. Смирнов в работе [52] предлагает зависимости для определения глубины распространения пластической деформации

$$h_{nl} = K'_{nl} D \frac{h_o}{d_o}; \quad \frac{h_o}{d_o} = C_o \left(\frac{d_o}{D} - B_o \right), \quad (1.2)$$

где K'_{nl} , C_o , B_o – коэффициенты пропорциональности. На основе данных зависимостей получено распределение остаточных деформаций по глубине

$$\varepsilon_z^o = 2 \frac{h_o}{h_{nl}} \left(1 - \frac{z}{h_{nl}} \right) \quad (1.3)$$

Данная зависимость при помощи физических уравнений позволяет получить распределение остаточных напряжений.

В работе [42] для описания НДС процессов поверхностной обработки используют подход, основанный на теории начальных напряжений, которые в зарубежной литературе [88] называют «источником деформации». Их действие эквивалентно приложению к детали осевой силы P и изгибающего момента M , которые при закрепленной детали компенсируются внешними силами зажима. После раскрепления происходит деформация детали в виде изгиба и удлинения. В результате начальные напряжения перераспределяются по всему сечению детали, принимают равновесное состояние и превращаются в остаточные напряжения (рис. 1.21).

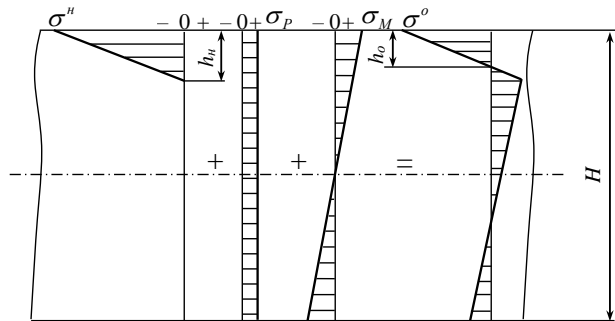


Рис. 1.21 – Принципиальная схема образования остаточных напряжений [85]

Эпюры остаточных и начальных напряжений связаны соотношением σ^h с [23]:

$$\sigma^o = \sigma^h + \sigma_p + \sigma_m.$$

где σ_p и σ_m – эпюры от осевой силы и изгибающего момента соответственно.

Внутреннюю силу P , приводящую к формоизменению детали при обработке дробью, можно определить путем интегрирования эпюры начальных напряжений по глубине их распространения.

Зависимости (1.1-1.3) являются эмпирическими и получены для анализа процесса единичного внедрения. Их использование для технологических расчетов представляет проблему в связи с невысокой адекватностью из-за идеализации реального процесса дробеобработки.

Лучшие результаты при определении начальных напряжений и внутренних силовых факторов, возникающих при обработке дробью даёт использование конечно-элементного анализа [32, 75, 77, 80, 85, 99, 100, 49].

В работе [45] приведены результаты моделирования процесса возникновения остаточных напряжений в полупространстве из алюминиевого сплава типа В95 при внедрении жесткого шара диаметром 3 мм (см. рисунок 1.22, а,б) с целью определения остаточных напряжений.

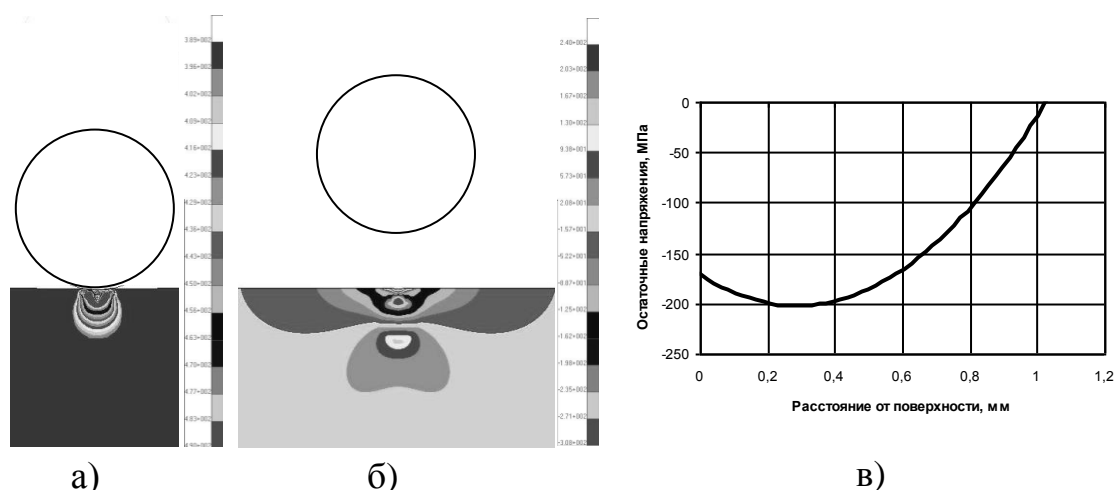


Рисунок 1.22 – Результаты моделирования процесса внедрения дроби: а) напряжения в пластической зоне при внедрении; б) остаточные напряжения; в) распределение осредненных остаточных напряжений по глубине

Для определения внутренней силы $P_{ед}$, действующей на деталь при единичном внедрении в [45] принято допущение о том, что остаточное НДС эквивалентно начальному НДС, имеющему место в мало жесткой детали до ее общей деформации. Сила $P_{ед}$ определяется интегрированием аппроксимации полученной эпюры остаточных напряжений. Переход к

удельной силе P^H , действующей на участок обработанной поверхности, осуществляется через соотношение

$$P^H = \sum_{k=1}^{N_f} (S_{nlk} P_{nlk} + S_{ek} P_{ek}),$$

где S_{nl} , S_e – степень покрытия единичными очагами пластической деформации и площадь, охваченная областью упругого взаимодействия, соответственно.

Принятые допущения о последовательном независимом внедрении дробинки в материал приводят к значительной погрешности в расчетах. Более адекватные результаты дают модели множественных внедрений дроби.

Моделирование множественных внедрений дроби в пластины Альмена приведено в работе [109]. Данный процесс имитирует дробеструйное упрочнение (см. рисунок 1.23).

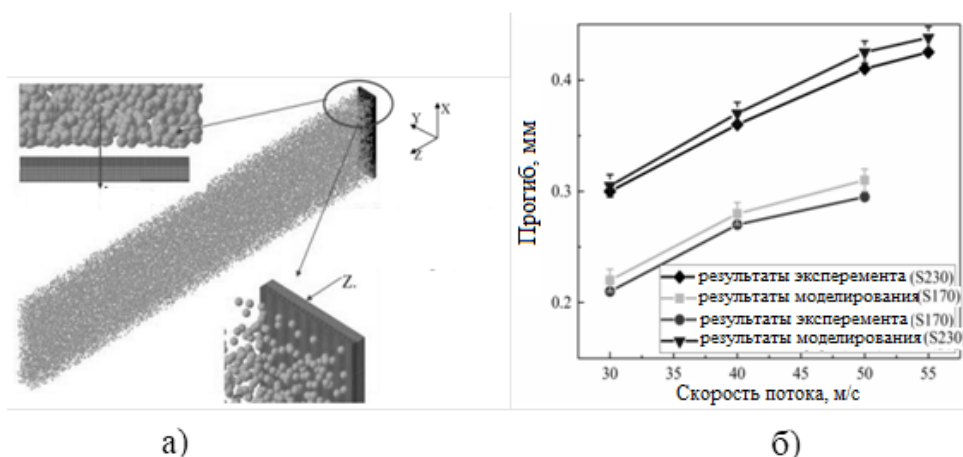


Рисунок 1.23 – Результаты моделирования обработки пластины Альмена: а) конечно-элементная модель симуляции дробеструйной обработки; б) Сравнение полученной интенсивности обработки при моделировании и эксперименте

Результатами данной работы являются зависимости интенсивности обработки от различных технологических параметров обработки (расстояние

от сопла до пластины, угла наклона сопла и т.д.). Полученные результаты показали достаточную сходимость с экспериментальными исследованиями.

Авторы работ [24, 47] предлагают методику определения внутренних силовых факторов процесса дробеударного формообразования с помощью распределений остаточных напряжений в поверхностном слое, полученных моделированием множественного внедрения в полупространство шариков одного диаметра, имеющих разные скорости и углы падения (см. рисунок 1.24). Исходные данные для моделирования были получены путём анализа профилограмм структуры зоны обработки.

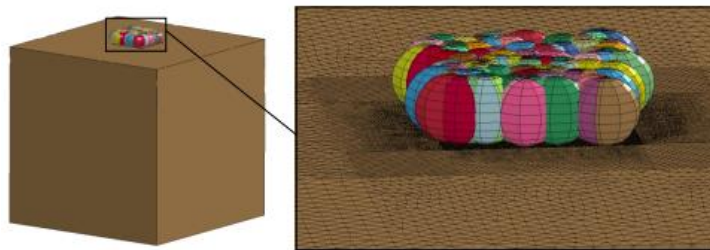


Рисунок 1.24 – Моделирование множественного внедрения дробинок

Результатом (см. рисунок 1.25) моделирования являются распределения остаточных напряжений в поверхностном слое.

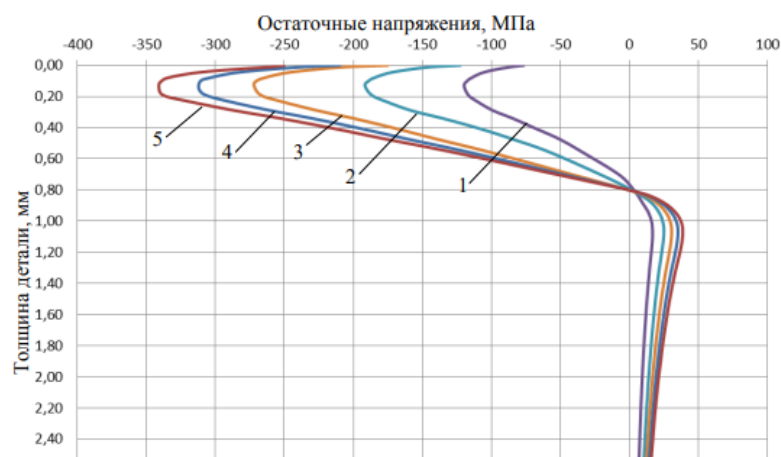


Рисунок 1.25 – Распределение нормальных остаточных напряжений при множественном внедрении дробинок, с временем обработки: 1 – 4 с; 2 – 8 с; 3 – 12 с; 4 – 16 с; 5 – 20 с.

Для определения начальных напряжений по результатам моделирования используется линейно-полигональная аппроксимация эпюры остаточных напряжений. Процесс формирования начальных напряжений в работе [68] представляют следующей схемой (см. рисунок 1.26).

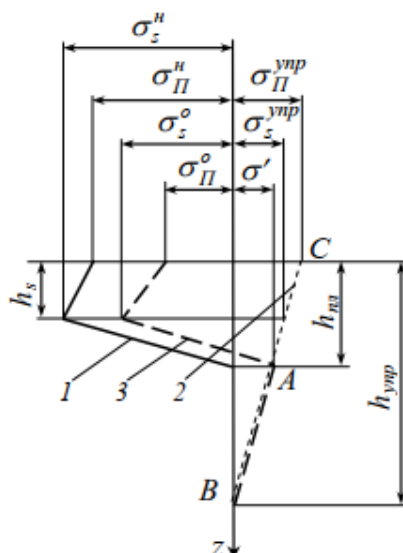


Рисунок 1.26 – Схема образования остаточных напряжений, обусловленных внедрением дробинки: 1 – начальные напряжения сжатия, 2 – реактивные напряжения σ_R в прилегающих к очагу деформации слоях металла, 3 – остаточные напряжения (сумма эпюр 1 и 2)

Интегральное значение распределения начальных напряжений даёт удельную внутреннюю силу P (см. рисунок 1.27).

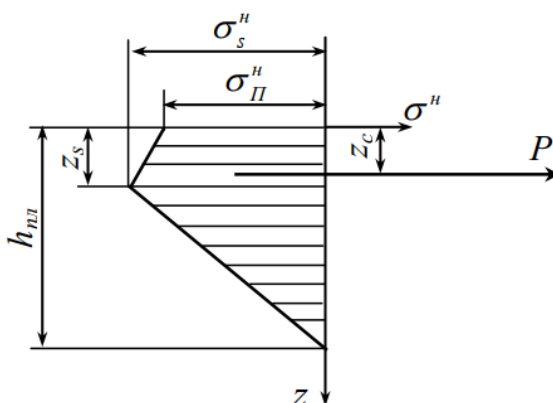


Рисунок 1.27 – Параметры распределения начальных напряжений от внедрения дробинки

Для определения силы P и координату (расстояние от поверхности) z_c точки ее приложения используют следующие выражения.

$$P = -\frac{1}{2}(\sigma_{II}^H h_s + \sigma_s^H h_{nl}); \quad (1.4)$$

$$z_c = \frac{\sigma_{II}^H h_s^2 + \sigma_s^H (3h_s^2 - 2h_s h_{nl} + h_{nl}^2)}{3(\sigma_{II}^H h_s + \sigma_s^H h_{nl})}. \quad (1.5)$$

где

$$\sigma_{II}^H = \sigma_{II}^o + \sigma_{II}^{ynp} = \sigma_{II}^o - \sigma' \left(1 + \frac{h_{nl}}{h_{ynp} - h_{nl}} \right); \quad (1.6)$$

$$\sigma_s^H = \sigma_s^o + \sigma_s^{ynp} = \sigma_s^o - \sigma' \left(1 - \frac{h_s - h_{nl}}{h_{ynp} - h_{nl}} \right). \quad (1.7)$$

Сходимость предложенной модели с экспериментом по обработке образцов дробемётом контактного типа с рабочей средой в виде калиброванных шарикоподшипниковых шариков диаметром 3,5 мм составила 9-15%. Методика, предложенная в указанных работах может быть использована при моделировании процесса дробемётного упрочнения с доработкой, касающейся состава и размеров рабочей среды.

1.4 Постановка цели и задач исследования

Из приведённого анализа следует, что в настоящее время при производстве деталей каркаса и обшивки деталей типа пластин с подкреплением существует проблема искажения пространственной формы (коробления) данных деталей после поверхностного деформационного упрочнения. Проблема осложняется тем, что правка упрочненных деталей недопустима из-за возможной потери упрочняющего эффекта. Пропуск в дальнейшее производство деталей с отклонениями приводит к силовой сборке, в конструкцию вносятся непредсказуемые монтажные напряжения, что отрицательно влияет на ресурсные характеристики. Для снижения

коробления деталей предприятия вынуждены выполнять упрочняющую обработку на заниженных режимах, что также приводит к снижению усталостной долговечности.

Для решения указанной проблемы в целях сохранения требуемой точности формы деталей предлагается использовать их превентивного деформирование перед упрочняющей обработкой путём раскатки роликами конструктивных элементов деталей, а также дополнительную дробеударную обработку, не нарушающую благоприятное НДС деталей по завершению процесса упрочнения.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности производства и качества деталей типа пластин с подкреплением на основе решения комплекса вопросов по управлению напряженно-деформированным состоянием деталей в технологическом сочетании «Превентивное деформирование – дробеударное упрочнение».

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику определения внутренних силовых факторов процесса дробеударной обработки в виде растягивающих сил, действующих на конструктивные элементы обрабатываемых деталей, и координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности) конечно-элементным моделированием с учетом структуры зоны обработки применяемого оборудования и фракционного состава рабочей среды;

2. Разработать методику конечно-элементного моделирования процесса дробемётного упрочнения путём нагружения моделей деталей расчетными силами, соответствующими режимам обработки, с целью определения формоизменения обработанных деталей;

3. Предложить способ минимизации искажения пространственной формы деталей в процессе дробемётного упрочнения, заключающийся в превентивном деформировании раскаткой роликами конструктивных

элементов деталей, с определением технологических параметров на основе расчетного формоизменения упрочненной детали;

4. Исследовать технологические возможности правки деталей после дробемётного упрочнения дробеструйной обработкой;

5. Разработать и реализовать программы экспериментального исследования по проверке адекватности результатов моделирования процесса дробемётного упрочнения на конструктивно-подобных образцах деталей; по определению влияния операции превентивного деформирования на усталостную долговечность материала деталей.

2 Определение внутренних силовых факторов и структуры зоны упрочняющей дробемётной обработки деталей типа пластин с подкреплением

2.1 Определение внутренних силовых факторов процесса

Внутренними силовыми факторами процесса упрочняющей дробемётной обработки, вызывающими формоизменение детали, являются удельные растягивающие силы, действующие на конструктивные элементы обрабатываемых деталей, и координаты точек приложения данных сил (расстояния от поверхности) (см. рисунок 1.27).

Особенностью большинства деталей типа пластин с подкреплением является расположение центра тяжести сечения вне полона (см. рисунок 2.1).

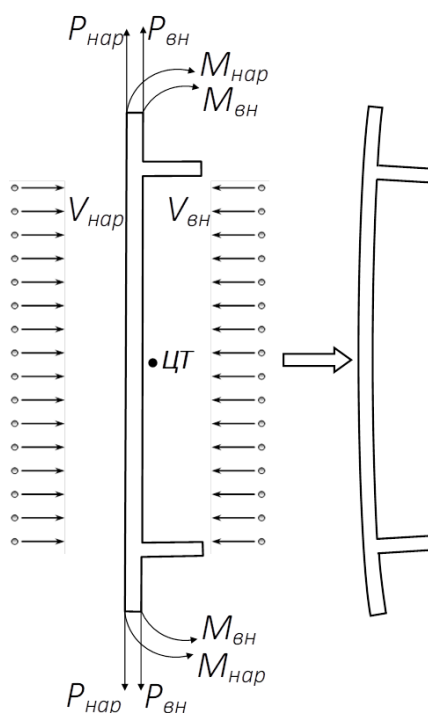


Рисунок 2.1 – Схема нагружения при упрочнении дробью подкреплённой детали

При этом растягивающие силы, возникающие в наружных и внутренних слоях при двухсторонней упрочняющей дробеобработке, вызывают однонаправленные изгибающие моменты. Это не позволяет

добиться устранения коробления регулированием режимов обработки сторон детали.

В результате анализа детали «Стенка» (см. рисунок 1.1а), которая в процессе изготовления подвергается дробеметному упрочнению, были выявлены конструктивные особенности данной детали. Это протяженное полотно, подкрепленное поперечными и продольными ребрами. Ребро по внешнему контуру детали расположено под переменным углом к плоскости детали [38].

Действие внутренних силовых факторов, возникающих в процессе обработки дробью на различных конструктивных элементах детали, выражается в возникновении изгибающего момента

$$M = Pk = \frac{EJ}{R}, \quad (2.1)$$

где P – внутренняя растягивающая сила, действующая в образце; k – расстояние от точки приложения силы до центра тяжести образца,

$$k = \frac{H}{2} - z_c, \quad (2.2)$$

H – толщина образца, z_c – расстояние от точки приложения силы до обработанной поверхности; E – модуль упругости 1-го рода, $E = 74\,000$ МПа; R – радиус кривизны образца, полученный при обработке дробью,

$$R = \frac{a^2}{8f}, \quad (2.3)$$

f – стрела прогиба, полученного при обработке; a – база измерения стрелы прогиба ($a = 0,2$ м);

J – осевой момент инерции сечения

$$J = \frac{BH^3}{12}, \quad (2.4)$$

B – ширина образца.

Из выражений 2.1-2.4 получаем расчетную формулу для удельной (на единицу ширины) растягивающей силы, действующей в поверхностном слое после обработки дробью:

$$P = \frac{2EfH^3}{3a^2\left(\frac{H}{2} - z_c\right)}, \quad (2.5)$$

Для исследования особенностей НДС конструктивных элементов подкреплённых деталей при дробемётном упрочнении выполним обработку образцов в виде пластин из материала детали (см. рисунок 2.2), закрепляя их на специальных имитаторах конструктивных элементов.

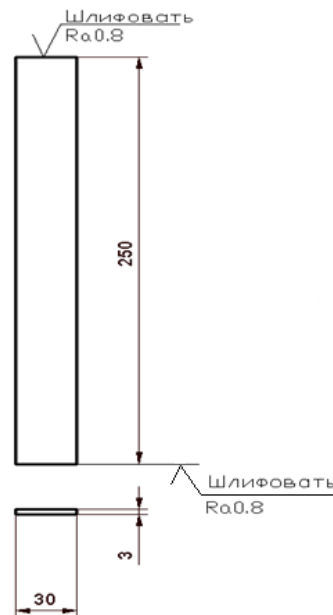
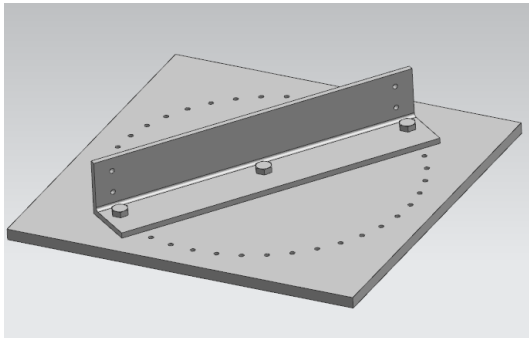


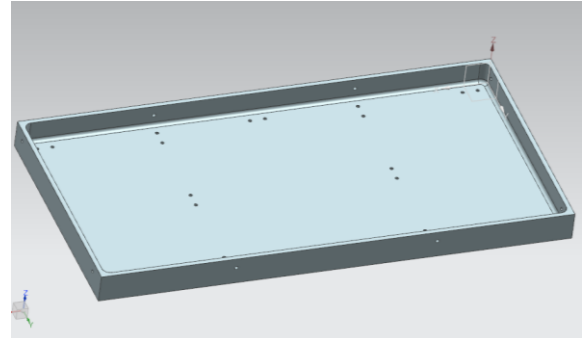
Рисунок 2.2 – Образец-пластина для исследования особенностей НДС конструктивных элементов подкреплённых деталей при дробемётном упрочнении

Для исследования процесса дробемётного упрочнения подкреплённых деталей были разработаны имитаторы конструктивных элементов деталей типа «Ребро» с различными углами наклона в плане с шагом $4,5^\circ$ и «Карман» для оценки интенсивности одновременной обработки ребер и полотна (см. рисунок 2.3). Схема закрепления образцов на имитаторе «Ребро» приведена на рисунке 2.4. На имитаторе «Карман» производилась обработка образцов,

закреплённых на каждом ребре с двух сторон, а также по шесть образцов на полотне (см. рисунок 2.5).



а)



б)

Рисунок 2.3 – Имитаторы конструктивных элементов деталей «Ребро» (а) и «Карман» (б)

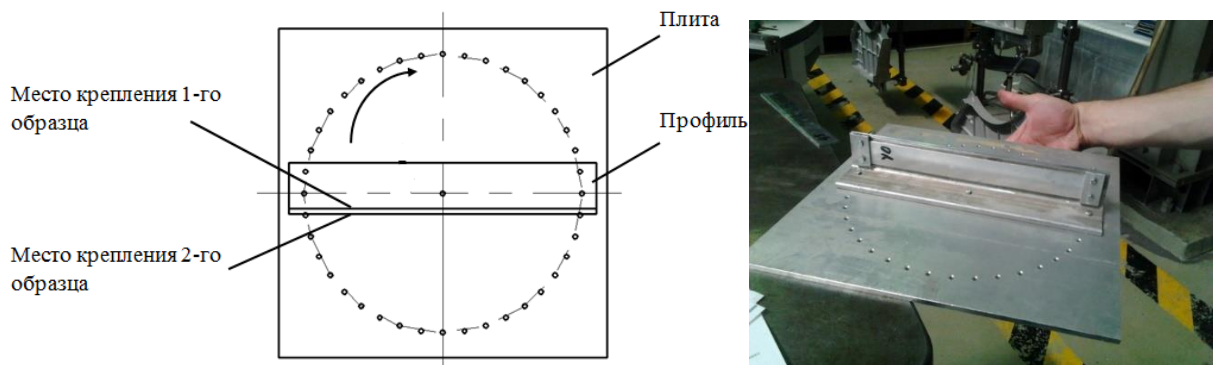


Рисунок 2.4 – Схема закрепления образцов на имитаторе «Ребро»

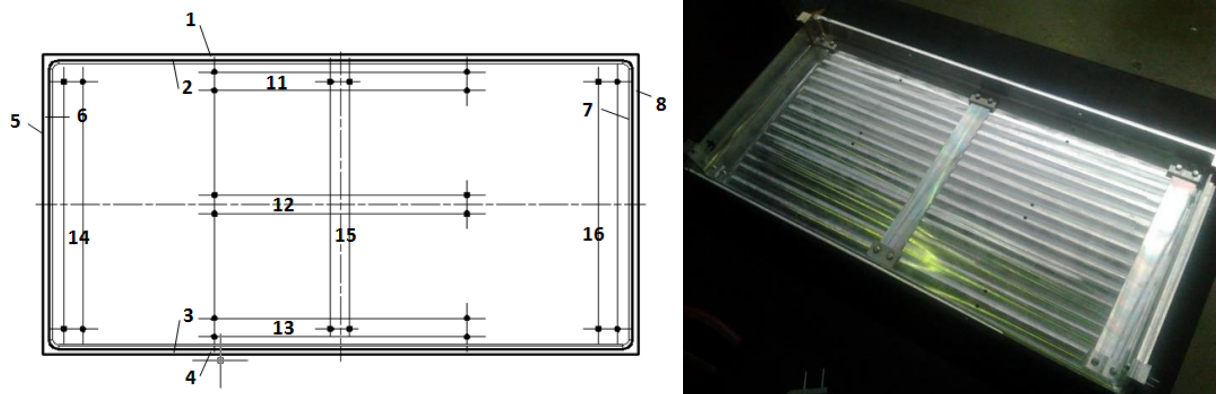


Рисунок 2.5 – Схема закрепления образцов на имитаторе «Карман»

Крепление образцов-пластин на имитаторах осуществлялось с помощью специальных прихватов болтами и гайками.

Обработка дробью производилась на установке УДП-2-2,5 (см. рисунок 1.9). Режимы дробеударной обработки, приведены в таблице 2.1. Данные режимы соответствуют технологическому процессу упрочнения выбранной детали.

Таблица 2.1– Режимы обработки образцов

	Установ 1	Установ 2
Количество рабочих ходов	4	2
Частота вращения дробеметов 1-4, мин ⁻¹	420	420
Частота вращения дробеметов 5-8 , мин ⁻¹	470	470
Подача, м/мин	3	1
Положение заслонок дозаторов	1 (открыты на 50%)	3 (открыты на 100%)

Измерение стрелы прогиба образцов до (исходная стрела прогиба $f_{исх}$) и после обработки (полученная стрела прогиба $f_{пол}$) производилось при помощи индикаторной планки, оснащенной головкой часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм, на базе 200 мм (см. рисунок 2.6).

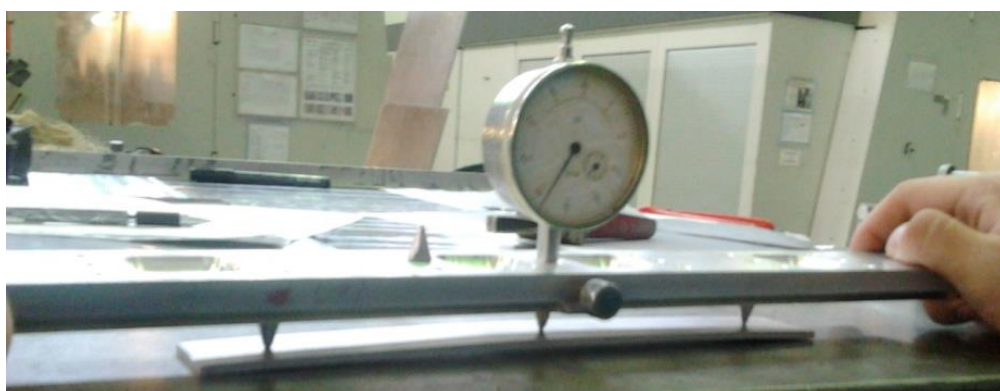


Рисунок 2.6 – Устройство для измерения прогиба образцов

Прирост стрелы прогиба после обработки определялся при помощи формулы

$$\Delta f = f_{\text{пол}} - f_{\text{исх.}}$$

Результаты измерений были занесены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты эксперимента: толщина и стрела прогиба образцов

Маркировка образца	Размещение образа в оснастке	Толщина образца	$f_{\text{исх.}}$ мм	$f_{\text{пол.}}$ мм	f, мм
0	Ребро, 0°	2,980	2,46	3,48	1,02
18	Ребро, 18°	2,960	2,01	2,93	0,92
36	Ребро, 36°	2,980	2,18	2,98	0,8
54	Ребро, 54°	2,987	2,03	2,68	0,65
90	Ребро, 90°	2,980	2,02	2,63	0,61
108	Ребро, 108°	2,980	2,01	2,52	0,51
126	Ребро, 126°	2,980	2,02	2,52	0,50
180	Ребро, 180°	2,987	2,04	2,50	0,46
270	Ребро, 270°	2,963	2,08	2,67	0,59
288	Ребро, 288°	2,983	2,14	2,93	0,79
306	Ребро, 306°	2,963	2,01	2,86	0,85
342	Ребро, 342°	2,997	2,03	3,03	1,00
1	Карман, 1	2,967	2,01	3,25	1,24
2	Карман, 2	2,977	2,05	2,41	0,36
3	Карман, 3	2,987	2,03	2,53	0,5
4	Карман, 4	2,987	2,08	2,43	0,35
5	Карман, 5	2,987	2,04	2,67	0,63
6	Карман, 6	2,987	2,06	2,43	0,37
7	Карман, 7	2,987	2,01	2,40	0,39
8	Карман, 8	2,980	2,12	2,97	0,85

Маркировка образца	Размещение образца в оснастке	Толщина образца	$f_{исх}$, мм	$f_{пол}$, мм	f , мм
11	Карман, 11	2,960	2,06	3,49	1,43
12	Карман, 12	2,957	2,00	3,54	1,54
13	Карман, 13	2,980	2,24	3,48	1,24
14	Карман, 14	2,987	2,01	3,48	1,47
15	Карман, 15	2,970	2,01	3,48	1,47
16	Карман, 16	2,987	2,03	3,55	1,52

Для измерения удлинения образцов использовалось специально разработанное устройство с индикаторной головкой Mitutoyo с ценой деления 0,001 мм (см. рисунок 2.7).

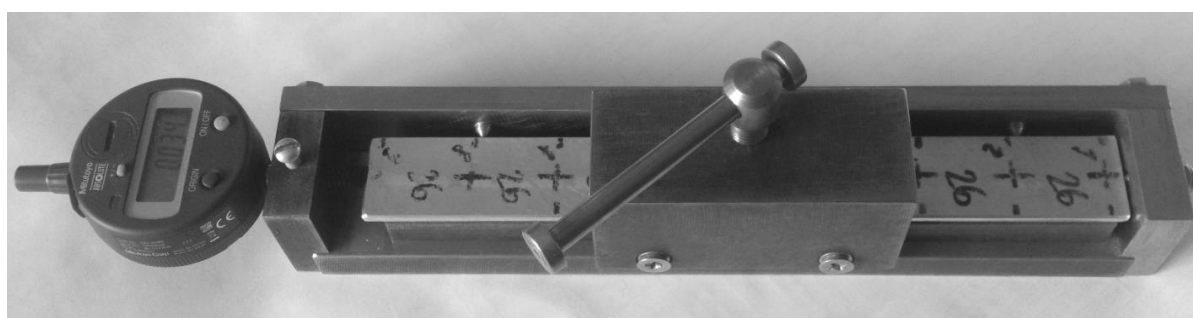


Рисунок 2.7 – Устройство для измерения удлинения образцов

С помощью устройства для измерения удлинения образцов определялась длина образцов до обработки (ΔL_0) и после обработки ΔL_1 . Для этого индикаторная головка устройства выставлялась на 0 по эталону, после чего определялась разность длины образца относительно эталона. При этом выставление индикаторной головки на 0 производилось перед измерением каждой пластины. Далее рассчитывалось изменение длины детали в процессе обработки по формуле

$$\Delta L = \Delta L_1 - \Delta L_0.$$

Для измерения толщины образцов использовался стенкомер индикаторный Mitutoyo с ценой деления 0,01 мм. Измерение толщины образцов производилось в трех точках, далее определялось среднее арифметическое значение толщины образцов.

Результаты измерений приведены в таблице 2.3

Таблица 2.3 – Результаты эксперимента: удлинение образцов

Маркировка образца	Размещение образца в оснастке	ΔL_0 , мм	L, мм	ΔL_1 , мм	ΔL , мм
0	Ребро, 0°	-0,350	249,65	-0,337	0,013
18	Ребро, 18°	0,000	250,000	0,007	0,007
36	Ребро, 36°	-0,119	249,881	-0,117	0,002
54	Ребро, 54°	-0,104	249,896	-0,92	0,012
90	Ребро, 90°	0,041	250,041	0,057	0,017
108	Ребро, 108°	-0,005	249,995	0,016	0,021
126	Ребро, 126°	-0,063	249,927	0,078	0,015
180	Ребро, 180°	0,013	250,013	0,029	0,016
270	Ребро, 270°	-0,003	249,997	0,021	0,024
288	Ребро, 288°	-0,037	249,963	-0,012	0,025
306	Ребро, 306°	0,049	250,049	0,070	0,021
342	Ребро, 342°	-0,098	249,902	-0,088	0,010
1	Карман, 1	0,010	250,010	0,030	0,020
2	Карман, 2	0,003	250,003	0,024	0,021
3	Карман, 3	0,019	250,019	0,040	0,021
4	Карман, 4	-0,001	249,999	0,015	0,016
5	Карман, 5	0,018	250,018	0,036	0,018
6	Карман, 6	0,010	250,010	0,029	0,019

Маркировка образца	Размещение образца в оснастке	ΔL_0 , мм	L, мм	ΔL_1 , мм	ΔL , мм
7	Карман, 7	0,022	250,022	0,043	0,025
8	Карман, 8	0,011	250,011	0,039	0,038
11	Карман, 11	0,011	250,011	0,043	0,032
12	Карман, 12	-0,014	249,986	0,015	0,029
13	Карман, 13	-0,384	249,616	-0,355	0,029
14	Карман, 14	-0,505	249,495	-0,483	0,022
15	Карман, 15	-0,424	249,576	-0,396	0,028

Расчет удельной растягивающей силы $P_{об}$, действующей на образец-пластину, и координаты $z_c^{об}$ точки её приложения выполним с использованием следующих формул [19]

$$P_{об} = -EH_{об}\varepsilon_{об};$$

$$z_c^{об} = \frac{H_{об}}{2} - \frac{2}{3} \frac{f_{об}}{\varepsilon_{об}} \left(\frac{H_{об}}{L_{об}} \right)^2.$$

где E – модуль упругости материала образца; $L_{об}$, $H_{об}$ – длина и толщина образца; $\varepsilon_{об}$ – относительное удлинение образцов ($\varepsilon_{об} = \Delta L_{об} / L_{об}$).

Для определения компонент силы, действующей на деталь, используем следующую зависимость

$$P_j = (P_{обj} + \mu P_{обk}) / (1 - \mu^2); \quad j, k = x, y,$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Принимая допущение о симметричном характере нагружения при дробеобработке, с учетом того, что при упругой деформации $\mu = 1/3$, получаем

$$P_x = P_y = 1,5P_{об}.$$

Таблица 2.3 – Расчетные значения внутренних сил, действующих на образцы-пластины при упрочняющей дробемётной обработке

Маркировка образца	Размещение образца в оснастке	$P_{об}$, Н/м
0	Ребро, 0°	733,3
18	Ребро, 18°	657,6
36	Ребро, 36°	591,8
54	Ребро, 54°	398,5
90	Ребро, 90°	423,6
108	Ребро, 108°	417,4
126	Ребро, 126°	315,8
180	Ребро, 180°	299,7
270	Ребро, 270°	331
288	Ребро, 288°	319,6
306	Ребро, 306°	345,6
342	Ребро, 342°	335,9
1	Карман, 1	297,8
2	Карман, 2	320,9
3	Карман, 3	436,8
4	Карман, 4	602,3
5	Карман, 5	601,8
6	Карман, 6	543,4
7	Карман, 7	685,7
8	Карман, 8	758,6
11	Карман, 11	747,1
12	Карман, 12	896,5
13	Карман, 13	769,3
14	Карман, 14	269,7
15	Карман, 15	587,6

2.2 Исследование остаточных напряжений, создаваемых дробемётной обработкой

Для определения остаточных напряжений (ОН) использовали установку для измерения остаточных напряжений механическим методом (методом полосок) УДИОН-2 (см. рисунок 2.8).

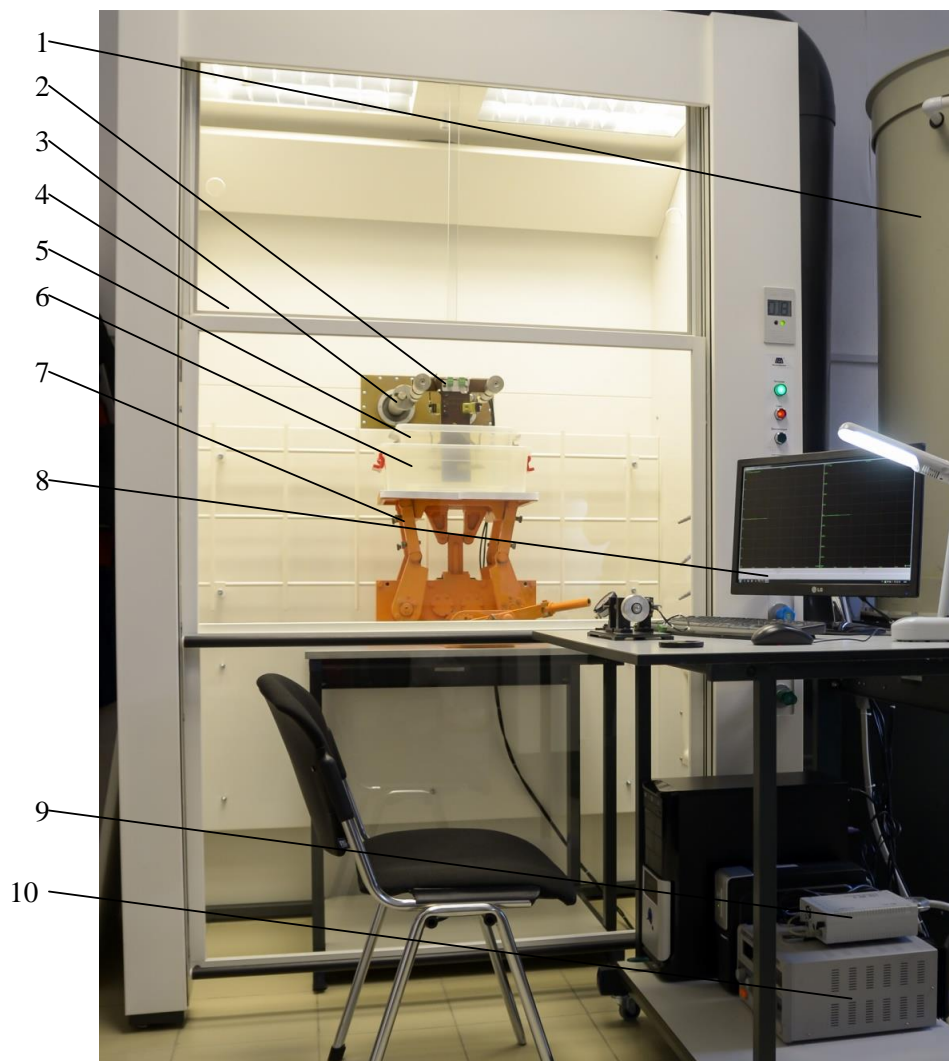


Рисунок 2.8 – Установка УДИОН-2 для измерения ОН механическими методами: 1 – скруббер; 2 – приспособление для закрепления образцов; 3 – кронштейны для приспособлений; 4 – вытяжной шкаф; 5 – ванна с раствором для травления; 6 – термостатирующая ванна; 7 – устройство подъема ванн; 8 – программное обеспечение системы сбора данных; 9 – тензометрические модули системы сбора данных; 10 – блок питания

Исследования проводились в следующей последовательности:

1) Из пластин, полученных после обработки дробью, вырезали образцы-полоски размерами $60 \times 8 \times 3$ мм (см. рисунок 2.9). Для раскроя образцов использовался отрезной станок Discotom-10. С помощью мелкозернистого надфиля производилось снятие заусенцев.

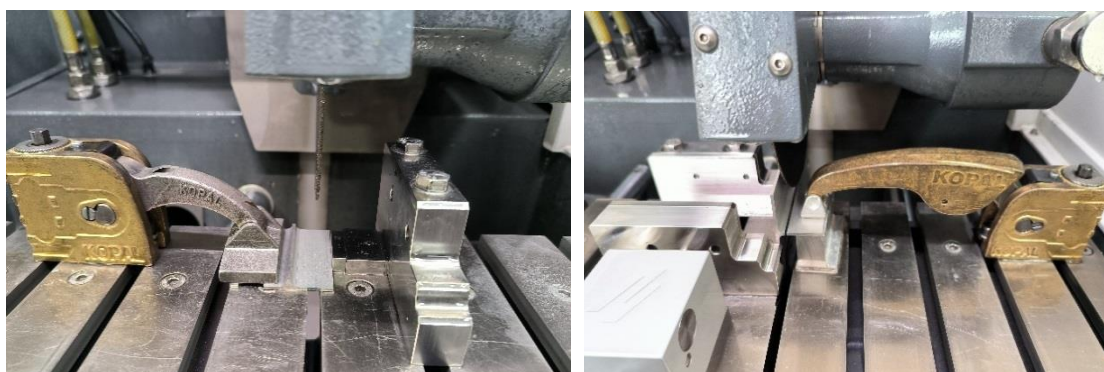
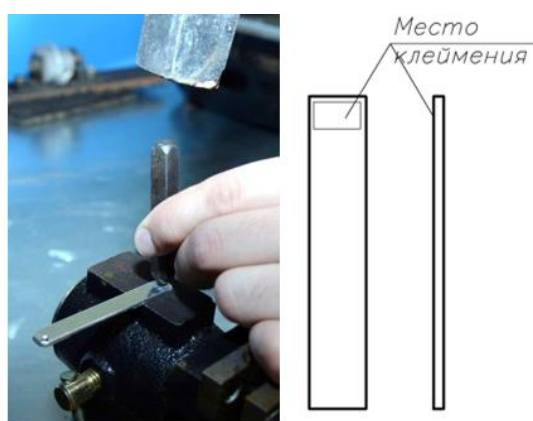


Рисунок 2.9 – Разрезка исходного образца.

2) В каждом образце с помощью универсального вертикально-сверлильного станка получали отверстие $\varnothing 2$ мм для подвешивания образца в сушильном шкафу после нанесения изоляционного покрытия и для крепления бирки-идентификатора образца.

3) На необработанную сторону наносилась маркировка ударным способом (рисунок 2.10).



а)

б)

Рисунок 2.10 – Маркировка образцов-полосок: а) нанесение маркировки; б) место маркировки

4) Каждому образцу-полоске присваивался уникальный идентификационный номер штрих-кода базы данных «Параметры образцов УДИОН-2» в формате EAN-13. Все последующие измерения параметров образцов заносятся непосредственно в базу данных для последующего расчёта ОН. Поиск образца в базе данных производился по номеру штрих-кода, указанному на бирке образца.

