



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Союз машиностроителей России
АО «Ульяновский НИАТ»
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»
Кафедра «Материаловедение и обработка металлов давлением»
Кафедра «Технологии заготовительно-штамповочного производства»

НАУКА, ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА АВИАЦИОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КЛАСТЕРА СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ

Материалы IX Всероссийской научно-производственной
конференции, приуроченной ко Дню Российской науки
и 40-летию АО «Ульяновский НИАТ»
(г. Ульяновск, 8 февраля 2024 г.)

Сборник научных трудов

Ульяновск
УлГТУ
2024



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Union of Machine Builders of Russia
PC «Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology
and Production Organization»
Ulyanovsk State Technical University
Department of Material Sciences and Fabricating Technology
Department "technology of blanking-die forging"

SCIENCE, THEORY AND PRACTICE OF THE AVIATION INDUSTRY CLUSTER OF MODERN RUSSIA

Proceedings of the IX scientific and production conference dedicated to
the Day of Russian science
and the 40th anniversary of PC «Ulyanovsk Research Institute of Aviation
Technology and Production Organization»
(Ulyanovsk, February 8, 2024)

Collection of proceedings

Ulyanovsk
2024

УДК 629.7:658(082)
ББК 39.5+30.6я43
Н 34

УДК 629.7:658(082)

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России. Материалы IX Всероссийской научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки и 40-летию АО «Ульяновский НИАТ» (г. Ульяновск, 8 февраля 2024 г.) : сборник научных трудов [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Ульяновск : УлГТУ, 2024. – 203 с.

В сборник вошли тезисы докладов, представленных на IX Всероссийской научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки «Инновации в технологиях формообразования листовых материалов и моделирование технологических процессов в авиационной и других отраслях промышленности», проводимой АО «Ульяновский НИАТ» и УлГТУ.

Материалы представлены в авторской редакции.

ISBN 978-5-9795-2387-3

© Коллектив авторов, 2024
© Оформление. УлГТУ, 2024

Состав организационно-программного комитета

Ярушкина Н. Г.	Председатель, ректор Ульяновского государственного технического университета, д.т.н., профессор
Марковцев В. А.	Сопредседатель, генеральный директор АО «Ульяновский НИАТ», зав. каф. «Технологии заготовительно-штамповочного производства», д.т.н.
Войт А.В.	Председатель Ульяновского регионального отделения ООО «Союз Машиностроителей России»
Ефимов С. И.	Руководитель представительства ГК «Ростех» в Ульяновской области и Республике Мордовия
Кокорин В. Н.	Профессор каф. «Материаловедение и обработка металлов давлением» УлГТУ, д.т.н.
Гречников Ф.В.	Зав. каф. «Обработка металлов давлением» Самарского НИУ им. академика С.П.Королева (г.Самара), академик РАН, профессор, д.т.н.
Ибрагимов Е. Г.	Директор Ульяновского филиала ПАО «Корпорация «Иркут».
Платонов С.В.	Технический директор Филиала ПАО «Ил» - Авиастар
Марковцева В.В.	Ответственный секретарь Конференции, нач. НИО-110 АО «Ульяновский НИАТ», к.т.н.

Уважаемые коллеги!

В 2024 году Научно-производственная конференция «Инновации в технологиях формообразования листовых материалов и упрочения технологической оснастки в авиационной и других отраслях промышленности», приуроченная ко Дню Российской науки, проходит уже в девятый раз. Кроме того, конференция приурочена и к 40-летию АО «Ульяновский НИАТ», который отмечался в декабре 2023 года.

Очное заседание состоялось 8 февраля 2024 года на территории производственной площадки АО «Ульяновский НИАТ». В работе заседания приняли участие ученые, ведущие специалисты в области обработки металлов давлением, в частности – производства гнутых профилей. Были заслушаны доклады представителей МГТУ им. Баумана, УлГТУ, нескольких отраслевых предприятий Ульяновска. Хотелось бы отметить высочайший уровень представленных материалов и большую значимость разрабатываемых авторами тем: часть докладов традиционно посвящена трехмерному моделированию, динамическому анализу процессов профилирования и других способов ОМД, однако в настоящем сборнике впервые публикуются статьи, связанные с тематикой цифровых двойников. Также интерес представляют обширные исследования повышения качества изделий, получаемых различными способами обработки металлов давлением, опыт внедрения разработанных методов, технологий и оборудования, результаты этих работ также представлены в настоящем сборнике.

Содержание конференции представлено докладами работы секций: «Заготовительно-штамповочное производство в машиностроении», «Инженерный анализ и автоматизация», «Подготовка производства» и «Гуманитарные науки в авиационно-космических технологиях».

Оргкомитет выражает благодарность всем авторам, принявшим участие в данной научно-производственной конференции, и надеется на дальнейшее плодотворное сотрудничество.

Оргкомитет конференции

Секция 1

Заготовительно-штамповочное производство в машиностроении

УДК 621

УСТРАНЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ

Маслова В.Д.¹, Нестеренко Е.С.²

1 – студент СНИУ им. академика С.П. Королёва, г. Самара

2 – к.т.н. доцент каф. «Обработка металлов давлением», г. Самара

Аннотация. Рассматривается проблема потери устойчивости в процессе вытяжки, которая препятствует более равномерному распределению толщины по образующей.

Ключевые слова: гофрообразование, фланец, вытяжка, упругие элементы.

ELIMINATION OF THE PROBLEM OF LOSS OF STABILITY DURING THE EXTRACTION PROCESS

Maslova V.D.¹, Nesterenko E.S.²

1 – student of the SNIU named after academician S.P. Korolev, Samara

2 – Ph.D. Associate Professor of the department "metal processing by pressure", Samara

Abstract. The problem of loss of stability in the extraction process is considered, which prevents a more uniform distribution of thickness over the generatrix.

Keywords: corrugation, flange, extraction, elastic elements.

Потеря устойчивости сферических заготовок с фланцем происходит за счёт возрастающих сжимающих напряжений на участке фланца, находящемся между матрицей и прижимом. При глубокой вытяжке с большой степенью деформации и малой толщине материала смещение объёма является причиной образования гофр на деформируемой части заготовки.

На рисунке 1 представлены примеры гофрообразования на фланце заготовки.



Рис. 1. Гофрообразование на фланце

На кафедре обработки металлов давлением Самарского национального исследовательского университета разработан способ вытяжки с упругими элементами [1]. Данный способ подходит для вытяжки полусфер с широким фланцем. Суть способа заключается в использования упругих свойств штамповой оснастки, а именно в том, что на протяжении всего процесса

прижим, обеспечивающий упругие перемещения, и матрица соприкасаются с поверхностью фланца заготовки, что препятствует появлению гофрообразования, а вследствие потери устойчивости заготовки. При вытяжке заготовки в штамповой оснастке с жесткими элементами, при оптимальных условиях прижима, возникает гофрообразование и появляются трещины. Общий вид штамповой оснастки с упругими и жесткими элементами представлен на рисунке 2.

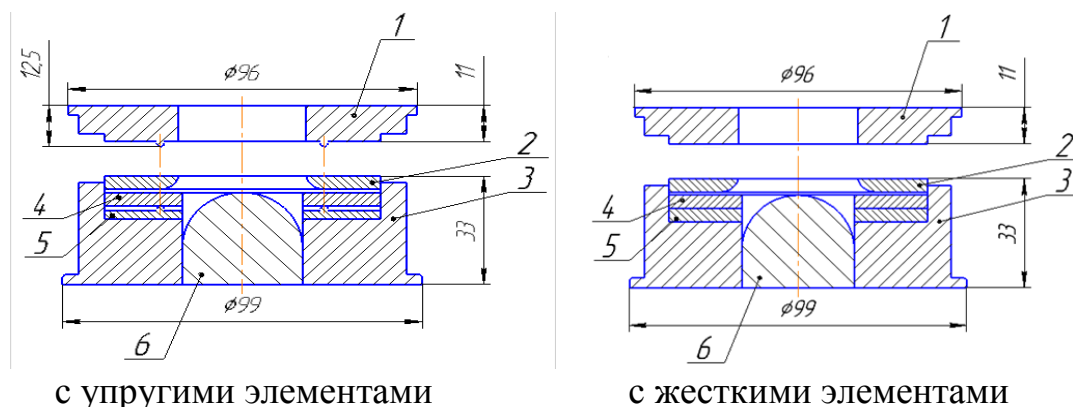


Рис. 2. Общий вид штамповой оснастки с упругими и жёсткими элементами
(1 – верхняя плита; 2 – матрица; 3 – обойма; 4 – прижим;
5 – опорное кольцо; 6 – пуансон)

Вытяжку образцов проводили на лабораторной машине для испытаний на глубокую вытяжку ZWICK Roell BUP 200 [2]. В качестве материала образца использовалась сталь 08КП. На рисунке 3 представлены результаты эксперимента.

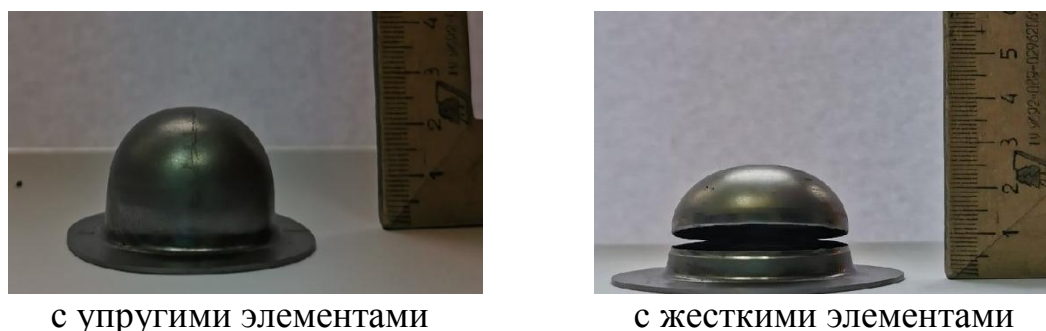


Рис. 3. Результаты эксперимента

Выявлена особенность влияния упругого элемента на ход процесса, заключающаяся в перераспределении растягивающих напряжений из зон опасного сечения в зоны менее опасные. Эта особенность препятствует образованию трещин, предотвращает гофрообразование и позволяет повысить степень деформации. Использование упругих элементов позволило уменьшить разнотолщинность на фланце детали и снизить напряжение на фланец, так как теперь оно распределяется по всей

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России поверхности. Разнотолщинность не превышает 30%, что меньше чем при штамповке в штампе с жестким прижимом.

Список литературы

1. Попов И.П., Нестеренко Е.С., Кузина А.А. Штамп для глубокой вытяжки осесимметричных деталей.: Авторское свидетельство / СНИУ им. академика С.П. Королёва. – Самара, 2013. – 8 с.
2. Ерисов Я.А., Камайкин И.А., Петров И.Н. Проведение испытаний на глубокую вытяжку на машине ZWICK/ROELLBUP 200: Методические указания / СНИУ им. Академика С.П. Королёва. – Самара, 2016 – 24 с.

УДК 621.98

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ (ХОШ) В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Мишов Н.В.

Ассистент кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, аспирант 2 года обучения, г. Ульяновск

Аннотация. Проведен анализ использования процессов холодной объемной штамповки (ХОШ) при производстве деталей различного назначения. Установлен диапазон применимости процессов ХОШ. Выявлены основные пути развития холодного деформирования со сдвигом.

Ключевые слова. Холодная объемная штамповка, инструмент, себестоимость, работоспособность рабочего инструмента.

ANALYSIS OF THE USE OF COLD VOLUMETRIC STAMPING (HOC) PROCESSES IN INDUSTRIAL PRODUCTION

Mishov N.V.

Assistant of the Department of Materials Science and OMD, UlSTU, postgraduate student of 2 years of study, Ulyanovsk

Abstract. The analysis of the use of cold volumetric stamping processes in the production of parts for various purposes is carried out. The range of applicability of the HOSH processes has been established. The main ways of development of cold shear deformation are revealed.

Keywords. Cold volumetric stamping, tools, cost, efficiency of the working tool.

Повышение конкурентоспособности современного машиностроения,—определяющая задача промышленного производства страны. Удельный вес процессов ХОШ при изготовлении деталей как конструкционного назначения, так и ответственных тяжело нагруженных в спектре процессов технологии машиностроения составляет порядка (10...15) % [1-2]. При этом, с целью расширения области применения процессов холодной объемной штамповки необходимо решить ряд задач, решение которых во многом зависит от технологических и эксплуатационных характеристик тяжело нагруженного деформирующего рабочего инструмента процессов обработки металлов давлением.

В экономике машиностроения значительную объемную долю составляют затраты на инструментальное производство, обеспечивающие изготовление, восстановление и ремонт инструмента ХОШ. Издержки предприятий на инструмент составляют значительную долю (в отдельных случаях до 10%) себестоимости изделия.

В таблице 1 представлен анализ себестоимости производства изделий холодной объемной штамповки [1].

Таблица 1 – Анализ себестоимости изделий ХОШ по статьям затрат

Статья затрат	Структура затрат, %
Сырье и материалы	37,9
Топливо и энергия	9,8
Зарплата производственных рабочих	18,3
Расходы на ремонт и восстановление инструмента	15,1
Отчисление на социальные нужды	6,1
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	5,0
Общепроизводственные расходы	3,4
Потери от брака	0,2
Прочие производственные расходы	1,3
Коммерческие расходы	2,9

При этом следует отметить следующие недостатки процессов ХОШ, такие как высокая трудоемкость изготовления и высокая стоимость рабочего инструмента, что делает экономически обоснованным применением этих технологий только при достаточно большой серийности производства.

Исходя из анализа таблицы 1 можно сделать вывод, что значительная часть затрат приходится на ремонт и восстановление рабочих частей инструмента ХОШ. Отсюда следует вывод, что повышение работоспособности рабочего инструмента (пуансонов/матриц) позволит существенно повысить эффективность процессов холодной объемной штамповки за счет уменьшения расходов на инструмент.

В связи с этим возникает необходимость разработки прогрессивных технологических решений, обеспечивающих высокие функциональные свойства штампового инструмента и, прежде всего, высокую эксплуатационную износостойкость рабочих деталей штампов.

Список литературы

- 1 Навроцкий Г.А. Холодная объемная штамповка. Справочник под редакцией д.т.н., проф. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1974. – 496 с.
2. Зубцов, М. Е. Повышение стойкости штампов для холодной штамповки. – Ленингр. дом науч.-техн. пропаганды, 1960. – 84 с.

УДК 621.98

УСТАНОВКА ПРАВИЛЬНО- ГИБОЧНАЯ РОЛИКОВАЯ, ПРИМЕНЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ НА АВИАЦИОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РОССИИ

Халилов Ф.Х.¹, Попов А.Г.²

1 – нач. НИС-132 АО «Ульяновский НИАТ»

2 – к.т.н., ведущий научный сотрудник АО «Ульяновский НИАТ»

Аннотация. Рассмотрен опыт разработки и изготовления первая опытная установка правильно-гибочная роликовая, предназначенной для производства заготовок профильных авиационных деталей из гнутых и прессованных профилей гибкой-прокаткой в роликах.

Ключевые слова: гнутые профили, роликовая оснастка, стрингер, шпангоут, правильно-гибочная роликовая установка.

THE INSTALLATION CORRECT-ROLLER BENDING, APPLICATION AND IMPLEMENTATION AT RUSSIAN AVIATION ENTERPRISES

Popov A. G.¹, Khalilov F. H.²

1 – Head of the Sector of «Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology and Production Organization»

2 – Candidate of Technical Sciences, leading scientific employee of «Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology and Production Organization»

Abstract. The article describes the experience of developing and manufacturing the first pilot installation correctly-bending roller, designed for the production of aircraft profile blanks parts from bent and pressed profiles by flexible rolling in rollers.

Keywords: bent profile, stringer billet, longitudinal bending, rollers, drive cage, high-strength aluminum alloys, straightening, transverse bending, bending cage.

Учитывая большую номенклатуру деталей, применяемых для изготовления фюзеляжей самолетов, в значительной доле выполняемых при помощи ручного труда, существует острая необходимость механизации процессов производства и повышение производительности.

В 2021 году на площадях АО «Ульяновский НИАТ» была разработана и изготовлена первая опытная установка правильно-гибочная роликовая (далее по тексту – УПГР). УПГР предназначена для производства заготовок профильных авиационных деталей из гнутых и прессованных профилей гибкой-прокаткой в роликах. В процессе работы оборудования в зависимости от технологической роликовой оснастки, установленной на рабочих валах УПГР получают заготовки авиационных деталей из профилей определенного типоразмера.

Проведены испытания процессов продольной гибки заготовок стрингеров и шпангоутов на постоянный и переменный радиусы. Результаты, полученные в ходе испытаний, показали, что при помощи данной установки удастся выполнять основные деформации профильной заготовки (на 95%) без использования ручного инструмента. Разработанная установка (рис.1)

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России
серийно поставляется на авиационные предприятия России с необходимыми
изменениями и доработками под нужды заказчика.

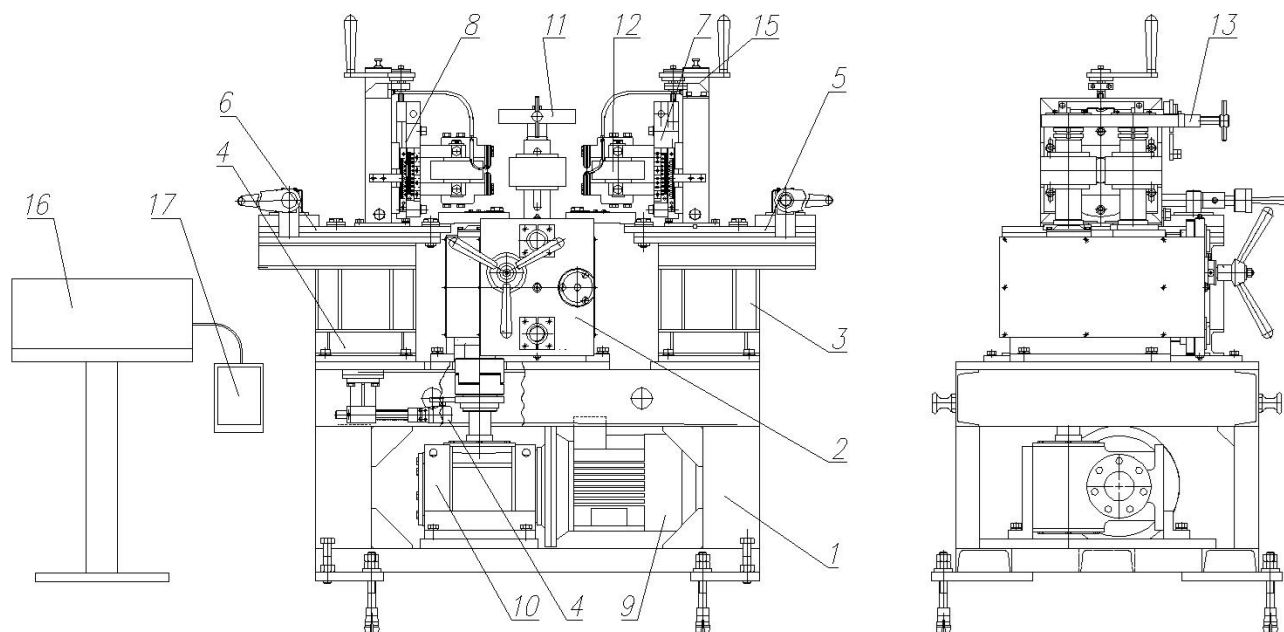


Рис. 1. Основные составные части УПГР

УПГР состоит из корпуса 1 (см. рис. 1), на котором в центре установлены приводная клеть 2 (далее ПК) и по краям с каждой стороны на подставках 3 и 4 соответственно поворотные плиты 5 и 6 с гибочными клетями 7 и 8 (далее ГК). Приводной вал ПК 2 соединен с регулируемым электроприводом, состоящим из асинхронного электродвигателя 9 и червячного редуктора 10. На рабочих валах ПК 2 установлена приводная роликовая оснастка 11, а на валах ГК 7 и 8 размещена гибочная роликовая оснастка 12. На рабочих валах ПК 2 после приводной роликовой оснастки 11 установлена серга 13. К приводному валу ПК 2 подключен контактный датчик перемещения «Энкодер» 14. Система протирки (смазки) 15 установлены на гибочных клетях 7 и 8. УПГР содержит стационарный пульт управления 16 с цифровым индикатором, клавиатурой, программным блоком, частотным преобразователем и регулятором скорости. В дополнении к стационарному пульта управления 16 УПГР имеет переносной пульт управления 17 с клавиатурой.

Секция 1. Заготовительно-штамповочное производство в машиностроении

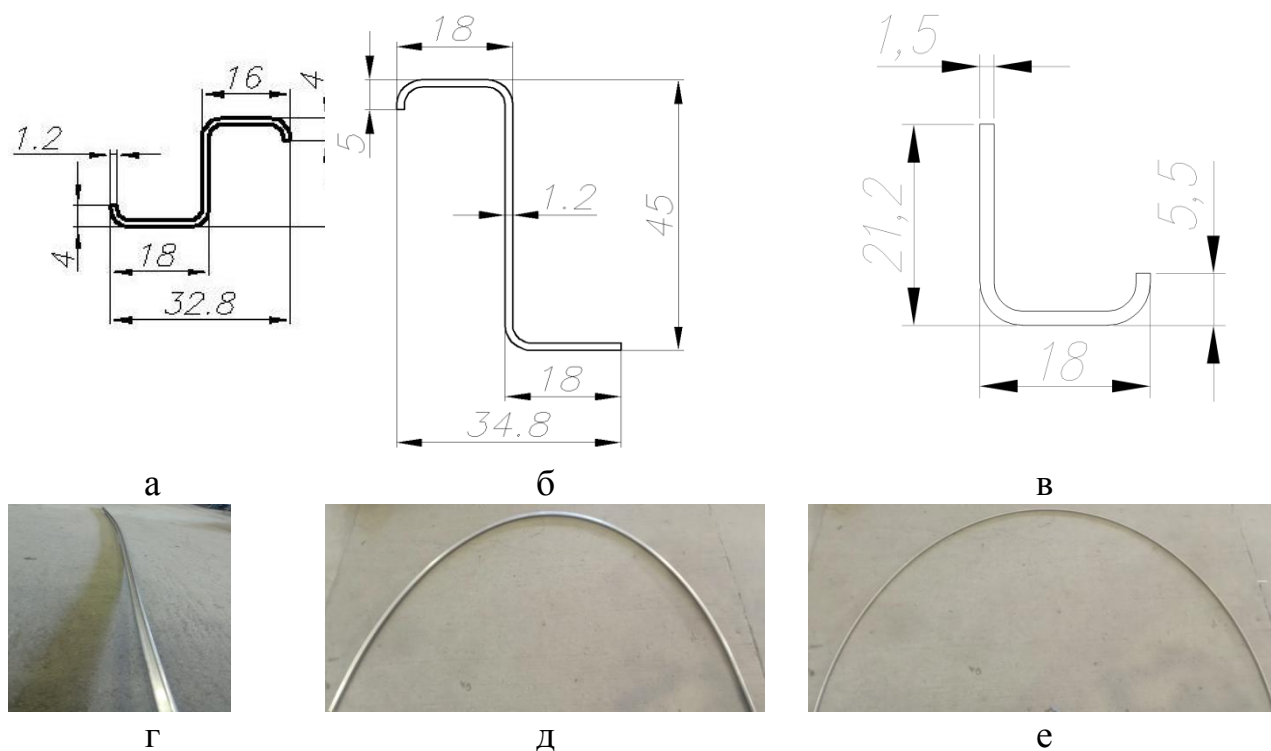
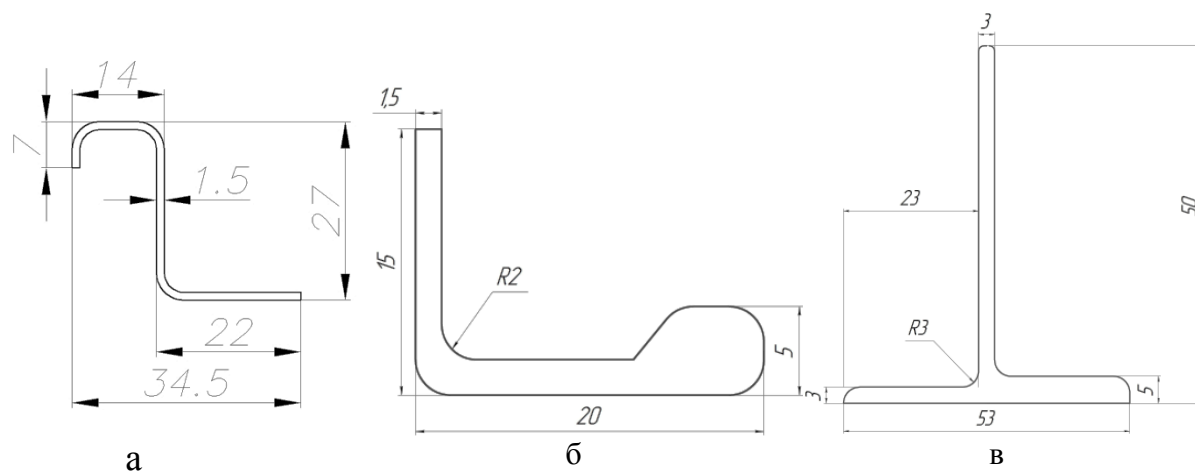


Рис. 2. Сечения профилей: а – гнутый Z-образный профиль С20 стрингер, б – гнутый Z-образный профиль С45 шпангоут, в – гнутый Л-образный профиль, г – С20 стрингер с переменной продольной кривизной, д – С45 шпангоут с постоянной продольной кривизной радиусом 1400 мм, е – Л-образный профиль с постоянной продольной кривизной радиусом 1400 мм



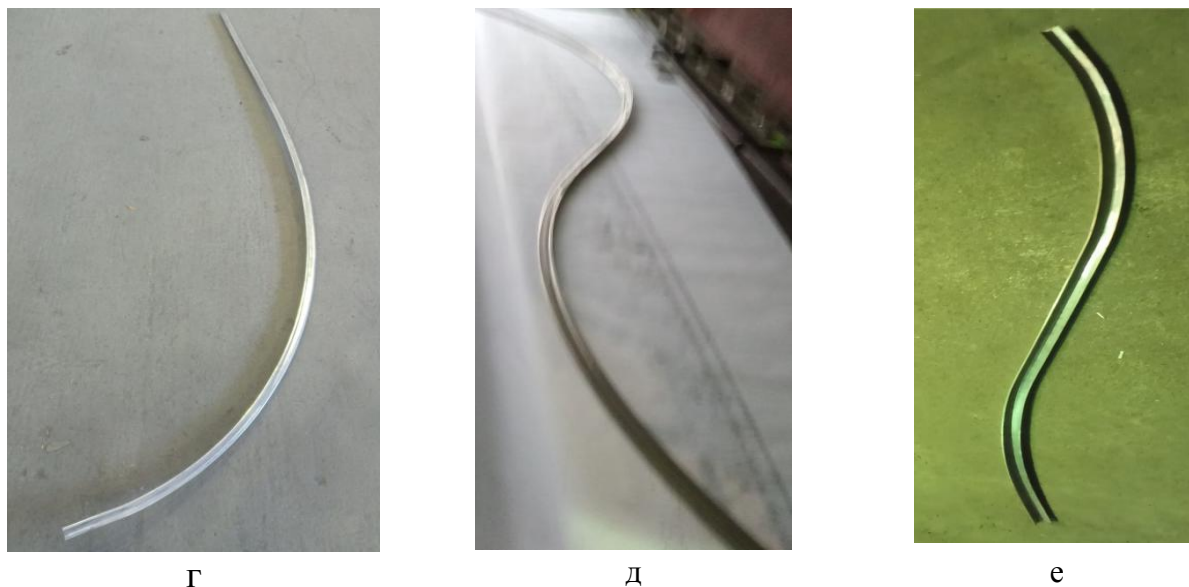


Рис. 3. Сечения профилей: а – гнутый Z-образный профиль С27 стрингер, б – прессованный профиль бульбо уголкового сечения ПР102-3, в – прессованный Т-образный профиль ПК 2806, г – С27 стрингер с переменной продольной кривизной, ПР102-3 со знакопеременной продольной кривизной, е – ПК 2806 со знакопеременной продольной кривизной

В настоящее время УПГР успешно эксплуатируются на вышеупомянутых авиационных предприятиях, благодаря чему: уменьшено время, сокращено количество единиц технологической оснастки, повышено качество при изготовлении деталей.

Секция 2

**Инженерный анализ
и автоматизация**

УДК 621.981

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ КОМПАС-3D API

Булычов О.И.¹, Марковцев В.А.², Илюшкин М.В.³

1 – инженер-программист, АО "Ульяновский НИАТ".

2 – д.т.н., генеральный директор АО "Ульяновский НИАТ"

3 – к.т.н., зам. генерального директора по науке АО "Ульяновский НИАТ"

Аннотация. В статье представлены основы разработки виртуальных 3D моделей на базе системы Компас-3D API, с особенностями разработки виртуальной модели пресса РО-3М.

Ключевые слова: виртуальная модель, Компас-3D, C#, SDK, API.

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL MODEL BASED ON THE KOMPAS-3D API SYSTEM

Bulychov O.I.¹, Markovtsev V. A.², Ilyushkin M.V.³

1 – Software engineer, PC "ULYANOVSK NIAT".

2 – General director in science PC "ULYANOVSK NIAT", d.t.s..

3 – Deputy of general director in science PC "ULYANOVSK NIAT", c.t.s.

Abstract. The article presents the basics of developing virtual 3D models based on the Kompas-3D API system, with features of developing a virtual model of the RO-3M press.

Keywords: virtual model, Kompas-3D, C#, SDK, API.

В ряде случаев для отработки технологических процессов целесообразно применение виртуальных моделей станков или иного оборудования. Виртуальные модели позволяют отладить предполагаемые режимы отработки и выбрать наилучший из них.

Преимуществами виртуальных моделей являются отсутствие необходимости использования реального оборудования и возможность отладки значительного количества различных режимов. Особенно это актуально при применении станков со сложной кинематикой, например имеющих 5 и более шарниров, которые в процессе движения влияют друг на друга, и для которых вывод теоретических формул для деформируемых структур весьма затруднителен.

Кроме того, виртуальные модели могут быть сопряжены с методом конечных элементов, что расширяет и дополняет возможности отладки процесса получения деталей, обладающих требуемой геометрической формой.

Для создания виртуальных моделей можно использовать различные CAD системы, например NX, Ansys, T-Flex, Компас-3D и т.д. Мы рассмотрим некоторые аспекты реализации модели в Компас-3D – отечественной CAD системе с достаточно большими возможностями для программирования. Для этого нам потребуется SDK КОМПАС-3D – это ориентированные на прикладного программиста инструментальные средства разработки приложений на базе системы Компас-3D.

Секция 2. Инженерный анализ и автоматизация

SDK КОМПАС-3D включает в свой состав 2D API и 3D API. Для создания и управления трехмерными моделями используется 3D API.

Для примера создадим сборку (рис. 1), состоящую всего из двух деталей, у одной из которых будем изменять координату вдоль оси X, а вторая будет поворачиваться вокруг своей оси. При этом детали соединены сопряжениями «соосность» и «касание».

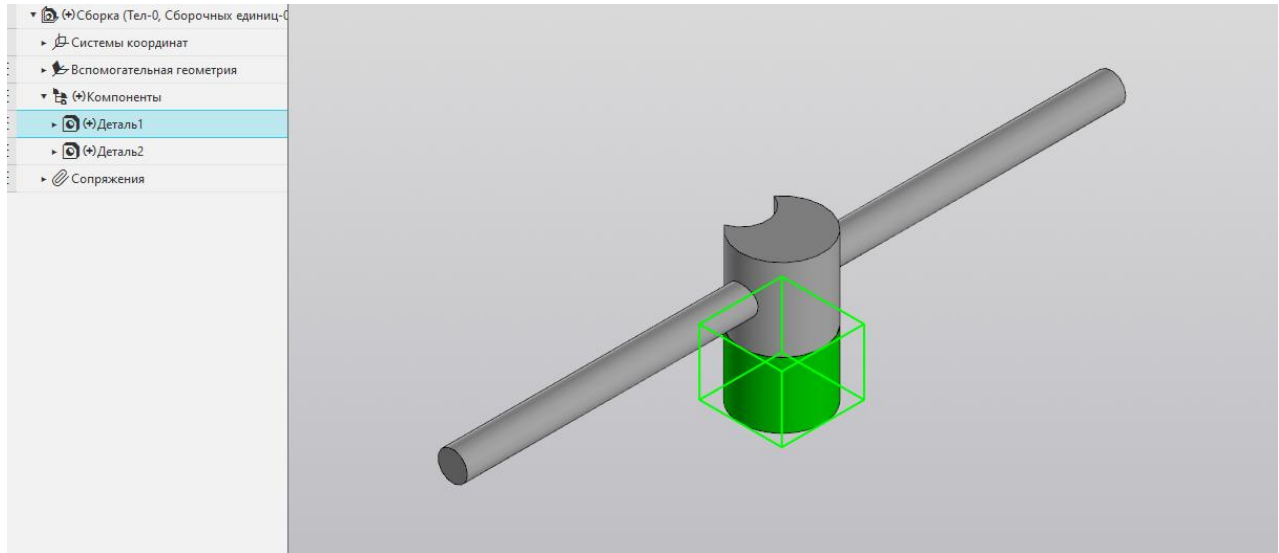


Рис. 1. Сборка из двух деталей (первая деталь выделена цветом)

Создадим переменные, управляющие движением деталей (рис. 2). VAR_ALPHA – угол поворота, в градусах.

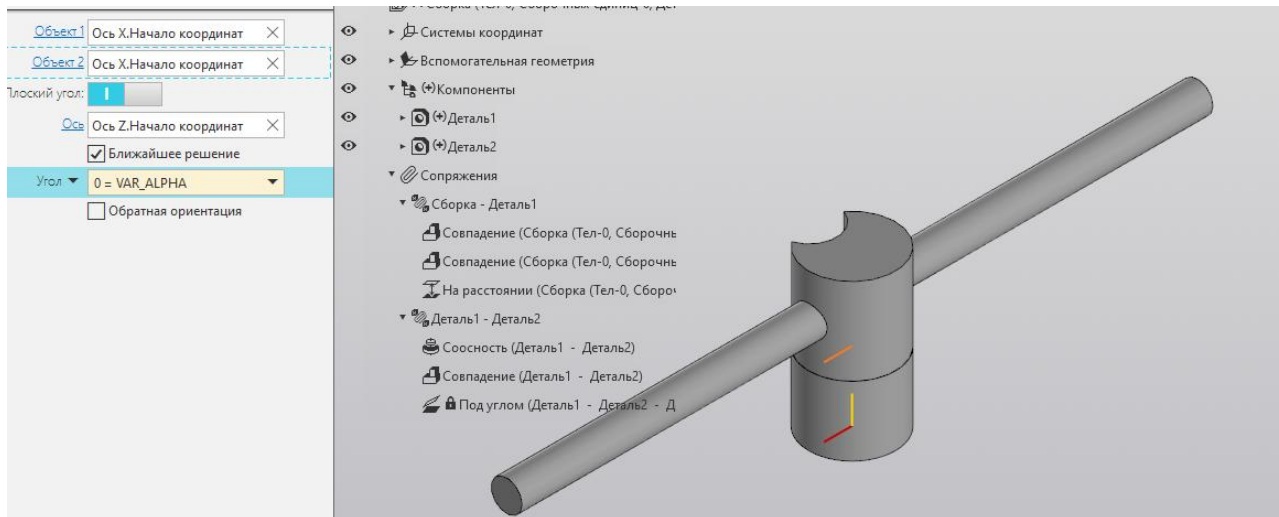


Рис. 2. Создание переменной VAR_ALPHA

Аналогично добавим переменную VAR_DX – смещение по оси X, мм (рис. 3).

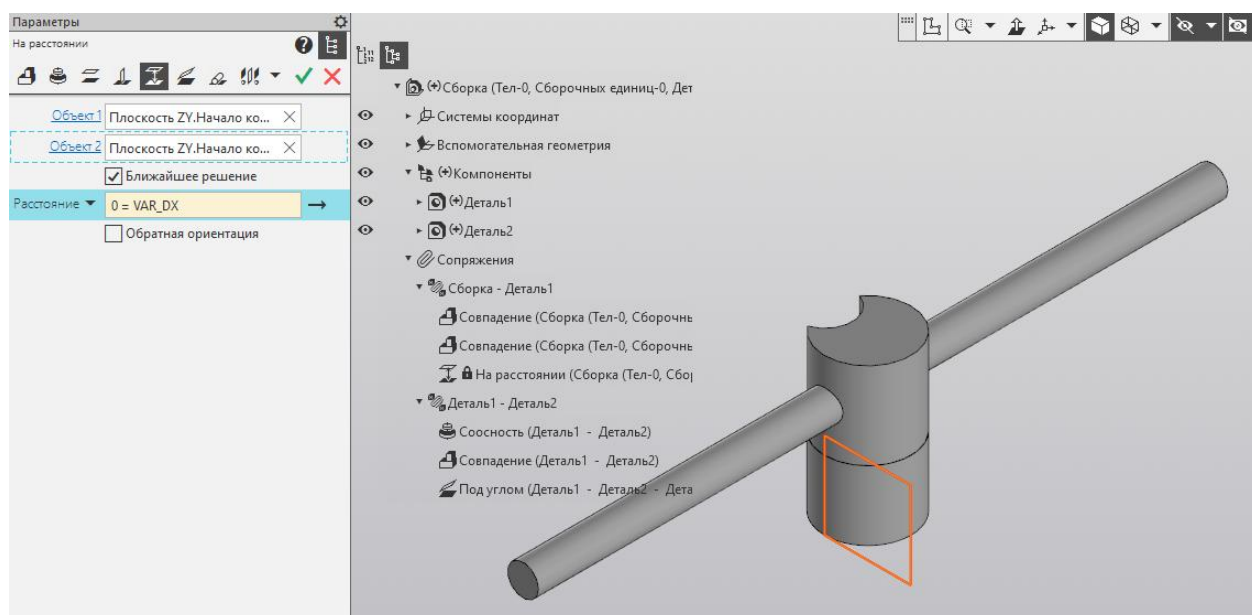


Рис. 3. Создание переменной VAR_DX

Мы можем протестировать движение деталей непосредственно в Компас-3D, перейдя на закладку переменных, задав им некоторые ненулевые значения и перестроив сборку (рис. 4).

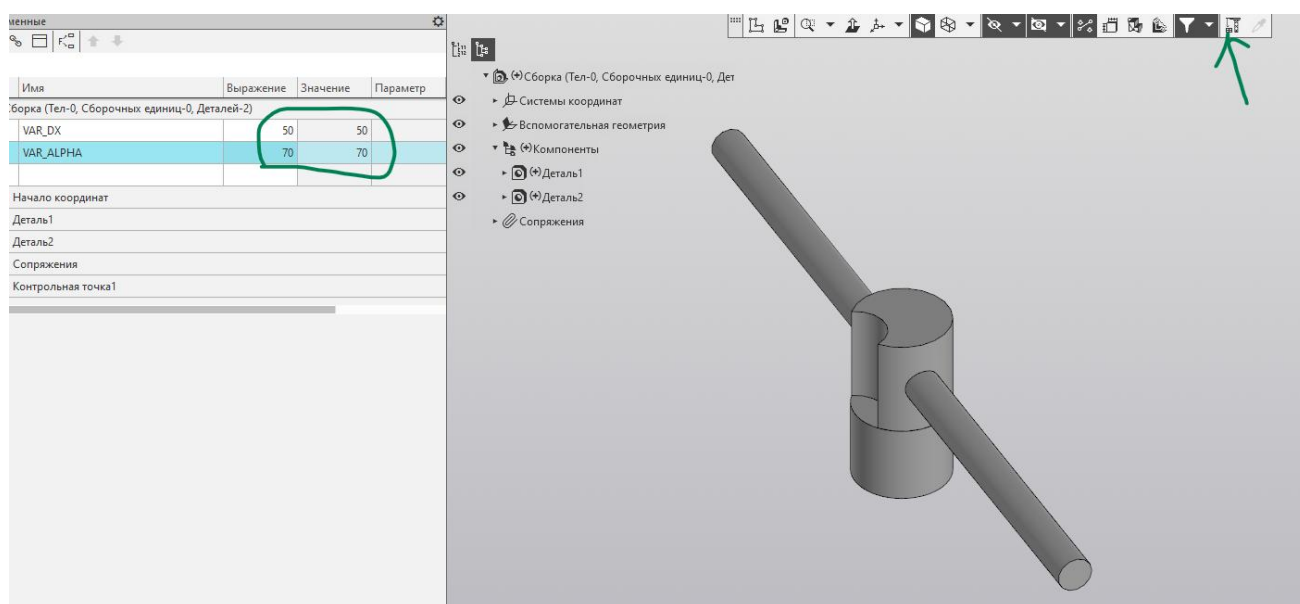


Рис. 4. Изменение значений переменных и перестроение сборки

Теперь попробуем изменить значения этих переменных программно. Для этого создадим проект на языке C#, подключим SDK Компас-3D, и создадим форму с двумя ползунками, которые и будут задавать значения переменных VAR_DX и VAR_ALPHA (рис. 5).

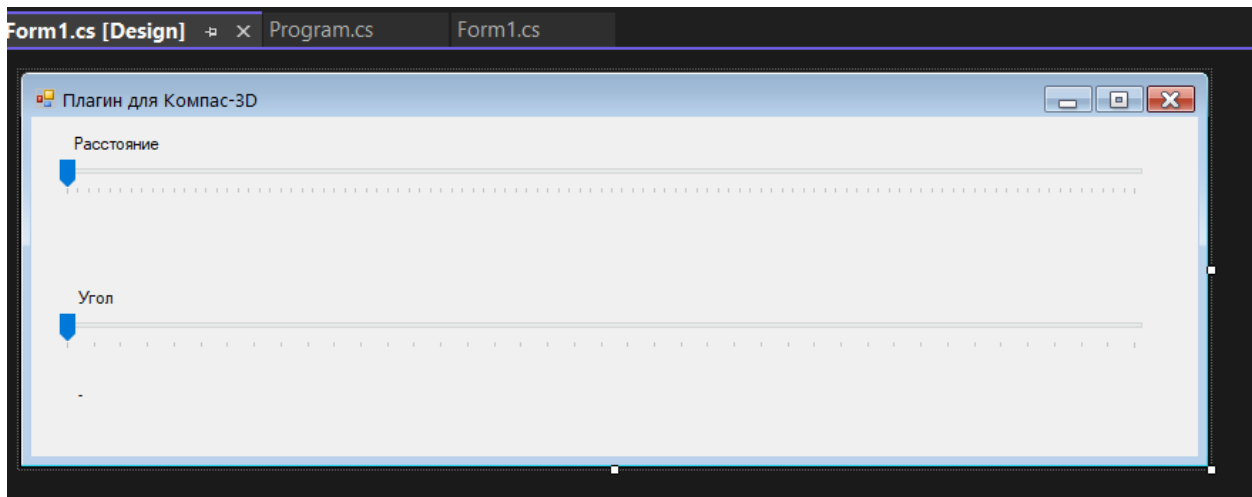


Рис. 5. Интерфейс (форма Form1) плагина

Запросим у активного документа эти переменные:

```
doc5 = (ksDocument3D)kompas.ActiveDocument3D();
ksPart? part = doc5.GetPart((short)Part_Type.pTop_Part) as ksPart;
ksFeature? feature = part.GetFeature() as ksFeature;
ksVariableCollection? param = feature.VariableCollection as
ksVariableCollection;
var_dx = (ksVariable)(param.GetByName("VAR_DX"));
var_alpha = (ksVariable)(param.GetByName("VAR_ALPHA")).
```

Код упрощен для читаемости. Будем изменять переменные в ответ на события перемещения ползунков.

```
private void trackBar_DX_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
    var_dx.value = trackBar_DX.Value;
    doc5?.RebuildDocument();
}
```

Код снова упрощен для читаемости, и для переменной *VAR_ALPHA* аналогичен приведенному выше.

Запускаем приложение вместе с открытой сборкой в Компас-3D и пробуем переместить ползунки (рис. 6).

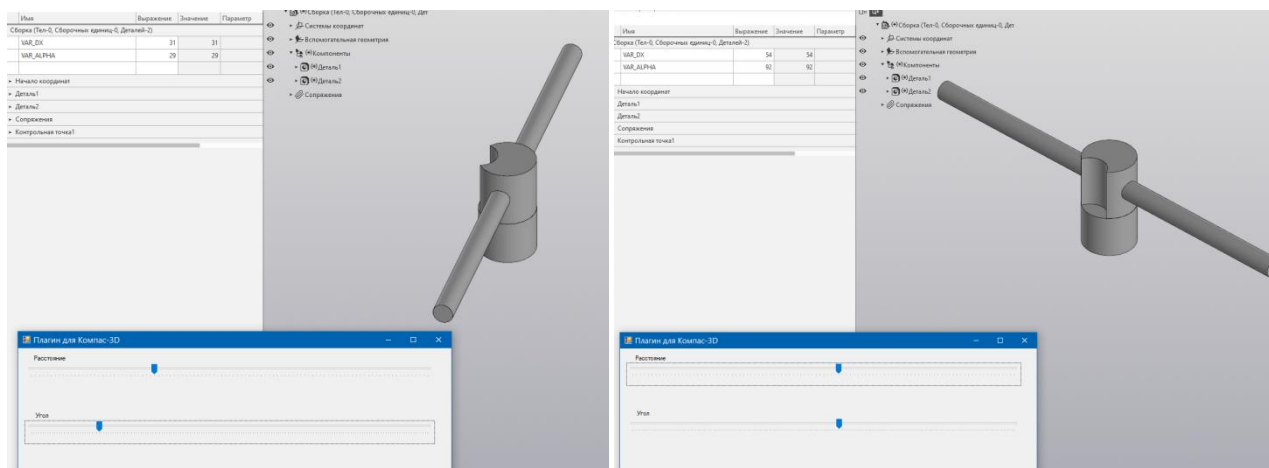


Рис. 6. Положения ползунков и деталей в сборке

Таким образом, можно создавать 3D модели с весьма сложной кинематикой, состоящие из нескольких сотен деталей.

При создании виртуального прессы РО-3М были выявлены следующие трудности:

- все вызовы Компас-API происходят синхронно, то есть вызывающий поток не получает управления, пока вызов не завершится. Если Компас-API не отвечает достаточно быстро, интерфейс программы может «притормаживать», и скорости обновления документа (сборки) может не хватить для анимации в реальном времени. Проблема решается комплексно, упрощением сборки, объединением неподвижных относительно друг друга деталей в одну подсборку, с преобразованием в деталь. Кроме того, все операции с API вынесены в отдельный поток (Worker), взаимодействие потоков отражено в следующей диаграмме (рис. 7).

Секция 2. Инженерный анализ и автоматизация

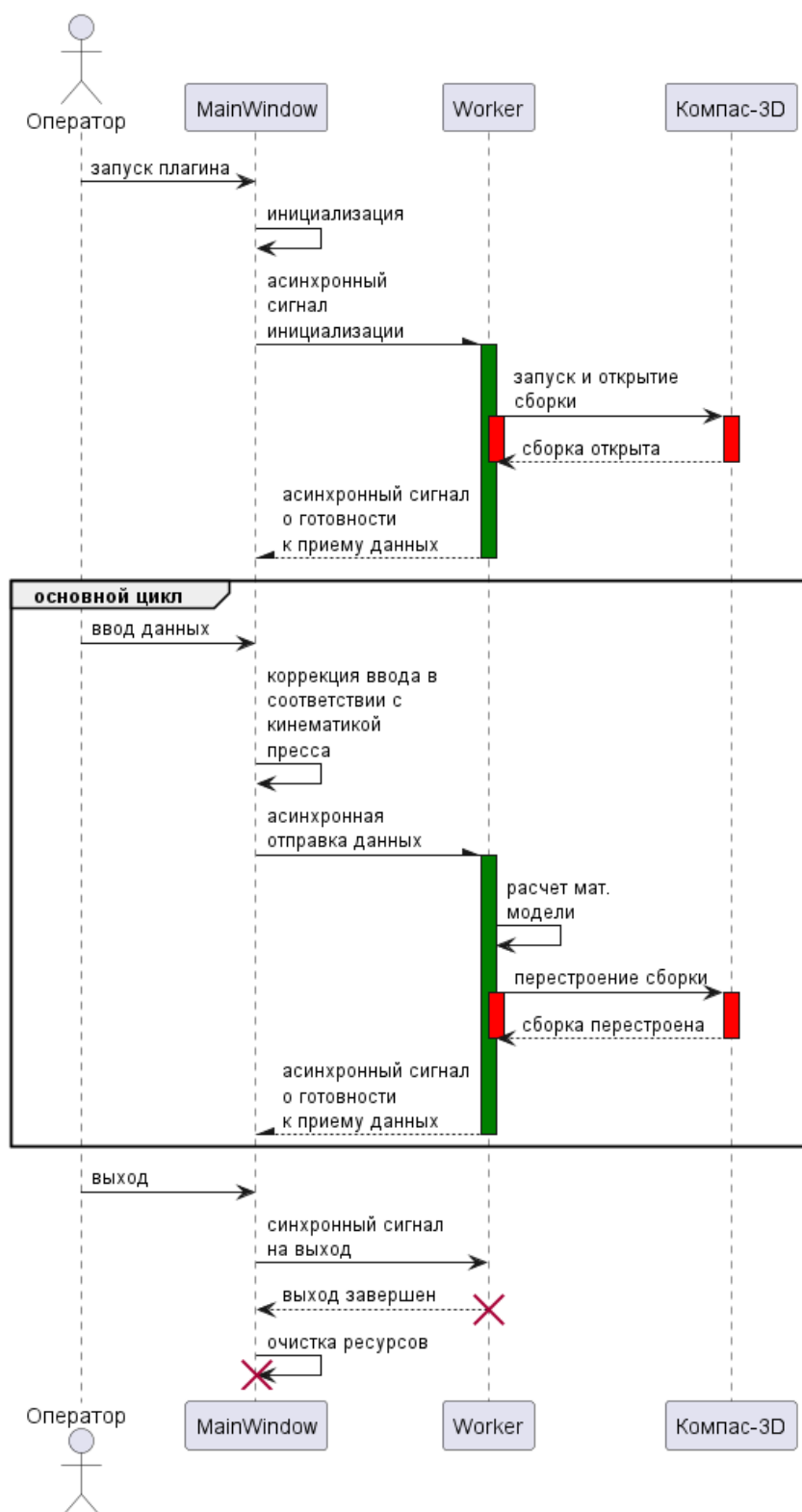


Рис. 7. Диаграмма последовательности работы плагина

Замена деталей (пуансонов) в сборке решается через создание отдельных подборок, соединенных сопряжениями с деталями в главной сборке и состоящих из одной детали – по умолчанию, это невидимый пуансон-«заглушка», но его можно заменить программно, изменив свойство *FileName* у этой детали.

Для рисования изогнутой поверхности (заготовки) в Компас-3D есть функции для создания поверхностей, но скорость их работы неудовлетворительна для анимации в реальном времени. Однако есть возможность рисования произвольной внешней геометрии через интерфейс *IEExternalTessellationManager*. Рисование производится по стандартам *OpenGL* – т.е. треугольниками, через передачу буферов вертексов и индексов, заданных в определенной последовательности (рис. 8).

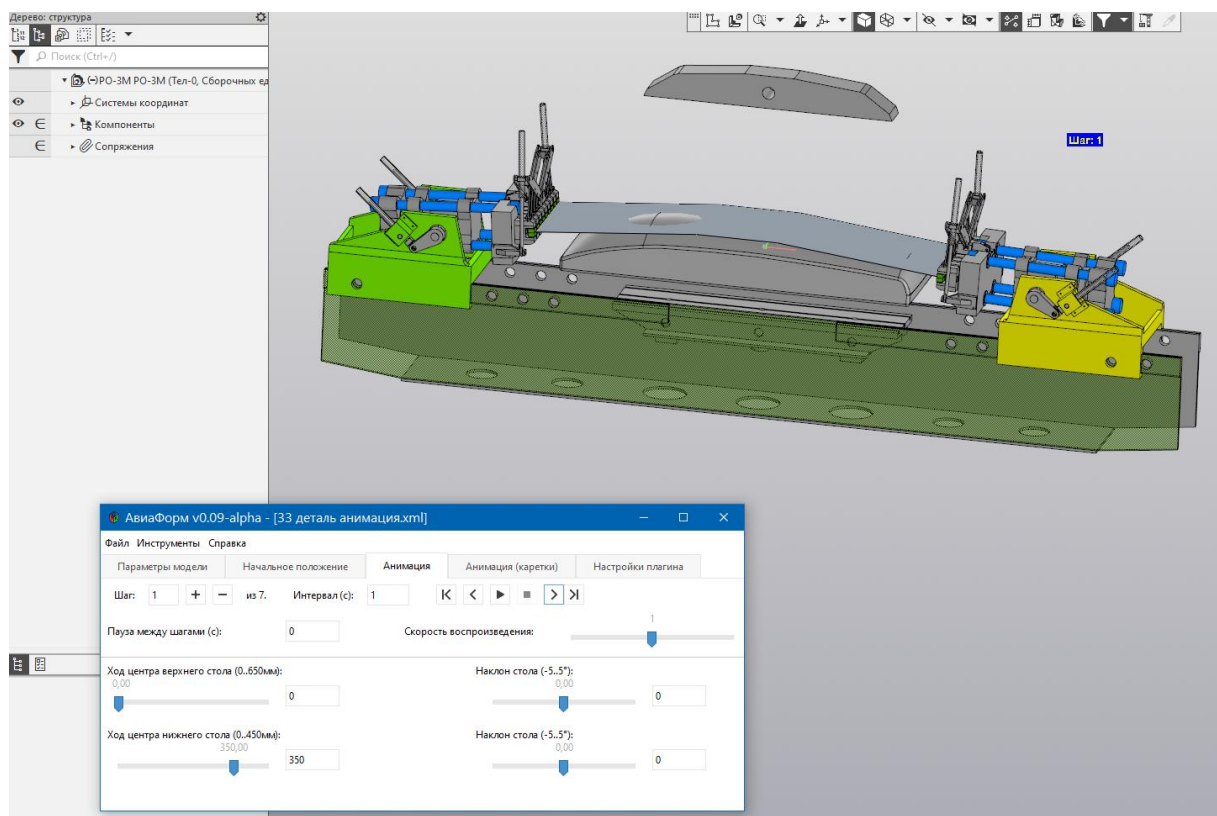


Рис. 8. Окно Компас-3D с плагином. Заготовка нарисована несколькими треугольниками

Разработанная 3D модель пресса РО-3М позволила упростить и ускорить подготовку численных расчетов процесса обтяжки. Заданные в модели параметры движения органов пресса для конкретного процесса формообразования переводятся плагином в формат программы, выполняющей моделирование методом конечных элементов.

Список литературы

1. https://help.ascon.ru/KOMPAS_SDK/22/ru-RU/index.html
2. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование / Голованов Н. Н. – М. : Физматлит, 2002. – 472 с.
3. Рихтер, Джеффри. CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.5 на языке C# / Д. Рихтер. ООО "ЛитРес", 2015. – 893 с. [Электронный ресурс]

УДК 621.771.63

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДОБИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОФИЛЕГИБКИ НА ПРИМЕРЕ ЗЕТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

Волгин Д.С.¹, Поворов С.В.²

1 – МГТУ им. Н.Э. Баумана, volginds@student.bmstu.ru

2 – к.т.н., доц. каф. МТ10, МГТУ им. Н.Э. Баумана, povorovs@bmstu.ru

Аннотация. Затронута проблема скручивания тонколистовых зетовых профилей. На примере математического моделирования зетовых профилей рассмотрено подобие процессов профилегибки. Предложено перспективное применение подобия процессов для проектирования калибровок для производства тонколистовых зетовых профилей с минимальным дефектом скручивания.

Ключевые слова: профилегибка, тонколистовые зетовые профили, математическое моделирование, подобие профилегибки.

ROLL FORMING SIMILARITY RESEARCH BASED ON Z-SHAPED PROFILES

Volgin D.S.¹, Povorov S.V.²

1 – Bauman Moscow State Technical University, volginds@student.bmstu.ru

2 – c.t.s., doc. MT10 (Rolling Department), Bauman Moscow State Technical University, povorovs@bmstu.ru

Annotation. The thin-sheeted Z-shaped profiles twisting problem is discussed. Roll forming processes similarity is reviewed based on the z-shaped profile roll forming mathematical simulation. Roll forming process similarity is suggested to use to produce the design of passes to produce thin-sheeted Z-shaped profiles with the minimum twisting defect.

Keywords: roll forming, thin-sheeted Z-shaped profiles, mathematical simulation, roll forming similarity.

Введение. Зетовый профиль – конструкционный или декоративный профиль из металлопроката, имеющий форму буквы “Z”. В рамках данной работы исследуются тонколистовые зетовые профили толщиной до 2 мм из холоднокатанной стали 08пс. Химический состав и механические характеристики указанной стали приведены в таблице 1 и таблице 2, соответственно [1].

Таблица 1 – Химический состав стали 08пс

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
				не более				
08пс	0,05- 0,11	0,05- 0,17	0,35- 0,65	0,03	0,035	0,10	0,30	0,30

Таблица 2 – Механические характеристики состав стали 08пс

Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	Относительное удлинение при разрыве, δ_5 , %	Относительное сужение, ψ , %
> 175	> 290	> 35	> 60

Большая толщина заготовок (от 1 мм и более) характерна для конструкционных профилей, качество которых регламентируется соответствующими ГОСТами, например ГОСТ 13229–78 [2]. Наиболее распространённый пример использования тонколистовых зетовых профилей – в качестве декоративных изделий и ограждений (рисунок 1). Зачастую эти профили имеют индивидуальные размеры, заданные потребителем. Несмотря на то, что не существует стандартов, регламентирующего характеристики таких профилей, конечный потребитель всегда предъявляет высокие требования к качеству данных профилей.