5) С помощью приспособления (см. рисунок 2.11) определялась стрела прогиба образца на базе 40 мм, а также измерялись ширина и толщина образца. При помощи аналитических весов производилось взвешивание образцов.



Рисунок 2.11 – Приспособление для измерения стрелы прогиба образцов-полосок

6) Перед взвешиванием производилось обезжиривание образцов ацетоном (ГОСТ 2768-84). С помощью цифровых аналитических весов определялась масса образцов с точностью до 0,002 г.

7) За отверстие в образцах прикреплялась бирка, дублирующая их маркировку, и производилось трёхкратное окунание образцов в защитную эмаль с промежуточной просушкой в отсеке сушильного шкафа.

8) К верхней части образца монтировался двуплечий рычаг с фторопластовыми наконечниками для передачи деформации на тензометрический датчик, нижняя часть образца устанавливалась на приспособлении для закрепления образцов. Поверхность приспособления

защищалась парафиновой плёнкой, включая образец-полоску и основание двуплечего рычага. Исследуемая поверхность образца, подвергаемая травлению, очищалась от парафиновой плёнки и защитного покрытия с помощью лезвия. Далее приспособление для закрепления образцов с предустановленными образцами (до 4 шт.) устанавливалось и фиксировалось в вытяжном шкафу над ванной с раствором, расположенной на столе подъёмного механизма (см. рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Установка приспособления для закрепления образцов в вытяжном шкафу

9) Процесс травления осуществлялся в следующей последовательности: включение вентиляции, активизация систем сбора данных, погружение образцов в раствор, при помощи подъёмного стола с ванной. При послойном химическом травлении осуществлялась запись

перемещения контрольной точки тензометрического датчика в реальном времени.

10) По завершении травления образцы-полоски демонтировались, с поверхности образцов удалялось изоляционное покрытие, образцы промывались, обезжиривались и взвешивались на аналитических весах с точностью до 0,002 г. По разнице масс образца до и после проведения эксперимента рассчитывалась скорость травления образца в процессе измерения.

11) Расчёт остаточных напряжений производился по данным, полученным в результате подготовки и проведения эксперимента с помощью программы расчёта остаточных напряжений механическим методом XUdion, разработанной в ИРНТУ.

В результате были получены эпюры ОН в образцах обработанных с использованием режимов действующего технологического процесса, которые приведены в Приложении А.

2.3 Исследование структуры зоны дробемётной обработки

Внутренние силы, возникающие в процессе обработки дробью и действующие на конструктивные элементы деталей, зависят от структуры зоны обработки.

В большинстве отмеченных в предыдущей главе публикаций при моделировании процесса обработки дробью в качестве допущения принимались постоянство скорости и диаметра дроби,

Как видно из рисунка 1.9, структура зоны упрочняющей дробемётной обработки представляет совокупность отпечатков большого количества дробин, имеющих разные скорости и углы падения. Рабочей средой дробемётной установки УДП-2-2,5 является смесь дроби с диаметрами 0,6...0,8 мм.

Ниже приведены результаты исследований по определению реальной структуры зоны упрочняющей дробемётной обработки на установке УДП-2-2,5 для использования при дальнейшем моделировании.

Исследование микрорельефа поверхности после обработки упрочняющей дробью осуществлялась на образцах размерами 100x20x2 мм изготовленных из алюминиевого сплава 1933Т2.

При анализе микрорельефа важным фактором является исходное качество поверхности образца.

Поскольку образцы изготавливались фрезерованием из листового материала, шероховатость поверхности составляла Ra2,5. При дальнейшем измерении поверхности на оптическом профилометре, микрорельеф фрезерованной поверхности вносит значительные искажения в форму отпечатков от дробы и затрудняет анализ фракционного состава отпечатков.

В связи с этим, перед обработкой дробью поверхность образцов была обработана на шлифовально-полировальном станке Struers Tegamin-25 до зеркальной поверхности (см. рисунок 2.13). Величина снимаемого припуска составляла 0,25 мм и контролировалась толщиномером.



Рисунок 2.13 – Полирование поверхности образцов

Обработка образцов осуществлялась на установке УДП-2-2,5, за один рабочий ход со следующими режимами:

- частота вращения дробеметного колеса 400 об/мин;
- скорость подачи 1 м/мин;

- положение заслонок 3 (полностью открыты).

Данные режимы обработки являются типовыми на производстве.

Образцы закреплялись в траверсе установки УДП-2-2.5 на различной высоте (с шагом 500 мм), для оценки интенсивности обработки в зависимости от ориентации детали в камере обработки (см. рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Закрепление образца в зажимах установки УДП-2-2.5

Для оценки влияния ориентации обрабатываемой поверхности на микрорельеф обработки использовался специальный имитатор (см. рисунок 2.15).

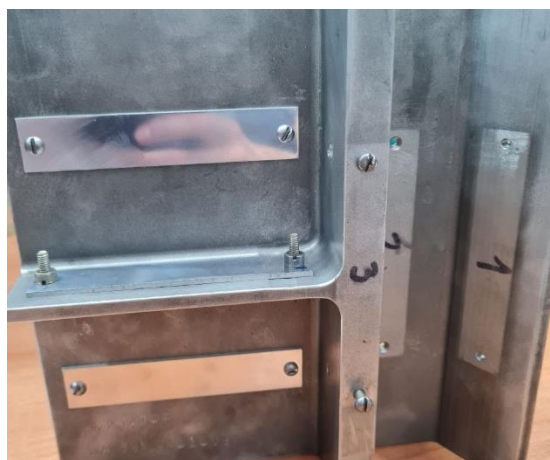


Рисунок 2.15 – Закрепление образцов в имитаторе

Поверхность обработанных образцов исследовалась на 3D-оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1 (см. рисунок 2.16) на участке 20x20 мм.



Рисунок 2.16 – Измерение образца на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1

По результатам анализа на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1 были получены профилограммы обработанных поверхностей (см. рисунок 2.17).

Полученные изображения, с соблюдением масштаба, импортировались в САД систему NanoCAD, где осуществлялось обведение отпечатков вписанными окружностями (см. рисунок 2.18).

Далее с помощью встроенной функции NanoCAD «Извлечь данные», данные о диаметрах окружностей, которые были обведены изображения отпечатков, экспортировались в таблицу Microsoft Excel. В таблице полученные данные округлялись до сотых, сортировались по значениям диаметров и осуществлялся подсчет количества диаметров отпечатков. Полученные значения представлены в таблице 2.5.

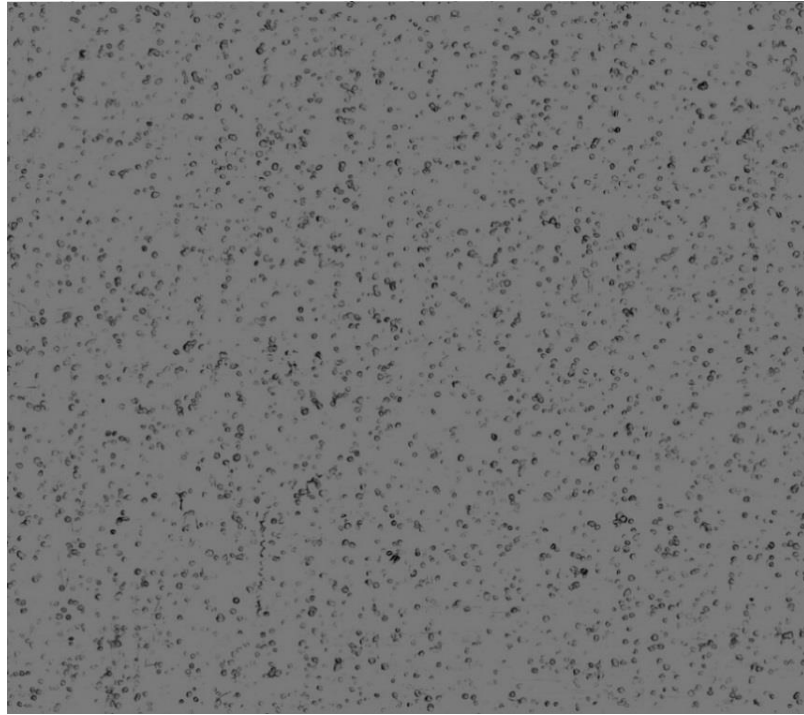


Рисунок 2.17 – Профилограмма поверхности после обработки на установке
УДП-2-2.5

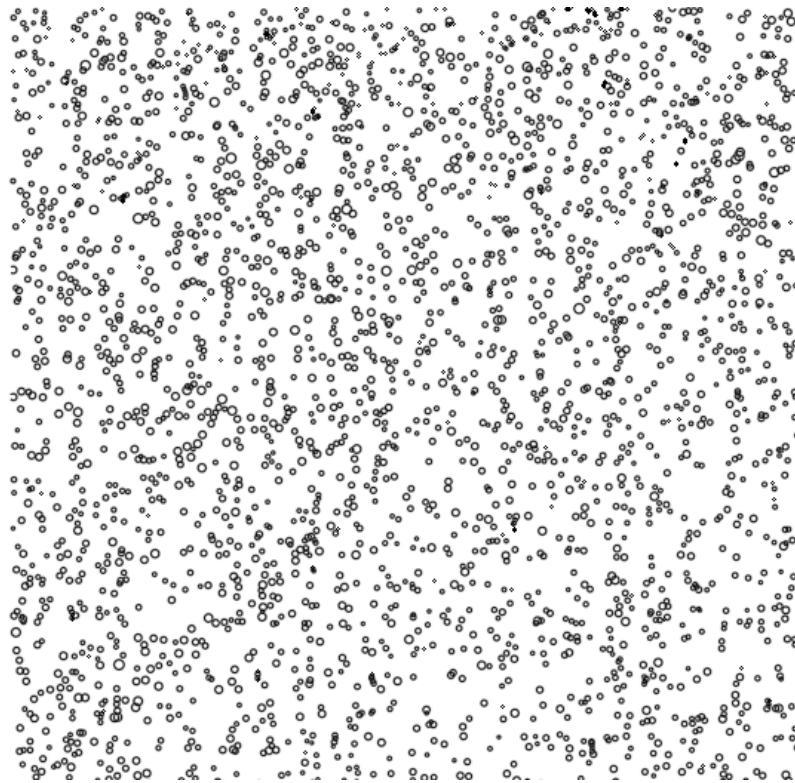


Рисунок 2.18 – Результат обработки поверхности в САД-системе AutoCAD

Таблица 2.5 – Распределение диаметров отпечатков по фракциям

Диаметр, мм	Количество, шт		
	Высота закрепления 500 мм	Высота закрепления 1000 мм	Высота закрепления 1000 мм (на имитаторе «ребро»)
0,03	1	2	1
0,04	1	4	2
0,05	5	4	2
0,06	9	7	4
0,07	21	17	9
0,08	40	46	23
0,09	45	50	25
0,1	68	73	37
0,11	90	89	45
0,12	100	110	55
0,13	86	79	40
0,14	82	80	40
0,15	52	49	25
0,16	47	50	25
0,17	27	23	12
0,18	20	19	10
0,19	5	3	2
0,2	9	7	4
0,21	2	4	2
0,24	1	0	0
Общее кол-во отпечатков, шт	712	716	358

В программе Adobe Photoshop CC 2019 рассчитывалась площадь покрытия, путем выделения на полученном изображении только белых и черных цветов. Обработанное изображение представлено на рисунке 2.19.



Рисунок 2.19 – Обработанное изображение отпечатков

Далее была определена площадь черного цвета на изображении, она составляет 22951 пикселей, зная общее количество пикселей в изображении – 210871, рассчитывается степень покрытия по формуле:

$$S_{\text{п}} = \frac{K_{\text{ч}}}{K_{\text{об}}} \cdot 100\% = \frac{22651}{210871} \cdot 100\% = 10,74\%.$$

где $S_{\text{п}}$ – степень покрытия, $K_{\text{ч}}$ – количество черных пикселей, а $K_{\text{об}}$ – общее число пикселей.

2.4 Определение фракционного состава дробы, применяемой при упрочнении деталей

Поскольку на установке УДП-2-2.5 применяется смесь дробы, с с диапазоном диаметра 0,6-0,8 мм, необходимо установить количественное соотношение дробинok данных диаметров [78].

Фракционный состав дробы определялся при помощи технологии технического зрения [62] с применением установки National InstrumentI Smart Camera 1764 (см. рисунок 2.20). Технические характеристики приведены в таблице 2.6.



Рисунок 2.20 – Общий вид установки National InstrumentI Smart Camera 1764

Таблица 2.6 – Технические характеристики установки National InstrumentI Smart Camera 1764

Модель	Процессор	Датчик	Контроллер непосредственного управления источником света	Интерфейс квадратурного энкодера
NI 1742	533 МГц	1/3 дюйма ПЗС, моно-хромный 640× 480 пикселей (VGA)	Да	Да

Дробь засыпалась в емкость таким образом, чтобы дробинки в ней распределились в один слой. Заполненные емкости помещались на

поворотный стол измерительного стенда National Instruments (см. рисунок 2.21). Затем при помощи камеры получены изображения.



Рисунок 2.21 – Измерение дроби при помощи NI Smart Camera 1764

Полученные изображения представляют собой двумерный массив значений функции интенсивности света $f(x,y)$. При анализе сенсор разбивает изображение на отдельные пиксели, при этом каждый пиксель имеет цифровые координаты. Помимо этого, присваивается уровень яркости или код цвета, определяющие яркость или цвет элемента изображения. Анализ полученного изображения производился с помощью программы Vision Assistant,

Определение размеров дробы осуществлялось с помощью гистограмм, определялись координаты расположения дробы, далее высчитывалась площадь в пикселях. Перевод из полученных значений из пикселей в метрическую систему осуществлялся путем умножения на стандартный коэффициент.

С помощью программы Excel значения сортировались. результаты представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Разделение исследуемой дробы по фракциям

Диаметр дробинок, мм	N , шт - эксперимент	N , шт - расчет	Относительная погрешность, %
0,6	1434	1333	8
0,7	1590	1642	3
0,8	277	285	2

После определения фракционного состава дробы было получено соотношение распределения дробинок разного диаметра в общей массе дробы:

0,6 мм – 43%;

0,7 мм – 48%;

0,8 мм – 9%.

Выводы по главе 2

1. Разработана и реализована методика экспериментального исследования процесса дробемётного упрочнения деталей, состоящих из таких конструктивных элементов, как полотно, карманы и подкрепляющие рёбра, расположенные под разными углами, с целью определения исходных данных для дальнейших расчетов в виде внутренних силовых факторов и структуры зоны упрочняющей дробемётной обработки.

2. На основе измерения стрел прогибов и удлинений образцов, закрепляемых на имитаторах конструктивных элементов деталей, определены внутренние силовые факторы процесса дробемётного упрочнения – удельные растягивающие силы и координат точек приложения данных сил (расстояния от обрабатываемой поверхности). Данные силы изменяются в диапазоне от 300 до 800 Н/м в зависимости от расположения относительно потока дроби и действуют на конструктивные элементы деталей, что приводит к короблению деталей при упрочнении.

3. С использованием механического метода (метода полосок) определения остаточных напряжений (ОН) получены эпюры ОН в поверхностных слоях конструктивных элементов подкреплённых деталей, подвергнутых дробемётной упрочняющей обработке.

4. Определены параметры микрорельефа поверхностей типовых конструктивных элементов деталей, подвергнутых дробемётной упрочняющей обработке, в виде распределений диаметров отпечатков дроби, изменяющихся в диапазоне 0,03...0,24 мм.

5. Разработана методика определения фракционного состава дроби, применяемой при упрочнении деталей в виде количественного соотношения дробинok данных диаметров с применением технологии технического зрения. Определён фракционный состав дроби, используемой при упрочнении деталей на дробемётной установке УДП-2-2,5: 0,6 мм – 43%; 0,7 мм – 48%; 0,8 мм – 9%.

3 Моделирование формоизменения деталей типа пластин с подкреплением при дробемётном упрочнении

3.1 Общие подходы к моделированию

В предыдущей главе приведены методика и результаты экспериментального определения внутренних силовых факторов процесса дробемётного упрочнения – удельных растягивающих сил, действующих на конструктивные элементы обработанных деталей, и координат точек приложения данных сил.

На основе значений данных сил может быть определено формоизменение упрочненной детали.

Приведенная методика, основанная на изготовлении, обработке и измерении стрел прогиба и удлинения большого количества образцов-пластин из материала деталей является достаточно дорогостоящей и трудоёмкой. Дальнейшие расчеты по аналитическому определению формоизменения подкреплённых деталей под действием изгибающего момента, вызванного внецентренным растяжением деталей, могут быть выполнены при условии принятия ряда допущений, что приведёт к значительной погрешности.

Современные программные средства инженерного анализа позволяют заменить физический эксперимент конечно-элементным моделированием, что позволит сократить время и расходы на подготовку исходных данных.

Определённые внутренние силовые факторы могут быть использованы при моделировании процесса формоизменения деталей, что, в отличие от прямого моделирования процесса обработки дробью, позволит значительно сократить потребные вычислительные ресурсы и время расчета.

Моделирование процесса дробемётного упрочнения выполним в следующей последовательности.

Установим зависимость геометрической формы отпечатков на обрабатываемой поверхности, от скорости дробы.

Полученные результаты были использованы при моделировании множественного внедрения дробинки в обрабатываемый материал с учетом ранее определённого фракционного состава смеси дробы в установке УДП-2-2,5. Это позволит определить внутренние силовые факторы процесса дробемётного упрочнения при различных скоростях дробы и времени обработки (скорости подачи детали).

Для проверки адекватности результатов определения внутренних силовых факторов выполним нагружение найденными силами образцов-пластин из материала деталей и сопоставим полученные результаты с экспериментальными данными, приведёнными в предыдущей главе.

В целях определения формоизменения подкреплённых деталей при упрочняющей обработке дробью выполним моделирование нагружения модели конструктивно-подобного образца (КПО) расчетными внутренними силами, действующими на конструктивные элементы КПО.

3.2 Моделирование единичного внедрения дробы в материал детали

При определении влияния скорости дробы на геометрическую форму отпечатков выполним моделирование процесса ударного единичного внедрения шариков с диаметрами 0,6 мм, 0,7 мм и 0,8 мм, соответствующего размерам применяемой дробы. Для каждого из диаметров проведём моделирование со скоростями шариков 0,5 м/с, 1 м/с, 2 м/с, 3 м/с, 4 м/с и 5 м/с. Результатом моделирования будет являться два геометрических параметра: диаметр отпечатка d_0 и глубина h_0 глубина залегания остаточных напряжений, при внедрении шарика диаметром d .

Объектом внедрения является параллелепипед с размерами 0,8 x 0,8 x 0,4 мм.

На рисунке 3.1 представлена конечно-элементная модель (КЭМ), состоящая из участка обрабатываемой поверхности и дробины.

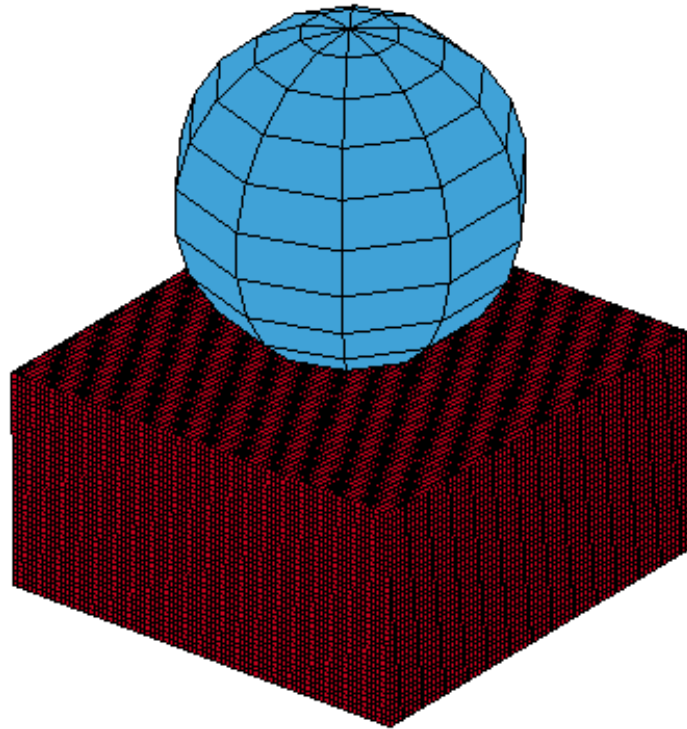


Рисунок 3.1 – Конечно-элементная модель единичного внедрения

Для детали использована модель анизотропного упругопластического материала, в которой зависимость напряжений от деформации задается на основе кусочно-линейной кривой нагружения (см. рисунок 3.2), полученной в процессе аппроксимации результатов испытаний на растяжение [24].

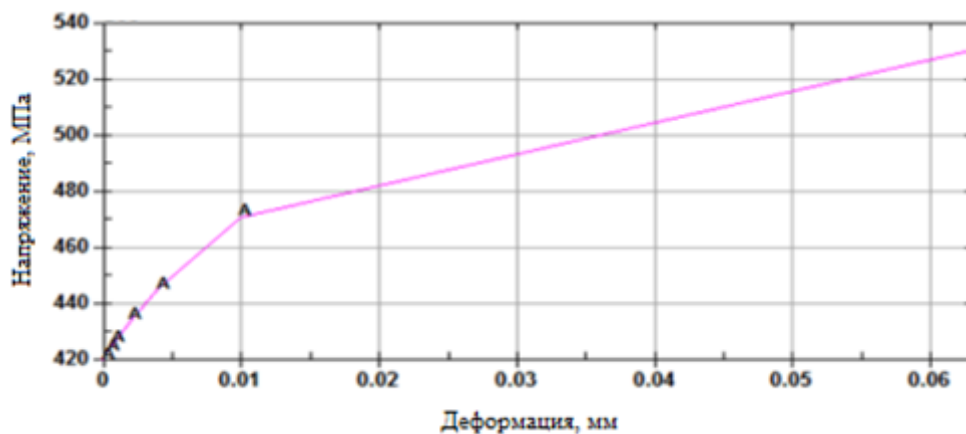


Рисунок 3.2 – Кривая нагружения, задающая зависимость напряжения от деформации материала 1933Т2 в зоне пластичности

В качестве критерия пластичности был применен критерий Мизеса-Хилла. Согласно данному критерию:

$$2f(\sigma_{ij}) = F \cdot (\sigma_y + \sigma_z)^2 + G \cdot (\sigma_z + \sigma_x)^2 + H \cdot (\sigma_x + \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + NL\tau_{xy}^2 = 1,$$

где F, G, H, L, M, N – коэффициенты анизотропии, определенные экспериментально, путем проведения одноосного растяжения в двух направлениях (ортотропная модель).

Параметры модели материала представлены в таблице 2.1.

Таблица 3.1 – Параметры модели материала 1933Т2

Плотность, кг/мм ³	Модуль Юнга, МПа	Коэф. Пуассона	Предел текучести, МПа	Коэф. анизотропии F	Коэф. анизотропии G	Коэф. анизотропии H
2,85*10 ⁻⁹	7,4*10 ⁴	0,33	458	0,47	0,53	0,47

В модели индентора использовалась модель материала абсолютно-жесткого тела. Свойства представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры модели материала индентора

Плотность, кг/мм ³	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
7,7*10 ⁻⁹	20*10 ⁴	0,3

Модель контакта индентора и детали задавалась со следующими параметрами:

1. Тип геометрии – сфера;
2. Тип ведомого объекта – тело;
3. Локальная система координат: AX=1 и BY=1;
4. Центр сферы – по оси Z – 0,31;
5. Радиус сферы – 0,3-0,4 мм.

Такой тип контакта применяется при анализе деформируемых узлов относительно жестких геометрических поверхностей.

Для исключения вибраций детали в процессе моделирования используется демпфирование деформируемого тела, а также модель глобального демпфирования. Ускорение демпфирования в процессе моделирования рассчитывается автоматически пропорционально массе тела по зависимости:

$$a^n = M^{-1} \cdot (P^n - P^n - P_{damp}^n),$$

где M – диагональная матрица масс, P^n – вектор внешней нагрузки, P^n – вектор внутренних сил, P_{damp}^n – демпфирующая сила.

Таким образом, в процессе моделирования определена зависимость диаметра отпечатка от скорости внедрения шарика. На рисунке 3.3 показан очаг деформации в районе отпечатка от внедрения дробинки диаметром 0,6 мм со скоростью 5 м/с. На рисунке 3.4 представлено измерение диаметра данного отпечатка.

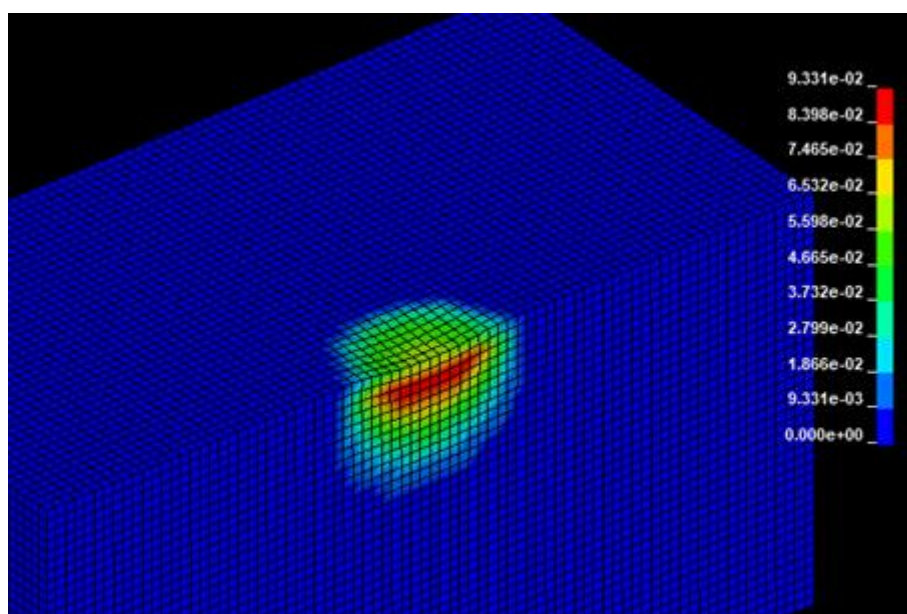


Рисунок 3.3 – Очаг деформации в районе отпечатка от внедрения дробинки диаметром 0,6 мм со скоростью 5 м/с

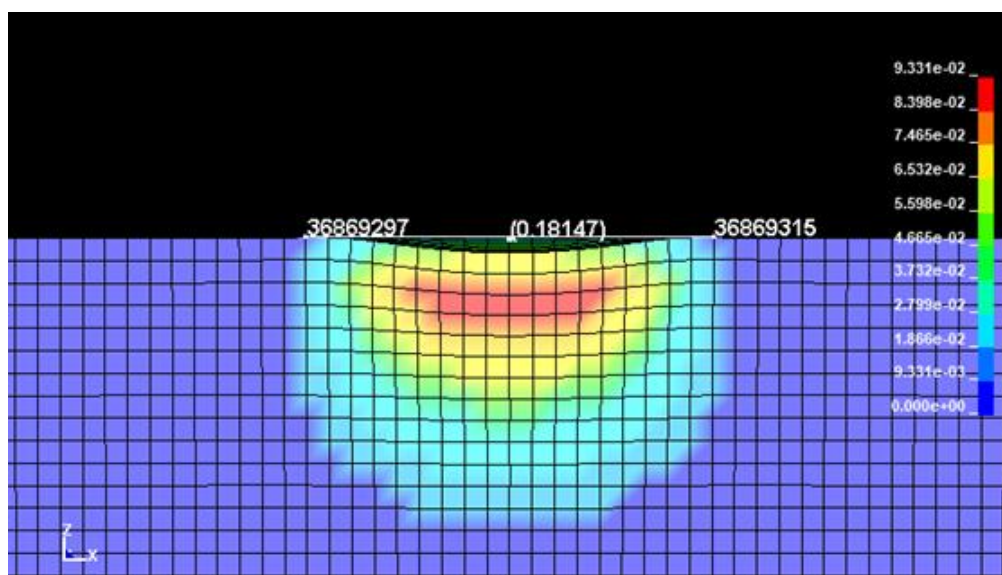


Рисунок 3.4 – Измерение отпечатка от внедрения дробинки диаметром 0,6 мм со скоростью 5 м/с

В результате были определены зависимости диаметра отпечатка от скорости дробинки. Определенные значения представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Геометрические параметры единичного внедрения шарика диаметром 0,6 мм

Скорость, м/с	Диаметр отпечатка от дробинки $\varnothing 0.6$, мм
5	0,18
4	0,163
3	0,12
2	0,10
1	0,06
0,5	0

Аналогичные расчеты были выполнены для дробы диаметром 0,7 и 0,8 мм при скоростях 0,5...5 м/с.

Графики зависимости диаметра отпечатка от скорости дробинки и их аппроксимации полиномами второго порядка приведены на рисунке 3.5.

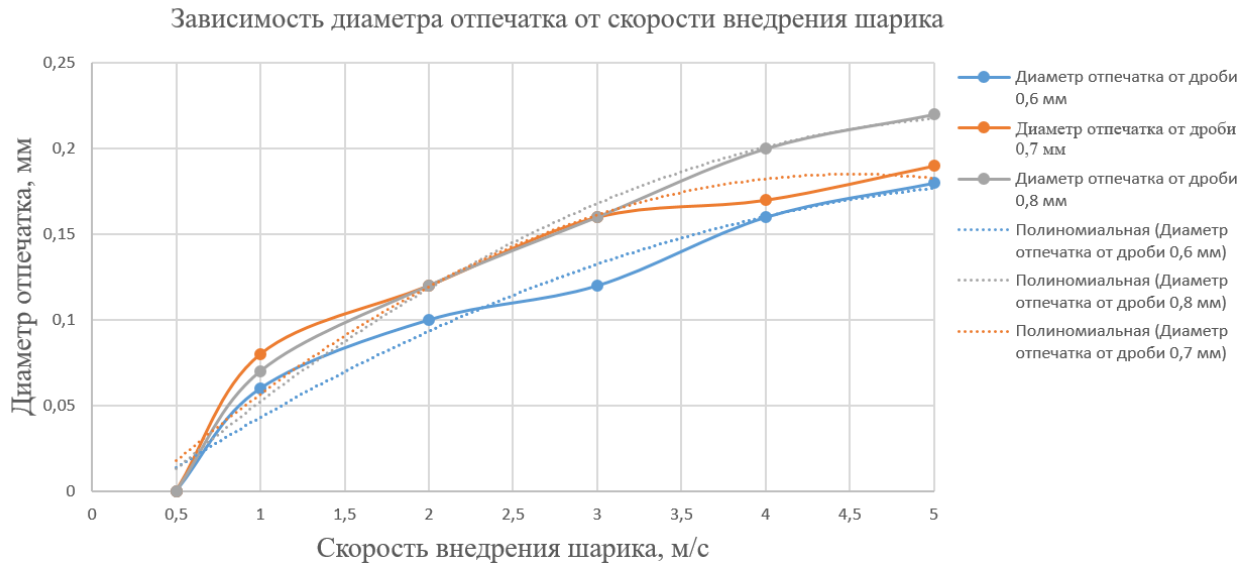


Рисунок 3.5 – Зависимость диаметров отпечатков от скорости внедрения дроби

Зависимости диаметра отпечатка от скорости внедрения дроби представлены в виде функций:

$$d_o^{0,6} = -0,0056 \cdot v^2 + 0,0671 \cdot v - 0,0184,$$

$$d_o^{0,7} = -0,0104 \cdot v^2 + 0,0937 \cdot v - 0,0265,$$

$$d_o^{0,8} = -0,0083 \cdot v^2 + 0,0908 \cdot v - 0,0303,$$

где d – диаметр отпечатка, v – скорость внедрения дроби.

3.3 Моделирование множественного внедрения дроби в материал детали

В процессе упрочняющей обработки дробью происходит множественное внедрение в поверхность детали дробинок, имеющих различные скорости и углы внедрения. Для моделирования данного процесса использована система нелинейных конечно-элементных расчетов LSTC LS-DYNA Version R10 [11, 31, 58, 71].

В связи с большой трудоемкостью подготовки расчетной модели обработки дробью путем множественного внедрения шариков, были

использованы средства программирования при подготовки расчетной модели [12].

Параметризация модели выполнена с помощью среды программирования MATLAB, в которой использовано специально разработанное ПО для получения модели множественного внедрения абсолютно жестких шариков в заготовку в виде параллелепипеда размерами 10 x 10 x 0,6 мм. Контактная область представляет собой 1 миллион гексаэдральных элементов.

Данный программный модуль состоит из следующих частей:

1. Программный код, который генерирует модель и свойства материала, модель демпфирования и метод решения.
2. Программный код, распределяющий координаты центров шариков над поверхностью детали. Схема назначения координат центра шарика представлена на рисунке 3.6.

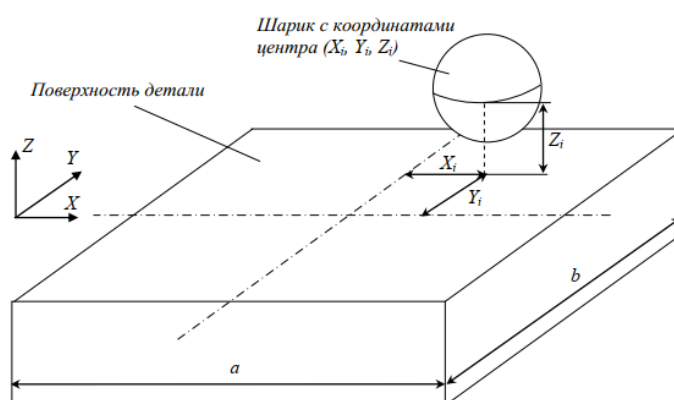


Рисунок 3.6 – Схема назначения координат шарика

Генерация координат производится с помощью функции $X=rand(n)$, в которой формируется массив значений координат для заданного участка. Элементами данного участка являются случайные величины, которые распределяются равномерно в интервале от 0 до 1.

3. Программный модуль *INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY генерирует значения скоростей шарика на основе массива, который содержит

данные в виде списка отсортированных скоростей. При этом в качестве исходных данных используется количественное соотношение дробинok разного диаметра в общей массе дроби.

4. Программный код, необходимый для создания контакта для каждого шарика. В данном случае использован тип контакта *ENTITY, позволяющий математически представлять тела-инденторы элементарных объемных геометрических форм без использования конечно-элементной сетки.

При моделировании процесса обработки дробью в качестве входных данных использовали определённое во 2-й главе распределение отпечатков дроби по фракциям, другими словами – количество отпечатков соответствующего диаметра.

На рисунке 3.7 представлено изображение созданной модели.

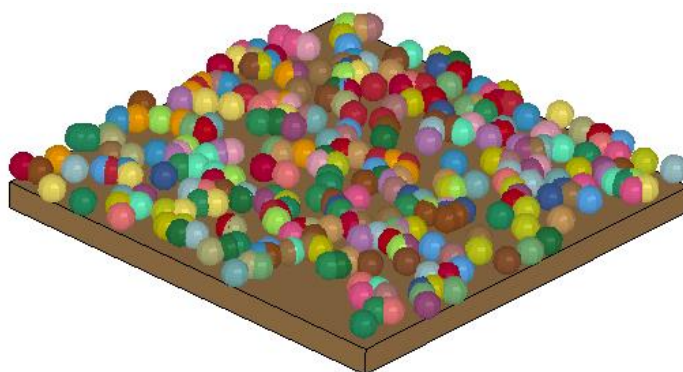
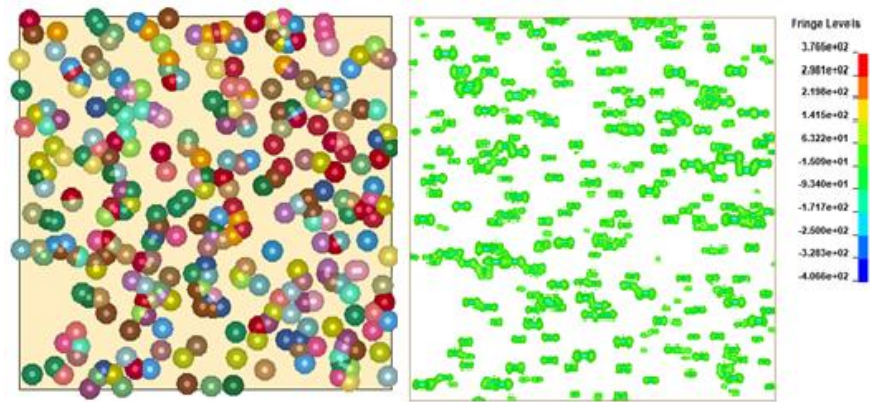


Рисунок 3.7 – Трёхмерное изображение модели процесса внедрения в поверхность образца партии дробинok диаметром 0,6 мм

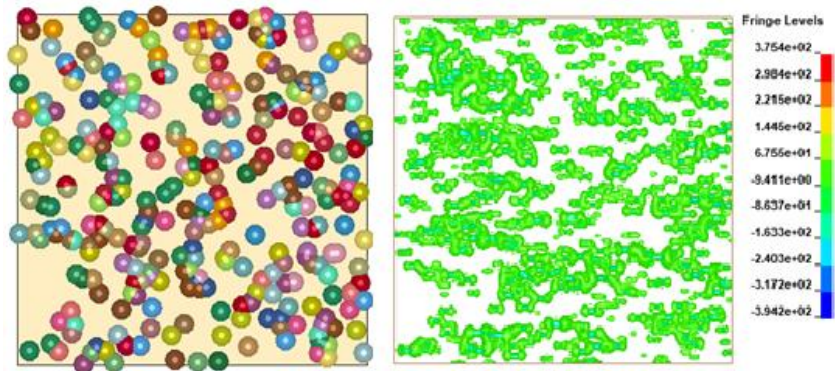
Модель процесса внедрения в поверхность образца, расположенного на полотне имитатора, партии дробинok диаметром 0,6 мм в количестве, соответствующем одному рабочему ходу через камеру установки УДП-2-2,5 была создана в препроцессоре LS DYNA. Режимы обработки составляли:

- частота вращения дробеметного колеса 400 об/мин;
- скорость подачи 1 м/мин;
- положение заслонок 3 (полностью открыты).

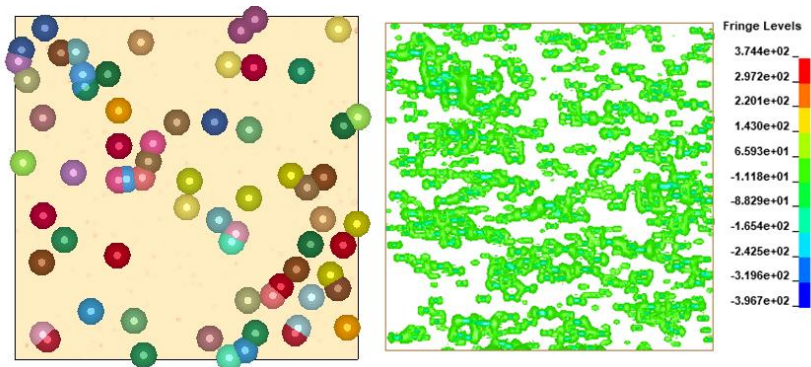
Результаты моделирования процесса внедрения в поверхность образца дробы разных фракций приведены на рисунке 3.8.



а)



б)



в)

Рисунок 3.8. – Виды КЭМ в плане и распределения остаточной деформации при множественном внедрении дробинки диаметром: а) 0,6 мм (304 шт.); б) 0,7 мм (339 шт.); в) 0,8 мм (68 шт.);

На основе результатов, полученных при моделировании последовательного внедрения партий шариков с диаметрами 0,6, 0,7 и 0,8 мм, была построена эпюра нормальных остаточных напряжений в полотно детали. Данная эпюра представлена на рисунке 3.9. Аналогичным способом была построена эпюра остаточных напряжений образца закреплённым на имитаторе «Ребро». Данная эпюра представлена на рисунке 3.10.

Небольшие средние величин остаточных напряжений на представленной эпюре обусловлена низкой степенью покрытия (10,74%) после моделирования процесса обработки на установке УДП-2-2,5 за один рабочий ход.

По линейно-полигональным аппроксимациям полученных распределений остаточных напряжений определялись параметры распределений начальных напряжений (см. рисунки 1.26 и 1.27) и с использованием формул 1.4-1.7 вычислялись внутренние силы и координаты точек их приложения.