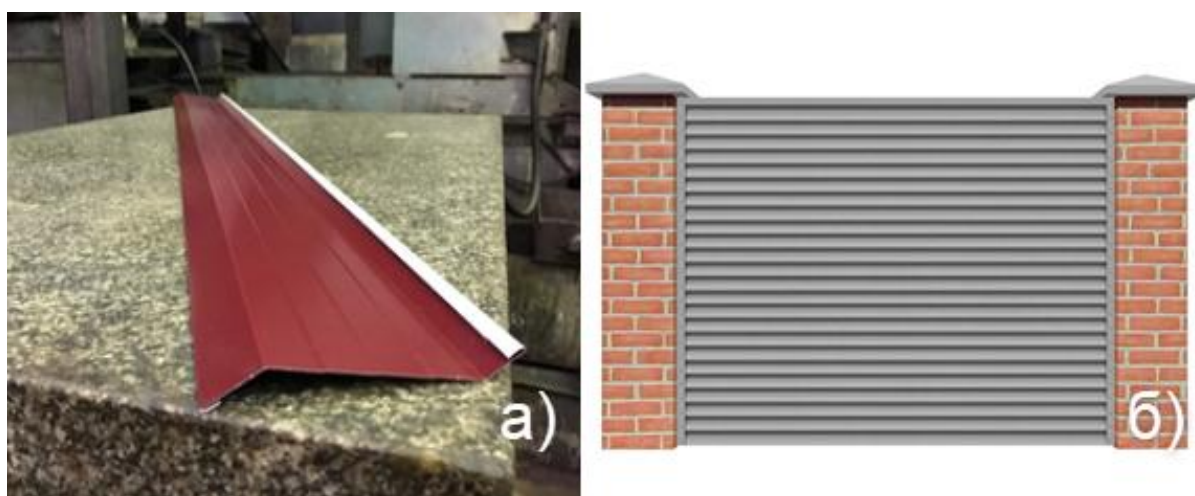


Рис. 1. Забор-жалюзи из зетовых ламелей а) Профиль; б) Конструкция сборки

Наибольшей трудностью при производстве зетовых профилей на профилегибочных станах является предотвращение дефекта продольного скручивания, возникающего из-за однонаправленности подгибки полков *b* профиля (рисунок 2). Согласно ГОСТ скручивание профилей (в данной работе обозначается Θ) вокруг продольной оси не должно превышать 1° на 1 м и общее скручивание не должно превышать произведения допускаемого скручивания на 1 м на длину профиля в метрах, но не более 10° [2].

Актуальность проблемы. Профилегировка по сей день остаётся отраслью, которая во многом полагается на эмпирический опыт инженеров. В связи с этим зачастую производство калибровок для новых типоразмеров профилей происходит итерационным путём. Инженер на основе своего опыта создаёт калибровку, которая зачастую даёт профиль с дефектом, затем происходит переточка или изготовление новой оснастки, переналадка оборудования и повторный прокат. Это приводит к временным и материальным затратам (рисунок 2).



Рис. 2. Блок-схема итерационного способа

Согласно статистике, представленной предприятием ООО «Мобипроф», специализирующимся на производстве мобильных

профилегибочных станов, в последние годы имеется стабильный спрос на станы, производящие профиль по чертежам заказчика (рисунок 3). Среди всех станов в среднем 3 в год – производящие стальные тонколистовые зетовые профили новых типоразмеров. Соответственно проектирование калибровок для производства тонколистовых зетовых профилей – актуальная задача.

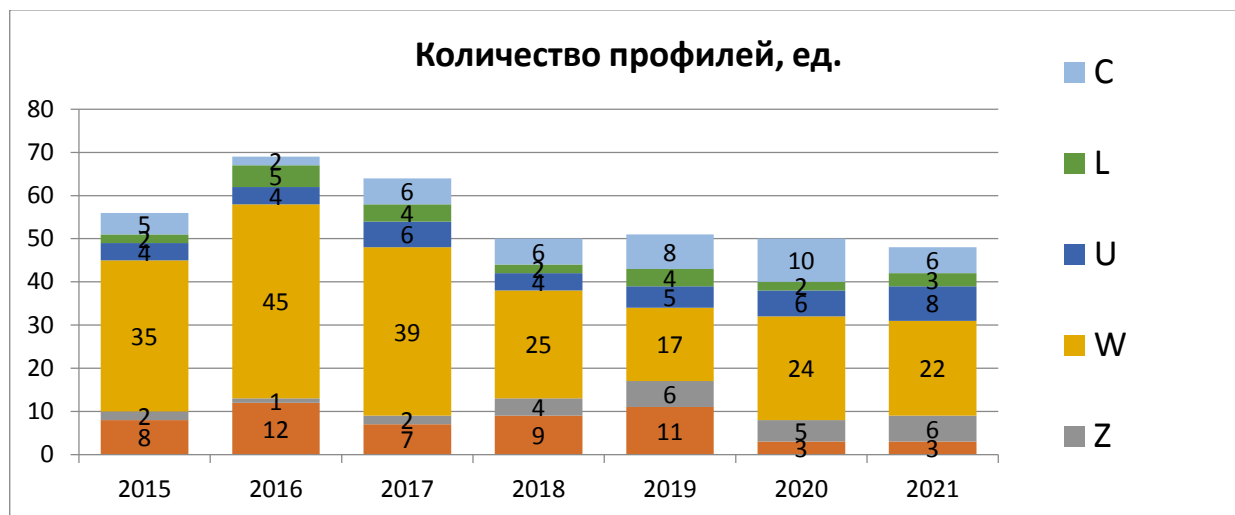


Рис. 3. Статистика ООО «Мобипроф» по произведённым профилегибочным станам

Влияние факторов на естественное скручивание. В общем случае скручивание зетовых профилей зависит от нескольких факторов, таких как геометрические размеры профиля, углы подгибки за переход и механические характеристики заготовки.

$$\theta_{\text{естеств}} = f(H, b, s, \Delta\alpha, \sigma_{0,2}, E', G), \quad (1)$$

где H, b, s – ширина стенки, высота подгибаемых полок и толщина профиля соответственно,

$\Delta\alpha$ – угол подгибки полок за переход,

$\sigma_{0,2}, E', G$ – механические характеристики заготовки.

Предпринята попытка исследовать влияние геометрических характеристик профиля и углов подгибки за переход на его естественное скручивание, то есть при профилировании с горизонтальной стенкой профиля (рисунок 4).

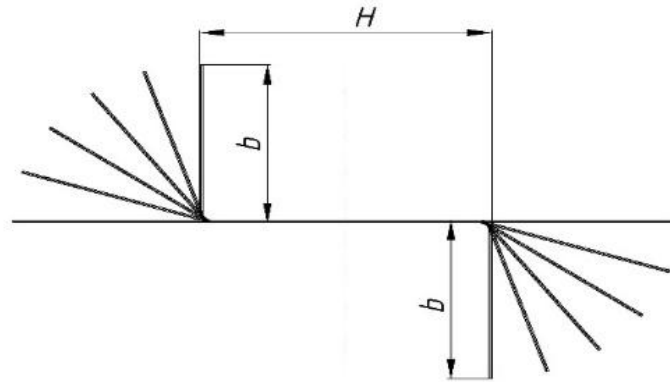


Рис. 4. Цветок формовки зетового профиля с горизонтальной стенкой

На рисунке 5 синим изображена зависимость естественного скручивания от толщины для профиля, имеющего размеры $H=80\text{мм}$, $b=40\text{мм}$, при формовании его за 5 проходов. Данные, получены при помощи моделирования процесса профилирования в программе LS-DYNA. Видно, что зависимость скручивания от толщины неявная, поскольку она влияет как на усилие профилирования, требуемое для подгибки полок, так и на способность самого профиля противостоять кручению. В этой же координатной плоскости оранжевым цветом изображен график угла поворота профиля в последней клетке $\beta,^\circ$ вокруг точки, расположенной на середине стенки H , при условии равного шага поворота стенки профиля за переход. При том, для этого графика каждая точка угла поворота β характеризуется минимальным скручиванием профиля, т.е. $\theta=0$. Из графика ясно, что наиболее трудно предотвращать дефект, возникающий на тонколистовых профилях, имеющих низкую крутильную жёсткость.

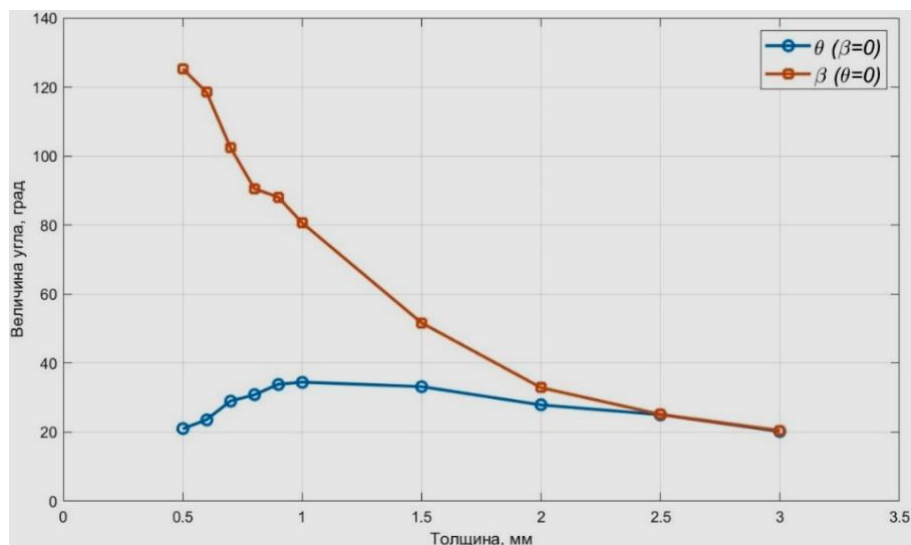


Рис. 5. Угол естественного скручивания профиля Z-80x40xS и требуемый угол поворота стенки в последней клетке для правки скручивания при формовке за 5 переходов [3]

Предпринята попытка рассмотреть влияние ширины стенки H на естественное скручивание θ для разных толщин профиля s при условии, что размер подгибаемой полки ($b=40\text{ мм}$) и угол подгибки за переход ($\Delta\alpha=18^\circ$) остаются неизменными (рисунок 6). Притом по горизонтальной оси представлено отношение величины стенки профиля к его неизменной в каждом случае толщине, т.е. H/s . Также были построены аналогичные графики для профиля с толщиной $s=0,5\text{ мм}$ при увеличенном в два раза количестве формирующих переходов (рисунок 7). Из графиков видно, что при увеличении относительной величины H/s естественное скручивание θ уменьшается, причём при одинаковом H/s естественное скручивание θ меньше у профиля, имеющего большую толщину. Также можно сделать вывод о том, что при увеличении дробности деформации (количества формирующих переходов) скручивание уменьшается.

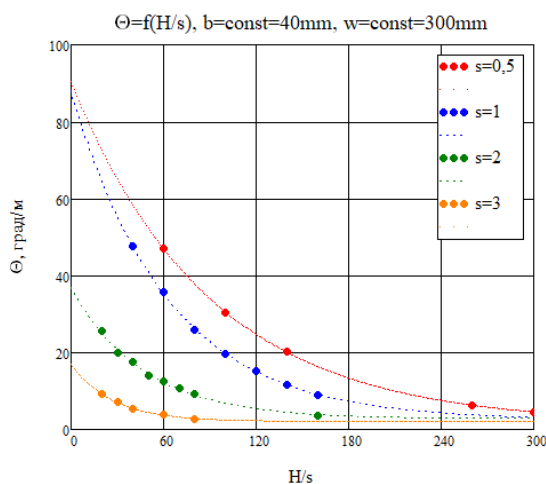


Рис.6. Графики углов скручивания в зависимости от отношения (H/s) для разных толщин

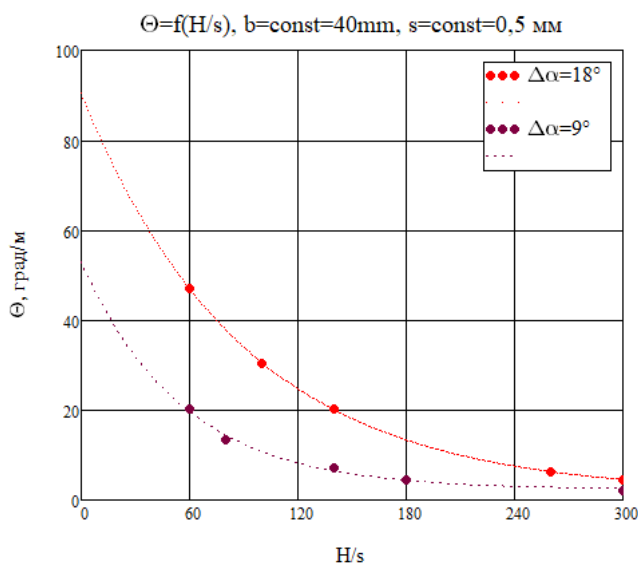


Рис. 7. Графики углов скручивания в зависимости от отношения (H/s) для разных углов подгибки за переход

Таким образом, скручивание обратно пропорционально ширине стенки, о чём также говорит формула определения относительного угла закручивания открытого профиля θ , рад [4]. При неизменных составляющих формулы (2) и увеличении величины стенки H , увеличивается общая длина профильной линии l , тогда скручивание профиля уменьшается.

$$\theta = \frac{M_k}{GJ_k} = \frac{M_k}{G \frac{1}{3} \delta^3 l}, \quad (2)$$

где M_k – Скручивающий момент, $H^*_{мм}$;

G – Модуль упругости второго рода (модуль сдвига), $МПа$;

δ – толщина профиля, $мм$;

l – общая длина профильной линии, $мм$.

Подобие процессов профилегибки. Представленные выше графики не являются исчерпывающими с точки зрения описания естественного скручивания, поскольку на него влияют также и другие факторы – толщина заготовки, размер подгибаемой полки и количество формирующих переходов. Для того, чтобы изучить влияние различных факторов на естественное скручивание по-отдельности на ограниченном количестве математических моделей, решено обратиться к подобию процессов профилирования. Это позволит получить область значений углов естественного скручивания для различных вводных данных ($\theta_{естеств} = f(H = var, b = var, s = var, \Delta\alpha = var, w = var)$).

Предлагаются следующие критерии подобия процессов профилегибки:

- Подобие геометрических размеров исследуемых профилей:
 $\frac{H_1}{H_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{s_1}{s_2} = k$;
- Подобие переходных процессов в межклетьевом пространстве, наличие зон стабилизации углов подгибки: $\frac{w_1}{w_2} = k$;
- Идентичные углы подгибки за переход: $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2$;
- Идентичный материал заготовки.
- Для моделирования процессов должны использоваться конечные элементы с аналогичным геометрическим коэффициентом подобия k .

На рисунке 8 изображен внешний вид наложенных друг на друга моделей процесса профилирования геометрически подобных зетовых профилей, изображённых на рисунке 9, с соблюденными критериями подобия:

- 1) Межклетьевые расстояния:
 - $w1 = 150 \text{ мм}$;
 - $w2 = 300 \text{ мм}$;
 - $w3 = 600 \text{ мм}$;
- 2) Одинаковый угол подгибки за переход:
 - $\Delta\alpha = const = 18^\circ$;
- 3) Одинаковый материал заготовки (сталь 08пс);

4) Принято допущение, что процесс квазистатический, силы инерции пренебрежимо малы, поэтому скорость подобных процессов может быть одинакова $v = \text{const} = 10 \text{ м/мин}$.

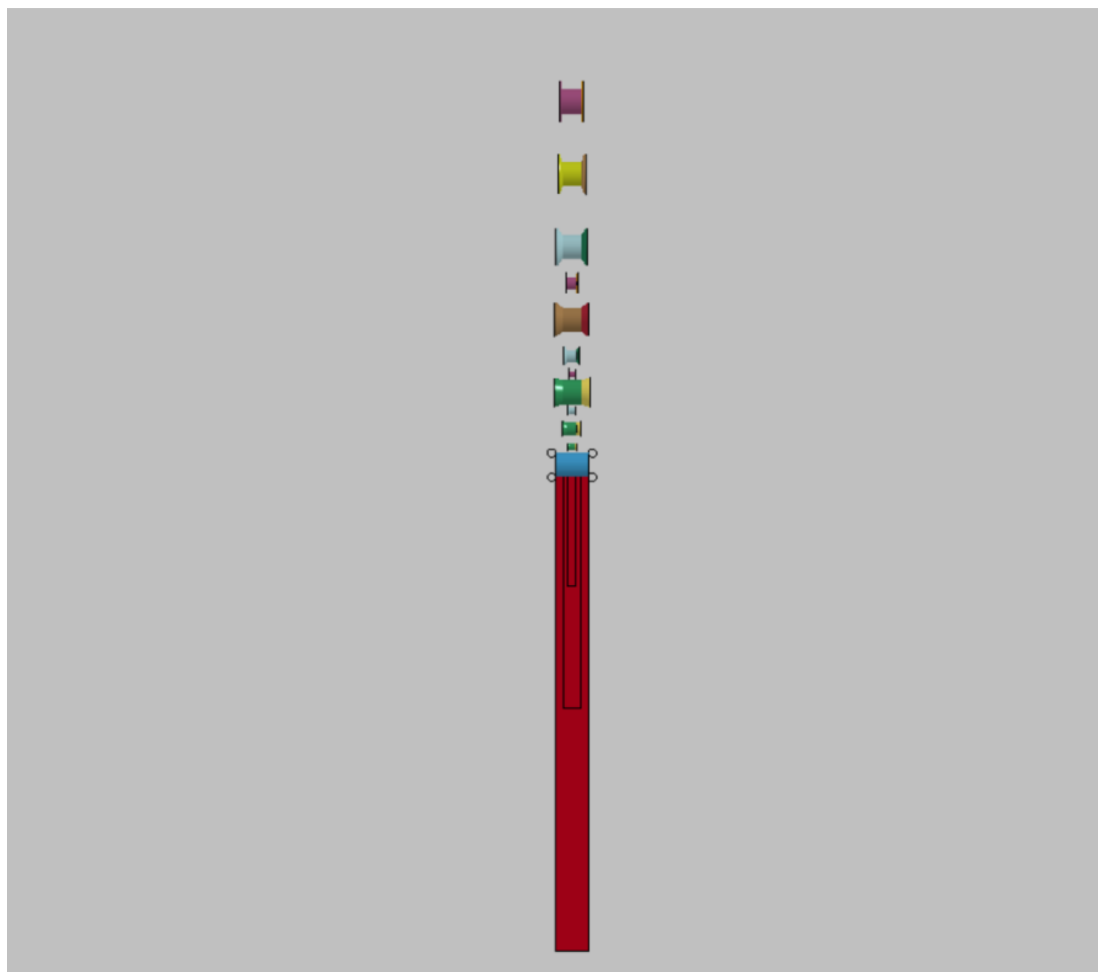


Рис. 8. Внешний вид наложенных друг на друга моделей с выполненными условиями геометрического подобия

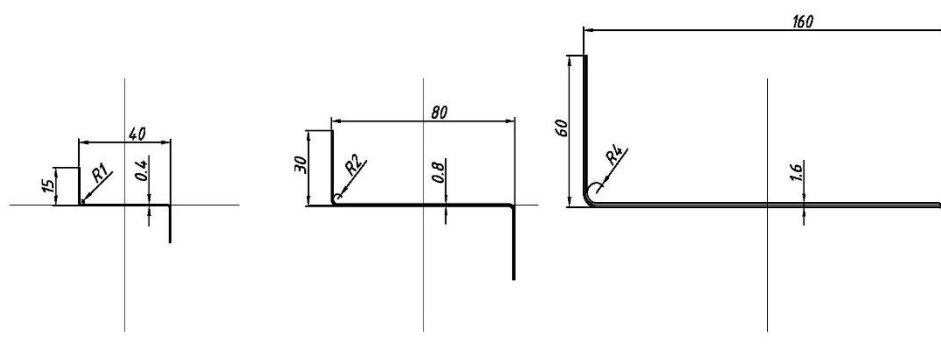


Рис. 9. Зетовые профили с геометрическим подобием

На рисунке 10 изображены приведённые графики углов подгибки полок профиля относительно его стенки. Вертикальными линиями изображены координаты осевых плоскостей формирующих роликов, т.е. клеток профилегибочного стана. Особенность графика заключается в том, что графики углов подгибки профилей с толщинами $s=0,8$ мм и $s=1,6$ мм изображены в зависимостях: $\alpha_2 = f\left(\frac{z_2}{2}\right)$ и $\alpha_3 = f\left(\frac{z_3}{4}\right)$. Так эти графики оказались приведены к $\alpha_1 = f(z_1)$. В результате приведённые графики углов подгибки оказались практически идентичными, что говорит о подобии переходных процессов в процессе профилегибки.

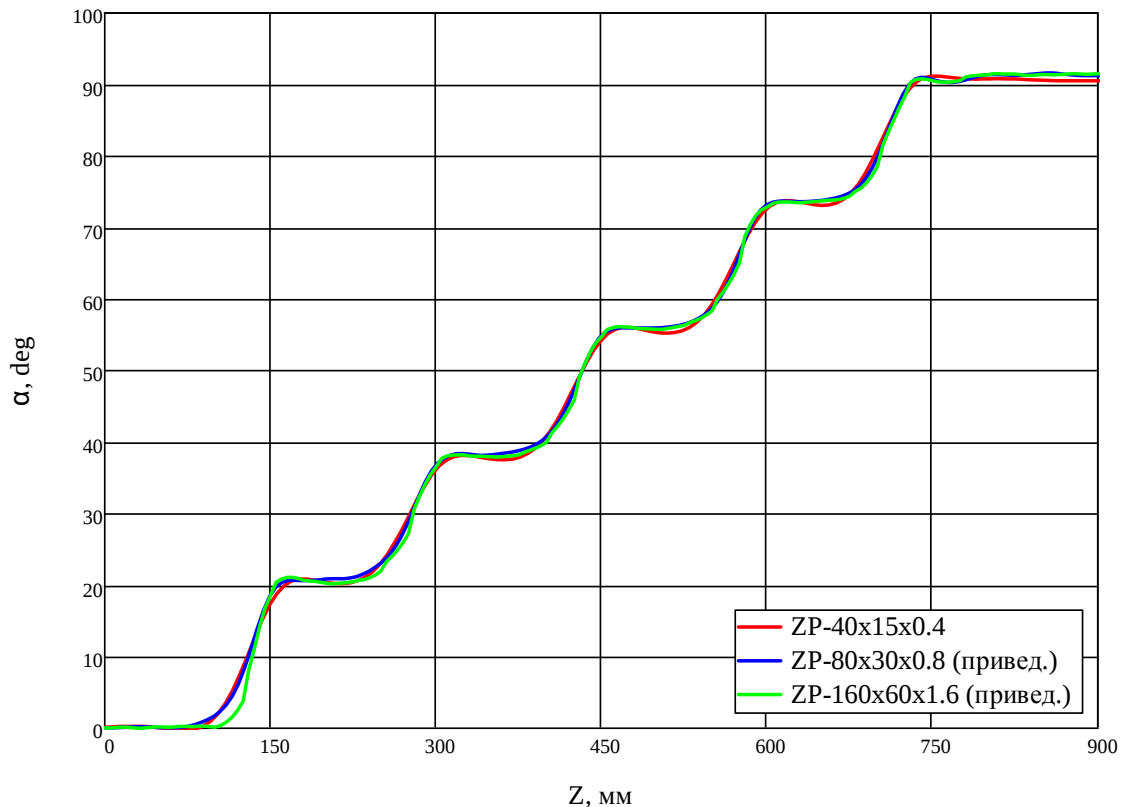


Рис. 10. Приведенные графики углов подгибки за переход

Однако главным результатом с точки зрения конкретного исследования явилось то, что конечное естественное скручивание профилей $\theta_{\text{естеств}}$, $^{\circ}/\text{м}$, оказалось подобно (таблица 3)

Таблица 3 – Результаты моделирования профилирования подобных профилей

Критерий/Наим. профиля	ZP-40x15x0,4	ZP-80x30x0,8	ZP-160x60x1,6
Скручивание $\theta_{\text{естеств}}$, $^{\circ}/\text{м}$	80,2	39,7	19,85
Коэффициент геометрического подобия	1	2	4
Коэффициент подобия скручивания	1	2,02	4,04

Перспективы подхода. В будущем предполагается использовать подобие процессов профилирования зетовых профилей для отыскания углов поворота профиля в переходах стана относительно горизонтали b , для минимизации скручивания, на основе рассмотренных выше исходных данных: геометрические характеристики профиля (H, b, s), углы подгибки за переход $\Delta\alpha$ и межклетьеовое расстояние w .

В конечном счёте на основе множества решений и интерполяции предполагается создать в цифровом виде модель, куда инженер вносит требуемую конфигурацию профиля и углы подгибки, и на основе этого получает углы поворота промежуточных сечений в калибрах стана для минимизации угла скручивания (рисунок 11).

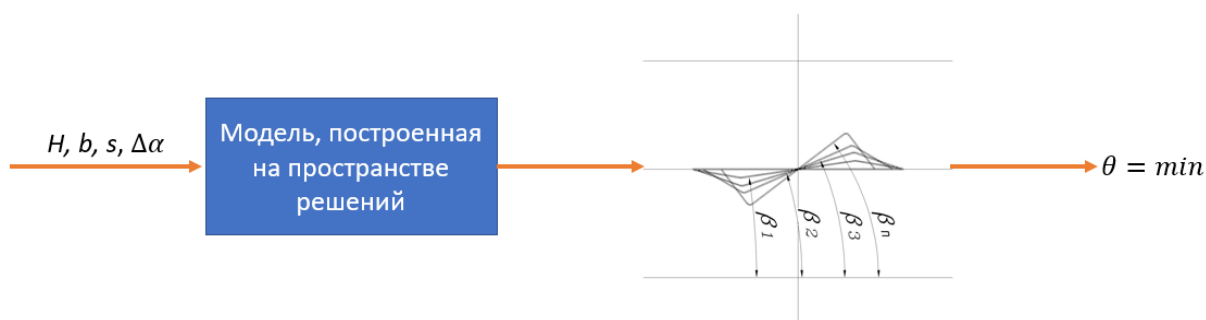


Рис. 11. Перспектива применения методики

Выводы. Проблема скручивания зетовых профилей является особенно актуальной для изделий, произведённых из тонколистовых заготовок. На этот дефект влияют множество факторов, такие как: геометрические размеры профиля, материал заготовки и величина угла подгибки за переход. Для того, чтобы проанализировать влияние этих факторов на скручивание профиля по отдельности, необходимо решение большого множества математических моделей. Однако, сократить это количество поможет применение явления подобия процессов профилегибки. Подобие процессов при соблюдении его критериев позволит интерпретировать результаты моделирования для различных вводных условий. В перспективе этот метод можно использовать для создания модели, которая позволит калибровщику вычислять угол поворота сечений в калибрах профилегибочного стана для минимизации скручивания готового профиля.

Список литературы

1. ГОСТ 1050-2013.Metalloпродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. [Электронный ресурс]. – введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014.
2. ГОСТ 13229–78. Профили стальные гнутые зетовые. Сортамент. [Электронный ресурс]. – введ. 1980-01-01. – М.: Стандартинформ, 2012.
3. Поворов, С. В. Исследование скручивания зетового профиля в процессе его формовки на профилегибочном стане / С. В. Поворов, Д. С. Волгин,

Д. В. Егоров // Заготовительные производства в машиностроении. – 2022. – Т. 20, № 5. – С. 218-222.

4. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов: учебник для студентов высш. техн. учеб. зав. – 10-е изд., перераб. и доп. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 588 с.

УДК 623.455.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫТЯЖКИ ДВОЙНОЙ МОЙКИ

Гу Цзявэй¹, Евсюков С.А.², Артюховская Т.Ю.³

3 – аспирант каф. «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

4 – д.т.н. профессор, зав. каф. «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

5 – к.т.н, доцент каф «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Баумана, г. Москва.

Аннотация. Представлены результаты моделирования вытяжки двойной мойки с применением программного продукта Dynaform. Анализируется процесс вытяжки мойки и определяется максимальная глубина данной двойной мойки без дефектов.

Ключевые слова: вытяжка, двойная коробка, трение, предел вытяжки, МКЭ, SS304.

INVESTIGATION OF THE DOUBLE SINK HOOD

Guo Jiwei¹, Evsyukov S. A.², Artyukhovskaya T. Y.³

3 – PhD student at the at the department of metal forming technologies, BMSTU, Moscow

4 – ScD, professor, head of the department of metal forming technologies, BMSTU, Moscow

5 – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Deputy Head of metal forming technologies, BMSTU, Moscow.

Abstract. The article presents the results of modeling a double sink hood using the Dynaform software product. The process of extraction of the sink is analyzed and the maximum depth of this double sink without defects is determined.

Keywords: drawing, double box, friction, exhaust limit, FEM, SS304

Номенклатура деталей типа кухонная мойка весьма многочисленна и разнообразна как по размерам и форме, так и по числу отделений. В данной статье приводится анализ процесса изготовления мойки с двумя отделениями прямоугольной формы (рис.1).

Технологический процесс изготовления подобных деталей включает вырезку плоской заготовки с последующей вытяжкой и обрезкой по контуру. Как известно, в процессе вытяжки вертикальная стенка образуется за счет трансформации (деформации) плоского фланца. Однако, в данном случае размеры фланца в зоне между отделениями не велики, что ограничивает глубину получаемой детали. В статье представлены результаты моделирования вытяжки мойки с двумя отделениями прямоугольной формы с применением программного продукта Dynaform. Цель анализа – найти максимальную глубину вытянутой части.

Исходные данные и определение размеров заготовки

Исходная деталь изготавливается из нержавеющей стали SS 304 толщины 0,8 мм. На рисунке 1 представлен эскиз детали двойной коробки (маленькая коробка и большая коробка) с размерами.

Процесс вытяжки и деформация прямоугольных деталей относительно сложны. Получить деталь с точными размерами фланца невозможно, поэтому после вытяжки края обрезают. Поэтому при определении размера заготовки необходимо учитывать припуск на обрезку фланца. В данном случае, в соответствии с рекомендациями [1-3] припуск на обрезку

составляет 6 мм.

Ш и р и н а фланца с припуском на обрезку составляет:

$$B = 470 + 6 * 2 = 482 \text{ мм}$$

Д л и н а фланца с припуском на обрезку составляет:

$$A = 830 + 6 * 2 = 842 \text{ мм}$$

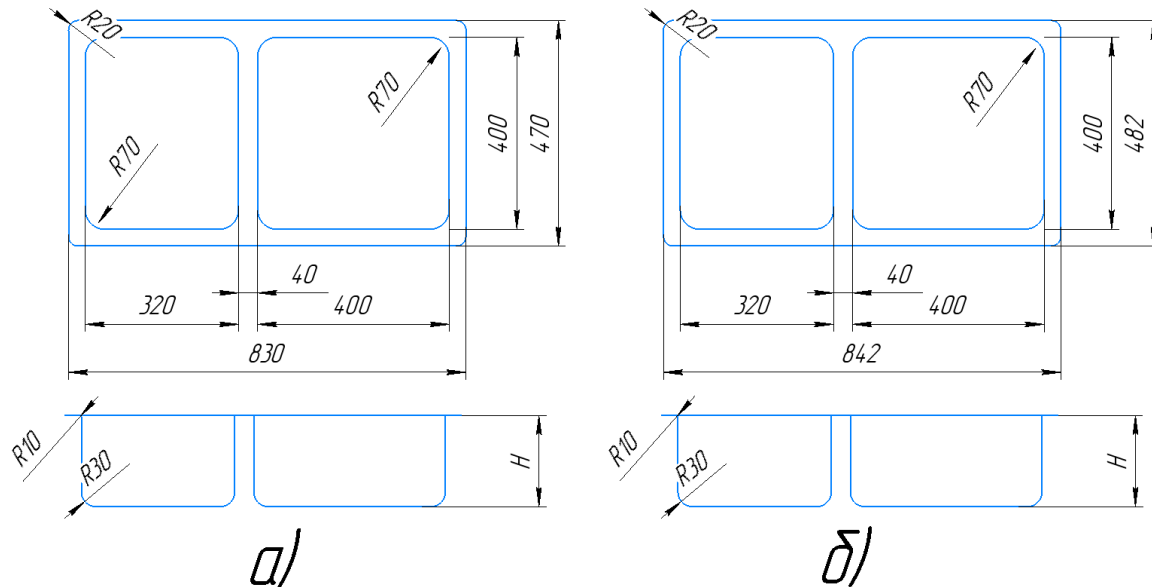


Рис. 1. Эскиз детали двойной коробки. а) размеры окончательной детали;
б) размеры детали с припуском на обрезку фланца.

Для определения максимальной глубины вытяжки данной двойной майки были заданы три высоты H детали (как показано в таблице 1). При этом остальные размеры оставались постоянными.

В соответствии с размером и припуском на обрезку по чертежу предварительной детали с помощью программного обеспечения SOLIDWORKS создана 3D-модель объекта детали. Используя функцию расширения детали программного обеспечения Dynaform, получили размеры заготовки. Окончательная оптимизированная форма и размер заготовки показаны на рисунке 2.

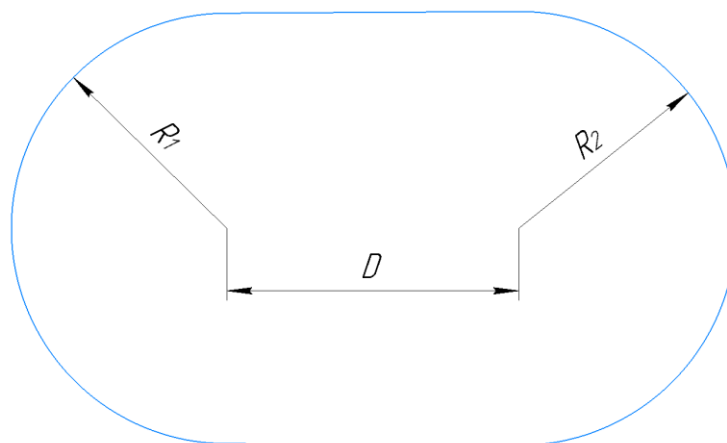


Рис. 2. Эскиз заготовки

Таблица 1. Размеры заготовки

Глубина(мм) H	Размеры		
	D(мм)	R ₁ (мм)	R ₂ (мм)
80	484	303	309
90	484	310	314
100	484	314	318

Моделирование

Используется программное обеспечение SOLIDWORK для создания модели поверхности матрицы. Файл модели поверхности матрицы импортируется в программное обеспечение Dynaform. Пуансона и прижим заготовки создаются методом смещения.

Из [3,4] известно, что при вытяжке стали с маслом коэффициент трения колеблется от 0,05 до 0,25. Поэтому при моделировании коэффициент трения выбираем равным 0,125.

Таблица 2 – Исходные данные для моделирования

Материал заготовки	SS304
Толщина заготовки(мм)	0,8
Единичное усилие прижима (МПа)	1
Зазор между инструментами (мм)	1,1*0,8
Тип процесса	Двойное действие
Скорость пуансона(мм/с)	2000
Коэффициент трения	0,125

Процесс вытяжки (рисунок 3) разделен на два этапа: первый этап — прижим опускается вниз, прижимая лист; второй этап — пуансона движется вниз, вытягивая листовую заготовку в матрицу.

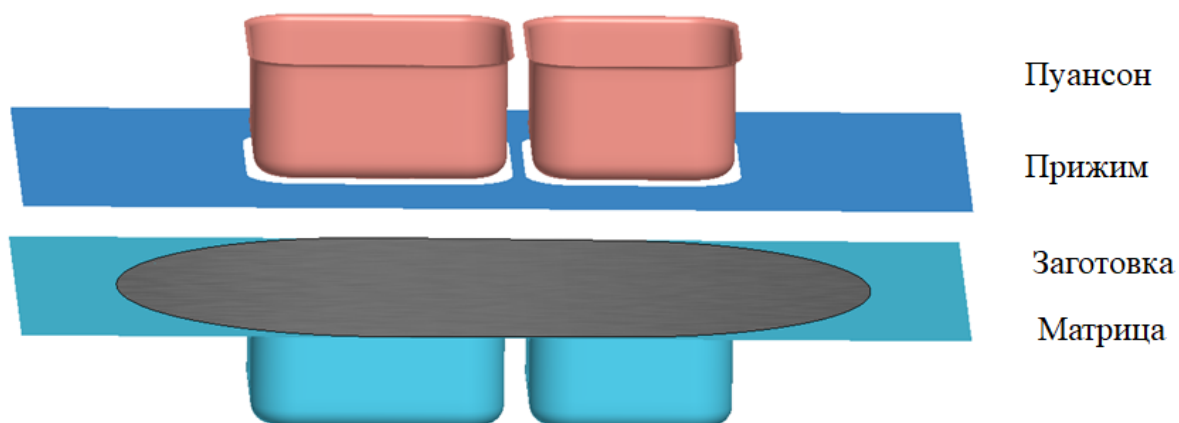


Рис. 3. Схемы моделирования вытяжки

Результаты моделирования представлены на рисунке 4. Как следует из данных, представленных на рисунке, для деталей с первоначально заданной глубиной $H=80$ мм и $H=90$ мм процесс вытяжки проходит успешно. Для детали с первоначально заданной глубиной $H=100$ мм возможное повреждение наблюдается на участке между полостями при вытяжке до глубины 93 мм.

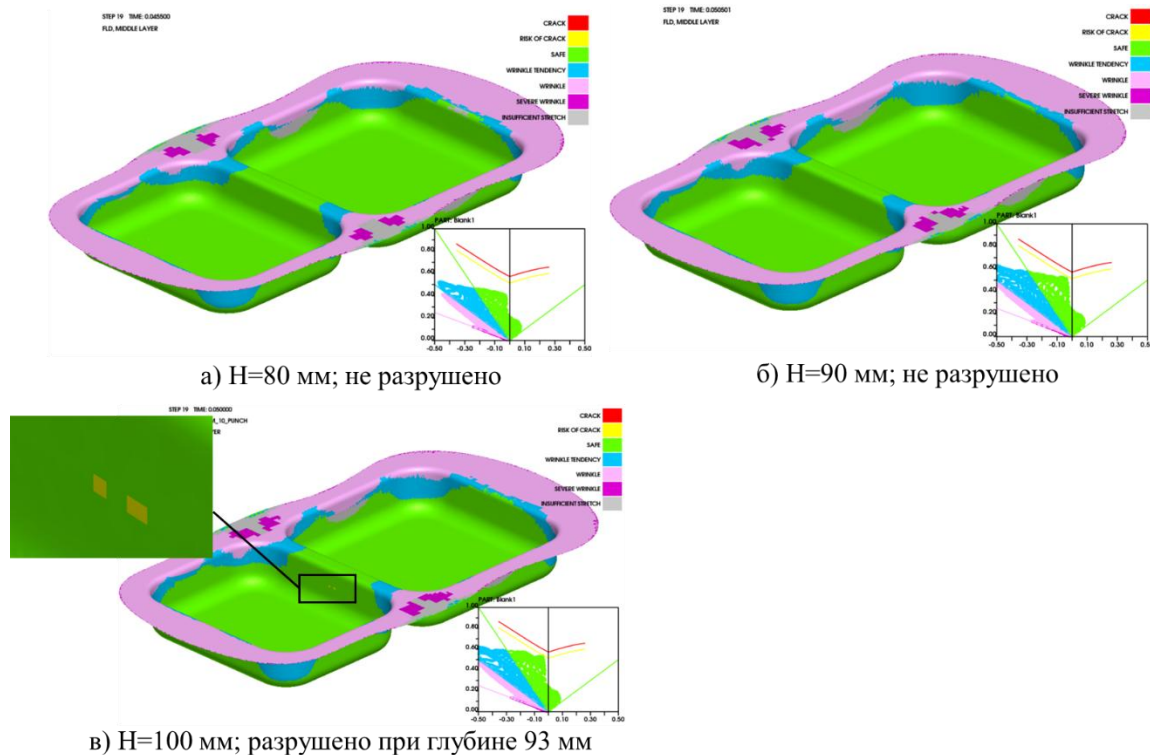


Рис. 4. Результаты моделирования.

Вывод. По результатам моделирования можно сделать вывод, что максимальная глубина данной двойной мойки не превышает 100 мм. Местом, где разрушается заготовка в процессе вытяжки, является внутренняя прямая часть маленькой коробки. Поскольку с уменьшением глубины полости уменьшаются и размеры плоской заготовки (что облегчает процесс вытяжки) предполагается, что максимальная глубина этой детали составляет около 95 мм.

Список литературы

1. Попов Е А, Ковалев В Г, Шубин И Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. – М.: Изд-во МГТУ им. НЭ Баумана, 2003.
2. Зубцов, М.Е. Листовая штамповка. Учебник для студентов вузов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
3. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке. – М.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
4. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка/ Под общ. ред. Л.И. Рудмана. – М.: Машиностроение, 1988.

УДК 621.981

ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИСТОВЫХ И ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Илюшкин М.В.¹, Марковцев В.А.², Халилов Ф.Х.³

1 – к.т.н., зам. генерального директора по науке АО «Ульяновский НИАТ»

2 – д.т.н., генеральный директор АО «Ульяновский НИАТ»

3 – нач. НИС-132 АО «Ульяновский НИАТ»

Аннотация. В статье описано применение виртуального моделирования при разработке новых технологических процессов и создание виртуальных станков с использованием программы LS-DYNA.

Ключевые слова: виртуальное моделирование, LS-DYNA, виртуальные станки, технологические процессы.

THE USE OF VIRTUAL MODELING FOR THE MANUFACTURE OF SHEET AND PROFILE PARTS TECHNOLOGICAL PROCESSES DEVELOPMENT

Abstract. The article describes the use of virtual modeling in the development of new technological processes and the creation of virtual machines using the LS-DYNA program.

Keywords: virtual modeling, LS-DYNA, virtual machines, technological processes.

В настоящее время на многих предприятиях страны используется средства компьютерного моделирования для разработки новых и усовершенствование существующих технологических процессов изготовления различных деталей для авиационной, автомобильной, строительной и других сфер.

На АО «Ульяновский НИАТ» для моделирования технологических процессов используется программа LS-DYNA. Использование данной программы позволяет:

- заменить реальный эксперимент на виртуальный;
- предсказать поведение материала до изготовления в металле технологической оснастки;
- показать дефекты детали при выбранном технологическом режиме (углов формообразования, операций штамповки и т.п.);
- отработать любое количество технологических переходов (например, схем и калибров) и посмотреть влияния на конечную деталь (профиль).

Среди сложностей и ограничений применение виртуальных моделей можно отметить:

- необходимость проведения валидации процесса для подтверждения полной адекватности виртуальной и практической (или теоретической) модели;
- сложности с моделями материала, где требуется точное описание упругопластических, скоростных, тепловых характеристик, включая

сложно-напряженное состояние, существующий реальный разброс материала по толщинам и свойствам;

- необходимость проведения верификации процесса, т.е. подтверждения стабильности от изменения математических факторов, например. по таким параметрам как модели материала, контактные взаимодействия, выбор типов элементов и пр.

Одно из основных применений виртуального моделирования на АО «Ульяновский НИАТ» – это усовершенствования технологических схем и калибров при изготовлении гнутых профилей.

При разработке технологических схем изготовления профилей фюзеляжного набора самолета (стрингер и шпангоут) применяется метод стесненного изгиба, который ранее неоднократно нами был описан и смоделирован (рис. 1).

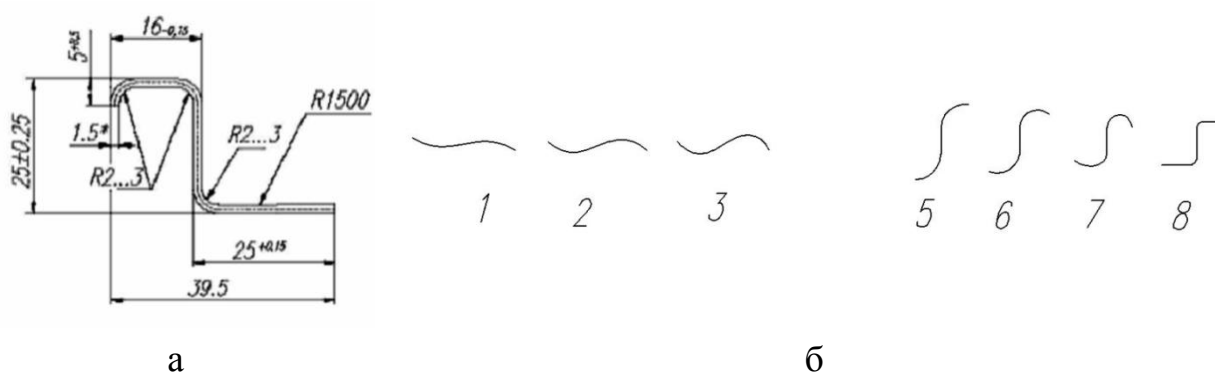


Рис.1. Пример профиля стрингер для самолета МС-21 (а) и его технологическая схема изготовления (б)

По результатам моделирования определялось НДС участков профиля, энергосиловые параметра процесса, а также наличие дефектов и соответствие сечения заданного исходным чертежом.

Виртуальное моделирование позволяет проанализировать различные варианты технологических схем и выбрать вариант наиболее приемлемый по принятым критериям:

- минимизация количества переходов,
- скорость процесса формообразования и отсутствие ручной заправки,
- повышение ресурса технологической оснастки,
- отсутствие или минимизация пружинения на краях профиля,
- получение профиля с заданными параметрами утонения или утолщения по зонам сгиба,
- получении профиля с минимальными энергосиловыми параметрами.

На рис. 2 представлены результаты моделирования формообразования заготовки в роликовых калибрах по ранее разработанной технологической схеме для профиля – стойка дорожная 120x55x5.

Среди критериев которые использовали при проектировании данной оснастки были повышение ресурса технологической оснастки и минимизация пружинения на краях профиля.



Рис. 2. Моделирование процесса формообразования заготовки в роликовых калибрах для профиля – стойка дорожная 120x55x5

При проектировании технологической оснастки можно создавать профили с требуемыми параметрами поперечного сечения в зависимости от эксплуатационных требований данного профиля и конструкции где данный профиль будет работать.

Например, для получения малых радиусов в ненагруженных конструкциях можно утонять или надрезать зоны сгиба в совмещении со сжатием в процессе формования, что позволит приблизить внутренние радиусы практически к нулевым. Для утолщения зон сгиба можно применять особые подходы – например метод стесненного изгиба с увеличенной исходной заготовкой и схемами воздействия, при которых металл перемещается в зону сгиба и др.

К примеру, данный профиль предназначен для установки в конструкции дорожных ограждений в качестве стойки (рис. 3) и выполняет основную роль для предотвращения значительного прогиба дорожного ограждения при наезде транспортного средства.

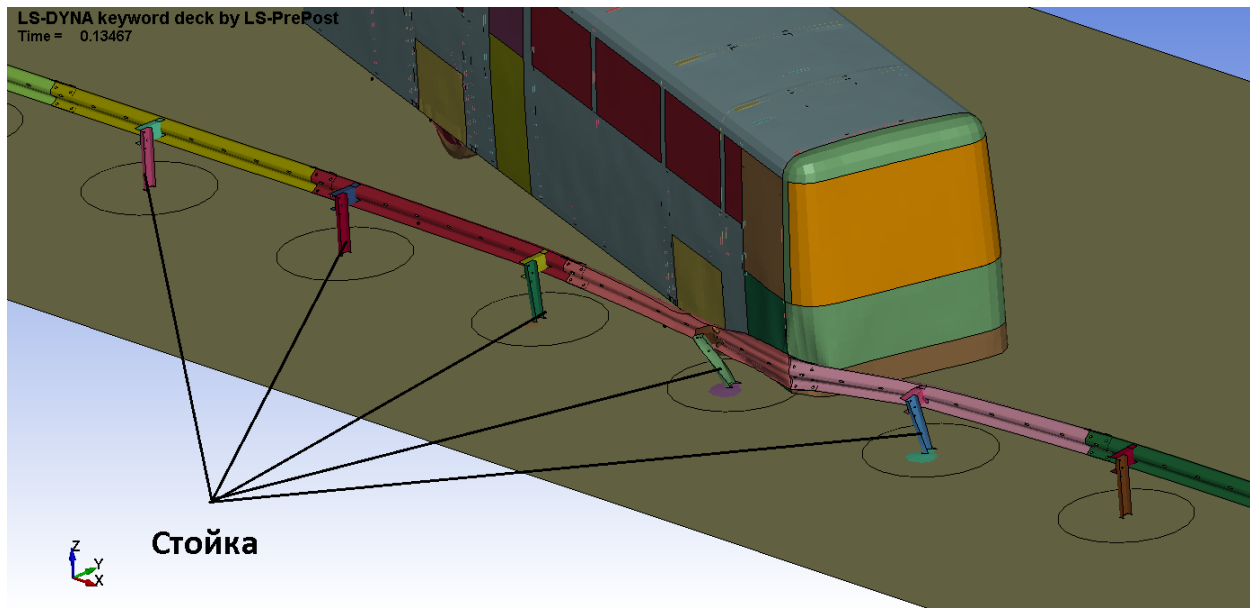


Рис. 3. Деформация дорожного ограждения со стойкой при наезде автобуса

При этом стойки в зависимости от массы наезжаемого транспортного средства может подвергаться различной деформации (рис. 4) – в основном это скрутка и изгиб профиля.

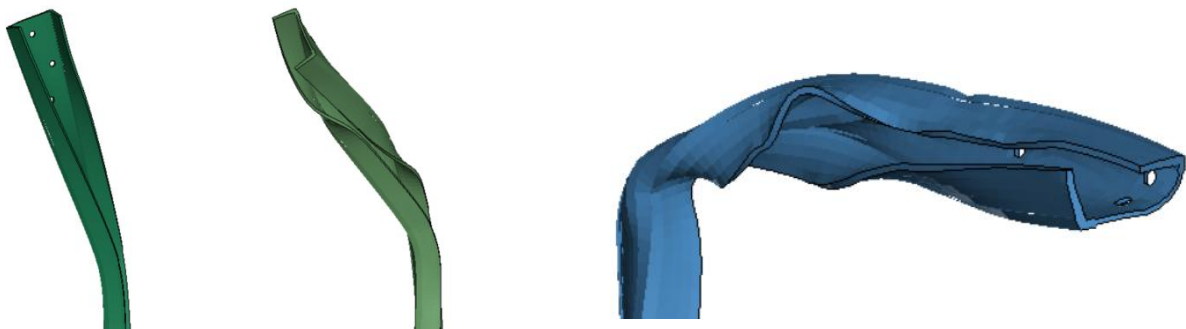


Рис. 4. Варианты деформации стоек при наезде транспортного средства

Изменив технологическую схему деформирования исходной заготовки и перераспределив металл из зон меньших деформаций в зоны больших и склонных в первую очередь к потере устойчивости можно увеличить сопротивляемость стойки воздействию удара (т.е. увеличить параметр удерживающей способности всей конструкции) без увеличения массы.

Виртуальное моделирование позволит оценить возможность изготовления профиля по предлагаемым технологическим схемам и методам профилирования. Например, метод стесненного изгиба не применяется для стальных материалов из за повышенных энергозатрат и износа технологической оснастки. Но возможные преимущества, например приближения сечения гнутого профиля к горячекатаному может нивелировать затраты на расход энергии и износ роликов.

Кроме того, виртуальное моделирование широко применяется и для моделирования краш-тестов, существуют полноценные методики по выполнению этих работ в Is-dyna. Таким образом, профиль полученный после виртуального моделирования технологической схемы может использоваться в модели дорожного ограждения на испытании ударом транспортным средством согласно принятым методикам. Это позволит сразу показать годится ли предлагаемый профиль для применения в дорожном ограждении и при отрицательном ответе изменить технологическую схему и снова проверить моделированием на краш-тесте. Преимущества виртуального моделирования в том, что данную процедуру можно сделать любое разумное количество раз пока не получится нужный результат.

Другим направлением применения конечно-элементного или виртуального моделирования на АО “Ульяновский НИИТ” является создание различных виртуальных станков – например, роликовых гибочных, растяжно-обтяжных и растяжных станков (прессов).

Часто заготовки подвергаются различной деформации под воздействием инструмента, который движется по сложным траекториям. Например, при обтяжке листовых материалов на растяжно-обтяжных прессах за движение зажимных захватов отвечает несколько механизмов обеспечивающих движение в различных плоскостях. Описать это движение математически бывает весьма затруднительно. К тому же создание полного аналога реального станка в виртуальном виде позволяет использовать уже наработанные методики по управлению этим станком.

Виртуальный станок представляет собой полную копию реального станка, включая движение кареток и инструмента, управление и ограничения по перемещению и др.

Пример виртуального растяжно-обтяжного станка (пресса) РО-3М приведен на рис. 5. Сама виртуальная модель сделана в программе Компас 3D и подробно описана в статье Булычова О.И. (представлена в данном сборнике). Средства программирования Компас 3D позволят установить начальное положение всех механизмов станка в рабочее положение в соответствии с изначально разработанным техпроцессом.

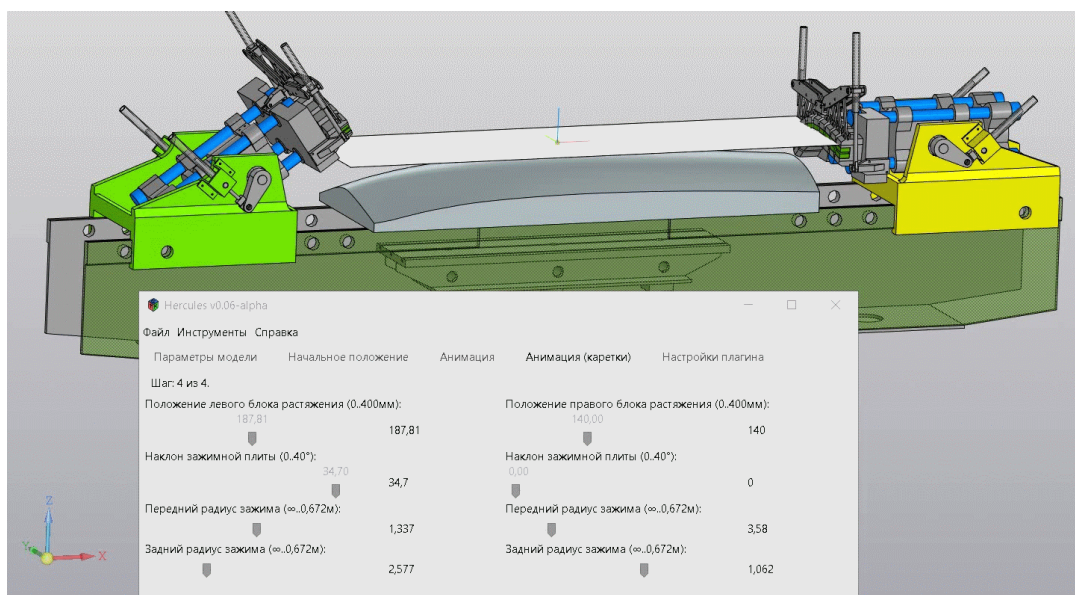


Рис. 5. Виртуальная модель станка РО-3М с панелью управления для установки исходных параметров

Далее виртуальная модель из Компаса 3D переносится в программу конечно-элементного моделирования ANSYS/LS-Dyna где непосредственно и выполняется расчет на деформирование заготовки. Для контроля исходной модели и просмотра результатов использовалась программа LS-Prepost.

Данная конечно-элементная модель представляет собой полную физическую модель реального станка, но упрощенную с точки зрения внешнего вида (рис. 6). Все механизмы в данной модели задаются через оболочечные и балочные элементы используя шарниры, которые в ls-dyna представлены в большом разнообразии.

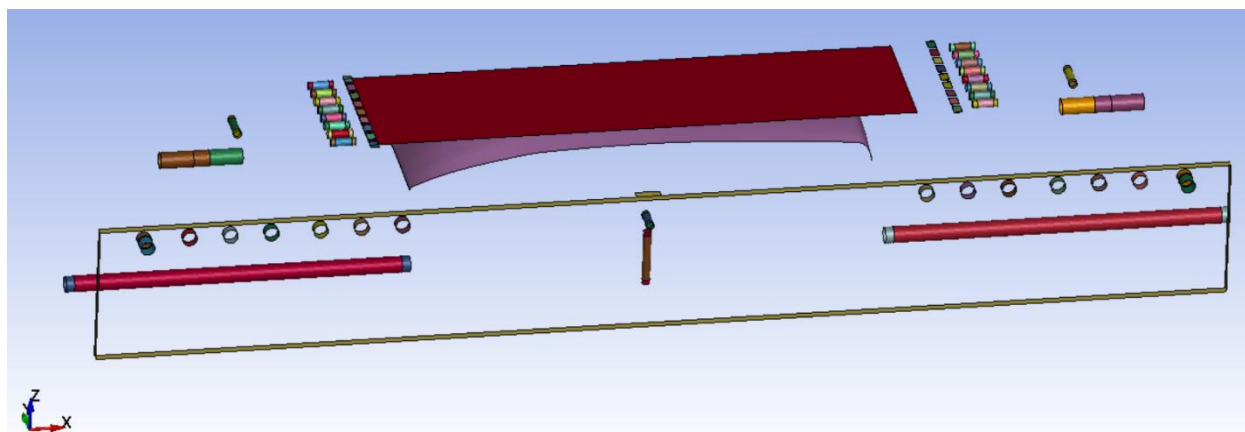


Рис. 6. Расчетная модель станка РО-3М для программы LS-Dyna

По результатам расчета можно проанализировать НДС заготовки, изменения толщин по полю заготовки (рис. 7), энергосиловые параметры и т.п. Также можно отследить дефекты в виде гофр при их наличии (рис. 8). Гофры представленные на рисунке не являются пластическими, а связаны со

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России
сжатием листа. После окончания деформирования гофры пропадают. Образование таких гофр полностью подтверждается практикой.