Параметры распределения начальных напряжений при внедрении шариков диаметром 0,6-0,8 мм в полотно детали при степени покрытия 10% и результаты расчёта по формулам (1.4) и (1.5) удельной внутренней силы P и координаты точки ее приложения (расстояние от поверхности) z_c представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Расчетные параметры распределения начальных напряжений при внедрении шариков диаметром 0,6-0,8 мм в полотно детали

Параметры	Значения	Параметры	Значения
$h_{\text{упр}}$, мм	0,6	$\sigma_{\text{п}}^{\text{упр}}$, МПа	1,320866
$h_{\text{пл}}$, мм	0,38	$\sigma_{\text{п}}^{\text{н}}$, МПа	-20,37476
$h_{\text{с}}$, мм	0,06	$\sigma_{\text{с}}^{\text{н}}$, МПа	-28,34845
$\sigma_{\text{п}}^0$, МПа	-19,05390	$P_{\text{вд}}$, Н	22,68757
$\sigma_{\text{с}}^0$, МПа	-27,0584	$z_{\text{с}}$, мм	0,039628
σ' , МПа	0,99065		

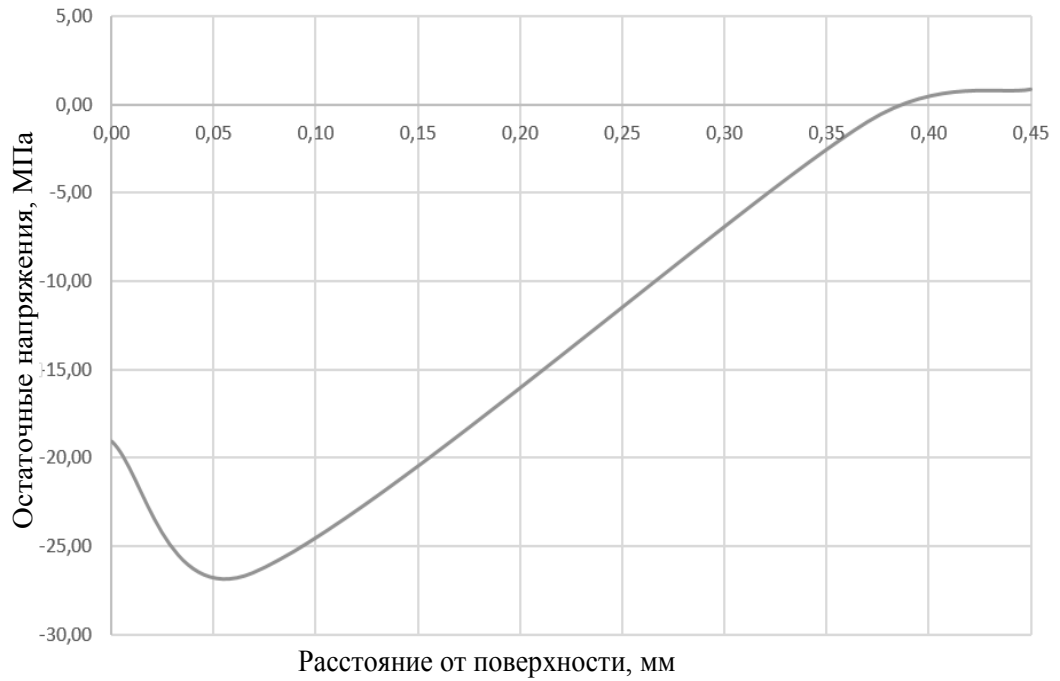


Рисунок 3.9 – Полученное в результате моделирования распределение остаточных напряжений в полоте детали после обработки за один рабочий ход смесью дроби с диапазоном диаметров 0,6-0,8 мм

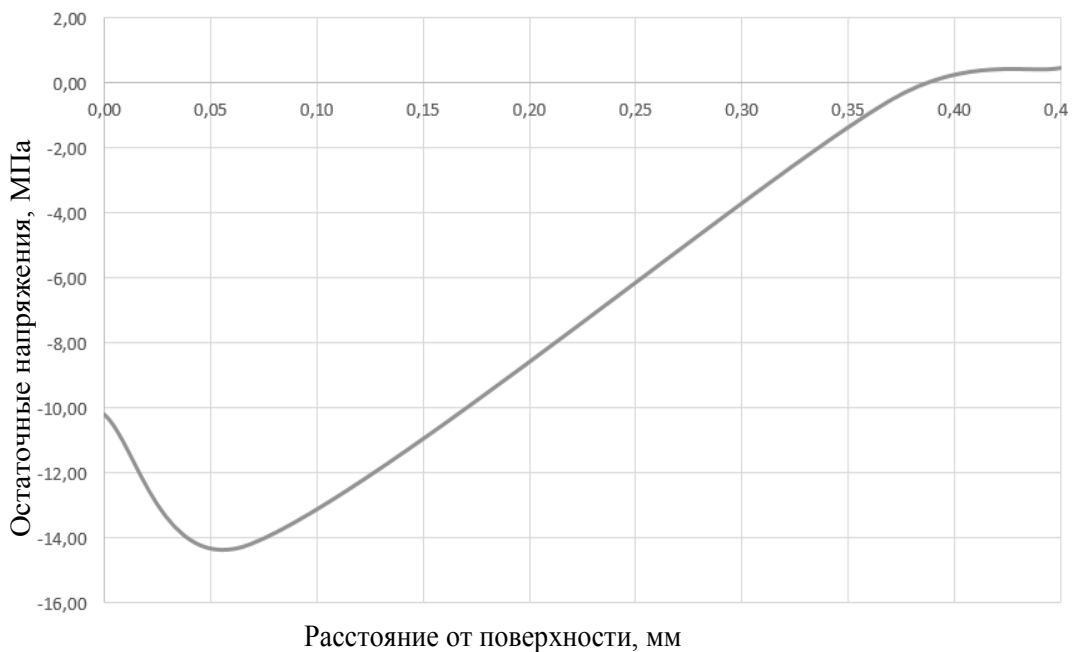


Рисунок 3.10 – Полученное в результате моделирования распределение остаточных напряжений на ребре детали после обработки за один рабочий ход смесью дроби с диапазоном диаметров 0,6-0,8 мм

После моделирования процессов однократного внедрения всех дробинok деформированная сетка конечных элементов импортировалась в новую расчетную модель с сохранением значений компонент напряжений и деформаций и осуществляется внедрение новых партий дробинok с координатами, сгенерированными случайным образом. Расчет повторяется до достижения степени покрытия поверхности отпечатками дробинok, близкой к 100 %. Результаты таких расчетов показаны на рисунке 3.11.

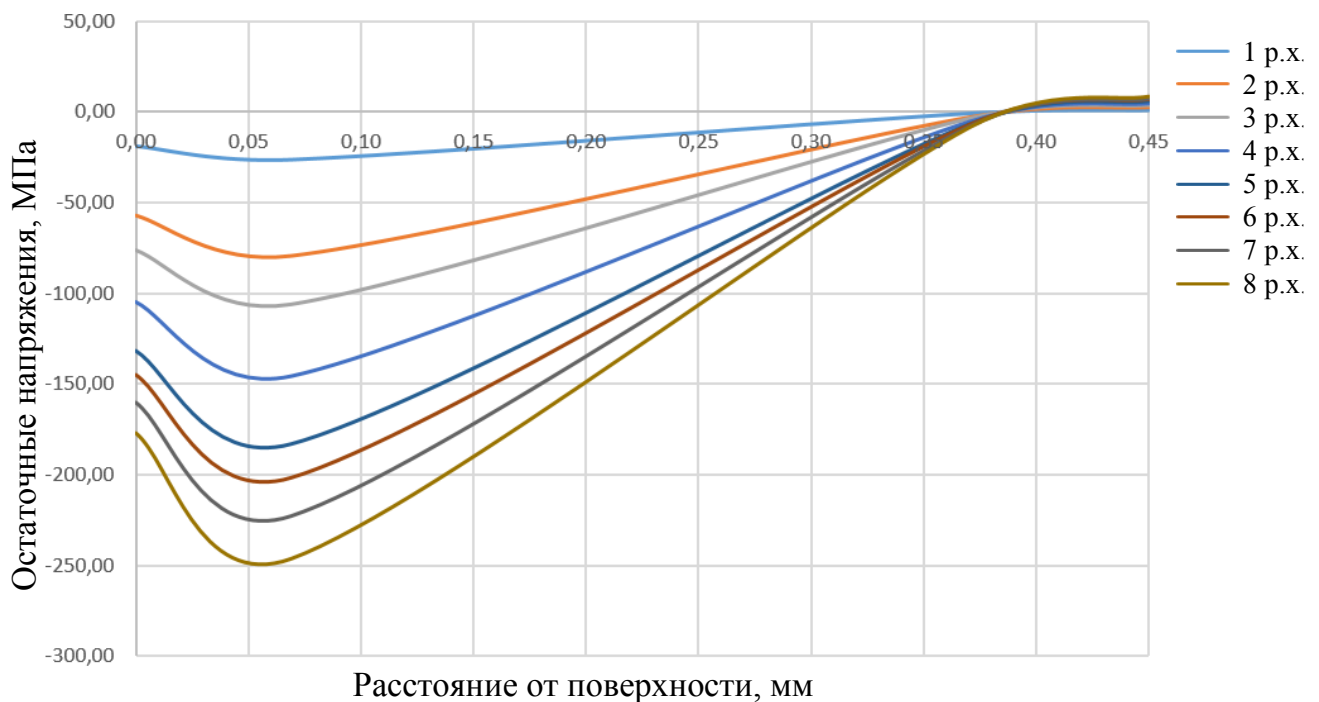


Рисунок 3.11 – Эюры ОН, полученные путём моделирования процесса дробемётного упрочнения с нарастающим временем обработки при увеличении количества рабочих ходов

Сравнение эюр ОН, полученных путём конечно элементного моделирования и экспериментального определения механическим методом (Приложение А), позволяет заключить, что отклонения значений ОН не превышают 15 %.

Расчётные значения удельных растягивающих сил, возникающих в результате дробемётной обработки, в зависимости от расположения образца на имитаторе и определённые на основе полученных моделированием распределений остаточных напряжений приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты расчета: удельные растягивающие силы

Маркировка образца	Положение	Сила P , Н/м
0	Ребро, 0°	660,96
4	Карман, 4	648
12	Карман, 12	803,52
18	Ребро, 18°	596,16
36	Ребро, 36°	518,4
54	Ребро, 54°	421,2
90	Ребро, 90°	395,28
108	Ребро, 108°	330,48
126	Ребро, 126°	324
180	Ребро, 180°	298,08

Сравнение расчётных и экспериментальных данных по определению внутренних удельных растягивающих сил, действующих на конструктивные элементы деталей при дробемётной упрочняющей обработке, показало сходимость в пределах 9 %.

3.4 Моделирование формоизменения образцов-пластин после дробемётного упрочнения

Для подтверждения адекватности определения удельных растягивающих сил, возникающих в процессе дробемётного упрочнения с применением смеси дроби с фракционным составом 0,6-0,8 мм было выполнено нагружение найденными силами КЭМ с размерными параметрами образцов, использованных при исследовании особенностей НДС конструктивных элементов подкреплённых деталей.

КЭМ с размерами 3x30x250 мм состояла из 33 000 элементов. Схема приложения распределенной силы представлена на рисунке 3.12. Результаты моделирования представлены на рисунках 3.13-315.

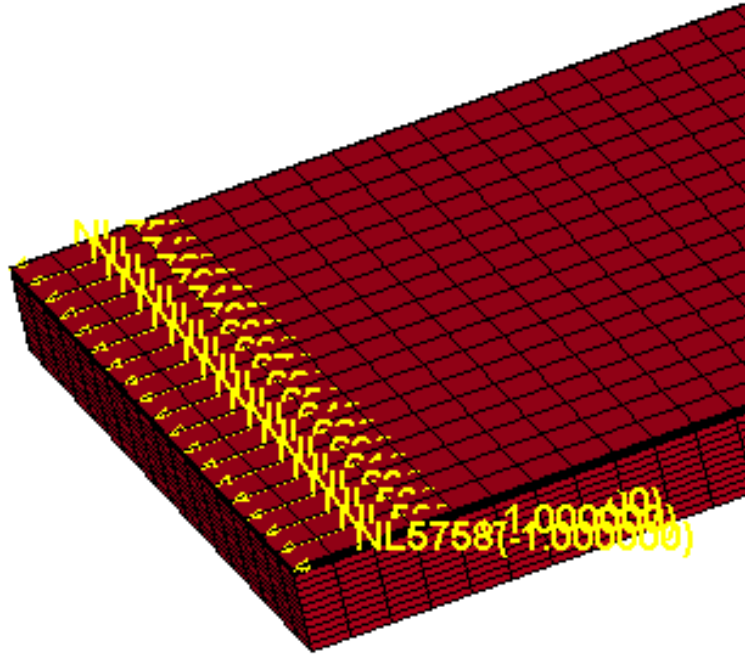


Рисунок 3.12 – Схема приложения распределенной силы при моделировании процесса дробемётного упрочнения

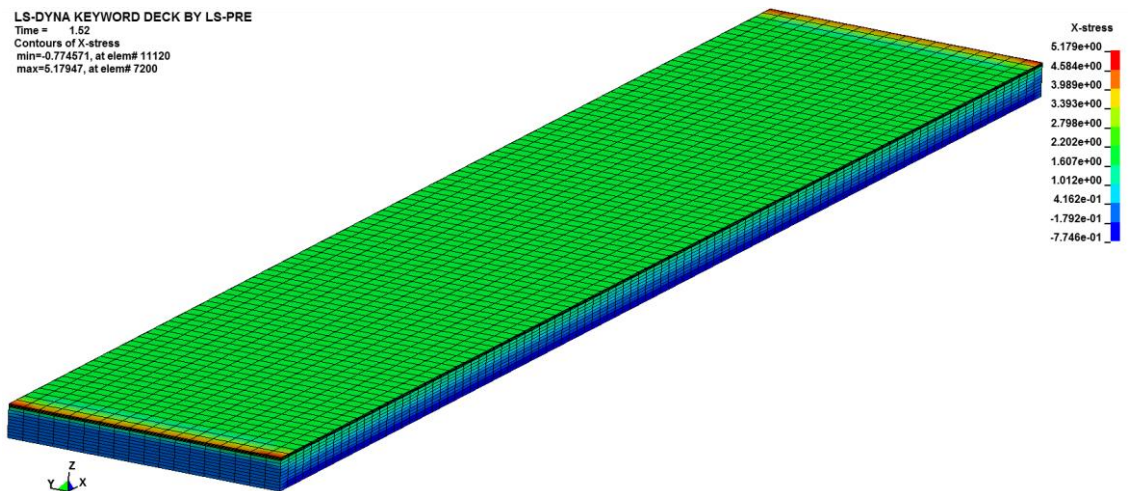


Рисунок 3.13– Компоненты напряжений относительно оси X в результате моделирования образца, МПа

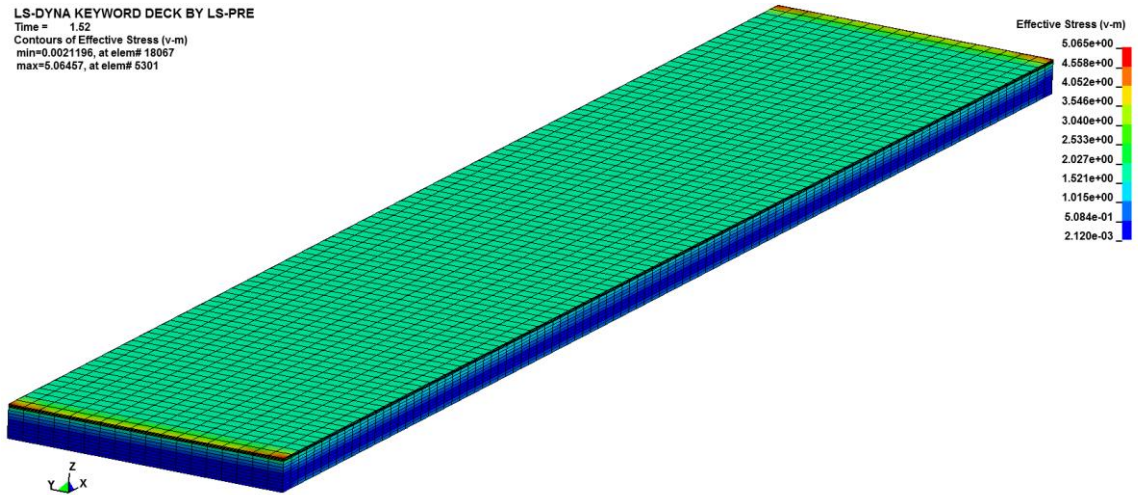


Рисунок 3.14 – Интенсивность напряжений по Мизесу в результате моделирования образца, МПа

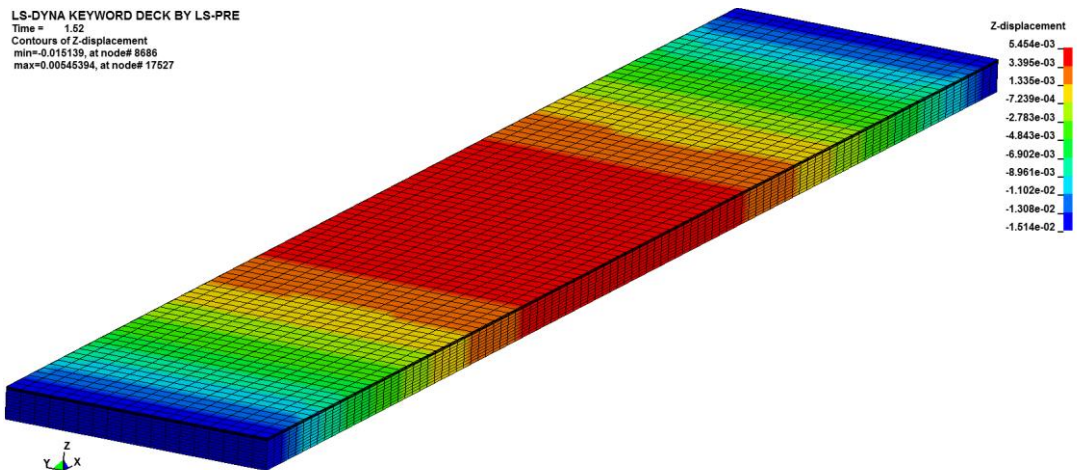


Рисунок 3.15 – Перемещение узлов относительно оси Z в результате моделирования образца, мм

В результате моделирования получено значение стрелы прогиба образца на базе 200 мм, равное 0,16 мм при степени покрытия 10% и 1,46 мм при степени покрытия 100%.

Сходимость результатов моделирования с данными измерений обработанных образцов, приведёнными в таблице 2.2, находится в пределах 10 %.

3.5 Моделирование процесса упрочняющей обработки конструктивно-подобных образцов деталей с целью определения искажения формы

Целью моделирования является определение формоизменения подкреплённых деталей при упрочняющей дробью обработке для дальнейшего назначения режимов и условий превентивного деформирования.

Моделирование целесообразно выполнить путём нагружения КЭМ расчетными внутренними силами, что в отличие от прямого моделирования процесса обработки дробью, позволяет значительно сократить требуемые вычислительные ресурсы и время расчета.

Моделирование процесса дробеметной обработки проводилось на модели КПО детали «Стенка» (см. рисунок 3.16).

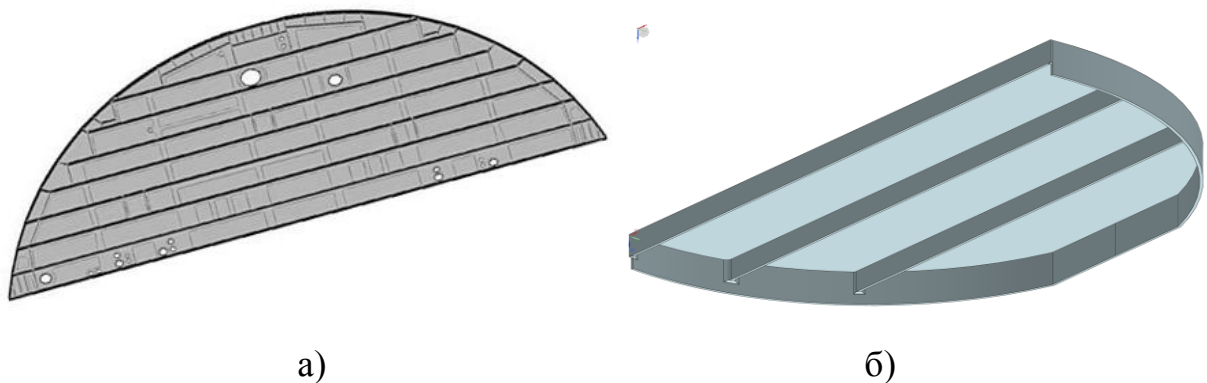


Рисунок 3.16 – Деталь «Стенка» (а); модель конструктивно подобного образца данной детали (б)

При проведении расчетов важной задачей представляется создание адекватной модели детали в конечных элементах (КЭ). КЭ сетка обеспечивает аппроксимацию геометрии изделия и преобразует исходную физическую задачу к дискретной математической модели.

Построение КЭ сетки КПО детали «Стенка» выполнялось в следующей последовательности:

1) Оптимизация геометрии детали путем устранения технологических скруглений и галтелей для обеспечения возможности построения сетки из гексаэдральных элементов. Выбор данного типа элементов обусловлен стремлением к сохранению жесткости детали, построенной в КЭ в совокупности с приемлемым количеством элементов и продолжительностью расчета.

2) Создание сечения, включающего все конструктивные элементы (см. рисунок 3.17).

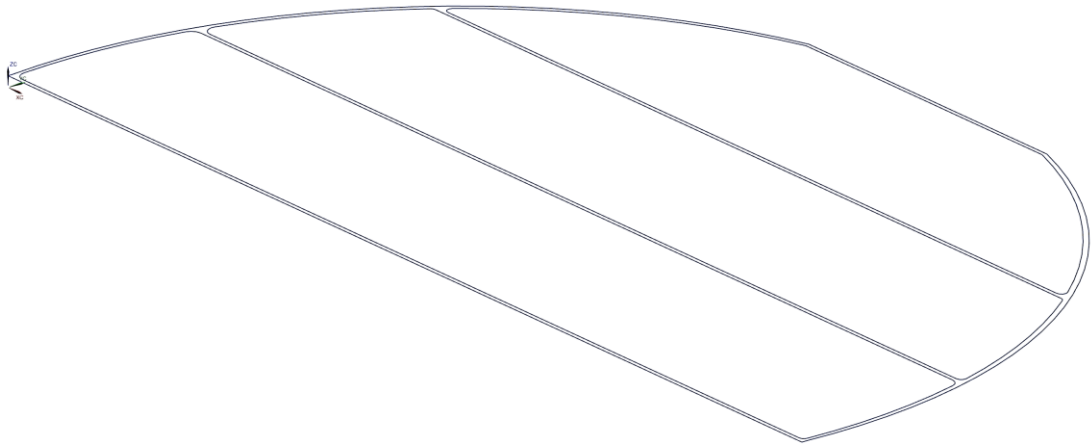


Рисунок 3.17 – Сечение модели КПО детали «Стенка»

3) Разделение полученного сечения на элементарные прямоугольные участки (см. рисунок 3.18).

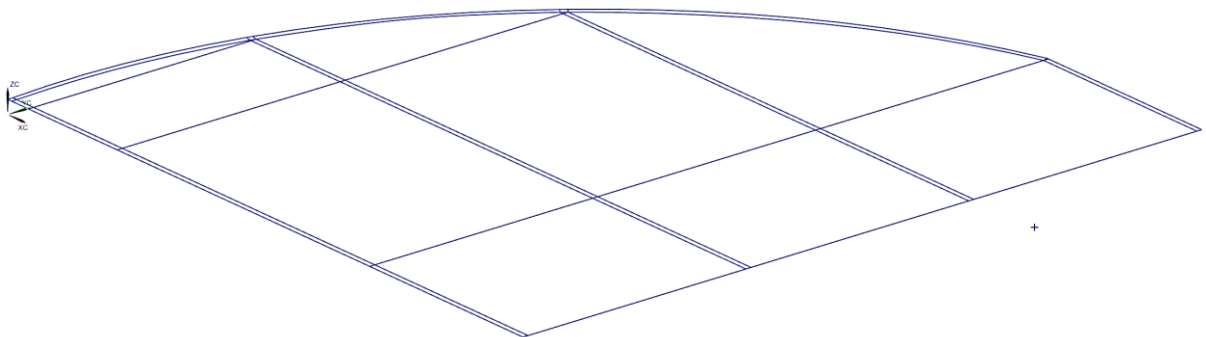


Рисунок 3.18 – Элементарные прямоугольные участки сечения модели КПО детали «Стенка»

4) Создание двумерной сетки четырех-узловых элементов (см. рисунок 3.19).

DYNA keyword deck by LS-PRE
*1
*2
*3

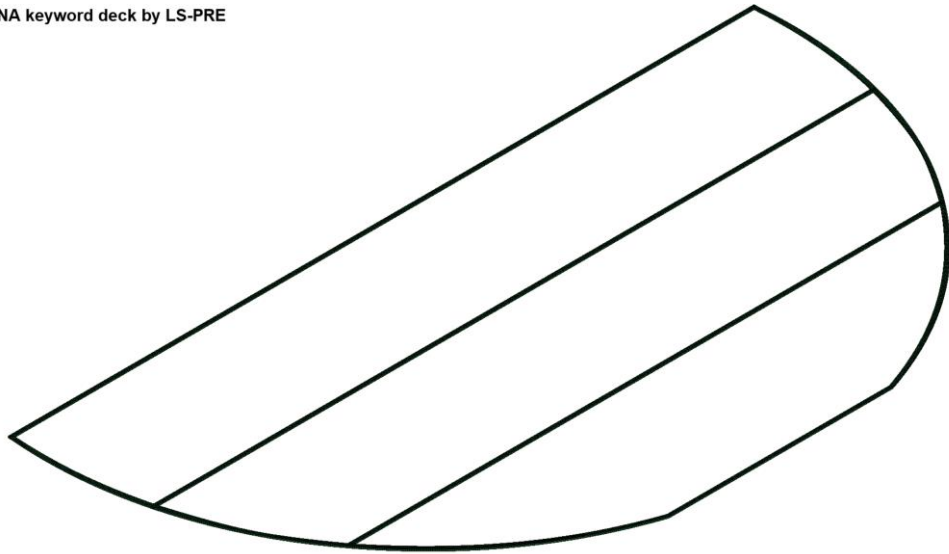


Рисунок 3.19 – Двухмерная сетка четырех-узловых элементов для элементарных прямоугольных участков сечения модели КПО детали «Стенка»

5) Вытягивание двумерной сетки на требуемую величину для создания совокупности гексаэдральных элементов (см. рисунок 3.20).



Рисунок 3.20 – Сетка из гексаэдральных элементов модели КПО детали «Стенка»

б) Разбиение конструктивных элементов на связанную КЭ сетку со следующими размерами:

- 2,0 x 2,0 x 1,0 мм – на ребрах и полотне;
- 1,0 x 1,0 x 1,0 мм – в местах перекрестья (соединения) ребер.

Итоговое количество элементов составило 637128.

7) Расчетные параметры модели использовались аналогично представленным разделе 3.3.

8) Для задания нагрузок использовались определённые в разделе 3.2 распределенные растягивающие силы, соответствующие режимам обработки и приложенные к поверхности детали. Данное допущение принято в связи с тем, что глубина залегания растягивающей силы при дробеударном упрочнении составляет менее 0,1 мм (см. рисунок 3.21).

9) К каждому узлы участка прикладывалась сила с возможностью следящего перемещения в случае если при изгибе детали вектор силы поворачивается и продолжает действовать по нормали к плоскости приложения.

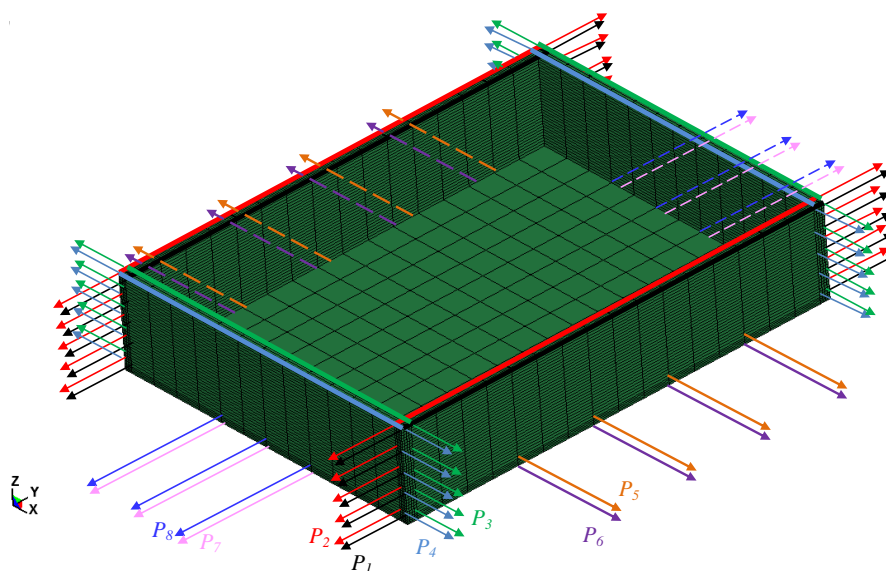


Рисунок 3.21 – Приложение распределенных растягивающих сил к конструктивному элементу детали, где $P_1 - P_8$ – распределенные растягивающие силы

Наращение силы до расчетного значения осуществлялось по линейной зависимости А-А. После завершения нарастания силы на диаграмме нагружения предусмотрен участок постоянно действующей силы (см. рисунок 3.22)

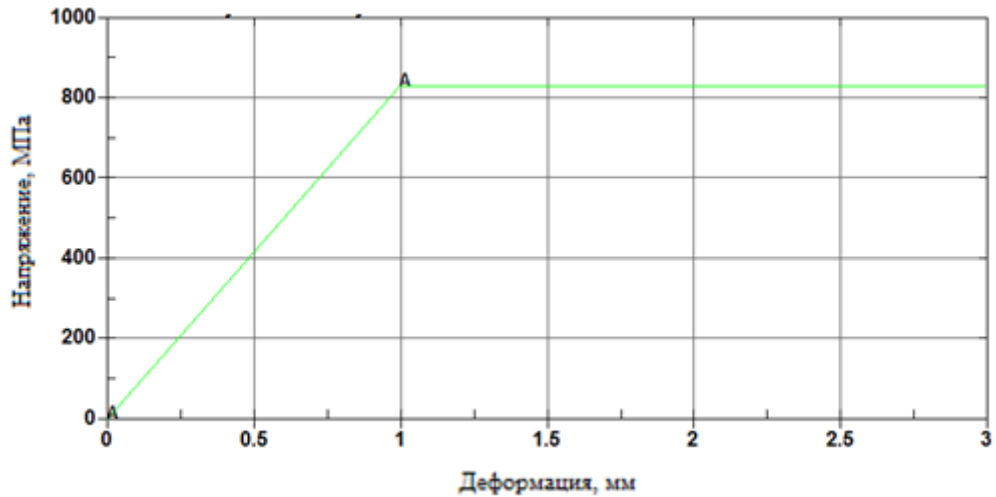


Рисунок 3.22 – Кривая нарастания растягивающей силы

Для учета инерционных сил, и влияния собственного веса заготовки в процессе нагружения, к узлам сетки была приложена сила, эквивалентная силе тяжести путем задания ускорений 9800 мм/с^2 .

В ходе моделирования были получены следующие распределения перемещений узлов сетки детали (см. рисунки 3.23-3.25).

Из распределения перемещений узлов сетки детали относительно оси Z были определены отклонения КПО от плоскостности (см. рисунок 3.26). Значения отклонений были занесены в таблицу 3.6 для использования в ход расчета технологических параметров процесса превентивного деформирования.

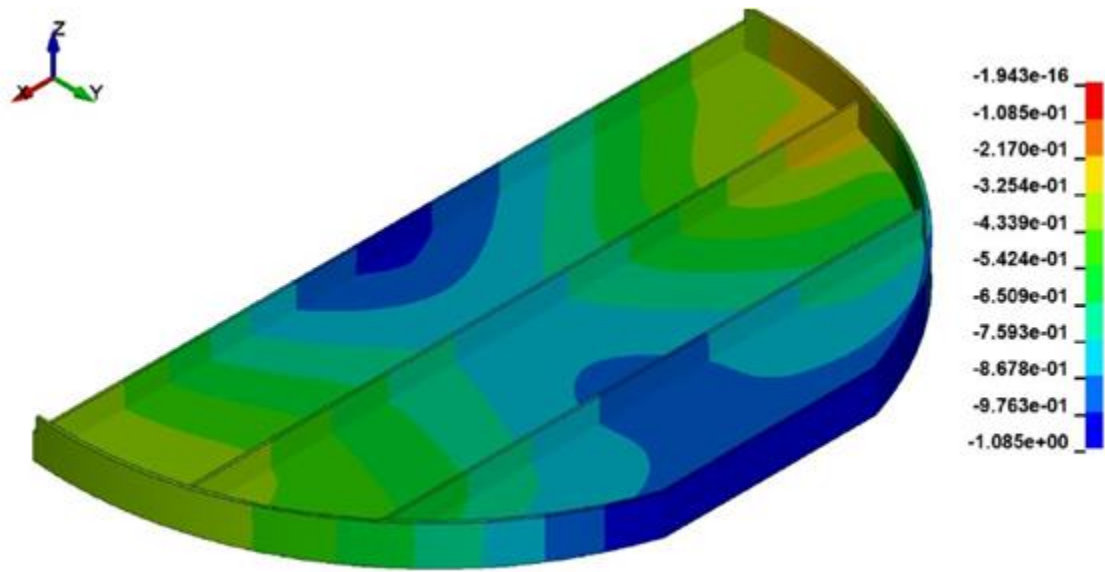


Рисунок 3.23 – Распределения перемещений узлов конечно-элементной сетки деталей относительно оси Z после дробеметной обработки

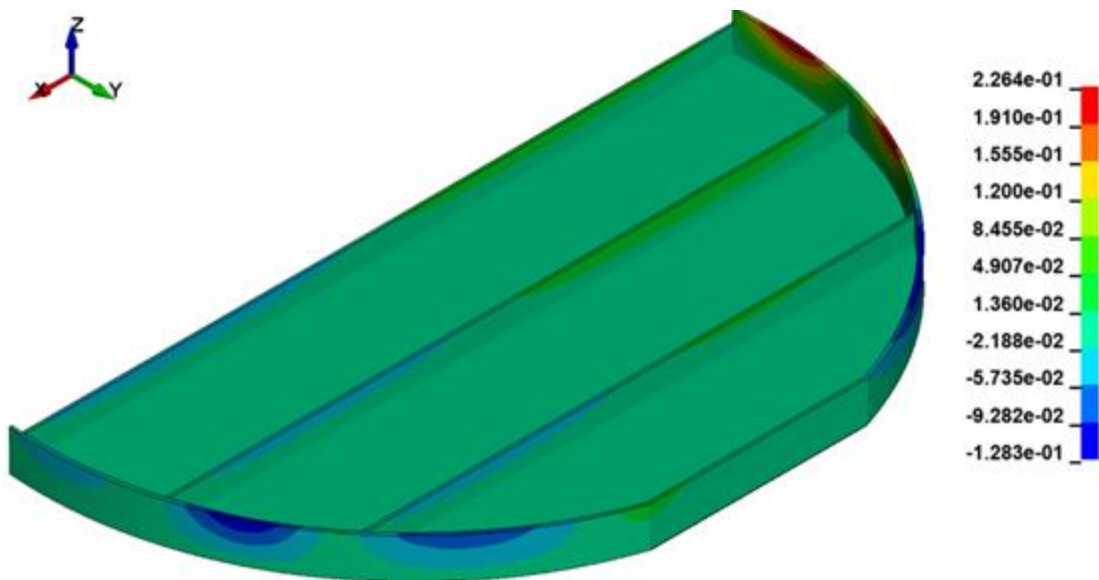


Рисунок 3.24 – Распределения перемещений узлов конечно-элементной сетки деталей относительно оси X после дробеметной обработки

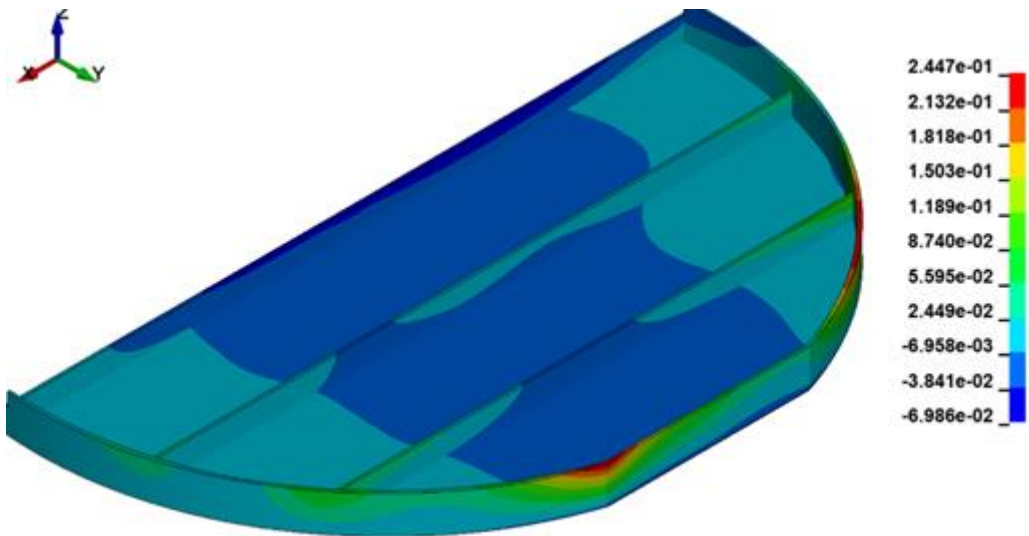


Рисунок 3.25 – Распределения перемещений узлов конечно-элементной сетки деталей относительно оси Y после дробеметной обработки

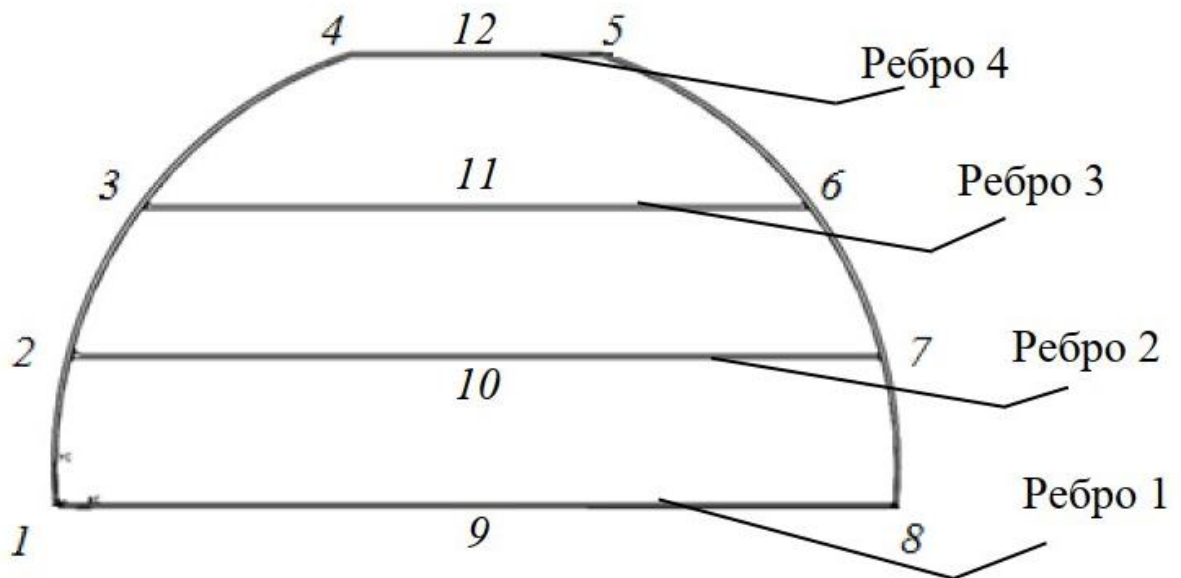


Рисунок 3.26 – Карта измерений детали после моделирования дробеметной обработки

Таблица 3.6 – Результаты отклонений в контрольных точках после моделирования дробеметной обработки

№ контрольной точки	Величина отклонений, Z, мм
1	0,83
2	0,79
3	0,59
4	0,07
5	0,045
6	0,42
7	0,88
8	0,9
9	0,01
10	0,23
11	0,11
12	0

По результатам измерения рассчитали стрелы прогибов для всех сечений по рёбрам КПО

$$f_i = Z_{Ci} - \frac{Z_{K1i} + Z_{K2i}}{2},$$

где f_i – стрела прогиба i -го ребра; Z_{Ci} – отклонение в середине ребра; Z_{Ki} , – отклонение по краям ребра.

Расчётные значения стрел прогибов составили:

$$f_1 = 0,86 \text{ мм}; f_2 = 0,61 \text{ мм}; f_3 = 0,4 \text{ мм}; f_4 = 0,057 \text{ мм}.$$

Выводы по главе 3

1. Разработана и апробирована методика конечно-элементного моделирования процесса дробемётного упрочнения подкреплённых деталей с учетом структуры зоны обработки и фракционного состава рабочей среды.

2. Моделированием процесса единичного внедрения шарика в материал детали получены необходимые для дальнейших расчетов эмпирические зависимости диаметров отпечатков от скорости дробы с диаметрами, применяемыми в рабочей среде оборудования.

3. Разработана методика и выполнено моделирование процесса множественного внедрения дробинки с учетом фракционного состава и распределения скоростей в потоке дробы при упрочняющей дробемётной обработке. Результатом моделирования являются расчетные эпюры остаточных напряжений (ОН) и значения удельных растягивающих сил в конструктивных элементах деталей. Сравнение расчетных и экспериментальных данных (см. разд. 2.2) показало сходимость эпюр ОН с отклонениями в пределах 15%; удельных растягивающих сил – 9 %.

4. Выполнено моделирование формоизменения образцов-пластин, подвергнутых дробемётному упрочнению, в положении, соответствующем расположению типовых конструктивных элементов подкреплённых деталей. Сравнение с результатами эксперимента (см. разд. 2.2) показало сходимость с отклонениями в пределах 10%.

5. Разработана методика и выполнено моделирование процесса упрочняющей обработки конструктивно-подобного образца подкреплённой детали «Стенка» косвенным методом путём нагружения расчетными внутренними силами, что позволяет значительно сократить потребные вычислительные ресурсы и время расчета. Определённые в результате моделирования параметры формоизменения деталей при упрочняющей обработке дробью представляет исходные данные для дальнейшего определения режимов и условий превентивного деформирования.

4 Практическая реализация результатов исследования

4.1. Отработка технологического сочетания «Превентивное деформирование – дробемётное упрочнение»

Опытные работы по отработке технологического сочетания «Превентивное деформирование – дробемётное упрочнение» были выполнены на базе Иркутского авиационного завода. Для проведения работ были изготовлены конструктивно-подобные образцы (КПО) детали «Стенка» из алюминиевого сплава 1933Т2 в количестве 2 шт. (см. рисунок 4.1). Образцы изготавливались фрезерованием на станке с ЧПУ, на основе управляющей программы, разработанной по электронной модели КПО.

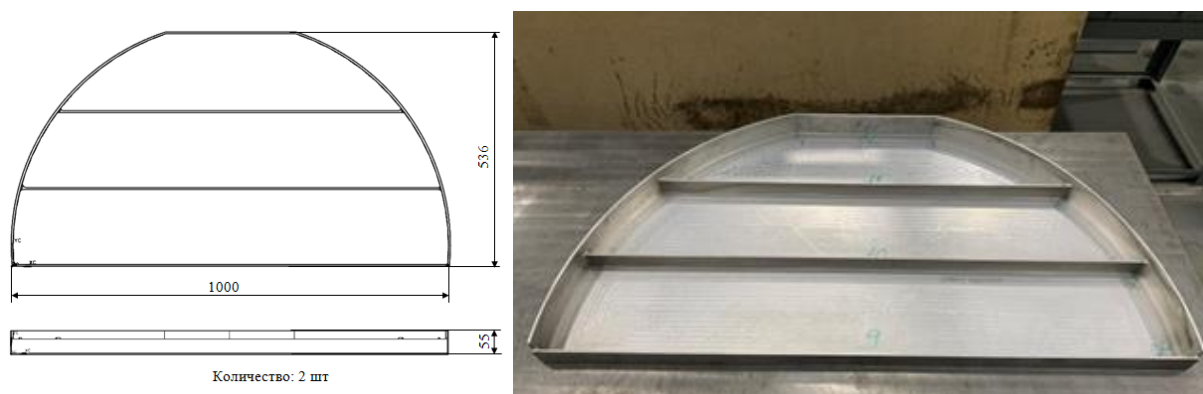


Рисунок 4.1 – Конструктивно-подобный образец детали «Стенка»

После фрезерования был осуществлен контроль отклонений образцов от плоскостности в контрольных точках согласно используемой при моделировании схеме, показанной на рисунке 3.26. Результаты занесены в таблицу 1 приложения Б.

Определялись стрелы прогиба в продольных сечениях ребер 1-4 КПО:

$$\begin{aligned}
 f_1^{\text{исх}} &= \delta_9^{\text{КТ}} - \frac{(\delta_1^{\text{КТ}} + \delta_8^{\text{КТ}})}{2}; \\
 f_2^{\text{исх}} &= \delta_{10}^{\text{КТ}} - \frac{(\delta_2^{\text{КТ}} + \delta_7^{\text{КТ}})}{2}; \\
 f_3^{\text{исх}} &= \delta_{11}^{\text{КТ}} - \frac{(\delta_3^{\text{КТ}} + \delta_6^{\text{КТ}})}{2}; \\
 f_4^{\text{исх}} &= \delta_{12}^{\text{КТ}} - \frac{(\delta_4^{\text{КТ}} + \delta_5^{\text{КТ}})}{2}.
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

где $\delta_1^{\text{КТ}}$ – $\delta_{12}^{\text{КТ}}$ – измеренные значения отклонений от плоскостности в контрольных точках 1-12, соответственно. Результаты представлены в таблице 2 приложения Б.