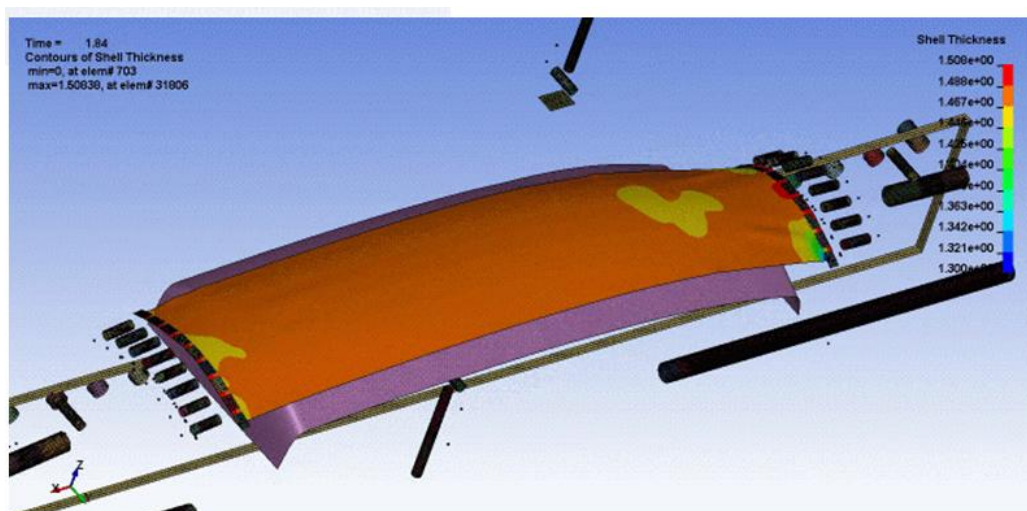


Рис. 7. Результаты обтяжки листового материала по пуансону на виртуальном станке РО-3М с выводом параметров толщины

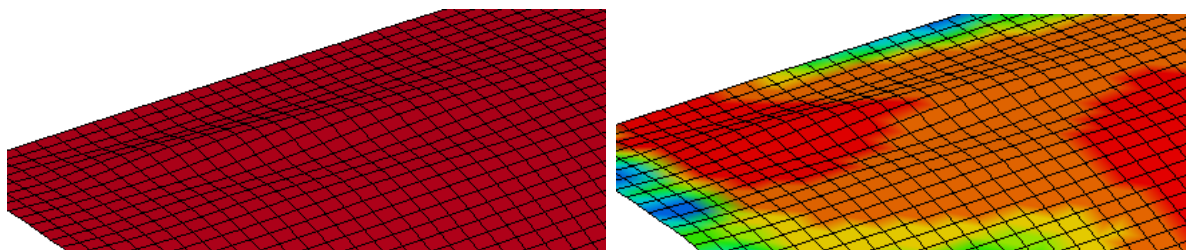


Рис. 8. Гофры на листе в процессе обтяжки

Кроме передачи виртуальной модели в Is-dyna данная виртуальная модель можете быть передана в другие расчетные программы, например, QFORM, Логос и др. Для этого требуется переработка модуля передачи под соответствующий код необходимой программы.

Виртуальная модель на АО «Ульяновский НИАТ» была также создана для растяжного прессы ПГР-6 (рис. 9).

В данном случае модель строилась непосредственно в программе Is-prepost без привлечения средств программирования в CAD программах. Также как и в предыдущем случае, движение механизмов были описаны с помощью шарниров.

В рамках данной работы рассчитывалась форма пуансона, учитывающая наличие упругого пружинения, после обтяжки заготовки. А также создавалась программа для управления цилиндрами прессы, обеспечивающая растяжение и обтяжку заготовки по траектории, зависящей от формы и длины профиля, свойств материала и прочее.

Перемещение было задано на гидроцилиндры пресса обеспечивающее растяжение и поворот левых и правых блоков пресса.

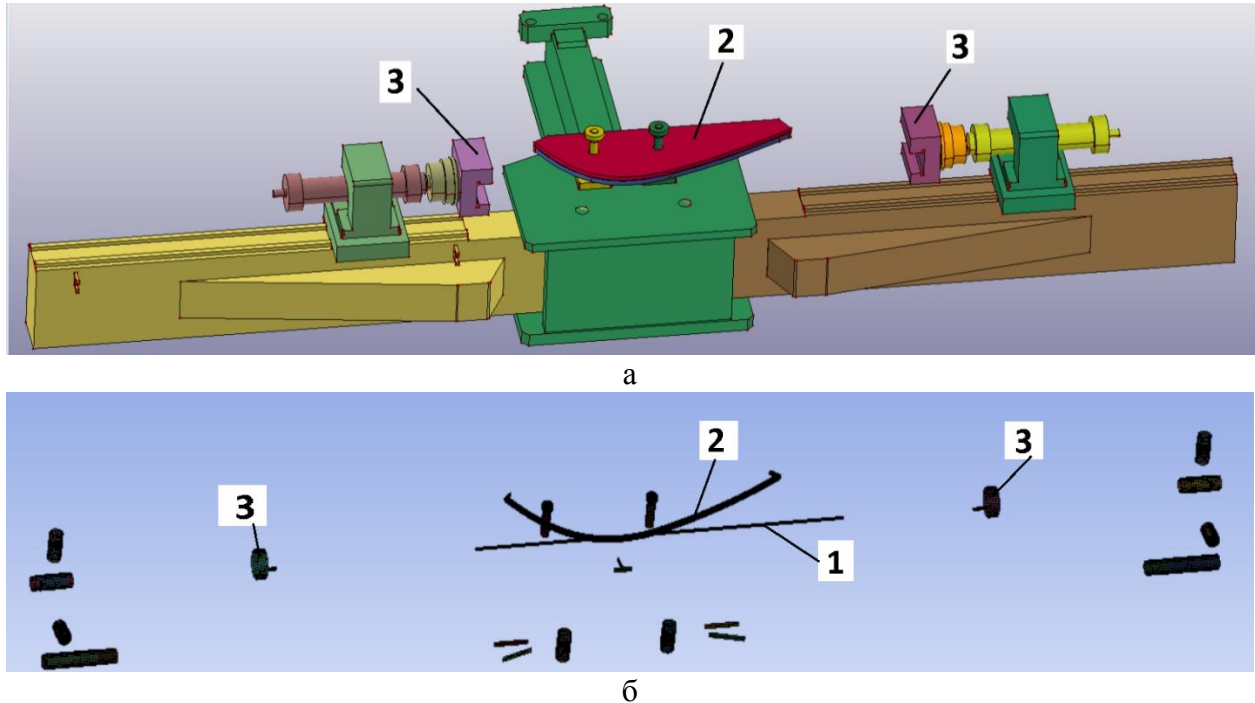
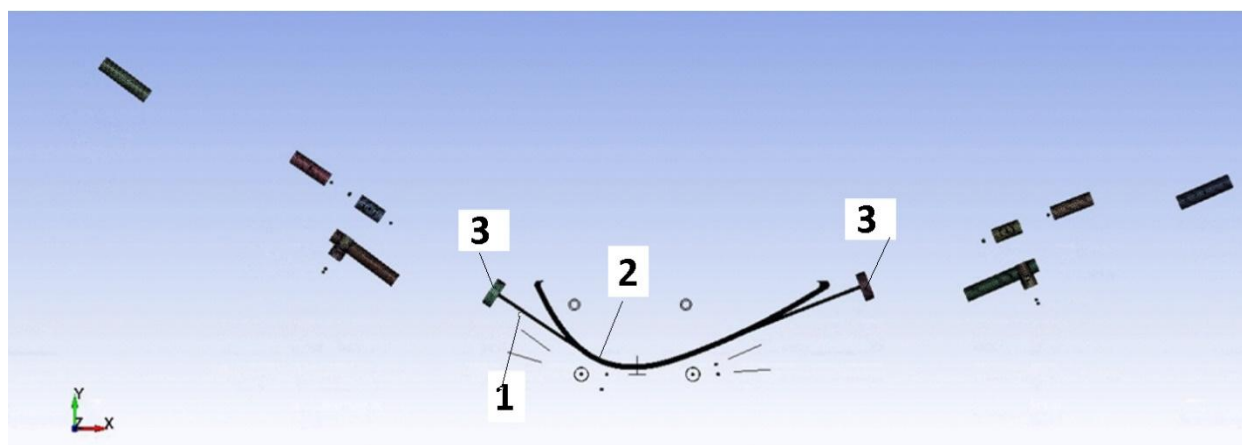


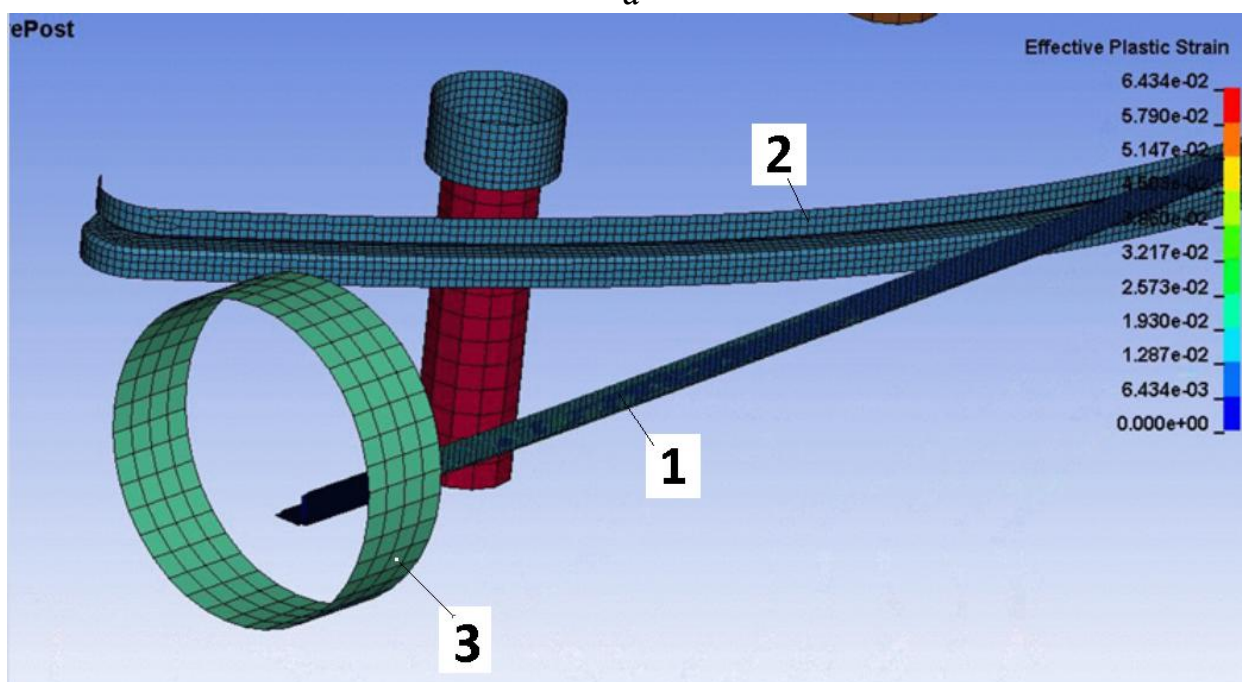
Рис. 9. 3D модель станка ПРГ-6 (а) и виртуальная модель, созданная в LS-Prepost (б):
1 – заготовка, 2 – обтяжной пуансон, 3 - зажимы

Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 10-11. Оценивались величины пластических деформаций по сечению профиля и сравнивались с допустимыми. Также оценивали величины упругих пружинений и сравнивались с расчетными.

Как известно пружинение детали зависит от технологических режимов формообразования. Преимущества виртуального моделирования, в данном примере, связана с возможностью регулировать перемещение гидроцилиндров станка таким образом, чтобы форма конечной детали попадала в требуемую геометрию.



а



б

Рис. 10. Результаты моделирования процесса обтяжки профиля на ПРГ-6 (промежуточный этап) в общем виде (а) и укрупненно левая часть (б) :
1 – заготовка, 2 – обтяжной пуансон, 3 – зажимы

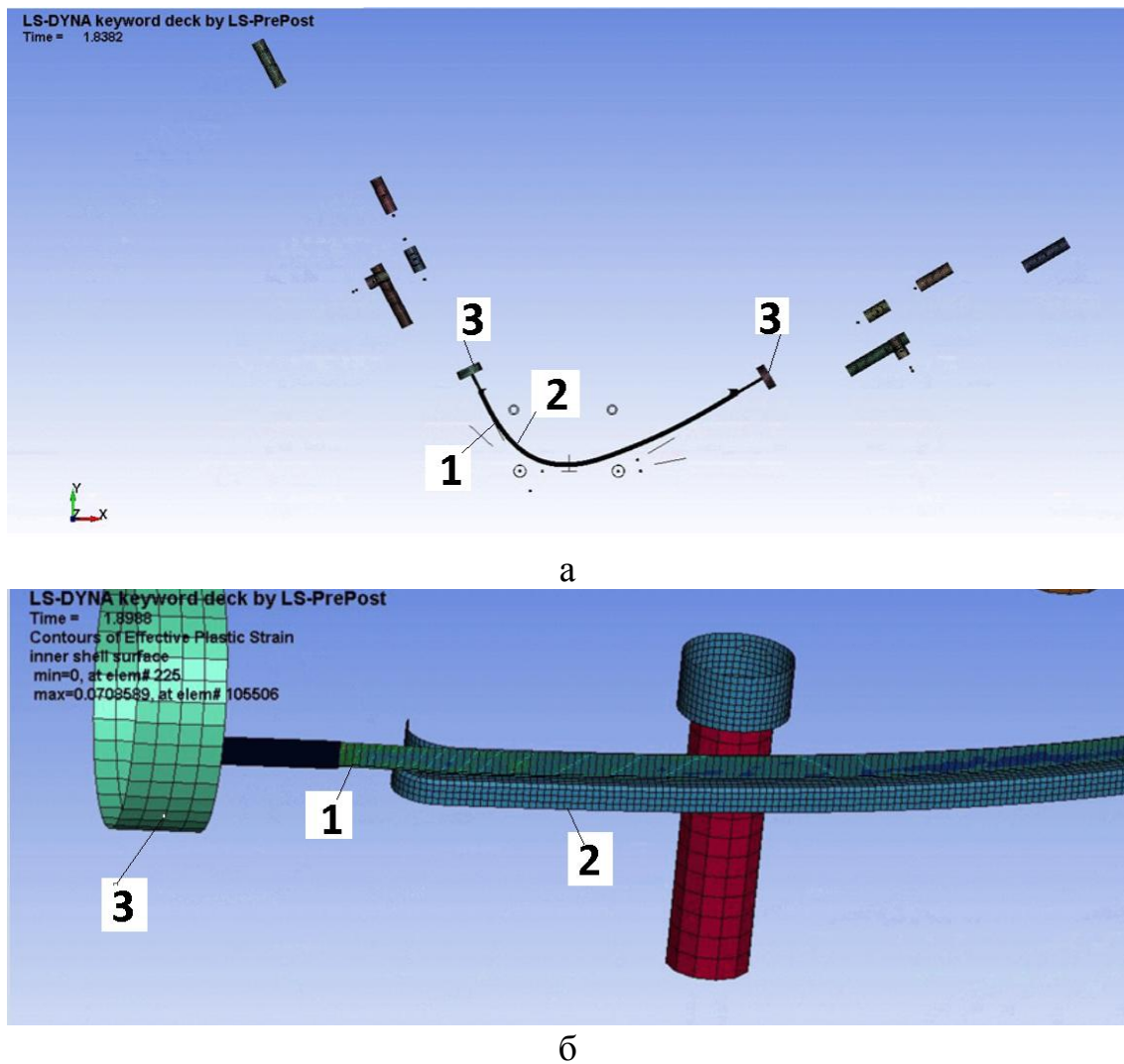


Рис. 11. Результаты моделирования процесса обтяжки профиля на ПРГ-6 (окончательный этап) в общем виде (а) и укрупненно левая часть (б) :
1 – заготовка, 2 – обтяжной пуансон, 3 – зажимы

После окончания отработки на виртуальной модели всех режимов формообразования и получения профиля в соответствии с чертежом детали данную программу управления гидроцилиндрами можно перенести на реальный станок ПРГ-6 и получать профили в автоматизированном режиме без ручной отладки процесса.

Еще одна виртуальная модель связана с гибочно-роликовым станком, предназначенным для получения профилей с различной продольной кривизной (рис. 12).

Преимущества данного станка относительно ПРГ-6 в отсутствии необходимости большого количества разнообразных обтяжных пуансонов, что значительно уменьшает стоимость изготовления таких профилей, поскольку для изготовления профиля кроме самой установки требуется только универсальная роликовая оснастка (6 роликов), а получаемая

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России

кривизна будет зависеть только от взаимного расположения этих роликов в процессе проката профиля.

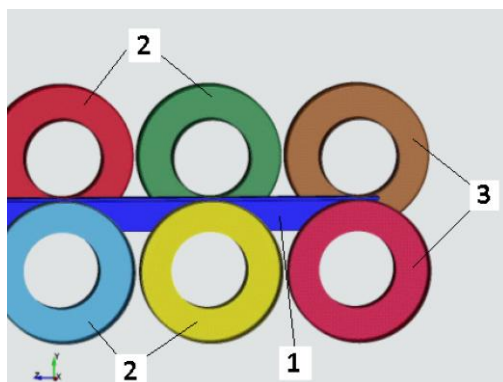


Рис. 12. Виртуальный гибочно-роликовый станок:

1 – заготовка, 2 – подающие ролики, 3 – гибочные ролики

В процессе разработки модели было проработано несколько виртуальных моделей. На рисунке 13 представлены результаты моделирования с использованием виртуальной 2D модели при изготовлении профиля с кривизной S-образного типа. На рисунке видно, что кривизна профиля в текущий момент времени зависит от угла поворота гибочной пары роликов.

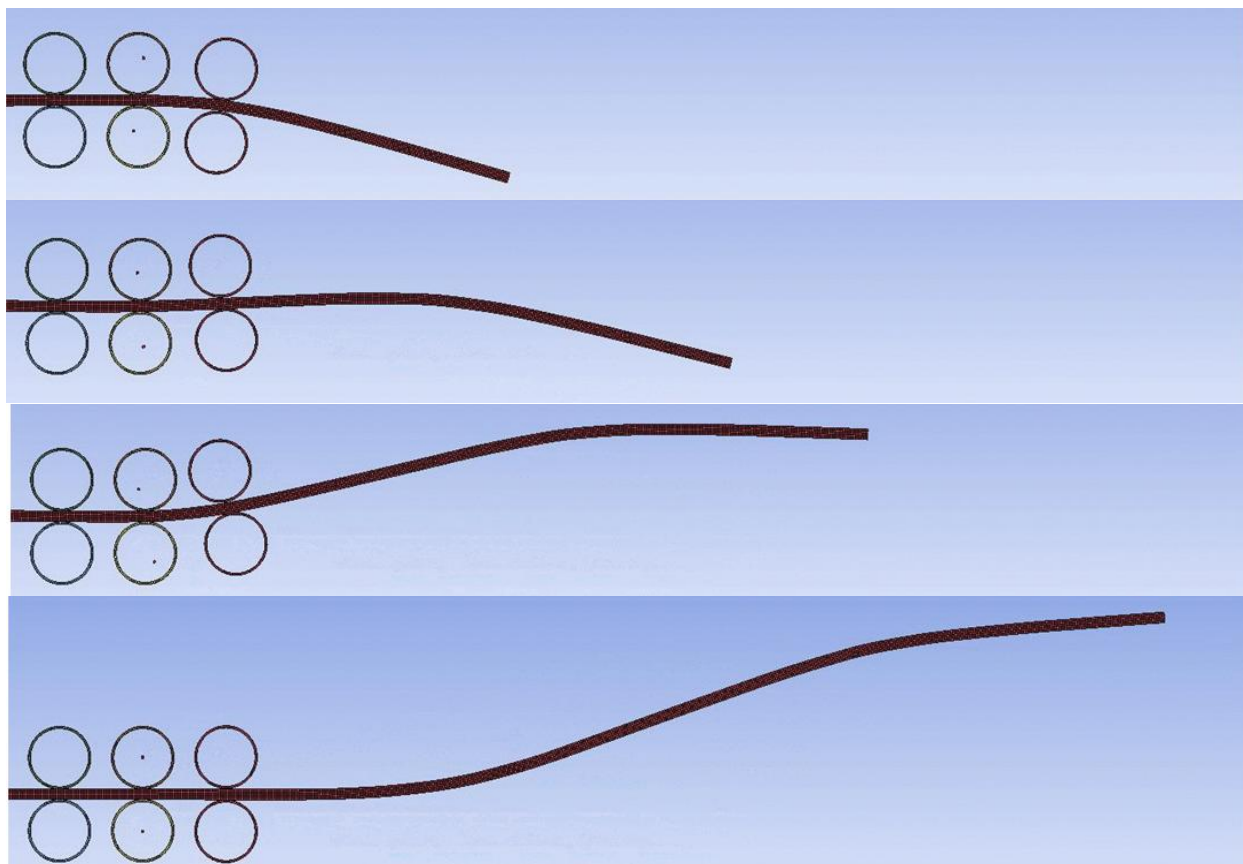


Рис. 13. Получение профиля S-образного типа на виртуальном гибочно-роликовом станке

Гибочная пара роликов в виртуальной модели, так же как и предыдущих вариантах, выполняется с помощью шарнирных моделей доступных в Is-dyna.

Пример виртуальной модели для профиля трубного типа представлен на рисунке 14.

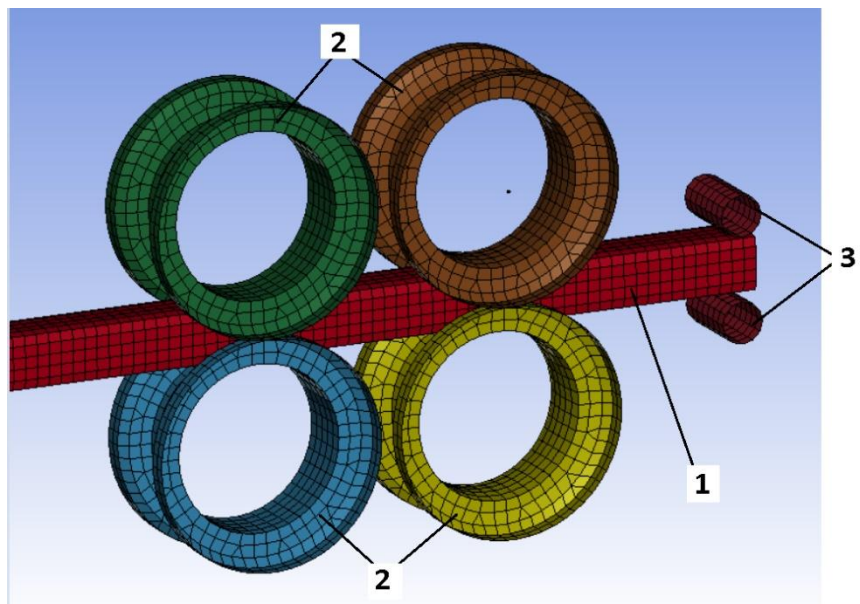


Рис. 14. Виртуальная модель гибочно-роликового станка для профиля трубного типа:
1 – профиль труба, 2 – подающие ролики, 3 – гибочные ролики.

Для получения детали с нужной продольной кривизной вначале были установлены зависимости величин радиусов от поворота гибочных роликов (рис. 15).

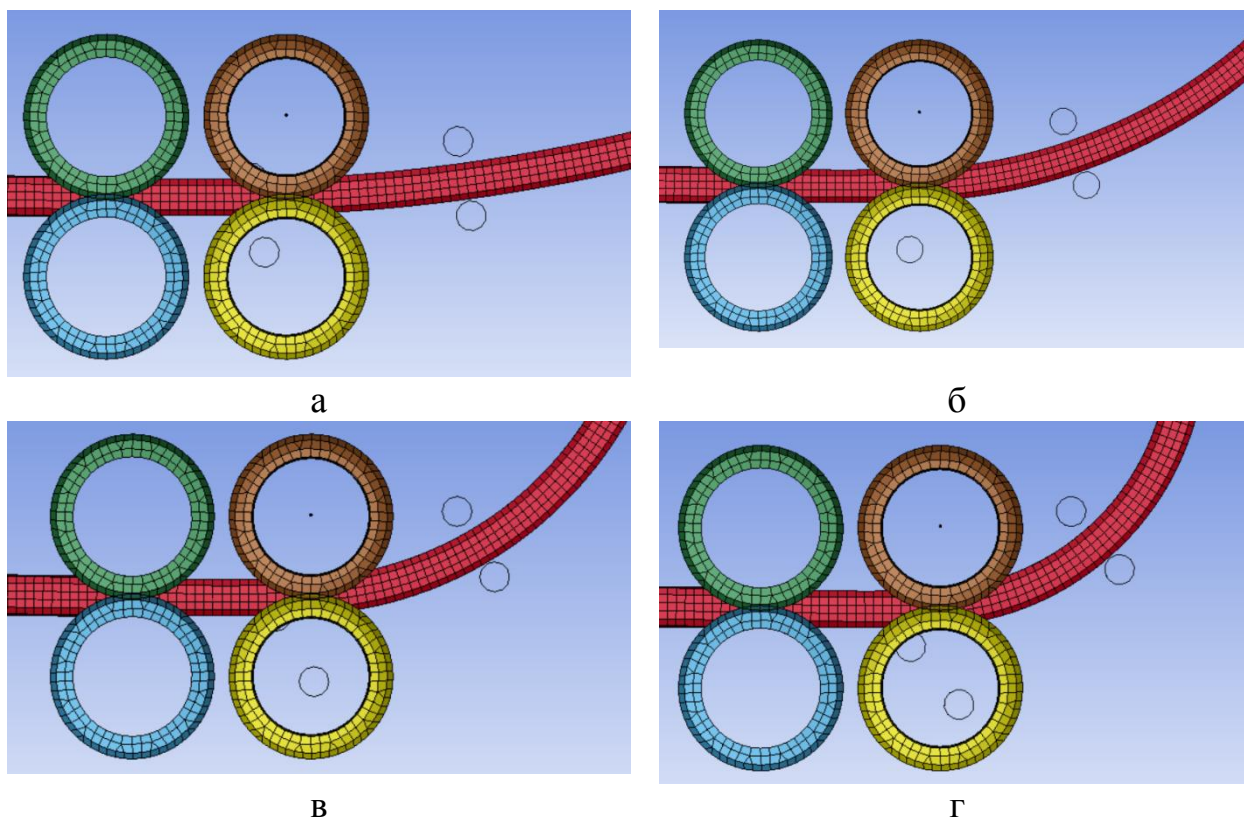


Рис.15. Определение кривизны получаемой детали в зависимости от поворота гибочных роликов: а – 10^0 , б – 20^0 , в – 30^0 , г – 40^0 .

Далее строили зависимость получаемого радиуса от угла поворота (рис. 16). График представляет собой кривую в степенной зависимости для которой с помощью линии тренда была получена формула, которую и можно использовать для получения данного профиля-труба с переменной кривизной.

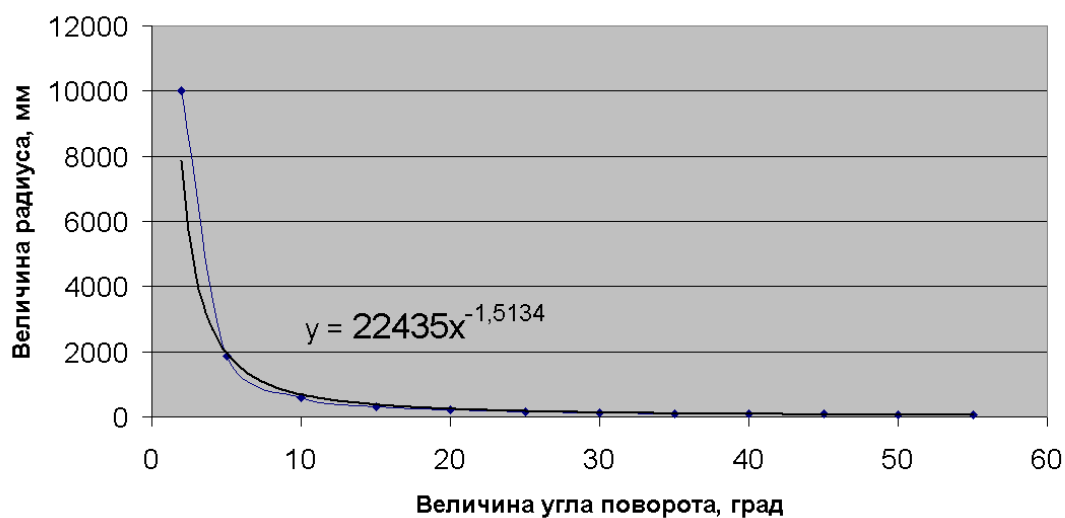


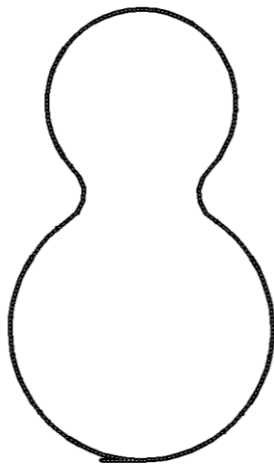
Рис. 16. Зависимость величины продольного радиуса профиля от угла поворота гибочных роликов

Дальше требуется перевод заданной кривой профиля в величины углов поворота гибочного устройства. Для этого предлагается следующая процедура:

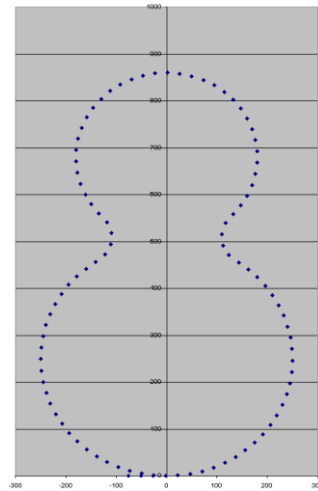
- извлечение продольной кривой из модели детали;
- разбиение извлеченной кривой на точки с шагом N (величина подбирается опытным путем);
- по координатам 3-х точек получение величины радиуса;
- по зависимости рис. 16 (для данного сечения профиля) нахождение угла поворота гибочного устройства.

На рис. 17-18 в качестве примера представлено получения замкнутой фигуры типа “восьмерки”. На рис. 19 результаты моделирования гибки заготовки по графику из рис. 18.

Нужно отметить, что небольшое несоответствие полученной детали к исходной кривой связано как с динамическими эффектами в процессе проката, так и с его упругим распружинением. В данном случае форма детали меняется даже под собственным весом.



а



б

Рис. 17. Форма исходной кривой полученной с профиля (а) и разбиение кривой на точки с координатами

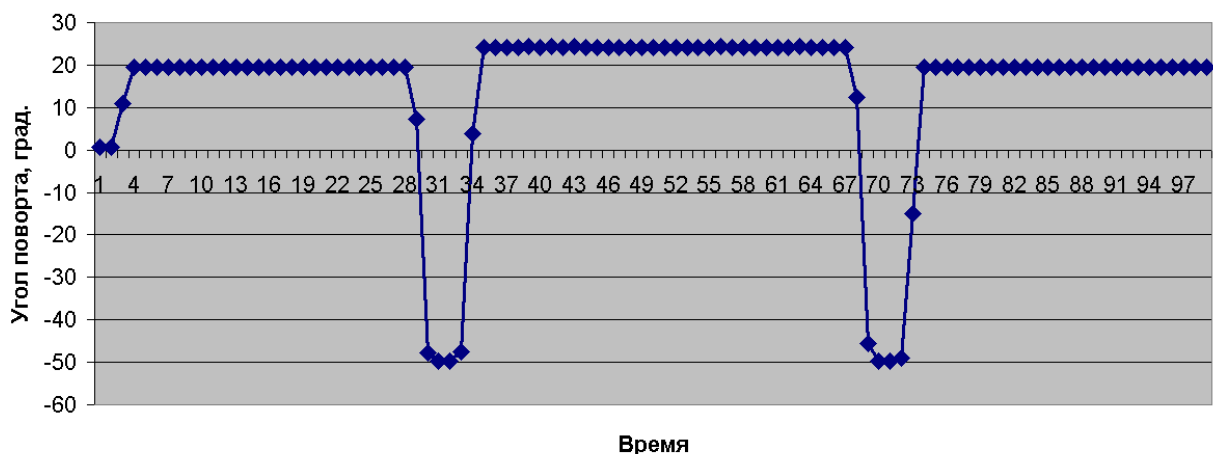


Рис. 18. График зависимости угла поворота гибочного блока от времени

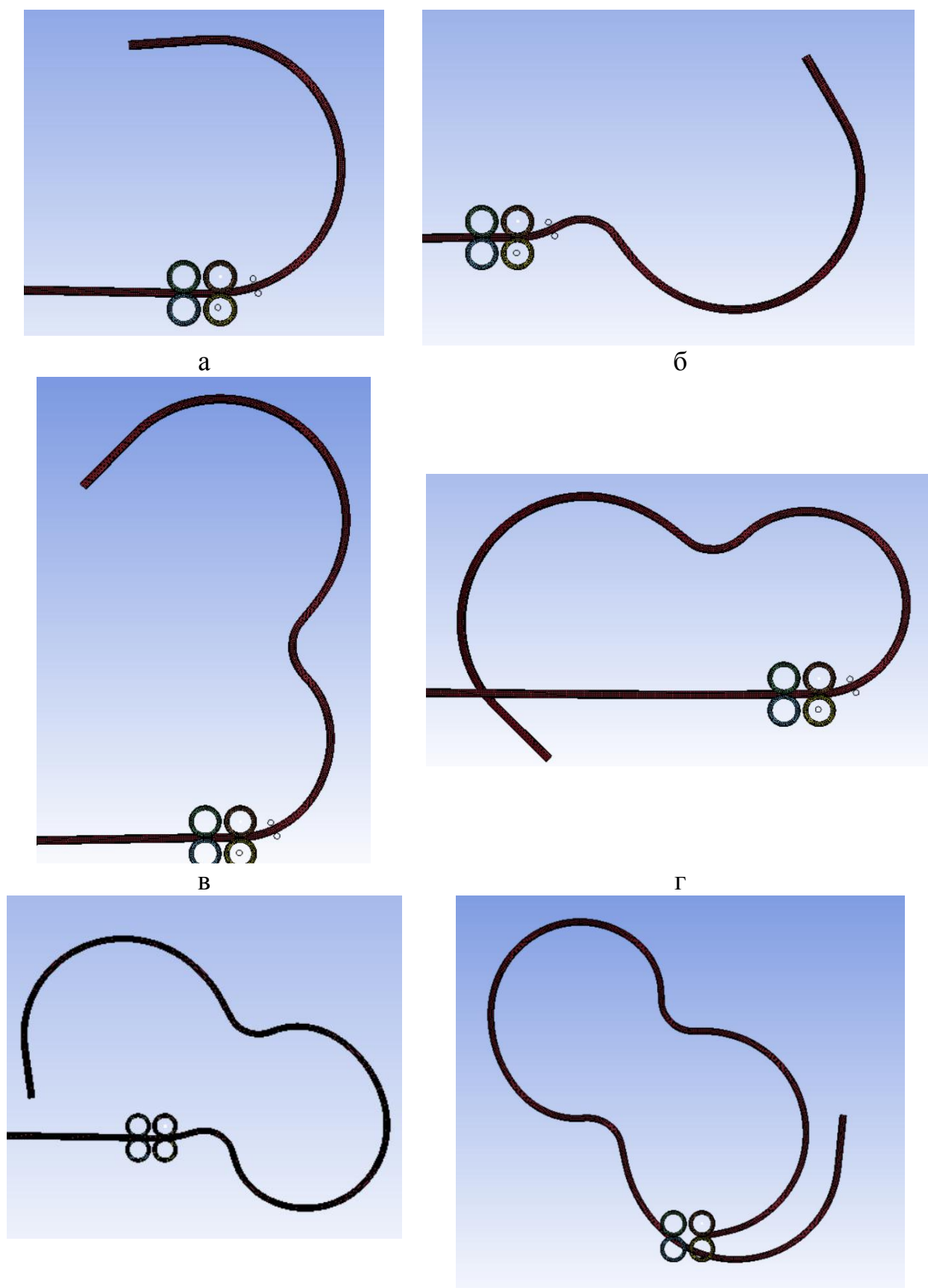


Рис. 19. Этапы гибки заготовки для изготовления детали «Восьмерка»

Хотя профили типа стрингера и шпангоута не имеют такой сложной формы изгиба и имеют переменный радиус с величинами составляющими 50000-10000 мм для стрингера и 3000-1000 мм для шпангоута, гибка по данному методу имеет следующие сложности:

- сильное влияние упругого пружинения и сложность его учета особенно при малой кривизне (при больших радиусах);
- скрутка профилей в процессе деформирования, что связано с несимметричным сечением профилей стрингерного и шпангоутного типов.

На рис. 20 представлена опытная гибочная машина разработки АО «Ульяновский НИАТ». Данная установка в 2023 году уже внедрена на двух авиационных предприятиях России.



Рис. 20. Гибочная установки разработки АО «Ульяновский НИАТ»

Следующий шаг это автоматизация движения гибочной клетки по заданной программе с использованием ЧПУ по методике представленной выше.

Использование виртуального моделирования и виртуальных станков позволяет использовать средства компьютерного моделирования для отладки предлагаемых техпроцессов и режимов формовки еще до изготовления всей конструкции в металле, что позволит значительно уменьшить стоимость их внедрения на различные предприятиях нашей страны.

УДК 621.77

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ QFORM V10

Казаков А.В.¹, Ерисов Я.А.²

1 – аспирант кафедры обработки металлов давлением Самарского университета, г. Самара

2 – д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением Самарского университета, г. Самара

Аннотация. В докладе представлено сравнение результатов конечно-элементного моделирования процесса вытяжки в программном комплексе QFORM V10 и экспериментальных данных. Были получены параметры моделей материала технического алюминия марки А5 с толщиной 1 и 2 мм, которые были внесены в библиотеку программного комплекса и использованы в моделировании.

Ключевые слова: моделирование, листовая штамповка, вытяжка, QFORM, алюминий А5.

FINITE ELEMENT SIMULATION OF THE DRAWING PROCESS IN THE QFORM V10 SOFTWARE

Kazakov A.V.¹, Erisov Y.A.²

1 – postgraduate student of the Metal Forming Department at Samara University, Samara

2 – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Metal Forming Department at Samara University, Samara

Abstract. The report presents a comparison of the results of finite element simulation of deep drawing in the QFORM V10 software and experimental data. The parameters of material models of technical aluminum grade A5 with a thickness of 1 and 2 mm were obtained, which were entered into the library of the software complex and used in modeling.

Keywords: modeling, sheet stamping, drawing, QFORM, aluminum A5.

Операции листовой штамповки в настоящее время являются актуальными и имеют множество нерешённых проблем даже в самых распространённых операциях, таких как вытяжка, отбортовка, пробивка и вырубка. Очень часто предсказать как именно поведёт себя металл в том или ином процессе очень сложно и это приводит как к финансовым, так и к временным издержкам на производстве [1,2].

Эту проблему пытаются решать при помощи численного моделирования процессов обработки металлов давлением (ОМД) [3,4]. Есть уже проверенные временем программы, которые позволяют прогнозировать процессы ОМД, такие как ANSYS, DEFORM и т.д. [5,6]. Все эти программы имеют очень высокий порог входа и имеют полностью англоязычный интерфейс, к тому же в настоящее время являются недоступными в РФ.

Программный комплекс QFORM является полностью отечественной разработкой и недавно дополнился модулем для решения задач листовой штамповки. Насколько точно данная программа способна моделировать процесс вытяжки, представлено в докладе.

В первую очередь был произведён эксперимент на испытательной машине ZwickRoell BUP 200 с параметрами, представленными на рисунке 1.



Рис. 1 – Эскиз оснастки

Все технологические параметры процесса были зафиксированы для последующего использования в конечно-элементном моделировании (рисунок 2).

Толщина заготовки, мм	1,0	2,0
Скорость пуансона, мм/с	2,0	1,0
Усилие прижима, кН	4,0	2,0
Смазка	Масло И-20А	
Коэффициент трения	0,074	

Рис. 2 – Параметры процесса вытяжки

Далее были произведены испытания на растяжения листовых заготовок той же партии и получены кривые упрочнения сплава А5 (рис. 3).

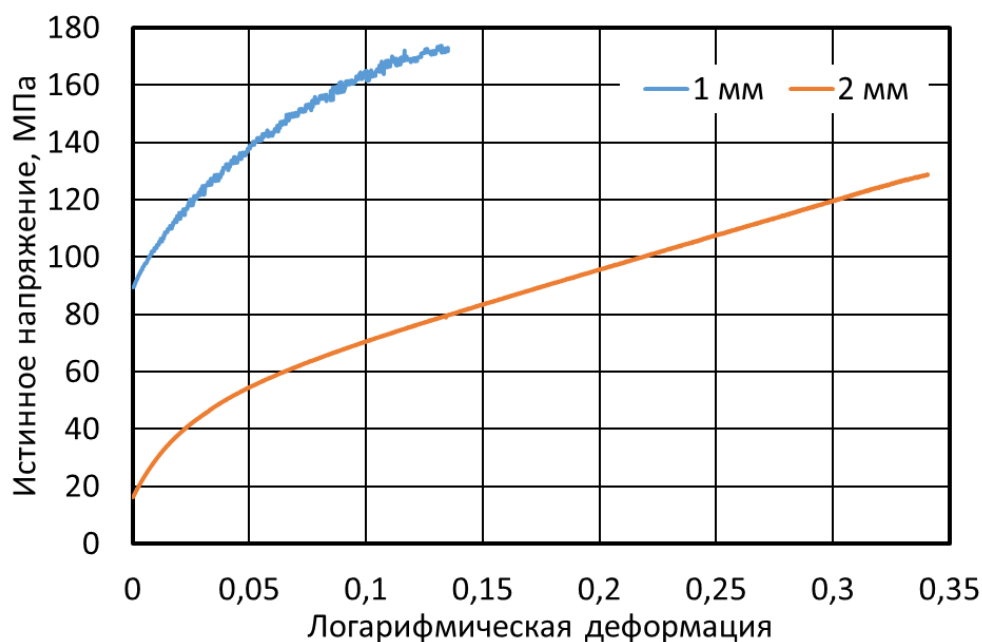


Рис. 3 – Кривые упрочнения листовых заготовок из сплава А5

Эти данные были внесены в библиотеку программного комплекса QFORM и были использованы в качестве моделей материала технического алюминия А5 с толщиной 1 и 2 мм.

Сравнение результатов производилось на основании графиков усилий и распределения толщины, полученных на испытательной машине и в программном комплексе QFORM.

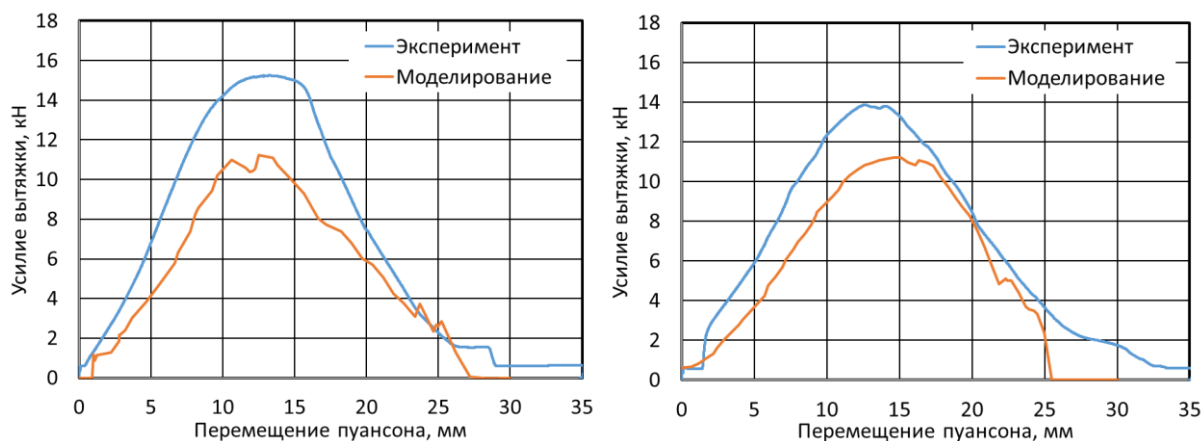


Рис. 4 – Графики усилий процесса вытяжки
(для 1 мм слева и для 2 мм справа)

В результате погрешность моделирования усилия процесса составила порядка 35% для вытяжки из заготовки толщиной 1 мм и около 23% для вытяжки из 2 мм.

Секция 2. Инженерный анализ и автоматизация

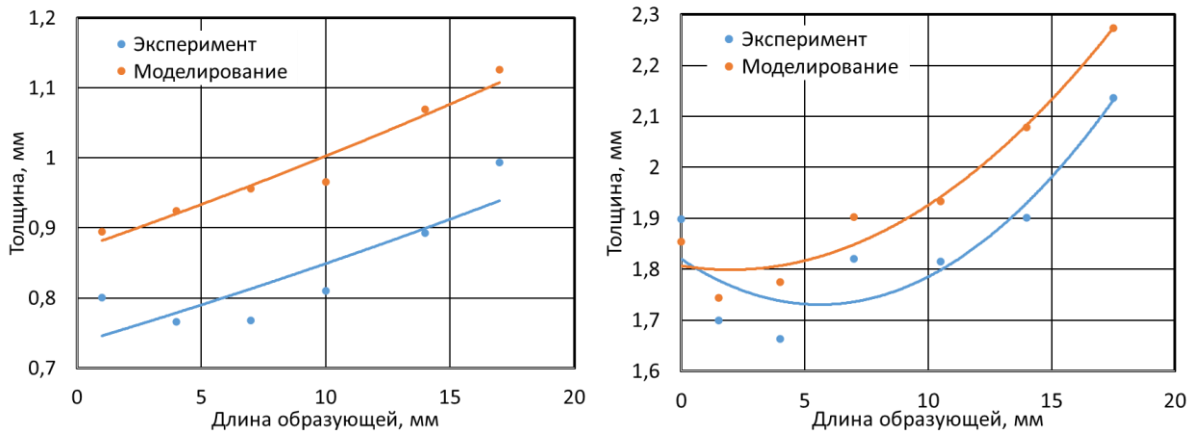


Рис. 5 – Графики распределения толщины по образующей (для 1 мм слева и для 2 мм справа)

В результате погрешность моделирования деформированного состояния составила порядка 12-25% для вытяжки из 1 мм заготовки и 3-10% для 2 мм.

Также было произведено сравнение влияния количества конечных элементов по толщине заготовки на усилие процесса вытяжки, результаты приведены на рисунке 6.

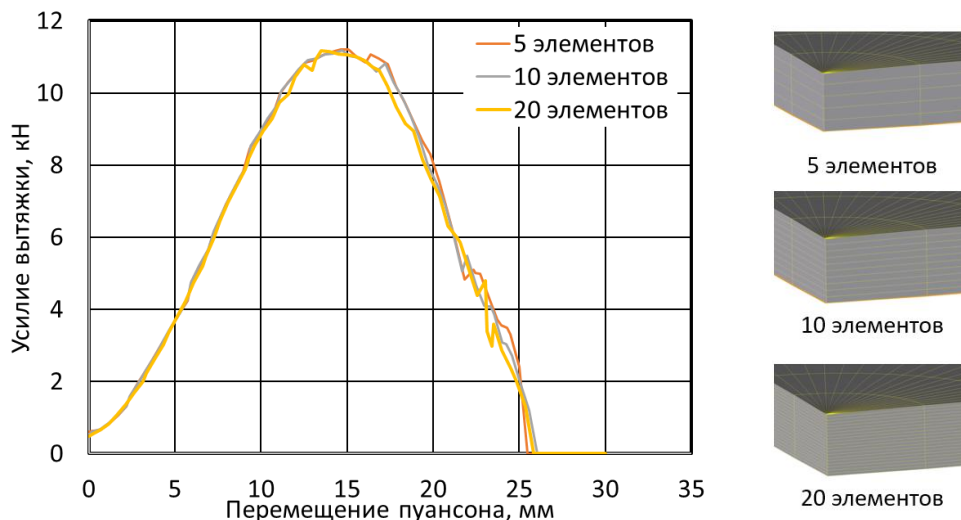


Рис. 6 – Изменение усилия вытяжки в зависимости от количества элементов в заготовке

Из рисунка 6 видно, что более пяти конечных элементов по толщине заготовки использовать смысла нет, так как это практически не влияет на результаты расчёта.

Таким образом, программный комплекс QFORM V10 позволяет моделировать процессы листовой штамповки, в частности вытяжку, с точностью около 70-80%. При этом использовать более пяти конечных элементов по толщине заготовки смысла нет, так как это практически не влияет на результаты расчёта.

Список литературы

1. Камайкин И.А., Петров И.Н., Ерисов, Я.А. Исследование влияния усилия прижима на гофрообразование при вытяжке тонких листов из алюминиевого сплава 3104. XIII Королёвские чтения: Международная молодёжная научная конференция, Самара, 6-8 октября 2015 года: Тезисы докладов, Т.1. Самара: Издательство СГАУ, 2015, с. 344
2. Тиабашвили А.Т., Дорогов Р.П., Ерисов, Я.А. Исследование влияния кристаллографических ориентировок на фестонообразование при вытяжке. Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 22-24 июня 2016 г. Ч. 2, с. 199-200.
3. Батулин, А. П. Применение PAM-STAMP 2G для моделирования процесса формообразования гофрированных оболочек / А. П. Батулин, И. Н. Петров, Я. А. Ерисов // XV Королевские чтения [Электронный ресурс] : междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Д. И. Козлова : сб. тр. : 8-10 окт. 201 / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т) ; [науч. ред. М. А. Шлеенков]. - 2019. - Т. 1. - С. 78-79
4. Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Шляпугин А.Г. Методика передачи данных между программными продуктами ProCAST и Deform-3D. Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 22-24 июня 2016 г. Ч. 2, с.143-144.
5. Прибытков Д.А., Ерисов Я.А. Компьютерное моделирование процесса вытяжки в коническую матрицу. XIII Королёвские чтения: Международная молодёжная научная конференция, Самара, 6-8 октября 2015 года: Тезисы докладов, Т.1. Самара: Издательство СГАУ, 2015, с. 354-355.

УДК 621

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОКОВКИ
«ДИСК С ДВУСТОРОННИМИ СТУПИЦАМИ»
ПРИ ОСАДКЕ В ПОДКЛАДНЫХ КОЛЬЦАХ**

Каргин В.Р.¹, Каргин Б.В.²

- 1 – д.т.н., профессор, кафедра обработки металлов давлением, «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.
2 – к.т.н., доцент, кафедра обработки металлов давлением, «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Аннотация. Выполнено конечно-элементное моделирование процесса осадки цилиндрической заготовки из сплава 40Х на подкладных кольцах с помощью программного комплекса Deform 2D. Установлены зависимости относительных размеров поковки от степени деформации, внешнего трения, геометрии заготовки и инструмента. Эти зависимости позволяют управлять в определенных пределах формообразованием поковок в виде тел вращения типа диск с двусторонними ступицами.
Ключевые слова: свободная ковка, осадка в подкладных кольцах, моделирование, сплав 40Х, геометрия заготовки и инструмента, степень деформации, внешнее трение, высота ступицы, диаметр фланца.

MODELING OF FORMATION OF FORGING "DISK WITH DOUBLE-SIDED HUBS" AT SETTLEMENT IN BACKING RINGS

Kargin V.R.¹, Kargin B.V.²

- 1 – PhD, Department OMD, Samara National Research University, Samara.
2 – PhD, Department OMD, Samara National Research University, Samara.

Abstract. A finite element simulation of the process of settling a cylindrical workpiece made of 40Kh alloy on backing rings was performed using the Deform 2D software complex. Dependencies of relative forging dimensions on degree of deformation, external friction, geometry of workpiece and tool are established. These constraints allow you to control, within certain limits, the formation of forgings in the form of rotation bodies, such as a disk with double-sided hubs.

Keywords: free forging, sludge in backing rings, modeling, 40Kh alloy, geometry of workpiece and tool, degree of deformation, external friction, hub height, flange diameter.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из технологических операций свободнойковки на молотах и прессах является операция осадки цилиндрической заготовки в подкладных кольцах, позволяющей получить поковки в виде тел вращения типа дисков двухсторонними ступицами (бобышками, цапфами, отростками). Так отковывают некоторые типы прокатных валков, короткие кулачковые валы, поковки шестерён, фланцев и дисков со ступицами, когда размеры последних имеют небольшую величину в сравнении с габаритными размерами поковки [1 - 2].

Процесс осадки цилиндрических заготовок на подкладных кольцах для поковки «диск с двусторонними ступицами» рассмотрен в работах [5-9], в

которых особое внимание уделено анализу потоков металла в радиальном и осевом направлениях, границе разделов потоков, расширению технологических возможностей осадки посредством изменения условий внешнего трения.

Сложный характер течения металла в радиальном и осевом направлениях при формировании геометрии фланца и ступиц поковки в процессе осадки цилиндрической заготовки в подкладных кольцах затрудняет выбор размеров исходной заготовки, геометрии инструмента, степени деформации и условий трения, необходимые для получения поковки «диск с двусторонними ступицами» заданных размеров и формы. Поставленная задача усложняется тем, что к моменту получения ступицы требуемой высоты фланец поковки также должен иметь заданные размеры.

Цель работы – установление закономерностей влияния геометрии заготовки и инструмента, степени деформации и внешнего трения на формообразование требуемой геометрии готовой поковки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Моделирование осадки цилиндрической заготовки на подкладных кольцах, приведенное на рис.1, реализовано средствами специализированного пакета программы Deform - 2D на базе метода конечных элементов [10] и проведено для следующих условий: скорость осадки на гидравлическом прессе 1мм/сек, температура нагрева заготовки 1000°C и подкладных колец 300°C. В качестве материала заготовки использована сталь AiSi-5140 (аналог стали 40X), подкладных колец - сталь ANSI-11-13.

К основным технологическим параметрам, оказывающим влияние на формирование размеров и формы ступицы и фланца поковки, относятся: величина относительной степени деформации при осадке ε в подкладных кольцах, отношение исходных размеров заготовки D_0/H_0 , отношение наибольшего входного диаметра конического канала на подкладном кольце к начальному диаметру заготовки d_0/D_0 , радиус скругления входной кромки r , угол конусности канала подкладного кольца γ , а также внешнее контактное трение μ .

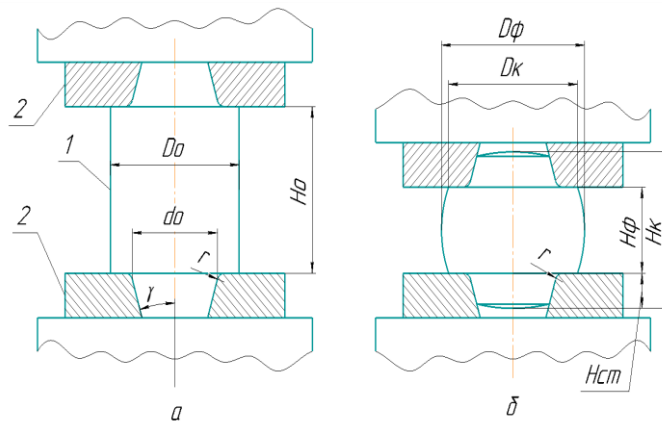


Рис. 1. Схема деформирования цилиндрической заготовки 1 в подкладных кольцах 2 в начале (а) и в конце (б) процесса осадки

На рис.1 показаны все геометрические параметры заготовки и инструмента процесса осадки: D_0 – начальный диаметр заготовки; H_0 – начальная высота заготовки; d_0 , диаметр отверстия кольца; γ – ковочный уклон отверстия; $H_{ст}$ – высота ступицы; $H_{ф}$ – высота фланца; $D_{ф}$ – диаметр фланца; r – радиус кромки отверстия; H_k – конечная высота поковки; D_k – конечный диаметр контактной поверхности заготовки с кольцом.

При постановке задачи компьютерного моделирования ее рассматривали как осесимметричную. Напряжение трения на контактных поверхностях заготовки и инструмента τ_k при горячей деформации описывали по закону Зибеля $\tau_k = \mu S_d$, где μ – фактор трения, S_d – сопротивление деформации при заданных температурно-скоростных условийковки. Степень деформации заготовки определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_{ф}}{H_0} \cdot 100\%.$$

Замеры высоты проводили у верхней ступицы, так как разница в замерах высот верхней и нижней ступиц не более 0.5 - 1% при помощи Measure (линейка) , которая находится на панели инструментов. В параметрах линейки выберем стиль замера – CAD style и направление, по которому будем замерять – Y direction, рис.2. Средний диаметр фланца определяли по трем замерам диаметров D_k на контактных поверхностях и $D_{ф}$ в середине высоты диска. Все замеры проводили с округлением с точностью 0,01.