Далее было выполнено дробебетное упрочнение КПО №1 на программной дробебетной установке УДП-2-2,5 (см. рисунок 4.2) с целью проверки адекватности моделирования, результаты которых приведены в разделе 3.4. Режимы дробебетного упрочнения:

- подача 1000 мм/мин;
- частота вращения дробебетов 400 об/мин;
- заслонки полностью открыты;
- количество рабочих проходов 4.

После упрочнения детали производился контроль отклонений набором щупов в контрольных точках (см. рисунок 4.3). Результаты представлены в таблице 1 приложения Б.



Рисунок 4.2 – Упрочнение образца на установке УДП-2-2,5



Рисунок 4.3 – Измерение отклонений поверхности полотна КПО от
ПЛОСКОСТНОСТИ

Следующим шагом было определение стрел прогибов продольных ребер 1-4. Результаты представлены в таблице 2 приложения Б.

Затем определялись величины стрел прогибов $f^{\text{прог}}$ в продольных сечениях ребер 1-4 КПО №1, возникающих в процессе дробеметного упрочнения:

$$f_i^{\text{прог}} = f_i^{\text{упр}} - f_i^{\text{исх}} \quad (4.2)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ – номер ребра.

Результаты расчета представлены в таблице 2 приложения Б.

Сравнение измеренных значений отклонений от плоскостности с результатами расчетов, выполненных в разделе 3.4, показало сходимость в пределах 18 %.

Превентивное деформирование КПО №2 выполнялось по методике представленной в работе [35, 86].

Для расчета режимов превентивного деформирования вычислялись стрелы прогибов $f^{\text{раск}}$, которые должны быть обеспечены раскаткой роликами с учетом прогнозируемых и исходных отклонений формы КПО

$$f_i^{\text{раск}} = |f_i^{\text{исх}} - f_i^{\text{прог}}|, \quad (4.3)$$

Результаты расчета представлены в таблице 2 приложения Б.

По найденным стрелам прогиба были рассчитаны требуемые эквивалентные растягивающие силы при раскатке роликами ребер 1-4

$$P_i^{\text{раск}} = \frac{8f_i^{\text{раск}} E J_i}{l_i^2 z_i} \cdot 70\%, \quad (4.4)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ – номер ребра; E – модуль упругости 1-го рода (для алюминиевого сплава 1933Т2: $E = 0,74 \cdot 10^{11}$ Па); l – длина ребра ($l_1 = 0,978$ м, $l_2 = 0,947$ м, $l_3 = 0,767$ м, $l_4 = 0,298$ м); z – расстояние от точки приложения растягивающей силы, возникающей при раскатке роликами, до

центра тяжести поперечного сечения ($z_1 = 0,0234$ м, $z_2 = 0,0255$ м, $z_3 = 0,0255$ м, $z_4 = 0,04$ м); J – момент инерции поперечного сечения ($J_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ м⁴, $J_2 = 3,9 \cdot 10^{-8}$ м⁴, $J_3 = 3,9 \cdot 10^{-8}$ м⁴, $J_4 = 1 \cdot 10^{-7}$ м⁴).

При расчёте моментов инерции поперечных сечений раскатываемых участков использовалась схема, показанная на рисунке 4.4. Согласно этой схеме, сечение КПО разбивалось на четыре части, которые содержали соответствующее ребро и прилегающие к нему части полотна между смежными ребрами.

Результаты расчёта представлены в таблице 2 приложения Б.

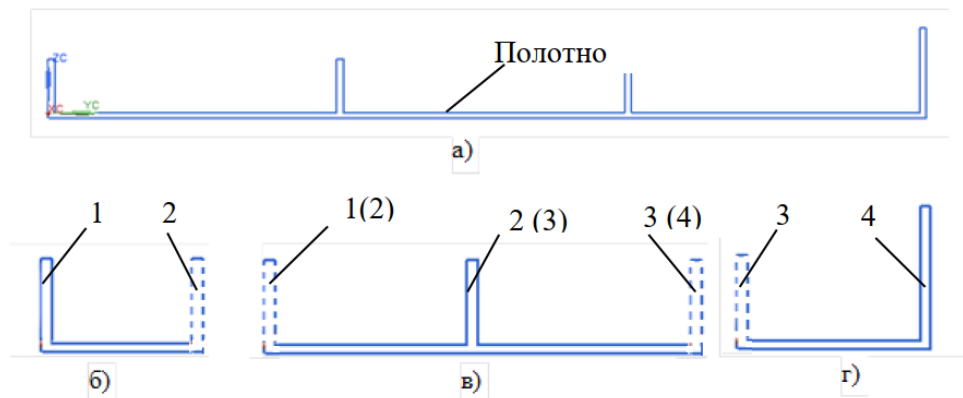


Рисунок 4.4 – Общий вид поперечного сечения КПО (а); расчетное поперечное сечение участка, образованного ребром 1 (б); расчетные поперечные сечения участков, образованных ребрами 2 и 3 (в); расчетное поперечное сечение участка, образованного ребром 4 (г)

Определение потребных моментов затяжки силового болта ручного раскатного устройства при выполнении превентивного деформирования ребер КПО №2, осуществлялось по тарировочному графику, показанному на рисунке 4.5. Определённые потребных моментов затяжки силового болта представлены в таблице 2 приложения Б.

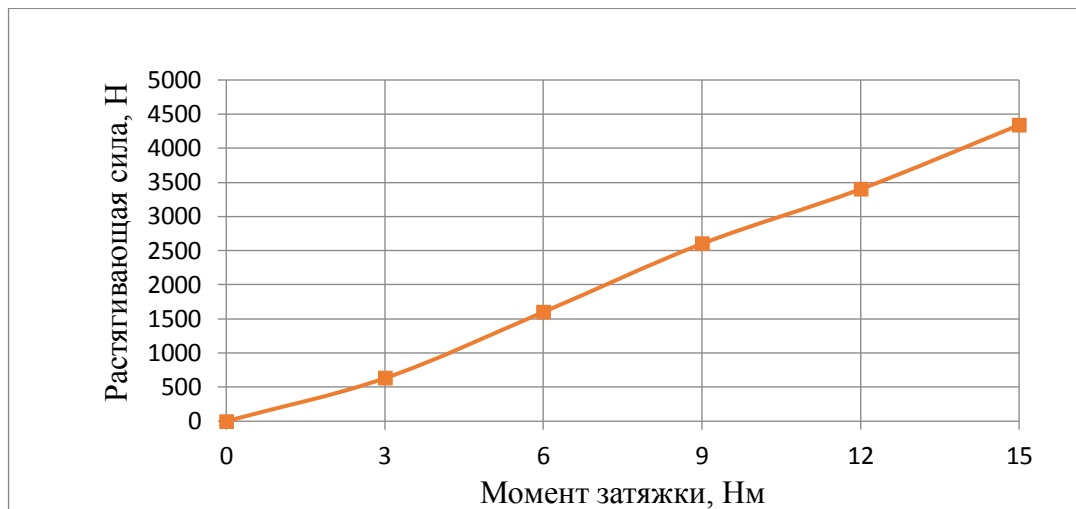


Рисунок 4.5 – Тарировочный график ручного раскатника

Затем было выполнено превентивное деформирование КПО №2 с расчетными режимами (см. рисунок 4.6). Результаты измерения отклонений приведены в таблице 1 приложения Б.

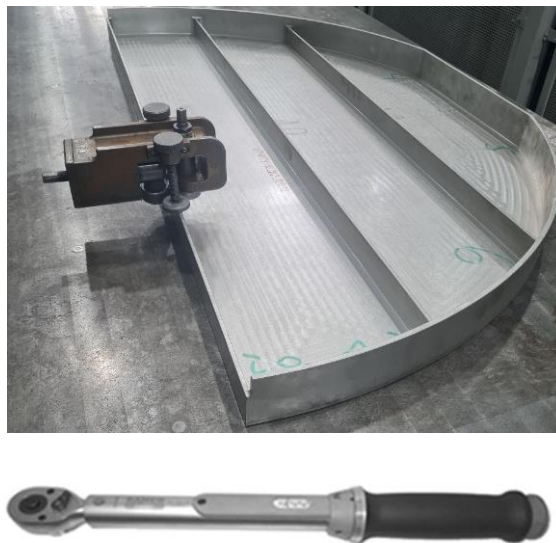


Рисунок 4.6 – Раскатка ребер КПО при помощи ручного раскатника с затяжкой силового болта динамометрическим ключом

После раскатки роликами определялись фактические стрелы прогиба $f_{\text{факт}}$ в продольных сечениях ребер 1-4 КПО №2. Результаты представлены в таблице 2 приложения Б.

Далее производилось упрочнение КПО №2 на установке УДП-2-2,5, на режимах, аналогичных использованным при упрочнении КПО №1.

После упрочнения КПО №2, были измерены отклонения в контрольных точках и определены стрелы прогиба $f_{упр-№2}$, результаты предоставлены в таблице 1 приложения Б.

С целью проверки технологических возможностей процесса правки упрочнённых деталей дробеструйным методом была произведена доводка формы КПО №1 и №2 дробеструйной обработкой в дробеструйной обитаемой камере (ДОК) (см. рисунок 4.7).

Полученные отклонения в контрольных точках и зоны дробеструйной обработки представлены в таблице 1 приложения Б



Рисунок 4.7 – Доводка формы КПО дробеструйной обработкой в ДОК

По результатам экспериментального исследования максимальное отклонение от плоскостности после фрезерования КПО №1 – 2 мм, данное значение после дробеструйного упрочнения возросло до 2,75 мм.

Максимальное отклонение КПО №2 после фрезерования составляло 2,5 мм. После превентивного деформирования и упрочнения отклонение снизилось до 0,9 мм. В процессе доводки дробеструйной обработкой удалось снизить данное отклонение до 0,4 мм, что соответствует допустимому отклонению детали такой конструкции.

Изменение стрел прогибов в продольных сечениях ребер 1-4 КПО №1, 2 при обработке приведены на рисунках 4.8 и 4.9, соответственно.

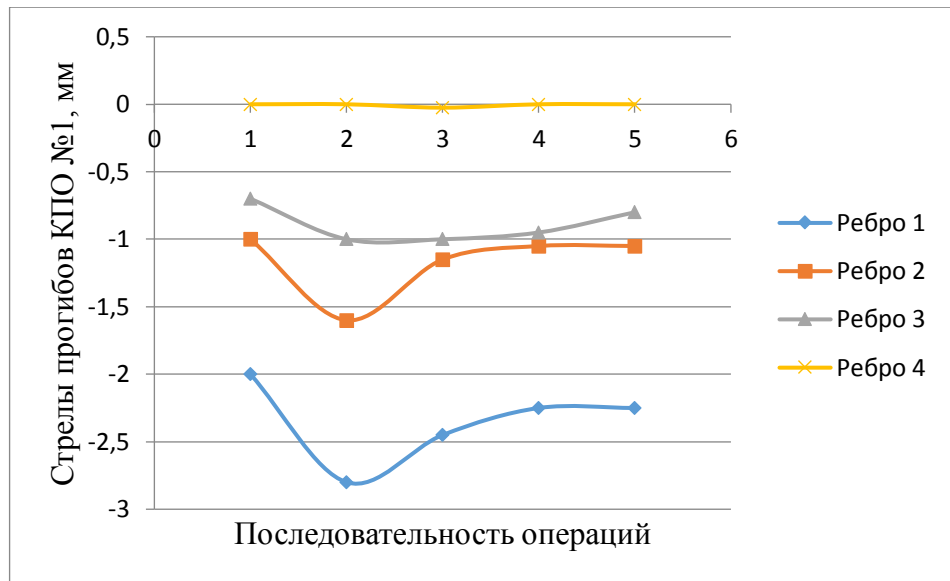


Рисунок 4.8 – Изменение стрел прогибов в продольных сечениях ребер 1-4 КПО №1 при обработке: 1 – фрезерование; 2 – упрочняющая обработка; 3- 5 – дробеструйная обработка (в т. ч. дополнительная)

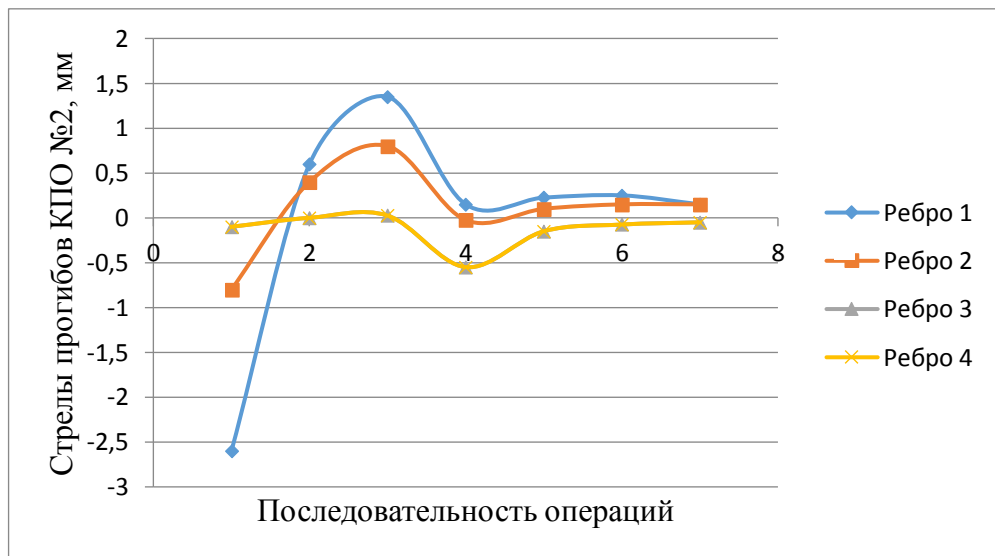


Рисунок 4.9 – Изменение стрел прогибов в продольных сечениях ребер 1-4 КПО №2 при обработке: 1 – фрезерование; 2 – раскатка роликами (превентивное деформирование); 3 – дополнительная раскатка роликами (превентивное деформирование) ребер №1; 4 – упрочняющая обработка; 5, 6, 7 – дробеструйная обработка (в т. ч. дополнительная)

В ходе анализа результатов проведенных работ установлено, что наиболее оптимальной технологией, позволяющей выполнить упрочнение детали типа «Стенка» с обеспечением точности формы в пределах допуска, является последовательность операций: превентивное деформирование раскаткой рёбер роликами → дробеметное упрочнение → доводка формы дробеструйным методом.

Для увеличения производительности превентивное деформирование целесообразно выполнять на этапе правки деталей после механической обработки. Используя на этих операциях раскатку роликами можно определять требуемые для получения суммарной деформации режимы обработки и с высокой точностью производить превентивное деформирование.

Следует отметить, что при определении режимов обработки на операции превентивного деформирования подкреплённых деталей раскаткой рёбер роликами с использованием существующей на сегодняшний день методики не обеспечивает требуемой точности расчетов. Это связано с принятием допущения по использованию при расчете растягивающих сил, эквивалентных по деформирующему воздействию процессу раскатки роликами.

В настоящее время ИРНТУ выполняются исследования по разработке методик конечно-элементного моделирования процесса раскатки роликами подкреплённых деталей, что повысит точность технологических расчетов.

Проведение представленных исследований показало, что для гарантированного достижения точности формы подкреплённых деталей при правке дробеструйной обработкой после упрочнения, необходимо закладывать величину «недогиба» деталей в 10-15 % при превентивном деформировании раскаткой рёбер роликами.

4.3 Исследование влияния режимов и условий процесса раскатки рёбер на усталостную долговечность материала деталей, подвергаемых дробемётному упрочнению

Целью исследования является определение усталостной долговечности на образцах подкрепленных деталей, изготавливаемых в последовательности фрезерование – превентивное деформирование раскатка рёбер роликами – упрочняющая дробемётная обработка.

Экспериментальные исследования образцов проводились на универсальной сервогидравлической испытательной машине ENF-EV101K2-04N-1E (Япония) для статических и циклических испытаний материалов (см. рис 4.10).

Рабочими органами испытательной машины являются две опоры: верхняя и нижняя. Нагружение создает нижняя опора, перемещаясь вверх или вниз в зависимости от знака нагрузки. Верхняя опора фиксируется вначале и остается неподвижной до конца испытания. Опоры оснащены гидравлическими захватами E100 wedge type, в которые устанавливается специальная оснастка, а управляющим устройством является система управления испытаниями 4830. Технические характеристики испытательной машины ENF-EV101K2-04N-1E приведены в таблице 4.1.



Рисунок 4.10 – Универсальная сервогидравлическая испытательная машина
ENF-EV101K2-04N-1E

Таблица 4.1 – Технические характеристики испытательной машины
ENF-EV101K2-04N-1E

Характеристики	Ед. изм.	Значение
Максимальная нагрузка при проведении испытаний в динамическом режиме	кН	± 100
Максимальная нагрузка при проведении испытаний в статическом режиме	кН	± 120
Точность	%	$\pm 0,5$

Образцы для проведения исследований (см. рисунок 4.11) были изготовлены фрезерованием из алюминиевых сплавов 1933Т2 и 1163Т

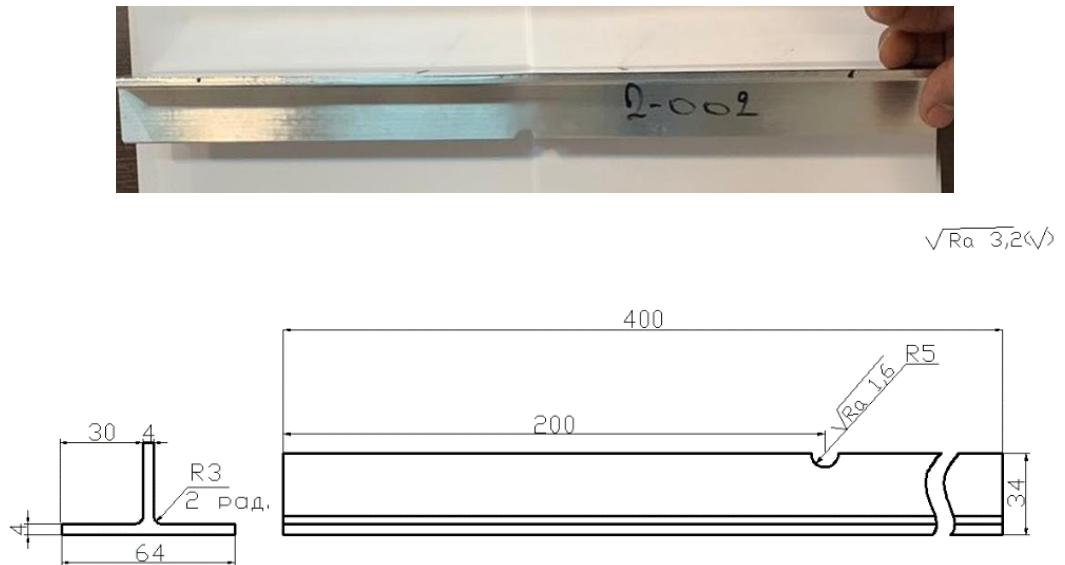


Рисунок 4.11 – Образец для проведения испытаний

Образцы изготавливались:

- из плиты 1163Т 50x1200x3000 ТУ 1-92-161-90 фрезерованием на станке Gantry cs 650/200 Т-5;
- из профиля 1933Т2 ПФ 286-16 (50x150x3500) ТУ 1814-632-07510017-2009 фрезерованием на станке DMF 500.

На нижней поверхности у обоих краев образца наносилась маркировка несмываемой тушью:

M.NNN,

где М – материал образца (1-1163Т; 2-1933Т2), NNN – порядковый номер образца.

Обработка дробью производилась на установке дробеметной программной УДП-2-2,5.

В качестве рабочей среды процесса дробемётной упрочняющей обработки используется дробь стальная литая ГОСТ 11964-81; AMS 2431. Диаметр дроби 0,6...0,8 мм.

Правка после механической обработки и превентивное деформирование осуществлялись с помощью ручного раскатника в комплекте с динамометрическим ключом ВАНСО No.7421-20 2-20Nm (см. рисунок 4.6). Схема обработки образцов раскаткой роликами приведена на рисунке 4.12.

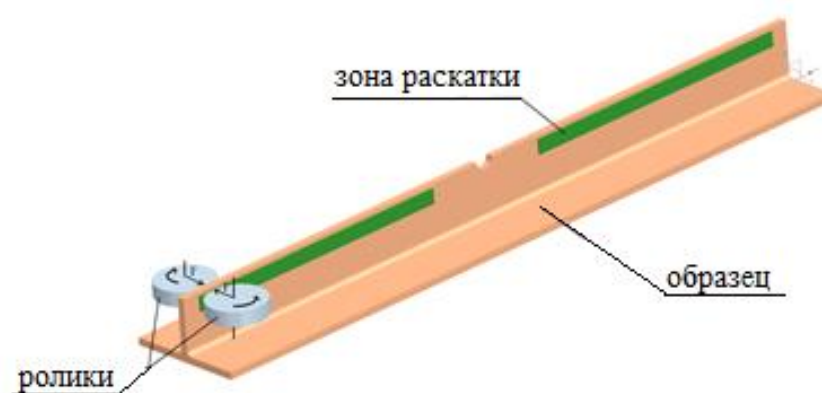


Рисунок 4.12 – Схема обработки образцов раскаткой роликами

Для каждого материала образцы были разделялись на группы из 15 образцов. Образцы группы 1 не подвергались дальнейшей обработке после фрезерования. Образцы из второй группы были упрочнены дробеметным способом согласно технологическому процессу изготовления детали «Стенка». Образцы группы №№3-7 были подвергнуты превентивному деформированию раскаткой роликами, после чего также были упрочнены дробеметным способом согласно технологическому процессу изготовления детали «Стенка», режимы обработки представлены в таблице 4.2. Образцы группы №№2-7 после фрезерования при необходимости подвергались правке раскаткой роликами для устранения отклонений от плоскостности.

Таблица 4.2 – Параметры обработки типовых образцов для проведения исследований на усталостную долговечность

№ группы образцов	Вид обработки	Режимы обработки	Номер образца 1933Т2 (1163Т)
1	Фрезерование	Согласно типовому ТП мех. обработки	1.001-1.015 (2.001-2.015)
2	Фрезерование + раскатка роликами + дробемётное упрочнение	<u>Фрезерование:</u> согласно типовому ТП механической обработки <u>Раскатка роликами (правка):</u> согласно типовому ТП правки <u>Дробеметное упрочнение:</u> подача – 1 м/мин; положение заслонок дозаторов – 3 (полностью открыты); количество двойных рабочих ходов – 2; частота вращения ДА – 400 мин ⁻¹	1.016-1.030 (2.016-2.030)
3	Фрезерование + правка раскаткой роликами + превентивное деформирование раскаткой роликами + дробемётное упрочнение	<u>Фрезерование:</u> согласно типовому ТП механической обработки <u>Раскатка роликами:</u> согласно типовому ТП правки <u>Раскатка роликами (превентивное деформирование):</u> Момент затяжки силового болта раскатника – 3 Нм <u>Дробеметное упрочнение:</u> подача – 1 м/мин; положение заслонок дозаторов – 3 количество двойных рабочих ходов – 2; частота вращения ДА – 400 мин ⁻¹	1.031-1.045 (1.031-1.045)

№ группы образцов	Вид обработки	Режимы обработки	Номер образца 1933Т2 (1163Т)
4	Фрезерование + правка раскаткой роликами + превентивное деформирование раскаткой роликами + дробемётное упрочнение	<u>Фрезерование:</u> согласно типовому ТП механической обработки <u>Раскатка роликами (правка):</u> согласно типовому ТП правки <u>Раскатка роликами (превентивное деформирование):</u> Момент затяжки силового болта раскатника – 6 Нм <u>Дробеметное упрочнение:</u> подача – 1 м/мин; положение заслонок дозаторов – 3 (полностью открыты); количество двойных рабочих ходов – 2; частота вращения ДА – 400 мин ⁻¹	1.046-1.060 (2.046-2.060)
5	Фрезерование + правка раскаткой роликами + превентивное деформирование раскаткой роликами + дробемётное упрочнение	<u>Фрезерование:</u> согласно типовому ТП механической обработки <u>Раскатка роликами(правка):</u> согласно типовому ТП правки <u>Раскатка роликами (превентивное деформирование):</u> Момент затяжки силового болта раскатника – 10 Нм <u>Дробеметное упрочнение:</u> подача – 1 м/мин; положение заслонок дозаторов – 3 ; количество двойных рабочих ходов – 2; частота вращения ДА – 400 мин ⁻¹	1.061-1.075 (2.061-2.075)

№ группы образцов	Вид обработки	Режимы обработки	Номер образца 1933Т2 (1163Т)
6	Фрезерование + правка раскаткой роликами + превентивное деформирование раскаткой роликами + дробемётное упрочнение	<u>Фрезерование:</u> согласно типовому ТП мех. обработки <u>Раскатка роликами(правка):</u> согласно типовому ТП правки <u>Раскатка роликами (превентивное деформирование):</u> Момент затяжки силового болта раскатника – 15 Нм <u>Дробеметное упрочнение:</u> подача – 1 м/мин; положение заслонок дозаторов – 3 (полностью открыты); количество двойных рабочих ходов – 2; частота вращения ДА – 400 мин ⁻¹	1.076-1.090 (2.076-2.090)
7	Фрезерование + правка раскаткой роликами + превентивное деформирование раскаткой роликами + дробемётное упрочнение	<u>Фрезерование:</u> согласно типовому ТП механической обработки <u>Раскатка роликами(правка):</u> согласно типовому ТП правки <u>Раскатка роликами (превентивное деформирование):</u> Момент затяжки силового болта раскатника – 19 Нм <u>Дробеметное упрочнение:</u> подача – 1 м/мин; положение заслонок дозаторов – 3 (полностью открыты); количество двойных рабочих ходов – 2; частота вращения ДА – 400 мин ⁻¹	1.091-1.105 (1.091-1.105)

Определение циклической долговечности образцов осуществлялось при нагружении по схеме четырехточечного изгиба, показанной на рисунке 4.5. Для данных испытаний была разработана и изготовлена специальная оснастка (см. рисунок 4.13), включающая две базовые детали – пуансон 1 и опору 2.

Назначение пуансона – нагружение образца при испытаниях. Пуансон выполнен из стали из 30ХГСА.

В качестве нажимных элементов, воздействующих на образец, использованы ролики из материала 30ХГСА.

Нижняя опора представляет собой основание для базирования образца, с отверстиями, выполненными с целью облегчения конструкции.

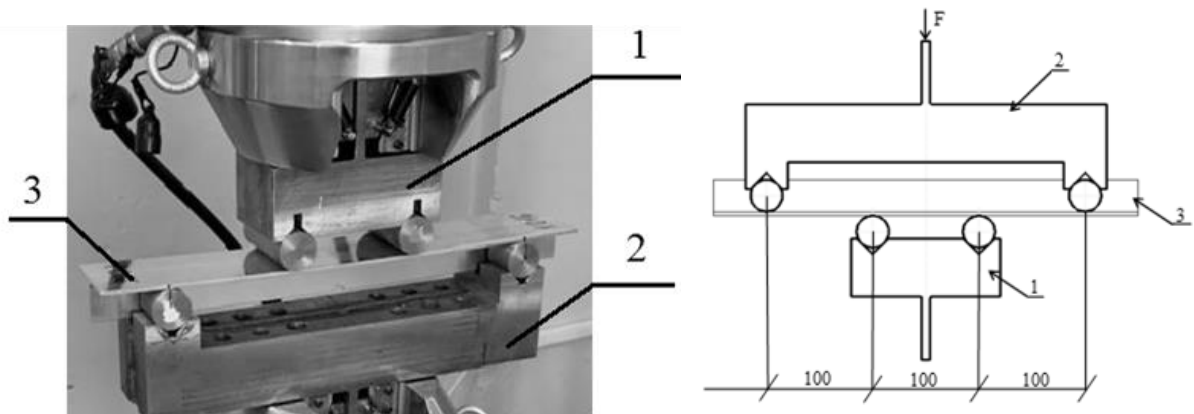


Рисунок 4.13 – Схема нагружения типовых образцов в оснастке: 1 – пуансон; 2 – опора; 3 – образец

Испытания заключались в проведении нагружения каждого из образцов асимметричным циклом с коэффициентом асимметрии цикла $R_\sigma = 0,1$ до разрушения образца. Для каждой группы образцов испытания проводились с тремя значениями максимальной силы нагружения в цикле (4 кН; 5 кН; 6 кН) по 5 образцов из группы на одном значении силы.

Результаты испытания приведены в сводной таблице приложения В. При анализе результатов испытаний значение количества циклов нагружения до разрушения образца усреднялось по результатам испытаний на 5 образцах, если разброс значений количества циклов до разрушения превышал 15%, то данный результат при подсчете среднего значения не учитывался.

Результаты, полученные после испытания образцов из 1933Т2

Среднее количество циклов до разрушения образцов при нагружении:

При максимальной силе цикла нагружения **4 кН**

- образцы 1 группы	70 240;
- образцы 2 группы	81 066;
- образцы 3 группы	88 111;
- образцы 4 группы	99 399;
- образцы 5 группы	102 199;
- образцы 6 группы	112 466;
- образцы 7 группы	98 486.

При максимальной силе цикла нагружения **5 кН**

- образцы 1 группы	31 538;
- образцы 2 группы	37 629;
- образцы 3 группы	48 587;
- образцы 4 группы	47 866;
- образцы 5 группы	49 016;
- образцы 6 группы	54 658;

- образцы 7 группы 48 503.

При максимальной силе цикла нагружения **6 кН**

- образцы 1 группы 19 815;

- образцы 2 группы 23 961;

- образцы 3 группы 23 562;

- образцы 4 группы 26 759;

- образцы 5 группы 27 326;

- образцы 6 группы 25 167;

- образцы 7 группы 33 757.

Среднее значение отношения количества циклов до разрушения образцов, подвергнутых дробеметному упрочнению и неупрочненных образцов.

При максимальной силе цикла нагружения **4 кН**

- образцы 2 группы 1,15;

- образцы 3 группы 1,25;

- образцы 4 группы 1,42;

- образцы 5 группы 1,45;

- образцы 6 группы 1,60;

- образцы 7 группы 1,40.

При максимальной силе цикла нагружения **5 кН**

- образцы 2 группы 1,19;

- образцы 3 группы 1,54;

- образцы 4 группы 1,52;
- образцы 5 группы 1,55;
- образцы 6 группы 1,73;
- образцы 7 группы 1,54.

При максимальной силе цикла нагружения **6 кН**

- образцы 2 группы 1,21;
- образцы 3 группы 1,19;
- образцы 4 группы 1,35;
- образцы 5 группы 1,38;
- образцы 6 группы 1,27;
- образцы 7 группы 1,70.

Результаты, полученные после испытания образцов из 1163

Среднее количество циклов до разрушения образцов при нагружении:

При максимальной силе цикла нагружения **4 кН**

- образцы 1 группы 53 637;
- образцы 2 группы 103 727;
- образцы 3 группы 92 070;
- образцы 4 группы 65 168;
- образцы 5 группы 91 054;
- образцы 6 группы 68 431;
- образцы 7 группы 72 544.

При максимальной силе цикла нагружения **5 кН**

- образцы 1 группы	23 393;
- образцы 2 группы	38 193;
- образцы 3 группы	33 011 ;
- образцы 4 группы	30 776;
- образцы 5 группы	34 640;
- образцы 6 группы	31 100;
- образцы 7 группы	30 293.

При максимальной силе цикла нагружения **6 кН**

- образцы 1 группы	15 703;
- образцы 2 группы	17 300;
- образцы 3 группы	16 961;
- образцы 4 группы	17 818;
- образцы 5 группы	16 616;
- образцы 6 группы	16 037;
- образцы 7 группы	16 636.

Среднее значение отношения количества циклов до разрушения образцов, подвергнутых дробеметному упрочнению и неупрочненных образцов.

При максимальной силе цикла нагружения **4 кН**

- образцы 2 группы	1,93;
- образцы 3 группы	1,72;
- образцы 4 группы	1,21;

- образцы 5 группы 1,70;
- образцы 6 группы 1,28;
- образцы 7 группы 1,35.

При максимальной силе цикла нагружения **5 кН**

- образцы 2 группы 1,63;
- образцы 3 группы 1,41;
- образцы 4 группы 1,32;
- образцы 5 группы 1,48;
- образцы 6 группы 1,33;
- образцы 7 группы 1,29.

При максимальной силе цикла нагружения **6 кН**

- образцы 2 группы 1,10;
- образцы 3 группы 1,08;
- образцы 4 группы 1,13;
- образцы 5 группы 1,06;
- образцы 6 группы 1,02;
- образцы 7 группы 1,06.

По результатам исследований образцов на циклическую долговечность были построены графики (см. рисунки 4.14-4.15) зависимости количества циклов нагружения до разрушения образца, а также диаграммы средних значений отношения количества циклов до разрушения образцов, подвергнутых дробеметному упрочнению и неупрочненных образцов (см. рисунки 4.16-4.17).

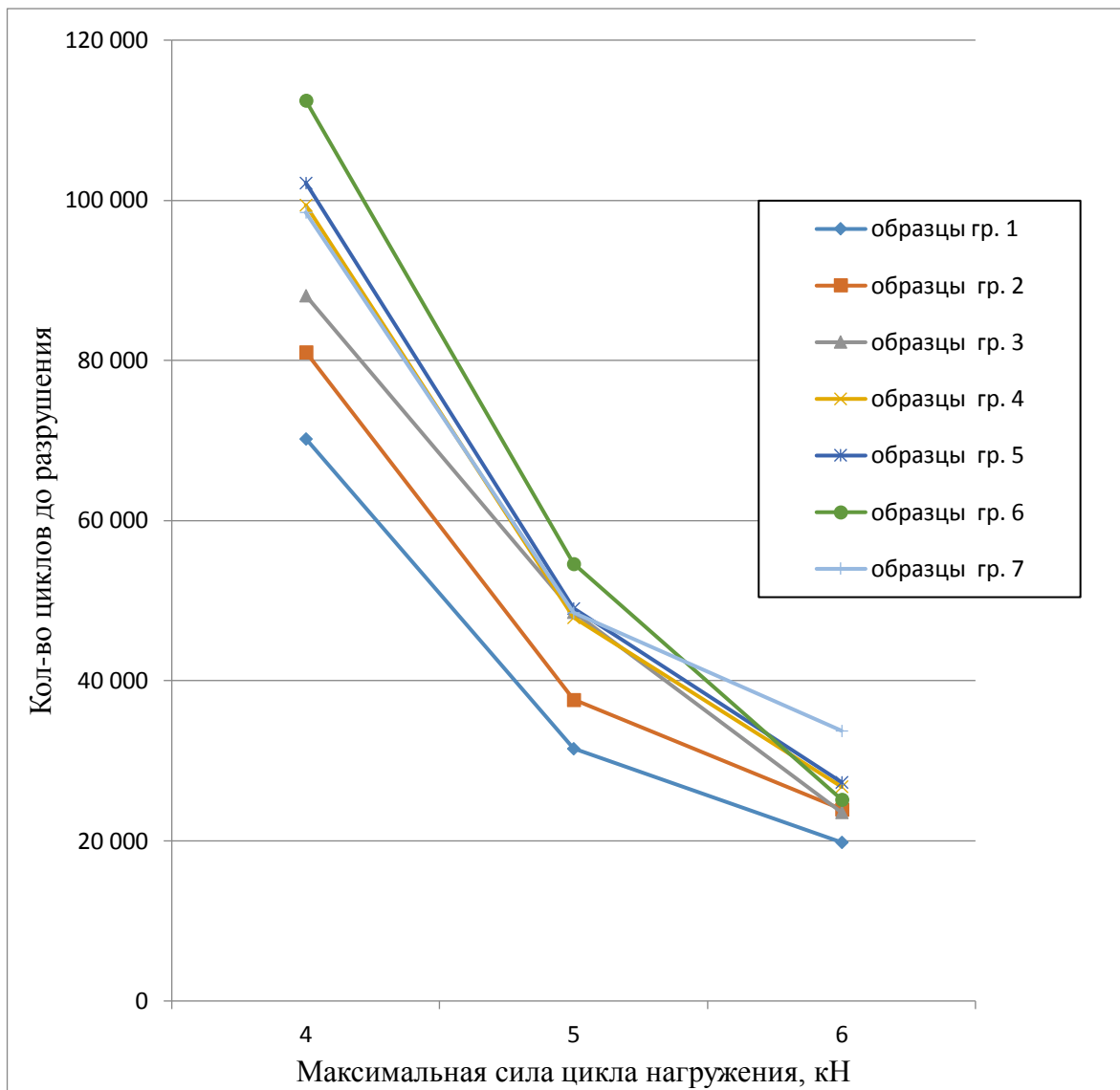


Рисунок 4.14 – Зависимость средних значений количества циклов нагружения до разрушения образцов из материала 1933Т2 от максимальной силы цикла нагружения

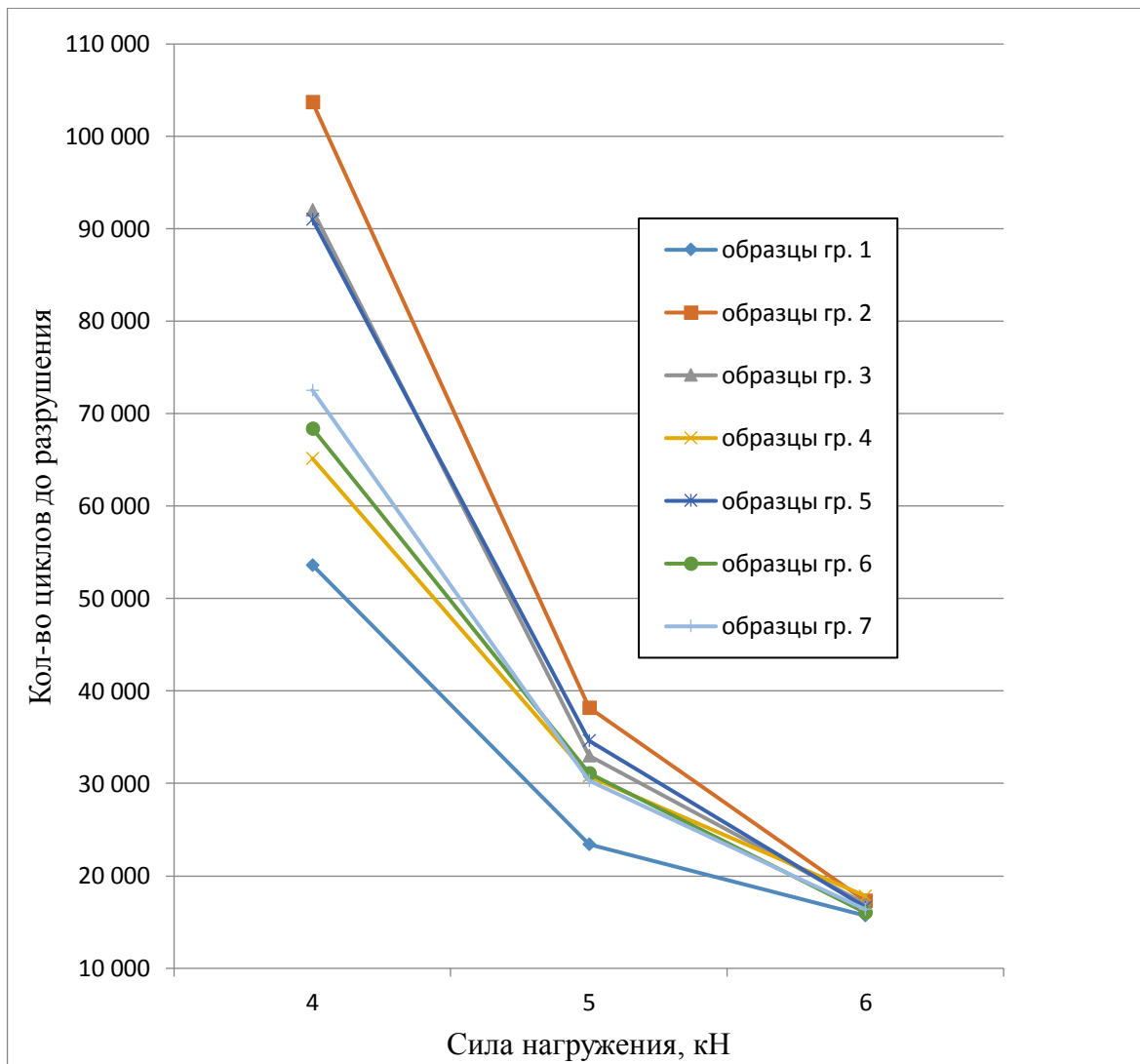


Рисунок 4.15 – Зависимость средних значений количества циклов нагружения до разрушения образцов из материала 1163 от максимальной силы цикла нагружения

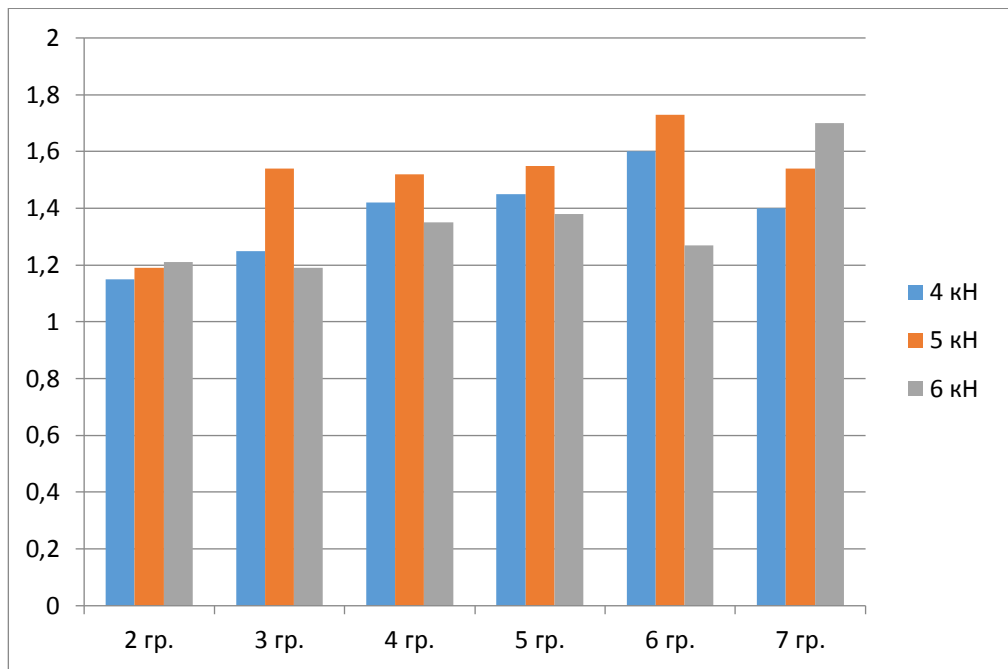


Рисунок 4.16 – Диаграмма средних значений отношения количества циклов нагружения до разрушения образцов, подвергнутых дробеметному упрочнению, и неупрочненных образцов образцами из материала 1933Т2

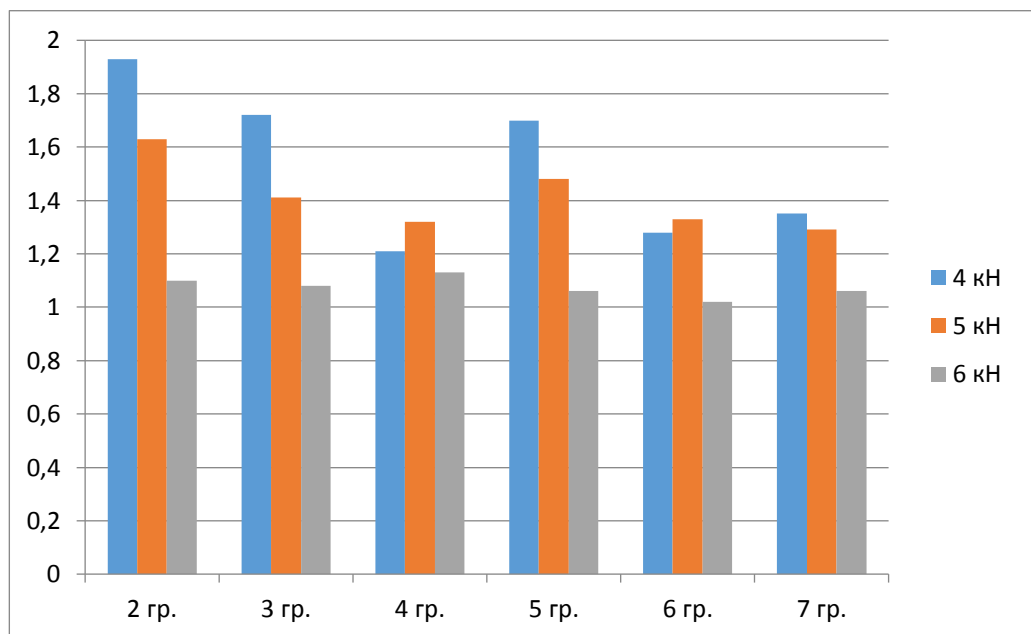


Рисунок 4.17 – Диаграмма средних значений отношения количества циклов нагружения до разрушения образцов, подвергнутых дробеметному упрочнению, и неупрочненных образцов образцами из материала 1163Т

Для образцов из сплава 1933Т2, изготовленных по типовой технологии механической обработки (группа 2 – без превентивного деформирования), эффект от дробеметного упрочнения с режимами обработки используемыми в действующем технологическом процессе (частота вращения ДА – 400 мин^{-1} ; подача – 1 м/мин; положение заслонок дозаторов – 3; количество двойных рабочих ходов – 2) выражается в увеличении количества циклов нагружения до разрушения на 15-20 %. Влияние превентивного деформирования на количество циклов до разрушения образцов из сплава 1933Т2 выражается в его увеличении на 9-39 %.