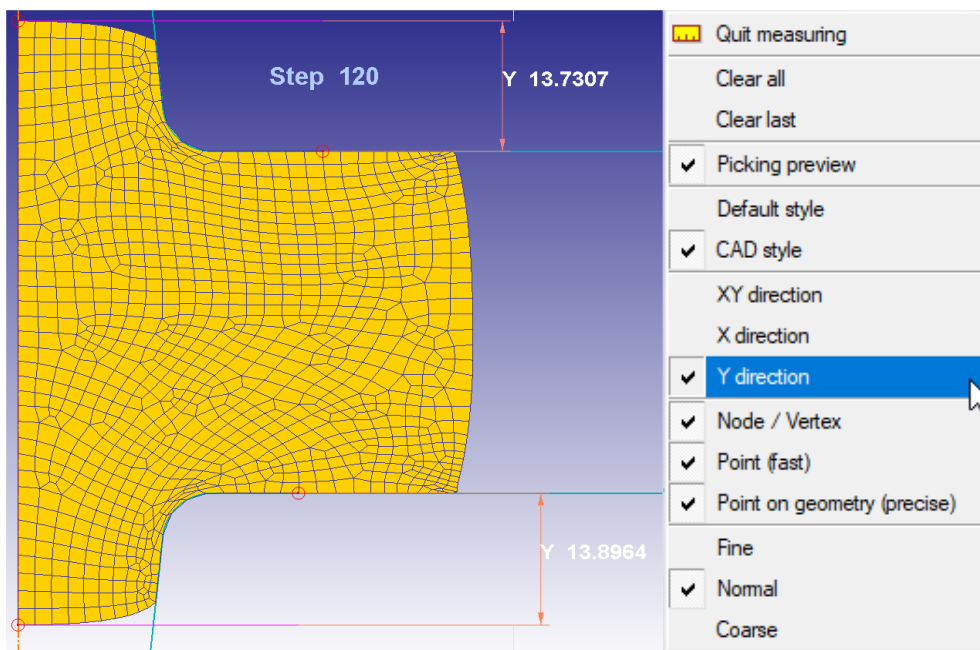


Рис. 2. Методика замера высоты ступиц

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис.3 построена расчетная диаграмма эмпирических зависимостей относительных размеров высоты поковки H_k/H_0 и ступицы $\frac{H_{ст}}{H_0}$, диаметра D_ϕ/D_0 и высоты H_ϕ/H_0 фланца от относительной степени деформации заготовки ε , полученная при следующих условиях моделирования: $D_0 = 60$ мм, $H_0 = 90$ мм, $d_0 = 28$ мм, $\gamma = 3^\circ$, $r = 5$ мм, фактор трения $\mu = 0,3$. Из рисунка видно, что с увеличением степени деформации наблюдается интенсивный рост относительного диаметра фланца D_ϕ/D_0 и относительной высоты ступицы $H_{ст}/H_0$ по закону экспоненты. Чем выше степень деформации, тем больше диаметр фланца и высота ступицы. Относительная высота поковки H_k/H_0 вначале уменьшается, достигая минимального значения при $\varepsilon = 59\% - 65\%$, затем отмечается рост этого параметра. Относительная высота фланца (H_ϕ/H_0) уменьшается с увеличением степени деформации по нелинейному закону.

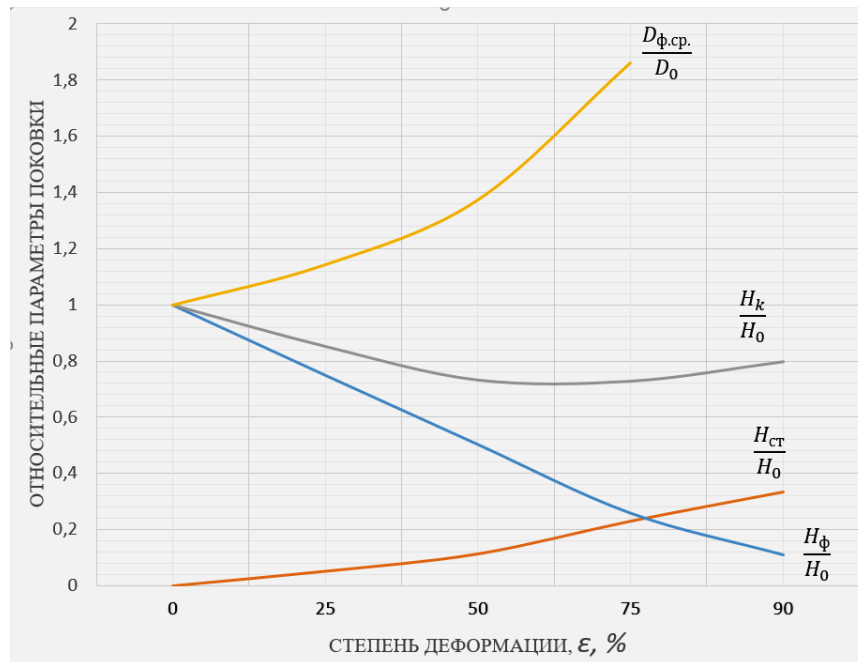


Рис. 3. Диаграмма зависимости относительных размеров поковки от степени деформации заготовки

В табл. 1 приведены результаты исследования по влиянию величины фактора внешнего трения на контактных поверхностях заготовки и инструмента на высоту ступицы при различных степенях деформации при следующих условиях: $D_0 = 60$ мм, $H_0 = 90$ мм, $d_0 = 28$ мм, $\gamma = 3^\circ$, $r = 5$ мм.

Таблица 1. Результаты замеров относительной высоты ступицы в зависимости от фактора трения μ и степени деформации ε

μ	$\varepsilon, \%$		
	25	50	75
0	0,05	0,12	0,26
0,30	0,05	0,10	0,24
0,50	0,05	0,10	0,23

Результаты моделирования говорят о том, что более высокая ступица на поковке получается при величине фактора внешнего трения $\mu = 0,0$ и $\varepsilon = 25\%, 50\%, 75\%$. Для фактора трения $\mu = 0,3$, $\mu = 0,5$ и степени деформации 50%, 75% наблюдается уменьшение размера высоты ступиц в пределах 5-10%. Одна из причин уменьшения высоты ступицы при осадке заготовки в подкладных кольцах с трением в сравнении без трения – это сдерживание течения металла силами трения в радиальном и осевом направлениях. Вместе с тем при отсутствии трения на контактных поверхностях инструмента и степенях

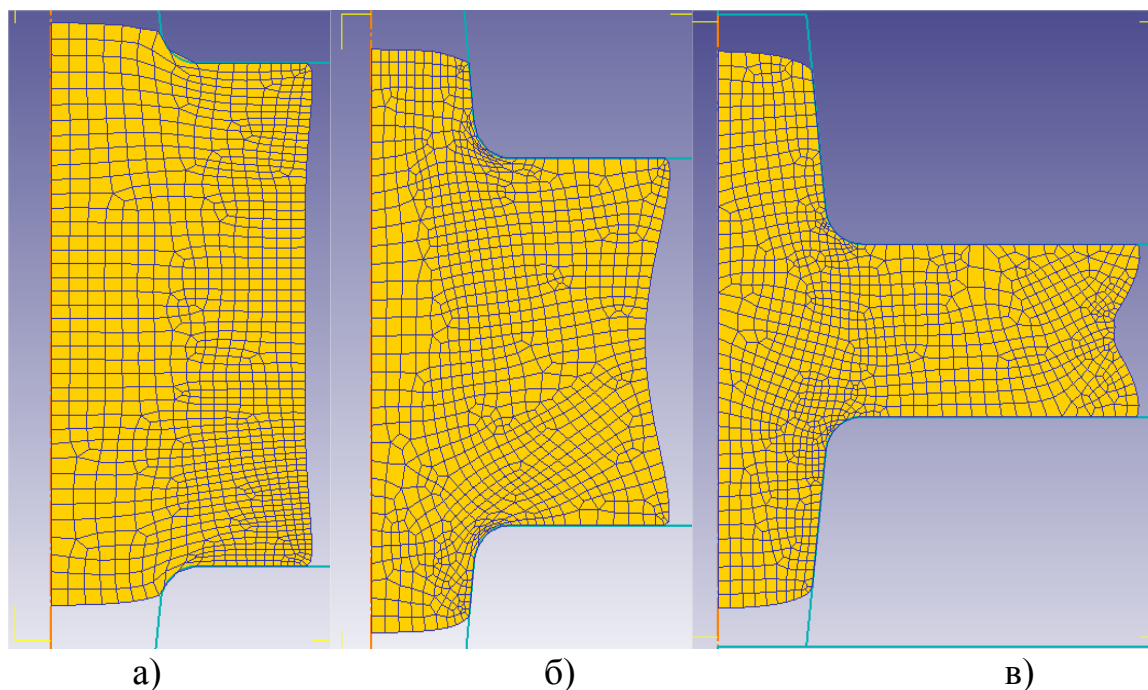


Рис.4. Деформация заготовки на контактных поверхностях идеально гладкого инструмента

деформации 25%, 50%, 75% на рис. 4 (а), рис. 4 (б), рис. 4 (в) исходная боковая цилиндрическая поверхность фланца из-за роста скоростей материальных частиц приконтактных слоев металла относительно центральных слоев постепенно становится вогнутой. Чем больше степень деформации, тем больше вогнутость. При последующей осадке при степени деформации $\varepsilon > 75\%$ можно получить дефект «зажим». На практике такой режим деформирования целесообразно исключить.

В табл. 2 приведены результаты исследования влияния относительных размеров исходной заготовки H_0/D_0 на величину высоты ступицы в зависимости от степени деформации при следующих условиях: $D_0 = 60$ мм; $H_0/D_0 = 0,5$, $H_0/D_0 = 1,0$, $H_0/D_0 = 1,5$; $\mu = 0,3$; $d_0 = 28$ мм; $\gamma = 3^\circ$.

Таблица 2. Результаты замеров относительной высоты ступицы в зависимости от степени деформации ε и относительных размеров исходной заготовки H_0/D_0

$\frac{H_0}{D_0}$	$\varepsilon, \%$		
	25	50	75
0,5	0,04	0,09	0,17
1,0	0,05	0,12	0,23
1,5	0,05	0,11	0,22

Из рассмотрения результатов моделирования видно, что при размерах исходной заготовки $H_0/D_0 = 1,0$ при степени деформации $\varepsilon = 75\%$ наблюдается максимальная высота ступицы. При $H_0/D_0 < 1,0$ и $H_0/$

$D_0 > 1$ высота ступиц меньше максимальных по высоте ступиц. Чем больше степень деформации заготовки, тем выше ступицы. На рис. 5(а) при $\varepsilon = 25\%$ боковая поверхность фланца практически вертикальная, на рис.5(б) при $\varepsilon = 50\%$ - чуть выпуклая. На практике целесообразно производить осадку в подкладных кольцах в диапазоне относительных начальных размеров заготовки $H_0/D_0 = 0.8 - 1.12$.

Результаты моделирования по влиянию величины ковочного уклона на характер формирования размеров ступицы по высоте при $\mu = 0,3$; $D_0 = 60$ мм; $H_0 = 90$ мм; $\gamma = 1^\circ, 3^\circ, 6^\circ$; $r = 5$ мм; $\varepsilon = 25\%, 50\%, 75\%$ приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты замеров относительной высоты ступицы в зависимости от ковочного угла γ и степени деформации ε

γ°	$\varepsilon, \%$		
	25	50	75
1°	0,04	0,10	0,20
3°	0,05	0,11	0,23
6°	0,05	0,11	0,24

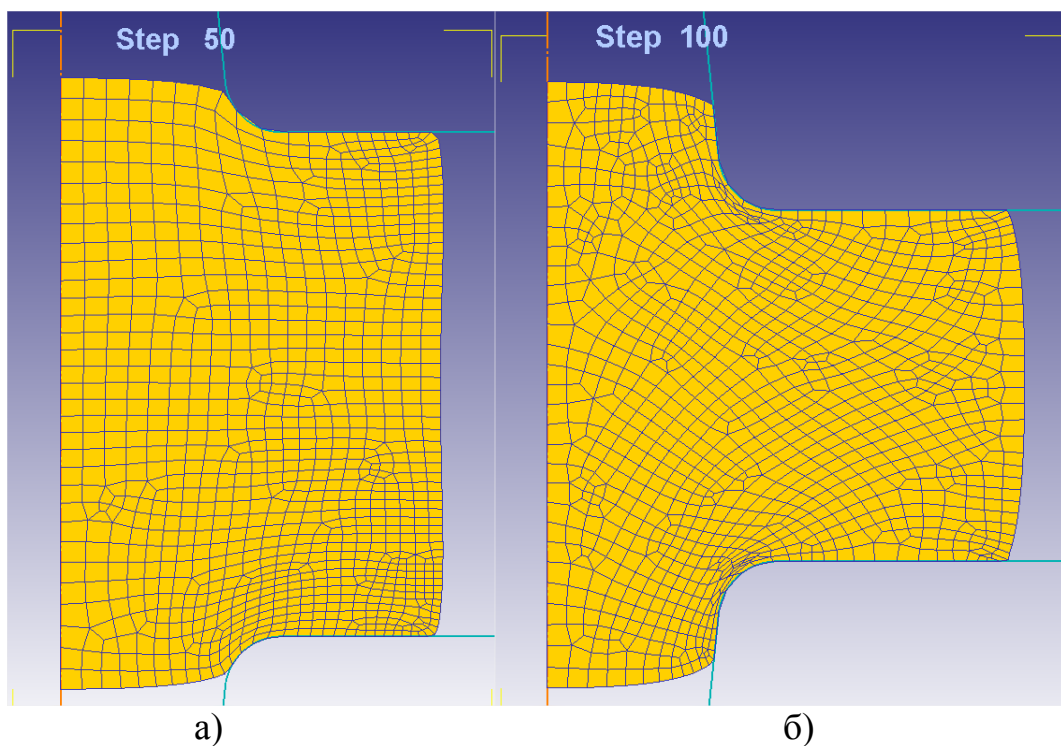


Рис. 5. Деформация заготовки при размерах исходной заготовки $H_0/D_0 = 1,0$

Результаты моделирования по влиянию величины ковочного уклона на характер формирования размеров ступицы по высоте при $\mu = 0,3$; $D_0 = 60$ мм; $H_0 = 90$ мм; $\gamma = 1^\circ, 3^\circ, 6^\circ$; $r = 5$ мм; $\varepsilon = 25\%, 50\%, 75\%$ приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты замеров относительной высоты ступицы $\frac{H_{ст}}{H_0}$ в зависимости от ковочного угла γ и степени деформации ε

γ°	$\varepsilon, \%$		
	25	50	75
1°	0,04	0,10	0,20
3°	0,05	0,11	0,23
6°	0,05	0,11	0,24

Как видно из результатов в таблице 3, при увеличении ковочного угла, относительная высота ступиц возрастает стабильно на 10-15%. Это связано с уменьшением сопротивления деформации металла при его заполнении конической полости отверстия бойка осадкой и выдавливанием.

Пересекающие поверхности ступицы и фланца сопрягаются по радиусу закругления r . При ковке этот выступ в полости конического отверстия обтекается металлом и считается внутренним радиусом закругления. Его величина определяет качество поковки. Геометрия заготовки при деформации 75% и ковочном угле $\gamma=6^\circ$ в меридианном сечении заготовки представлена на рис. 6.

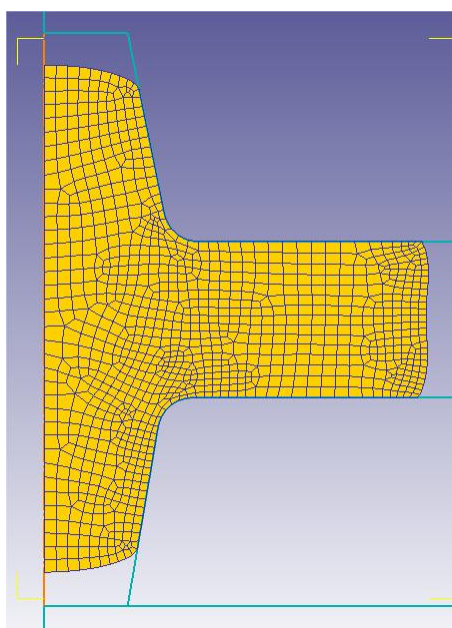


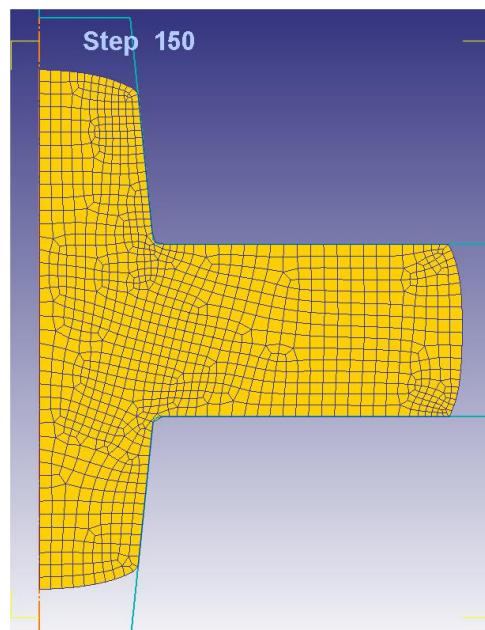
Рис. 6. Геометрия заготовки при угле $\gamma=6^\circ$ и $\varepsilon = 25\%$

Результаты моделирования по влиянию величины радиуса закругления на характер изменения высоты ступицы при $\mu = 0,3$; $D_0 = 60$ мм; $H_0 = 90$ мм; $r = 1$ мм, 3 мм, 5 мм; $\gamma = 6^\circ$; $\varepsilon = 25\%$, 50%, 75% приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты замеров относительной высоты ступицы в зависимости от радиуса закругления r и степени деформации ε

r , мм	ε , %		
	25	50	75
1	0,05	0,12	0,26
3	0,05	0,12	0,24
5	0,05	0,12	0,24

Установлено, что при радиусах закругления $r = 1$ мм, 3 мм и $\varepsilon = 25\%$, 50% 75% с точностью одного знака после запятой получаются наиболее высокие ступицы (рис. 6). При радиусе закругления $r > 3$ мм, высота ступицы медленно уменьшается.

Рис. 7. Геометрия заготовки при радиусе закруглений $r = 1$ мм

Результаты моделирования по влиянию относительного наибольшего диаметра отверстия кольца d_0/D_0 на характер изменения высоты ступицы при $\mu = 0,3$, $D_0 = 60$ мм, $d_0/D_0 = 0,4; 0,55; 0,70$; $H_0 = 90$ мм; $r = 3$ мм; $\gamma = 3^\circ$ при степенях деформации $\varepsilon = 25\%$, 50%, 75% приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты замеров высоты ступицы в мм в зависимости от отношения d_0/D_0 и степени деформации ε

$\frac{d_0}{D_0}$	ε , %		
	25	50	75
0,40	0,04	0,09	0,20
0,55	0,06	0,14	0,28
0,70	0,08	0,19	0,33

Установлено, что с уменьшением относительного диаметра отверстия d_0/D_0 затекание металла в полость конического отверстия подкладного кольца затруднено. Это связано с повышением сопротивления деформации металла при заполнении полости. При увеличении отношения d_0/D_0 , заполнение полостей (колец) для ступиц значительно облегчается и наблюдается существенный рост высоты ступицы. При отношении $\frac{d_0}{D_0} = 0.70$ в области образования фланца при $\varepsilon > 75\%$ наблюдается «складывание» металла с последующим образованием дефекта зажим (рис. 7), что нежелательно на практике..

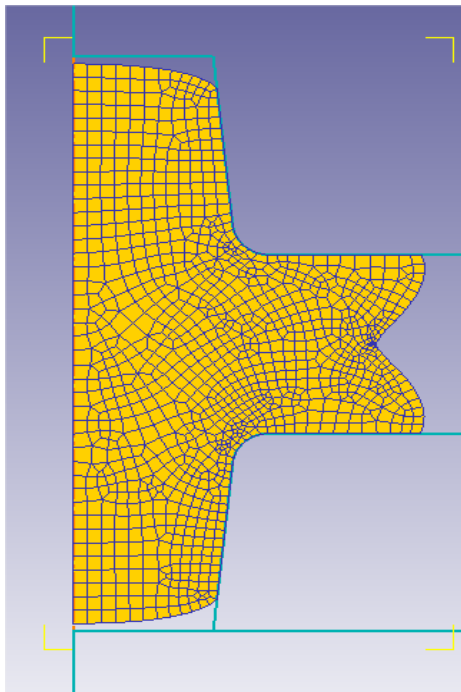


Рис. 8. Геометрия заготовки при $\frac{d_0}{D_0} = 0.70$ и $\varepsilon = 75\%$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен численный анализ влияния относительных размеров цилиндрической заготовки, наибольшего относительного диаметра, ковочного угла и радиуса закругления кромки конического отверстия подкладных колец, степени деформации и внешнего трения на процесс формирования заданной геометрии поковки.
2. На основе результатов моделирования построена диаграмма зависимостей относительных размеров высоты поковки H_k/H_0 , ступицы $\frac{H_{ст}}{H_0}$, относительного диаметра D_ϕ/D_0 и относительной высоты H_ϕ/H_0 фланца от относительной степени деформации заготовки ε .
3. Повышение степени деформации, выбор относительных размеров исходной заготовки и относительного наибольшего диаметра отверстия кольца при осадке на подкладных кольцах играют положительную роль, интенсивно увеличивая относительную высоту ступицы и диаметр фланца по закону экспоненты.

4. Целесообразно производить осадку в подкладных кольцах в диапазоне относительных начальных размеров заготовки $H_0/D_0 = 0.8 - 1.2$.
5. Чем больше ковочный угол и входной диаметр полости отверстий в бойках, тем меньше сопротивление металла при заполнении конической полости и соответственно выше ступицы на поковке.
6. Предлагаемые рекомендации по выбору параметров процесса осадки цилиндрической заготовки на подкладных кольцах: ковочного угла, радиуса закругления и фактора трения расширяют технологические возможности формообразования поковки типа «диск с двусторонними ступицами».

Список литературы

1. Семёнов, Е. И. Ковка и горячая штамповка: Учебник. М.: МГИУ, 2011. 411 с.
2. Охрименко, Я. М. Теория процессовковки. Учебное пособие для вузов. / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин. М.: Высшая школа, 1977. 295 с.
3. Кирсанова, С. Б. Исследование течения металла при осадке в кольцах / С.Б. Кирсанова // Сборник трудов МВТУ им. Баумана «Машины и технологии обработки давлением, 1951. 56-72.
4. Савонькин, М. Б. Исследование течения металла при осадке цилиндрических заготовок бойками с осевым отверстием и разработка промышленного применения полученных результатов: диссертация, канд. техн. наук. М., 2018. 137 с.
5. Ребельский, А. В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки / А.В. Ребельский // Машиностроение, 1965. 248 с.
6. Савонькин, М.Б. Способы получения поволоков для производства дисков и колес / М.Б. Савонькин, В.А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. 2015. №4. С. 20-24.
7. Тарновский, И. Я. Свободная ковка на прессах / И.Я. Тарновский, В.Н. Трубин, М.Г. Златкин. М.: Машиностроение, 1967. 328 с.
8. Lin, S. Y. Influences of the geometrical conditions of die and workpiece on the barreling formation during forging-extrusion process // Journal of Materials Processing Technology. 2003. № 140. P. 54–58.
9. Смирных, А.В. Расширение технологических возможностей процесса осадки в подкладных кольцах посредством изменения условия контактного трения / А.В. Смирных, С.С. Стругов, В.А. Иванов, М.Д. Таркаленко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2018. Т. 18, № 2. С. 81–88.
10. Каргин, В.Р. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе DEFORM-2D: Учебное пособие / В.Р. Каргин, А. П. Быков, Б. В. Каргин, Я. А. Ерисов. М.: Изд-во МИР, 2011. 170 с.

References

1. Semenov, E.I. Kovka and hot stamping: Textbook. M.: MGIU, 2011. 411 s.
2. Okhrimenko, Ya. M. Theory of forging processes. Textbook for universities / Y. M. Okhrimenko, V.A. Tyurin - M.: Higher School, 1977. 295 p.
3. Kirsanova, S. B. Research of metal flow during precipitation in rings / S. B. Kirsanova //Collection of works by MVTU named after Bauman "Machines and technologies of pressure processing, 1951. 56-72.
4. Savonkin, M. B. Study of the flow of metal during the settlement of cylindrical billets by strikers with an axial hole and development of industrial application of the results obtained: dissertation, candidate of technology sciences. M., 2018. 137 p.
5. Rebelsky, A.V. Basics of designing hot die forming processes. A.V. Rebelsky. Mechanical engineering, 1965. 248 p.
6. Savonkin, M.B. Methods of producing forgings for the production of discs and wheels / M.B. Savonkin, V.A. Tyurin // Forging production. 2015. №4. S. 20-24
- 7 Tarnovsky, I. Ya. Free forging at the press / I. Ya. Tarnovsky, V.N. Trubin, M.G. Zlatkin. M.: Mechanical engineering, 1967. 328 p.
8. Lin, S. Y. Influences of the geometrical conditions of die and workpiece on the barreling formation during forging-extrusion process // Journal of Materials Processing Technology. 2003. № 140. P. 54–58.
9. Smirnykh, A.V. Expanding the technological capabilities of the settlement process in the backing rings by changing the contact friction condition / A.V. Smirnykh, S.S. Strugov, V.A. Ivanov, M.D. Tarkalenko // Bulletin of SUSU. Series "Metallurgy." 2018. T. 18, NO. 2. S. 81-88.
10. Kargin, V.R. Modeling of metal forming processes in the DEFORM-2D program: Textbook/V.R. Kargin, A.P. Bykov, B.V. Kargin, Ya. A. Erisov. M.: Publishing house MIR, 2011. 1

УДК 621

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ НА ВРАЩАЕМОЙ ОПРАВКЕ

Каргин В.Р.¹, Каргин Б.В.², Муртазин Р.М.³

1 – д.т.н., профессор, кафедра обработки металлов давлением, «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

2 – к.т.н., доцент, кафедра обработки металлов давлением, «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

3 – студент, кафедра обработки металлов давлением, «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Аннотация. Приведены результаты компьютерного моделирования волочения тонкостенной трубы на вращаемой оправке из алюминиевого сплава 2024 методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D. Получены расчетные графики усилия протягивания, накопленной интенсивности деформации по ходу волочения, распределения касательных напряжений по толщине стенки и интенсивности напряжений на протянутом участке готовой трубы. Дан анализ полученных результатов методом сравнения: волочения труб на не вращаемой оправке и волочение труб на вращаемой оправке. Показано, что вращение оправки обеспечивает положительный эффект по повышению производительности процесса.

Ключевые слова: волочение; вращаемая оправка; тонкостенная труба; моделирование; программа DEFORM-3D; напряженно-деформированное состояние; коэффициент вытяжки.

IMULATION OF PIPE DRAWING ON ROTARY MANDREL

Kargin V.R.¹, Kargin B.V.², Murtazin R.M.³

1 – PhD, Department OMD, Samara National Research University, Samara.

2- PhD, Department OMD, Samara National Research University, Samara.

3- student, Department OMD, Samara National Research University, Samara.

Abstract. The results of computer modeling of drawing a thin-walled pipe on a rotating mandrel made of aluminum alloy 2024 by finite element method in the software complex DEFORM-3D are given. Calculated graphs of the pulling force, accumulated strain intensity along the drawing, distribution of tangential stresses along the wall thickness and stress intensity on the stretched section of the finished pipe are obtained. The obtained results are analyzed by the method of comparison: drawing pipes on a non-rotating mandrel and drawing pipes on a rotating mandrel. It has been shown that the rotation of the mandrel provides a positive effect on improving process performance.

Keywords: drawing; rotating mandrel; thin-walled pipe; modeling; DEFORM-3D program; stressed-deformed state; draw factor.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из высокоэффективных методов изготовления тонкостенных труб является волочение. Трубы, изготовленные методом волочения, обладают высокими качествами, с точки зрения точности геометрических размеров, чистоты поверхности и механических свойств [1,2].

Для изготовления тонкостенных труб со строго лимитированными значениями внутреннего диаметра и толщины стенки, применяют волочение

на закрепленной короткой оправке [2]. В процессе волочения на закрепленной короткой оправке, часть усилия волочения уходит на преодоление сил трения трубной заготовки по рабочей поверхности цилиндрической оправки, что снижает эффективность процесса протягивания [1,2]. Уменьшить силы трения на неподвижной оправке можно за счет приложения вращательного движения оправки в плоскости, перпендикулярной оси волочения [3]. При таком движении контактная поверхность цилиндрической оправки перемещается относительно трубной заготовки по винтовой линии со скоростью $V = \omega r_{\text{опр}}$, где ω – угловая скорость вращения оправки; $r_{\text{опр}}$ – радиус вращаемой оправки. Данный процесс, на сегодняшний день, является недостаточно изученным.

В настоящее время для исследования процесса волочения наиболее широко используется компьютерное моделирование [6-7].

Цель работы – установление влияния вращения закрепленной короткой оправки в плоскости, перпендикулярной оси оправки, при волочении тонкостенных труб на характер распределения напряженно-деформированного состояния и энергосиловых условий на протянутом участке готовой трубы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Компьютерное моделирование процесса волочения тонкостенной трубы на закрепленной короткой вращаемой (не вращаемой) оправке реализовано средствами специализированного программного комплекса DEFORM-3D на базе метода конечных элементов [7]. Дано сравнение полученных результатов.

При моделировании в качестве заготовки использовали тонкостенную трубу $\varnothing 31 \times 3$ мм из алюминиевого сплава 2024 (аналог Д16). Предел текучести данного материала составляет 270 МПа, а предел прочности 410 МПа. Тонкостенную трубу протягивали через коническую волоку диаметром 29 мм, углом конуса рабочей зоны 20° и длиной калибрующего пояска 3 мм, рисунок 1а. Радиус сопряжения рабочей и калибрующей зон 10 мм.

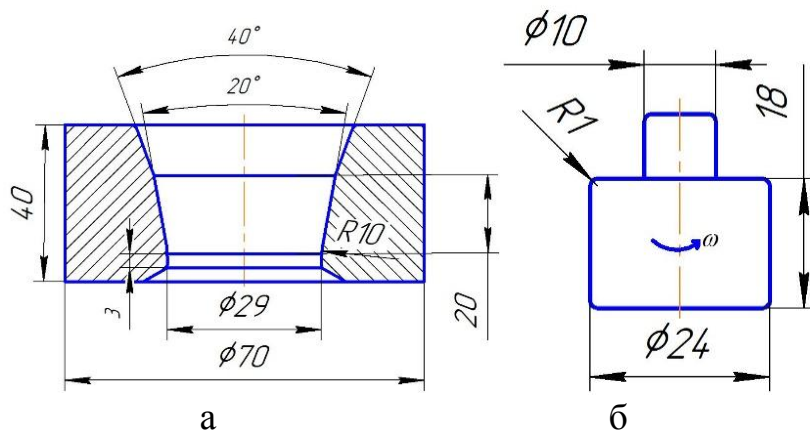
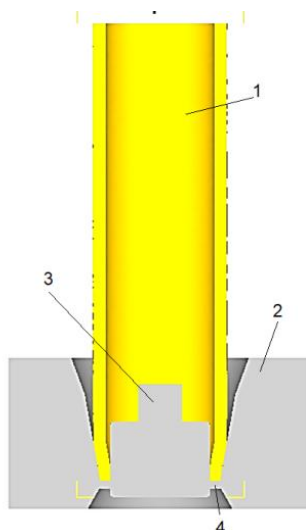


Рис. 1. Чертеж конической волоки и короткой цилиндрической оправки

При моделировании волоку и оправку рассматривали как жесткие тела. Угловую скорость вращения закрепленной короткой цилиндрической оправки $\varnothing 24$ мм и длиной 18 мм принимали равной $\omega = 0$ рад/сек, 5 рад/сек (рис. 1б). Коэффициент вытяжки по площади поперечного сечения $\lambda=1,31$. Трехмерные геометрические модели заготовки 1, волокна 2, оправки 3 и захвата 4 получены с помощью программного комплекса SolidWorks. На рис. 2 приведена компьютерная модель волочения тонкостенной трубы на закрепленной короткой оправке.



1 – заготовка; 2 – волокно; 3 – оправка; 4 – захват

Рис.2. Компьютерная модель волочения тонкостенной трубы на вращаемой оправке в момент начала протягивания

На поверхностях контакта трубной заготовки с волоком и оправкой действуют касательные напряжения, определяемые по закону Амонтона - Кулона. Коэффициент трения принят равным 0,08. Конечно - элементная сетка трубы сгенерирована с использованием 136146 конечных элементов с длиной ребра элемента 1 мм.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 изображен график изменения усилия волочения от перемещения захвата. Из графика видно, что на установившейся стадии процесса усилие при волочении на вращаемой закрепленной короткой оправке в среднем меньше на 30% по сравнению с классическим волочением на невращаемой закрепленной короткой оправке. Уменьшение усилия произошло за счет снижения силы трения между цилиндрической оправкой и внутренней поверхностью трубной заготовки вследствие поворота вектора сил трения от оси волочения к винтовой линии.

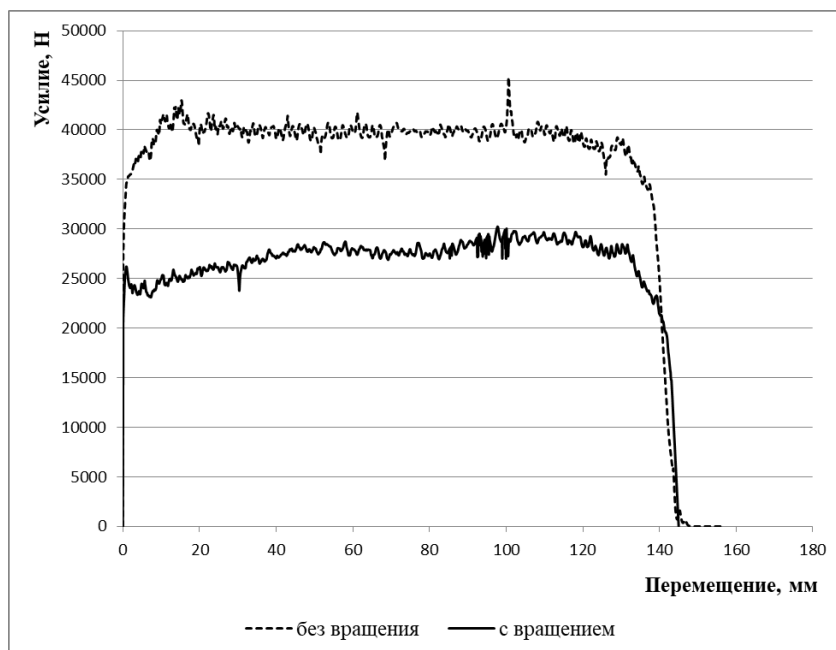


Рис. 3. График изменения усилия волочения от перемещения трубы

На рис. 4 представлен график распределения накопленной интенсивности деформации ε_i по длине протянутого участка трубы. Из рисунка следует, что при волочении с вращением оправки, величина накопленной интенсивности деформации в среднем на 42% больше, чем при волочении без вращения оправки. Увеличение интенсивности деформации происходит за счет наложения на процесс деформации сдвиговых деформаций от вращения оправки в плоскости, перпендикулярной оси волочения.

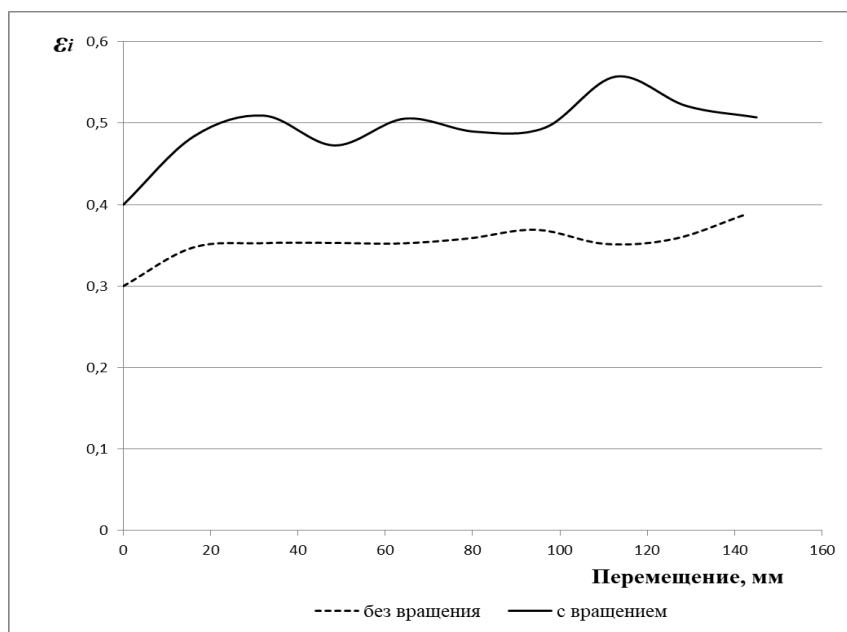


Рис. 4. График распределения интенсивности накопленной деформации по длине протянутого участка тонкостенной трубы

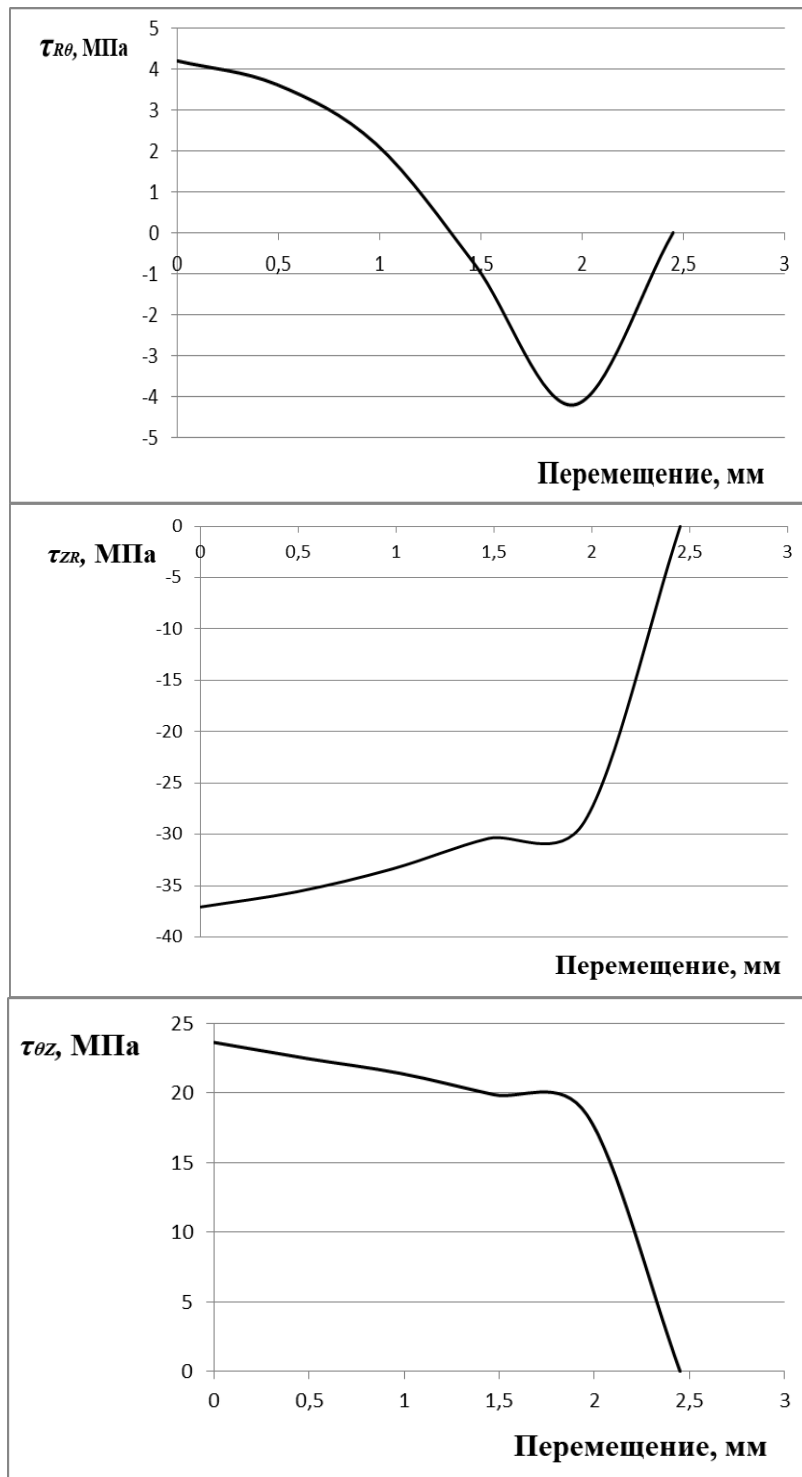


Рис. 5. Распределение касательных напряжений $\tau_{R\theta}$, $\tau_{\theta Z}$, τ_{ZR} по толщине стенки на протянутом участке трубы

Из рисунка 5 видно, что вращение оправки приводит к появлению на протянутом участке трубы по толщине стенки касательных напряжений $\tau_{R\theta}$, $\tau_{\theta Z}$, τ_{ZR} . При классическом волочении на закрепленной короткой оправке, компоненты тензора напряжений $\tau_{R\theta}$, $\tau_{\theta Z}$, τ_{ZR} на протянутом участке равны нулю. При гибридном волочении максимальные значения этих напряжений наблюдаются на внутренней поверхности стенки трубы, контактируемой с

оправкой, а на внешней поверхности они равны нулю. Касательные напряжения $\tau_{R\theta}$ на внутреннем и внешнем участках стенки трубы имеют противоположные знаки, примерно равны по величине и равны 0 в середине поперечного сечения.

Величина интенсивности напряжений σ_i по толщине стенки на протянутом участке трубы, вычисляемая по формуле

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2\sigma_z^2 + 6(\tau_{R\theta}^2 + \tau_{\theta z}^2 + \tau_{zR}^2)},$$

при волочении на короткой вращаемой оправке, больше на 5%, вследствие наличия касательных напряжений, рис. 6.

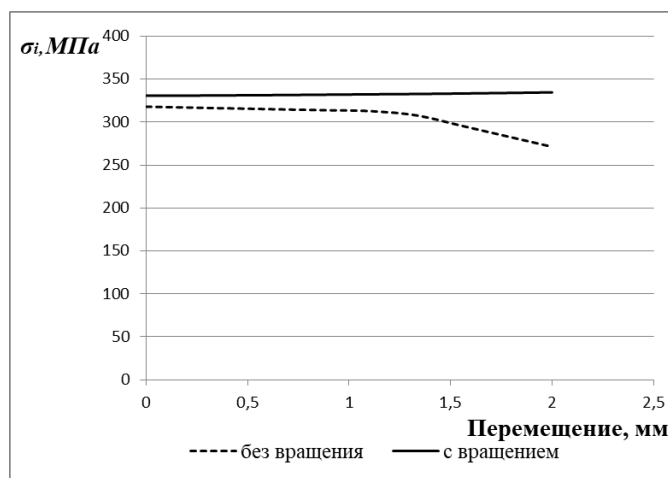


Рис. 6. Интенсивность напряжения по толщине стенки на протянутом участке трубы

ВЫВОДЫ

1. Проведен численный анализ влияния вращения короткой оправки при волочении труб на напряженно-деформированное состояние на протянутом участке.

2. Применение метода волочения на вращаемой оправке оказывает положительный эффект по снижению усилия протягивания в среднем на 30% за счет уменьшения силы трения между оправкой и внутренней поверхностью заготовки. Это что приводит к росту коэффициента вытяжки за проход на 20-30% за проход и соответственно повышению производительности процесса.

3. Величина накопленной интенсивности деформации при волочении на вращаемой оправке на протянутом участке трубы в среднем на 42% больше, чем при волочении трубы на неподвижной оправке без вращения, за счет наложения на процесс деформации сдвиговых деформаций от вращения оправки. Это приводит к дополнительному росту интенсивности напряжений

4. При классическом волочении на закрепленной оправке касательные напряжения $\tau_{R\theta}$, $\tau_{\theta z}$, τ_{zR} по толщине стенки на протянутом участке равны нулю. При волочении на вращаемой оправке максимальные значения

касательных напряжений, $\tau_{\theta Z}$, τ_{RZ} наблюдаются на внутренней поверхности стенки трубы, контактируемой с оправкой, а на внешней поверхности они равны нулю. Касательные напряжения $\tau_{R\theta}$ на внутреннем и внешнем участках стенки трубы имеют противоположные знаки, примерно равны по величине и равны 0 в середине сечения.

5. Величина интенсивности напряжений по толщине стенки при волочении на вращаемой оправке на протянутом участке трубы в среднем на 5% больше, чем при волочении трубы на неподвижной оправке без вращения, за счет наложения на процесс деформации сдвиговых напряжений от вращения оправки.

Список литературы

1. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
2. Савин, Г.А. Волочение труб / Г.А. Савин. – М.: Металлургия, 1993. – 336 с.
3. Каргин, В.Р. Процессы получения винтовых профилей и труб / В.Р. Каргин. – М.: Металлургия, 1994. – 92 с.
4. Шевченко, А.А. Об особенностях процесса волочения с вращением контактных поверхностей инструмент-заготовка / А.А. Шевченко, Г.А. Сидоренко, М.В. Рогов // Производство труб. – М.: Металлургия, 1971. Вып. 26. – С. 108 – 114.
5. Логинов, Ю.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении с вращением волокна / Ю.Н. Логинов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 6. – С. 39 – 41.
6. Харитонов, В.А. Влияние кручения при волочении круглой проволоки в монолитной волоке / В.А. Харитонов, М.Ю. Усанов // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2015. – №21. – С. 82-88.
7. Паршин, В.С. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.

References

1. Perlin, I.L. Theory of Drawing/I.L. Perlin, M.Z. Yermanok. – M.: Metallurgy, 1971. – 448 p.
2. Savin, G.A. Pipe drawing / G.A. Savin. – M.: Metallurgy, 1993. – 336 p.
3. Kargin, B.P. Processes of production of screw profiles and pipes / V.R. Kargin. – M.: Metallurgy, 1994. – 92 s.
4. Shevchenko, A.A. On the features of the drawing process with rotation of contact surfaces tool-blank / A.A. Shevchenko, G.A. Sidorenko, M.V. Rogov // Production of pipes. – M.: Metallurgy, 1971. Vyp. 26. – S. 108-114.

5. Loginov, Yu.N. Modeling of the stress-strain state during drawing with the rotation of the wolf / Yu.N. Loginov // Forging and stamping production. Pressure treatment of materials. – 2014. № 6. – S. 39-41.
6. Kharitonov, V.A. The influence of torsion when drawing round wire in a monolithic fiber/V.A. Kharitonov, M.Yu. Usanov // Modeling and development of OMD processes. – 2015. – №21. – S. 82-88.
7. Parshin, V.S. Practical guide to the software complex DEFORM-3D./ V.S. Parshin, A.P. Karamyshev, I.I. Nekrasov - Yekaterinburg: UrFU, 2010. 266 p.

УДК 669.715

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБТЯЖКОЙ ЛИСТОВОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ
ДЕТАЛИ ПЕРЕМЕННОЙ КРИВИЗНЫ С УЧЕТОМ СИММЕТРИЧНЫХ
ВЗАИМОСВЯЗЕЙ**

**Михеев В.А.¹, Чемпинский Л.А.¹, Булычов О.И.², Илюшкин М.В.²,
Сурудин С.В.¹, Гусев Д.В.¹, Тарасов В.А.¹, Баранова М.М.¹,
Воробьев Д.И.¹**

1 – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара.

2 – АО «Ульяновский НИИТ», г. Ульяновск.

Аннотация. Основным объектом для анализа результатов моделирования формообразования обтяжки являются графики изменения толщины в характерных или выбранных нами точках на поверхности оболочки двойной кривизны. В статье рассматриваются результаты моделирования, полученные при создании желаемой последовательности шаговых движений виртуального прессы, которая может быть повторно вставлена в интерфейс как блок команд, повторяемых автоматически. Принципы симметрии прослеживаются в процессе формообразования обтяжки листовой заготовки на виртуальном растяжно-обтяжном прессе РО-3М. А эффекты, лежащие в основе предлагаемого способа, подчиняются вполне определенным симметричным взаимосвязям каждый на своем шаговом движении, сокращая число альтернатив и обеспечивая эффективность вычислительного алгоритма, приводящего к минимизации риска локального утонения листовой заготовки и к уменьшению разнотолщинности полученной оболочковой детали до прогнозируемых пределов.

Ключевые слова: формообразование обтяжки, оболочковая деталь, переменная кривизна, имитационное моделирование, симметричные взаимосвязи.

**SIMULATION MODELING OF THE SHAPING PROCESS
OF A TIGHT-FITTING SHEET SHELL PART OF VARIABLE
CURVATURE, TAKING INTO ACCOUNT SYMMETRICAL
RELATIONSHIPS**

**Mikheev V.A.¹, Chempinskiy L.A.¹, Bulychov O.I.², Ilyushkin M.V.²,
Surudin S.V.¹, Gusev D.V.¹, Tarasov V.A.¹, Baranova M.M.¹, Vorobyov D.I.¹**

1 – Samara National Research University, Samara.

2 – PC «Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology and Production Organization», Ulyanovsk.

Abstract. The main object for results analyzing of modeling the shaping of the covering is the graphs of changes in thickness at characteristic or selected points on the surface of a double-curvature shell. The article examines the research results obtained by creating a desired sequence of step-by-step movements of a virtual press that can be reinserted into the interface as a block command that is repeated automatically. The principles of symmetry can be traced in the process of shaping the stretched sheet blank on the actual stretching and stretching press RO-3M. The effects included in the basis of the resulting output are subject to completely symmetrical relationships of each at its steps of movement, the choice of an alternative number and the achievement of the computational efficiency algorithm, leading to minimization the risk of local sheet mass thinning and to a reduction in the thickness variation of the resulting shell part to the predicted limits.

Keywords: *skin-tight shaping, shell detail, variable curvature, simulation modeling, symmetrical relationships.*

Введение

Имитационное моделирование – это технология, которая повторяет работу реального объекта в цифровой среде, воспроизводит действия оригинала в течение заданного времени. Выступая цифровым аналогом, имитационная модель замещает реальные процессы. Модели способны наглядно демонстрировать работу оборудования в формате управляемого алгоритма и программной реализации на компьютере, позволяют преобразовать реальный объект в цифровой аналог. После окончания разработки имитационной модели исследователь проводит компьютерные эксперименты (числовые расчеты), которые позволяют сделать выводы о поведении реального объекта [1].

В нашем случае при имитационном моделировании формообразования обтяжкой используется комплекс программ для работы ЧПУ через компьютерное приложение системы управления виртуальным отображением реального растяжно-обтяжного прессы РО-630-11 или РО-3М. Для воспроизведения процесса функционирования того или иного прессы разработан независимый компилируемый программный модуль (плагин) вариативного типа, который можно динамически подключать как дополнение к базовой программе САЕ конечно-элементного моделирования для расширения или использования ее возможностей, добавляя, при необходимости, новые функции в отличие от пакета из нескольких плагинов. В компьютерном приложении системы управления предусмотрен программный интерфейс, что позволяет исследователю точно моделировать реальную кинематику растяжно-обтяжного прессы [2].

В дополнение к этому, программный интерфейс включает управление и позиционирование каждым рабочим цилиндром виртуального растяжно-обтяжного прессы РО-630-11 или РО-3М (рисунок 1).

Однако все имитационные модели представляют собой модели типа, так называемого, «черного ящика». Это означает, что они обеспечивают выдачу выходного сигнала системы, если на ее взаимодействующие подсистемы поступает входной сигнал. Поэтому для получения нужной информации или результатов необходимо осуществлять «прогон» имитационных моделей, а не «решать» их. Имитационные модели не способны формировать свое собственное решение в том виде, в каком это имеет место в аналитических моделях, а могут лишь служить в качестве инструмента для анализа поведения оригинала в условиях, которые определяются исследователем. Поэтому среди методов прикладного системного анализа имитационное моделирование является наиболее удобным инструментом исследования, так называемых, сложных систем, управление которых связано с принятием решений в условиях неопределенности.

В нашем случае исследователь поставил цель снизить степень неравномерности деформации листовой заготовки, приводящей к

Секция 2. Инженерный анализ и автоматизация

минимизации риска локального утонения листовой заготовки и к уменьшению разнотолщинности полученной оболочковой детали до прогнозируемых пределов. Исследователь загружает твердотельный макет обтяжного пуансона на рабочий стол виртуальной модели растяжно-обтяжного пресса и макет листовой заготовки в его зажимные устройства. Для подключения вариативного плагина при разработке основного приложения предусмотрен программный интерфейс, выполненный на русском языке для пресса РО-3М (рисунок 1б).

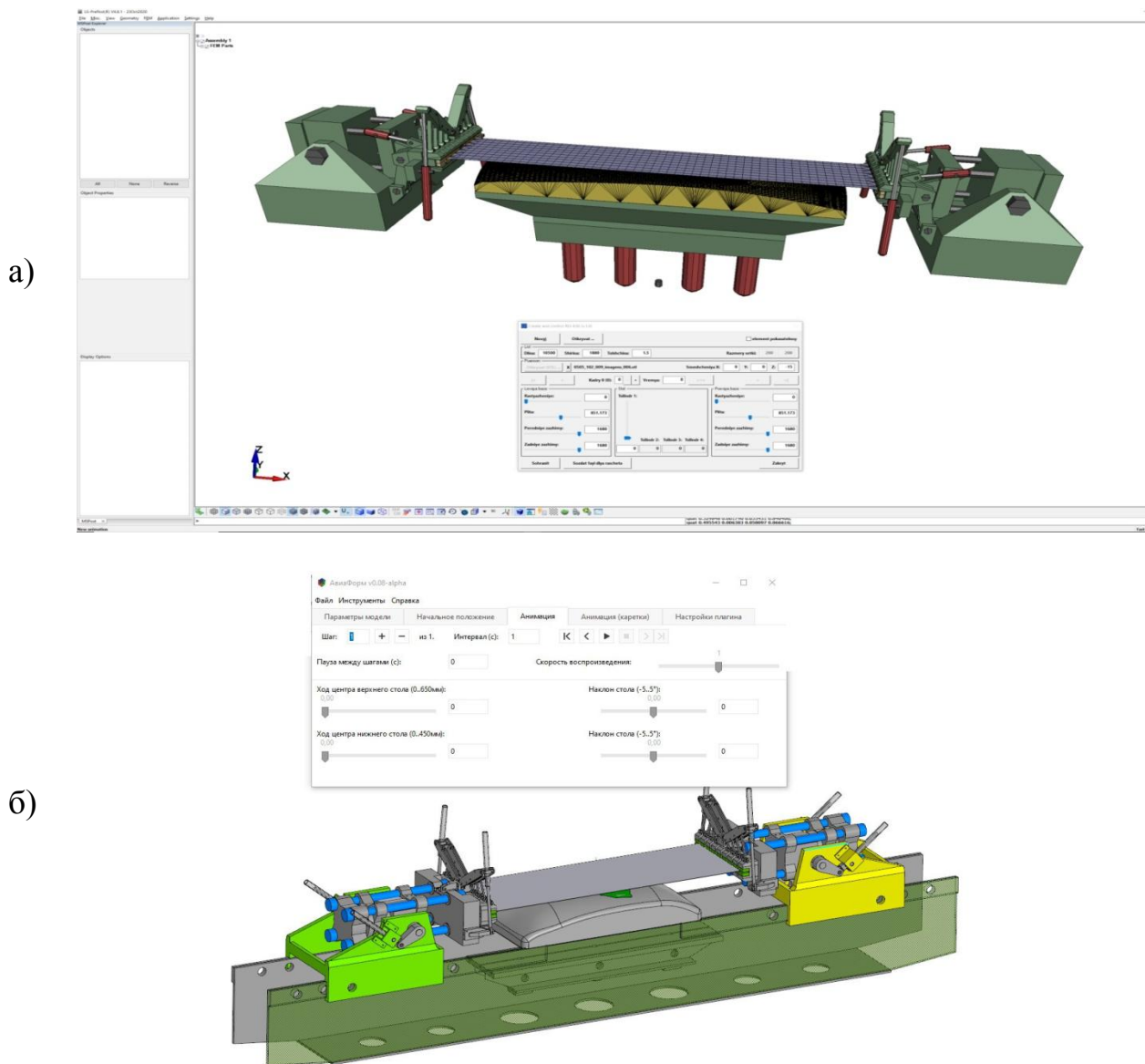


Рис. 1. Виртуальная модель и интерфейс исследователя растяжно-обтяжного пресса РО-630-11(а) и РО-3М (б)

Программный инструмент позволяет рассматривать большое число альтернатив, пытаясь улучшать качество управленческих решений за счет подбора желаемой последовательности шаговых движений виртуального пресса РО-3М и точнее спрогнозировать последствия, сокращая число альтернатив и обеспечивая эффективность вычислительного алгоритма.

Такой программный инструмент допускает несколько треков для получения нужного эффекта, что должно быть заложено в устанавливаемом приложении.

Если скачать плагин без устанавливаемого приложения, он не сможет функционировать. Для базовой программы QForm версии 10.2.4 расчетный файл запускается пока вручную.

Данное приложение определяет порядок и записывает соответствующую командную строку, позволяя свободно организовывать их для создания желаемой последовательности шаговых движений виртуального пресса, которая может быть повторно вставлена в интерфейс как блок команд, повторяемых автоматически. Можно подобрать кинематический шаговый режим имитации растяжения листовой заготовки с максимизацией степени формообразования при допустимом уровне утонения листовой заготовки путем ручной корректировки значений управляемых координат в программном интерфейсе управления виртуальной модели растяжно-обтяжного пресса. Ручная корректировка осуществляется по результатам анализа значений толщин в обозначенных исследователем точках на поверхности листовой заготовки и, при необходимости, повторяется числовой расчет в базовой программе CAE QForm.

Реалии в области информационных технологий на сегодняшний день таковы, что современные программные средства должны подстраиваться под быстро меняющиеся технологические тренды, причем в условиях импортозамещения. Во-первых, разработку крупной базовой программы QForm могла позволить себе лишь такая ведущая фирма российской IT-сферы как «КванторФорм», которая разрабатывает автоматизированный модуль под растяжно-обтяжной пресс РО-3М, что позволяет задавать перемещения его зажимов. Во-вторых, для передачи координат перемещения зажимов из плагина АвиаФорм с виртуальной моделью пресса в базовую программу QForm реализован модуль через язык API, что позволяет полностью автоматизировать процесс передачи координат при движении зажимных губок пресса РО-3М. Это окончательно «прикручивает» плагин АвиаФорм к базовой программе QForm, как это уже заложено в настройках устанавливаемого приложения.

Кроме того, для получения желаемой последовательности шаговых движений виртуального пресса РО-3М создан файл данных цикловой диаграммы, элементов виртуального пресса, макеты обтяжного пуансона и листовой заготовки. Подготовлена процедура автоматического разбиения объектов на конечные элементы с помощью solid или shell. Для повышения стабильности работы плагина, алгоритмы работы с сеткой были вынесены в отдельный процесс (k_motor.exe), который выступает в роли backend, и вызывается из плагина (выступающего в роли frontend) с требуемым набором параметров. Размер конечного элемента сетки можно варьировать при задании параметров экспорта. Однако условия неопределенности

сохраняются, и число альтернатив для получения желаемой последовательности шаговых движений виртуального пресса РО-3М при формообразовании обтяжкой листовой оболочковой детали переменной кривизны значительно увеличивается.