Для образцов из сплава 1163Т эффект от дробеметного упрочнения с указанными режимами обработки выражается в увеличении количества циклов до разрушения образцов, изготовленных по типовой технологии, на 63-93 %. Влияние превентивного деформирования на количество циклов до разрушения образцов из сплава 1163Т выражается в снижении количества циклов до разрушения образцов в среднем на 16-25 %.

4.3 Разработка технологических рекомендаций по минимизации коробления деталей при дробемётном упрочнении превентивным деформированием раскаткой рёбер роликами

Разработанные технологические рекомендации возможно применять при производстве изделий авиационной техники. На основе данных рекомендаций может производиться разработка технологических процессов по формообразованию и превентивному деформированию раскаткой роликами конструктивных элементов деталей из алюминиевых сплавов после

механической обработки перед дробеметным упрочнением с целью минимизации коробления деталей.

1. Превентивное деформирование детали представляет внесение предыскажений для устранения отклонений от плоскостности в продольном направлении полотна после дробемётного упрочнения.

2. Деталь необходимо разделить на расчетные сечения – продольные A_i-A_i и поперечные B_i-B_i согласно рисунку 4.18.

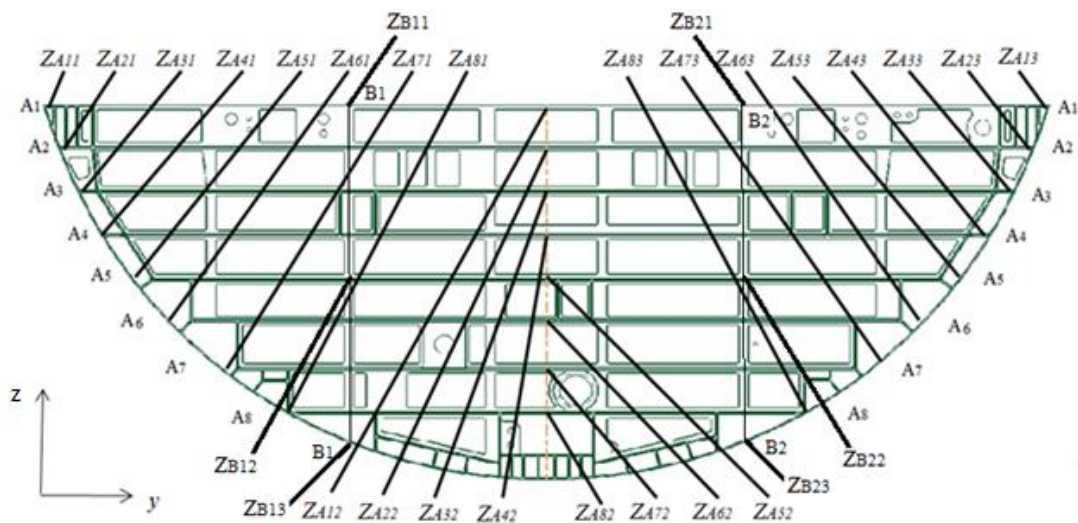


Рисунок 4.18 – Схема измерения детали типа «стенка»

3. В каждом сечении (A_i-A_i ; B_i-B_i) после механообработки с помощью КИМ и/или набора щупов, линеек, контрольного стола производится измерение отклонений от плоскостности в трех точках $Z_{A(B)i1}$, $Z_{A(B)i2}$, $Z_{A(B)i3}$ (где i – номер сечения).

4. По результатам измерения рассчитываются исходные стрелы прогибов для всех сечений:

$$f_{A_i-A_i(B_i-B_i)_{\text{исх}}} = Z_{A(B)i2} - \frac{Z_{A(B)i1} + Z_{A(B)i3}}{2}. \quad (4.5)$$

5. Величина прогнозируемой стрелы прогиба после упрочнения рассчитывается по формуле 4.5. Значения отклонений в контрольных точках определяются расчетом по методике, приведённой в гл. 2. Также отклонения

могут определяться по опыту изготовления подобных деталей или с помощью отработки на КПО, отражающего основные закономерности расположения конструктивных элементов и изготовленного из материала детали. Моделирование процесса упрочнения строится на предварительном определении внутренних силовых факторов процесса: величин растягивающих сил с координатами точек их приложения, возникающих при обработке дробью на конструктивных элементах детали (ребрах, полотно). Если прогнозируемая стрела прогиба i -го сечения после упрочнения представлена радиусом кривизны $R_{Ai-Ai(Bi-Bi)}$, то стрелу прогиба можно определить следующим образом:

$$f_{Ai-Ai(Bi-Bi)_упр} = \frac{a_{Ai-Ai(Bi-Bi)}^2}{8R_{Ai-Ai(Bi-Bi)}},$$

где $a_{Ai-Ai(Bi-Bi)}^2$ – длина i -го сечения.

6. Рассчитывается стрела прогиба, требуемая к получению при раскатке роликами i -го сечения:

$$f_{Ai-Ai(Bi-Bi)_раск} = -(f_{Ai-Ai(Bi-Bi)_исх} + f_{Ai-Ai(Bi-Bi)_упр}).$$

7. Определяется требуемая эквивалентная растягивающая сила:

$$P_{Ai-Ai(Bi-Bi)_раск} = \frac{8f_{Ai-Ai(Bi-Bi)_раск}EJ}{a_{Ai-Ai(Bi-Bi)}^2 z_{Ai-Ai(Bi-Bi)}} \cdot 70\%;$$

где $z_{Ai-Ai(Bi-Bi)}$ – расстояние от точки приложения растягивающей силы до центра тяжести i -го сечения; E – модуль упругости 1-го рода; $J_{x(z)}$ – момент инерции поперечного сечения детали.

8. По полученным растягивающим силам $P_{Ai-Ai(Bi-Bi)_раск}$ для обрабатываемых участков детали определяются давление в гидроцилиндре, применяемое на раскатной установке с помощью тарировочного графика, показанного на рисунке 4.19.

9. Раскатку роликами рёбер детали целесообразно производить на рассчитанных режимах на установке автоматизированной УФП-1, обеспечивающей требуемую точность воспроизведения параметров обработки.

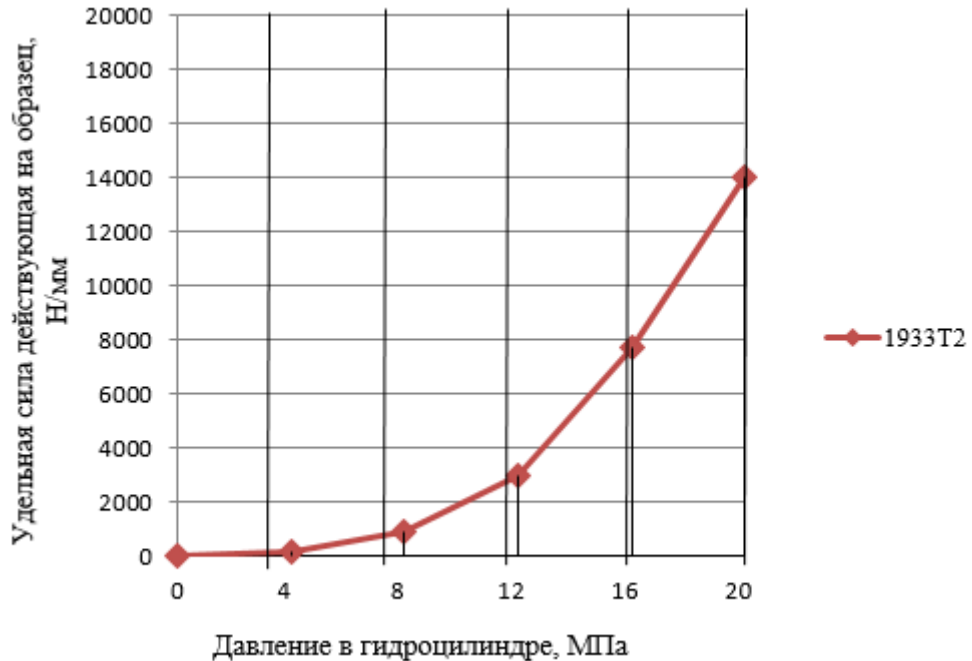


Рисунок 4.19 – Тарировочный график зависимости эквивалентных внутренних сил, возникающих при раскатке, от давления в гидроцилиндре раскатной головки

10. Контроль формы детали после раскатки роликами осуществляется путем измерения отклонений в тех же контрольных точках согласно схеме, показанной на рисунке 4.10. Далее определяются фактические стрелы прогиба в расчетных сечениях $f_{Ai-Ai(Bi-Bi)_{раск_факт}}$ согласно (4.5), которые сравниваются с прогнозируемыми отклонениями $f_{Ai-Ai(Bi-Bi)_{упр}}$. В случае необходимости (при расхождении между требуемыми и фактическими стрелами прогибов на величину более 0,2 мм) выбранные ребра детали подвергаются дополнительной обработке раскаткой роликами с увеличением давления в гидроцилиндре на 10-20% с контролем получения стрел прогибов в расчетных сечениях.

На рисунках 4.20 и 4.21 показанная разработанная ИРННТУ установка для формообразования и правки подкреплённых деталей раскаткой роликами УФП-1 деформирования при помощи раскатной установки.

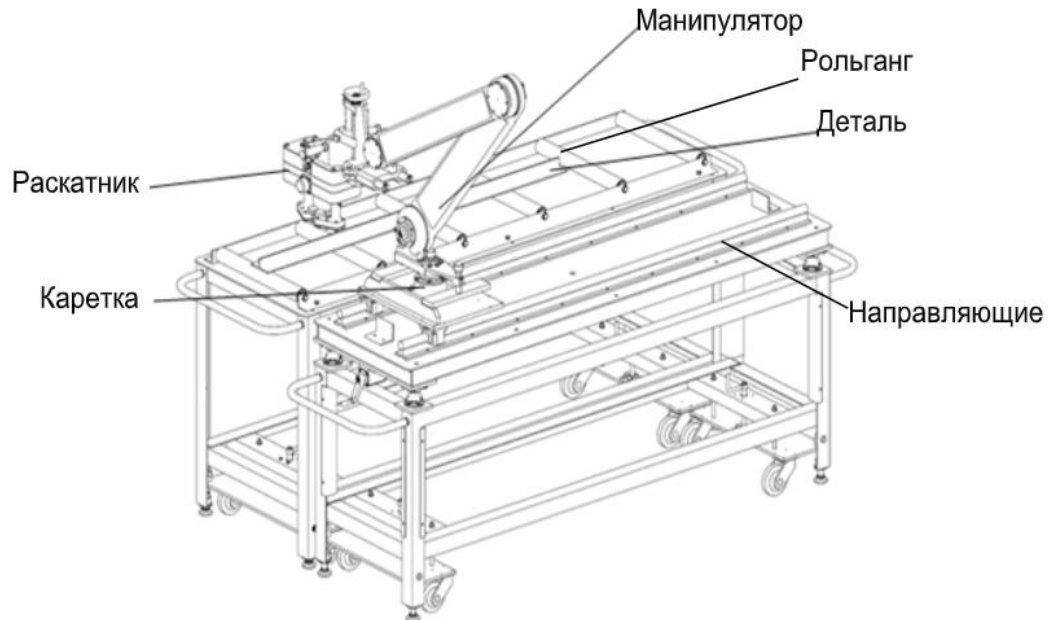


Рисунок 4.20 – Схема установки для формообразования и правки подкреплённых деталей раскаткой роликами УФП-1



Рисунок 4.21 – Установка для формообразования и правки подкреплённых деталей раскаткой роликами УФП-1

Установка УФП-1 обеспечивает программируемое воздействие на рёбра на участке длиной 1200 мм; является передвижной и может быть использована в разных местах цеха. Перемещение рабочего органа согласованно с вращением роликов, относительно неподвижной детали.

Последовательность выполнения операции превентивного деформирования подкреплённых деталей на установке УФП-1 рассмотрим на примере детали «Стенка» (см. рисунок 4.22).

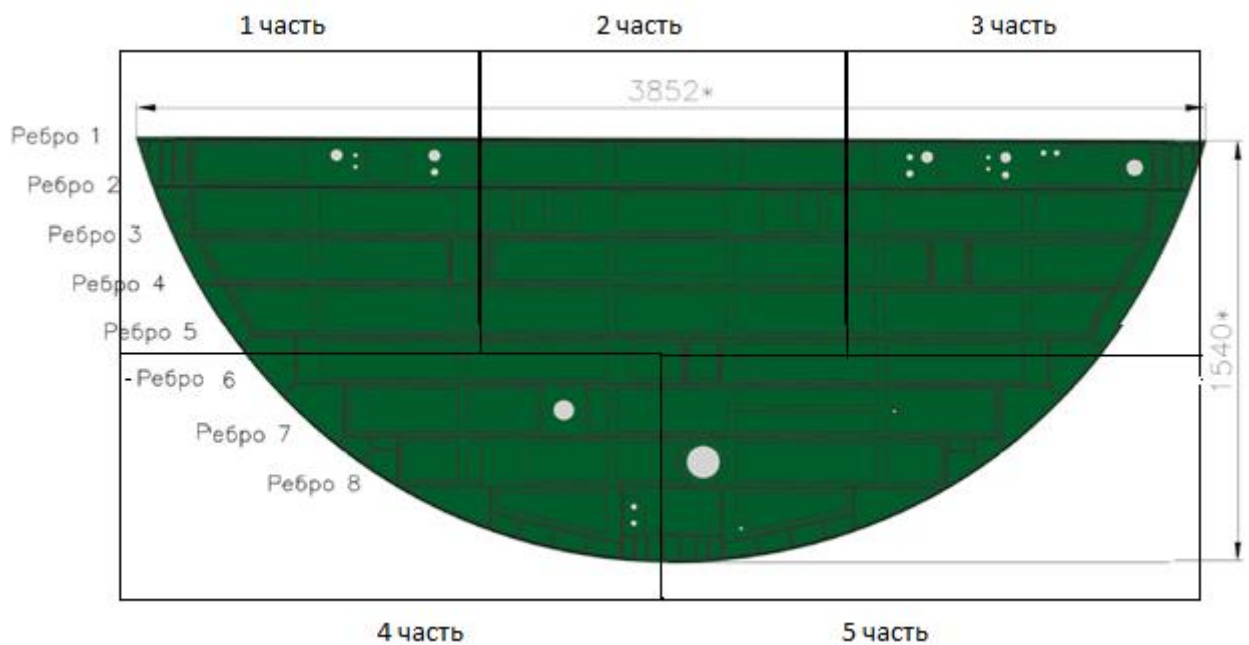


Рисунок 4.22 – Эскиз детали «Стенка»

1. Закрепить деталь на плите/контрольном столе, произвести контроль плоскостности детали, определить режимы обработки согласно приведенной выше методике.
2. Подкатить установку к первой части детали, установить требуемое силу сжатия роликов, раскатать ребра 1-5, измерить деталь, при необходимости повторно раскатать ребра 1-5.
3. Повторить п.п. 1-2 для второй и третьей частей детали.

4. Подкатить установку к четвертой части детали, раскатать ребра 6-8, измерить деталь, при необходимости повторно раскатать ребра 6-8.

5. Повторить п. 4 для пятой части детали.

6. Произвести контроль плоскостности детали.

7. Криволинейные рёбра обрабатывать раскаткой запрещено в виду наличия сборочных отверстий.

8. После превентивного деформирования, деталь отправить на упрочнение дробеметным методом на установке УДП-2-2,5 на режимах согласно утвержденному технологическому процессу.

9. После упрочнения произвести контроль плоскостности детали.

10. При необходимости обработать деталь дробеструйным методом на концевых участках криволинейного ребра для устранения неплоскостности в поперечном направлении, или полотно детали с целью устранения отклонений типа «Хлопун».

Выводы по главе 4

1. В ходе отработки технологического сочетания «Превентивное деформирование – дробемётное упрочнение» на конструктивно-подобных образцах (КПО) подкреплённой детали «Стенка» подтверждена применимость разработанных методик определения исходных данных для расчетов параметров процесса превентивного деформирования деталей раскаткой рёбер роликами. В результате превентивного деформирования с расчётными режимами отклонения КПО после дробемётного упрочнения были снижены в 2,8 раза.

2. Опытны работы, проведённые с целью проверки технологических возможностей процесса правки упрочнённых деталей дробеструйным методом, показали возможность повышения точности формы упрочняемых подкреплённых деталей путём выполнения последовательности операций «Превентивное деформирование раскаткой рёбер роликами – дробеметное упрочнение – доводка формы дробеструйным методом». В результате доводки дробеструйной обработкой был получен КПО детали «Стенка» с отклонениями от плоскостности в пределах установленного допуска 0,4 мм.

3. Разработана и реализована методика экспериментального исследования по определению усталостной долговечности на образцах подкреплённых деталей, изготавливаемых в последовательности «Фрезерование – превентивное деформирование раскаткой рёбер роликами – упрочняющая дробемётная обработка» согласно действующему технологическому процессу. Установлено, что для фрезерованных и упрочнённых образцов из сплава 1933Т2 раскатка роликами привела к увеличению усталостной долговечности на 9-39 %. Для сплава 1163Т предварительная раскатка вызвала снижение количества циклов до разрушения на 16-25 %.

4. Разработанные рекомендации по реализации технологического сочетания «Превентивное деформирование раскаткой роликами –

дробемётное упрочнение» применительно к деталям типа пластин с подкреплением апробированы в условиях реального производства на детали типа «Стенка» самолета МС-21, что обеспечило повышение точности формы детали при дробеметном упрочнении.

Заключение

В результате выполнения диссертационной работы получены новые научно обоснованные технологические решения, обеспечивающие решение актуальной для машиностроения проблемы минимизации коробления при упрочении дробью деталей каркаса, типа маложестких пластин с подкреплением.

При этом получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Изучены закономерности процесса дробемётного упрочнения деталей, состоящих из типовых конструктивных элементов «Полотно», «Карман» и «Рёбро» для которых экспериментально определены: внутренние силовые факторы в виде удельных растягивающих сил, координат точек приложения данных сил (расстояния от поверхности); эпюры остаточных напряжений в поверхностных слоях; параметры микрорельефа поверхностей в виде распределений диаметров отпечатков дроби. Предложена высокопроизводительная методика автоматизированного определения с применением технологии технического зрения фракционного состава дроби, применяемой при упрочнении деталей, в виде количественного соотношения дробинok данных диаметров. Результаты исследования представляют исходные данные для предсказательного моделирования процесса дробемётного упрочнения деталей типа пластин с подкреплением смесью дроби регламентированного фракционного состава.

2. Разработанная методика конечно-элементного моделирования процесса дробемётного упрочнения с учетом фракционного состава и распределения скоростей в потоке дроби позволяет по расчетным эпюрам остаточных напряжений определять внутренние силовые факторы в виде удельных растягивающих сил, действующих на конструктивные элементы деталей в процессе обработки, и координат точек приложения данных сил

(расстояния от поверхности). Адекватность методики подтверждена экспериментом (сходимость в пределах 15%).

3. Впервые выполнено конечно элементное моделирование реального процесса упрочняющей дробеобработки подкреплённой детали косвенным методом, путём нагружения конструктивных элементов расчетными внутренними силами, определёнными с учетом особенностей обработки на конкретном оборудовании – дробемётной установке УДП-2-2,5. Результатом моделирования обработки конструктивно-подобного образца (КПО) детали «Стенка», представляющего собой пластину с подкрепляющими рёбрами, являются стрелы прогиба сечений КПО по рёбрам (наибольшее значение – 0,86 мм по первому ребру), используемые в качестве исходных данных для расчета технологических параметров превентивного деформирования детали раскаткой рёбер роликами.

4. Доказана возможность управления процессом технологического наследования отклонений пространственной формы деталей типа пластин с подкреплением при дробементном упрочнении, заключающийся в превентивном деформировании конструктивных элементов деталей раскаткой роликами с созданием расчетного предыскажения формы деталей в противоположном направлении. Предложена методика расчета режимов и условий превентивного деформирования деталей типа пластин с подкреплением раскаткой рёбер роликами на основе определённых в результате моделирования параметров формоизменения в результате упрочнения дробью. Выполнен расчет и произведена экспериментальная отработка технологического сочетания «Превентивное деформирование – дробемётное упрочнение», что позволило подтвердить применимость разработанных методик.

5. Исследованы технологические возможности процесса правки упрочнённых деталей дробеструйным методом. Показана возможность повышения точности формы деталей типа пластин с подкреплением при

выполнении последовательности операций «Превентивное деформирование раскаткой рёбер роликами → Дробеметное упрочнение → Доводка формы дробеструйным методом». При реализации данной последовательности операций на КПО детали типа «Стенка» достигнуты отклонения от плоскостности 0,4 мм в пределах установленного допуска.

6. Разработана и реализована методика экспериментального исследования, которая позволила установить основные закономерности влияния технологических параметров последовательности операций «Фрезерование – превентивное деформирование раскаткой рёбер роликами – упрочняющая дробемётная обработка» на усталостную долговечность алюминиевых сплавов 1933Т2 и 1163Т, применяемых при изготовлении деталей типа пластин с подкреплением.

7. Разработаны рекомендации по реализации технологического сочетания «Превентивное деформирование раскаткой роликами – дробемётное упрочнение» применительно к деталям типа пластин с подкреплением, которые были апробированы в условиях реального производства на детали типа «Стенка» самолета МС-21, что обеспечило повышение точности формы детали при дробеметном упрочнении. Это позволяет рекомендовать полученные результаты к использованию при разработке технологических процессов упрочнения подкреплённых деталей из алюминиевых сплавов, получаемых механической обработкой.

Библиографический список

1. Абибов А.Л., Бирюков Н.М., Бойцов В.В. Технология самолётостроения. – М.: Машиностроение, 1982. – 551 с.
2. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. / В.В. Абрамов. – М.: Машиностроение, 1963. – 355 с.
3. Беляков В.И., Мовшович А.Я., Кочергин Ю.А. Изготовление листовых деталей методом раскатки // Системи обробки інформації. 2010. Вип. 9. С. 12–14
4. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М., Машгиз, 1963. – 232 с.
5. Бойцов Б.В., Кравченко Г.Н. Определение продолжительности упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием // Вестник машиностроения. –1981 –№6.– С. 6-8.
6. Ботвенко С.И. Остаточные напряжения и деформации при изготовлении деталей типа пластин с подкреплениями: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – 132 с.
7. Брондз Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолётов. – М.: Машиностроение, 1986. – 182 с.
8. Вепрев А.А., Пашков А.Е., Плихунов В.В., Румянцев Ю.С., Сергунов А.В. О создании отраслевой технологии дробеударного формообразования панелей // Авиационная промышленность. - 2009. - № 2. - С. 24-29.
9. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. Государственное издательство физико-математической литературы. – Москва, 1959. – 574 с.
10. Гомульчик П.М. Упрочнение рессорных листов в предварительно напряженном состоянии // Пути улучшения качества и долговечности автомобильных рессор: Сб. научн. тр. – М.: ЦНИИТМАШ, 1973. – С. 45-52.

11. Гриневич А.В. Исследование усталостной долговечности алюминиевых сплавов 1163-Т и В95о.ч.-Т2 после поверхностного упрочнения / А. В. Гриневич, Ю. С. Румянцев, Л. В. Морозова, А. Л. Терехин // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № S4. – С. 93-102.
12. Дагмирзаев О. А. Изучаем язык программирования С++ // Colloquium-Journal. 2021. № 3-3 (90). С. 17–19.
13. Дьяк А.Ю. Определение степени покрытия автоматизированным методом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 12. С. 19–25.
14. Дриц, А. М. Алюминиевые сплавы в самолетостроении: прошлое и настоящее / А. М. Дриц, А. Г. Вовнянко // Цветные металлы. – 2010. – № 8. – С. 88-90
15. Дробемётное упрочнение деталей из алюминиевых сплавов: Производственная инструкция ПИ 1. 4. 1623-86. – М.: НИАТ, 1987. – 18 с.
16. Дрозд М.С. Инженерные расчеты упруго-пластической контактной деформации. / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, С.Ю. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с., ил.
17. Дудкин А.И. Поверхностное упрочнение монолитных панелей с одновременным образованием теоретического контура // Авиационная промышленность. – 1976. – №10. – С. 5-8.
18. Житомирский Г.И. Конструкция самолетов: Учебник для студентов авиационных специальностей вузов. / Г.И. Житомирский – М.: Машиностроение, 1991. 4
19. Замашиков Ю.И. Об исследовании на образцах начальных и остаточных напряжений в поверхностном слое // Механика деформируемых сред в технологических процессах: Сб. научн. тр. – Иркутск: ИрГТУ, 1997. – С. 44-48

20. Замашиков Ю.И., Каргапольцев С.К. Экспресс-метод определения остаточных напряжений в закаленных плитах // Повышение эффективности технологических процессов механообработки. – Иркутск: ИПИ, 1990. – С. 90-96.
21. Захаров В.А. Правка длинномерных профилей ППД // Интенсификация производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием: Тез. докл. на обл. научн. техн. конф. По секции № 2 «Динамические методы ППД». / В.А. Захаров. - Тольятти, 1989. – с. 66.
22. Илюшкин М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки): Учебно-методическое пособие. Ульяновск: УлГУ, 2012. 91 с.
23. Исаев А.И., Овсеенко А.Н. Выбор оптимальной толщины образца при определении остаточных напряжений в поверхностном слое // Вестник машиностроения. – 1967. – № 8. – С. 74-76.
24. К определению внутренних силовых факторов процесса дробеударного формообразования / А. Е. Пашков, А. П. Чапышев, А. А. Пашков [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 12(131). – С. 43-55. – DOI 10.21285/1814-3520-2017-12-43-55.
25. Каргапольцев С.К. Факторы, определяющие точность обработки мало жестких подкрепленных деталей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2005. – №5. – С. 33-36.
26. Кононенко В., Сикульский В.Т. Исследование возможностей формоизменения монолитных панелей путем последовательного деформирования ребер // Проблемы машиностроения, вып. 14. – Респ. межвед. сборник. – 1981. – С. 32-36
27. Кононенко В.Г. Расчет основных технологических параметров гибки

- монолитных панелей методами локального деформирования ребер // Обработка металлов давлением в машиностроении. Вып. 16. / В.Г. Кононенко, В.Т. Сикульский. – 1980. – С. 6-10
28. Кононенко В.Г., Исследование возможностей формоизменения монолитных панелей путём последовательного деформирования ребер // Проблемы машиностроения: Республиканский межведомственный сборник. Вып. 14. / В.Г. Кононенко, В.Т. Сикульский. – 1981. – С. 32-36
29. Кооп Р. Пластическое формообразование при помощи дробеструйной обработки – гибкий процесс обработки давлением // Сб. тр. первой междунар. конф. по обработке дробью. – Париж, 1981.– С. 541-554.
30. Кравченко Г. Н. Обоснование эффективности восстановления усталостной долговечности поверхностно-упрочненных авиационных деталей повторным упрочнением дробью // Вестник машиностроения. 2019. № 12. С. 69–75
31. Кравчук А.С., Кравчук А.И. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST. Ч. 3. Основные элементы графического интерфейса LS-PREPOST. Решение задач с помощью LS-DYNA Solver. М.: БГУ, 2013. 74 с
32. Ле, Ч. В. Моделирование формирования основных параметров качества поверхностного слоя при дробеударном упрочнении деталей / Ч. В. Ле, В. П. Кольцов, М. Х. Нгуен // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : Сборник статей XIV Международной научно-технической конференции, Иркутск, 21–26 сентября 2020 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2020. – С. 104-112.
33. Лозовцев Ю.Е. Теоретические основы формообразования листовых заготовок дробе-ударной обработкой // Вестник машиностроения. – 1986.– №4. –С. 16-23.

34. Лысов М.И., Закиров И.М. Пластическое формообразования тонкостенных деталей авиатехник // М.: Машиностроение, 1983 – 176 с.
35. Макарук А.А., Самойленко О.В., Иванов Ю.Н., Чашин Н.С., Минаев Н.В. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка». *iPolytech Journal*. 2021;25(1):8-16.
36. Макарук, А. А. Исследование процесса правки фрезерованных деталей каркаса раскаткой роликами / А. А. Макарук // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 5(64). – С. 27-35.
37. Макарук, А. А. К определению деформаций мало жестких подкрепленных деталей при правке раскаткой роликами / А. А. Макарук // XX Туполевские чтения, Казань, 08–10 октября 2012 года, 2012. – С. 90-94.
38. Маталин А.А. Коробление тонкостенных деталей в процессе их механической обработки // Технология и автоматизация машиностроения. / А.А. Маталин, И.П. Моисеев. – Киев: Техника, 1968. – Вып. 4. – С. 47–53.
39. Минаев, Н. В. К созданию предсказательной модели процесса формообразования и правки подкреплённых панелей раскаткой роликами / Н. В. Минаев // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering: Материалы XVI международной научно-практической конференции, Иркутск, 03–07 июля 2023 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 15-25.
40. Минаев, Н. В. Проблемы измерения остаточных напряжений на образцах конструктивно подобных элементов алюминиевых деталей после раскатки роликами / Н. В. Минаев, А. Г. Тихонов //

Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 4(52). – С. 84-88.

41. Минаев Н. В. Формообразование подкрепленных панелей раскаткой роликами / Н. В. Минаев // Высокоэффективные технологии производства летательных аппаратов : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2012. – С. 94-100.
42. Овсеенко А.Н. Технологические остаточные напряжения и методы их определения // Прогрессивные технологические процессы механосборочного производства в турбостроении: Сб. научн. тр. ЦНИИТМАШ. – М., 1986. – Вып. № 196. – С. 9-15.
43. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
44. Патент № 2618680. Устройство для обкатывания ребер панелей / А. Е. Пашков, А. А. Макарук, А. К. Китов, В. П. Кольцов. 2015.
45. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей / А.Е. Пашков, Иркутск: ИрГТУ, 2005. – 140 с
46. Пашков А.Е. Физико-технические методы обработки: Учебное пособие. –Иркутск: Ирк. гос. техн. ун-т, 2004. – 200 с.
47. Пашков, А. А. Программный комплекс определения степени покрытия при дробеударной обработке / А. А. Пашков, Д. С. Пашаев, Н. И. Никуличев // Будущее машиностроения России : Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов, Москва, 05–08 октября 2016 года. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 91-94.

48. Пашков, А. Е. Конечно-элементное моделирование процесса обработки хаотичным потоком дроби / А. Е. Пашков, А. А. Пашков // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции, Иркутск, 27–28 ноября 2018 года / Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2018. – С. 91-96
49. Пашков, А. Е. Формообразование и правка мало жестких деталей при помощи переносного инструмента / А. Е. Пашков, С. В. Викулова, А. А. Макарук // Высокие технологии в машиностроении : Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 02–04 февраля 2009 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2009. – С. 156-159.
50. Промптов А.И., Остаточные напряжения и деформации при обработке мало жестких деталей / А.И. Промптов, Ю.И. Замащиков. – Вестник машиностроения, 1975. – № 4. – С. 42–45.
51. Румянцев Ю.С. Об устранении поводок крупногабаритных поверхностно упрочненных деталей из алюминиевых сплавов / Ю. С. Румянцев, Н. В. Анисимова, А. Г. Рудаков // Авиационная промышленность. –1992. –№ 12. – С. 5-6.
52. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклёпом. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.
53. Саверин М.М. Дробеструйный наклёп. – М.: Машгиз, 1955. – 312 с.
54. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617997. Расчет технологических параметров формообразования и правки ребристых панелей раскаткой роликами / А. А. Макарук, Н. В. Минаев, А. Е. Пашков [и др.]
55. Сикульский В.Т. Формоизменение монолитных панелей локальным

деформированием ребер // Обработка металлов давлением в машиностроении. Вып. 18. / В.Т. Сиккульский. – 1982. – С. 16-17

56. Смирнов В.А., Румянцев Ю.С. Программирование управляемой дробемётной обработки и разработка базовой технологии упрочнения крупногабаритных деталей // Технология авиационного производства: Сб. научн. тр. – М.: НИАТ, 1987. – С.79-81.
57. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
58. Стрелец Д. Ю. Применение суперкомпьютерных технологий для решения актуальных задач проектирования новых образцов авиационной техники // Рациональное управление предприятием № 2, 2014 г. - стр. 48 -51
59. Стрижиус В.Е. Методы и процедуры расчётов на усталость элементов авиационных конструкций. М.: МАИ-ПРИНТ, 2008. - 60 с.
60. Тейлор Э.В. Формовка и упрочнение панелей дробеударной обработкой // Авиационная промышленность за рубежом: Сб. науч. работ НИАТ. - М.: Машиностроение, 1974. С. 17-19
61. Томлёнов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением / А.Д. Томлёнов. - М.: Машгиз, 1963.
62. Федоренко В. Ю. Применение технологии машинного зрения в различных сферах жизни современного общества // Теория и практика современной науки. 2021. № 8 (74). С. 36–39.
63. Хосен Ри Э.Х. Современные технологии производства алюминиевых сплавов / Хосен Ри, Э.Х. Ри, С.Н. Химухин, В.И. Якимов. – Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2015. – 131 с.
64. Чепя П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – Минск: Наука и техника, 1981. –128 с.
65. Шевнюк Ю.В. Дробеударное формообразование монолитных панелей

из прессованных заготовок // *Авиационная промышленность*. –1966.– №2.– С. 21-24.

66. Шнейдер Г.П. Остаточные напряжения в полуфабрикатах и деталях из алюминиевых сплавов // *Технология легких сплавов*. / Г.П. Шнейдер. – 1983. – № 10. – С. 9–16.
67. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid S.A. Realistic finite element simulations of arc-height development in shot peened Almen strips // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2014. Vol. 136. No. 4.
68. Pashkov A.E. Complex method of peen forming and shot peening of aircraft structural components/ A.E. Pashkov, V.P. Koltsov, A.A. Pashkov // *2017 Advances in Engineering Research 2017*. Volume 133. P. 585-5913.
69. Foppl O. Compression of the Surface of Steel Machine Parts // *Stahl und Eisen*, Vol. 49, April, 1929, p. 576.
70. Guagliano M. An approach for prediction of fatigue strength of shot peened components / M. Guagliano, L. Vergani // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2004. – Vol. 71. – P. 501–512.
71. Hallquist J.O. LS-DYNA Keyword User's Manual, version 970 / J.O. Hallquist – Livermore Software Technology Corporation. – April 2003. – Vol. 1. – 2682 p.
72. Herbert E.G. The Work Hardening of Steel by Abrasion // *Engineering*, October 7, 1927, pp. 470-472
73. Herzog, R. The significance of Almen intensity for the generation of shot peening residual stresses / R. Herzog, W. Zinn, B. Scholtes, H. Wohlfahrt // *Proc. 6th conf. shot peening (ICSP6)*. – 1996. – P. 270–281.
74. Hong, T., Ooi, J. Y. & Shaw, B. A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses. *Eng. Fail. Anal.* 15, 1097–1110 (2008).
75. Kelly S. A numerical simulation of the residual stresses in laser-peened friction stir-welded aluminum 2195 joints / S. Kelly, O. H. Carney, J.

- Smith, T Matrka и др. // International Journal of Structural Integrity. – 2011. – Vol. 2. – №1. – P. 62–73
76. Kirk D. Metrology of Almen Arc Height Measurement // Shot peener. – Spring 2008. – P. 24-34
77. Klemenz M. Application of the FEM for the prediction of the surface layer characteristics after shot peening / M. Klemenz, V. Schulze, I. Rohr, D.Lohe // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – №8. –P. 4093–4102
78. Koltsov, V. P. Surface roughness formation during shot peen forming / V. P. Koltsov, L. T. Vinh, D. A. Starodubtseva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk, 04–06 декабря 2017 года. Vol. 327, 4. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 042125.
79. Kopp R., Hornauer K.-P., Ball H.-W. Shot-peen-forming, recent technological and theoretical developments // Adv. Surface Treat. Technol. Appl., Eff. Oxford e. a., 1986.–Vol. 2.–P. 21-23
80. Kyriacou S. Shot peening mechanics, a theoretical study / S. Kyriacou // Conf Proc: ICSP–6. – 1996. – P. 505–516
81. Levers A. Finite element simulation of shot peening / A. Levers, A. Prior – The Shot peener – Vol. 9. Issue 3, pages 14–16.
82. Lu LX, Sun J (2016) Investigation on distortion mechanism and correcting load calculation method for aluminum beam structure by bilateral rolling process. Procedia CIRP 57:781–786.
83. Lu LX, Sun J, Han X, Xiong QC (2016) Study on the surface integrity of a thin-walled aluminum alloy structure after a bilateral slid rolling process. Metals 6(5):99. doi:10.3390/met6050099
84. Lu, L., Sun, J., Li, Y. et al. A theoretical model for load prediction in

rolling correction process of thin-walled aeronautic parts. *Int J Adv Manuf Technol* 92, 4121–4131 (2017).

85. Majzoobi G. H. A three–dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts / G.H. Majzoobi, R. Azizi, A.A. Nia // *Journal of Materials Processing Technology*. – May, 2005. – Vol. 164–165. –P. 1226–1234.
86. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Samoilenko O.V. Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019: Vol. 632.
87. MPF 20000 Aircraft Wing Peening [Электронный ресурс] <https://www.wheelabratorgroup.com/en-gb/equipment/airblast-cabinets-and-machines/frame-machines/mpf-20000-aircraft-wing-peening-machine> (дата обращения: 10.10.2022)
88. Nicu-Lari A. Methode de la fleche, methode de la source des cintraintes residueles / A. Nicu-Lari // *1-st Int. Conf. on Shot Peening*. – Paris, 14 – 17 Sept. 1981. – P. 234 Nicu-Lari A. 247.
89. Official site Associated Spring-Raymond [Электронный ресурс] <https://www.asraymond.com/> (дата обращения: 5.10.2022)
90. Official site Curtiss-Wright Corporation [Электронный ресурс] <https://www.curtisswright.com/> (дата обращения: 4.07.2021)
91. Official site Electronics Inc. [Электронный ресурс] <https://www.electronics-inc.com/> (дата обращения: 5.10.2022)
92. Official site General Dynamics company [Электронный ресурс] <https://www.gd.com/> (дата обращения: 4.07.2021)
93. Official site KSA Corporation [Электронный ресурс] <https://ksa.de.com/> (дата обращения: 4.07.2021)
94. Official site Pangborn company [Электронный ресурс] <https://pangborn.com/> (дата обращения: 4.07.2021)

95. Official site Rösler Corporation [Электронный ресурс]
<https://www.ru.rosler.com/ru-ru/> (дата обращения: 4.07.2021)
96. Official site Wheelabrator company [Электронный ресурс]
<https://www.wheelabratorgroup.com/en-gb/> (дата обращения: 4.07.2021)
97. Pashkov, A. A. Simulation of the Forming of Large Double Curvature Parts on Contact-Type Shot Peening Installations / A. A. Pashkov // . – 2021. – Vol. 2021, No. 13. – P. 1821-1828. – DOI 10.1134/S0036029521130218
98. Perenda J, Trajkovski J, Žerovnik A, Prebil I (2015) Residual stresses after deep rolling of a torsion bar made from high strength steel. J Mater Process Tech 218:89–98.
99. Ramati S. Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology / S. Ramati, G. Levasseur, S. Kennerknecht // 7–th Int. Conf. on Shot Peening. – Warsaw, Poland, 28–30 Sept. 2000. P. 1–18. С 1528–1535
100. Schwarzer J. Finite element simulation of shot peening: A method to evaluate the influence of peening parameters on surface characteristics / J. Schwarzer, V. Schulze, O. Vohringer // Shot Peening. – 2006. – P. 507–515.
101. SHOT PEENING - HISTORY [Электронный ресурс]
<https://www.shotpeener.com/library/pdf/1962004.pdf> (дата обращения: 03.07.2021)
102. Shot Peening // SAE : AMS 2430L. 1993. July 1. P. 15.
103. Shot Peening of Metal Parts // U. S. Specification : MIL-S-13165C. 1989. June 7. P. 24.
104. Sikulskiy, V.; Sikulskyi, S.; Garin, V. Investigation into the Forming Process of Wing Panel Oblique Bending by Means of Rib Rolling. Cham, 2021; pp. 598-608.
105. Test Strip, Holder and Gage For Shot Peening // SAE : SAE J442. 1995. Jan. P. 2

106. The English Wheel: Some insight into using this sheet metal forming tool [Электронный ресурс] <https://www.aviationpros.com/home/article/10387129/the-english-wheel-some-insight-into-using-this-sheet-metal-forming-tool>(дата обращения: 17.06.2021)
107. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts / A. E. Pashkov, A. Y. Malashchenko, A. A. Pashkov, A. A. Duk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Irkutsk, 21–26 сентября 2020 года. Vol. 1061. – Irkutsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012029
108. Tu Fubin, Delbergue D., Miao Hongyan, Klotz T., Brochu M., Bocher P, et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 319. P. 200–212.
109. Wang, C.; Li, W.; Jiang, J.; Chao, X.; Zeng, W.; Xu, J.; Yang, J. An Improved Approach to Direct Simulation of an Actual Almen Shot Peening Intensity Test with a Large Number of Shots. Materials 2020, 13, 5088
110. Wolfhart, H. (1984). The influence of peening conditions on the resulting distribution of residual stress / H. Wolfhart // Proc. 2nd conf. shot peening (ICSP2). – 1984. – P. 316 – 331.

Список сокращений и условных обозначений

ДОК	дробеструйная обитаемая камера
КПО	конструктивно-подобный образец
КЭ	конечные элементы
КЭМ	конечно-элементная модель
МКЭ	метод конечных элементов
НДС	напряженно-деформированное состояние
ОН	остаточные напряжения
ЧПУ	числовое-программное управление
M	изгибающий момент
P	внутренняя сила
k	расстояние от точки приложения силы до центра тяжести образца
H	толщина образца
E	модуль упругости 1-го рода
z_c	расстояние от точки приложения силы до обработанной поверхности
R	радиус кривизны образца, полученный при обработке дробью
f	стрела прогиба
$f_{\text{пол}}$	полученная стрела прогиба в процессе обработки
Δf	прирост стрелы прогиба после обработки
$f_i^{\text{прог}}$	прогнозируемая стрела прогиба
$f_i^{\text{упр}}$	стрела прогиба возникающая в процессе дробеметного упрочнения
J	момент инерции поперечного сечения
L_0	длина образца до обработки
L_1	длина образца после обработки
ΔL	изменение длины детали в процессе обработки
$\varepsilon_{об}$	относительное удлинение образцов
μ	коэффициент Пуассона
$S_{\text{п}}$	степень покрытия после обработки дробью
$K_{\text{ч}}$	количество черных пикселе

$K_{об}$	общее число пикселей
$F, G, H,$ L, M, N	коэффициенты анизотропии, определенные экспериментально, путем проведения одноосного растяжения в двух направлениях (ортотропная модель)
a^n	ускорение демпфирования в процессе моделирования
M	диагональная матрица масс
P^n	вектор внешней нагрузки
P^n	вектор внутренних сил
P_{damp}^n	демпфирующая сила
d_o	зависимости диаметра отпечатка от скорости внедрения дробинки
B	ширина образца
$\delta^{кт}$	измеренные значения отклонений от плоскостности в контрольных точках

Приложение А
Протоколы измерений ОН на установке УДИОН-2.

Партия:	ИА3-26	Примечание	-	
Образец:	0			
Материал:	1933	Глубина наклепа, мм	0,3	
Вид обработки:	Упрочнение, 420 об/мин, 1 м/мин, дробь 0,6-0,8 мм, угол ребра 0.			

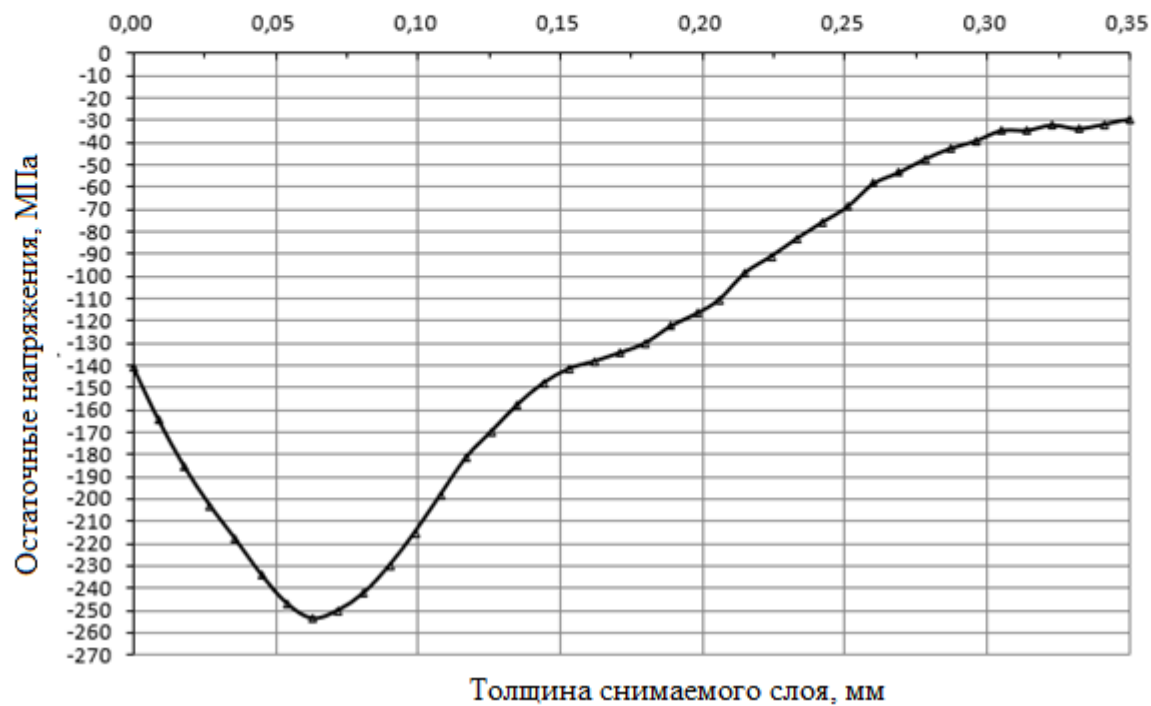


Рисунок А.1 – Протокол измерения ОН образца №0

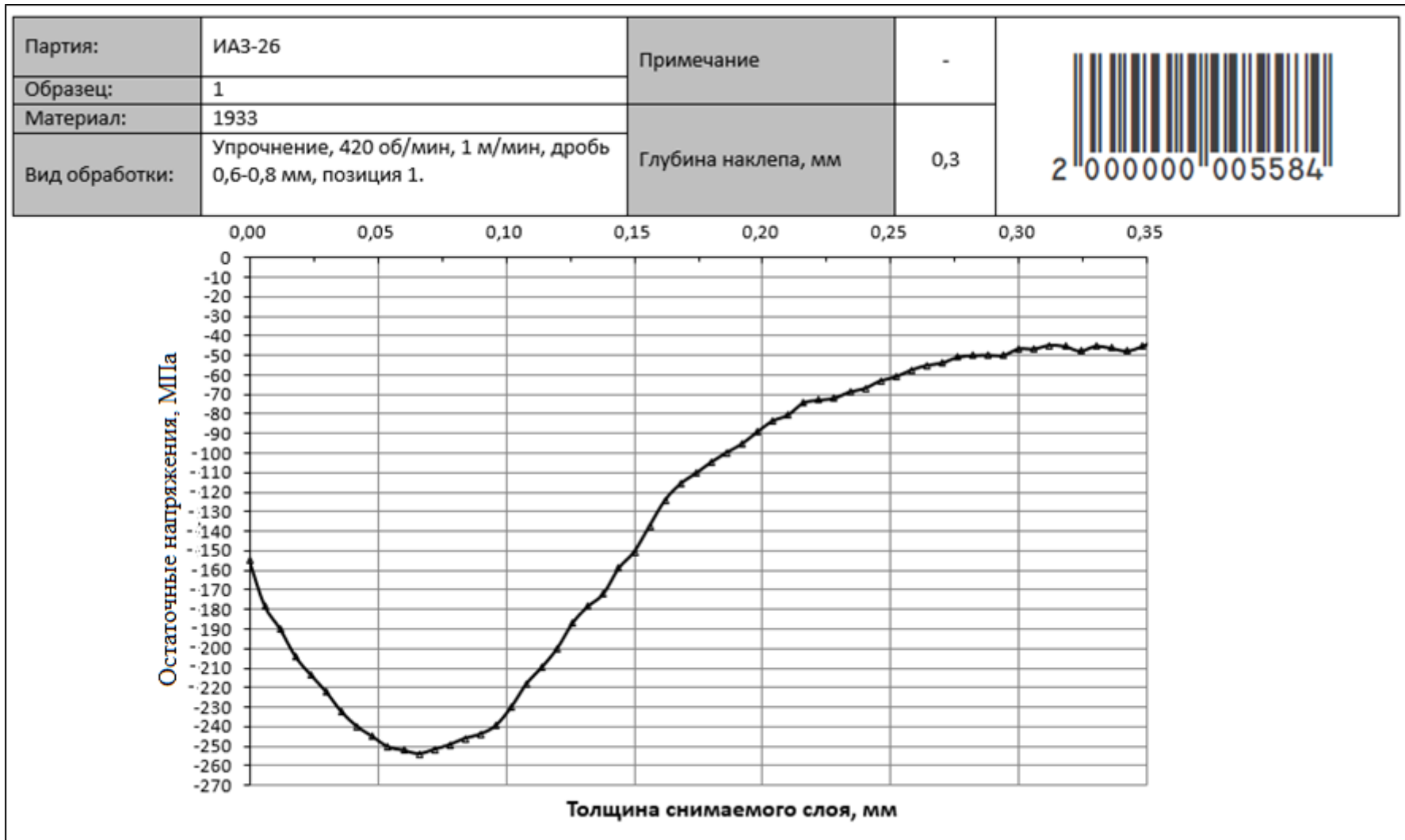


Рисунок А.2 – Протокол измерения ОН образца №1

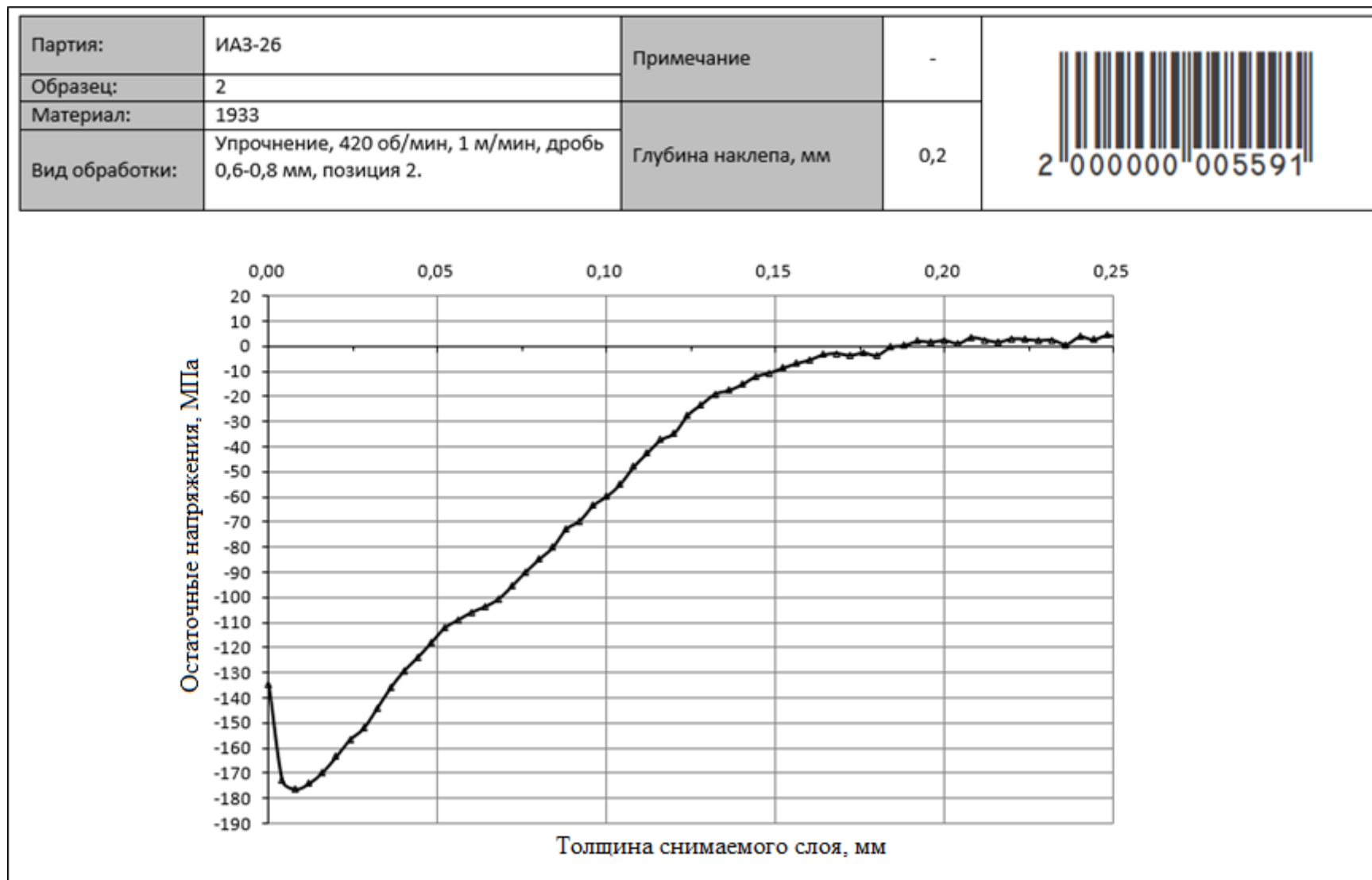


Рисунок А.3 – Протокол измерения ОН образца №2

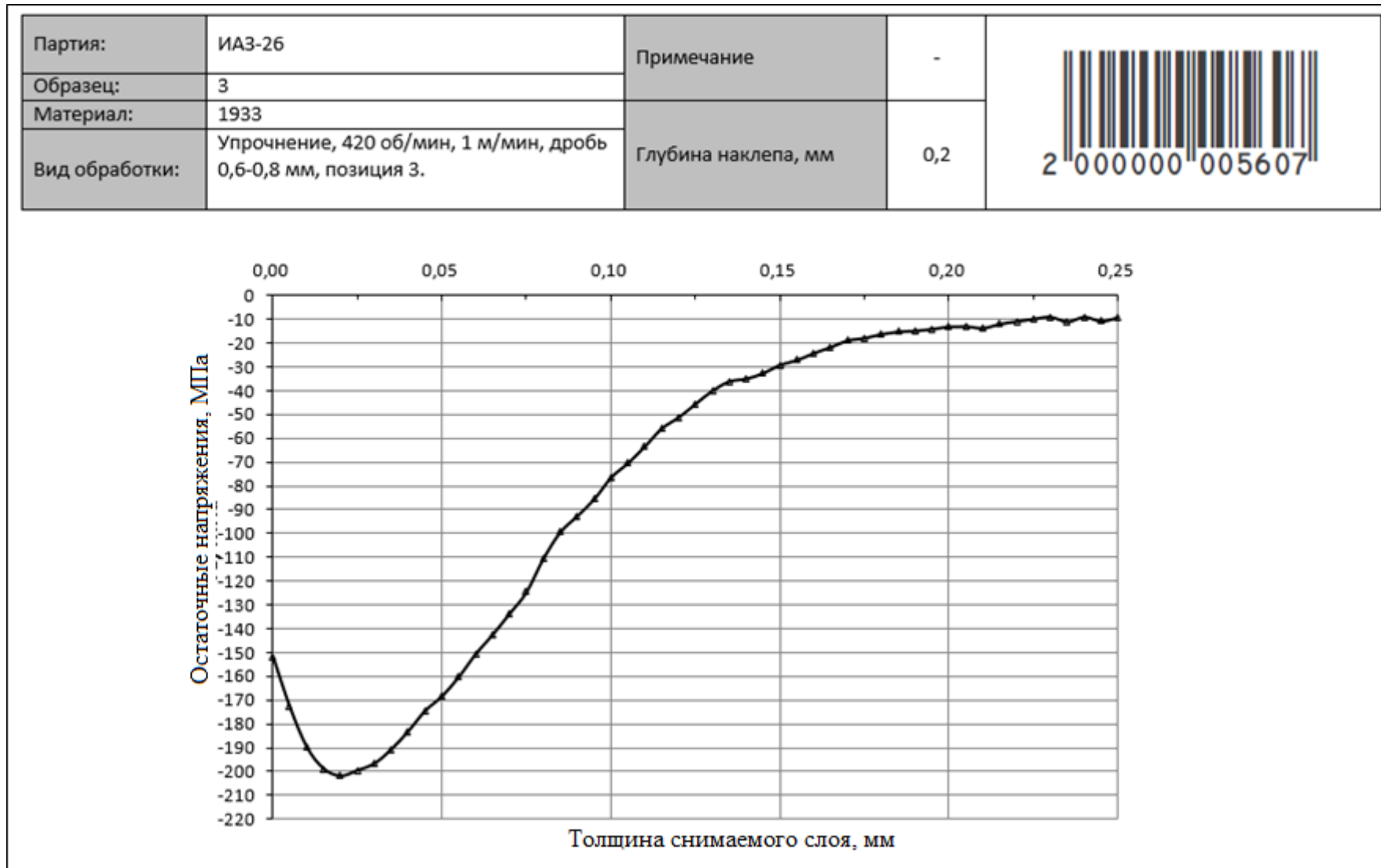


Рисунок А.4 – Протокол измерения ОН образца №3

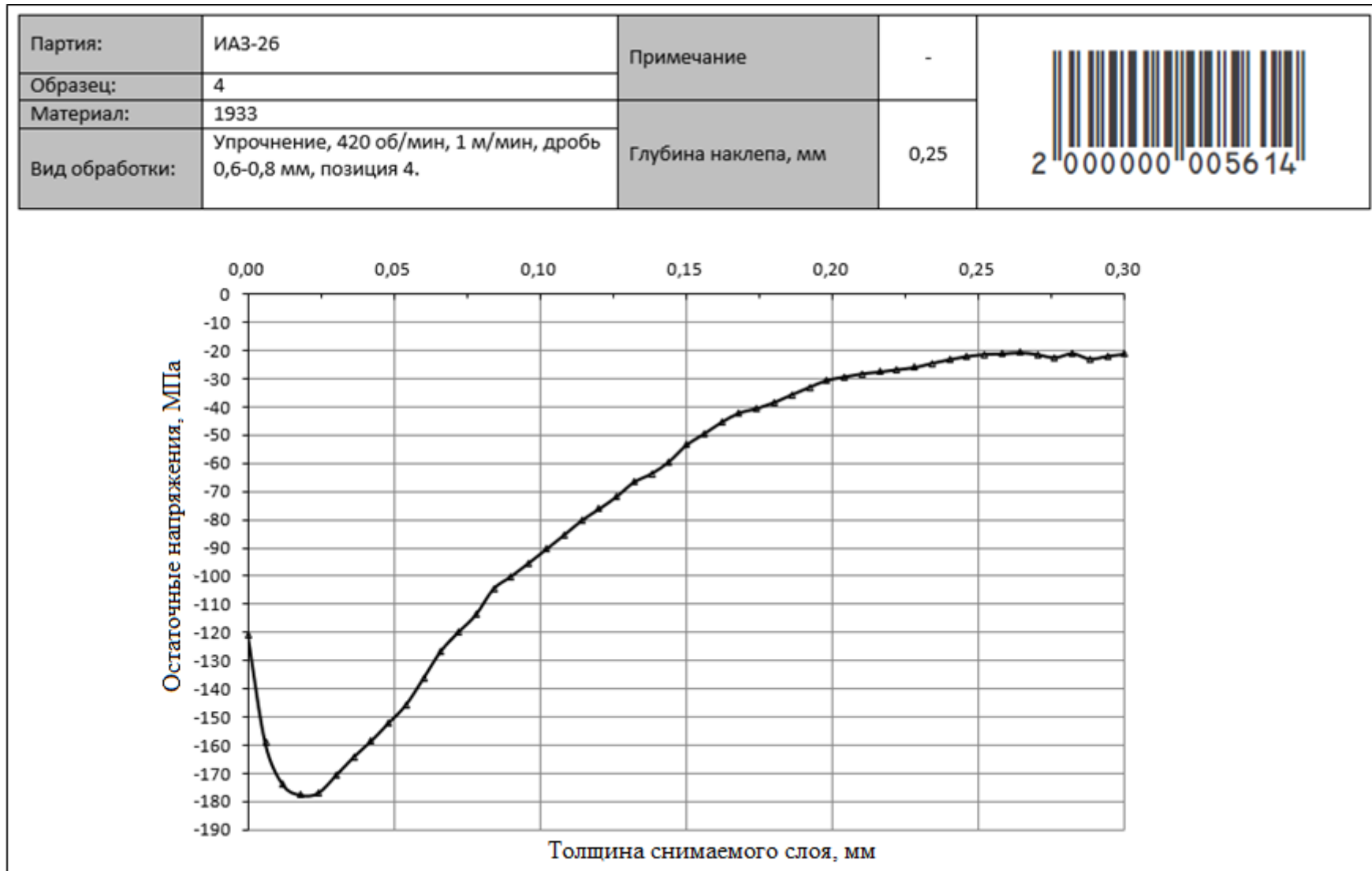


Рисунок А.5 – Протокол измерения ОН образца №4

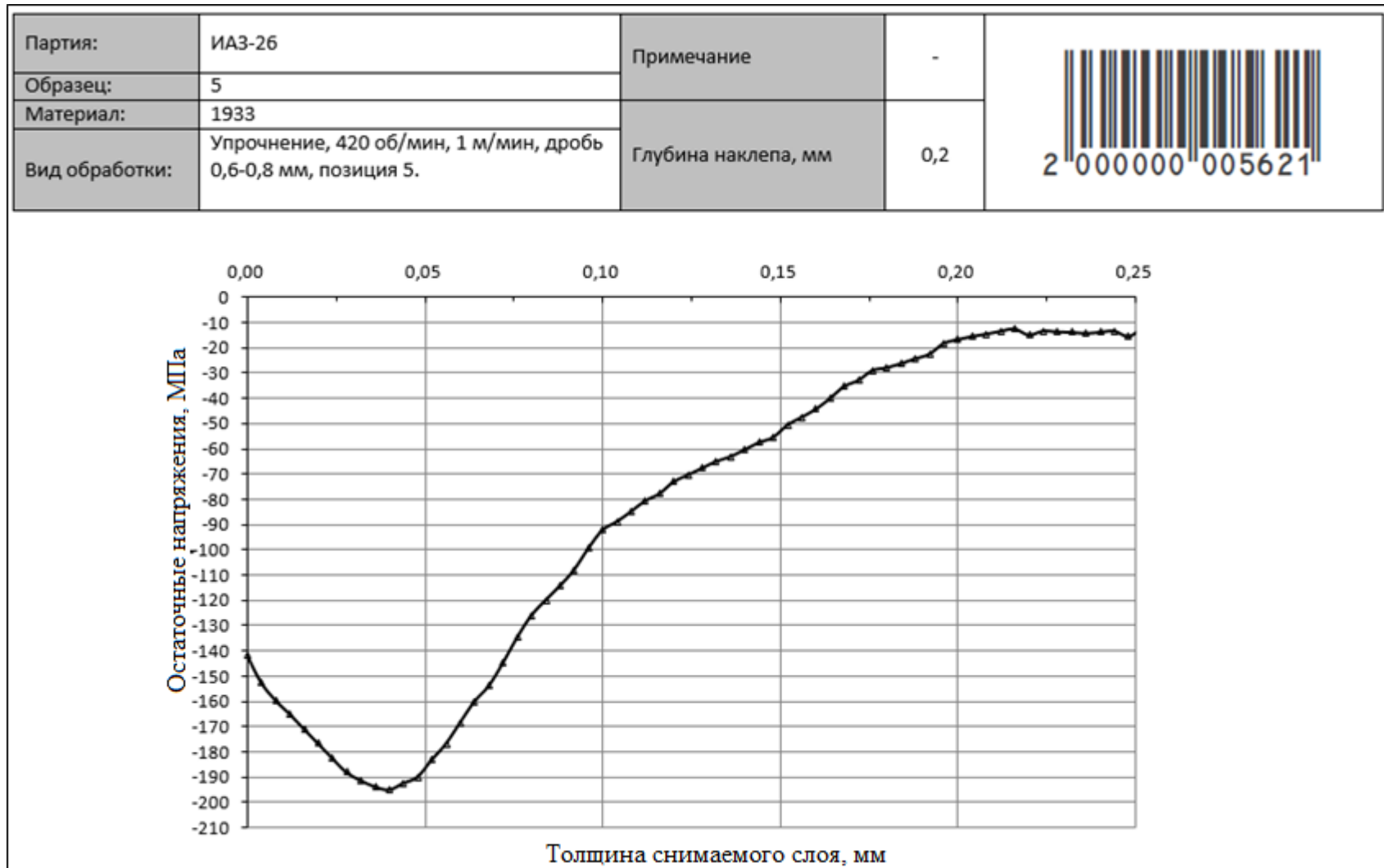


Рисунок А.6 – Протокол измерения ОН образца №5

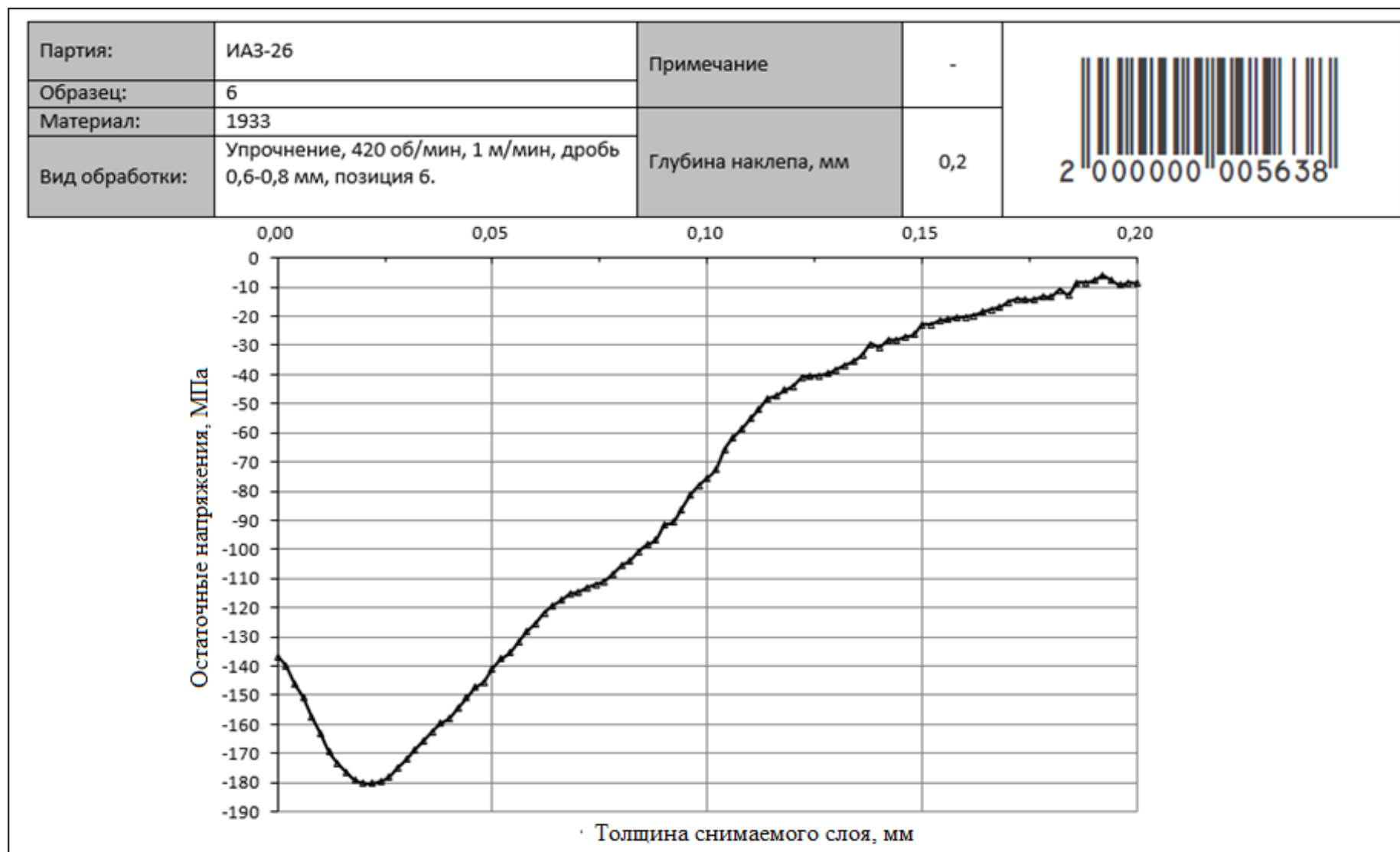


Рисунок А.7 – Протокол измерения ОН образца №6

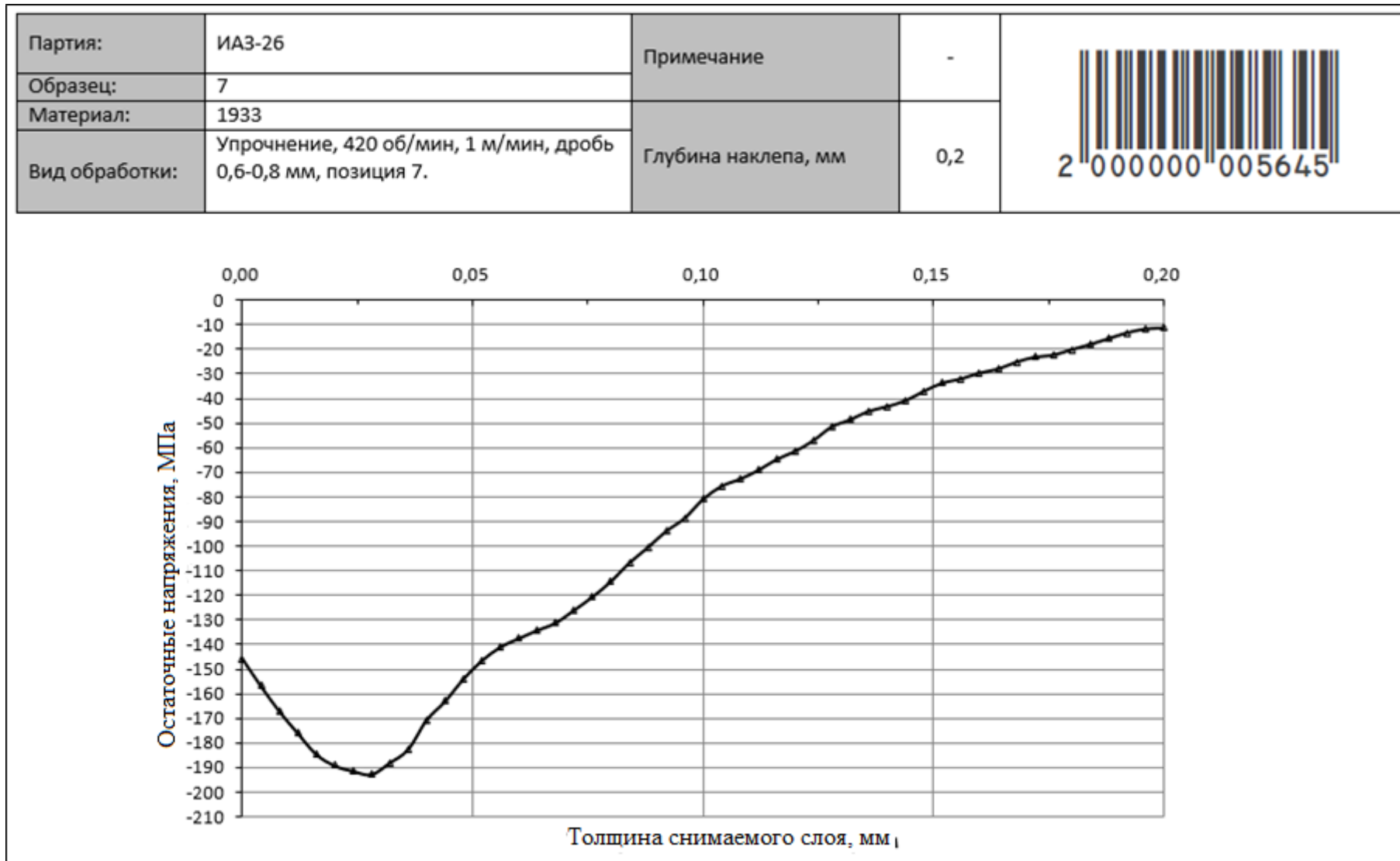


Рисунок А.8 – Протокол измерения ОН образца №7

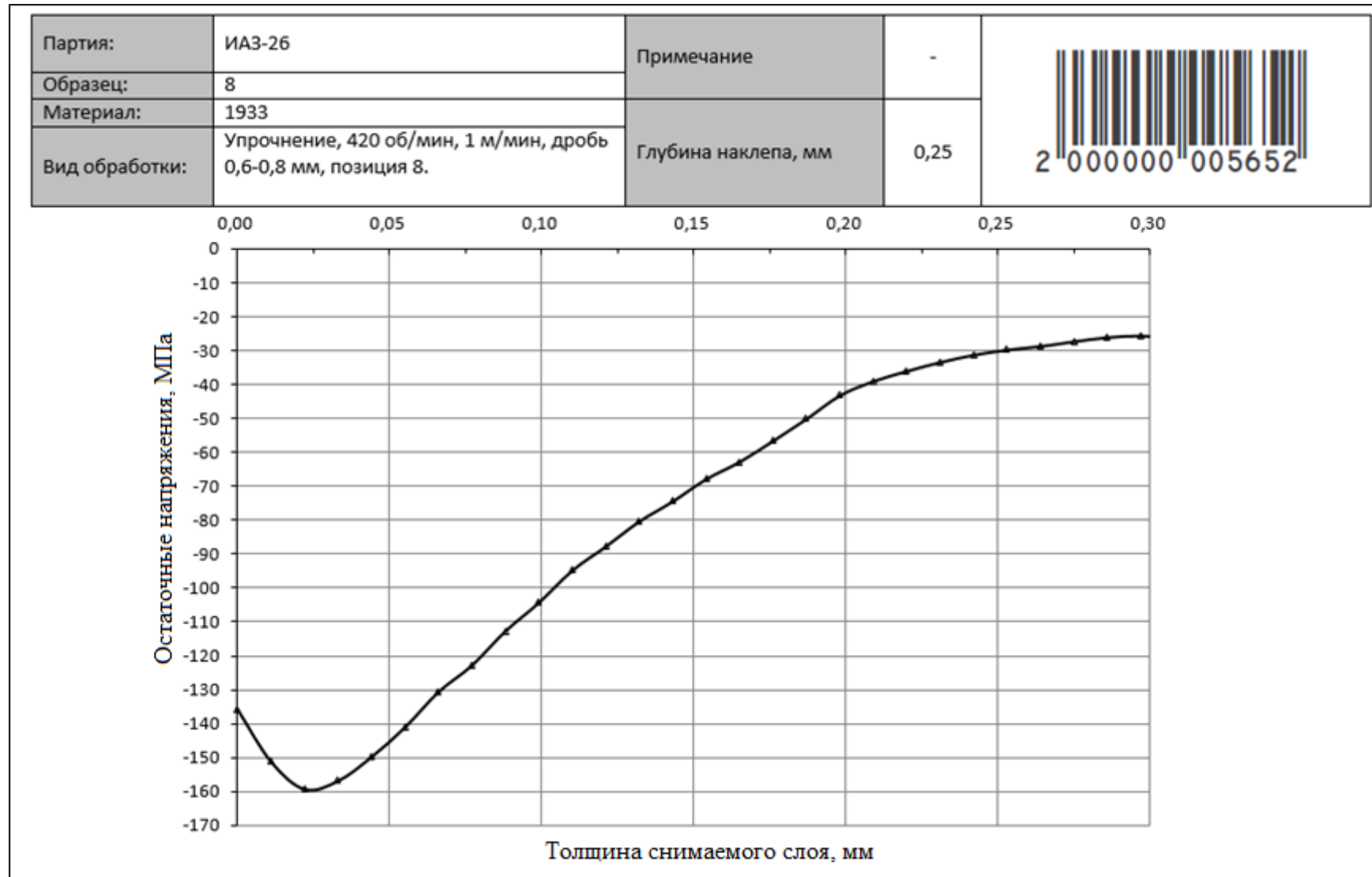


Рисунок А.9 – Протокол измерения ОН образца №8

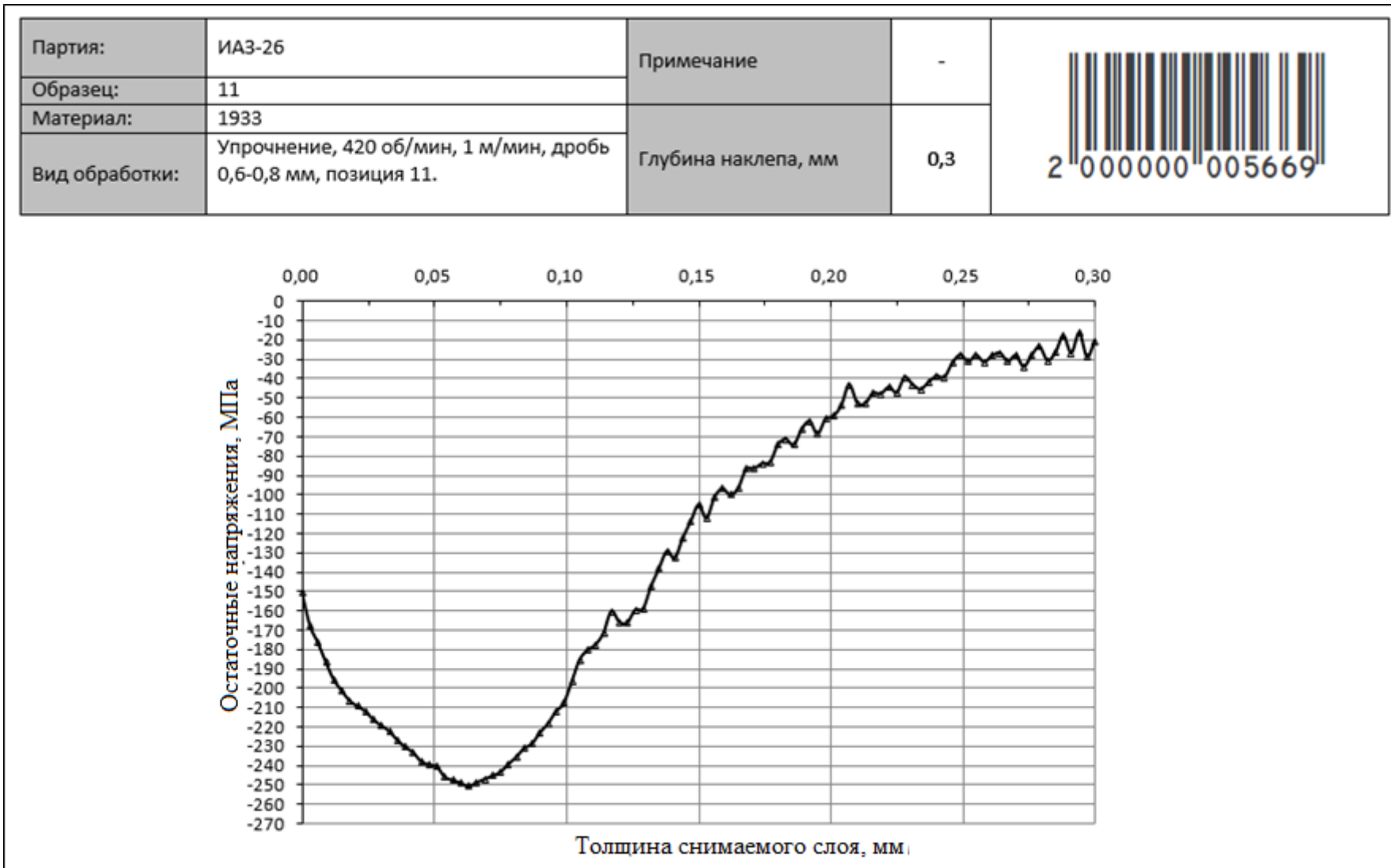


Рисунок А.10 – Протокол измерения ОН образца №11

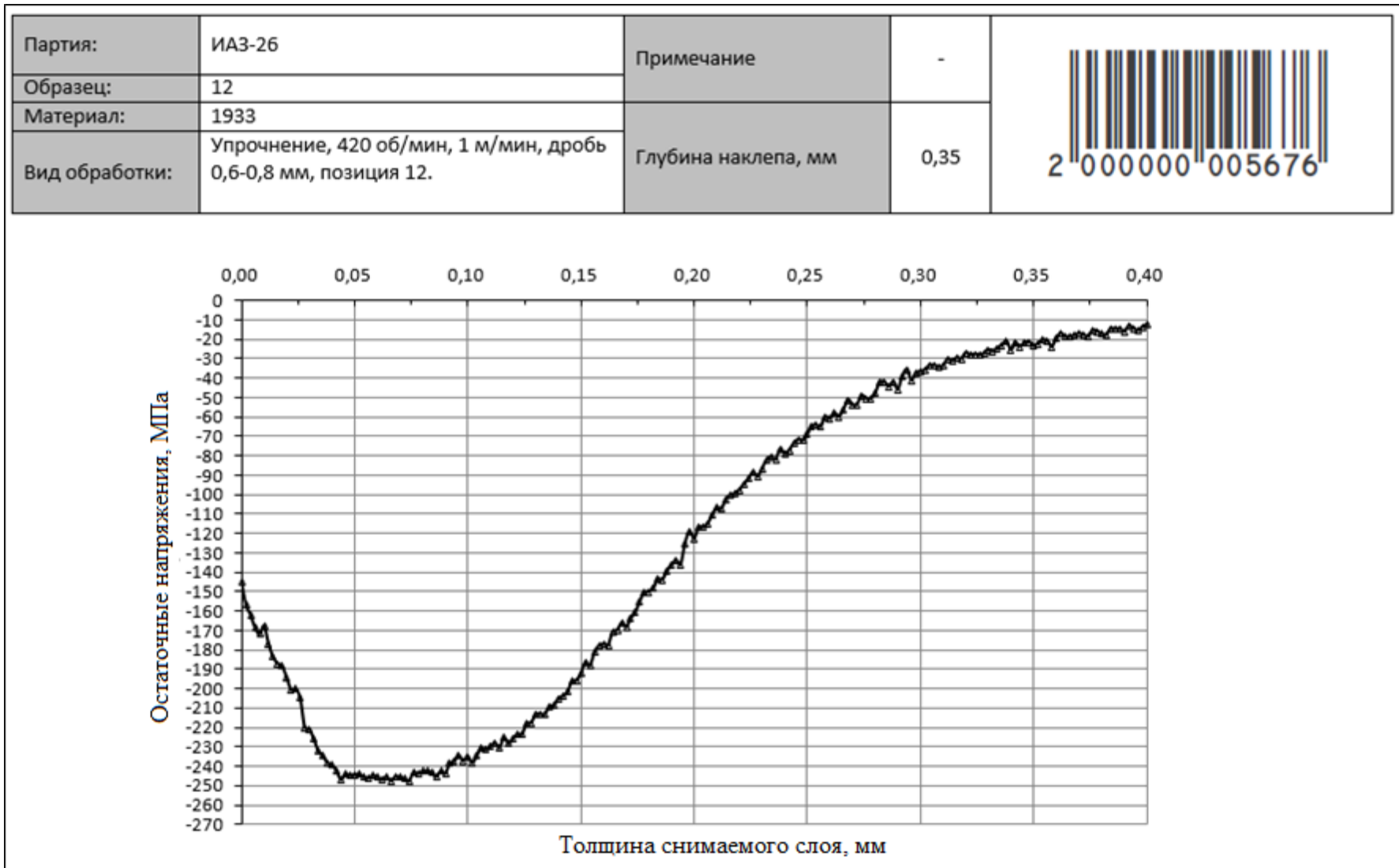


Рисунок А.11 – Протокол измерения ОН образца №12

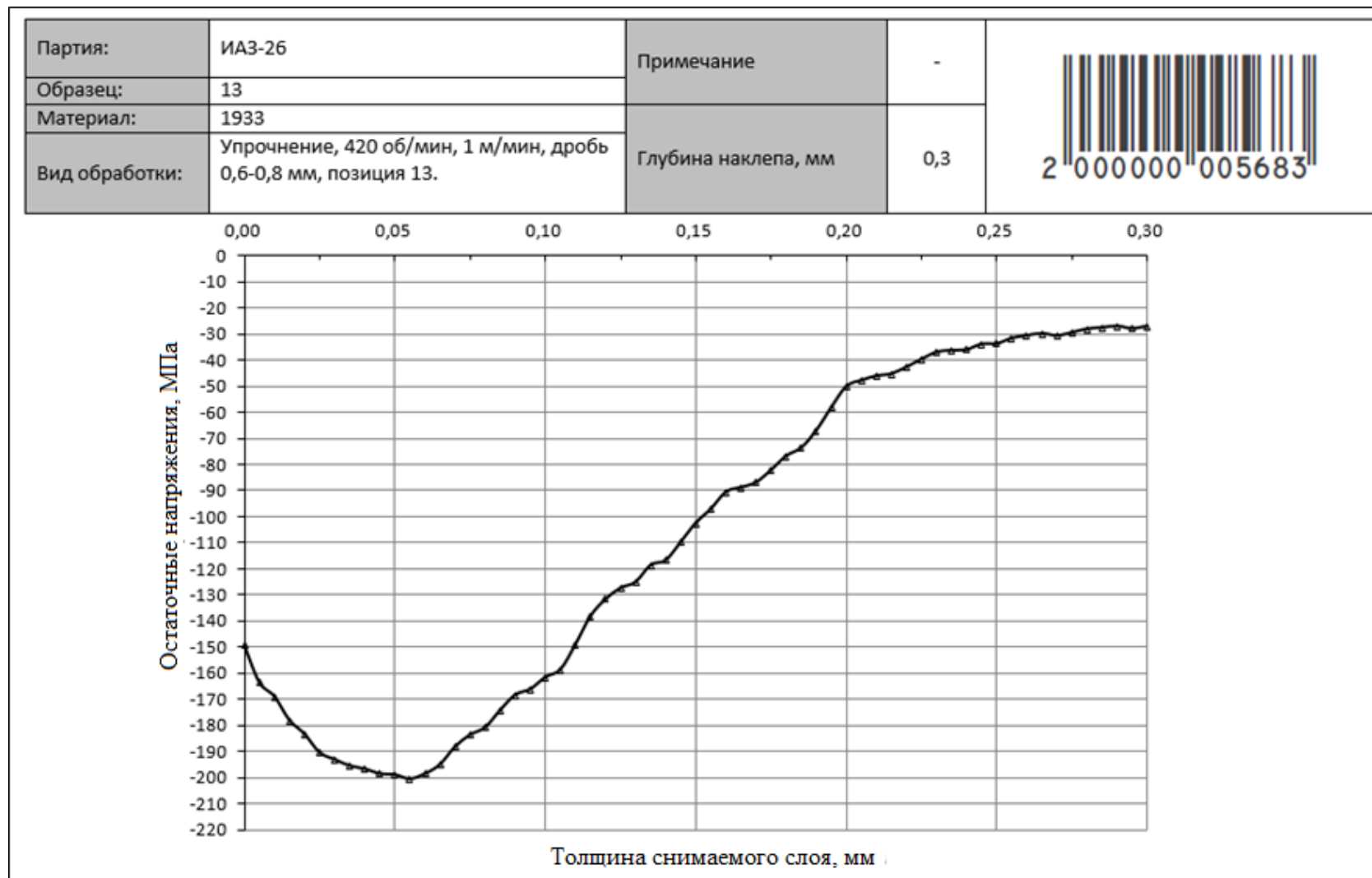


Рисунок А.12 – Протокол измерения ОН образца №13

Партия:	ИАЗ-26	Примечание	-	
Образец:	14			
Материал:	1933	Глубина наклепа, мм	0,25	
Вид обработки:	Упрочнение, 420 об/мин, 1 м/мин, дробь 0,6-0,8 мм, позиция 14.			