Это связано со сложной спецификой программного продукта, имеющей научно–технологическую природу. Стоит отметить и сложный процесс потребления программных продуктов, требующий технической поддержки. Зачастую после того, как продукт попал в руки исследователя, он начинает «жить отдельной жизнью» и развиваться, исходя из потребностей и задач исследователя, что еще более осложняет его поддержку. Задача имитационного моделирования становится чрезвычайно сложной, а подготовка файлов для отправки на расчет требует нечто иного. Требуется преобразовать задачу в такой вид, в каком ее можно решить путем компьютерных расчетов. Задача касается компьютерных алгоритмов – математических скелетов, из которых вырастают компьютерные программы. Принципиальное значение имеет концепция эффективности алгоритма: за сколько вычислительных шагов (числа альтернатив) будет получен результат при определенном количестве входных данных. При запуске система загружает необходимые структуры и переменные, благодаря работе алгоритмов с сеткой, собирает виртуальный пресс и создает последовательность шаговых движений через интерфейс, предоставляя другие функции, которые активируются в соответствии с запросами исследователя. При этом для оценки искомых величин может быть использована другая подходящая информация, циркулирующая не в этом программном комплексе, а в технологической среде производства самолетов.

Например, на предыдущем этапе исследований разработали расчетный модуль, который позволил выделить допущения и рассматривать их как граничные условия для построения алгоритма моделирования процесса формообразования обтяжкой оболочек на принципах симметрии. В качестве основы для построения алгоритма моделирования была принята общая идея симметрии, заимствованная из геометрии, но обладающая, тем не менее, общеметодологическим, и далеко, не частным характером. Принципы симметрии вносят существенную степень детерминизма и упорядоченности в поведение сложной системы, значительно снижая неопределенность общей задачи. Если вспомнить, то сложность теории пластических оболочек состоит в геометрической и физической нелинейности, в необходимости учета сдвиговых напряжений и деформаций по поверхности оболочки и топологической переменности по кривизне с плавно меняющейся криволинейной геометрией, что очень характерно для деталей обшивок самолета [3,4].

Задача приобретает особое значение, когда с помощью принципов симметрии определяют симметрию физической системы по симметрии ее частей на геометрическом уровне. Принципы симметрии способствуют выявлению структуры физических теорий и взаимосвязи фигурирующих в

них математических законов. Это позволяет устанавливать систематические отношения между различными теориями в рамках единой научно-исследовательской программы. Однако симметричный анализ технологических процессов до сих пор еще не получил должного внимания в промышленной практике, т.к. чаще всего требуется интуитивный путь и более сбалансированное партнерство между математикой и информатикой, приводящих к эффективному алгоритму [5].

В нашем случае симметрия является достаточно очевидным фактором. Например, для определенного геометрического объекта, в том числе и для оболочек двойной кривизны открытой поверхности в целом, а не замкнутой, как сферическая поверхность, нетрудно увидеть эту симметрию и показать путем преобразований его поверхности в соответствующей системе координат. В результате поверхность оболочки становится регулярной и изометричной по отношению к ее изгибанию или разгибанию. Тем более, что тонкостенная оболочковая деталь может менять изометрическую форму под собственным весом. В этом случае понятие симметрии гораздо шире и ее можно понимать как неизменность (инвариантность) каких-либо свойств объекта. Например, изометрические поверхности оболочек принадлежат одному и тому типу, т. е. они обе являются эллиптическими и в соответствующих точках поверхностей этих оболочек равны полные или гауссовы кривизны (инварианты кривизн нормальных линий, проходящих через точку). Две поверхности являются изометричными (изгибаемыми или разгибаемыми одна на другую), если между ними можно установить взаимно однозначное соответствие при существующей параметризации. При расширении понятия симметрии это может быть не только геометрический объект, но и закон, математическая формула или уравнение [6].

Например, если интуитивным путем устанавливается полный состав элементов симметрий некоторой сложной системы, то задача поиска рациональной схемы преобразования самой системы и сопутствующих уравнений значительно упрощается. Уже не нужно перебирать всевозможные схемы преобразований и уравнения, достаточно ограничиться теми, которые имеют требуемые симметрии. Таким образом, симметрия помогает перейти от интуиции к построению модели эффектов, как результат различных сочетаний групп элементов симметрий или заданного набора преобразований. Элементы геометрической группы симметрий можно разбить на классы, например, вращения, имея эквивалентные оси симметрии или отражения в эквивалентных плоскостях симметрии. Эквивалентными называются оси или плоскости, которые могут быть переведены друг в друга с помощью каких-либо операций симметрии из этой же группы. При этом критерием тождественности геометрического объекта и его математической модели служит совпадение их групп симметрии или, что, то же самое, их инвариантность относительно одних и тех же преобразований. На многих примерах убедительно продемонстрировано интегративное свойство симметрии, проявляющееся в соотношениях между ее принципами.

Предположим, что симметрия сможет сыграть важную роль в совершенствовании, как теории, так и практики процесса формообразования обтяжкой тонколистовых оболочек двойной кривизны, что гарантирует получение обводообразующих деталей обшивок современных самолетов точной геометрической формы и минимальной разнотолщинности после обрезки внешнего контура из сформированной обтяжкой тонколистовой оболочки, используя нужный шаблон. В результате мы плотно подошли к технологической среде производства самолетов и нашли подходящую информацию о том, что в представлении поверхности детали обшивки принята жесткая привязка к обводообразующим контурам самолета, кривизна которых характеризуется переменными величинами, закон изменения определяется теоретическими контурами элементов силового каркаса, составленными из шпангоутов и стрингеров.

При этом сама поверхность детали обшивки рассматривается не как целая, а как состоящая из продольных полосок весьма малой ширины в направлении обводообразующих контуров самолета, которая не даёт никакой информации о геометрической форме оболочки. В этом случае симметрия поверхности детали обшивки просто выпадает. Исправить такое положение можно за счет суперпозиции групп симметрии, применяемой для сложных и проблемных задач. В соответствии с этим имеется результирующая группа симметрии, которая считается высшей подгруппой групп симметрии частей объекта при заданном их расположении относительно друг друга. Причем такой принцип применим как к геометрическим, так и к технологическим объектам. Например, путём уточнения геометрической формы 3D поверхности обтяжного пуансона «припасовыванием» её к геометрии 3D модели поверхности детали обшивки, приближая к симметричному виду тонколистовую оболочковую деталь и твердотельный макет обтяжного пуансона с помощью единого параметрического представления их поверхностей.

Данное предположение касается тонколистовых оболочек двойной кривизны, обеспечивающих различное изометрическое положение поверхности в пространстве относительно поверхности обтяжного пуансона. Поэтому процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки в оболочковую деталь обладает некоторой группой симметрии относительно заданного набора преобразований поверхности, если при их выполнении не поменяются определенные свойства, так называемые инварианты набора преобразований. Например, гауссова кривизна как мера искривления поверхности оболочки в окрестности какой-либо точки характеризует ее внутренние свойства. Если рассматривать ее в окрестности вершины оболочки в центральной области, составляющей большую часть поверхности, где главные кривизны однозначны (положительны), то их произведение будет инвариантно разгибанию всей поверхности оболочки, принимающей новое изометрическое положение, даже под собственным весом. Предлагаемая нами система форм симметрии в целом ещё далека от

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России совершенства, но уже сейчас она может обеспечить устойчивый процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки и предложить ту последовательность шаговых движений виртуального пресса РО-3М, которая позволяет обеспечить получение тонколистовой оболочковой детали точной геометрической формы и минимальной разнотолщинности.

1. Анализ информации о представлении обводообразующей поверхности детали обшивки самолета

Создание электронного макета самолёта требует построения твердотельных моделей каждой детали и её увязки с окружением – другими деталями, входящими в проектируемый агрегат. Поэтому в представлении поверхности обтяжного пуансона как элемента геометрической увязки при построении самолета, принята жесткая привязка к обводообразующим контурам шпангоутов и стрингеров дискретного каркаса самолета, для которого внешние формы и размеры во многом определяют его летные свойства.

Одной из важнейших математических моделей самолета является его геометрическая модель. С ее помощью формируется образ создаваемого аэродинамического объекта самолета. Для характеристики поверхностей таких аэродинамических объектов как самолет вводят понятие «характерных» контуров, которое даёт представление о геометрии поверхности, например, теоретических контуров шпангоутов и стрингеров дискретного каркаса самолета. Внешняя поверхность одной детали обшивки, входящей в фюзеляж самолета, представляет собой участок обводообразующей поверхности, ограниченный замкнутым контуром, составленным из плоских разомкнутых гладких линий (рисунок 2).

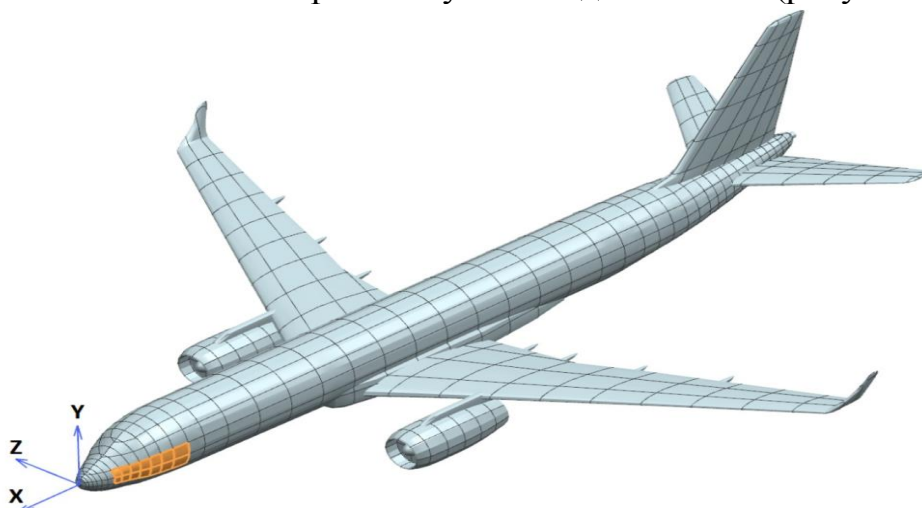


Рис. 2. Геометрическая модель самолета, заданная теоретическими контурами шпангоутов и стрингеров в системе координатных плоскостей OXYZ самолета

На рисунке выделена одна внешняя обшивка обвода фюзеляжа самолета. Ее поверхность рассматривается в связанной системе координат самолета, параллельно переведённой в исходную область расположения

поверхности обшивки OXYZ и соответствует теоретическим контурам шпангоутов (Шп.7 – Шп.14) и стрингеров дискретного каркаса (Стр.66 – Стр.76) (рисунок 3).

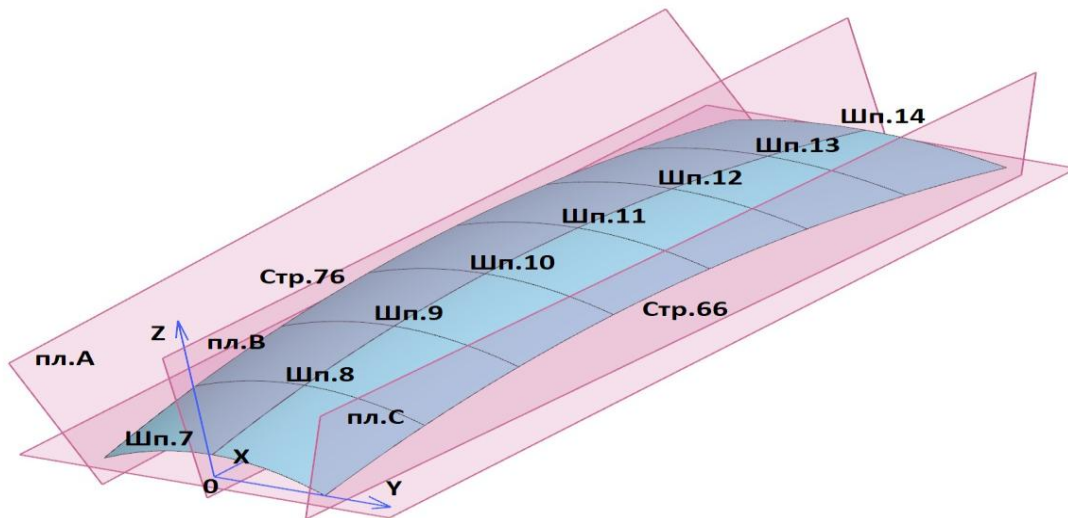


Рис. 3. Внешняя поверхность детали обшивки, входящей в фюзеляж самолета, в связанной системе координат самолета, параллельно переведённой в исходную область расположения поверхности обшивки OXYZ

Таким образом, геометрическая модель внешней поверхности детали обшивки и самолета целиком зависит от метода представления поверхности. Для этого нужно построить множество продольных и поперечных гладких кривых дискретного каркаса, которые во многих последних методиках, за исключением плазового-расчетного метода, играют одну и ту же роль, разбивая поверхность сложной пространственной формы на простые четырехугольные участки гомеоморфные квадрату. Квадрат автоматически покрывается сетью, а затем сеть отображается на участок поверхности с помощью метода двумерной интерполяции.

Данное представление поверхности получило развитие в методе генерации сеток как в области конечно-элементного анализа, так и в области геометрического моделирования с помощью существующих CAE/CAD-систем широкого применения. В свою очередь, работы для воспроизведения форм и размеров отдельных агрегатов самолета характеризуются специфичностью используемых методов и средств увязки размеров всех его деталей. Необходимую для этого информацию непосредственно задает конструктор.

Для них создается базовый эталон внешних форм и размеров в виде геометрической модели агрегата, с помощью которой до сих пор пытаются заменить конструктивный плаз, представляющий собой чертеж агрегата в натуральном масштабе со всеми проекциями и сечениями, позволяющими воспроизвести объемные формы деталей обшивок. Данное обстоятельство оказывает влияние на разработку процессов изготовления обшивок и на их контроль, определяемых необходимостью наличия большого количества

плоской и объемной технологической оснастки для контроля и их геометрической увязки с другими элементами агрегата.

Например, для контроля точности взаимоувязанной внутренней поверхности оболочковых деталей обшивок с дискретным каркасом самолета строят объемную «болванку» из дельта-древесины или изготавливают металлическую «болванку» непосредственно на фрезерных станках с ЧПУ из литой алюминиевой объемной заготовки при наличии модели внутренней поверхности оболочковых деталей обшивок с дискретным каркасом самолета. «Болванка» представляет собой объемный шаблон контрольно-доводочной оснастки, используя макет обводообразующей поверхности (базового эталона) агрегата самолета, соответствующий участку внутренней поверхности рассматриваемой детали обшивки. Но изначально эту «болванку» используют в качестве обтяжного пуансона для процесса формообразования обтяжкой листовой заготовки на специализированном растяжно-обтяжном прессе (рисунок 4).

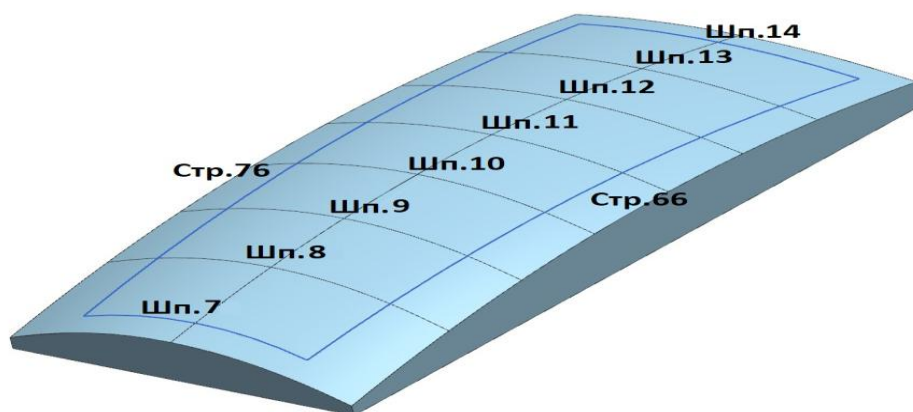


Рис. 4. Объемный шаблон контрольно-доводочной оснастки (обтяжной пуансон)

При установке «болванки» в качестве обтяжного пуансона на стол растяжно-обтяжного прессы направления стрингеров дискретного каркаса на поверхности обтяжного пуансона вдоль его длинной стороны совмещались с боковыми кромками стола прессы, а растяжения в листе создаётся за счет усилия, приложенного к узким сторонам листовой заготовки в сегментных зажимах растяжно-обтяжного прессы. При таких условиях верхний гребень обтяжного пуансона как линия нормального сечения поверхности (формообразующий продольный контур) имеет отклонения от линии дискретного каркаса и не вкладывается в вертикальную продольную плоскость симметрии растяжно-обтяжного прессы. Это еще раз указывает на то, что направление растяжения при обтяжке может не совпадать с направлением прокатки листового материала.

Кроме этого, представление поверхности обшивки в виде набора стрингеров и шпангоутов силового каркаса не дает никакой информации о геометрической форме оболочки. Расчетные алгоритмы представляют реальные объекты самолета в геометрических форматах, подходящих для

компьютерного отображения в системах CAE/CAD, которые используются для обработки очень больших данных, содержащих огромный массив точек. Однако применяя расчетные алгоритмы, разработчики имеют чисто геометрические проблемы при проектировании.

Имея узловые параметры участков дискретного каркаса поверхности, можно построить эффективные расчетные алгоритмы. Однако потенциал линий дискретного каркаса не исчерпывается первыми производными. Можно попытаться применить и вторые производные для более точного описания геометрии поверхности, основанного на смешанных производных. Их называют векторами закрутки поверхности. Если принять их равными нулю, то это приведет к местным «уплощениям» поверхности вблизи узлов. Применение же упрощенного подхода, когда используют только координаты узловых точек, приводит к визуализации непредусмотренных «складок» поверхности, которые реально проявляются при обтяжке с растяжением листовой заготовки. А вот равенство нулю смешанных производных точно выполняется только тогда, когда линии дискретного каркаса представляют собой линии кривизны.

Для получения деталей обшивок самолетов точной геометрической формы и минимальной разнотолщинности необходимо выявить, что процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки в оболочковую деталь обладает некоторой группой симметрии. Группа симметрии формируется относительно заданного набора преобразований поверхности. Заметим, что вместо преобразований поверхности можно выполнить соответствующее преобразование системы координат, т.е. вместо линий дискретного каркаса использовать линии кривизны. Такое определение операции симметрии является более удобным, когда имеем дело с поверхностными объектами, что согласно классической теории оболочек обеспечивает понимание симметрии геометрической формы и геометрический аспект деформации оболочки.

2. Анализ последовательности шаговых движений виртуального прессы РО-3М для формообразования обтяжкой листовой заготовки

Процесс обтяжки листовой заготовки заключается в получении тонкой оболочки двойной кривизны путем копирования формы обтяжного пуансона приложением растягивающих усилий к двум противоположным краям листовой заготовки. Эти процессы во многом близки к процессам формообразования, но их отличительной особенностью является наличие контактного трения листовой заготовки с поверхностью обтяжного пуансона. Имеется незамкнутый контур приложения растягивающих нагрузок со стороны подвижных зажимных губок обтяжного прессы, перемещающихся с обеих сторон по касательной к формообразующему продольному контуру на сходе с поверхности обтяжного пуансона. Предельные возможности при такой схеме формообразования обтяжкой чаще всего ограничиваются разрушением концевых участков листовой заготовки в районе зажимных

губок обтяжного пресса. Степень формообразования при обтяжке не превышает аналогичных показателей в сравнении с процессами деформирования с осевой симметрией.

Сущность процесса формообразования обтяжкой заключается в том, что плоская листовая заготовка, зажата с двух противоположных краев, обертывается по обтяжному пуансону за счет перемещения зажимных блоков обтяжного пресса с дифференцированным натяжением под действием растягивающего усилия. Либо после оборачивания и установки зажимных блоков по касательной к формообразующему продольному контуру на сходе к поверхности обтяжного пуансона, прикладывается растягивающее усилие. В результате растягиваются участки заготовки, которые прилегают к поверхности обтяжного пуансона до тех пор, пока вся внутренняя поверхность листа не будет прилегать к пуансону, а форма обтяжного пуансона по второй кривизне будет пластически «скопирована».

Это и есть процесс формообразования обтяжкой оболочки двойной кривизны, где средняя часть листовой заготовки приобретает вторую кривизну по ширине в окрестности вершины обтяжного пуансона в условиях осевой симметрии центрального поперечного сечения оболочки. Особенность данного поперечного сечения в том, что оно остается неподвижным и не скользит относительно поверхности пуансона. Сила трения меняет направление влево или вправо от нее, а пересечение данного поперечного сечения с продольным формообразующим контуром обтяжного пуансона, по которому было выполнено предварительное оборачивание листовой заготовки, определяет положение центральной точки O (вершина поверхности), в которой геометрическая форма оболочки двойной кривизны локально характеризуется величиной и знаком гауссовой кривизны, например эллиптическая (двояковыпуклая форма с положительной гауссовой кривизной).

Известно, что величина гауссовой кривизны сохраняет свое значение при свободном разгибании в пространстве поверхности оболочки двойной кривизны из-за своей малой жесткости, приобретая изометрическую форму по отношению к поверхности обтяжного пуансона. Изометрическая форма оболочки будет иметь другие радиусы продольной и поперечной кривизны, меняя местами максимальную и минимальную величину и оставляя их произведение постоянным (инвариантным). При этом значение гауссовой кривизны в точке O используется для оценки потребной деформации в районе полюса поверхности, которая характеризует получение заданной геометрической формы оболочки двойной кривизны в целом, т.к. к поверхности оболочки в окрестности вершины локально близка некоторая квадратичная поверхность.

Однако, имея оболочковую деталь переменной кривизны, необходимо изучить локальное устройство поверхности оболочки в окрестности вершины. Самую «грубую» информацию предоставляют касательные векторы, которые создают двумерное касательное пространство, в котором

естественным образом возникает евклидова геометрия. Эта геометрия переносится на саму поверхность и относится к внутренней геометрии поверхности в выбранной точке касания. Для изучения внутренней геометрии поверхности важным является понятие проекции той или иной фигуры на касательную плоскость к поверхности в окрестности точки касания последней, например, при рассмотрении малой области в окрестности «вершины» оболочки (точка O), с возможностью определения ее локальной формы. Такой подход получил развитие в дифференциальной геометрии в отличие от геометрии поверхности в целом.

Для определения локальной формы оболочки нужно заменить «изогнутую» поверхность в окрестности выбранной точки на касательную плоскость в этой точке и все нужные измерения произвести в удобной линейной евклидовой плоскости. Для этого используем прием, который приведет к касательной плоскости, позволяющий рассматривать всевозможные кривые, лежащие на поверхности и проходящие через точку O . Отклонение кривой, выполненной в нормальном сечении поверхности оболочки, от ее касательной на плоскости описывается кривизной. Среди множества ортогональных линий в нормальных сечениях поверхности, проходящих через вершину оболочки (точка O), имеется единственная ортогональная пара линий, отклонения которых от их касательных на плоскости имеют экстремальные значения. При таком положении касательные совмещены с главными направлениями поверхности в этой точке.

Система ортогональных осей x_0 и y_0 , проходящих через точку O , вместе с нормалью z_0 образуют репер (x_0, y_0, z_0). Таким образом, выбрана подвижная система координат в виде локального репера. Вектора репера x_0 и y_0 на касательной плоскости совмещены с направлениями главных кривизн нормальных сечений, проходящих через точку O , отображаемой как вершина поверхности обтяжного пуансона, имеющая касание с плоскостью. Пересечение поверхности с плоскостью, проходящей через нормаль z_0 , представляет собой плоскую кривую, называемую нормальным сечением поверхности. В нашем случае имеем две плоские нормальные кривые, совмещенные с главными направлениями поверхности в этой точке. Продольная кривая (формообразующий продольный контур, длиной $2L$) и поперечная кривая (центральный поперечный контур, длиной $2l$) пересекаются в точке O (рисунок 5).

Для практики наиболее важными элементами симметрии являются, прежде всего, касательная плоскость P к поверхности в точке O и вертикальные плоскости симметрии F_1 и F_2 растяжно-обтяжного пресса, при которых два любых направления, симметричных относительно плоскостей, будут иметь одинаковые свойства. Третьим элементом симметрии являются оси симметрии, например, пара главных осей анизотропии в плоскости листового материала. Четвертым элементом являются два главных направления в касательной плоскости к поверхности оболочки в точке O .

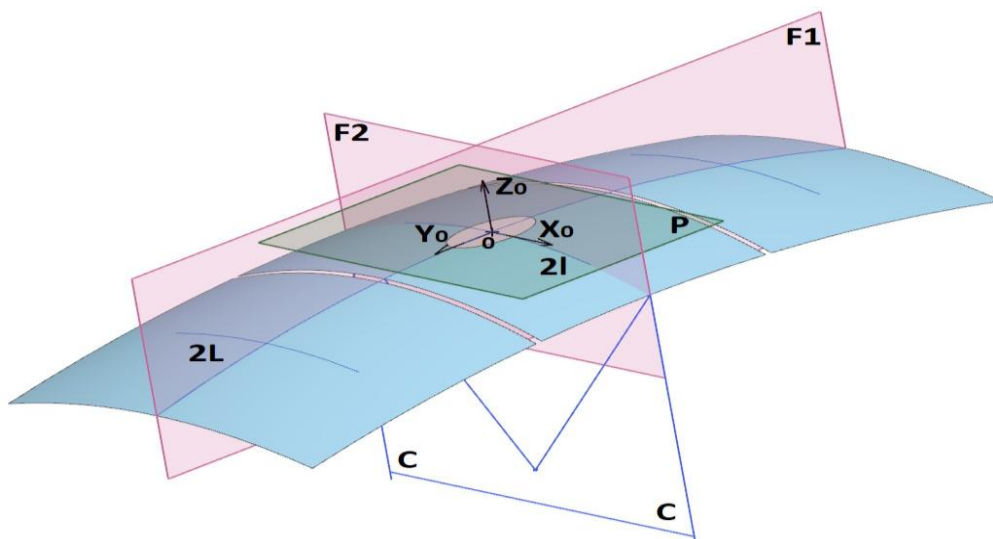


Рис. 5. Центральная часть поверхности двойной кривизны с касательной плоскостью в точке O на примере лоскутной модели поверхности оболочки, состоящей из центрального, левого и правого лоскутов

Факт совмещения направления растяжения при обтяжке с направлением прокатки листового материала подтвержден положением «правильного» эллипса, фигура которого получается при опускании вниз горизонтальной касательной плоскости к поверхности в точке O в положение секущей плоскости. Для правильной ориентации рабочей поверхности пуансона, относительно горизонтально расположенной в зажимах прессы листовой заготовки, необходимо обеспечить фигуру сечения рабочей поверхности горизонтальной плоскостью в виде «правильного» эллипса. Как известно, эллипс может быть «правильным», если его продольные и поперечные полуоси попарно равны между собой. Этого можно достичь за счёт изменения положения секущей плоскости, относительно центра симметрии фигуры сечения.

Можно показать, что главным направлениям соответствуют главные кривизны, одна из которых является максимальной, а другая – минимальной по отношению к кривизнам плоских линий нормальных сечений, проходящих через точку O , а вершина обтяжного пуансона является пятым элементом симметрии. Если главные кривизны не равны, то легко доказать, что главные направления будут обязательно ортогональны. Продольная кривая (формообразующий продольный контур) и поперечная кривая (центральный поперечный контур) ортогонально пересекаются в точке O и вложены в вертикальные плоскости симметрии F_1 и F_2 растяжно-обтяжного прессы. При этом вертикальная плоскость симметрии F_1 проходит через вершину поверхности обтяжного пуансона (точка O) и середины центральных губок левого и правого зажимного устройства растяжно-обтяжного прессы (см. рисунок 5).

При изучении локального строения центрального лоскута оболочки использовали прием, который привел к изучению касательной плоскости.

Однако каждая поверхность лоскута наделяется своей геометрией. Получение изометрической формы поверхности оболочковой детали в целом по отношению к поверхности обтяжного пуансона производится в условиях осевой симметрии для центрального лоскута, поперечное сечение которого является образующей поверхности вращения. Имея две изометрические поверхности, можно так изогнуть одну из них в окружающем пространстве, что она точно ляжет на вторую поверхность.

Важнейшим из свойств оболочковой детали является кривизна. При этом переменная кривизна является топологическим свойством оболочковой детали. Кривизну можно квантифицировать, т.е. для каждой точки геометрической поверхности существует число, говорящее о том, насколько изогнута поверхность вблизи этой точки. При этом, перемещая подвижный репер (x_0, y_0, z_0) вдоль продольной кривой (формообразующий контур) влево, а потом вправо, можно изучать саму поверхность оболочки и выхватывать закономерности изменения кривизны от точки к точке, переходя с одного лоскута на другой. Описанный прием позволил выполнить анализ внутренней геометрии поверхности оболочковой детали в целом, определить кривизны продольной и поперечной произвольно параметризованных кривых, пересекающиеся в точке O , не прибегая к натуральной параметризации, определить локальную форму в вершине поверхности обтяжного пуансона, причем в главных кривизнах.

При этом строить геометрическую модель обтяжного пуансона необходимо с учётом направления прокатки листовой заготовки. Была сориентирована поверхность обтяжного пуансона относительно основной линии кривизны по формообразующему контуру, направление которого совпало с направлением растяжения при обтяжке. Экспериментально с помощью верификации расчетной модели было доказано, что такое совпадение, оказалось возможным при формообразовании обтяжкой листовой заготовки по предложенному нами обтяжному пуансону, что обеспечивало симметричный характер развития очага деформации, и преимущественное образования зоны пластической деформации в центральной части листовой заготовки [7].

В результате необходимо преобразовать процесс проектирования обтяжного пуансона в соответствующей системе координат. Так что эффекты, лежащие на принципах симметрии, привели к контролируемой точности получения геометрической формы оболочки, к равномерному изменению толщины в различных областях листовой заготовки, отсутствию складок и разрывов. Проведены исследования методом конечных элементов в программном комплексе CAE QForm при моделировании процессов формообразования обтяжкой листовой заготовки по обтяжному пуансону, размещенному на столе виртуального растяжно-обтяжного пресса РО-3М с помощью программного модуля с интерфейсом пользователя. Он включает управление и позиционирование каждым рабочим органом виртуального растяжно-обтяжного пресса. Подобран кинематический шаговый режим

растяжения листовой заготовки с максимизацией степени формообразования при допустимом уровне утонения листовой заготовки и получен патент на способ формообразования обтяжкой длинномерных деталей оболочек двойной кривизны, имеющих двояковыпуклую пологую форму [8].

Принципы симметрии прослеживаются на каждом этапе шаговых движений виртуального растяжно-обтяжного пресса РО-3М в процессе формообразования обтяжкой, также как и эффекты, лежащие в основе предлагаемого способа, подчиняются вполне определенным симметричным взаимосвязям каждый на своем шаговом движении пресса. Эффект при первоначальной установке зажимов пресса для обтяжки прямолинейной листовой заготовки, эффект изометрического распрямления оболочковой детали и эффект увеличения градиента прилегания листовой заготовки в центральной области листовой заготовки с сохранением границ зоны пластической деформации без сползания в сторону зажимов. Способ включает следующие этапы, соответствующие шаговым движениям растяжно-обтяжного пресса РО-3М:

1. Растяжение плоской листовой заготовки прямолинейно выставленными дискретными зажимами пресса.
2. Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола пресса.
3. Растяжение оболочковой детали, принявшей изометрически распрямленную форму.
4. Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола пресса.
5. Установка левых и правых дискретных зажимов пресса по соответствующим контурам.
6. Движение стола пресса вверх до положения обертки формообразующего контура обтяжного пуансона;
7. Растяжение прижатых угловых частей листовой заготовки.

Для создания условий симметричной обтяжки необходимо поверхность обтяжного пуансона (макет обтяжного пуансона в формате IGES) импортировать в криволинейную систему координат, к поверхности двойной кривизны, привязанной к сетке линий кривизны с вершиной в качестве начала координат в точке O .

Были введены средства параметрического определения поверхности через криволинейные координаты, а установка обтяжного пуансона выполнена так, чтобы положение формообразующего контура поверхности было совмещено с первой вертикальной плоскостью F_1 . Вторая вертикальная плоскость F_2 , ортогональная первой, содержит положение контура центрального поперечного сечения, пересекающего формообразующий контур в вершине (точка O) поверхности оболочки двойной кривизны. В результате такой привязки обе ортогональные плоскости переходят в вертикальные плоскости симметрии растяжно-обтяжного пресса.

3. Результаты моделирования процесса формообразования обтяжкой листовой заготовки на принципах симметрии

Процесс формообразования обтяжкой совершается в соответствии с алгоритмом моделирования и представляет собой последовательность операций, выполняемых рабочими механизмами растяжно-обтяжного пресса РО-3М согласно шаговым движениям цикловой диаграммы. Основным источником получения информации о шаговых движениях технологического оборудования является измерение параметров управления с помощью компьютерного приложения системы управления для виртуального отображения реального растяжно-обтяжного пресса РО-3М с учетом его кинематических особенностей.

В центре внимания рассматриваются исследования, проводимые методом конечных элементов при моделировании процессов формообразования обтяжкой листовой заготовки по обтяжному пуансону, с поверхностью, ориентированной относительно сетки линий кривизны и размещенного на столе виртуального растяжно-обтяжного пресса. Сетка линий кривизны поверхности связана с возможностью определения локальной формы в вершине поверхности обтяжного пуансона, причем в главных осях, используя симметричные взаимосвязи. Необходимо выполнить соответствующее преобразование системы координат: вместо линий дискретного каркаса использовать линии кривизны. Относительно линий кривизны определяются значения геометрических параметров в нормальных поперечных сечениях поверхности обтяжного пуансона (рисунок 6).

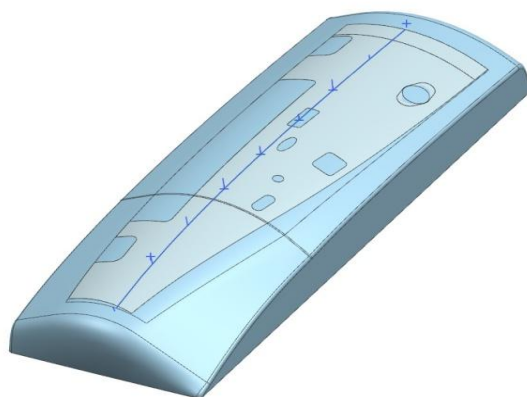


Рис. 6. Модель обтяжного пуансона и положение на поверхности контура детали обшивки, формообразующего контура и центральной поперечной линии, на пересечении которых обозначилась вершина поверхности обтяжного пуансона

При этом учитывали метрику самой поверхности в окрестности ее вершины с возможностью определения локальной формы оболочки, требовании симметрии к положению рабочей поверхности и позиционирование обтяжного пуансона на столе растяжно-обтяжного пресса РО-3М относительно его плоскостей симметрии (см. рисунок 1б).

Именно в условиях симметрии внешней нагрузки при обтяжке с растяжением листовой заготовки был отработан порядок ведения процесса формообразования по новой схеме формообразования обтяжкой длинномерных деталей оболочек двойной кривизны, имеющих двояковыпуклую симметричную форму, при которой первоначально выполняется формообразование листовой заготовки с зажимами, выставленными прямолинейно.

Программа для управления виртуальным прессом реализована в виде плагина Компас-3D с использованием Компас SDK (КОМПАС-МАСТЕР) для языка C# и получила название АвиаФорм. Первоначальным этапом в моделировании процесса является подготовка геометрических моделей элементов, участвующих в процессе: листовой заготовки; обтяжного пуансона и оболочки двойной кривизны в двух программных комплексах QForm и LS-DYNA для подтверждения соответствия результатов моделирования.

Механические свойства листового материала из алюминиевого сплава 1163РДМВ (обшивочный (В) лист из сплава марки 1163 с твердой регламентированной плакировкой РД, в оттоженном состоянии М) были получены в ходе испытания пяти образцов (толщиной 1,5мм). Статистическая обработка их результатов показала, что предел прочности (σ_B) – 174 МПа; предел текучести ($\sigma_{0,2}$) – 78 МПа; равномерное удлинение (δ) – 18%; касательный модуль (К) – 241,4 МПа, показатель упрочнения (n) – 0,204 и коэффициенты анизотропии $\mu_{21} = 0,428$, $\mu_{12} = 0,40$ и $\mu_1 = 0,471$; коэффициенты Лэнкфорда: $R_{00}=0,666$, $R_{45} = 0,889$, $R_{90} = 0,748$.

Далее было выполнено согласованное моделирование реальной кинематики растяжно-обтяжного пресса РО-3М в трехмерной среде, которое позволило получить более точные симуляции процессов формообразования деталей из листового металла на принципах симметрии согласно алгоритму моделирования процесса формообразования обтяжкой оболочек двойной кривизны.

Сопоставим качественную палитру очага пластической деформации при формообразовании обтяжкой данной оболочковой детали в системе QForm (рисунок 7 – рисунок 13). Габариты листовой заготовки 1900*7000 мм*мм. Подробности проведения процедуры расчетов здесь опускаем и покажем качественные «картинки» очага пластической деформации оболочковой детали соответствующие семишаговым движениям растяжно-обтяжного пресса РО-3М (обозначены римскими цифрами).

Секция 2. Инженерный анализ и автоматизация

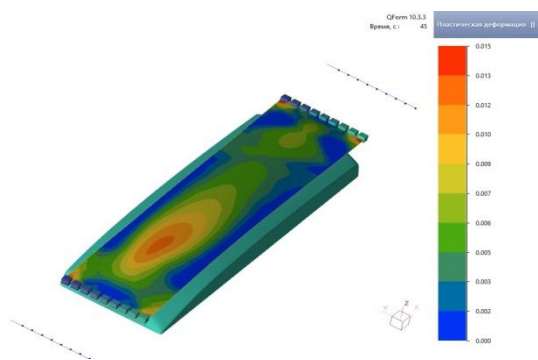


Рис. 7. Полное оборачивание плоской листовой заготовки по формообразующему контуру обтяжного пуансона (I шаг). Проявилась вершина обтяжного пуансона, имеющая эллипсоидный тип (деформация порядка 1,5%)

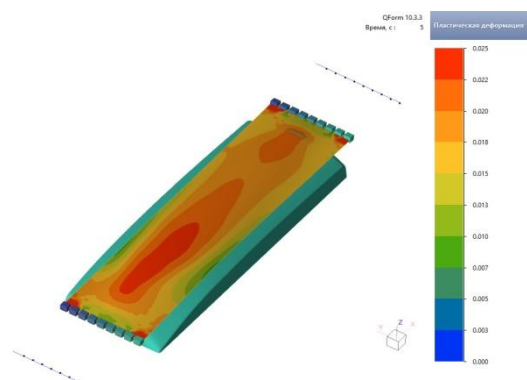


Рис. 8. Растяжение плоской листовой заготовки прямолинейно выставленными секционными зажимами прессы (II шаг). Пластическое формоизменение листовой заготовки до момента получения формы эллипсоидной поверхности в окрестности вершины обтяжного пуансона, охватывая границы центрального лоскута (деформация порядка 2,5%)

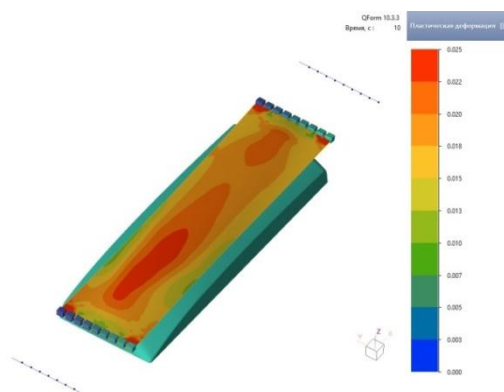


Рис. 9. Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола прессы. Деформационный «фон» остался без изменений (III шаг). Поверхность оболочки изменяется, принимая новую изометрическую распрямленную форму по отношению к поверхности обтяжного пуансона. Такая деформация называется изометрическим разгибанием

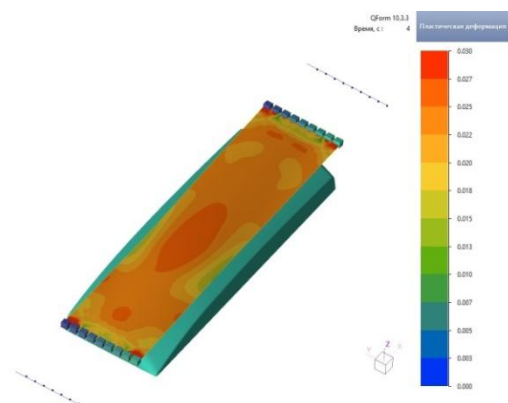


Рис. 10. Растяжение оболочковой детали, принявшей изометрически распрямленную форму (IV шаг). В результате пластического растяжения краевых волокон оболочки пластически конфигурируется кривизна в центральном поперечном сечении и сближаются значения толщины листовой заготовки в поперечном направлении (деформация порядка 3,0%)

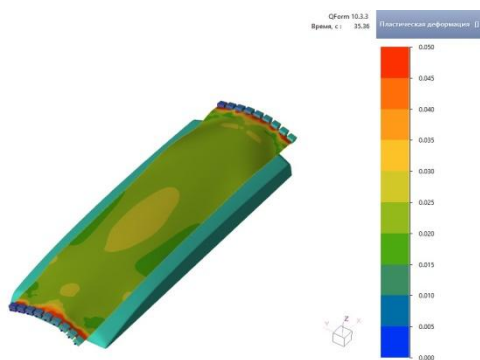


Рис. 11. Разгрузка без освобождения детали из зажимов за счет опускания стола пресса и установка левых и правых секционных зажимов пресса по соответствующим контурам (V шаг). Деформационный «фон» остался без изменений. В районе зажимов имеются локальные флуктуации деформаций на фоне разгрузки и изгибной деформации

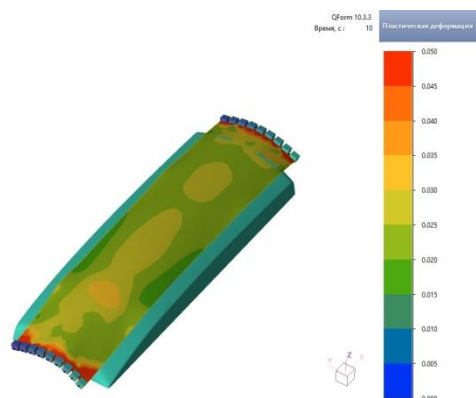


Рис. 12. Движение стола вверх до положения обертки формообразующего контура обтяжного пуансона (VI шаг). Движение стола вверх приводит к «возмущению» деформационного «фона», выделяя (опять) местонахождение вершины обтяжного пуансона

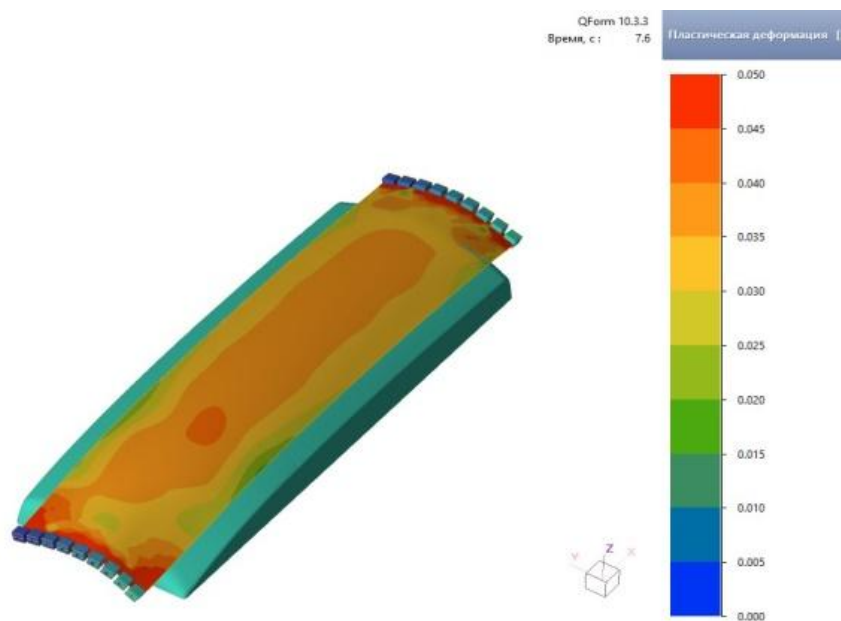


Рис. 13. Растяжение прижатых угловых частей листовой заготовки (VII шаг). Увеличение градиента прилегания листовой заготовки в центральной области листовой заготовки с сохранением границ зоны пластической деформации без сползания в сторону зажимов. Пластическое растяжение прижатых угловых частей листовой заготовки к поверхности обтяжного пуансона (деформация порядка 4,0% с небольшим калибровочным растяжением)

Результаты изменения толщины оболочковой детали фиксировали в условно выбранных точках на поверхности листовой заготовки. Касание листовой заготовки в вершине поверхности обтяжного пуансона (точка P7) (рисунок 14). Подробности проведения процедуры расчетов здесь опускаем и покажем только графики изменения значений толщины в характерных или

Секция 2. Инженерный анализ и автоматизация

выбранных нами точках на поверхности листовой заготовки согласно рисунку 15. Эти точки расположены на трех линиях, расположенных на листе спереди фронтально (синий цвет P0, P3, P6, P9, P12), по центру (красный цвет P1, P4, P7, P10, P13) и сзади (зеленый цвет P2, P5, P8, P11, P14) по отношению к позиции оператора пресса. Точки на линиях синего и зеленого цвета соответствуют боковым контурам детали.

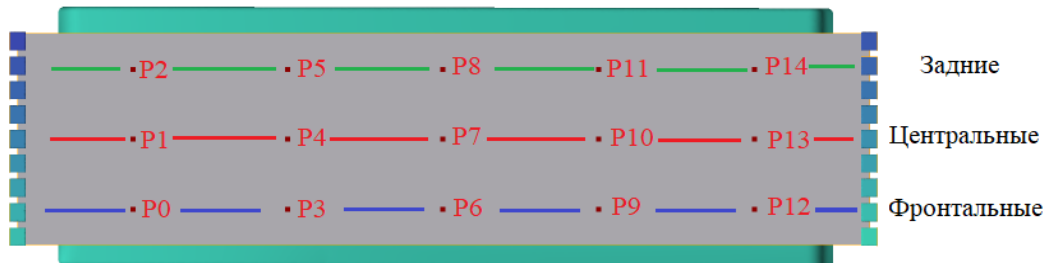


Рис. 14. Условно выбранные точки на поверхности листовой заготовки для идентификации значений толщины оболочковой детали в системе QForm

Результаты изменения толщины оболочки в условно выбранных точках на поверхности листовой заготовки приведены в виде графиков, имеющих достаточно монотонный падающий характер (условное время процесса моделирования в системе 8 сек) (рисунок 15).

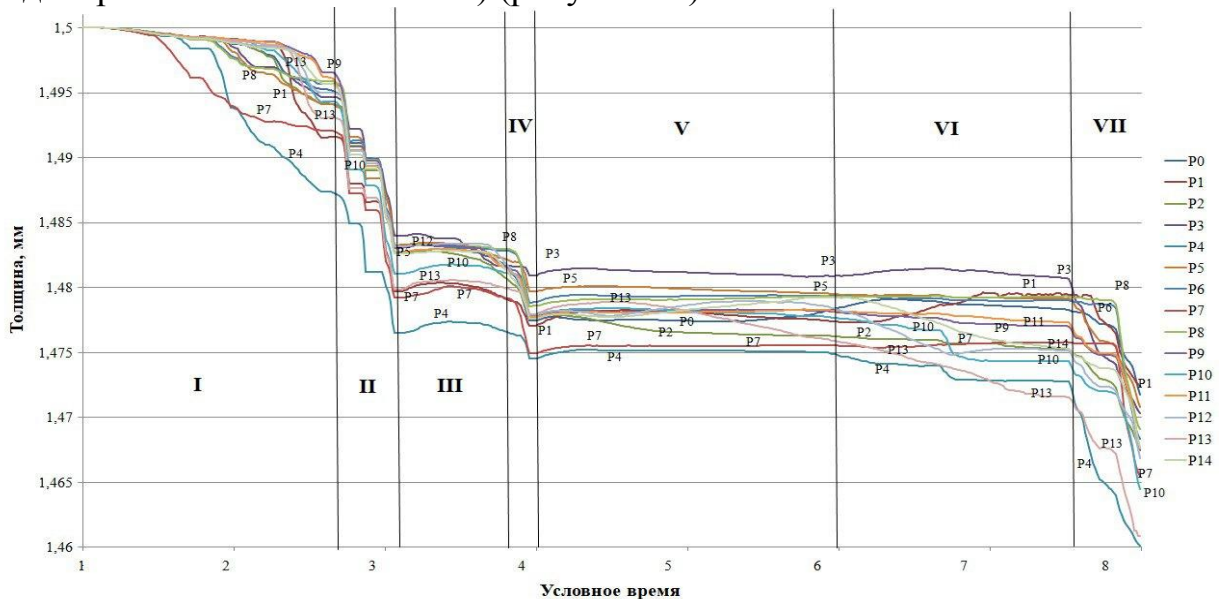


Рисунок 15. Распределение толщины в условно выбранных точках на поверхности оболочковой детали показано в зависимости от условного времени расчета (8 сек.) в системе QForm

Наблюдается монотонное изменение толщины листовой заготовки в направлении условных единиц времени (у. е. в.). Разнотолщинность оболочковой детали составляет диапазон 1,473 – 1,460 мм. На графиках выделены вертикальные линии, четко разделяющие семь шаговых движений растяжно-обтяжного пресса (обозначены римскими цифрами).

Это указывает на полную кинематическую управляемость процессом формообразования обтяжкой листовых оболочковых деталей переменной кривизны – топологически сложной пространственной формы. Способ формообразования обтяжкой листовых оболочковых деталей переменной кривизны, построенный на принципах симметрии, поддается оптимизации за счет подбора кинематической схемы управления параметрами рабочих органов растяжно-обтяжного пресса. Увеличивается этап формообразования при сохранении местоположения зоны наибольших деформаций в центральной части листовой заготовки при отсутствии локализации деформации на концевых участках листовой заготовки. Жесткость кинематической схемы формообразования обтяжкой обеспечивает высокую равномерность деформации растяжения листовой заготовки.

Заключение

Чтобы минимизировать риск локального утонения и получить равномерную толщину листовой оболочковой детали до прогнозируемых пределов, требуется новая технология. Она направлена на увеличение степени формоизменения при обтяжке при сохранении местоположения наибольшей деформации в центральной части листовой заготовки, достигаемой практически за один переход без локализации деформации утонения и выравнивающая их значения в различных областях листовой заготовки. Таким образом, для обеспечения монотонности деформации формообразование листовой заготовки необходимо проводить в условиях симметричной обтяжки без ее локализации в части листовой заготовки, расположенной между краем обтяжного пуансона и зажимными губками пресса. Растяжение листовой заготовки при формообразовании обтяжкой различается не только величиной усилий, но и областью их приложения по краю заготовки. Данная особенность оказывает влияние на характер зоны пластической деформации.

Путь от выделения инвариантов до аналитического оформления метода расчета метрик поверхности оболочки, к которым можно отнести кривизны линий и величины деформации в характерных точках поверхности обшивки, почти завершен. Считаем, что процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки в оболочковую деталь самолета обладает некоторой формой симметрии относительно заданного набора преобразований поверхности, если при их выполнении не поменяются определенные свойства или соотношения, так называемые инварианты набора преобразований. Выполнили соответствующее преобразование системы координат, т.е. вместо линий дискретного каркаса самолета использовали сетку линий кривизны.

Предлагаемая система форм симметрии в целом ещё далека от совершенства, но уже сейчас она может создать устойчивый процесс формообразования обтяжкой листовой заготовки, получить более точные симуляции процессов формообразования деталей из листового металла и

предложить более рациональную кинематическую схему на растяжно-обтяжном прессе РО-3М.

Список литературы

1. Эльберг, М.С. Имитационное моделирование: уч. пособие. / М.С. Эльберг, Н.С. Цыганов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-р, 2017. – 128 с.
2. Михеев, В.А. Компьютерное приложение системы управления кинематикой виртуального растяжно-обтяжного прессы РО-630-11. [Текст] / В.А. Михеев, Р. де Алваренга, М.М. Демидова // Серия конференций IOP: Материаловедение и машиностроение. – 2021. – Т. 2094. – С. 42057. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2094/4/042057> (дата обращения: 10.02.2023).
3. Михеев, В.А. Изометрические условия при формообразовании обтяжкой оболочки двойной кривизны минимальной разнотолщинности. [Текст] / В.А. Михеев, С.Г. Дементьев, В.П. Самохвалов, Д.В. Савин, С.В. Сурудин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 6-1 – С. 161-166.
4. Филин, А.П. Элементы теории оболочек. – 3-е изд. перераб. и доп. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987, – 384 с.
5. Михеев, В.А. Метрическое преобразование поверхности обтяжного пуансона для формообразования листовых оболочек двойной кривизны. [Текст] / В.А. Михеев, Ф.В. Гречников, Р. де Алваренга, В.В. Бодров // Серия конференций IOP: Материаловедение и машиностроение. – 2021. – Т. 1155. – С. 12010. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1155/1/012010>, (дата обращения: 10.02.2023).
6. Вернер, А.Л. Элементы топологии и дифференциальная геометрия / А.Л. Вернер, Б.Е. Кантор. – М.: Мир, 1985.
7. Михеев, В.А. Моделирование траектории перемещения зажимов листовой заготовки при формообразовании обтяжкой оболочковой детали [Текст] / В.А. Михеев, А.Ф. Гречникова, Р. де Алваренга, М.М. Демидова // Серия конференций IOP: Материаловедение и машиностроение. – 2021. – Т. 1181. – С. 12016. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1181/1/012016>, (дата обращения: 10.02.2023).
8. Патент на изобретение № 2799365 Способ формообразования обтяжкой длинномерных деталей оболочек двойной кривизны, имеющих двояковыпуклую пологую форму / Бодров В.В., Михеев В.А., Багаутдинов Р.М., Бухаров И.В., Батурин А.А., Сурудин С.В., заявка № 2022129012, приоритет изобретения 09.11.2022г., дата госрегистрации 05.06.2023 г.

УДК 621.7.04:629.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИБКИ КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ ШВЕЛЛЕРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ВАГОНОСТРОЕНИИ

Сосенушкин Е.Н.¹, Яновская Е.А.², Пономарева А.С.³

1 – д.т.н. профессор, зав. каф. композиционных материалов

2 – к.т.н., доцент каф. прикладной математики

3 – студент каф. систем пластического деформирования

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» г. Москва

Аннотация. В статье рассмотрена одна из краевых задач, возникающих при анализе операции гибки. Выполнено компьютерное моделирование операции гибки в программном комплексе DEFORM. Оценены напряженно-деформированное состояние металла заготовки и кинематические характеристики, определены силовые параметры гибки концевых участков швеллера ограниченной длины, рассчитан угол пружинения.

Ключевые слова: гнутый швеллер, гибка, сила деформирования, компьютерная модель, пружинение.

MODELING OF BENDING PARAMETERS OF THE END SECTIONS OF CHANNEL LAYERS USED IN CAR BUILDING

Sosenushkin E.N.¹, Yanovskaya E.A.², Ponomareva A.S.³

1 – Doctor of Technical Sciences professor, head department composite materials

2 – Ph.D., Associate Professor, department. applied mathematics

3 – student of the department plastic deformation systems

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MSTU "STANKIN"
Moscow

Annotation. The article considers one of the boundary value problems that arise when analyzing the bending operation. Computer modeling of the bending operation was carried out using the DEFORM software package. The stress-strain state of the workpiece metal and kinematic characteristics were assessed, the force parameters for bending the end sections of a channel of limited length were determined, and the springing angle was calculated.

Key words: bent channel, bending, deformation force, computer model, springing.

Актуальность. Подвижной состав железнодорожного транспорта, включающий в себя вагоны для обеспечения перевозки грузов и пассажиров, нуждается в периодическом обновлении. Вагонный парк характеризуется многообразием типов и конструкций. Это вызвано необходимостью удовлетворения различных требований при перевозках: защиты ряда грузов от атмосферных воздействий, сохранения скоропортящихся грузов, предупреждения повреждений хрупких грузов, обеспечения комфорта пассажирам. Кузов вагона предназначен для размещения пассажиров или грузов, что влияет на тип вагона и его конструкцию. К примеру, кузов пассажирского вагона состоит из рамы, боковых и торцовых стен, пола, крыши, дверей окон, систем жизнеобеспечения [1]. Рама вагона собирается из хребтовой балки, проходящей по всей длине, двух шкворневых, усиливающих ребра нижней части кузова, трех поперечных и двух концевых балок [2]. Балки изготавливают из гнутого швеллера [3] с размерами $h \times t \times s$ (h – ширина стенки; t – высота полок; s – толщина полок швеллера) по

техническим условиям [4] из толстолистного проката [5]. Материал балок сталь марки 09Г2Д [6] из группы низколегированных конструкционных сталей для сварных конструкций, марганцовистая с медью, которая обладает повышенной стойкостью против атмосферной коррозии. Для стыкования балок концевые участки швеллеров дополнительно обрабатываются с помощью операций пробивки, локальной гибки и обрезки [7-9].

Схема гибки концевой участка гнутого швеллера (рисунок 1) аналогична двугуговой гибке П-образных деталей. Разница заключается в том, что исходной заготовкой является не плоская полоса, а гнутый швеллер. Зазор между пуансоном и матрицей назначен равным толщине полок швеллера $z=s$. Математическая модель гибки концевых участков балок описана в работе [10].

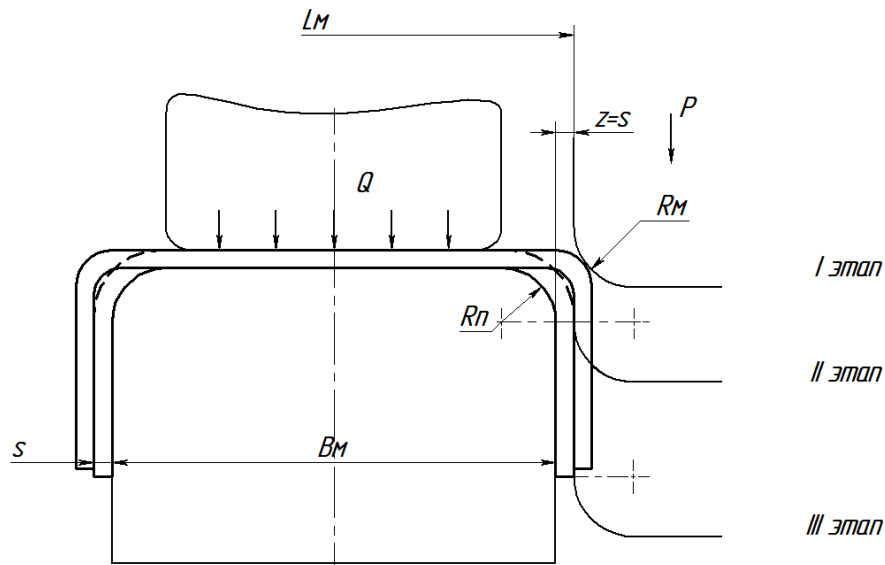


Рис. 1. Схема гибки

Компьютерное моделирование гибки концевых участков балок в штампе. Проведем расчет технологических параметров гибки концевых участков балки на конкретном примере. Чертеж балки представлен на рисунке 2, где левый конец обрабатывается с двух сторон, а правый концевой участок деформируется по схеме односторонней гибки [11] длина противоположных участков различная.

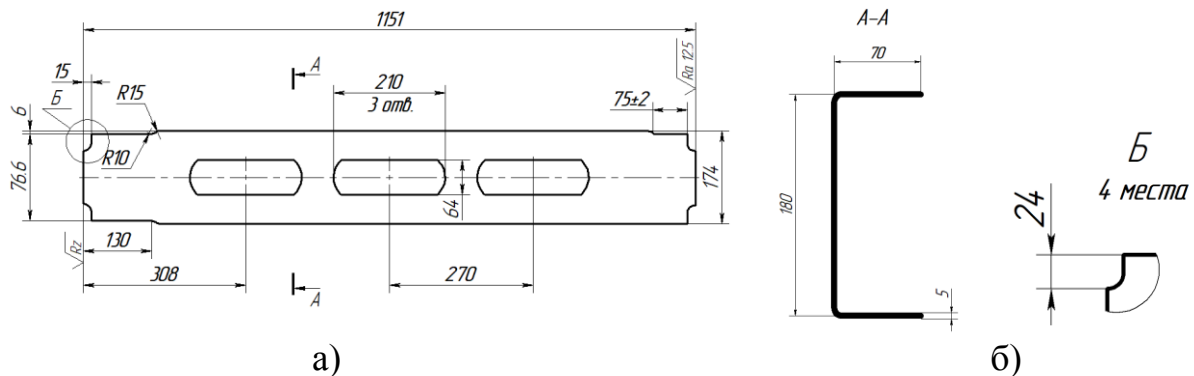


Рис. 2. Чертеж балки

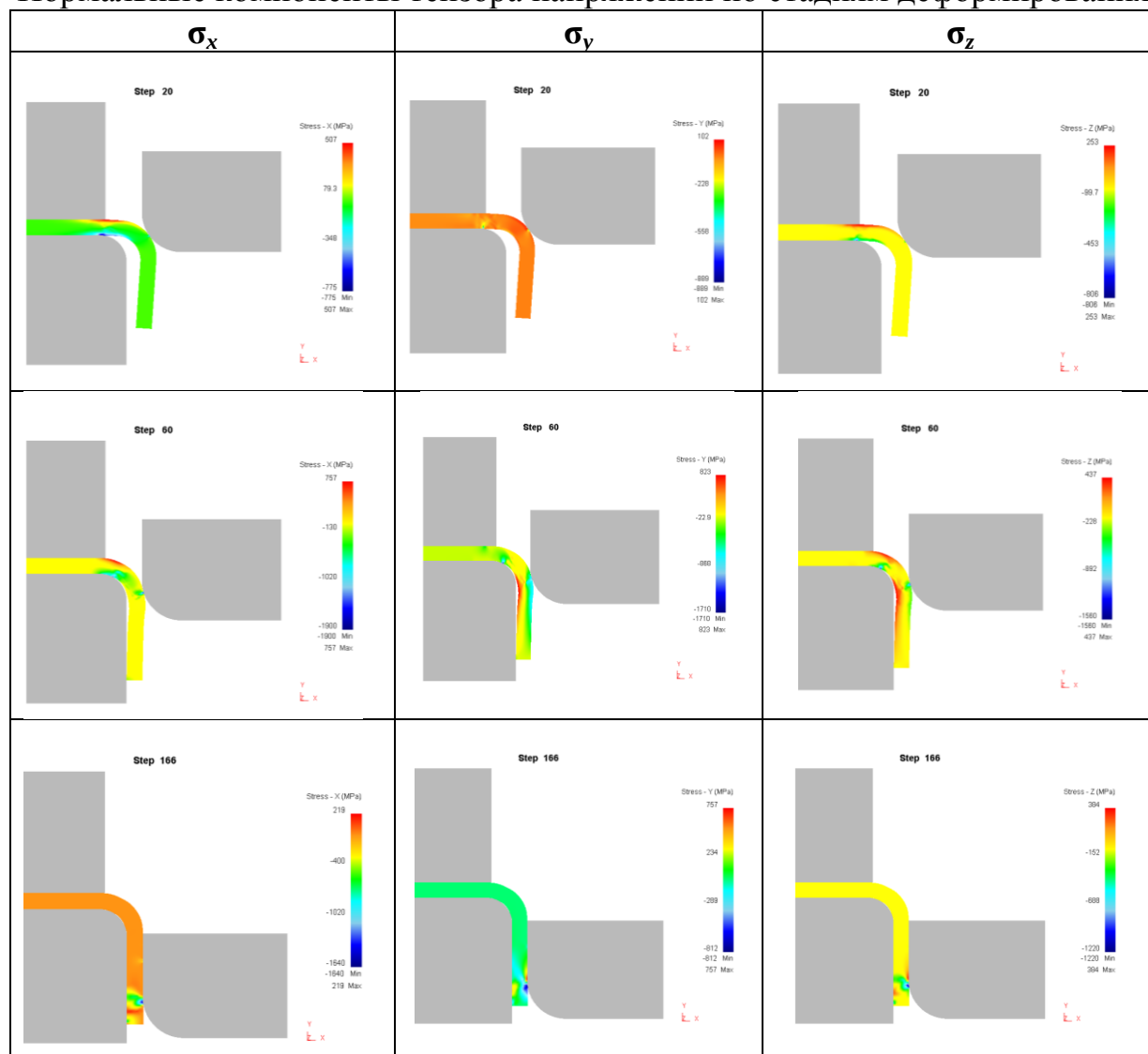
Поскольку толщина полок изгибаемого швеллера 5 мм, то деталь можно отнести к толстолистовым [6, 12, 13], и в качестве инструмента численного моделирования использован программный комплекс DEFORM 2D [14].

Исходные данные. Геометрические параметры определим из чертежа балки. Для реализации технологии гибки используется индукционный нагрев концевой участка ограниченной длины до температуры 900°C. С учетом транспортировки к прессу и установки заготовки в штамп температура начала гибки находится на уровне 850°C, что соответствует температурному интервалу полугорячей штамповки.

Фактор трения для этих условий принимаем по модели Прандтля – Зибеля $f=0,5$. В качестве условий теплообмена на стадии установки заготовки в штамп до начала рабочего хода принимаем теплообмен излучением, во время рабочего хода условия меняются на контактный теплообмен.

Таблица 1

Нормальные компоненты тензора напряжений по стадиям деформирования



Анализ результатов моделирования. Результаты моделирования гибки в штампе для половины поперечного сечения балки в силу симметрии представлены в виде таблиц, при этом получены: нормальные компоненты тензора напряжений (таблица 1); касательные напряжения, максимальное главное растягивающее напряжение и интенсивность напряжений по стадиям деформирования представлены в таблице 2; компоненты тензора деформаций (таблица 3), следует отметить, что концевой элемент подвергается гибке в условиях плоского деформированного состояния, а компоненты деформаций не зависят от координаты z ; компоненты скорости деформаций в локализованном очаге деформации сечения детали; критерий Кокрофта – Латама по стадиям деформирования представлены в таблице 4.

Таблица 2

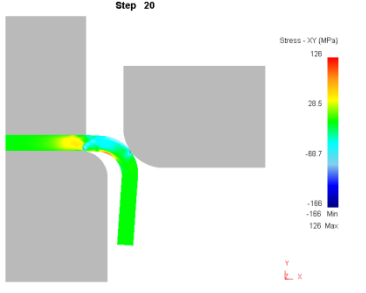
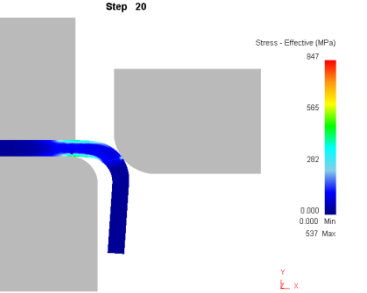
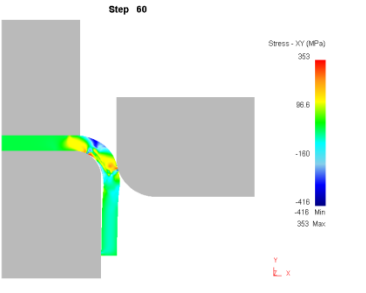
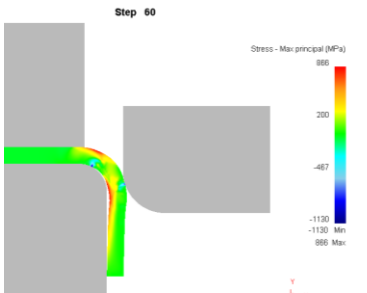
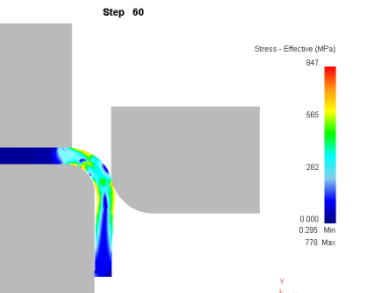
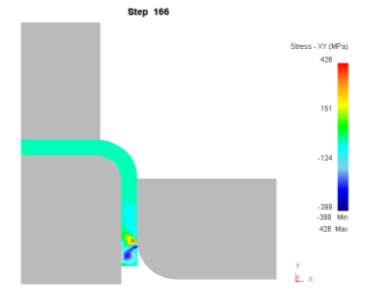
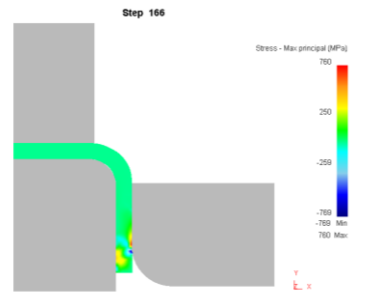
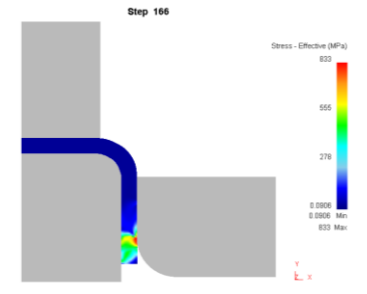
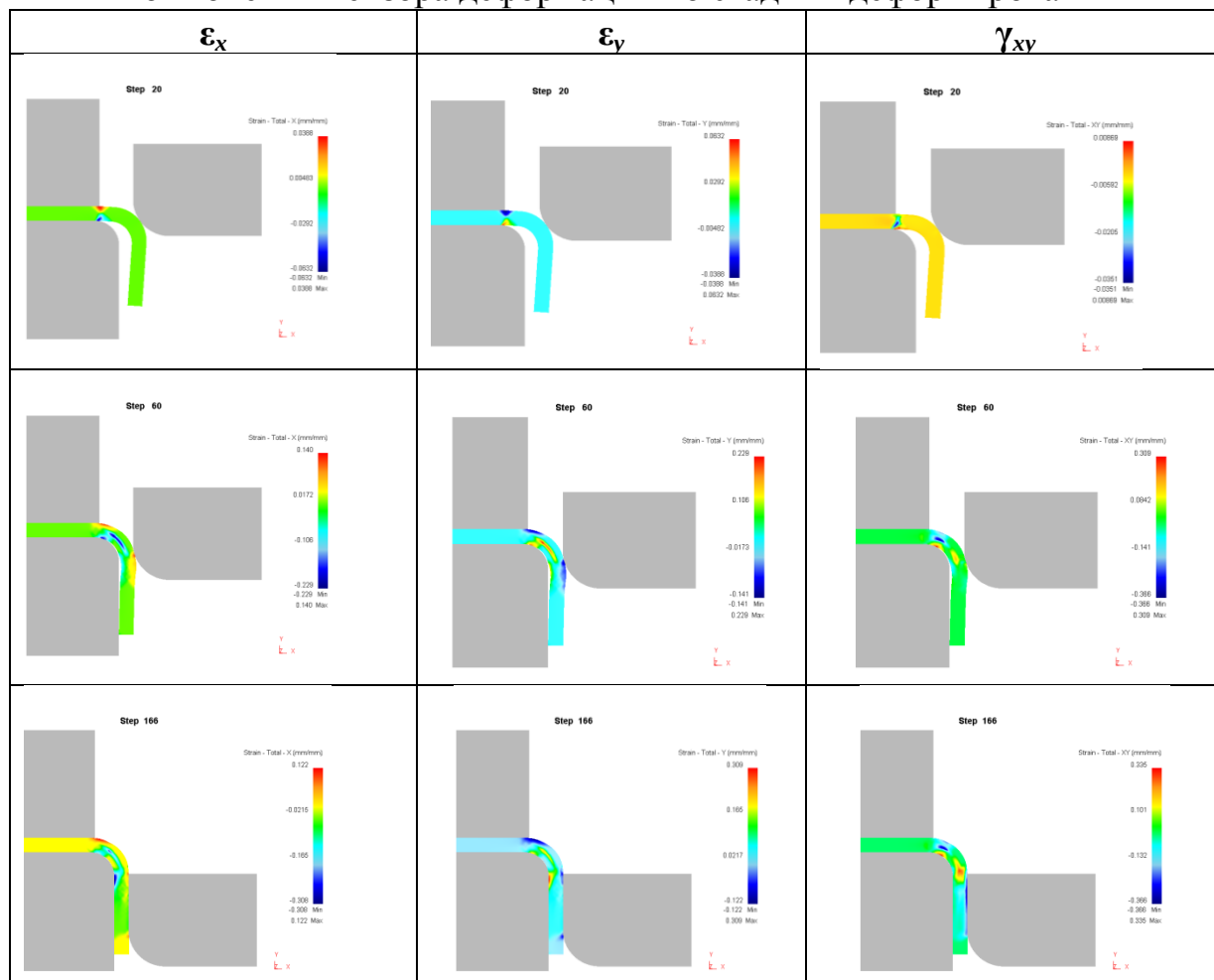
Касательные напряжения	Максимальное главное растягивающее напряжение	Интенсивность напряжений
τ_{xy}	σ_1^{max}	σ_i
Step 20  Stress - XY (MPa) 126 28.5 -89.7 -186 -186 Min 126 Max	Step 20  Stress - Max principal (MPa) 507 81.1 -345 -771 -771 Min 507 Max	Step 20  Stress - Effective (MPa) 947 565 282 0.000 0.000 Min 947 Max
Step 60  Stress - XY (MPa) 353 96.6 -180 -416 -416 Min 353 Max	Step 60  Stress - Max principal (MPa) 886 200 -467 -1130 -1130 Min 886 Max	Step 60  Stress - Effective (MPa) 947 565 282 0.000 0.000 Min 947 Max
Step 166  Stress - XY (MPa) 428 181 -124 -397 -397 Min 428 Max	Step 166  Stress - Max principal (MPa) 760 250 -259 -769 -769 Min 760 Max	Step 166  Stress - Effective (MPa) 823 565 278 0.000 0.000 Min 823 Max

Таблица 3

Компоненты тензора деформаций по стадиям деформирования



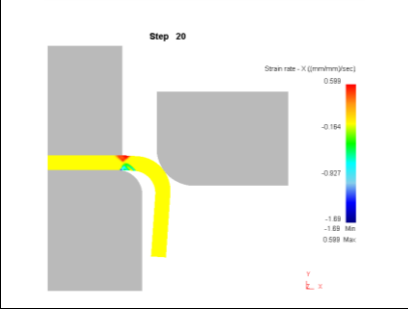
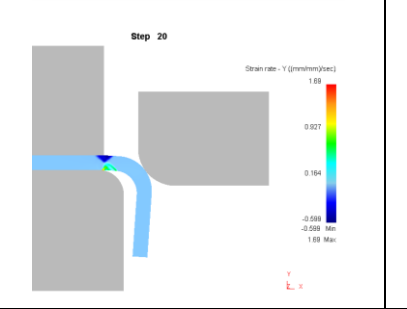
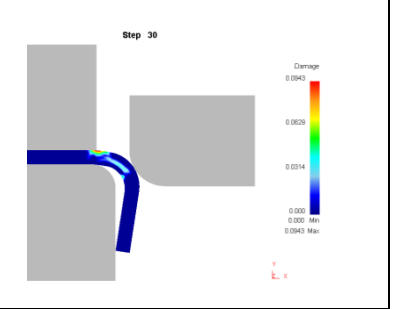
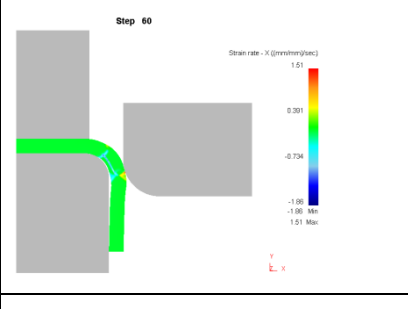
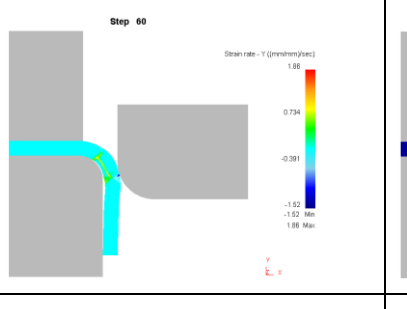
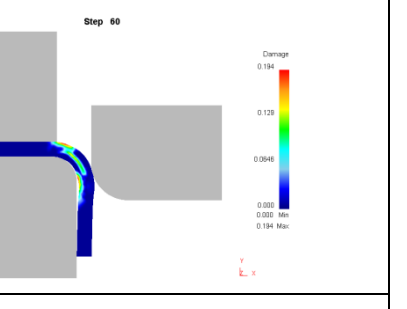
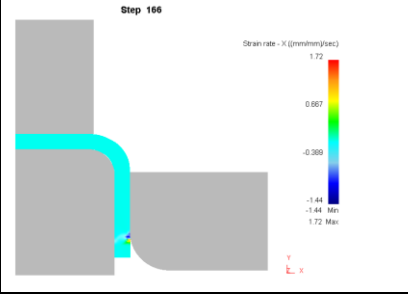
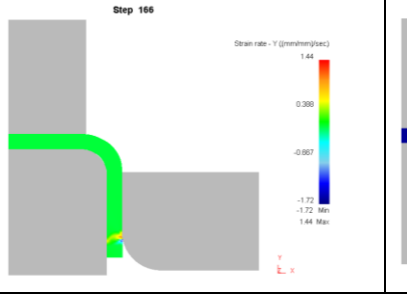
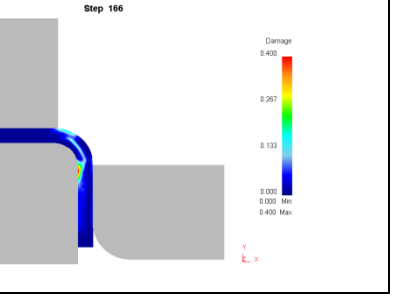
Специфика процесса гибки ограниченного по длине (координата z) конечного участка балки в виде гнутого швеллера заключается в том, что на начальной стадии деформирования, гибка производится по свободной схеме при контакте заготовки только с одним инструментом, а именно с матрицей. Стадия свободного изгиба сопровождается ростом силы (таблица 5) на ходе матрицы 14 мм и, по достижении интенсивностью напряжений предела текучести материала, наблюдается рост нагрузки. При ходе матрицы 26 мм сила достигает максимального значения 3,78 кН, затем силовые параметры снижаются до значения 3,45 кН и до конца рабочего хода практически не изменяются. В этот момент радиусная часть пуансона будет полностью охвачена металлом заготовки, а полка сечения балки займет вертикальное положение, хотя и не полностью будет прилегать к пуансону. При дальнейшем ходе матрицы вниз деформация полок будет отсутствовать, а движению матрицы на этой стадии препятствуют только силы трения. Протекающая деформация в локальных зонах сечения балки немонотонна.

Поскольку очаг деформации в сечении балки локализуется вблизи радиусного участка пуансона, то наибольшие компоненты тензоров

напряжений и деформаций проявляются в локальной зоне на радиусном участке постоянной кривизны.

Таблица 4

Моделирование параметров гибки

Скорость деформаций		Исчерпание ресурса пластичности
$\dot{\varepsilon}_x$	$\dot{\varepsilon}_y$	Критерий Кокрофта - Латама
		
		
		

Изменение температуры по сечению детали в начале и конце гибки представлено в таблице 5, здесь же приводится график изменения силовых параметров гибки концевой участка балки на ограниченной длине.

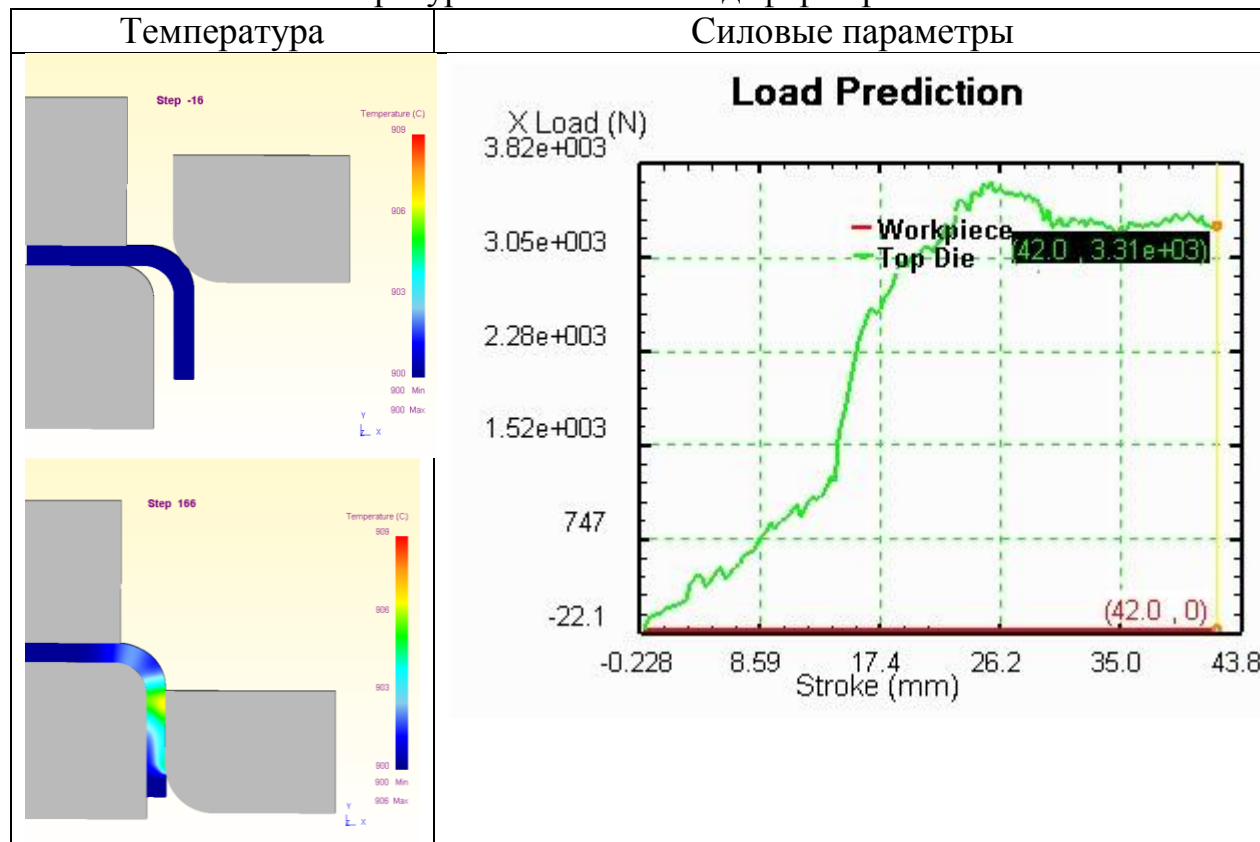
Параметры пружинения после гибки в штампе. Отклонение формы детали после выполнения гибочных работ predetermined незамкнутостью контура получаемых изделий и спецификой напряженно-деформированного состояния материала в конце гибки, что связано с неизбежностью снятия упругой составляющей деформации. При постоянстве кривизны получаемого радиусного участка концевой элемента изгибаемой балки привлечем теорему о разгрузке, сформулированную А.А. Ильюшиным [15], что позволяет воспользоваться уравнениями упругого чистого изгиба, возникающего при нагружении заготовки изгибающим моментом $M_{и}$. Величина момента должна быть такой, чтобы в конце гибки получить

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России

переходный участок от стенки к полке швеллера с заданным радиусом кривизны.

Таблица 5

Температурное поле и сила деформирования



При разгрузке согнутого участка детали ограниченной длины в общем случае изменяются радиус и угол гибки. Опираясь на опытные данные [8, 11] в части несущественного изменения радиуса гибки в условиях полугорячей деформации, будем определять только величину угла пружинения $\Delta\alpha$ изгибаемого локального участка балки, для чего воспользуемся методом О. Мора с моделью изгибаемого бруса с заделкой, приложив к его свободному концу единичный момент M' [16]:

$$\Delta\alpha = \int_0^l \frac{M_{\text{и}} M'}{EJ} dl,$$

очевидно, что дифференциал длины дуги $dl = \rho_{\text{н}} d\alpha$ и $M' = 1$, тогда

$$\Delta\alpha = \frac{M_{\text{и}}}{EJ} \rho_{\text{н}} \alpha, \quad (1)$$

где J – момент инерции сечения с учетом его кривизны, причем $\frac{1}{J} + \frac{1}{J'} + \frac{1}{F\rho_{\text{н}}^2}$;

$$J' = \int_F \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}} + y} y^2 dF;$$

F – площадь сечения изгибаемого участка заготовки;

ρ_n – радиус нейтрального слоя при упругом изгибе бруса большой кривизны.

Если положить $\frac{1}{j} = \lambda \frac{1}{j'}$, $M_n = mW\sigma_b$, $\rho_n = R_b + xs$, то для полки заготовки прямоугольного сечения уравнение для определения угла пружинения приобретет вид:

$$\Delta\alpha = 2\lambda m(r_b + x) \frac{\sigma_b}{E} \arcsin \frac{a}{a + \gamma}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала заготовки при температуре обработки;

x – коэффициент, определяющий положение нейтрального слоя при упругом изгибе бруса большой кривизны; $a = 1 + r_m + r_n$; $\gamma = \frac{z}{s} - 1$; $r_n = \frac{R_n}{s}$; $r_m = \frac{R_m}{s}$.

В данном случае зазор между инструментом $z=s$, тогда значение $\gamma=0$, а угол гибки $\alpha = \frac{\pi}{2}$, т.е. формула для определения угла пружинения переписывается

$$\Delta\alpha = \pi\lambda m(r_b + x) \frac{\sigma_b}{E}, \quad (3)$$

С учетом аппроксимации кривой упрочнения степенной функцией и объемной схемы напряженного состояния [9] в очаге деформации относительный изгибающий момент может быть вычислен:

$$m = \beta \frac{3}{2+n} \eta^2 \frac{\sigma_{in}}{\sigma_b}, \quad (4)$$

где β – коэффициент, учитывающий вид напряженно-деформированного состояния при гибке широких полос;

η – коэффициент утонения;

σ_{in} – интенсивность напряжений в наружных волокнах заготовки;

$$n = \frac{\lg \frac{\sigma_{ш}}{\sigma_{02}}}{\lg \frac{\varepsilon_{ш}}{\varepsilon_{02}}}, \quad (5)$$

n – показатель деформационного упрочнения.

Принимая упомянутые выше допущения, выражение (4) может быть преобразовано к виду:

$$m = C\eta^2\varepsilon_{\theta n}^n, \quad (6)$$

где

$$C = 3 \frac{1 + \delta_b}{2 + n} \beta \left(\frac{\beta}{\varepsilon_{ш}} \right)^n, \quad (7)$$

δ_b – относительное удлинение при испытании образца на растяжение в момент образования шейки;

$\varepsilon_{ш}$ – истинная (логарифмическая) деформация в момент образования шейки;

$\varepsilon_{\theta n}$ – истинная тангенциальная деформация наружных волокон.

Перечисленные показатели принимаются в соответствии с заданной температурой нагрева металла заготовки.

Из допущения равенства радиусов нейтральных слоев напряжений и деформаций, получим:

$$\varepsilon_{\theta_n} = \ln \sqrt{\frac{r_B + \eta}{r_B}}. \quad (8)$$

Пример расчета угла пружинения при гибке концевых участков балки. В таблицу 6 занесены данные по механическим характеристикам стали 09Г2Д при температуре 900 °С согласно действующему стандарту [6] и известными из справочной литературы [17].

Таблица 6

Свойства стали 09Г2Д при температуре деформации 900 °С

Параметр	σ_{02}	$\sigma_{ш}$	σ_b	E	δ_b	ψ
Ед. изм.	МПа				%	
Значение	66	69	75	$1,3 \times 10^4$	41	95

На основе опытных данных независимых исследователей [8, 11, 16], составлена таблица 7 коэффициентов для расчета параметров гибки.

Таблица 7

Значения коэффициентов

Коэффициент	μ	λ	β	n	η	x	m
Значение	0,5	0,995	1,15	0,66	0,99	0,472	1,9
Источник, формула	[7, 10]	[10, 16]	[16]	(5)	[11]	[16]	[16]

Для рассматриваемого случая гибки концевой участка балки размеры балки – из чертежа (см. рисунок 2); относительный внутренний радиус гибки $r_B=r_n=2,4$; относительный радиус матрицы $r_m= 4,0$; ширина пуансона $B_n=158$ мм; размер матрицы $L_m=168$ мм; расстояние между полками балки по нейтральному слою $l=163$ мм.

Как видно из формулы (3) на величину угла пружинения оказывают влияние относительный изгибающий момент m , относительный радиус пуансона r_n , коэффициент смещения нейтрального слоя деформации x и механические характеристики материала заготовки.

Для рассматриваемого случая гибки концевых участков балки в условиях полугорячей деформации угол пружинения, полученный расчетом по зависимости (3) составил $\Delta\alpha=0,4329$ градуса, что практически не оказывает влияния на изменение геометрических параметров сечения изготавливаемой балки после снятия упругой составляющей деформации.

Проведенное компьютерное моделирование и полученные параметры легли в основу разработки технологического процесса гибки, оформленного патентом РФ на изобретение [18]. Технология гибки реализуется с помощью универсально-переналаживаемого штампа (рисунок 3) [19], на конструкцию которого получен патент РФ на изобретение [20].



а)



б)

Рисунок 3. Штамп (а) для гибки концевых участков балок (б)

Вывод. Проведенный анализ операции гибки концевых участков балки ограниченной длины в условиях полугорячей деформации позволил оценить температурное и напряженно-деформированное состояние металла заготовки, рассчитать необходимую силу деформирования, зависящую от геометрических параметров заготовки и инструмента, оценить исчерпание ресурса пластичности по стадиям деформирования, а также рассчитать параметр пружинения. Отличительной особенностью операции гибки является то, что положение полок швеллера в начале гибки и в конце операции определяется углом 90° между стенкой швеллера и его полками. В момент касания матрицей заготовки полки поворачиваются на угол меньше 90° , а дальше выпрямляются, примыкая к пуансону, по мере движения матрицы вниз. Уменьшается размер стенки до значения $(h-2s)$, увеличивается радиус между полками и стенкой со значения 9 мм до 12 мм. При этом формирование радиусной части изгибаемого участка, заканчивается, когда очаг деформации локализуется вблизи закругленной кромки пуансона.

Список литературы

1. Пигунов, В.В. Конструкция, теория и расчет вагонов: учеб. пособие. В 2-х частях. Ч.1/ В.В. Пигунов, А.В. Пигунов. – Гомель: Бел ГУТ, 2020. – 303 с.
2. Вагоны. Под ред. Л.Д. Кузмича. – М.: Машиностроение, 1978. – 376 с.
3. ГОСТ 8278-83 «Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент». – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 16 с.
4. ГОСТ 11474-76 «Профили стальные гнутые. Технические условия». – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 7 с.
5. ГОСТ 19281 – 2014 «Прокат повышенной прочности. Общие технические условия». – М.: Стандартиформ, 2021. – 69 с.

6. ГОСТ 19282-73 «Сталь низколегированная толстолистовая и широкополосная универсальная». – М.: Государственный комитет по стандартам, 1973. – 30 с.
7. Ильин, Л.Н. Технология листовой штамповки: учебник для вузов/ Л.Н. Ильин, И.Е. Семенов. – М.: Дрофа, 2009. – 475 с.
8. Горбунов, М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов / М.Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1981.– 224 с.
9. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением/ М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
10. Сосенушкин, Е.Н. Математическая модель напряженного состояния и силовых параметров гибки концевых участков балок / Е.Н. Сосенушкин, В.В. Белокопытов, Е.А. Яновская и др. / Международная научно-практическая конференция «Перспективные машиностроительные технологии АЕТ 2022». 21-25 ноября 2022.– Санкт-Петербург, 2023.– С. 311-318.
11. Мошнин, Е.Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах/ Е.Н. Мошнин. – М.: Машгиз, 1959. – 360 с.
12. Сосенушкин, Е.Н. Технологические процессы штамповки изделий из толстостенных труб/ Е.Н. Сосенушкин, В.В. Третьюхин, Е.А. Яновская// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2013. №2. – С.25 – 29.
13. Сосенушкин, Е.Н., Яновская Е.А. Пластическое течение в тонком слое: теория, математические модели, анализ решений и их приложения/ Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская. – М.: Янус-К, 2023.– 208 с.
14. Паршин, В.С. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D : учебное пособие / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, Ю.Б. Чечулин.– Екатеринбург: УрФУ, 2010.– 265 с.
15. Ильюшин А.А. Труды. Т.1 (1935-1945)/ Составители Е.А. Ильюшина, Н.Р. Короткина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
16. Мещерин, В.Т. Определение угла пружинения при гибке П-образных деталей с учетом влияния зазора между пуансоном и матрицей/ В.Т. Мещерин, Л.Н. Ильин// Кузнечно-штамповочное производство. 1972. №2.– С.16-18.
17. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х томах / Под общей ред. Е.И. Семенова. Т.1: Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. – М.: Машиностроение, 2010. – 717 с.
18. Патент 2746190 Способ обработки концевых участков балки С-образного сечения/ Е.Н. Сосенушкин, В.В. Белокопытов, Е.А. Яновская, А.Е. Сосенушкин. Оpubл. 08.04.2021. Бюл. №10.
19. Сосенушкин, Е.Н. Штамповая оснастка для пластического деформирования концевых участков балок в вагоностроении / Е.Н. Сосенушкин, В.В. Белокопытов, Е.А. Яновская и др.// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып.5. 2023.– С.391-397.
20. Патент 2746193 Штамп для обработки концевых участков балки П-образного сечения/ Е.Н. Сосенушкин, В.В. Белокопытов, Е.А. Яновская, А.Е. Сосенушкин. Оpubл. 08.04.2021. Бюл. №10.

Секция 3

Подготовка производства

УДК 621.914

КОНЦЕПЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО УЧАСТКА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ СБОРКЕ

Астапов В.Ю.¹, Бушуев М.А.²

1 – к.т.н., доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

2 – магистрант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

Аннотация. Приведены общие сведения о роботизированном фрезеровании, основные параметры промышленных роботов и их жесткости и калибровки. Рассмотрены 3 готовых решения применения роботизированного фрезерования: комплекс на базе стационарных роботов, порталный роботизированный комплекс, роботизированная ячейка на рельсе.

Проведен технологический анализ кронштейнов фюзеляжа самолета. Также проведен анализ технологического процесса сборки фюзеляжа самолета и представлены сведения об использовании лазерных измерительных инструментах в процессе сборки. Разрабатывается концепция комплекса роботизированного фрезерования, для этого приводятся технические требования к промышленному комплексу и оборудованию, с проведение подбора оборудования. Определена итоговая сборка промышленного комплекса и его основные параметры, разработан технологический процесс фрезерования на роботизированном комплексе.

Ключевые слова: заготовка, фрезерная обработка, управляющая программа, роботизированный комплекс, промышленное оборудование.

THE CONCEPT OF A ROBOTIC SECTION FOR MILLING AIRCRAFT COMPONENTS DURING ASSEMBLY

Astapov V.Yu.¹, Bushuev M.A.²

1 – PhD, associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

2 – magistant, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

Abstract. It provides general information about robotic milling, the main parameters of industrial robots and their rigidity and calibration. 3 ready-made solutions for the use of robotic milling are considered: a complex based on stationary robots, a portal robotic complex, and a robotic cell on a rail. A technological analysis of the aircraft fuselage brackets has been carried out. The analysis of the technological process of assembling the fuselage of the aircraft is also carried out and information on the use of laser measuring instruments in the assembly process is presented. The concept of a complex of robotic milling is being developed, for this purpose the technical requirements for the industrial complex and equipment are given, with the selection of equipment. The final assembly of the industrial complex and its main parameters have been determined, and the technological process of milling on a robotic complex has been developed.

Key words: billet, milling, control program, robotic complex, industrial equipment.

Роботизированное фрезерование – это технология, которая позволяет значительно повысить эффективность производства и снизить затраты на рабочую силу. Применение промышленных роботов в этой сфере уже сегодня дает возможность производить высококачественную продукцию, сократить время ее изготовления, а также снизить риск ошибок и повысить точность обработки деталей [1]. Роботизированное фрезерование является

важным составляющим интеллектуального производства. С развитием промышленных роботов, технологий обработки, измерения силы и машинного обучения, роботизированное фрезерование постепенно заняло определенную область промышленности и продемонстрировало сильный импульс развития.

Интеллектуальная роботизированная система обработки, которую использует промышленный робот, многопоточные датчики (такие как зрение, сила и вибрация) в качестве системы восприятия, машинное обучение и интеллектуальная облачная платформа в качестве системы принятия решений, может выполнять антропоморфные производственные задачи.

Одним из главных преимуществ роботизированного фрезерования является возможность создания более сложных и точных деталей, которые ранее были недоступны для производства вручную. Кроме того, промышленные роботы могут работать круглосуточно без прерываний на отдых, что позволяет существенно ускорить производственные процессы и повысить производительность. Роботизированное фрезерование также позволяет снизить риск травм и увеличить безопасность на производстве. Роботы не подвержены усталости и не нуждаются в перерывах на отдых, что снижает вероятность ошибок и повышает точность обработки деталей. В свою очередь, роботизированное фрезерование может привести к сокращению рабочих мест, поскольку для обслуживания промышленных роботов нужны специалисты с высокой квалификацией [2,3].

При выборе робота необходимо учитывать максимальное расстояние, на которое он должен дотягиваться для выполнения задач. Максимальный вертикальный вылет робота измеряется от самой низкой точки, которую робот может достичь, до максимальной высоты. Максимальный горизонтальный вылет определяется расстоянием от центра основания робота до самой дальней точки, которую манипулятор может достичь горизонтально. Также стоит обратить внимание на рабочий угловой диапазон, выраженный в градусах.

Повторяемость и точность робота определяют его способность достигать одинакового положения каждый раз, когда он выполняет одну и ту же процедуру. Если робот необходим для создания электронной печатной платы, то нужен робот с высокой степенью повторяемости и точности. Если задача довольно грубая, например укладка паллет, то нет смысла переплачивать за высокую точность.

Масса робота является важным фактором при разработке роботизированных систем. Не только опора, но и другие компоненты робота, такие как моторы, передачи и соединения, должны быть спроектированы с учетом массы робота. Большой вес робота может привести к перегрузке этих компонентов и повреждению оборудования. Также важно учитывать максимальный вес, который робот может перемещать. Это позволит избежать повреждения робота или перемещаемого объекта, а также обеспечить безопасность операторов и окружающей среды.

Промышленные роботы имеют конструктивные особенности, которые определяются их функциональными и эксплуатационными характеристиками. Важнейшими из них являются: рабочая зона, которая определяет пространство, в котором робот может выполнять задачи; манипулятивность, которая определяет количество и тип манипуляторов, необходимых для выполнения задачи; коэффициент сервиса, который показывает, как много времени робот может работать без поломок; и нагрузочная способность, которая определяет максимальный вес, который робот может поднимать или перемещать. При выборе промышленного робота необходимо учитывать все эти характеристики и подбирать робота, который наилучшим образом подходит для выполнения конкретной задач [4].

При выборе промышленных роботов для роботизированного фрезерования необходимо учитывать несколько ключевых факторов. В первую очередь, это мощность и скорость робота, которые должны соответствовать требуемой производительности. Также необходимо учитывать размеры и грузоподъемность робота, чтобы он мог обрабатывать необходимые детали. Важным параметром является точность и повторяемость движений робота, которые должны быть достаточно высокими для обеспечения качественной обработки деталей. Кроме того, следует учитывать возможность применения дополнительных инструментов и систем автоматизации процесса обработки. Наконец, не менее важно учитывать стоимость робота и его эксплуатационные расходы, включая затраты на обслуживание и ремонт. В целом, оптимальный выбор промышленных роботов для роботизированного фрезерования зависит от конкретных требований производства и доступного бюджета.

Важным фактором является также программируемость робота и возможность его интеграции с другими системами автоматизации производства. Также стоит учесть надежность и долговечность робота, а также наличие сервисной поддержки со стороны производителя. В итоге, выбор подходящего робота для роботизированного фрезерования зависит от многих факторов, и требует внимательного анализа и оценки всех необходимых параметров и характеристик. Рассмотрим существующие и работающие роботы, которые используются для роботизированного комплекса. Рассматриваются промышленные комплексы, которые применяют для роботизированного фрезерования.

Базирование заготовок является важной процедурой, которая позволяет установить деталь в определенном положении относительно выбранной координатной системы. Это достигается путем закрепления заготовки на столе токарного или фрезерного станка с использованием специальных установочных приборов. После закрепления заготовка становится стабильной в трехмерном пространстве, ограничивая ее движение по осям абсцисс, ординат и аппликата. Таким образом, заготовка фиксируется в выбранной координатной системе. Базирование выполняется с целью повышения точности обработки и изготовления детали

Калибровка промышленных роботов может осуществляться с помощью лазерных трекеров. Лазерные трекаеры – отличный способ откалибровать робота и повысить его точность. Частная проблема большинства роботов – это потеря точности после работы, что существенно снижает повторяемость. Большинство промышленных роботов сконструированы так, чтобы обладать высокой повторяемостью. Очевидно, что это хорошо — это означает, что робот всегда будет занимать одно и то же положение при каждом запуске своей программы.

Промышленная роботизированная ячейка применяется в авиационной промышленности, а значит должна соответствовать все необходимым требованиям в данной промышленности.

Для работы комплекса необходимо данное оборудование:

1. Промышленный робот
2. Линейная платформа
3. Гидравлический подъемник
4. Платформа вращения
5. Стойки
6. Шпиндель
7. Сменный патронник (комплект с инструментом)
8. Лазерный трекер
9. Универсальная базовая система управления

Для дальнейшего определения требований и подбора оборудования была разработана концепция роботизированного комплекса для фрезерной обработки, представленная на рисунке 1.



Рис. 1 – Концепция роботизированного комплекса для фрезерной обработки

Промышленная роботизированная ячейка для фрезерной обработки должна соответствовать разработанной концепции и всем требованиям, чтобы обеспечить эффективное и безопасное выполнение задач по обработке

крупногабаритных изделий. Основные требования к фрезерной обработке в авиационной промышленности могут быть следующими:

1. Высокая точность: фрезерование должно происходить с высокой точностью, чтобы гарантировать соответствие деталей заданным параметрам. Это особенно важно для авиационной промышленности, где детали должны быть точно изготовлены, чтобы обеспечить безопасность и надежность полетов.
2. Качество поверхности: фрезерование должно обеспечивать гладкую поверхность детали без неровностей и дефектов, что может повлиять на ее прочность и долговечность.
3. Стабильность и надежность: оборудование должно быть стабильным и надежным, чтобы избежать возможных аварий и сбоев в процессе фрезерования.
4. Высокая производительность: для авиационной промышленности, которая работает в условиях жестких сроков и ограничений по времени, важна высокая производительность оборудования.
5. Гибкость и автоматизация: фрезерный комплекс должен иметь возможность работать с различными типами материалов и конфигурациями деталей, а также быть автоматизированным для минимизации необходимого вмешательства оператора.
6. Соответствие стандартам: фрезерование в авиационной промышленности должно соответствовать определенным стандартам, чтобы гарантировать качество и безопасность изготавливаемых деталей.

Кроме того, так как промышленный комплекс рассматривается под обработку кронштейнов фюзеляжа самолета ЛМС-901 «Байкал», он должен иметь соответствующее рабочее пространство. Платформа вращения должна быть минимум 4,8 м, чтобы иметь возможность устанавливать на него крупногабаритный фюзеляж. Линейная платформа должна иметь длину не менее 9 м, что соответствует длине фюзеляжа. Высота робота и высота стоек должна быть такая, чтобы обеспечить удобный подход к фюзеляжу. Также необходимо предусмотреть ход платформы на 0.7 м по оси Z, для обеспечения гибкости работы комплекса.

Рассматриваемый комплекс разработан специально для упрощения процесса сборки фюзеляжа самолета и обработки стыковых отверстий в кронштейнах фюзеляжа. Быстрое и точное выполнение данных задач способствует сокращению времени сборки и улучшению качества продукции.

Промышленный роботизированный комплекс на базе KUKA KR 600 является надежным и высокопроизводительным решением для автоматизации производства в авиационной отрасли. Он способен удовлетворить самые высокие требования к точности и скорости выполнения зада [5-7].

Для базирования фюзеляжа в процессе обработки на промышленном роботизированном комплексе, как правило, применяются лазерные трекеры. Это позволяет создать точную 3D-модель детали и определить ее положение в пространстве, что особенно важно при изготовлении сложных конструкций, таких как фюзеляж самолета.

После проведения анализа требований был произведен подбор оборудования от разных производителей, с учетом минимальной стоимости и удовлетворения всех требований комплекса. В итоге была выбрана сборка, состоящая из робота KUKA KR 600, линейной платформы KUKA KL 4000 (3 секции), гидравлических подъемников HAWE Hydraulik (7 штук), платформы вращения (проектируется в зависимости от необходимых размеров), стоек (проектируются в зависимости от изделия для обработки), шпинделя HITECO S-1 1.5 18 24 ER25, плоского магазина смены инструментов (комплект с инструментами), лазерного трекера Leica AT930 и универсальной базовой системы управления KR C4.

Для упрощения процесса сборки необходимо произвести вне-стапельную обработку кронштейнов фюзеляжа самолета ЛМС-901. Для этого после всех основных операций сборки фюзеляжа самолета, он транспортируется в рабочую зону робота, устанавливается на специальные опоры, которые обеспечивают неподвижность работы и максимальное приближение к условиям полностью собранного фюзеляжа. Сами опоры устанавливаются на платформу, которая может вращаться на 360 градусов. После того как робот завершает обработку кронштейнов, фюзеляж снимается с опор и транспортируется на следующий этап сборки.

Таким образом, разработанный роботизированный комплекс представляет собой универсальное средство для фрезерной обработки, обладающее высокой точностью и производительностью. В сочетании с современным оборудованием, данный комплекс может быть успешно применен в различных отраслях промышленности, где необходима точная и эффективная обработка деталей из металлов и сплавов. Использование роботизированного комплекса позволяет существенно снизить затраты на производственный процесс, так как его использование позволяет увеличить производительность и точность обработки, а также сократить количество брака и ошибок. Данный промышленный комплекс может быть использован для решения различных второстепенных задач на производстве, благодаря своей универсальности и гибкости. Это позволяет использовать комплекс в максимально широком диапазоне задач, что делает его еще более привлекательным для инвесторов и потенциальных покупателей.

Список литературы

- [1] Василенко, Н. В. Основы робототехники: учеб. пособие / Н. В. Василенко [и др.]. – Томск: РАСКО, 1993. – 473 с.
- [2] Erik Wernholt, M^oans Ostring Modeling and Control of a Bending Backwards

Industrial Robot. – Department of Electrical Engineering Linköping universitet, 19th May 2003

[3] Е.И. Щурова Расчетное и экспериментальное определение жесткости манипуляционных роботов, применяемых для операций сверления. – Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2021

[4] Исследование характеристик робота-манипулятора [Электронный ресурс]: электрон. метод. пособие / М-во образования России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им.С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. В.Н. Илюхин, М.Д. Рыбальченко, П.И. Грешняков – Электрон. текстовые и граф. дан. (6,3 Мбайт). – Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM)

[5] KR 500 FORTEC: How robots can revolutionize architecture and timber construction // KUKA URL: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-500-fortec> (дата обращения: 13.12.2023).

[6] Производственные роботы-манипуляторы KUKA – немецкое качество // Vektorus URL: <https://vektorus.ru/blog/obzory/robot-manipulyator-kuka.html> (дата обращения: 13.12.2023).

[7] Роботизированный комплекс для механической обработки изделий // Альфа Интех URL: https://www.alpha-intech.com/our_projects/realizovannye-proekty/robotizirovannyy-kompleks-dlya-frezerovki-amg/ (дата обращения: 09.12.2023).

УДК 621.98., 620.178.3:620.194.8

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Галкин В.В.

к.т.н., доцент каф. «Машиностроительные технологические комплексы»

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

Аннотация. Рассмотрены способы построения температурно-скоростных зависимостей предельной деформации листовых металлических материалов. Приведены сведения конструкции устройства для испытания, позволившие построить зависимости тонколистовых титановых сплавов OT4-1 и VT6C для интервала температур $(20 \div 1200)^\circ\text{C}$ и скоростей деформации $(10^{-1} \div 10^{-3}) \text{ c}^{-1}$.

Ключевые слова: тонколистовые металлические материалы, температурно-скоростные зависимости предельной деформации, способы построения.

ON THE ISSUE OF CONSTRUCTING TEMPERATURE-VELOCITY DEPENDENCES OF THE ULTIMATE DEFORMATION OF SHEET METAL MATERIALS

Galkin V.V.

candidate of technical sciences, associate professor of the faculty "Machine-building technological complexes"

NSTU named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod

Annotation. The article considers methods for constructing temperature-velocity dependences of the ultimate deformation of sheet metal materials. The information on the design of the testing device is given, which made it possible to construct the dependences of thin-sheet titanium alloys OT4-1 and VT6C for the temperature range $(20 \div 1200)^\circ\text{C}$ and deformation rates $(10^{-1} \div 10^{-3}) \text{ c}^{-1}$.

Keywords: thin-sheet metal materials, temperature-velocity dependences of the ultimate deformation, methods of construction.

В узлах машиностроительных изделий различного назначения, в частности летательных аппаратов, широкое применение имеют листовые панели с элементами жесткости (рифтами), имеющими различную форму поперечного сечения: синусоидальную, трапециидальную, прямоугольную и др. Основной операцией выполнение рифтов в листовых заготовках является формовка. В отличие от операции вытяжки, формообразование рифтов осуществляется за счет утонения материала, а схема напряженного состояния материала в зоне деформации близка к схеме двухосного растяжения [1].

За прошедшее время технологический опыт отечественного и зарубежного изготовления листовых гофрированных панелей позволил определить основные виды применяемых технологических процессов в зависимости от марки штампуемых материалов и требований, предъявляемых к утонению материала в зоне рифтов.

Высокопрочные нержавеющие стали типа 12X17Г9АН4 (ЭИ-878) штампуются в холодном состоянии на форм-блоках эластичной средой на специализированных гидравлических прессах и с нагревом в металлических

штампах на листоштамповочных молотах; титановые сплавы ОТ4-1, ВТ6С штампуются с нагревом на листоштамповочных молотах и применением специализированных процессов деформирования, в частности, с использованием нагреваемой керамической оснастки. Допустимое утонение материала в зоне рифтов указывается в конструкторской документации заказчика.

Несмотря на большой производственный и технологический опыт в изготовлении изделий из листовых металлических материалов с нагревом имеются проблемы, которые не позволяют в полной мере оптимизировать их производство. Это касается отсутствие температурно-скоростных зависимостей предельной деформации деформированных металлических листовых материалов в интервале температур $(20 \div 1200) ^\circ\text{C}$, скоростей деформации $(10^{-1} \div 10^{-3}) \text{ c}^{-1}$ и жестких схем напряженного состояния $\Pi = 1 \div 2$ [1,2]. Причиной отсутствия данной информации является недостаточное совершенство способа испытания листового металлического материала на двухосное растяжение в интервале температур горячей пластической деформации методом выпучивания. При этом следует отметить, что одноосное растяжения, проводимое в соответствии с ГОСТ 9651, не позволяет в полной мере оценить значение предельной деформации листовых металлических материалов.

Для оценки пластичности листового материала при двухосном растяжении при комнатной температуре в наибольшей степени подходит испытание, при котором образец в виде круглой заготовки перед испытанием жестко зажимается по контуру, и выдавливается под действием одностороннего гидростатического или пневматического давления в круглую матрицу до разрыва [1]. На поверхности образца, для исключения проскальзывания, выполняются плавные кольцевые зиги для его плотного защемления (рисунок 1). К недостаткам способа относятся невозможность проведения испытаний при высоких температурах, а также выдавливания образцов с большими степенями деформации, так как форма мембраны при выпучивании не может превышать контур полусферы.

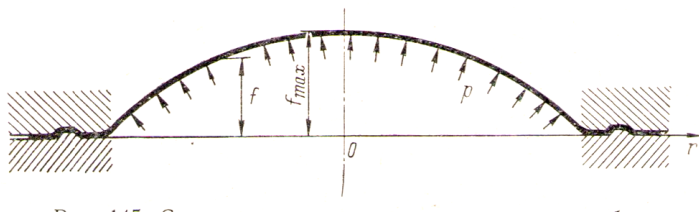


Рис. 1. Схема гидростатического выдавливания мембраны

Как показала практика, способы испытания плоских листовых образцов на двухосное растяжение методом выпучивания при повышенных и высоких температурах имеют технологические и конструктивные особенности, заключающиеся в том, что деформирование листового образца выполняется через промежуточное рабочее тело.

По одному из способов образец испытывается по схеме изгиба круглой пластинки, жестко закрепленной по контуру, равномерно распределенной нагрузкой с помощью нагружающего устройства. В качестве рабочего тела, передающего давление, применяется жидкая гидропластмасса, обладающая высокой вязкостью и достаточной перетекаемостью [3]. Существенным недостатком способа является ограничение температурных условий деформирования.

Известно испытание, в котором образец размещается в матрице штампа и разогревается электро-контактным способом, а в качестве рабочего тела используется сыпучий, неэлектропроводный материал [4]. Наряду с достоинствами: простотой испытания и максимально возможным диапазоном температур деформирования, способ имеет недостатки. Давление, передаваемое на образец рабочим телом, не соответствует равностороннему равномерному давлению, которое создает жидкость при гидростатическом выдавливании.

Наиболее технологичным для деформирования листового материала в условиях высоких температур является способ (рисунок 2) [5], при котором образец 5 размещается в устройстве (автономном узле), состоящем из: матрицы 2 с рабочим отверстием 1; втулки 6, между которыми размещаются образец 5 и чашеобразная мембрана 3 с рабочей средой 4. Втулка 6 по поверхности контакта с матрицей 2 имеет кольцеобразный зиг 7.

После сборки автономный узел помещается в температурную камеру испытательной машины. При испытании на мембрану 3 воздействует вкладыш 9, который через сыпучую помещенную рабочую среду 4, выдавливает образец 5 в рабочее отверстие 1 матрицы 2.

К недостаткам способа относится несоответствие давления, передаваемого на образец 5 рабочей средой 4, давлению при гидростатическом выдавливании, и как следствие невысокие возможные степени деформации.