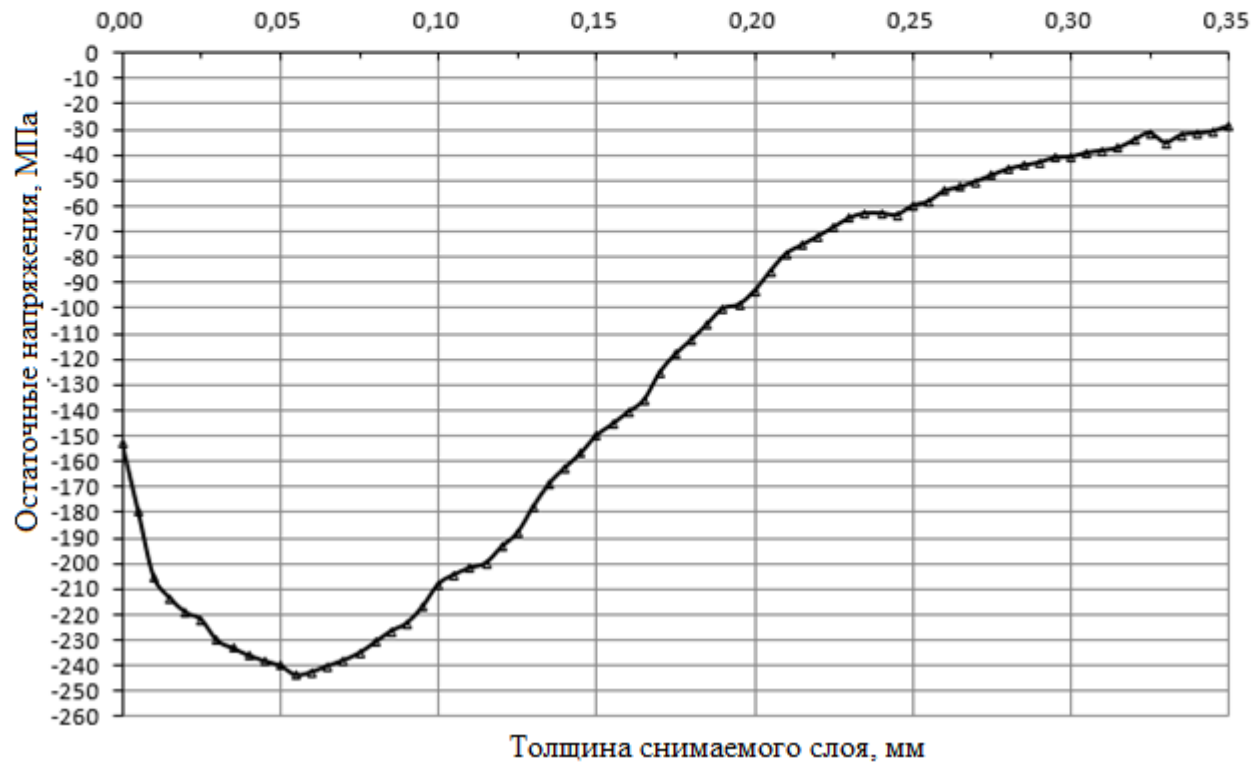


Рисунок А.13 – Протокол измерения ОН образца №14

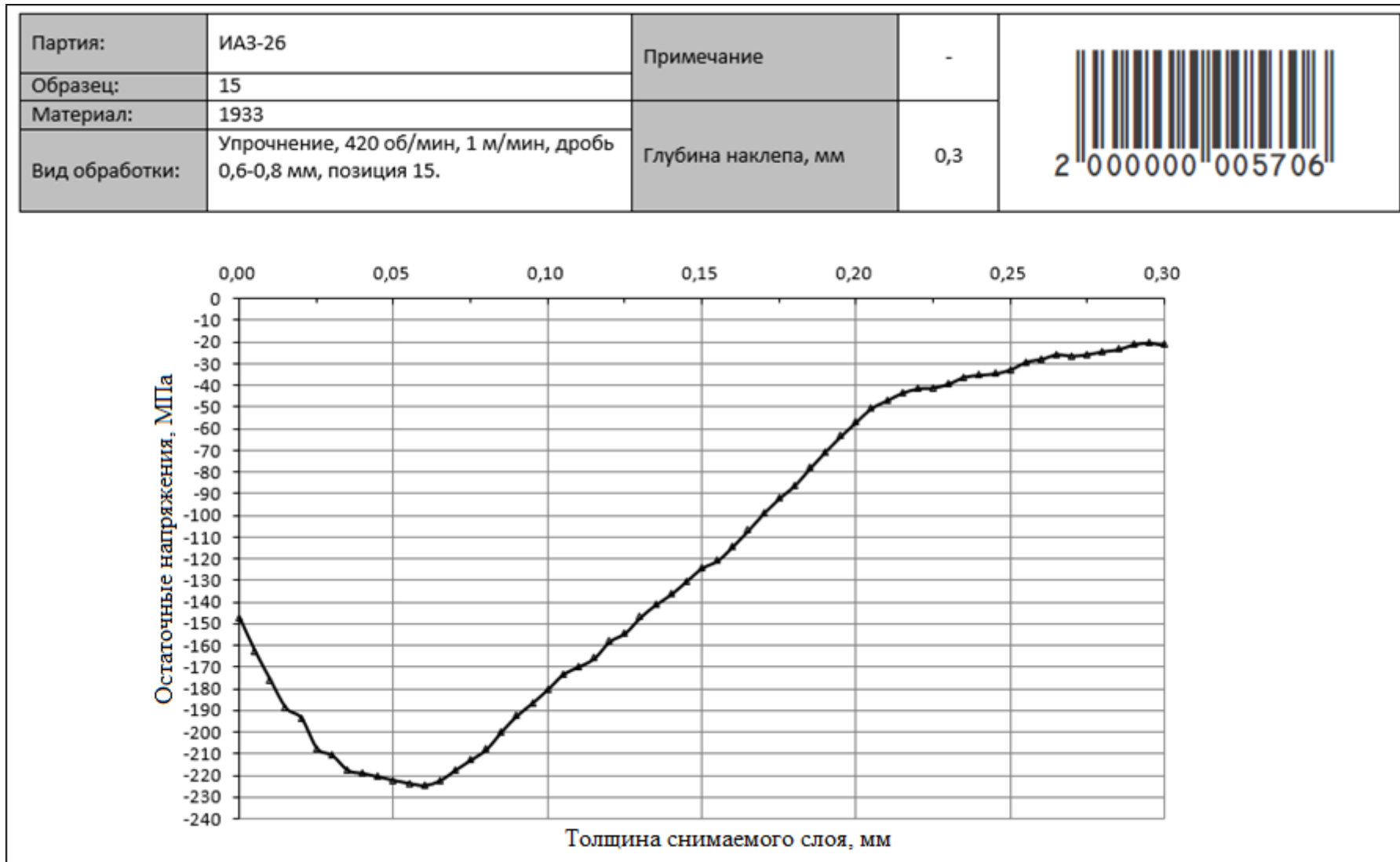


Рисунок А.14 – Протокол измерения ОН образца №15

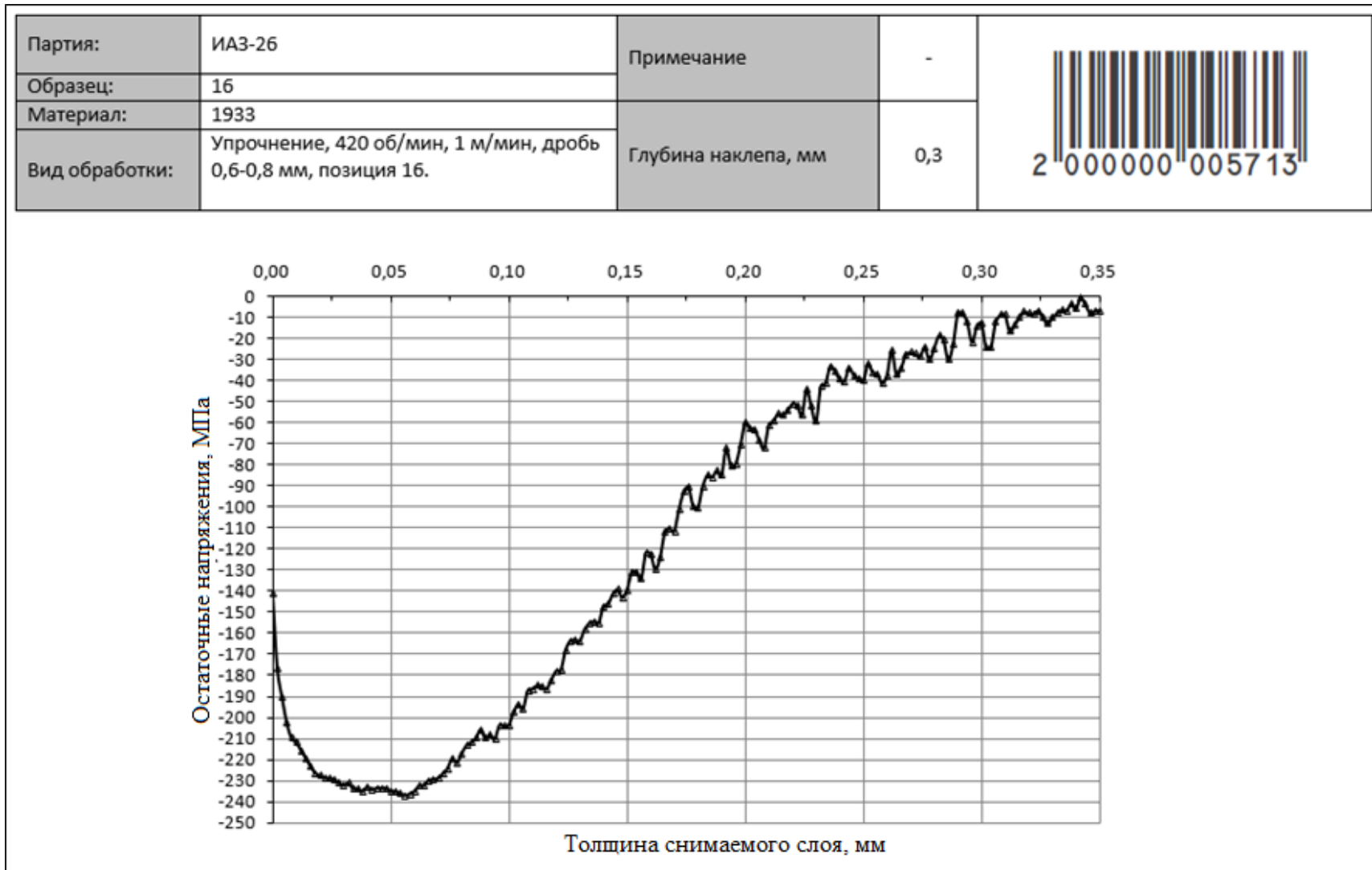


Рисунок А.15 – Протокол измерения ОН образца №16

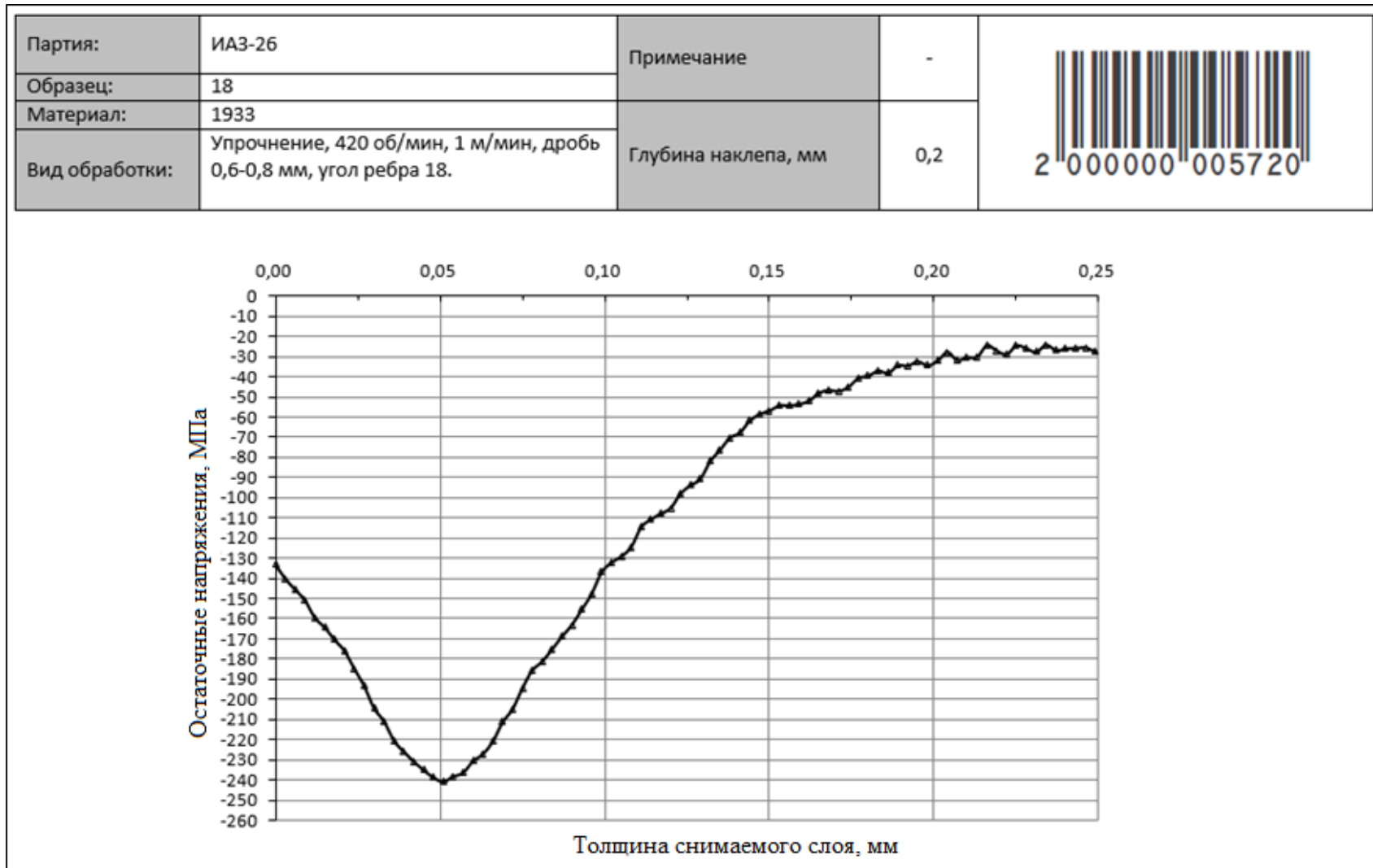


Рисунок А.16 – Протокол измерения ОН образца №18

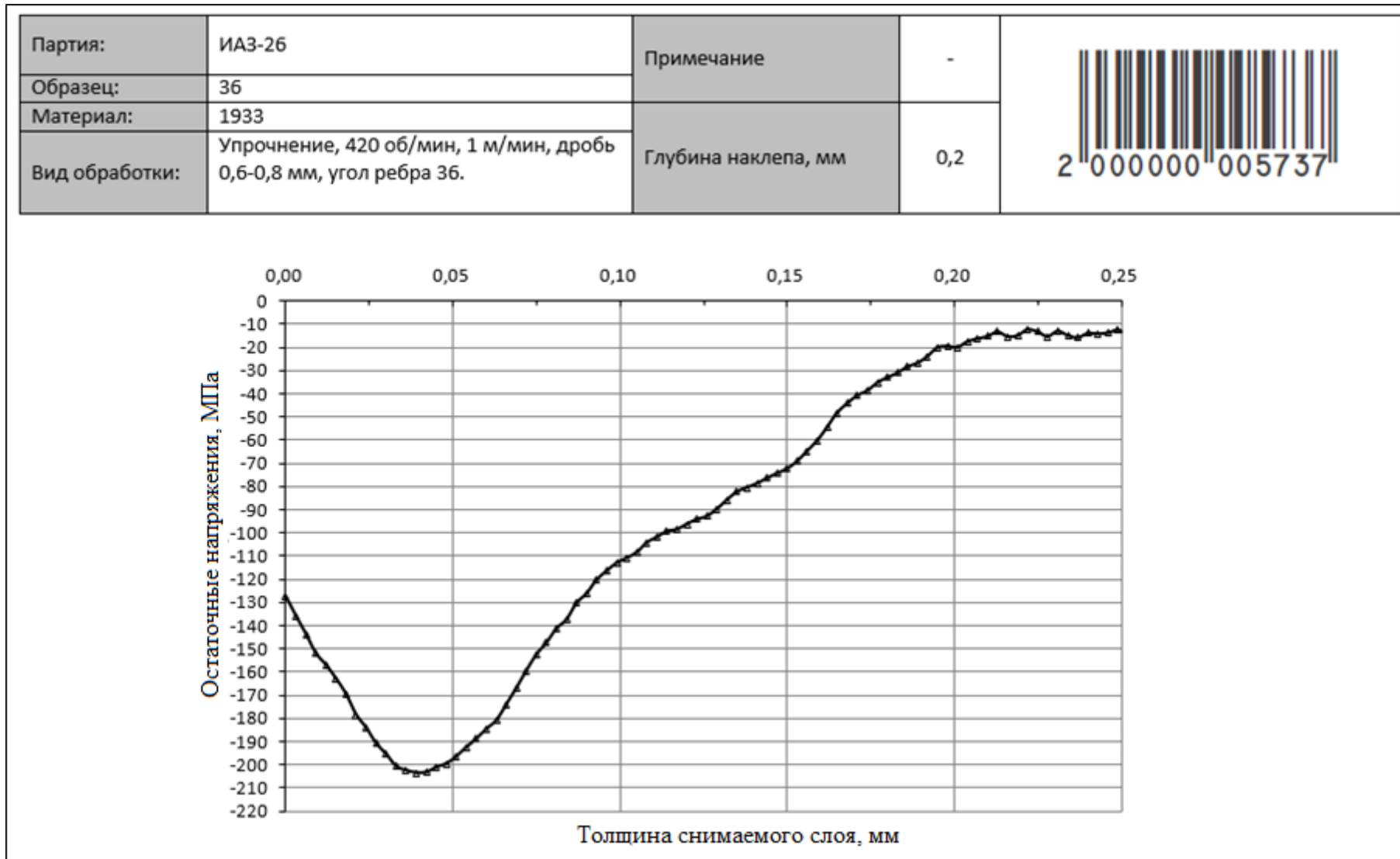


Рисунок А.17 – Протокол измерения ОН образца №36

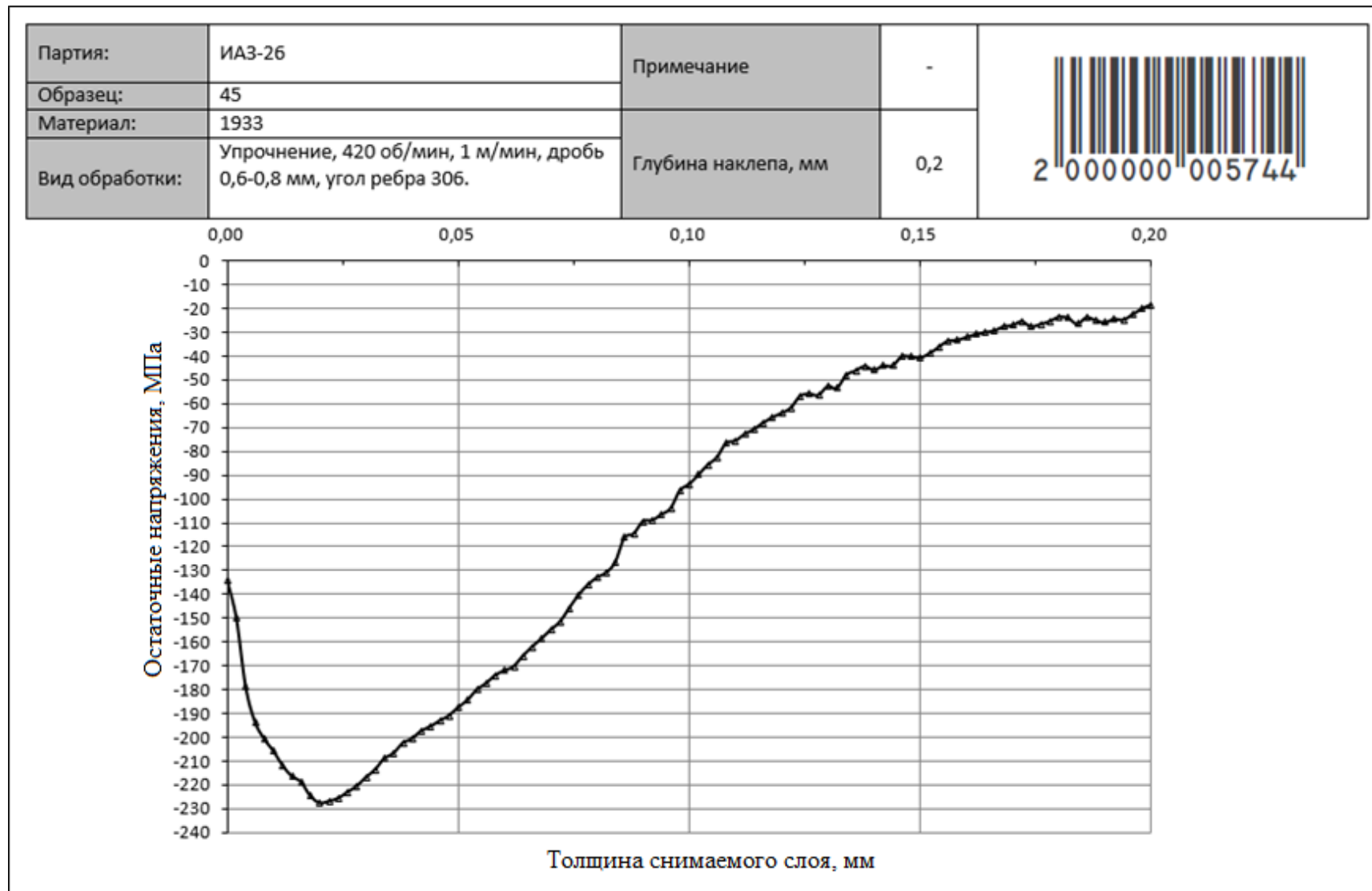



Рисунок А.18 – Протокол измерения ОН образца №45

Партия:	ИА3-26	Примечание	-	
Образец:	54			
Материал:	1933	Глубина наклепа, мм	0,18	
Вид обработки:	Упрочнение, 420 об/мин, 1 м/мин, дробь 0,6-0,8 мм, угол ребра 54.			