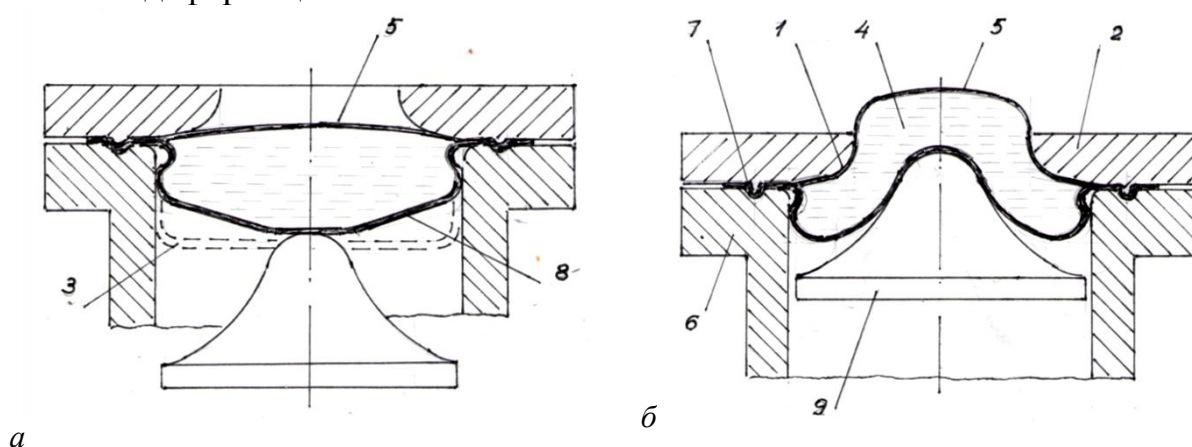


Рис. 2. Схема расположения образца и инструмента в устройстве при испытании в исходном (а) и конечном положении (б): 1 – рабочее окно матрицы; 2 – матрица; 3 – мембрана; 4 – рабочая среда; 5 – образец; 6 – втулка; 7 – кольцеобразный зиг; 8 – усеченный конус мембраны; 9 – вкладыш

Усовершенствование конструкции устройства, с возможностью увеличения формоизменения выдавливаемого образца в интервале температур $(20 \div 1200)^\circ\text{C}$ и скоростей деформации $(10^{-1} \div 10^{-3})\text{c}^{-1}$, была достигнуто за счет изменения геометрии рабочего окна 1 матрицы 2 и введения операции подформовки чашеобразной мембраны 3 перед нагружением [6]:

- поверхность рабочего окна 1 выполнено в виде усеченного конуса переходящего в тороидную поверхность на его кромке (рисунок 3);
- мембрана 3 с выпучей рабочей средой 4, образцом 5 и втулкой 6 в собранном состоянии в приспособлении перед выпучиванием обжимается отдельным вкладышем с уменьшением высоты мембраны 3 и изменением ее плоского основания на форму усеченного конуса 8 (рисунок 2 а).

Применительно к измененной геометрии поверхности рабочего окна матрицы 1 была предложена модель линии перемещения контура образца 5 (рисунок 3), основанная на допущениях: при выпучивании листовой образец диаметром D и толщиной a_0 из начального положения принимает форму сферического сегмента радиуса R , переходящего в тороидную поверхность; тороидная поверхность имеет переменную толщину от a_0 до $a_{\text{тек}}$ по меридиану сегмента (рисунок 3).

При испытаниях замеры высоты выдавленных образцов проводились по центру (в полюсе) и на расстоянии $B/2$ от центра. Форма выдавленных образцов, приведенная на рисунке 4, подтвердила предложенную модель линии перемещения их контура.

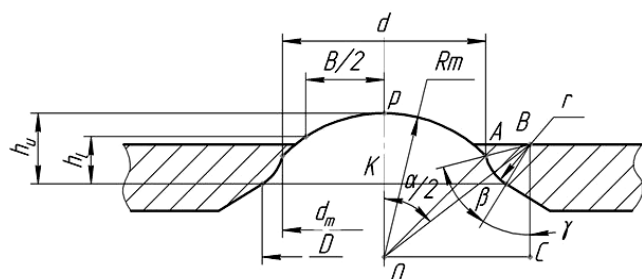


Рис. 3. Геометрия рабочего окна матрицы и форма выпучиваемого образца



Рис. 4. Форма выдавленных образцов из титанового сплава ОТ4-1, л. 0,3

В соответствии с принятой моделью линии перемещения контура выпучиваемых образцов, их толщина по центру (в полюсе) $a_{\text{тек}}$, в зависимости от высоты выдавливания определяется выражением [6]

$$a_{\text{тек}} = a_0 \left\{ \frac{\frac{D^2}{2} - (d_0 + 2r)L + 2r \left[h_{\text{ц}} - R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \right]}{(d + 2r)L - 2r \left[h_{\text{ц}} - R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) + 4R^2 \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \right]} \right\} \quad (1)$$

где a_0 – исходная толщина образца; D – диаметр образца; r – радиус отверстия матрицы; d_0 – диаметр отверстия матрицы; $h_{\text{ц}}$ – высота выпучивания образца по центру; h_1 – высота выпучивания образца на расстоянии $B/2$ от центра; α – угол шарового сегмента; R – радиус кривизны выпученного шарового сегмента образца, определяемый выражением

$$R = \frac{(h_{\text{ц}} - h_1)^2 + b^2}{2(h_{\text{ц}} - h_1)} \quad (2)$$

Угол шарового сегмента α определяется по формуле

$$\alpha = 2 \left(90^\circ - \arctg \frac{r + R - h_{\text{ц}}}{d_0/2 + r} - 2 \arctg \sqrt{\frac{(p - R)(p - K)}{p(p - r)}} \right) \quad (3)$$

$$\text{где } P = \frac{R + r + K}{2}, \quad K = \sqrt{\left(\frac{d}{2} + r\right)^2 + (r + R - h_{\text{ц}})^2}, \quad L = 0,017r\beta, \quad (4)$$

$$\beta = 2 \arctg \sqrt{\frac{(p - r)(p - K)}{p(p - R)}}$$

Сравнение расчетной толщин образцов, определяемых по выражению (1) на момент разрыва, с результатами их замеров на выдавленных образцах показало несоответствие менее 8%, что сопоставимо с точностью расчета степени деформации.

Устройство было разработано для двух видов испытательных машин: универсальной машины для испытаний в условиях сложного напряженного состояния ЦДМУ-30 (рисунок 5) в диапазоне температур $(20 \div 500)^\circ\text{C}$; установке для выдавливания колпачков МТЛ-10Г-1 – для испытаний в диапазоне температур $(20 \div 900)^\circ\text{C}$. Замеры температуры испытываемого образца производились термопарой, спай которой соприкасается непосредственно с образцом в приспособлении. Конструкции устройства на испытательных машинах отличаются друг от друга схемой передачи нагружающей силы на деформирующий вкладыш. В обеих испытательных машинах устройство для испытания помещается в рабочее пространство нагревательных устройств, которые имеют для каждой испытательной машины конструктивные отличия.

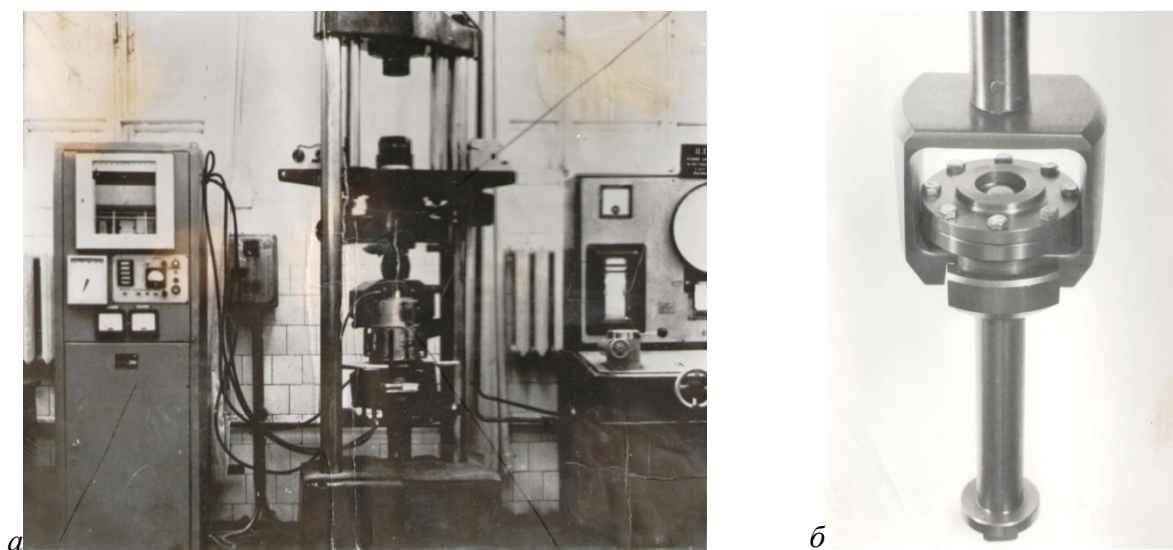


Рис. 5. Испытание листового материала на двухосное растяжение методом выпучивания мембран на испытательной машине ЦДМУ-30:
а – фотография установки; б – фотография приспособления

При испытаниях были заданы скорости движения рабочих органов испытательных машин: $V_1 = 8$ мм/мин; $V_1 = 120$ мм/мин., в соответствие рассчитанным скоростям деформации: $\dot{\epsilon} = 3,4 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; $\dot{\epsilon} = 4,5 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$;

По результатам испытаний построены температурно-скоростные зависимости предельной степени деформации титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ6С при двухосном растяжении (коэффициент жесткости $\Pi=2$) (рисунок 6) [7].

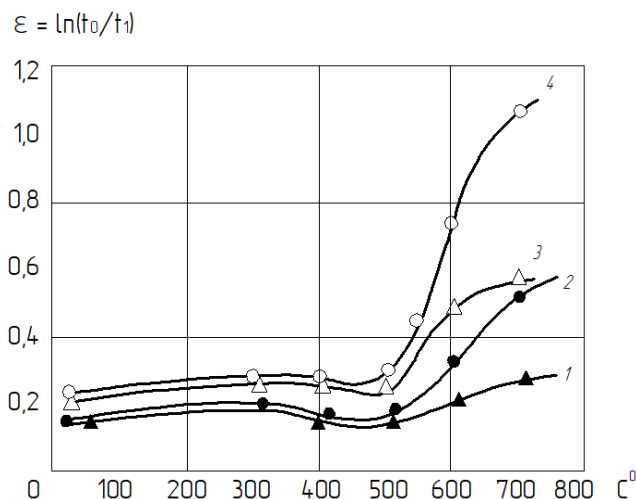


Рис. 6 – Температурные зависимости предельной степени деформации при двухосном растяжении ($\Pi=2$) титановых сплавов ОТ4-1 ($\circ, \triangle$) и ВТ6С ($\bullet, \blacktriangle$) при скоростях деформации:
 $(\circ, \bullet) - \dot{\epsilon} = 3,4 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$;
 $(\bullet, \blacktriangle) - \dot{\epsilon} = 4,5 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$

Для сравнения с двухосным растяжением на рисунке 7 приведены температурно-скоростные зависимости предельной степени деформации титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ6С, полученные при одноосном растяжении (коэффициент жесткости $\Pi=1$)

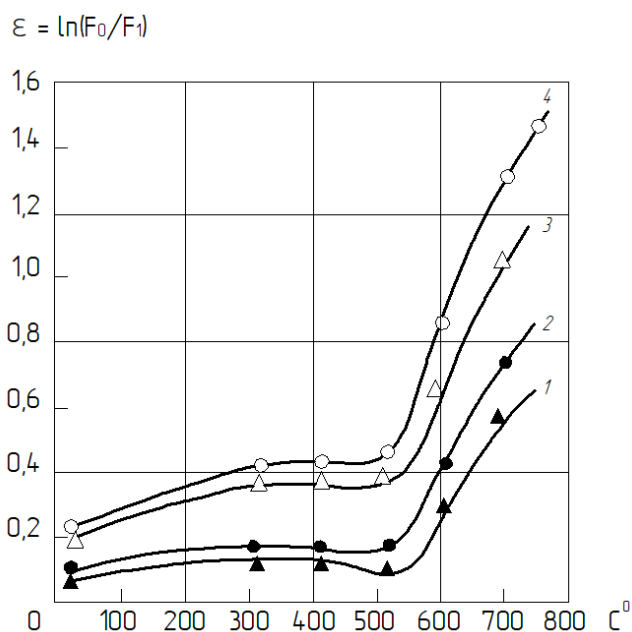


Рис. 7 – Температурные зависимости предельной степени деформации при одноосном растяжении ($\Pi=1$) титановых сплавов ОТ4-1 ($\circ, \triangle$) и ВТ6С ($\bullet, \blacktriangle$) при скоростях деформации:
 $(\circ, \bullet) - \dot{\epsilon} = 3,4 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$;
 $(\bullet, \blacktriangle) - \dot{\epsilon} = 4,5 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$

По результатам сравнения можно отметить, что температурные зависимости предельной деформации титановых сплавов при двухосном

растяжении подобны зависимостям при одноосном растяжении: пластичность незначительно повышается до температуры 400 °С, практически не меняется в интервале температур (400÷500) °С и далее интенсивно возрастает до температур (750÷ 800) °С. При увеличении жесткости напряженного состояния пластичность титановых сплавов понижается при всех температурах и скоростях деформации.

Достоверность построенных температурно-скоростных зависимостей предельной степени деформации титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ6С подтверждена результатами фрактографического анализа, который позволил сделать заключение, что не зависимо от схемы напряженного состояния происходит строго последовательная смена механизмов разрушения, каждому из которых соответствует участок зависимости, отличающийся величиной наклона. При повышении температуры от 20 до 800 °С последовательность изменения механизмов разрушения выглядит следующим образом: для ОТ4-1: квазискл – межзеренное разрушение – ямочный разрыв – разрушение по субструктурным границам; для ВТ6С: квазискл – межзеренное разрушение – ямочный разрыв.

Фрактографии изломов титанового сплава ОТ4-1 при двухосном растяжении, скорости деформации $\dot{\epsilon} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ при температурах °С: *a* – 600, *б* – 700, *в* – 750 приведены на рисунке 8.

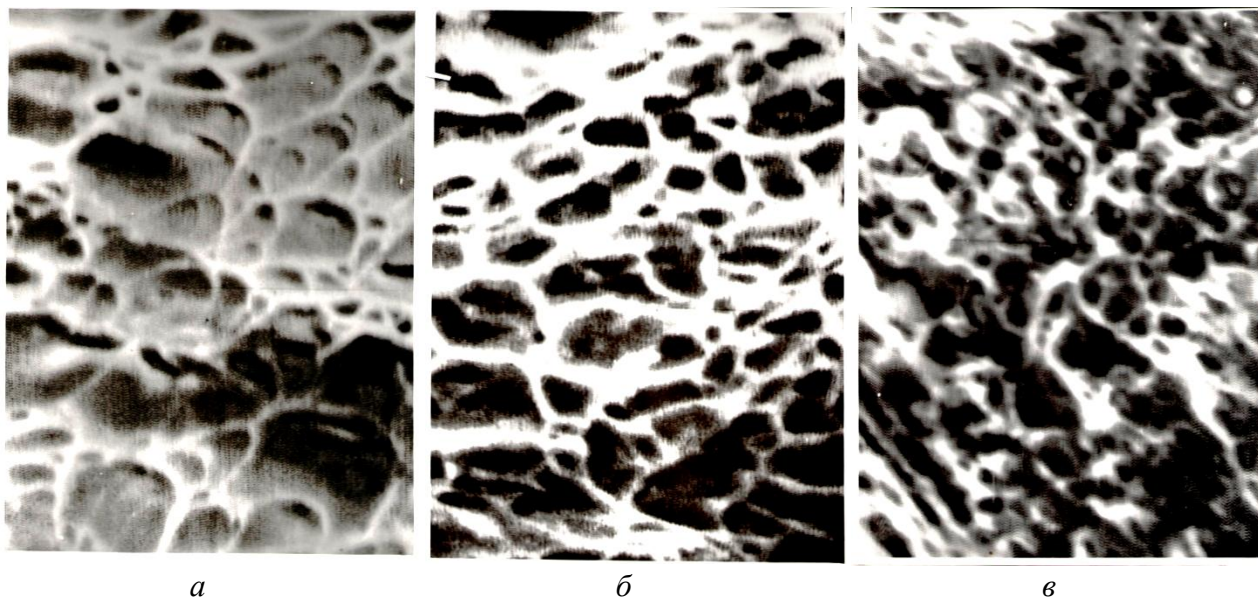


Рис. 8. Фрактографии изломов титанового сплава ОТ4-1 при двухосном растяжении, скорости деформации $\dot{\epsilon} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ при температурах °С: *a* – 600, *б* – 700, *в* – 750 ($\times 1400$)

Выводы

Усовершенствована конструкция устройства испытания плоских листовых образцов на двухосное растяжение методом выпучивания в интервале температур (20÷1200) °С и скоростей деформации ($10^{-1} \div 10^{-3}$) с^{-1} , за

счет изменения геометрии рабочего окна матрицы и введения операции подформовки чашеобразной мембраны перед нагружением.

Анализ полученных температурно-скоростных зависимостей предельной пластичности деформированных титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ6С для интервала температур $(20 \div 800)^\circ\text{C}$, скоростей деформации $\dot{\epsilon} = (10^{-1} \div 10^{-3}) \text{ с}^{-1}$ и жестких схем напряженного состояния $\Pi = 1 \div 2$ подтвердил технологические особенности штамповки листовых титановых сплавов:

- высокая чувствительность листовых сплавов к скорости деформации, что определяет необходимость применения оборудования с малыми и регулируемыми скоростями деформирования;
- пониженная пластичность в холодном состоянии и высокая пластичность в нагретом состоянии в узком диапазоне температур, что определяет необходимость проведения штамповки в изотермических условиях.

Определенные температурно-скоростные зависимости предельной пластичности деформированных титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ6С были положены в основы проектирования технологических процессов штамповки листовых титановых сплавов, в частности разработки способа изготовления листовых гофрированных панелей [7].

Список литературы

1. Смирнов-Аляев, Г.А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г.А. Смирнов-Аляев, В.П. Чикидовский. – Л.: Машиностроение, 1972. – 370 с.
2. Прудников, М.И. Предельные деформации листового материала при двухосном растяжении / М.И. Прудников // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением – 1962. – № 8. – С.15-17.
3. Макаров, Э.Л. Остаточные напряжения и прочность сварных соединений и конструкций / Э.Л. Макаров, В.Г. Федоров // Труды МВТУ N 133. – М.: Машиностроение (МВТУ), 1969, с. 87.
4. <https://findpatent.ru/patent/212/2125255.html>.
5. Золотов, М.А. Устройство для испытания образцов на двухосное растяжение / М.А. Золотов, В.А. Скуднов, В.В. Галкин // Авторское свидетельство СССР № 1299264, G 01 N 3/08, 3/10, выдано 28.06.84 г.
6. Галкин, В.В. Устройство для испытания сварных листовых образцов на двухосное растяжение / В.В. Галкин, Г.Н. Гаврилов, П.Л. Жилин // Евразийский патент № 040659, заявка № 202100064 от 29.12.2020 г., патент выдан 12.07.22г.
7. Галкин, В.В. Способ изготовления панели / В.В. Галкин, М.А. Золотов, В.Н. Перевезенцев, С.А. Ланин // Авторское свидетельство СССР № 1814234, МКИ³ кл. В 21 D 26/02, выдано 11.10.1992 г. заявка № 49002899 от 08.01.1991г.

УДК 621.98

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКОСТЕННОЙ ЗАГОТОВКИ

Демьяненко Е.Г.¹, Батина А.В.², Куксенко Е.С.³

1 - д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением Самарского университета, Самарский ун-т, г. Самара

2 - студент гр.1218-220302D, Самарский ун-т, г. Самара

3 - студент гр.1419-150301D, Самарский ун-т, г. Самара

Аннотация. В статье для проведения экспериментов рассмотрен механизм формообразования выпуклых тонкостенных осесимметричных деталей с использованием процесса формовки.

Ключевые слова: формовка, тонкостенная заготовка, сварной шов, эксперимент.

CONDUCTING EXPERIMENTS USING A THIN-WALLED WORKPIECE

Demyanenko E.G.¹, Batina A.V.², Kuksenko E.S.³

1 - PhD, Professor of the Department of Metal Forming at Samara University, Samara University, city of Samara

2 - student the G-1218-220302D, Samara University, Samara University, city of Samara

3 - student the G-1419-150301D, Samara University, Samara University, city of Samara

Abstract. In the article, the mechanism of forming convex thin-walled axisymmetric parts using the forming process is considered for experiments.

Keywords: forming, thin-walled workpiece, weld, experiment.

Типовыми изделиями аэрокосмического кластера являются тонкостенные оболочки из листовых заготовок (обшивки отсеков, обтекатели, топливные баки различных форм и размеров, баллоны хранения газов, сопловые оболочки, оболочки камер сгорания двигателей), которые изготавливаются методами холодной штамповки [2]. Технологии с использованием процессов формовки и отбортовки позволяют деформировать в условиях плоского напряженного состояния растяжения, исключая возможность брака деталей усеченной сужающейся формы из тонкостенных заготовок, склонных к гофрообразованию.

Механизм формообразования выпуклых тонкостенных осесимметричных деталей с использованием процесса формовки возможно реализовать устройством для промышленного производства (слева от оси в открытом, а справа от оси в закрытом положении) [4], в котором эластичный элемент выполнен в виде кольца прямоугольного сечения высотой H , которая больше на 5-10% рабочей части поверхности пуансона, со срезанной со стороны пуансона частью в виде конического сечения с углом конусности равным углу конусности заготовки.

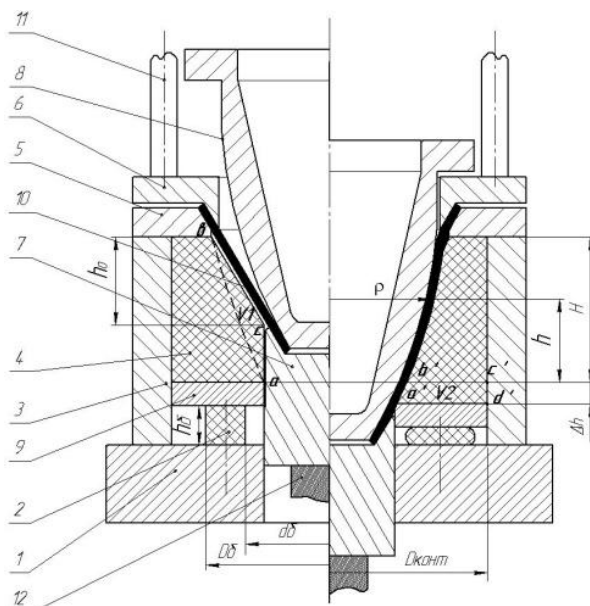


Рис. 1 - Схема устройства для формообразования выпуклых тонкостенных деталей
1 - плита штампа; 2 - эластичный буфер; 3 - контейнер; 4 - эластичный элемент;
5 - матрица; 6 - прижим; 7 - выталкиватель; 8 - пуансон; 9 - подкладная плита;
10 - заготовка; 11 - шпилька прижимного устройства; 12 - шпилька буферного устройства

В лабораторных исследованиях при проведении экспериментов использовалась модельная оснастка, для которой при выполнении условия $\frac{S_{заг}}{D} \leq 0,008$ (где $S_{заг}$ - толщина заготовки; D - диаметр большего основания детали) абсолютная толщина заготовки из алюминиевого сплава АД1 не превышала 0,345 мм. Поскольку сварку провести практически невозможно (заготовка особотонкостенная и выполнена в масштабе относительно реальных размеров), то встала необходимость деформирования заготовки, согнутой в конус, без соединения вдоль образующей в соответствии с рисунком 2 [5].

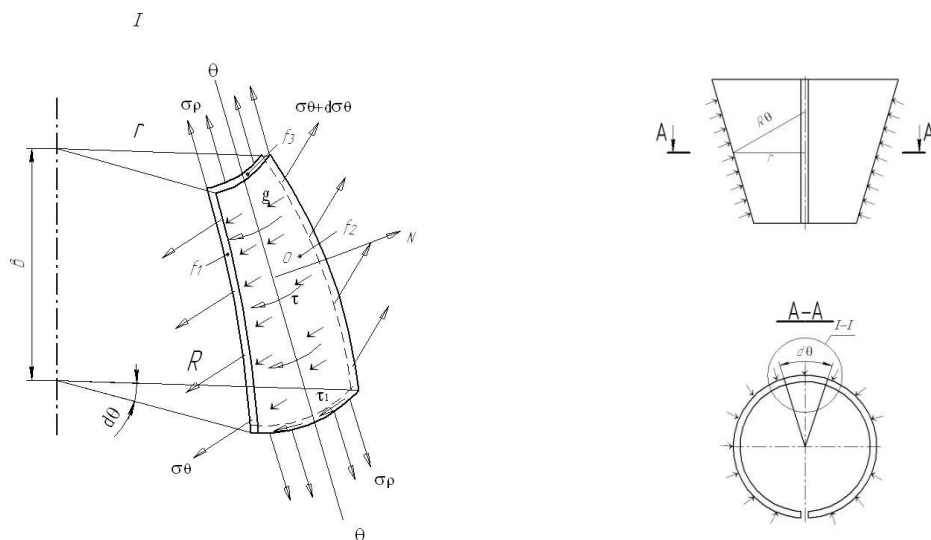


Рис. 2 - Схема к определению процесса формовки заготовки, согнутой в конус, без соединения вдоль образующей

Часть заготовки на участке противоположном разрезу определена условием формовки: $\sigma_\theta = \mu\sigma_\rho$ на некотором угле θ , который необходимо оценить для осуществления замеров. Используя инженерный метод [6], выделим бесконечно малый элемент с углом $d\theta$ (см. рисунок 2). Запишем уравнение равновесия сил на ось ON для $R_\rho \rightarrow \infty$, $R \approx r$:

$$\begin{aligned} qf_2 + 2\sigma_\rho f_1 \sin \frac{d\theta}{2} &= pf_2, \\ f_1 &= S_{заг} \cdot b, \\ f_2 &= r \cdot d\theta \cdot b. \end{aligned}$$

С учетом площадей:

$$qrd\theta + \sigma_\rho S_{заг} d\theta = prd\theta. \quad (1)$$

Из (1) определим:

$$\begin{aligned} p &= \sigma_\rho \frac{S_{заг}}{r} + q, \\ \frac{p}{S_{заг}} &= \frac{\sigma_\rho}{r} + \frac{q}{S_{заг}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где q - давление, создаваемое эластичным элементом;

p - давление со стороны заготовки на инструмент;

f_1 - площадь большего торца;

f_2 - площадь элементарной поверхности, на которую действует давление эластичного элемента;

τ - касательные напряжения на поверхности заготовки и инструмента (пуансона);

τ_1 - напряжения сдвига по площади сечения заготовки, определяемой границами зажима;

b - длина образующей (между зажимами);

θ - угол, при котором процесс деформирования определен условием формовки: $\sigma_\theta = \mu\sigma_\rho$.

Запишем уравнение равновесия сил на ось $\theta-\theta$:

$$\begin{aligned} (\sigma_\theta + d\sigma_\theta)f_1 - \sigma_\theta f_1 - \tau_2 f_2 - 2\tau_1 f_3 &= 0, \\ d\sigma_\theta f_1 - \tau_2 f_2 - \tau_1 f_3 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Преобразуем выражение (3) с учетом:

$$\begin{aligned} f_3 &= r \cdot d\theta \cdot S_{заг}, \\ \tau_1 &= 0,5\sigma_s, \\ \tau &= f \cdot p, \end{aligned}$$

где f_3 - площадь меньшего торца.

Продолжим преобразования с учетом (2):

$$\frac{d \left(\sigma_{\theta} + q \frac{r}{S_{заг}} + \frac{\sigma_s r}{fb} \right)}{\sigma_{\theta} + q \frac{r}{S_{заг}} + \frac{\sigma_s r}{fb}} = f \cdot d\theta. \quad (4)$$

Проинтегрируем полученное выражение и найдем произвольную постоянную интегрирования при условии: $\sigma_{\theta} = qf$ при $\theta = 0$.

$$\ln \left(\sigma_{\theta} + \frac{qr}{S_{заг}} + \frac{\sigma_s r}{fb} \right) = f\theta + C, \quad (5)$$

$$C = \ln \left(qf + q \frac{r}{S_{заг}} + \frac{\sigma_s r}{fb} \right).$$

Подставив значение произвольной постоянной интегрирования в (5), найдем угол θ :

$$\theta = \frac{1}{f} \ln \left| \frac{\sigma_{\theta} + q \frac{r}{S_{заг}} + \frac{\sigma_s r}{fb}}{qf + q \frac{r}{S_{заг}} + \frac{\sigma_s r}{fb}} \right|. \quad (6)$$

При реальных значениях механических свойств материала и относительных размеров заготовки (например, сплав АД1 с $S_{заг} = 0,3 \text{ мм}$;

$f = 0,15$; $\mu = 0,3 \div 0,8$; $\sigma_s = 200 \text{ МПа}$; $r = 20 \text{ мм}$; $\sigma_{\theta} = \mu \sigma_{\rho} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{1-\mu^2}}$) [1], как

правило, угол θ не превышает 70° - 90° . На рисунке 3 представлена деталь без сварного шва с нанесенной на ней координатной сеткой.



Рис. 3 - Деталь без сварного шва

Действительно, в разрезанной вдоль образующей зоне детали наблюдается значительное изменение кривизны линий, а характер линий в сечении противоположном разрезу после формообразования не изменился.

Список литературы

1. Арзамасов, Б.Н. Конструкционные материалы: справочник /Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
2. Акаро, И.Л. Машиностроение. Энциклопедия. Технологии заготовительных производств. Т. III-2 /И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов и др.; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. – М.: Машиностроение, 1996. – 736 с.
3. Легейда В.Ю. Формовка тонкостенных осесимметричных оболочек равномерным давлением деформирующей среды: автореф. дис. к.т.н.: 28.03.11/Легейда Виталий Юрьевич; науч. рук. В. Д. Кухарь; ТГУ. – Тула, 2011. – 12 с.
4. Пат. 78709 Российская Федерация, МПК7B21D20/30. Устройство для формообразования тонкостенных усеченных сужающихся оболочек Попов И.П., Демьяненко Е.Г., Десятниченко К.И.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Самарский аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева. – 2008112698; заявл. 02.04.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.
5. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением/М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
6. Шофман, Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки /Л.А. Шофман. – М.: Машиностроение, 1964. – 375 с.

УДК 621.98

ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШТАМПОВОЧНОЙ ОСТНАСТКИ ПРОЦЕССА ЧИСТОВОЙ ВЫРУБКИ СО СЖАТИЕМ

Кокорин В.Н.¹, Морозов О.И.², Мишов Н.В.³, Родионов Д.А.⁴

1 – д.т.н., профессор кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

2- к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

3— ассистент кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, аспирант 2 года обучения, г. Ульяновск

4 - аспирант 1 года обучения кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

Аннотация. Проанализирована схема процесса чистовой вырубки со сжатием, виды возможного износа штамповочного инструмента. Повышение стойкости штампов при применении износостойких покрытий.

Ключевые слова: стойкость, износ, покрытия, чистовая вырубка со сжатием.

INCREASING THE DURABILITY OF THE WORKING SURFACES OF THE STAMPING RIGGING OF THE PROCESS OF FINISHING BLANKING WITH COMPRESSION

Kokorin V.N.¹, Morozov O.I.², Mishov N.V.³, Rodionov D.A.⁴

1 – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

2- Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

3 - Assistant of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, postgraduate 2 years of study, Ulyanovsk

4 - postgraduate 1 year of study Departments of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

Abstract. The scheme of the process of finishing cutting with compression, the types of possible wear of the stamping tool are considered. Increasing the durability of dies when using wear-resistant coatings.

Keywords. Durability, wear, coatings, finishing with compression.

В массовом и крупносерийном производстве наиболее эффективными способами получения плоских деталей, которые удовлетворяют требованиям точных деталей (3–2-го классов точности по ГОСТу и с параметрами шероховатости поверхности Ra0,69-0,32), является чистовая вырубка и пробивка и зачистка. Применение этих операций в ряде случаев заменяет механическую обработку, что существенно повышает производительность труда и снижает удельный расход металла. Чистовую вырубку и пробивку применяют для получения деталей из конструкционных и низколегированных сталей, латуни, меди, алюминия и алюминиевых сплавов [1].

Наиболее широко применяется чистовая вырубка и пробивка с предварительным сжатием заготовки при весьма малом зазоре между режущими кромками пуансона и матрицы (рис. 1). Вырубка со сжатием выполняется в условиях, когда свободные поверхности в очаге деформации отсутствуют и заготовка зажата между торцами пуансона и выталкивателя, а

также между торцами матрицы и прижима. Обычно такая операция производится на специализированных прессах или штампах.

Всестороннее сжатие заготовки в зоне очага деформации повышает пластичность металла. Вследствие этого возникновения трещин у режущих кромок может отсутствовать. Условия деформирования близки к чистому сдвигу, ширина очага деформации уменьшена по сравнению с обычной вырубкой (пробивкой). Деформации по толщине заготовки распределены более равномерно. Разрушение материала происходит почти одновременно по всей толщине без образования трещин, идущих от режущих комков. Всестороннее сжатие может приводить к тому, что утяжины вблизи поверхности среза меньше, чем при обычной вырубке (пробивке). Это связано с уменьшением действия изгибающих моментов на процесс деформирования в начальной стадии. При вырубке со сжатием зазор между пуансоном и матрицей берется равным 0,005–0,01 мм, существенно меньшим, чем при обычной вырубке [2].

Отделение одной части заготовки происходит в результате сдвига под действием касательных напряжений. Оптимальные размеры клиновидных ребер устанавливаются экспериментально и приводятся в справочниках. При геометрически простой форме контура штампуемой детали, клиновидное ребро располагается повторяя форму контура, при сложной форме ребро должно плавно огибать угловые участки. Сопротивление сдвигу при вырубке со сжатием больше, чем при обычной вырубке и может превышать временное сопротивление σ_B . Величина удельного давления наружного прижима на заготовку и внутреннего прижима снизу на пуансон должна примерно быть равна временному сопротивлению материала σ_B .

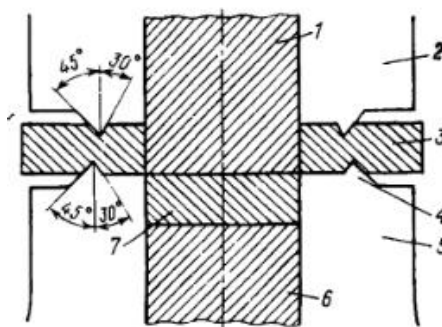


Рис.1. – Схема чистовой вырубки со сжатием:

1 – контрпуансон, 2 – матрица, 3 – заготовка, 4 – клиновидные ребра, 5 – прижимное кольцо, 6 – пуансон, 7 – деталь

Принцип действия чистовой вырубки со сжатием: Сначала прижимное кольцо 5 прижимает заготовку 3 к матрице 2, при котором происходит внедрение клиновидного ребра 4 в заготовку. Затем пуансон 6 вырубает деталь 7 по контуру и заталкивает ее в матрицу 2 преодолевая противодействие контрпуансона 1. При обратном ходе заготовка освобождается от прижимного кольца 5, а деталь выталкивается из матрицы

2 контрпуансоном 1 и удаляется из рабочего пространства сдуванием сжатым воздухом или при помощи автоматически действующего рычажного сбрасывателя.

Долговечность штампов измеряется количеством деталей, от штампованных до полного износа рабочих частей, определяемого невозможностью их восстановления и получением размерного брака штампующихся деталей.

Ориентировочная стойкость штампов для чистовой вырубки до перешлифовки составляет:

Для деталей простого контура 30-40 тыс. шт., сложного 15-25 тыс. шт.

Хотя в производственных условиях стойкость штампов значительно ниже и составляет примерно 2-5 тыс. шт.

Штамповой инструмент в процессе формообразования испытывает значительную нагрузку, которая может привести к снижению его надежности, обусловленной сохранением во времени, в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения.

Основными причинами повышенного износа рабочих поверхностей штампового инструмента являются высокий уровень контактных напряжений, неравномерно распределенных по рабочей поверхности штампа, дефектность кристаллической решетки металла и ее неблагоприятная ориентация по отношению к направлению максимальных напряжений

Механизм износа рабочих частей штампового инструмента характеризуются основными видами:

1) Схватывание – проявляется в местном соединении двух твердых тел, происходящем при трении, вследствие действия межатомных сил и высоких контактных давлений, достигающих значений близких к временному сопротивлению материала штампа [3].

2) Абразивный износ – происходит вследствие трения, возникающего между инструментом и заготовкой в процессе деформирования и последующего извлечения детали из оснастки, а также наличия твердых мелкодисперсных частиц, выполняющих функции абразива [4].

3) Усталостное разрушение материала оснастки – проявляется в виде микротрещин, возникающих в результате воздействия длительных знакопеременных динамических нагрузок. Концентрация напряжений в вершинах микротрещин способствует их росту и при достижении критического размера разрушению инструмента [5].

4) Коррозионно-механическое изнашивание – когда помимо механических действуют химические или электрические воздействия [4].

5) Механическое изнашивание – происходящее в результате механических воздействий.

Перечисленными факторами в основном охватываются наиболее часто встречающиеся причины выхода штампов из строя в процессе эксплуатации.

Однако выбраковка штампа, как правило, связана с одним преобладающим видом износа.

Одним из наиболее распространенных и эффективных способов повышения стойкости инструмента рабочих поверхностей является нанесение износостойких покрытий. [6]

Износостойкое покрытие – слой материала на поверхности инструментальной основы, который отличается по своим кристаллохимическим, физико-механическим и теплофизическим свойствам от соответствующих свойств основы.

Назначение износостойкого покрытия – повышение периода стойкости инструмента путем увеличения микротвердости, коррозионной стойкости и термодинамической устойчивости поверхностного слоя, а также снижения фрикционного взаимодействия (коэффициента трения) инструмента и обрабатываемого материала.

Для повышения стойкости штампов и пресс-форм применяются те же технологии, что и для режущего инструмента из быстрорежущих сталей.

Стойкость инструмента с однослойным покрытием TiN в 2–4 раза выше, чем подвергнутого азотированию.

Так же, как и для режущего инструмента, более высокое повышение стойкости достигается при использовании многослойных покрытий (например, TiC–TiN).

Покрытия повышают разгаростойкость штампов горячей деформации за счет образования теплоизоляционного барьера, препятствующего отпуску поверхностного слоя инструмента. Твердость сталей 5XHM и 4X5MFC после 2000 циклов для инструмента с покрытием TiN снизилась с 42–45 до 38–40 HRC; инструмента без покрытия снизилась на 10 единиц больше — до 28–30 HRC. Это свидетельствует о больших температурных перепадах в процессе эксплуатации инструмента без покрытия и, соответственно, больших термических напряжениях, вызывающих появление трещин разгара.

Высокая стойкость инструмента с покрытием достигается только при надежной адгезии покрытия и материала инструмента. В противном случае возможно отслаивание покрытия, его частицы вызовут ускоренный износ инструмента.

Необходимость получения хорошей адгезии накладывает ряд требований к технологии изготовления инструмента до нанесения покрытий:

- необходима тщательная очистка и обезжиривание инструмента перед нанесением покрытия;

- недопустим «недоотпуск» инструмента; это может привести к разрушению покрытия, так как в процессе нанесения покрытий происходит нагрев инструмента из быстрорежущих сталей практически до отпускных температур, при охлаждении произойдет превращение остаточного аустенита в мартенсит, сопровождающееся увеличением объема, что приведет к разрушению хрупкой пленки;

- недопустимы шлифовочные прижоги, во-первых, из-за наличия

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России

аустенита во вторично закаленном слое, во-вторых, из-за низкой твердости отпущенного слоя: при рабочем процессе возможно вдавливание пленки TiN в мягкую ниже подложку.

Список литературы

1. Зубцов М. Е. Листовая штамповка: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и технология обработки металлов давлением» / М. Е. Зубцов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 432 с2.
2. Бурдуковский, В. Г. Технология листовой штамповки : учебное пособие / В. Г. Бурдуковский. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 224 с.
3. Зубцов, М. Е. Стойкость штампов / М. Е. Зубцов, Д. В. Корсаков. – Л.: Машиностроение, 1971. – 230 с.
4. Трахтенберг, Б. Ф. Стойкость штампов и пути ее повышения / Б. Ф. Трахтенберг. – Куйбышев. книж. изд-во, 1964. – 280 с.
5. Векслин, И. И. Исследование стойкости матриц сборной конструкции для холодной высадки / И. И. Векслин, И. С. Дробязко / Кузнечно-штамповоч. пр-во. – 1983. – № 11. – С. 39–4
6. Верещака А.С. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, Табаков В.П. – Ульяновск: УлГТУ, 1998 – 144 с

УДК 621.98

К АНАЛИЗУ ДЕФОРМАЦИОННОГО И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЙ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Кокорин В.Н.¹, Морозов О.И.², Мишов Н.В.³, Родионов Д.А.⁴

1 – д.т.н., профессор кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

2- к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

3 – ассистент кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, аспирант 2 года обучения, г. Ульяновск

4 – аспирант 1 года обучения кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

Аннотация. Проведен анализ характеристик интенсивной пластической деформации при поверхностном пластическом деформировании. Предложена методика анализа напряженного деформированного состояния поверхностного слоя с учетом структурно-деформационного упрочнения металла поверхности.

Ключевые слова. Аддитивности, деформация, зерно, морфология, межзеренные границы, накопленная деформация.

ON THE ANALYSIS OF DEFORMATION AND STRESS STATES DURING INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION OF COLD VOLUMETRIC STAMPING PROCESSES

Kokorin V.N.¹, Morozov O.I.², Mishov N.V.³, Rodionov D.A.⁴

1 – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

2- Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

3 - Assistant of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, postgraduate 2 years of study, Ulyanovsk

4 - postgraduate 1 year of study Departments of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

Annotation. The analysis of the characteristics of intense plastic deformation during surface plastic deformation is carried out. A method for analyzing the stressed deformed state of the surface layer is proposed, taking into account the structural and deformation hardening of the surface metal.

Keywords. Additivity, deformation, grain, morphology, grain boundaries, accumulated deformation.

До настоящего времени количественного анализа и выявления диапазона границ интенсивной деформации ввиду её синергетики и явно выраженного стохастического характера не было проведено в полной мере. В общем случае, модель структурирования с учетом дислокационного упрочнения во многом неполна, поскольку отсутствуют инвариантные связи системы $W_{\Pi} = \epsilon[\text{структура зерна} / \text{межзеренные границы} / \text{плотность дислокаций} / \text{схемы и режимы нагружения}]$.

Следует отметить, что наряду со структурной составляющей модификации деформированного металла, наблюдается изменение его *механохимии* [1] и, как следствие, - инициирование процесса образования центров активации, характеризующихся существенным увеличением поверхностной энергии. Именно данное свойство деформированной структуры лежит в основе повышения адгезионной способности металлов и сплавов на их основе, являясь одной из определяющих характеристик получения стойких химических реакций.

Таким образом, при разработке корректной физической модели интенсивной деформации необходим комплексный анализ морфологии зеренной структуры, распределения и величины дислокаций на протяжении всех стадии деформационного упрочнения.

Изучение тонкой (дислокационной) структуры пластически деформированных металлов целесообразно для характеристики явлений, связанных с изменением физических свойств при пластической деформации. При анализе структурных явлений в ходе интенсивных пластических деформациях необходим *учет изменения морфологии зерна, обуславливающего уровень накопленной деформаций* локального участка (например, зерна) на микроуровне в координатах x, y, z .

Известно, *тензор* логарифмической деформации является обобщением *скалярной* логарифмической деформации [2-3]:

$$\begin{cases} e_x = \int_{l_0}^l \frac{1}{x} dx = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) \\ e_y = \int_{b_0}^b \frac{1}{b} dy = \ln \left(\frac{b}{b_0} \right), \\ e_z = \int_{c_0}^c \frac{1}{c} dc = \ln \left(\frac{c}{c_0} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Известно, что для получения функции достаточно знать величины его главных векторов. В матричной форме выражение (1) запишется в виде:

$$[e] = \begin{pmatrix} e_x & 0 & 0 \\ 0 & e_y & 0 \\ 0 & 0 & e_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Относительное изменение элементарного объема при пластическом сдвиге записывается следующим образом:

$$\ln \left(\frac{V}{V_0} \right) = e_x + e_y + e_z \quad (3)$$

Зная, что при рассмотрении металлических твердых тел реализуется условие несжимаемости среды: $e_x + e_y + e_z = 0$, можно считать, что изменение скалярной величины логарифмической деформации по любому единичному вектору (x, y, z) непременно приведет к соответствующему изменению скалярных величин логарифмических деформаций по двум остальным векторам в главных осях.

При пластической деформации в результате приложения внешней нагрузки происходит изменение структуры зерна, его морфологии,

закключающейся в появлении текстурованности, соответственно, изменении его линейных размеров по главным осям (рисунок 1).

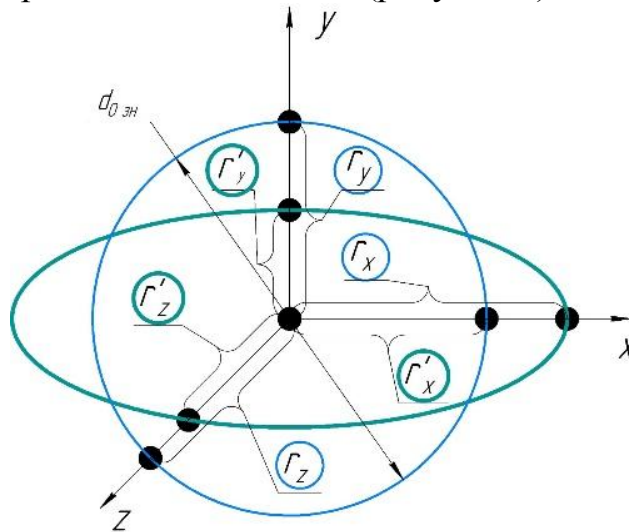


Рис. 1. – Характер изменения морфологии зерна при пластической деформации по главным осям

Считаем, что зерно в исходном состоянии имеет равноосную форму в виде сферы:

$$r_x = r_y = r_z \quad (4)$$

При деформировании наблюдается изменение координат границ формы зерна до величин:

$$\begin{cases} r'_z \neq r_z \\ r'_x \neq r_x \\ r'_y \neq r_y \end{cases} \quad (5)$$

Выражение (5) определяет неэквидистантность текущих границ формы зерна, т.е. изменение его морфологии при некоторой единичной либо накопленной деформации при сохранении строгой взаимосвязи между ними, исходя из постоянства объема зерна металла, - соответственно:

$$\frac{r_x + r_y + r_z}{r'_x + r'_y + r'_z} = 1 \quad (6)$$

Таким образом, очевидно, можно считать корректным использование в качестве меры накопленной деформации при пластическом деформировании величину изменения морфологии зерна:

$$\begin{cases} e_x = \ln\left(\frac{d_0}{d_{xi}}\right) \\ e_y = \ln\left(\frac{d_0}{d_{yi}}\right), \\ e_z = \ln\left(\frac{d_0}{d_{zi}}\right) \end{cases} \quad (7)$$

где d_0 – исходный диаметр зерна; d_{xi}, d_{yi}, d_{zi} - текущие величины границ деформированного (текстурированного) зерна по главным осям X, Y, Z.

Используя выражения (6) и (7), скалярную величину, накопленной деформации можно определить выделяя любую из скалярных величин

логарифмической деформаций по главным осям (выбор главной оси определяется направлением приложения деформирующей нагрузки таким образом, что бы выполнялась ортогональность направления приложения нагрузки к поверхности нагружения).

Таким образом, деформированное состояние при некотором пластическом смещении объема деформированного металла можно определить, зная изменение морфологии зеренной структуры, - текущие значения структурно-деформационных характеристик, а именно, значения размеров зерна:

$$e_{\text{накопл}} = \ln\left(\frac{d_0}{d_{xi}}\right). \quad (8)$$

Другим характерным показателем, определяющаяся как границы/стадийность изменения деформированной структуры, так и стадию пластической деформации, на наш взгляд, можно корректно использовать как средний размер зерна $d_{\text{ср}i}^*$ [4], так и удельный размер зерна $d_{\text{адд}}$, рассчитываемому по правилу аддитивности [5]:

$$d_{\text{адд}} = \frac{100 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot \dots \cdot d_n}{(P_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot \dots \cdot d_n)(P_2 \cdot d_1 \cdot d_3 \cdot \dots \cdot d_n)(P_n \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot \dots \cdot d_n)}, \quad (9)$$

где $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ – удельные размеры зерен в поле анализа микроструктуры, мкм; $P_1, P_2 \dots P_n$ – процентное (по доле) содержание зерен соответствующих размеров, %.

$$\begin{cases} e_{\text{накопл}} = \ln\left(\frac{d_{\text{зн}(0)}^{\text{адд}}}{d_{\text{зн}(i)}^{\text{адд}}}\right) \\ e_{\text{накопл}} = \ln\left(\frac{F_{\text{зн}(0)}^{\text{адд}}}{F_{\text{зн}(i)}^{\text{адд}}}\right) \end{cases}, \quad (10)$$

где $d_{\text{зн}(0)}^{\text{адд}}, d_{\text{зн}(i)}^{\text{адд}}, F_{\text{зн}(0)}^{\text{адд}}, F_{\text{зн}(i)}^{\text{адд}}$ – длины/площади аддитивного зерна исходной и деформируемой структуры (соответственно).

Тогда считается корректным использование характеристик зеренной структуры при учитывания правила аддитивности: $l_{k(i)}^{\text{адд}}, l_{k(0)}^{\text{адд}}, S_{i(0)}^{\text{адд}}$, - соответственно аддитивные исходные и аддитивные деформированные структуры и геометрические параметры зерна. Аддитивные геометрические параметры морфологии зерна принимаются путем расчета при использовании расчета (формула 10), исходные данные выбираются из таблиц и гистограмм морфологии зерна в процессе анализа структуры (с помощью анализатора, программа «SIAMS 700»)

Следует так же отметить, что до настоящего времени эти вопросы ввиду сложности, нелинейности и недостаточной изученности не имеют корректного и полного аналитического описания. В работах А. Коттрела [6], Е. Кренера [7], И.А. Одингга [8] сформулированы основные положения о накоплении линейных повреждений (дислокаций) структуры металла, а также искажений кристаллической решетки применительно к пластическому деформированию. Исследования, результаты которых представлены в работах Г.А. Смирнова-Аляева [9], И.Я. Тарновского [10], позволили дать оценку неравномерности деформации в процессах пластического формообразования, в том числе, и при реализации процессов

деформационного упрочнения. Некоторые элементы поэтапного структурно-деформационного анализа в условиях сложного нагружения представлены в работах исследователей из ФГБОУ ВО «НГТУ» им. Р.Е. Алексеева [11-12]. Однако, следует отметить, что до настоящего времени не выявлена корректная связь между структурно деформационными характеристиками и уровнем модификации морфологии зеренной структуры, образованной при холодной пластической деформации структуры, в частности, накопленной поверхностной энергией. Результаты исследований при оценке триботехнических характеристик, в частности, уровня адгезионной способности системы «подложка-покрытие» с учетом анализа модификации внутри/зеренной структуры не имеют в настоящее время корректного аналитического рассмотрения, что ограничивает их использования для прогнозирования служебных характеристик покрытий.

Список литературы

1. Широков Ю.В. Механохимия. Теоретические основы. Иваново.: ИГХТУ, 2015. 211 с.
2. Седаков О.С., Щербакова А.О. Об использовании тезора логарифмической деформации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика», 2014, т. 6, №3, с. 78-85.
3. Горлач Б.А., Ефимов Е.А. Конечные деформации в задачах формирования неупругих тел // Математическое моделирование систем и процессов,- 1992, №1, с. 67-81.
4. Кокорин В.Н., Скворцов А.А. и др. Структурообразование в процессе консолидации порошковых материалов в присутствии жидкой фазы // Вестник СГТУ. 2010. №3.
5. Ермаков С.С., Вязников Н. Ф. Порошковые стали и изделия. Л.: Машиностроение, 1990, 319с.
6. Коттрел А. Теория дислокаций. М.: Мир, 1969.
7. Кренер Е. Общая континуальная теория дислокаций и собственных напряжений. М.: Мир, 1965.
8. Одинг И.А. Прочность металлов. Л.:ГНТИ, 1932, 279с.
9. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. М.: Машиностроение, 1978.
10. И.Я. Тарновский. Контактные напряжения при пластической деформации. М.: Машиностроение, 1966.
11. Галкин В.В., Дербенев А.А., Братухин А.В. Инженерные решения оценки механических свойств холоднодеформированных металлических материалов в условиях многоэтапной обработки: Монография. Н. Новгород.: НГТУ, 2019. 100 с.
12. Галкин В.В. Научно-технологическая концепция формирования механических свойств деформированных металлических сплавов в условиях сложного нагружения на основе поэтапного структурно-деформированного анализа: Дисс. д.т.н. Н. Новгород.: НГТУ, 2023. 336с.

УДК 621.98

АНАЛИЗ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ TiN

Кокорин В.Н.¹, Морозов О.И.², Мишов Н.В.³, Родионов Д.А.⁴

1 – д.т.н., профессор кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

2- к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

3— ассистент кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, аспирант 2 года обучения, г. Ульяновск

4 - аспирант 1 года обучения кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

Аннотация. Проведен анализ стойкости пуансона холодной объемной штамповки с износостойким покрытием TiN в рамках опытно-промышленных испытаний. Показана характерная стадийность износостойкости холодновысадочного инструмента от числа ударов.

Ключевые слова: стойкость, высадка, износ, покрытия, пуансон, холодная объемная штамповка, испытания.

ANALYSIS OF THE ENERGY-STRENGTH CHARACTERISTICS OF COLD STAMPING PROCESSES USING WEAR-RESISTANT COATINGS BASED ON TIN

Kokorin V.N.¹, Morozov O.I.², Mishov N.V.³, Rodionov D.A.⁴

1 – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

2- Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

3 - Assistant of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, postgraduate 2 years of study, Ulyanovsk

4 - postgraduate 1 year of study Departments of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

Annotation. An analysis of the durability of a cold-die punch with a wear-resistant TiN coating was carried out within the framework of pilot tests. The characteristic gradation of the wear resistance of a cold-shrink tool from the number of strokes is shown.

Keywords: durability, landing, wear, coatings, punch, cold stamping, testing.

Были проведены опытно-промышленные испытания с использованием штампового инструмента холодной объемной штамповки при изготовлении детали №3962-290634 «Втулка наружная» при совмещении формоизменяющих операций высадки и дорнования (штамп №А91-2594, рабочий инструмент - пуансон № А91-2594-5). Использовано износостойкое покрытие – TiN (нитрид титана), толщина покрытия – (2-3) мкм. Покрытие наносилось на установке «Булат-3» (ФГБОУ ВО УлГТУ, г. Ульяновск, лаборатория «Износостойкие покрытия»). Опытно-промышленные испытания проведены в рабочем режиме предприятия ООО «УАЗ – механосборочное производство» на гидравлическом прессе модели К0034 с номинальным усилием 250 тс.

Материал детали – сталь 20 ГОСТ 8733-87, материал инструмента (пуансона) – быстрорежущая сталь Р6М5 ГОСТ 2590-88. Пуансон подвергался термообработке – закалка и отпуск, твердость – 62 HRC. На рисунке 1 представлена деталь «Втулка наружная», а также высадочный пуансон без покрытия – исходный и с выработкой ресурса работоспособности (рис.1в), характеризующий повышенный абразивный износ.

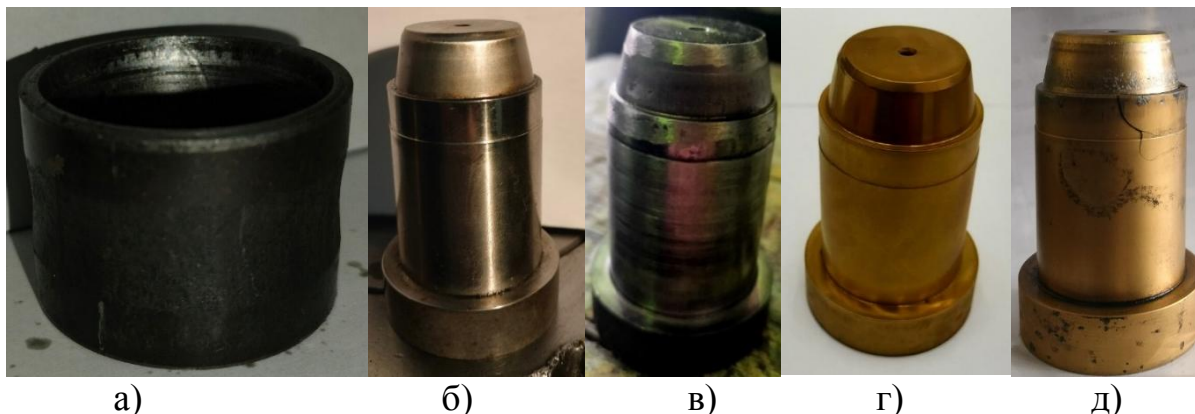


Рис. 1. – Фото детали «Втулка наружная» и пуансона*:
а) деталь «Втулка наружная»; б) исходный высадочный без покрытия;
в) высадочный пуансон с выработкой ресурса без покрытия;
г) с износостойким покрытием TiN (исходный); д) с износостойким покрытием (усталостное разрушение)

Анализ качества покрытия проводился за несколько итераций (11) с шагом (3...4) тыс. ударов. В рамках промышленного эксперимента проводился анализ энергосиловых характеристик процесса холодного объемного деформирования при изготовлении детали «Втулка наружная».

Оценка усилия деформирования производилась по фиксации давления манометра прессы, при этом производился расчет коэффициента изменения энергосиловых характеристик ($K_э$):

$$K_э = \frac{P_i}{P_0}, \quad (1)$$

где P_i – усилие деформирования в момент поэтапного фиксирования постадийного износа; P_0 – усилие деформирования в начальный этап эксперимента (износ отсутствует).

По результатам проведенных экспериментов построена таблица энергосиловых характеристик в различных этапах испытания.

Таблица 1. – Результаты расчетов энергосиловых характеристик

№ п/п	Количество ударов, $N_{уд}$, тыс.	Коэффициент изменения энергосиловых характеристик, $K_э$
1	3110	1
2	6110	1
3	9310	1
4	12374	1
5	16374	1,17
6	20594	1,17
7	24468	1,43
8	28468	1,43
9	34540	1,73
10	41402	1,73
11	45190	Инструмент вышел из строя

На основании полученных данных был построен график изменения энергосиловых характеристик в различных этапах испытания (рис.2).