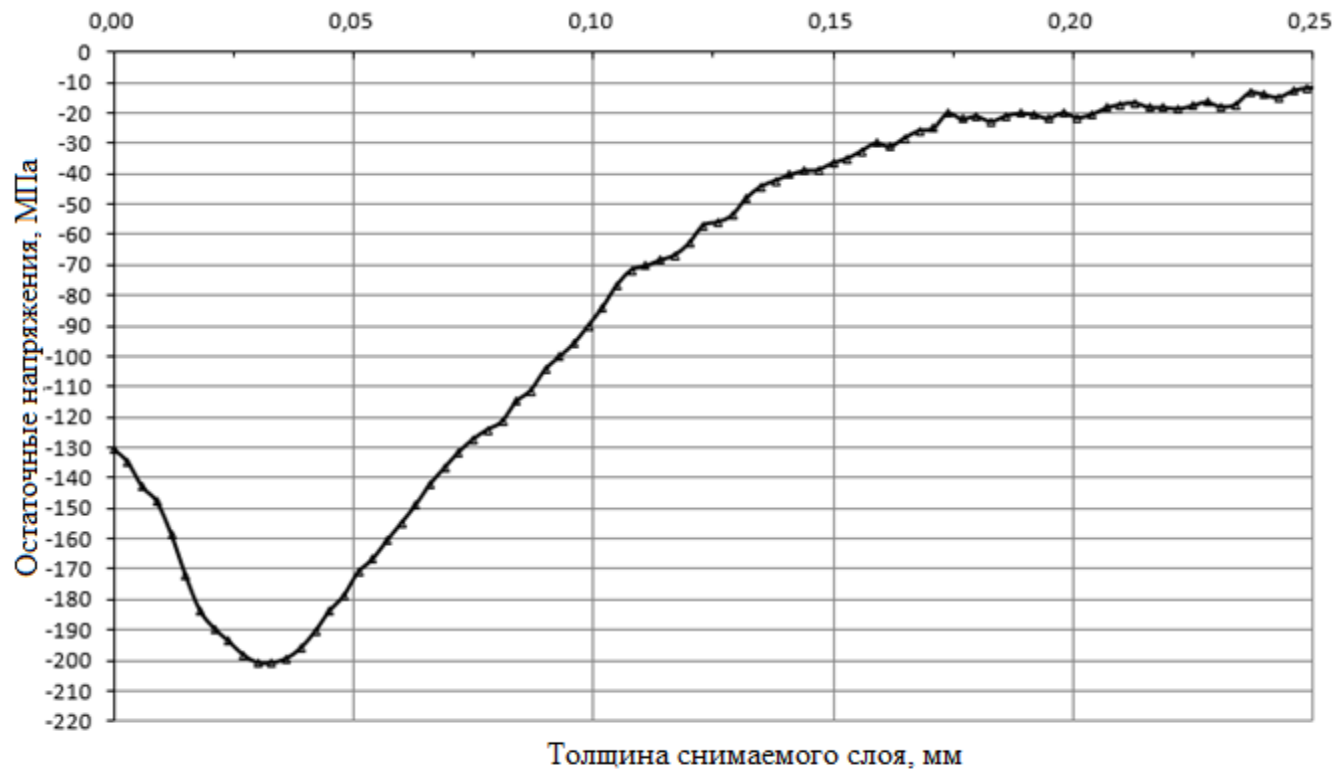


Рисунок А.19 – Протокол измерения ОН образца №54

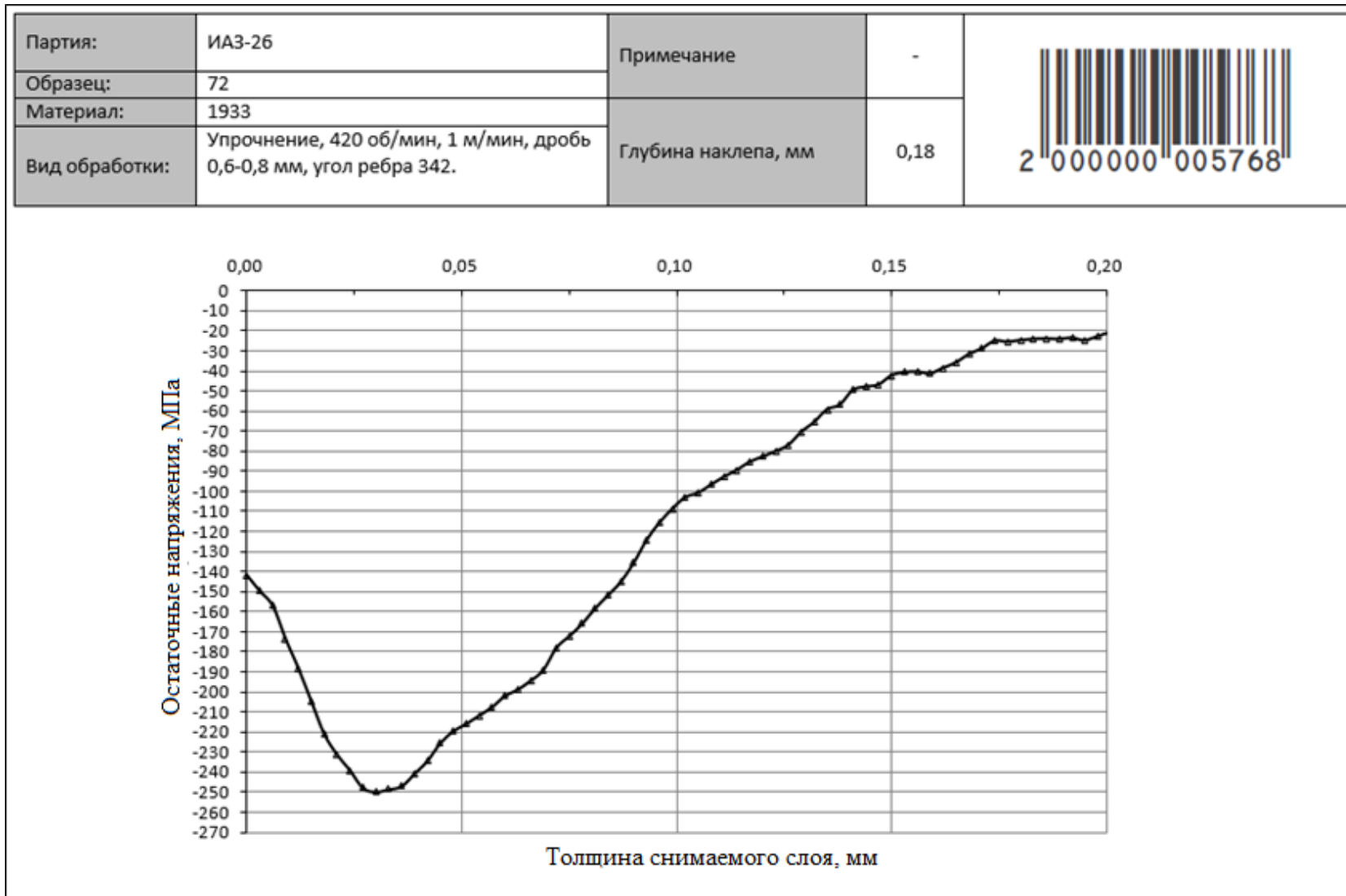


Рисунок А.20 – Протокол измерения ОН образца №72

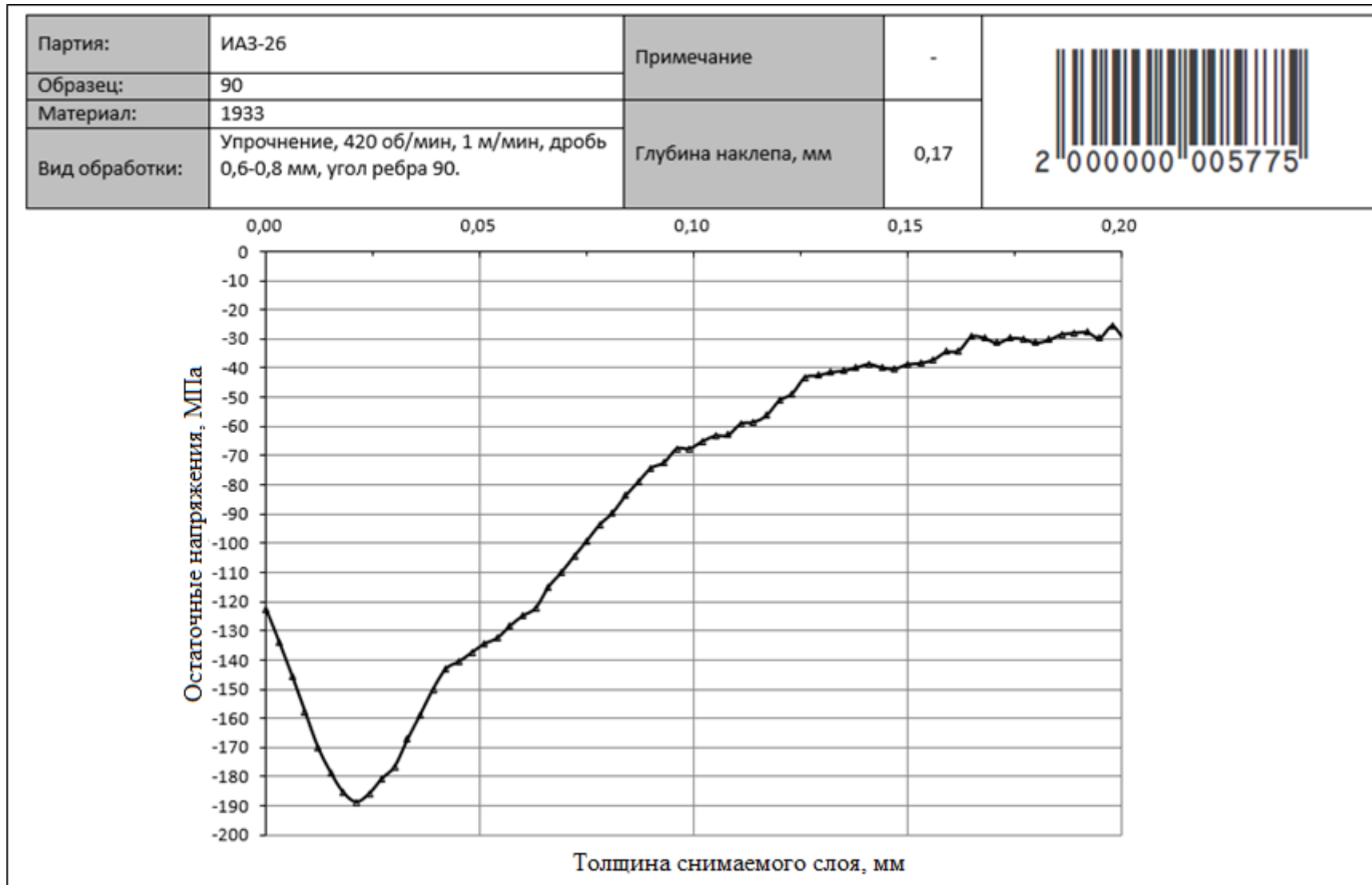


Рисунок А.21 – Протокол измерения ОН образца №90

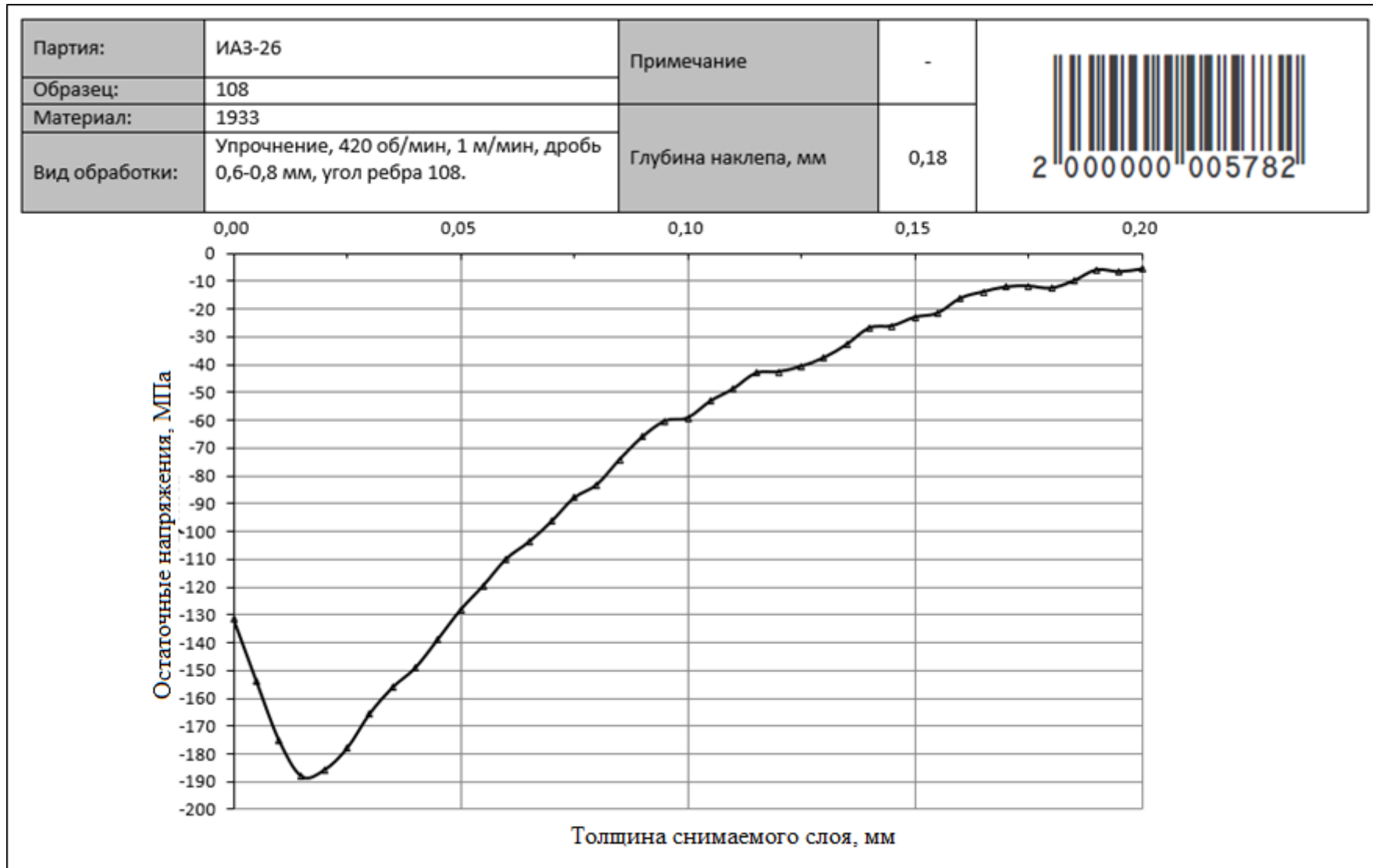


Рисунок А.22 – Протокол измерения ОН образца №108

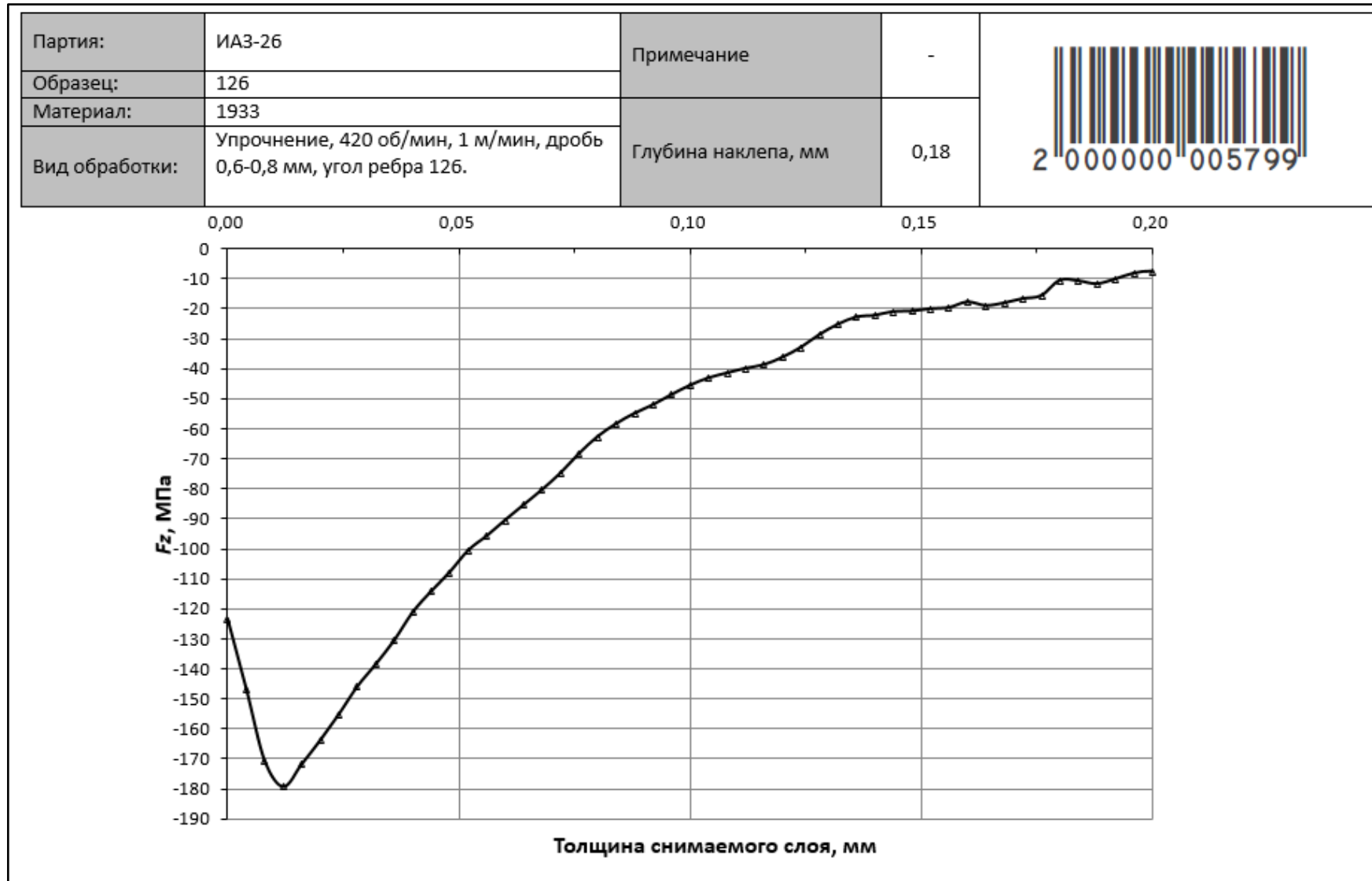


Рисунок А.23 – Протокол измерения ОН образца №126

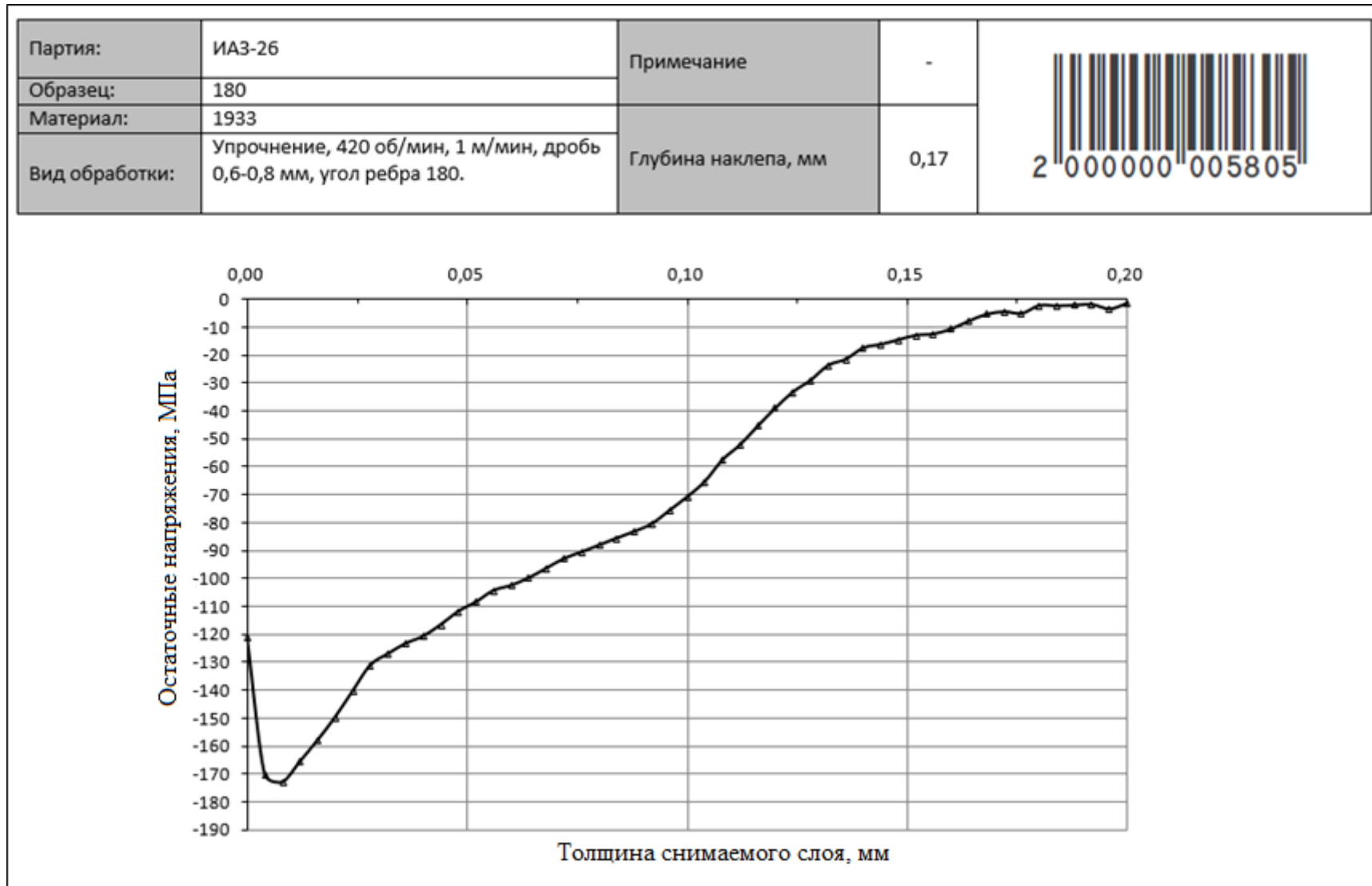


Рисунок А.24 – Протокол измерения ОН образца №180

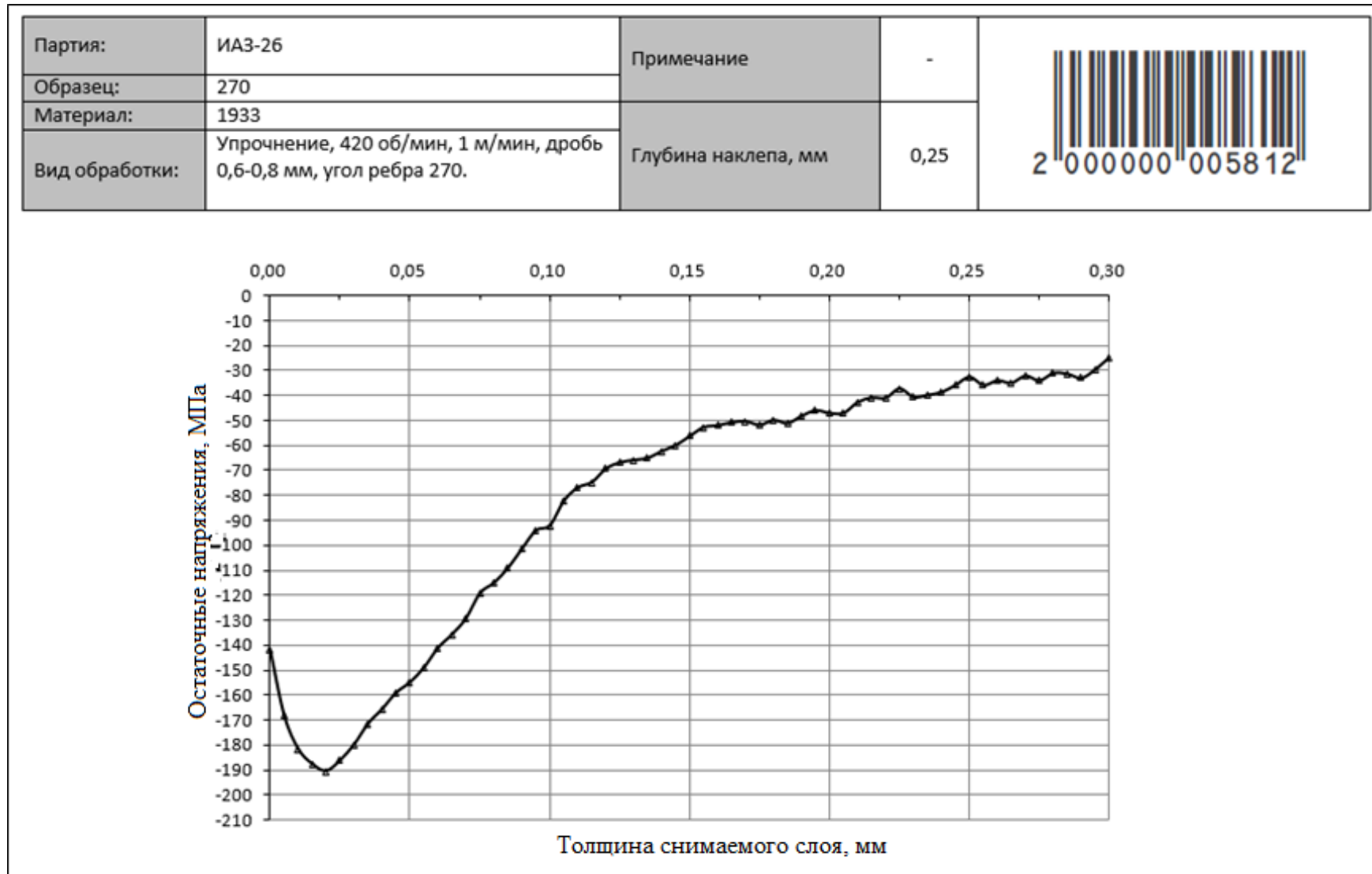


Рисунок А.25 – Протокол измерения ОН образца №270

Приложение Б

Результаты отработки технологии превентивного деформирования на КПО

Таблица Б.1 – Отклонения в контрольных точках КПО

Контролируемый параметр	Номер контрольной точки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Отклонение после механообработки КПО №1, мм	2,0	1,6	0,9	0	0	0,9	1,6	2,0	0	0,6	0,2	0
Отклонение после механообработки КПО №2, мм	2,5	1,7	0,7	0	0	0,8	1,7	2,7	0	0,9	0,7	0
Отклонение после упрочнения КПО №1, мм	2,75	2,3	1,4	0	0,05	1,25	2,4	2,8	0	0,8	0,3	0
Отклонение после раскатки роликами КПО №2, мм	0,1	0	0,1	0,3	0,15	0	0	0,3	0,8	0,4	0,05	0,2
Отклонение после дополнительной раскатки роликами КПО №2, мм (обработка ребра 1 на 7 Нм)	0,3	0	0,05	0,25	0,15	0	0	0,4	1,7	0,8	0,05	0,15
Отклонение после упрочнения КПО №2, мм	0	0,1	0,7	1	1	0,4	0,05	0	0,15	0,05	0	0,9
Отклонение после дробеструйной обработки 1 КПО №1, мм (ребра 1, 2, 3 по 1,5 атм, 3 прохода)	2,9	2,0	1,3	0,05	0	0,9	1,7	2,3	0	0,7	0,1	0
Отклонение после дробеструйной обработки 2 КПО №1, мм (ребро 1: 3 атм, 3 прохода, ребро 2: 2 атм, 3 прохода, ребро 3: 1,5 атм, 2 прохода)	2,6	1,9	1,1	0	0	0,9	1,7	2,2	0	0,75	0,05	0

Продолжение таблицы Б.1

Контролируемый параметр	Номер контрольной точки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Отклонение после дробеструйной обработки 3 КПО №1, мм (криволинейные боковые ребра по 3 атм, 3 прохода)	2,6	1,9	1,1	0	0	0,9	1,7	2,2	0	0,75	0,2	0
Отклонение после дробеструйной обработки 1 КПО №2, мм (ребра 3, 4 по 1,5 атм, 4 прохода, криволинейные боковые ребра между ребрами 3, 4 по 1,5 атм, 2 прохода)	0,05	0	0,2	0,55	0,5	0,1	0	0,1	0,3	0,1	0	0,55
Отклонение после дробеструйной обработки 2 КПО №2, мм (ребро 3: 2 атм, 3 прохода)	0,15	0	0,1	0,55	0,35	0,05	0	0,25	0,45	0,15	0	0,45
Отклонение после дробеструйной обработки 3 КПО №2, мм (криволинейные боковые ребра между ребрами 1, 3 по 1,5 атм, 3 прохода, с плоской стороны полотна под ребрами 1, 2 по 1,5 атм, 2 прохода)	0,1	0	0,1	0,4	0,35	0	0	0,2	0,3	0,15	0	0,4

Таблица Б.2 – Определение стрел прогибов КПО

Контролируемый параметр	Номер ребра КПО			
	1	2	3	4
Стрела прогиба после механообработки КПО №1 $f_{исх_№1}$, мм	-2,0	-1,0	-0,7	0
Стрела прогиба после механообработки КПО №2 $f_{исх_№2}$, мм	-2,6	-0,8	-0,1	0
Стрела прогиба после упрочнения КПО №1 $f_{упр_№1}$, мм	-2,8	-1,6	-1,0	0
Прогнозируемая при упрочнении стрела прогиба $f^{прогн} = f_{упр_№1} - f_{исх_№1}$, мм	-0,8	-0,6	-0,3	0
Требуемая при раскатке роликами стрела прогиба $f^{раск} = f_{исх_№2} + f^{прогн} $, мм	3,4	1,4	0,4	0
Требуемая при раскатке эквивалентная растягивающая сила F , Н	1763	989	431	0
Требуемый при раскатке момент затяжки силового болта раскатника 53892/5261, Нм	6	4	2	0
Фактически полученная после раскатки роликами стрела прогиба $f^{факт}$, мм	0,6	0,4	0	-0,025
Фактически полученная после дополнительной раскатки роликами стрела прогиба $f^{факт_доп}$, мм (обработка ребра 1 на 7 Нм)	1,35	0,8	0,025	-0,05
Стрела прогиба после упрочнения КПО №2 $f_{упр_№2}$, мм	0,15	-0,025	-0,55	-0,1
Стрела прогиба после дробеструйной обработки 1 КПО №1 $f_{др. обр. №1}$, мм	-2,45	-1,15	-1	-0,025
Стрела прогиба после дробеструйной обработки 2 КПО №1 $f_{др. обр. №1}$, мм	-2,25	-1,05	-0,95	0
Стрела прогиба после дробеструйной обработки 3 КПО №1 $f_{др. обр. №1}$, мм	-2,25	-1,05	-0,8	0

Продолжение таблицы Б.2

Контролируемый параметр	Номер ребра КПО			
	1	2	3	4
Стрела прогиба после дробеструйной обработки 1 КПО №2 $f_{др. обр. №2}$, мм	0,225	0,1	-0,15	0,025
Стрела прогиба после дробеструйной обработки 2 КПО №2 $f_{др. обр. №2}$, мм	0,25	0,15	-0,075	0
Стрела прогиба после дробеструйной обработки 3 КПО №2 $f_{др. обр. №2}$, мм	0,15	0,15	-0,05	0,025

Приложение В

Результаты испытаний на циклическую долговечность

Таблица В.1 – Результаты испытаний на циклическую долговечность образцов из материала 1163

Маркировка, дата испытаний	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-001 01.10.20 г.	249,61	63,84	3,91	0,4	4,0	0,1	10	синус	1238,84	80 693
TAVR 1-002 01.10.20 г.	247,51	63,79	3,88	0,4	4,0	0,1	10	синус	1256,71	74 184
TAVR 1-003 01.10.20 г.	254,80	64,02	3,98	0,4	4,0	0,1	10	синус	1198,28	62 156
TAVR 1-004 02.10.20 г.	251,05	63,88	3,93	0,4	4,0	0,1	10	синус	1222,30	65 206
2-005 02.10.20 г.	256,68	64,01	4,01	0,4	4,0	0,1	10	синус	1173,61	79 415
1-006 05.10.20 г.	253,28	63,96	3,96	0,5	5,0	0,1	10	синус	1802,32	22 881
1-007 05.10.20 г.	256,40	63,90	4,01	0,5	5,0	0,1	8	синус	1466,36	29 678

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-008 05.10.20 г.	252,56	63,94	3,95	0,5	5,0	0,1	8	синус	1513,51	33 929
TAVR 1-009 05.10.20 г.	252,56	63,94	3,95	0,5	5,0	0,1	8	синус	1562,97	39663
TAVR 1-010 05.10.20 г.	256,40	63,94	4,01	0,5	5,0	0,1	8	синус	380,32	48 502
TAVR 1-011 06.10.20 г.	255,00	63,91	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1836,21	18 266
TAVR 1-012 06.10.20 г.	254,88	63,88	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1790,45	17 940
1-013 06.10.20 г.	255,32	63,99	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1782,65	18 914
1-014 06.10.20 г.	254,40	63,92	3,88	0,6	6,0	0,1	7	синус	1832,06	20 889

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
1-015 06.10.20 г.	254,96	63,90	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1792,03	23 067
1-016 07.10.20 г.	254,44	63,93	3,98	0,4	4,0	0,1	12	синус	1192,48	84 675
1-017 07.10.20 г.	253,64	63,89	3,97	0,4	4,0	0,1	12	синус	1205,34	86 442
1-018 07.10.20 г.	255,32	63,99	3,99	0,4	4,0	0,1	12	синус	1189,23	79 387
TAVR 1-019 08.10.20 г.	254,24	63,88	3,98	0,4	4,0	0,1	12	синус	1201,18 1186,58	100 000 4 139
TAVR 1-020 08.10.20 г.	254,28	63,89	3,98	0,4	4,0	0,1	12	синус	1194,92	73 760
TAVR 1-021 08.10.20 г.	257,24	63,99	4,02	0,5	5,0	0,1	8	синус	1463,45	36 034
TAVR 1-022 09.10.20 г.	256,52	63,97	4,01	0,5	5,0	0,1	8	синус	1468,76	34 631

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-023 09.10.20 г.	254,52	63,95	3,98	0,5	5,0	0,1	8	синус	1672,39	38 917
TAVR 1-024 09.10.20 г.	253,60	63,88	3,97	0,5	5,0	0,1	8	синус	1505,53	40 934
TAVR 1-025 09.10.20 г.	255,00	63,91	3,99	0,5	5,0	0,1	8	синус	1498,87	44 387
1-026 12.10.20 г.	255,04	63,92	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1794,82	22 259
1-027 12.10.20 г.	253,96	63,97	3,97	0,6	6,0	0,1	7	синус	1866,03	25 295
1-028 12.10.20 г.	254,52	63,95	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1891,85	23 470
1-029 12.10.20 г.	255,36	64,00	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1817,51	24 822
TAVR 1-030 12.10.20 г.	254,92	63,89	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1798,53	30 091

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-031 13.10.20 г.	255,28	63,98	3,99	0,4	4,0	0,1	10	синус	1185,94	87 663
TAVR 1-032 13.10.20 г.	255,72	63,93	4,00	0,4	4,0	0,1	10	синус	1184,34	106 040
TAVR 1-033 13.10.20 г.	252,20	64,01	3,94	0,4	4,0	0,1	10	синус	1218,05	94 723
TAVR 1-034 14.10.20 г.	249,85	63,90	3,91	0,4	4,0	0,1	10	синус	1241,13	79 298
TAVR 1-035 14.10.20 г.	255,00	63,91	3,99	0,4	4,0	0,1	10	синус	1185,48	90 758
TAVR 1-036 14.10.20 г.	251,05	63,88	3,93	0,5	5,0	0,1	8	синус	1541,47	46 384
1-037 15.10.20 г.	250,57	63,92	3,92	0,5	5,0	0,1	8	синус	1538,68	46 366

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
1-038 15.10.20 г.	253,64	63,89	3,97	0,5	5,0	0,1	8	синус	1498,41	47 368
1-039 15.10.20 г.	255,32	63,99	3,99	0,5	5,0	0,1	8	синус	1477,57	52 520
1-040 15.10.20 г.	254,36	63,91	3,98	0,5	5,0	0,1	8	синус	1515,26	50 299
TAVR 1-041 15.10.20 г.	255,84	63,96	4,00	0,6	6,0	0,1	7	синус	1814,46	28 203
TAVR 1-042 16.10.20 г.	254,92	63,89	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1808,64	24 081
TAVR 1-043 16.10.20 г.	255,24	63,97	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1844,94	20 588
TAVR 1-044 16.10.20 г.	253,84	63,94	3,97	0,6	6,0	0,1	7	синус	1826,40	23 210
TAVR 1-045 16.10.20 г.	254,48	63,94	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1834,00	21 726

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-045 16.10.20 г.	254,48	63,94	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1834,00	21 726
TAVR 1-046 19.10.20 г.	254,44	63,93	3,98	0,4	4,0	0,1	10	синус	11914,75	77 334
TAVR 1-047 19.10.20 г.	253,68	63,90	3,97	0,4	4,0	0,1	10	синус	1203,62	101 064
1-048 20.10.20 г.	253,00	63,89	3,98	0,4	4,0	0,1	10	синус	1214,86	89 728
1-049 20.10.20 г.	254,44	63,93	3,96	0,4	4,0	0,1	10	синус	1205,32	101 759
1-050 20.10.20 г.	252,96	63,88	3,98	0,4	4,0	0,1	10	синус	1190,85	105 044
1-051 20.10.20 г.	252,96	63,88	3,96	0,5	5,0	0,1	8	синус	1529,27	60 562
TAVR 1-052 21.10.20 г.	254,08	63,84	3,98	0,5	5,0	0,1	8	синус	1510,35	43 825

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-053 21.10.20 г.	254,64	63,98	3,98	0,5	5,0	0,1	8	синус	1509,69	51 138
TAVR 1-054 22.10.20 г.	253,96	63,97	3,97	0,5	5,0	0,1	8	синус	1532,97	52 198
TAVR 1-055 22.10.20 г.	252,25	63,86	3,95	0,5	5,0	0,1	8	синус	1527,73	44 304
TAVR 1-056 22.10.20 г.	254,16	63,86	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1815,55	30 456
TAVR 1-057 22.10.20 г.	254,92	63,89	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1828,96	29 483
TAVR 1-058 23.10.20 г.	254,36	63,91	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1798,85	22 340
1-059 23.10.20 г.	256,52	63,97	4,01	0,6	6,0	0,1	7	синус	1816,21	24 756

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
1-060 23.10.20 г.	252,36	63,89	3,95	0,6	6,0	0,1	7	синус	1851,66	20 350
1-061 23.10.20 г.	253,04	63,90	3,96	0,4	4,0	0,1	10	синус	1204,29	104 030
1-062 26.10.20 г.	250,08	63,96	3,91	0,4	4,0	0,1	10	синус	1239,61	102 871
TAVR 1-063 26.10.20 г.	255,28	63,98	3,99	0,4	4,0	0,1	10	синус	1184,54	134 486
TAVR 1-064 26.10.20 г.	253,33	63,81	3,97	0,4	4,0	0,1	10	синус	1837,21	92 669
TAVR 1-065 27.10.20 г.	254,48	63,84	3,98	0,4	4,0	0,1	10	синус	1192,00	109 227
TAVR 1-066 27.10.20 г.	251,92	63,94	3,94	0,5	5,0	0,1	8	синус	1553,08	48 707
TAVR 1-067 27.10.20 г.	251,05	63,88	3,93	0,5	5,0	0,1	8	синус	1576,21	49 269

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-068	252,29	63,87	3,95	0,5	5,0	0,1	8	синус	1523,80	51 220
TAVR 1-069 28.10.20 г.	254,28	63,89	3,98	0,5	5,0	0,1	8	синус	1492,45	49 390
1-070 28.10.20 г.	254,52	63,95	3,98	0,5	5,0	0,1	8	синус	1487,39	46 492
1-071 28.10.20 г.	254,96	63,90	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1802,17	32 459
1-072 29.10.20 г.	254,40	63,92	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1844,02	23 828
1-073 29.10.20 г.	253,36	63,98	3,96	0,6	6,0	0,1	7	синус	1822,90	27 257
TAVR 1-074 29.10.20 г.	252,48	63,92	3,95	0,6	6,0	0,1	7	синус	1852,34	28 926
TAVR 1-075 29.10.20 г.	254,00	63,98	3,97	0,6	6,0	0,1	7	синус	1815,99	24 159
TAVR 1-076	249,52	63,98	3,90	0,4	4,0	0,1	10	синус	1238,33	81 146

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-077 30.10.20 г.	254,92	63,89	3,99	0,4	4,0	0,1	10	синус	1186,72	126 208
TAVR 1-078 30.10.20 г.	249,89	63,91	3,91	0,4	4,0	0,1	10	синус	1239,81	90 562
TAVR 1-079 30.10.20 г.	249,85	63,90	3,91	0,4	4,0	0,1	10	синус	1246,56	119 787
TAVR 1-080 02.11.20 г.	252,33	63,88	3,95	0,4	4,0	0,1	10	синус	1216,42	113 306
1-081 03.11.20 г.	253,80	63,93	3,97	0,5	5,0	0,1	8	синус	1543,80	65 372
1-082 03.11.20 г.	255,04	63,92	3,99	0,5	5,0	0,1	8	синус	1529,39	38 884
1-083 03.11.20 г.	254,68	63,99	3,98	0,5	5,0	0,1	8	синус	1496,97	56 729
1-084 05.11.20 г.	251,69	63,88	3,94	0,5	5,0	0,1	8	синус	1548,78	43 744

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-085 05.11.20 г.	253,12	63,92	3,96	0,5	5,0	0,1	8	синус	1527,00	52 785
TAVR 1-086 05.11.20 г.	253,60	63,88	3,97	0,6	6,0	0,1	7	синус	2129,12	21 254
TAVR 1-087 05.11.20 г.	252,92	63,87	3,96	0,6	6,0	0,1	7	синус	1898,50	28 307
TAVR 1-088 06.11.20 г.	254,32	63,90	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1828,41	24 169
TAVR 1-089 06.11.20 г.	254,92	63,89	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1815,51	27 373
TAVR 1-090 06.11.20 г.	254,24	63,88	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1839,24	24 730
TAVR 1-091 06.11.20 г.	248,65	63,92	3,89	0,4	4,0	0,1	10	синус	1267,65	94 077

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
1-092 09.11.20 г.	252,88	63,86	3,95	0,4	4,0	0,1	10	синус	1226,87	97 157
1-093 09.11.20 г.	248,49	63,88	3,89	0,4	4,0	0,1	10	синус	1263,43	98 718
1-094 09.11.20 г.	251,92	63,94	3,94	0,4	4,0	0,1	10	синус	1215,76	103 990
1-095 10.11.20 г.	253,00	63,89	3,96	0,4	4,0	0,1	10	синус	1203,51	137 722
TAVR 1-096 11.11.20 г.	251,73	63,89	3,94	0,5	5,0	0,1	8	синус	1525,16	49 252
TAVR 1-097 11.11.20 г.	255,28	63,98	3,99	0,5	5,0	0,1	8	синус	1544,35	45 593
TAVR 1-098 12.11.20 г.	253,52	63,86	3,97	0,5	5,0	0,1	8	синус	1545,51	52 834
TAVR 1-099 12.11.20 г.	254,72	63,84	3,99	0,5	5,0	0,1	8	синус	1527,33	50 219

Продолжение таблицы В.1

Маркировка, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 1-100 12.11.20 г.	253,40	63,99	3,96	0,5	5,0	0,1	8	синус	1530,59	44 618
TAVR 1-101 12.11.20 г.	253,28	63,96	3,96	0,6	6,0	1,0	7	синус	1869,90	56 638
TAVR 1-102 13.11.20 г.	253,84	63,94	3,97	0,6	6,0	1,0	7	синус	1823,95	27 238
TAVR 1-103 13.11.20 г.	252,48	63,92	3,95	0,6	6,0	1,0	7	синус	1861,13	36 454
TAVR 1-104 13.11.20 г.	252,88	63,86	3,96	0,6	6,0	1,0	7	синус	1829,78	26 454
1-105 13.11.20 г.	251,53	63,84	3,94	0,6	6,0	1,0	7	синус	1848,34	22 003

Таблица В.2 – Результаты испытаний на циклическую долговечность образцов из материала 1933

Маркировка ИЛ, дата испытания	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения, кН	Максимальная сила нагружения, кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-001 01.06.20 г.	267,56	64,01	4,18	0,4	4,0	0,1	10	синус	1079,59	56 207
TAVR 2-002 01.06.20 г.	268,93	64,03	4,20	0,4	4,0	0,1	10	синус	1068,50	54 692
TAVR 2-003 01.06.20 г.	266,86	64,15	4,16	0,4	4,0	0,1	10	синус	1089,68	45 587
TAVR 2-004 21.07.20 г.	266,99	63,93	4,02	0,4	4,0	0,1	10	синус	1166,07	50 117
TAVR 2-005 21.07.20 г.	262,44	64,01	4,10	0,4	4,0	0,1	10	синус	1122,95	61 580
TAVR 2-006 24.08.20 г.	255,36	64,16	3,98	0,5	5,0	0,1	10	синус	1481,84	21 623
2-007 24.08.20 г.	264,50	64,20	4,12	0,5	5,0	0,1	8	синус	1385,23	25 206
2-008 24.08.20 г.	257,76	64,12	4,02	0,5	5,0	0,1	8	синус	1455,42	23 358

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-009 25.08.20 г.	266,91	64,16	4,16	0,5	5,0	0,1	8	синус	1357,18	21 879
TAVR 2-010 25.08.20 г.	251,62	64,19	3,92	0,5	5,0	0,1	8	синус	1525,75	23 130
TAVR 2-011 25.08.20 г.	255,04	63,92	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1778,09	13 853
TAVR 2-012 26.08.20 г.	265,13	64,04	4,14	0,6	6,0	0,1	7	синус	1645,42	13 910
TAVR 2-013 26.08.20 г.	256,13	64,03	4,00	0,6	6,0	0,1	7	синус	1764,70	22 414
TAVR 2-014 26.08.20 г.	252,67	64,13	3,94	0,6	6,0	0,1	7	синус	1812,00	12 635
TAVR 2-015 26.08.20 г.	259,28	64,02	4,05	0,6	6,0	0,1	7	синус	1717,31	4 412

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-016 27.08.20 г.	258,12	64,05	4,03	0,4	4,0	0,1	12	синус	1159,74	113 492
TAVR 2-017 27.08.20 г.	258,57	64,16	4,03	0,4	4,0	0,1	12	синус	1157,15	119 344
2-018 28.08.20 г.	253,52	64,02	3,96	0,4	4,0	0,1	12	синус	1202,68	56 296
TAVR 2-019 28.08.20 г.	258,92	64,09	4,04	0,4	4,0	0,1	12	синус	1155,22	91 210
TAVR 2-020 28.08.20 г.	257,08	63,95	4,02	0,4	4,0	0,1	12	синус	1676,06	90 862
TAVR 2-021 31.08.20 г.	257,40	64,03	4,02	0,5	5,0	0,1	8	синус	1468,67	41 284
TAVR 2-022 31.08.20 г.	258,68	64,03	4,04	0,5	5,0	0,1	8	синус	1446,02	41 523
TAVR 2-023	256,76	64,03	4,01	0,5	5,0	0,1	8	синус	1474,92	32 430

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-024 01.09.20 г.	255,40	64,01	3,99	0,5	5,0	0,1	8	синус	1499,44	25 677
TAVR 2-025 01.09.20 г.	254,28	64,05	3,97	0,5	5,0	0,1	8	синус	1497,99	37 533
2-026 01.09.20 г.	255,04	64,08	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1799,80	17 372
2-027 01.09.20 г.	252,80	64,00	3,95	0,6	6,0	0,1	7	синус	1817,35	19 199
2-028 02.09.20 г.	254,52	63,95	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1830,91	18 176
2-029 02.09.20 г.	248,47	63,71	3,90	0,6	6,0	0,1	7	синус	1862,66	14 453
TAVR 2-030 02.09.20 г.	254,08	63,84	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1793,23	46 331
TAVR 2-031 02.09.20 г.	251,36	63,96	3,93	0,4	4,0	0,1	10	синус	1219,53	97 619

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-032 03.09.20 г.	260,03	63,89	4,07	0,4	4,0	0,1	10	синус	1142,23	94 046
TAVR 2-033 03.09.20 г.	252,32	64,04	3,94	0,4	4,0	0,1	10	синус	1210,40	84 545
TAVR 2-034 03.09.20 г.	254,72	64,00	3,98	0,4	4,0	0,1	10	синус	1191,24	62 306
TAVR 2-035 04.09.20 г.	252,72	63,98	3,95	0,4	4,0	0,1	10	синус	1214,80	74 561
TAVR 2-036 04.09.20 г.	255,44	63,86	4,00	0,5	5,0	0,1	8	синус	1496,01	33 099
2-037 04.09.20 г.	257,04	64,10	4,01	0,5	5,0	0,1	8	синус	1464,26	30 408
2-038 04.09.20 г.	254,32	63,90	3,98	0,5	5,0	0,1	8	синус	1507,82	38 811
2-039 07.09.20 г.	249,97	63,93	3,91	0,5	5,0	0,1	8	синус	1543,00	29 727

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
2-040 07.09.20 г.	253,13	63,76	3,97	0,5	5,0	0,1	8	синус	1553,62	20 106
TAVR 2-041 07.09.20 г.	260,21	64,09	4,06	0,6	6,0	0,1	7	синус	1732,95	16 136
TAVR 2-042 07.09.20 г.	257,60	63,92	4,03	0,6	6,0	0,1	7	синус	1794,71	15 212
TAVR 2-043 07.09.20 г.	254,48	63,94	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1837,69	20 422
TAVR 2-044 08.09.20 г.	253,76	63,92	3,97	0,6	6,0	0,1	7	синус	1798,74	13 532
TAVR 2-045 08.09.20 г.	249,04	64,02	3,89	0,6	6,0	0,1	7	синус	4706,26	19 502
TAVR 2-046 08.09.20 г.	255,00	63,91	3,99	0,4	4,0	0,1	10	синус	1185,18	62 026
TAVR 2-047	253,40	63,99	3,96	0,4	4,0	0,1	10	синус	1208,31	61 259

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
2-048 09.09.20 г.	250,33	63,86	3,92	0,4	4,0	0,1	10	синус	1230,69	72 218
2-049 09.09.20 г.	248,65	63,92	3,89	0,4	4,0	0,1	10	синус	1254,87	42 863
2-050 09.09.20 г.	254,00	63,66	3,99	0,4	4,0	0,1	10	синус	1191,67	43922
2-051 09.09.20 г.	253,68	3,96	3,96	0,5	5,0	0,1	8	синус	1503,27	28 194
TAVR 2-052 09.09.20 г.	253,60	64,04	3,96	0,5	5,0	0,1	8	синус	1520,82	16 326
TAVR 2-053 10.09.20 г.	257,40	64,03	4,02	0,5	5,0	0,1	8	синус	1475,66	28 257
TAVR 2-054 10.09.20 г.	257,56	63,91	4,03	0,5	5,0	0,1	8	синус	1470,37	27 894
TAVR 2-055 10.09.20 г.	256,84	63,89	4,02	0,5	5,0	0,1	8	синус	1492,81	38 760

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-056 10.09.20 г.	255,40	63,85	4,00	0,6	6,0	0,1	7	синус	1826,71	11 270
TAVR 2-057 10.09.20 г.	250,40	64,04	3,91	0,6	6,0	0,1	7	синус	1860,32	14 504
TAVR 2-058 11.09.20 г.	252,37	63,89	3,95	0,6	6,0	0,1	7	синус	1842,75	11 876
2-059 11.09.20 г.	247,78	63,86	3,88	0,6	6,0	0,1	7	синус	1900,66	18 281
2-060 11.09.20 г.	255,52	63,88	4,00	0,6	6,0	0,1	7	синус	1850,94	20 030
2-061 11.09.20 г.	251,01	63,87	3,93	0,4	4,0	0,1	10	синус	1224,31	62 435
2-062 14.09.20 г.	251,61	63,86	3,94	0,4	4,0	0,1	10	синус	1217,92	91 682
TAVR 2-063 14.09.20 г.	252,24	64,02	3,94	0,4	4,0	0,1	10	синус	1223,71	100 811

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-064 14.09.20 г.	258,00	64,02	4,03	0,4	4,0	0,1	10	синус	1159,05	49 772
TAVR 2-065 14.09.20 г.	254,64	63,98	3,98	0,4	4,0	0,1	10	синус	1158,75	80 669
TAVR 2-066 15.09.20 г.	257,48	64,05	4,02	0,5	5,0	0,1	8	синус	1481,74	32 196
TAVR 2-067 15.09.20 г.	257,00	64,09	4,01	0,5	5,0	0,1	8	синус	1480,41	28 347
TAVR 2-068 15.09.20 г.	256,20	63,89	4,01	0,5	5,0	0,1	8	синус	1518,99	35 178
TAVR 2-069 16.09.20 г.	256,96	63,92	4,02	0,5	5,0	0,1	8	синус	1515,33	36 357
2-070 16.09.20 г.	258,88	64,08	4,04	0,5	5,0	0,1	8	синус	1450,18	34 827
2-071 16.09.20 г.	256,96	63,92	4,02	0,6	6,0	0,1	7	синус	1761,58	12 044

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
2-072 17.09.20 г.	255,04	63,92	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1776,64	15 731
2-073 17.09.20 г.	257,32	64,01	4,02	0,6	6,0	0,1	7	синус	1760,53	26 306
TAVR 2-074 17.09.20 г.	254,84	63,87	3,99	0,6	6,0	0,1	7	синус	1773,36	13 688
TAVR 2-075 17.09.20 г.	257,32	64,01	4,02	0,6	6,0	0,1	7	синус	1744,03	15 299
TAVR 2-076 18.09.20 г.	256,56	63,82	4,02	0,4	4,0	0,1	10	синус	1170,03	61 367
TAVR 2-077 18.09.20 г.	253,40	63,99	3,96	0,4	4,0	0,1	10	синус	1200,69	58 222
TAVR 2-078 18.09.20 г.	254,80	63,86	3,99	0,4	4,0	0,1	10	синус	1183,60	66 467

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-079 21.09.20 г.	253,44	63,84	3,97	0,4	4,0	0,1	10	синус	1195,09	73 115
TAVR 2-080 21.09.20 г.	258,00	64,02	4,03	0,4	4,0	0,1	10	синус	1160,51	72 773
2-081 21.09.20 г.	252,25	63,86	3,95	0,5	5,0	0,1	8	синус	1516,37	31 215
2-082 22.09.20 г.	253,36	63,98	3,96	0,5	5,0	0,1	8	синус	1503,47	30 363
2-083 22.09.20 г.	254,68	63,99	3,98	0,5	5,0	0,1	8	синус	1489,70	32 196
2-084 22.09.20 г.	256,72	64,02	4,01	0,5	5,0	0,1	8	синус	1463,76	43 182
TAVR 2-085 22.09.20 г.	255,44	64,02	3,99	0,5	5,0	0,1	8	синус	1477,89	30 624
TAVR 2-086 23.09.20 г.	246,89	63,96	3,86	0,6	6,0	0,1	7	синус	1895,28	16 658

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-087 23.09.20 г.	254,68	63,99	3,98	0,6	6,0	0,1	7	синус	1781,69	14 915
TAVR 2-088 23.09.20 г.	250,37	63,87	3,92	0,6	6,0	0,1	7	синус	1845,93	12 716
TAVR 2-089 24.09.20 г.	250,57	63,92	3,92	0,6	6,0	0,1	7	синус	1851,95	12 629
TAVR 2-090 24.09.20 г.	251,17	63,91	3,93	0,6	6,0	0,1	7	синус	1835,83	19 859
TAVR 2-091 24.09.20 г.	252,17	63,84	3,95	0,4	4,0	0,1	10	синус	1219,86	41 363
2-092 24.09.20 г.	252,29	63,87	3,95	0,4	4,0	0,1	10	синус	1211,82	61 751
2-093 25.09.20 г.	254,52	63,95	3,98	0,4	4,0	0,1	10	синус	1187,57	82 400
2-094 25.09.20 г.	250,57	63,92	3,92	0,4	4,0	0,1	10	синус	1232,25	46 694

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
2-095 25.09.20 г.	248,53	63,89	3,83	0,4	4,0	0,1	10	синус	1246,69	73 481
TAVR 2-096 25.09.20 г.	250,89	63,84	3,93	0,5	5,0	0,1	8	синус	1567,20	22 647
TAVR 2-097 28.09.20 г.	252,00	63,96	3,94	0,5	5,0	0,1	8	синус	1546,47	27 981
TAVR 2-098 28.09.20 г.	243,56	63,76	3,82	0,5	5,0	0,1	8	синус	1618,12	35 013
TAVR 2-099 29.09.20 г.	246,23	63,79	3,86	0,5	5,0	0,1	8	синус	1591,48	30 063
TAVR 2-100 29.09.20 г.	244,48	64,00	3,82	0,5	5,0	0,1	8	синус	1617,82	28 113
TAVR 2-101 29.09.20 г.	252,37	63,89	3,95	0,6	6,0	1,0	7	синус	1851,84	20 228

Продолжение таблицы В.2

Маркировка ИЛ, дата испытании	Геометрические параметры			Минимальная сила нагружения , кН	Максимальная сила нагружения , кН	Коэффициент асимметрии цикла,	Частота цикла f , Гц	Форма нагружения	Максимальное напряжение цикла σ_{max} , Н/мм ²	Количество циклов до разрушения N
	Площадь поперечного сечения образца S , мм ²	Ширина рабочей части образца b , мм	Толщина рабочей части образца h , мм							
TAVR 2-102 29.09.20 г.	251,40	63,97	3,93	0,6	6,0	1,0	7	синус	1845,42	16 211
TAVR 2-103 29.09.20 г.	254,12	63,85	3,98	0,6	6,0	1,0	7	синус	1785,41	12992
2-104 30.09.20 г.	246,31	63,81	3,86	0,6	6,0	1,0	7	синус	1900,90	17 342
2-105 30.09.20 г.	241,13	63,79	3,78	0,6	6,0	1,0	7	синус	1986,32	15 545

Приложение Г



УТВЕРЖДАЮ

Технический директор
Иркутского авиационного завода –
филиала ПАО «Яковлев»

_____ А.В. Сергунов

«15» _____ 2023 г.

АКТ

использования результатов научно-исследовательских,
опытно-конструкторских и технологических работ

В рамках исполнения договора № 8/16 от 18 января 2016 г. на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ на тему «Разработка комбинированной технологии «Превентивное деформирование – дробёметное упрочнение» деталей типа подкреплённых ободов и стенок» были выполнены следующие работы:

1. Проведены исследования по определению внутренних силовых факторов, возникающих при дробёмётном упрочнении детали типа «Стенка», и конечно-элементному моделированию процесса упрочнения конструктивно-подобного образца данной детали.

2. Разработана методика расчета режимных параметров технологического сочетания «Превентивное деформирование методом раскатки роликами – дробёметное упрочнение» деталей типа подкреплённых ободов и стенок.

3. Разработан проект технологической инструкции по реализации комбинированной технологии «Превентивное деформирование – дробёметное упрочнение» деталей типа ободов и стенок».

Использование результатов НИОКТР обеспечило повышение точности формы деталей самолета МС-21 типа «Стенка» при дробёмётном упрочнении.

Настоящий акт предназначен для предъявления в Высшую аттестационную комиссию при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации и не может служить основанием для финансовых претензий к ПАО «Яковлев».

От ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Научный руководитель НИР

_____ А.Е. Пашков

Ответственный исполнитель

_____ А.А. Макарук

Научный сотрудник

_____ О.В. Самойленко

От ИАЗ – филиала ПАО «Яковлев»

Главный технолог

_____ К.В. Богданов

Начальник отдела механической
обработки

_____ А.Г. Головин