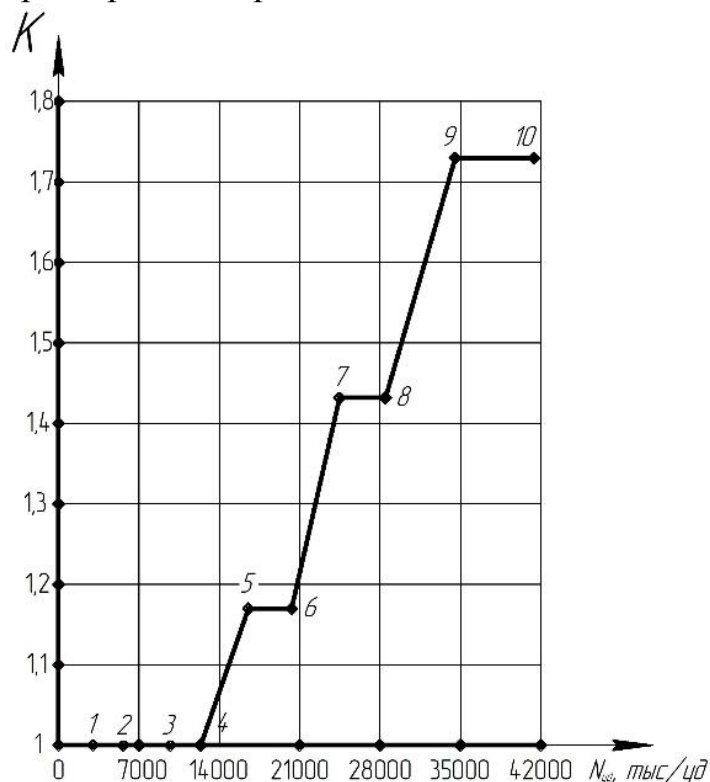


Рис.2. Изменение энергосиловых характеристик по этапам испытаний

На основании полученных результатов можно сделать выводы:

1. Износостойкое покрытие оказывает существенное влияние на энергосиловые характеристики процесса деформирования;
2. До 4 этапа испытания (12374 ударов) энергосиловые характеристики соответствовали исходному уровню целостности покрытия;

3. Качество изготавливаемых деталей при использовании пуансона с покрытием на всем протяжении испытаний соответствуют чертежу.

Список литературы

1. Табаков, В.Н. Кокорин, Е.Л. Корняков, О.И. Морозов, А.С. Алешин, Д.И. Сагитов. Повышение стойкости штампового инструмента с износостойким покрытием на формоизменяющих операциях // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 6. – С. 352–358.

УДК 621.98

К ВЫБОРУ ТОЛЩИНЫ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕТАЛЛЕ ОСНОВЫ ИНСТРУМЕНТА ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ

Кокорин В.Н.¹, Морозов О.И.², Мишов Н.В.³, Родионов Д.А.⁴

1 – д.т.н., профессор кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

2- к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

3— ассистент кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, аспирант 2 года обучения, г. Ульяновск

4 - аспирант 1 года обучения кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

Аннотация. Представлена методика расчета оптимальной толщины ионно-плазменного покрытия на металл подложки обеспечивающий высокий уровень адгезионной прочности.

Ключевые слова: подложка, толщина покрытия, адгезия, субстрат,

TO CHOOSE THE THICKNESS OF THE WEAR-RESISTANT COATING ON THE METAL OF THE BASE OF THE COLD STAMPING TOOL

Kokorin V.N.¹, Morozov O.I.², Mishov N.V.³, Rodionov D.A.⁴

1 – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Materials Science and OMD" UISTU, Ulyanovsk

2- Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Materials Science and OMD" UISTU, Ulyanovsk

3 - Assistant of the Department of "Materials Science and OMD" UISTU, postgraduate 2 years of study, Ulyanovsk

4 - postgraduate 1 year of study Departments of "Materials Science and OMD" UISTU, Ulyanovsk

Annotation. A method for calculating the optimal thickness of an ion plasma coating on a substrate metal providing a high level of adhesive strength is presented.

Keywords: substrate, coating thickness, adhesion, substrate,

Размеры неровностей твердой поверхности подложки определяются топологической наследственностью и изменяются в пределах от нескольких межатомных расстояний до десятков микрометров. Следует отметить, что данный диапазон величин погрешности формы поверхности в отдельных случаях может поглощать величину шероховатости после последовательно следующих операций шлифования и полирования, используемых для подготовки поверхности подложки перед ионно-плазменным напылением.

При этом, катодно-ионная бомбардировка при испарении металлической мишени (катода) формирует отдельные металлические кластеры (капли) адгезива размером (2...100) атомов/ при этом, образуются монослои толщиной (5...100) нм. Таким образом, толщина отдельного монослоя покрытия $h_{\text{покр}}^{\text{мон.}}$ сопоставима с высотой величины искажения поверхности ($h_{\text{покр}}^{\text{мон.}} \geq h_{\text{искаж.}}$).

Функциональные свойства тонкопленочных покрытий, получаемых методами физического и химического осаждения, в частности, их

износостойкость во многом определяются *толщиной покрытия* [1], имеющее толщину нанесенного слоя от 0.1 мкм до 6.0 мкм.

Толстые покрытия в основном применяются при необходимости обеспечения одинаковой толщины покрытия, уменьшения его дефектности и обеспечивают так называемые барьерные свойства (термостойкость, теплоизоляция) свойства покрытия. Увеличенная толщина покрытия также целесообразна для обеспечения эффекта теплового барьера в целях исключения отпуски поверхности основного материала покрытия в процессе саморазогрева при интенсивных сдвиговых деформациях.

При этом, следует иметь ввиду, что увеличение толщины покрытия способствует росту числа дефектов в покрытии, снижению прочности адгезии покрытия к основе и сопротивлению хрупкому разрушению при упругом и пластическом деформировании [2-3]. При этом, отмечается [4], что при использовании вакуумных методов нанесения покрытия и наличия его повышенной толщины обнаруживается увеличение шероховатости поверхности, что при использовании рабочего инструмента холодной объемной штамповки исключено.

Тонкие покрытия имеют повышенную адгезию к поверхности подложки при обеспечении высокого уровня износостойкости и антифрикционных свойств контактных поверхностей.

При нанесении *тонких* покрытий их регламентированная толщина соотносится с высотой неровностей профиля субстрата (подложки) [3,5].

В работах [3,6] представлен основной алгоритм образования покрытия заданной толщиной с известной шероховатостью подложки: материал покрытия осаждается как на впадинах, так и в выступах шероховатости поверхности, причем, высота поверхности сдвига может быть меньше величины слоя металла покрытия во впадинах (рисунок. 1).

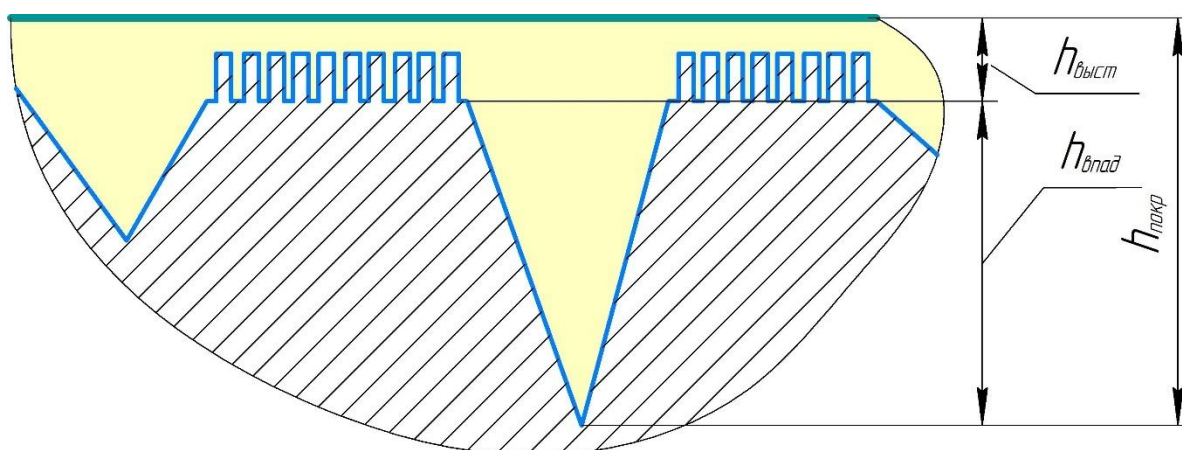


Рис. 1. – Соотношение уровней покрытия на микронеровностях подложки

В работе [7] представлены результаты экспериментальных исследований по сопоставлению толщины покрытий и величин когезионной/адгезионной прочности покрытия. Общая толщина покрытия составляет единицы мкм (2...3) мкм. При этом, *предельная толщина*

покрытия *на выступах*, при которой минимизировано его отслаивания, не превышает 0,6 мкм.

Таким образом расчетная толщина нанесенного покрытия, обеспечивающая его наивысшую адгезионную прочность, составляет:

$$h_{\text{покр}} = h_{\text{впад}} + h_{\text{выст}} = h_{\text{впад}} + 0,6 \text{ мкм}, \quad (1)$$

где $h_{\text{выст}} = 0,6 \text{ мкм}$ – предельная толщина покрытия по выступам системы «подложка-покрытие»; $h_{\text{впад}} = f(Ra, \chi)$.

В работах [3] приводятся рекомендуемые расчетные величины толщин покрытий: для диапазона шероховатости подложки системы «субстрат-адгезив» $Ra=(0,08...0,32) \text{ мкм}$, толщина покрытия составит соответственно $h_{\text{покр}} = (0,40 \dots 1,0) \text{ мкм}$.

Список литературы

1. Верещак А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Верещак А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
3. Тополянский П.А., Тополянский А.П., Соснин Н.А., Ермаков С.А. Выбор оптимальной толщины покрытия при финишном плазменном упрочнении // Металлообработка. – 2010. – №3. – С. 44-57.
4. Handbook of Hard Coating. Deposition Technologies, Properties and Applications / Ed. By R.F. Bunshah. – N. York.: LLS Norwich, 2001. – 535 p.
5. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 112 с.
6. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А.. Плазменные технологии: Руководство для инженеров. – СПб.: СПбГПУ, 2008. – 406 с.
7. Abbot E.F., Firestone F.A.. Specifying surface quality // Mechanical Engineering. – 1933. – №9(55). – P.569-572.

УДК 621.98

СТРУКТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ АДГЕЗИИ СИСТЕМЫ «СУБСТРАТ-АДГЕЗИВ»

Кокорин В.Н.¹, Морозов О.И.², Мишов Н.В.³

1 – д.т.н., профессор кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

2- к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, г. Ульяновск

3— ассистент кафедры «Материаловедение и ОМД» УлГТУ, аспирант 2 года обучения, г. Ульяновск

Аннотация. Предложена новая концепция теории адгезии, в основе которой находится анализ энергетического состояния поверхности субстрата (подложки). Разработаны математическая, расчетная и физическая модели при комплексном модифицировании поверхности субстрата, включающую в себя учет процессов поверхностного пластического деформирования подложки с последующим ионно-плазменным напылением покрытия.

Ключевые слова: адгезия, модель, зеренная структурна, покрытие, энергия, сцепление.

STRUCTURAL AND DEFORMATION THEORY OF ADHESION OF THE SUBSTRATE-ADHESIVE SYSTEM

Kokorin V.N.¹, Morozov O.I.², Mishov N.V.³

1 – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

2- Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, Ulyanovsk

3 - Assistant of the Department of "Materials Science and OMD" UlSTU, postgraduate 2 years of study, Ulyanovsk

Annotation. A new concept of adhesion theory is proposed, which is based on the analysis of the energy state of the substrate surface (substrate). Mathematical, computational and physical models have been developed for complex modification of the substrate surface, including consideration of the processes of surface plastic deformation of the substrate followed by ion-plasma spraying of the coating.

Keywords: adhesion, model, grain structure, coating, energy, adhesion.

Адгезия – сложное и многоуровневое физическое явление, определяемое как «сцепляемость» поверхностей («adhaesio») разнородных твердых и/или жидких фаз при образовании межфазной поверхности за счет физических и/или химических межмолекулярных сил.

В настоящее время в физике твердого тела и физическом материаловедении сосуществуют ряд теорий, объясняющих и описывающих процесс адгезии [1]. Основные механизмы адгезии различных контактных систем «адгезив - субстрат» были предложены и рассмотрены в рамках механической теории Мак-Бена [2], где адгезив (клей) производит механическое заклинивание в порах субстрата (подложки). Дальнейшие исследования привели к созданию адсорбционной теории адгезии Н.А. Дебройна [3], представляющую адгезионные процессы как результат сил межмолекулярного взаимодействия между поверхностями контакта,

подчиняющимися «правилу полярности» за счет сил Ван-Дер-Ваальса. В продолжении данных изысканий Б.Д. Дерягиным и Н.А. Кротовой была развита теория на основе представления решающего *влияния двойного электрического поля*, образующегося при контакте двух поверхностей,- так называемая *электрическая теория адгезии* [4]. *Электронная (электростатическая) теория адгезии* является продолжением электрической теории,- определяет, что контактная «прилипаемость» обусловлена электростатическими донорно-акцепторными взаимодействиями контактирующих фаз в результате перехода электронов от одного атома к другому [5]. Теоретико-аналитические и экспериментальные работы, проведенные С.С. Воюцким [6], находятся в основе *диффузионной теории* адгезии полимеров, где представлена концепция исчезновения границ между адгезивом и субстратом за счет диффузии молекул зон контакта.

Химическая теория адгезии, а также как ее логическое продолжение,- *релаксационная теория*, разработанная Н.И. Москвитиным [7], объясняют процессы адгезии исходя из того, что на границе раздела «адгезив-субстрат» возникают межфазные химические и/или межмолекулярные силы. *Молекулярная теория*, развитая А.А. Берлином [8], большое внимание уделяет термодинамике адгезии,- соотношению поверхностных энергий контактирующих тел, а также закономерностям смачивания адгезива на подложке субстрата.

Реология структуры контактирующих тел в теоретико-экспериментальных работах, лежащих в основе концепций процессов адгезии Я.О. Бикермана [9],- *молекулярная теория* адгезии,- рассматривает взаимодействие контактирующих тел как физико-химический процесс, учитывающий особенности микроструктуры полимеров. *Микрореологические* представления при адгезии с учетом особенности микроструктуры полимеров, развиты В.Е. Гулем [10-11], где предложено при рассмотрении адгезионных процессов учитывать изменение истинной поверхности контакта в результате микрореологических процессов затекания полимерного адгезива в микронеровности поверхности субстрата.

Интересны положения *молекулярно-кинетической теории* адгезии,- разработанной В.В. Лаврентьевым [12-13] и Л.М. Притыкиным [14-16], согласно которой в зоне контакта адгезива и субстрата наблюдается направленный процесс разрыва и обновления связей структуры. Адгезионная прочность характеризуется разностью энергии активации процессов разрушения и образования связей при фиксированном ограничении количества сегментов структуры.

Следует отметить, что каждая из теорий и разработанных концепций сущности адгезии имеет конкретные ограничения, связанные, прежде всего, с сужением (ограничением) объектов исследования, недостаточной *проработкой* влияния технологической структурной наследственности, связанной с морфологией зерна, качеством межзеренных границ, топологией

границ зерен формирующегося поверхностного слоя контактирующих фаз на уровень поверхностных явлений, в том числе, как величины поверхностной энергии, так и условий образования центров активации.

В последнее время появилась информация [17-21] с результатами по изучению и развитию так называемой «зернистой» инженерии, направленной на представление концепции проектирования морфологии как зерен кристаллического материала, так и межзеренных границ для формирования различных функциональных характеристик, структурно-деформационного упрочнения, в том числе, и при изучении физхимии адгезионных процессов системы «субстрат-адгезив»/ «подложка-покрытие».

Таким образом, представляется перспективными работы исследования по анализу и выявлению природы и механизмов адгезионных сил, а также характера изменения энергетического потенциала контактирующих фаз при комплексном анализе, феноменологических процессов структурирования зеренной межфазной поверхности в процессе реализации механических схем нагружения, характерных для процессов ОМД. Данная направленность определена следующими особенностями структурирования, характерными для основных операций ХОШ (осадка, высадка, выдавливание, дорнование, редуцирование), а именно: 1. одновременное включение зеренных кристаллитов металла в пластическую деформацию, что вызывает появления в них остаточных напряжений второго рода (на внутрикристаллитном уровне); 2. наличием в поверхностной зоне лишь отрицательных (сжимающих) остаточных напряжений, что в совокупности с эффектом растекания жидкой капли адгезива (реализация растягивающих напряжений в процессе кристаллизации жидкой фазы) создают в межфазной и внешней поверхностях покрытий равновесную нейтральную структуру (см. рисунок 10), что способствуют повышению их эксплуатационной способности.

Можно считать что все эти теории, по существу, рассматривают частные вопросы и в основном дополняют и совершенствуют друг друга.

В рамках разработанной структурно-деформационной теории нами:

1. Предложен и выявлен характер и вклад в процесс влияния характеристик структурно-деформированных составляющих субстрата/подложки, их морфологии, качество поверхности межзеренного контакта на величину поверхностной энергии (показатель Гиббса), а также уровня поверхностного натяжения σ_n , определяющая характер смачивания поверхности субстрата и адгезионное явление при его модифицировании:

$$\begin{cases} W_{\Pi} = W_{\text{стр}} + W_{\text{зн}} = W_{\text{стр}} + (10 \dots 20)\% W_0 \\ W_{\Pi} = \int_{V_0}^{V_i} P_v^d dS_p^k + \int_0^{\mu_k} F_{\text{тр}}^k dS_p^k + \int_0^{\mu_i^v} F_{\text{тр}}^{M/3} dS_k^{M/3} \end{cases}, \quad (1)$$

где P_v^d – усилие, затрачиваемое на смещение объемов металла при сдвиге; W_{Π} – полная энергия, направленная на структурирование; V – исходный объем; $W_{\text{стр}}$ – энергия, направленная на формообразование/смещение объема; $d_{\text{ср}}^{\text{зн}}$ – средний размер зерна; $d^{\text{зн}}$ – размер

зерна; $F_{\text{тр}}^{M/3}$ - величина межзеренного трения, $F_{\text{тр}}^{M/3} = f(\mu_i^v, S_k^{M/3})$; $F_{\text{тр}}^k$ - величина контактного трения по линии раздела смещения объемов металла; S_p^k - площадь поверхности контакта раздела смещения объемов; $S_k^{M/3}$ - площадь поверхности межзеренного контакта на линии раздела смещения объемов; $S_k^{M/3} = f(d_{\text{ср}}^{\text{зн}})$; $d_i, V_i, \mu_i^3, \mu_i^v$ - текущие значения изменения объема, размеров зерна и коэффициентов межзеренного и контактного трения.

2. Предложена методика фиксирования стадийности интенсивной пластической деформации с учетом структурно-деформационных характеристик модифицированного субстрата и уровня накопленной деформации, исходя из дислокационного механизма холодного пластического нагружения, а также изменения морфологии зерна (накопленной деформации).

Предложена методика определения характера структурирования при анализе величины накопленной деформации в процессе пластического сдвига, с учетом аддитивной величины зерна.

$$\left\{ \begin{array}{l} e_x = \ln\left(\frac{d_0}{d_{xi}}\right) \\ e_y = \ln\left(\frac{d_0}{d_{yi}}\right) \\ e_z = \ln\left(\frac{d_0}{d_{zi}}\right) \\ e_{\text{накопл}} = \ln\left(\frac{d_0}{d_{xi}}\right) = (0,27 \dots 0,43) \\ e_{\text{накопл}} = \ln\left(\frac{F_{\text{зн}}^{\text{адд}}(0)}{F_{\text{зн}}^{\text{адд}}(t)}\right) = (0,27 \dots 0,43) \end{array} \right. , \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f^*(\varepsilon_i) = f_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0}\right) \\ \uparrow N_3(\varepsilon_i) = \left\{ \begin{array}{l} \uparrow f_{mi}^*(\varepsilon_i) \\ \uparrow \Pi_i(\varepsilon_i) \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (3)$$

где ε_i - мгновенная величина деформации; Π_i - мгновенная величина энергетического потенциала; f_{mi}^* - объемная доля мелких зерен модифицированной поверхности при величине мгновенной деформации.

Первая стадия, характеризующая малыми упругопластическими деформациями, характеризующимися в основном упругой стадией деформирования, - $\varepsilon = tg \alpha$ участка кривой растяжения, будет наблюдаться при значительной объемной доле исходных (крупных) зерен ($f \geq 0,6$).

Топология, характерная началу *второй стадии* структурно-деформационной зеренной эволюции определяется увеличением объемной доли мелких зерен до уровня f^* :

$$f^* = \frac{D}{(1 + \bar{d}/D)}. \quad (4)$$

При $f^* \gg f$ выполняется приближенное равенство $d_{\text{ср}}^* \cong f \cdot d_i$, а при $f^* \ll f$ выражение для d_i имеет вид: $d_{\text{ср}i}^* \cong (1 - f)D_i$.

Третью стадию изменения морфологии зерен можно наблюдать при достижении предельных/критических ($\varepsilon_{\text{пред}}$) деформаций, определяемых уровнем механических свойств металла субстрата/подложки.

3. Предложена математическая модель изменения морфологии зерна при структурно-деформационном упрочнение металла в процессах пластического интенсивного деформирования при модификации металла поверхности субстрата:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{\text{ср}}^* = f \cdot d_i + (1 - f)D_i \\ f^* = \frac{D}{(1 + d/D)} \\ w = w_0 \exp\left(-\frac{t}{t_3}\right) \\ t_3 = \left(\frac{a_{\text{гп}} \cdot D_{\text{в}}^*}{A \cdot d^*}\right) \left(\frac{G}{KT}\right) \\ \downarrow d_{\text{ср}}^* \rightarrow \uparrow l_{\text{згп}}^{\text{гп}}, \uparrow N_{\text{згп}}, \uparrow F_{\text{к}}^3, \uparrow \Pi' \\ \frac{dl_{\text{гп}}}{d\varepsilon} = Kl_{\text{гп}} \\ f^*(\varepsilon_i) = f_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0}\right) \\ \uparrow N_3(\varepsilon_i) = \begin{cases} \uparrow f_{\text{ми}}^*(\varepsilon_i) \\ \uparrow \Pi_i(\varepsilon_i) \end{cases} \end{array} \right. \quad (5)$$

4. Разработана физическая и математическая модель изменения поверхностной энергии контактирующих сред адгезионного соединения, включающего в себя модифицированный металл субстрата, в том числе, с учетом топологии контактной поверхности:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{к}} = \sum \rho_w \in [\sigma_{\text{к}}, \sigma_{\text{н}}, S_{\text{к}}, l_{\text{к}}, W_0] \\ E_{\text{пов}}^{\Phi} = E_{\text{пов}}^{1\Phi} - E_{\text{пов}}^{2\Phi} \\ \sigma_{\text{н}} \rightarrow \downarrow \\ S \rightarrow \uparrow; (\text{или } \downarrow) \\ \Delta G_s = \Delta \sigma_{\text{н}} \cdot \Delta S \rightarrow \downarrow \\ h_{\text{покр}} = h_{\text{впад}} + h_{\text{выст}} = h_{\text{впад}} + 0,6 \text{ мкм} \\ \sum A_{\text{ц}} = N_i^a \cdot A_{\text{ц}i} \\ W_{\text{адг}} = \gamma \sum A_{\text{ц}} N_i^a \\ N_i^a = (400 \dots 2000) N_{\text{згп}} \\ \gamma A_{\text{ц}} N_i = \sigma_{\text{ип}} (1 + \cos \theta_{\text{ш}}) \\ \sum N = \frac{\sum A_{\text{ц}}}{(x_i \cdot y_i)} = \frac{N_i^a \cdot A_{\text{ц}i}}{(x_i \cdot y_i)} = \frac{(400 \dots 2000) N_{\text{згп}}}{(x_i \cdot y_i)} \end{array} \right. \quad (6)$$

где $h_{\text{выст}} = 0,6$ мкм – предельная толщина покрытия по выступам системы «подложка-покрытие»; $h_{\text{впад}} = f(Ra, \chi)$; x_i, y_i – текущее межатомное расстояние (период) кристаллической решетки металла, нм; $\sum A_{\text{ц}}$ – суммарная площадь фактического активного контакта фаз при напылении, мм².

5. Предложена математическая модель, описывающая образование устойчивых адгезионных связей системы «субстрат-адгезив»/«модифицированная подложка-покрытие»:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{\text{адг}} = \gamma \sum A_{\text{ц}} N_i^a \\ N_i^a = (400 \dots 2000) N_{\text{зн}} \\ \sum N = \frac{\sum A_{\text{ц}}}{(x_i \cdot y_i)} = \frac{N_i^a \cdot A_{\text{ц}i}}{(x_i \cdot y_i)} = \frac{(400 \dots 2000) N_{\text{зн}}}{(x_i \cdot y_i)} \\ 0,5 \frac{\Delta W_{\sum}}{S_i^2} \geq [E_s] \\ \chi = \frac{S_i}{S_0} = \frac{S_i^{\frac{3}{2}}}{S_0^{\frac{3}{2}}} \geq 1,5 \text{ или } \chi = \frac{S_i^{\text{адд.}}}{S_0^{\text{адд.}}} \geq 1,5 \\ e_{\text{накопл}} = \ln \left(\frac{F_{\text{зн}(0)}^{\text{адд.}}}{F_{\text{зн}(i)}^{\text{адд.}}} \right) = (0,27 \dots 0,43) \\ e_{\text{накопл}} = \ln \left(\frac{d_{\text{зн}(0)}^{\text{адд.}}}{d_{\text{зн}(i)}^{\text{адд.}}} \right) = (0,27 \dots 0,43) \\ \chi = \frac{S_i^{\text{адд.}}}{S_0^{\text{адд.}}} \geq 1,5 \\ \sum n_{\text{дисл}} = N_{\text{дисл}} \cong (400 \dots 2000) N_{\text{зн}} \\ \downarrow d_{\text{зн}} \Rightarrow \uparrow \sum S_{\cdot \text{зн}}^{\text{к}} / \uparrow \sum l_{\cdot \text{зн}}^{\text{к}} \\ \downarrow \frac{dd_{\text{ср}}}{dV} \Rightarrow \uparrow \frac{dW_i}{dV} \\ \downarrow d_{\text{зн}} \rightarrow \uparrow N_{\text{зн}} (\uparrow \varepsilon F_{\text{зн}}^{\text{к}}; \uparrow \varepsilon l_{\text{зн}}^{\text{к}}) \Rightarrow (\downarrow \sigma_{\text{н}}, \downarrow \theta^\circ) \Rightarrow \uparrow K_{\text{ад}} \\ \downarrow \frac{dd_{\text{зн}}}{d\varepsilon} \Rightarrow \downarrow \frac{dW_i}{d\varepsilon} \Rightarrow \uparrow K_{\text{адг}} \\ \downarrow W_i \rightarrow \uparrow K_{\text{адг}} \end{array} \right. \quad (7)$$

Список литературы

1. Кротова Н.А., Морозов Л.П., Поляков А.М. Исследование физического состояния и химической активности поверхности, образованной при нарушении адгезионной связи // Проблемы физико-химической механики дисперсных структур и материалов. - Рига.: ЗИТАТНЕ, 1967. – С. 14-37;
2. Кардашов Д.А. Синтетические клеи. - М.: Химия, 1968;
3. Дебройн Н.А. Адгезия. - М.: Издательский, 1954; Дебройн Н.А. Некоторые вопросы адгезии//Химия и технология полимеров. 1961. №6. – 126 с.;
4. Дерягин Б.Д., Кротова Адгезия Н.А. – М.: АН СССР, 1976;

5. Дудчак В.П. Теоретические предпосылки к исследованию адгезионной прочности полимерных конденсационных покрытий с основой//Электронная обработка материалов, 2003, №1, С.27 – 30;
6. Воюцкий С.С. Аутогезия и адгезия высокополимеров.- М.:Ростехиздат. 1960, 216с.;
7. Москвитин Н.И., Склеивание полимеров.- М.: Химия. 1968;
8. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров.- М.: Химия, 1974;
9. Бикерман Я.О. Новые представления о прочности адгезионных связей полимеров/ Успехи химии, 1972. С.1431-1436;
10. Гуль В.Е., Генель С.В. Микрореологические представления о адгезии пленочных полимерных материалов//Адгезия и прочность адгезионных соединений.- М., 1968. С. 30-38;
11. Гуль В.Е., Вахрушина Л.Н. Исследование механизма адгезии в зоне контакта: металл- расплав полимера//Высокомолекулярные соединения. 1976, №1. С.122-126;
12. Лаврентьев В.В. О молекулярно-кинетической трактовки зависимости адгезионной прочности// Высокомолекулярные соединения. 1973, №11. С.2579-2582;
13. Лаврентьев В.В. Клеи и соединения. – М.: МДНТП, 1970, 49с.;
14. Притыкин Л.М., А.А. Аскадский, Е.С. Гальперн. О возможности оценки термодинамической гибкости макромолекул по энергии когезии их сегментов// Высокомолекулярные соединения. 1985, №1. С.24-28;
15. Притыкин Л.М., Емельянов Ю.В. Расчет зависимости поверхностной энергии полимеров от их молекулярной массы// Высокомолекулярные соединения. 1984, №6. С.433-442;
16. Притыкин Л.М. Адгезия/Химическая энциклопедия.- М.: Сов. энциклопедия. 1988 – Т1. С. 35-48;
17. Watanabe T. Grain boundary engineering histocal perspective and future prospects // Mater sci USA, №6, 2011;
18. Мартин Дж. В., Доэрти Дж. Д, Кантор Б. Стабильность микроструктуры в металлических системах.- Кембридж.: Изд. Кем. университета, 1997;
19. Ауст К.Т., Чармелс Б. Энергия и структура зерен. Металлические интерфейсы.- Кливленд, Огайо.: ASM., 2012, 153с.;
20. Саттон А., Баллуфи Р.В. Интерфейсы в кристаллических материалах.- Оксфорд.: Изд. Оксф. университета, 2007;
21. Watanabe T., Nishizawa S., Tsurekawa S. Complex inorganic solid structural stability and magnetic properties of alloys.- N. York.: Springer. 2005, 327p.;

УДК 629.7.002:621.981

ИСПЫТАНИЕ ПРАВИЛЬНО- ГИБОЧНОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ АВИАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Марковцев В. А.¹, Попов А. Г.², Соснин В. В.³, Халилов Ф.Х.⁴

1 – д.т.н. генеральный директор АО «Ульяновский НИАТ»

2 – к.т.н., генеральный директор ООО «Авиапрофиль»

3 – зам главного технолога Филиала ПАО «Ил» - Авиастар

4- начальник НИС АО «Ульяновский НИАТ»

Аннотация. В АО «Ульяновский НИАТ» разработана, изготовлена и испытана установка правильно-гибочная роликовая УПГР, а также проведены ее приемосдаточные испытания в ЗШП авиационного завода в виде опытного изготовления заготовок стрингеров самолета. Испытания проводились на гнутых тонкостенных профилях Z-образного сечения из высокопрочного алюминиевого сплава В950ч в закаленном и состаренном состоянии (Т2) и в свежезакаленном состоянии. Полученные результаты показали что с помощью УПГР может быть получена в основном (на 95%) продольная деформация наиболее сложных заготовок стрингеров из гнутых профилей с высокой производительностью (за 15-30 мин), особенно в свежезакаленном состоянии.

Ключевые слова: Гнутые профили, заготовки стрингеров, алюминиевый сплав, гибка-прокатка, ролики, правка, продольный изгиб, настройка гибочного ролика, свежезакаленное состояние.

TESTING OF THE CORRECT BENDING UNIT IN THE CONDITIONS OF AVIATION PRODUCTION.

Markovtsev V. A.¹, Popov A. G.², Sosnin V. V.³, Khalilov F.H.⁴

1 – Doctor of Technical Sciences, General Director of Ulyanovsk NIAT JSC

2 – Candidate of Technical Sciences, General Director of Aviaprofil LLC

3 – Deputy Chief Technologist of the Branch of PJSC Il - Aviastar

4- Head of the NIS of Ulyanovsk Research Institute JSC

Abstract. Ulyanovsk NIAT JSC has developed, manufactured and tested a correctly bending roller UPGR installation, as well as conducted its acceptance tests in the ZSHP of the aviation plant in the form of pilot production of blanks for aircraft stringers.

Keywords: Bent profiles, stringer blanks, aluminum alloy, bending-rolling, rollers, straightening, longitudinal bending, bending roller adjustment, freshly baked condition.

В 2024 году АО «Ульяновский НИАТ» проводил приемо-сдаточные испытания установки правильно-гибочной роликовой (УПГР) для продольной гибки и правки заготовок из прессованных и гнутых профилей в роликах [1]. Испытания УПГР проводились в ЗШП (см. рис. 1) путем изготовления гибкой-прокаткой в роликах наиболее сложных заготовок стрингеров панелей фюзеляжа самолета с использованием специальной контрольной оснастки.



Рис. 1. Установка правильно-гибочная роликовая на испытаниях

На первом этапе испытаний была выполнена градуировка шкалы механизма, который обеспечивает изменения радиуса продольного изгиба профиля. Для этого исходный прямолинейный гнутый профиль С 27х1,5 был поделен на участки по 500 мм каждый. Профиль был установлен в ролики и выполнена его продольная гибка с разными положениями гибочной клетки, определяемой по шкале продольной гибки на УПГР. В таблице 1 приведены полученные экспериментальные данные по продольному изгибу профиля.

Таблица 1. Зависимость радиуса продольной кривизны профиля от положения гибочной клетки УПГР.

№ участка	1	2	3	4	5	6	7	8
Наименование параметра								
Положение клетки в делениях шкалы на УПГР	13	11	9	7	5	4	3	2
Полученный продольной радиус профиля, мм	4000	5200	6200	7000	7800	9000	10500	12500

При испытании УПГР выполнена поперечная гибка (скрутка) заготовок из закаленного и состаренного гнутого профиля С 27х1,5 [2]. Для этого профиль был поделен на участки по 200 мм каждый. Профиль установлен в ролики и была выполнена его поперечная гибка с разным поворотом гибочной клетки, определяемой по шкале поворота на УПГР. В таблице 2 приведены полученные экспериментальные данные по скрутке профиля.

Таблица 2. Зависимость угла скрутки профиля от поворота гибочной клетки УПГР.

№ участка	1	2	3	4	5	6
Наименование параметра						
Поворот гибочной клетки в делениях шкалы на УПГР	6	5	4	3	2	1
Полученный угол скрутки профиля, градусы	12	8	5,5	3,5	2	0,5

На втором этапе испытаний выполнено изготовление 2 х деталей (стрингеров) из закаленного и состаренного гнутого профиля С 27х1,5 (алюминиевый сплав В95очТ2).

2.1 Стрингер 7 (минимальный радиус продольной кривизны 5,5 м, длина 2,5 м) контролировался на инструментальной плите и на стенде с ШКС. Сначала после продольной гибки на заданные радиуса на заготовке после УПГР образовался боковой изгиб до 250 мм (определялся по инструментальной плите). При последующей правке за 4-5 проходов через ролики боковой изгиб был уменьшен до 3-4 мм (этот боковой изгиб находился в пределах упругой деформации при приложении усилий 10-20 Н) (см. рис. 2).



Рис. 2. Заготовка стрингера 7 на инструментальной плите после правки

Был сделан вывод, что правка для исключения бокового изгиба профильной заготовки должна начинаться сразу одновременно с продольной гибкой. Для точного совпадения заготовки с ШКС требовались доводочные

работы на отдельных участках профильной заготовки с использованием ручного инструмента.

2.2 Стрингер 13 (минимальный радиус продольной кривизны 5,5 м, длина 1,2 м) контролировался на инструментальной плите и КДП. После продольной гибки на заданные радиуса на заготовке с правкой бокового изгиба после УПГР отклонение от поверхности КДП составляло от 2-5 мм. При последующей правке за 4-5 проходов через ролики УПГР отклонение от КДП было уменьшено до 0,5-1 мм (это отклонение находилось в пределах упругой деформации и устранялось при приложении усилий 10-20 Н). На рис. 3 представлена заготовка стрингера 13 на КДП после правки на УПГР.



Рис. 3. Заготовка стрингера 13 на КДП после правки на УПГР

Третий этап испытаний предполагал изготовление заготовок стрингеров сотрудниками цеха 224 прошедшими обучение и инструктаж на УПГР. Для испытаний были выбраны заготовки стрингера 6 (минимальный радиус продольной кривизны 10 м и длина 5,5 м) и стрингера 8 (минимальный радиус продольной кривизны 8 м и длина 3,5 м). Испытания сначала проводились на гнутых профилях из закаленного и состаренного алюминиевого сплава В950с (состояние Т2) с одновременным выполнением на УПГР продольной гибки и правки. На рис. 4 представлена заготовка стрингера 6 полученная после 12 проходов через ролики УПГР с удовлетворительным совпадением с ШКС на контрольном стенде.



Рис. 4. Заготовка стрингера 6

На рис. 5 представлена заготовка стрингера 8 полученная после 8 проходов через ролики УПГР с удовлетворительным совпадением по ШКС на контрольном стенде после доводки ручным инструментом.

Последующие испытания на гнутых профилях из свежезакаленного алюминиевого сплава В950ч с одновременным выполнением продольной гибки и правки показали возможность получения заготовок стрингеров за 2-3 прохода через ролики УПГР с точностью совпадения по ШКС на 1-3 мм (данное отклонение быстро устраняется (10-15 мин) доводкой с помощью ручного инструмента).



Рис. 5. Заготовка стрингера 8

Выводы:

1. Использование УПГР при продольной гибки заготовок стрингеров из гнутых профилей С27 Z-образного сечения позволяет работать с алюминиевыми сплавами в закаленном и состаренном состояниях и выполнять основные деформации заготовок (на 93-97%) без использования ручного ударного инструмента. Осуществляя продольную гибку и правку (регулирование бокового изгиба) заготовок стрингера в роликах на УПГР можно сократить в 2 раза трудоемкость гибочных и доводочных работ, которые в настоящее время выполняются вручную.

2. Наибольшая эффективность УПГР показала при работе с профилями из алюминиевых сплавов в свежезакаленном состоянии. Число проходов через ролики УПГР могут быть уменьшены в несколько раз, а также упрощается выполнение доводочных работ.

3. Доводочные работы с заготовками стрингеров после деформации на УПГР целесообразно выполнять на специализированных доводочных приспособлениях.

4. Для уменьшения объема работ на УПГР необходимо готовить партии заготовок стрингеров с похожими параметрами по продольной кривизне, что сократит время работы УПГР не менее чем на 50%.

Список литературы

1. Патент РФ №207052 МКИ В 21 D 7/03 Устройство для гибки длинномерных профильных деталей / Марковцев В. А. и Попов А. Г.. патент. ООО «Авиапрофиль» заяв. 16.01.21; опуб. 08.10.21.
2. Патент РФ №211494 МКИ В 21 D 11/14 Устройство для скрутки длинномерных деталей из профиля / Марковцев В. А., Попов А. Г., Соснин В. В., Баранов А. С. патент. ООО «Авиапрофиль» заяв. 12.02.22; опуб. 08.06.22.

УДК 691:678.686

ЭПОКСИДНЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАПОЛНЕННЫЕ КАЛЬЦИЙ МАГНИЕВЫМИ СИЛИКАТАМИ

Твердов И.Д.¹, Валеева А.Р.², Гимранова А.Р.³, Готлиб Е.М.⁴

1 – инженер 1 категории, Комплексная лаборатория «НаноАналитика», г. Казань

2 – канд. техн. наук, ассистент каф. «Материаловедение, сварка и производственная безопасность», КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань

3 – канд. техн. наук, доцент каф. «Материаловедение, сварка и производственная безопасность», КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань

4 – д-р техн. наук, профессор каф. «Технологии синтетического каучука», КНИТУ, г. Казань

Аннотация. Кальций-магниево-силикатные материалы представляют большой интерес для эпоксидных антифрикционных износостойких материалов, так как оксиды магния характеризуются высокой теплопроводностью, что обеспечивает лучший отвод тепла из зоны трения. В качестве сырья для их получения, перспективно применение отходов промышленности и сельского хозяйства, в частности, золы рисовой шелухи и металлургического шлака. Рентгенофазовый анализ показал наличие в образце наполнителя на основе первого отхода – преимущественно диопсида – 97%, второго – 23 % диопсида и 77 % акерманита. Средний размер частиц и пористость меньше у наполнителя, полученного переработкой отходов черной металлургии. Исследованные диопсид-содержащие наполнители закономерно уменьшают коэффициент трения, увеличивают износостойкость и термостойкость, а также адгезию эпоксидных покрытий к стали. Несколько больший эффект оказывает менее пористый и более высокодисперсный кальций-магниево-силикат на основе отхода производства чугуна.

Ключевые слова: диопсид-содержащие наполнители, кальций-магниево-силикатные материалы, эпоксидные полимеры, отходы, зола рисовой шелухи, металлургический шлак.

EPOXY ANTIFRICTION MATERIALS FILLED WITH CALCIUM MAGNESIUM SILICATES

Tverdov I.D.¹, Valeeva A.R.², Gimranova A.R.³, Gotlib E.M.⁴

1 – engineer of the 1st category, Integrated Laboratory "«NanoAnalytics»", Kazan

2 – Ph.D., assistant department "«Materials Science, Welding and Industrial Safety»", KNRTU - KAI named after. A.N. Tupolev, Kazan

3 – Ph.D., associate professor of the department "«Materials Science, Welding and Industrial Safety»", KNRTU - KAI named after. A.N. Tupolev, Kazan

4 – Doctor of Technical Sciences, Professor of the department "«Technologies of synthetic rubber»", KNRTU, Kazan

Abstract. Calcium-magnesium silicates are of great interest for epoxy antifriction wear-resistant materials, since magnesium oxides are characterized by high thermal conductivity, which provides better heat removal from the friction zone. As a raw material for their production, it is promising to use industrial and agricultural waste, in particular, rice husk ash and metallurgical slag. ackermanite The average particle size and porosity are lower for filler obtained by processing waste from ferrous metallurgy. The studied diopside containing fillers naturally reduce the coefficient of friction, increase wear resistance and heat resistance, as well as the adhesion of epoxy coatings to steel. A slightly greater effect is exerted by less porous and more highly dispersed calcium-magnesium silicate based on cast iron production waste.

Keywords: diopside containing fillers, calcium magnesium silicates, epoxy polymers, waste, rice husk ash, metallurgical slag.

Введение

Кальций-магниевые силикаты, как диопсид содержащие наполнители ($\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$), представляют большой интерес для эпоксидных антифрикционных износостойких материалов, так как оксиды магния характеризуются высокой теплопроводностью, что обеспечивает лучший отвод тепла из зоны трения [1].

В качестве сырья для их получения, с точки зрения экономики замкнутого цикла, перспективно применение отходов промышленности и сельского хозяйства, в частности, золы рисовой шелухи (ЗРШ) [2] и металлургического шлака (МШ) [3].

Экспериментальная часть

В работе использовалась эпоксидная диановая смола ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), отверждаемая аминоалкилфенолом (АФ-2) (ТУ 2494-052-00205423-2004) при комнатной температуре в течение 7 суток

Кальций-магниевые силикаты (КМС) получали на основе: КМС₁-отхода производства чугуна, так называемого металлургического шлака, путем сплавления при 1300 °С имеющих высокую активность исходных компонентов (окислов кремния, кальция и магния), для проведения процесса их взаимодействия [3].

КМС₂ – полученной при 500 °С золы рисовой шелухи и доломита твердофазным методом при температуре 1100 °С, с использованием в качестве плавня борной кислоты [4].

Рентгенофазный количественный анализ (РКФА) проводился на многофункциональном дифрактометре Rigaku SmartLab при параметрах съёмки: угловой интервал от 3° до 65°, с шагом сканирования 0,02, с экспозицией 1 секунда в точке.

Размер частиц наполнителей определялся методом лазерной дифракции в соответствии с ГОСТ Р 8.777-2011.

Площадь удельной поверхности пор КМС оценивали по адсорбции газа методом Брунауэра-Эммета-Теллера, согласно ISO 9277:2010, объем пор по методу ВЖН, согласно ISO 15901-2, на анализаторе площади поверхности и размера пор «Nova 1200e».

Для оценки износостойкости и коэффициента статического трения, эпоксидные покрытия наносились на алюминиевый лист толщиной 1мм и затем шлифовались до Ra=1,00-1,20 мкм.

Износостойкость наполненных эпоксидных материалов определялась на вертикальном оптиметре ИЗВ-1 при следующем режиме: удельное давление контртела на испытываемую поверхность образца $P = 1$ МПа, скорость скольжения $V_{\text{ск}} = 1$ м/сек, без смазки.

Исследования трибологических свойств наполненных материалов проводились на автоматизированной машине трения (Tribometer, CSM Instruments, Швейцария), управляемой компьютером, по стандартной схеме испытания «шарик-диск» ASTM G99–959, DIN50324 и ISO 20808. Линейная

скорость при испытании составляла 8,94см/сек, частота выборки – 10 Гц, температура – 25 °С, влажность – 20 %.

Адгезионная прочность оценивалась методом отрыва на образцах стали по ГОСТ 32299- 2013

Электронно-микроскопический анализ образцов наполнителей проводили на растровом микроскопе Jeol JSM7001F с использованием для определения элементного состава энергодисперсионного детектора Oxford INCA X-max 80.

Термостойкость определялась на синхронном термоанализаторе STA 6000 PerkinElmer по ГОСТ 33403-2015 в интервале температур 30 – 600 °С со скоростью нагрева 10 град/мин, в инертной среде азота.

Обсуждение результатов.

Рентгенофазовый анализ (рис. 1 и 2) показал наличие в образце КМС₁ – 23 % диопсида и 77 % акерманита, а в КМС₂ преимущественно диопсида 97 %.

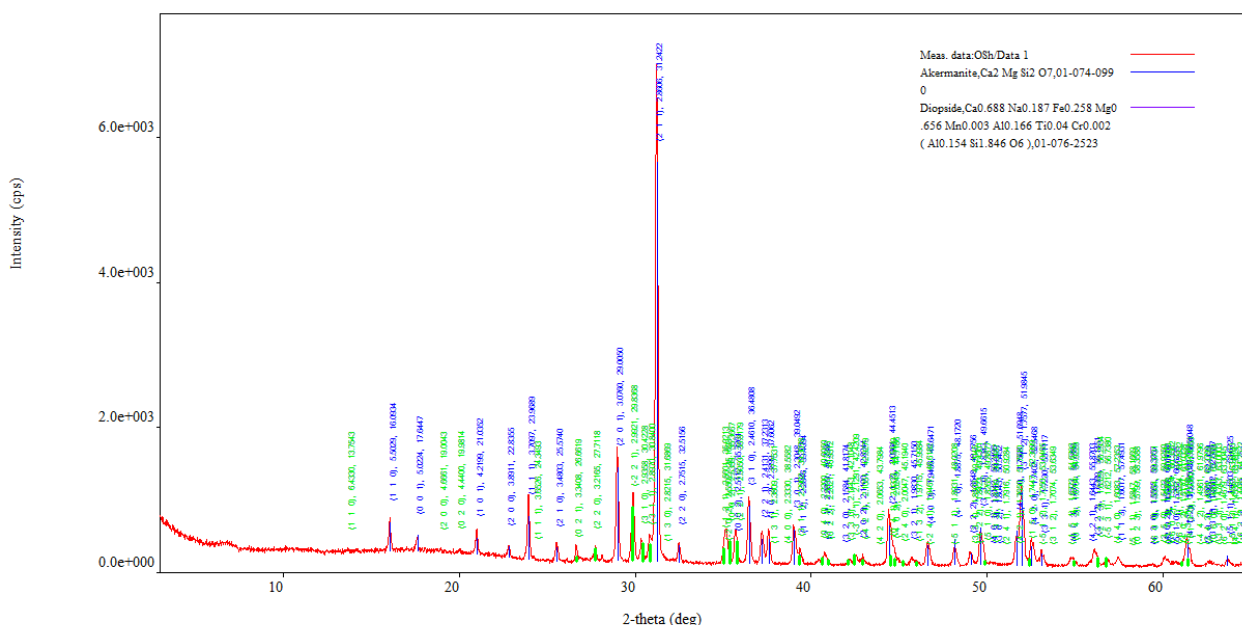


Рис. 1. РКФА спектр наполнителя на основе отходов черной металлургии

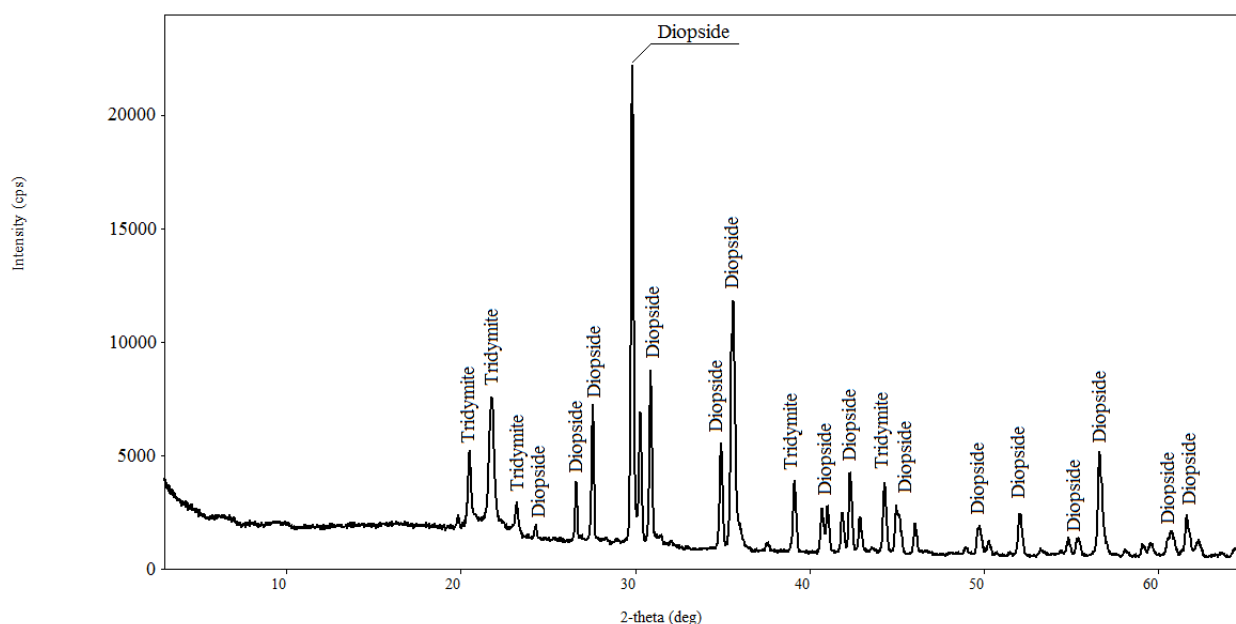
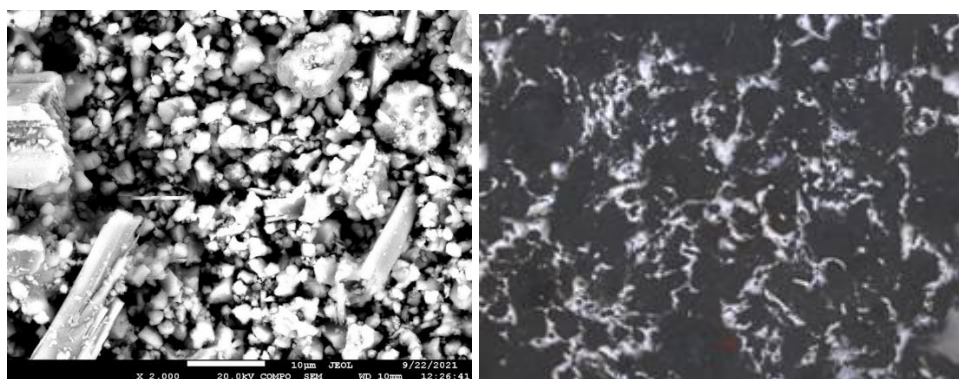


Рис. 2. РКФА-спектр наполнителя, полученного на основе золы рисовой шелухи

Акерманит ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), также как и диопсид ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), является кальций магниевым силикатом. Они отличаются по строению кристаллической решетки, так как диопсид кристаллизуется в моноклинной сингонии, а акерманит- в тетрагональной сингонии.



а

б

Рисунок 3. Электронно-микроскопические снимки диопсид содержащих наполнителей на основе: а) металлургического шлака; б) золы рисовой шелухи, увеличение 1000х

Структура этих магниевых силикатов (рис. 3) существенно отличается, и у наполнителя на основе МШ видны отдельные крупные иголки.

Средний размер частиц меньше и их удельная поверхность больше у наполнителя, полученного переработкой отходов черной металлургии (табл. 1). В тоже время у МКС₁ наблюдается наличие частиц большого размера (рис. 3 а), то есть у него менее однородная структура.

Таблица 1– Средний размер и удельная поверхность частиц кальций магниевых силикатов

Тип наполнителя	Средний размер частиц, мкм	Удельная поверхность $\text{см}^2/\text{см}^3$
МКС ₂	76,1	1958
МКС ₁	12,4	35264

У кальций магниевых силиката на основе металлургического шлака значительно меньшая пористость, по сравнению с наполнителем, синтезированным на основе ЗРШ (табл. 2). Это связано, как с наличием в золе рисовой шелухи остаточных органических компонентов [4], так и более высокой температурой обжига при получении КМС₁

Таблица 2 – Характеристики пористости наполнителей

Тип наполнителя	Удельная поверхность пор БЭТ, $\text{м}^2/\text{г}$	Общий объем пор по ВЖ, $\text{см}^3/\text{г}$	Средний диаметр пор по ВЖ, нм
КМС ₂	0,614	0,001	4,113
КМС ₁	0,475	-	-

Исследованные диоксид содержащие наполнители закономерно уменьшают коэффициент трения (до 40-42 %) и увеличивают износостойкость (до 33-47 %) эпоксидных материалов (табл. 3). То есть улучшаются их антифрикционные свойства. Кроме того, силикатные наполнители увеличивают адгезию эпоксидных покрытий к стали, примерно на 20-25 %.

Обладая высокой поверхностной энергией, диоксид способен к сравнительно высокому адсорбционному и адгезионному взаимодействию с эпоксидной смолой [5].

Таблица 3 – Эксплуатационные свойства эпоксидных материалов, наполненных МКС

Тип наполнителя	Адгезия к стали, МПа	Износ, $\cdot 10^{-6}$, м	Коэффициент трения
Базовый состав	3,2	17,7	0,44
КМС ₁	3,9	9,7	0,14
КМС ₂	3,7	10,8	0,17

Примечание : Содержание наполнителя 20 мас. ч. на 100 мас.ч ЭД-20

При этом, несмотря на большее содержание диоксида в составе наполнителя, полученного на основе ЗРШ, КМС₁ обеспечивает меньший

износ и коэффициент трения и большую адгезионную прочность эпоксидных композиций (табл. 3).

В принципе силикаты с цепочечной структурой, такие как диопсид, являются более эффективными наполнителями, чем минералы с островной структурой, такие как акерманит [6]. Однако, в нашем случае лучший комплекс свойств эпоксидных материалов достигается при наполнении КМС₁. Это можно объяснить его меньшей пористостью и меньшим средним размером частиц (табл. 1 и 2).

Значительное снижение коэффициента статического трения наполненных кальций магниевыми силикатами эпоксидных материалов можно связать с тем, что, согласно литературным данным [7], диопсид представляет собой керамическую фазу с превосходными термическими свойствами (теплопроводность его примерно 2,7 Вт/мК).

Положительное действие КМС на антифрикционные свойства объясняются [1] не только тем, что они отводят тепло от зоны трения, но и образованием на трущихся поверхностях соединений с высокой износостойкостью и твердостью [8].

Таким образом, на поверхности трения протекают процессы трибоокислительной деструкции. Известно [8], что из-за малой теплопроводности полимеров, в узлах трения их трущиеся поверхности быстро разогреваются, поэтому в случае низкой температуры размягчения, они начинают деформироваться, и подшипник выходит из строя.

Поэтому, для оценки возможности эксплуатации наполненных эпоксидных материалов в условиях повышенных температур, возникающих в узлах трения, важно было оценить влияние на их термостойкость исследованных диопсид содержащих наполнителей

Установлено, что наполнение ими замедляет процесс деструкции, увеличивая характеристические температуры потери массы эпоксидных композиций (табл. 4).

Таблица 4 – Характеристические температуры потери массы наполненных КМС эпоксидных материалов

Тип наполнителя	Без наполнителя	КМС ₂	КМС ₁
Температура 10%потери массы	343	362	371
Температура 50%потери массы	413	441	447

Примечание: Содержание наполнителя 20 мас. ч. на 100 мас. ч. ЭД-20

Несколько больший эффект оказывает менее пористый кальций магниевый силикат на основе МШ.

Одновременно несколько растут температуры максимумов экзотермических процессов, фиксирующихся в диапазоне температур

350-550 °С на ДТА кривых. Так как, эти экзотермические эффекты наблюдаются одновременно с существенными потерями массы, можно предположить, что имеет место деструкция непрореагировавших компонентов эпоксидной композиции[9].

Таким образом, кальций магниевые силикаты являются эффективными наполнителями эпоксидных полимеров, как основы антифрикционных материалов [10,11].

Заключение

Диопсид содержащие наполнители, полученные на основе отходов производства чугуна и рисовой крупы, обеспечивают значительное снижение коэффициента трения и рост износостойкости антифрикционных эпоксидных материалов. Одновременно растет термостойкость наполненных композиций и их адгезия к стали.

Несколько больший эффект улучшения эксплуатационных характеристик эпоксидных материалов достигается при применении кальций магниевого силиката на основе металлургического шлака, что может быть связано с его меньшей пористостью и большей степенью дисперсности.

Список литературы

1. Колесников, В.И. Эффективные упругие характеристики антифрикционных композитов на эпоксидной основе / В.И. Колесников, В.В. Бардушкин, А.В. Лапицкий, А.П. Сычев, В.Б. Яковлев // Вестник Южного научного центра РАН. – 2010. – Т. 6. – № 1. – С. 5–10.
2. Твердов, И.Д. Диопсид как наполнитель эпоксидных полимеров / И.Д. Твердов, Е.М. Готлиб, Р.Ш. Нцуму, Е.С. Ямалеева // Южно-Сибирский научный вестник. – 2023. – № 4. – С. 11-15.
3. Валеева, А.Р. Эпоксидные материалы, модифицированные золой рисовой шелухи, волластонит- и диопсидсодержащими наполнителями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.6.11, 2.6.17 / Валеева Алина Равиловна. Казанский (Приволжский) федеральный ун-т. – Набережные Челны, 2023. – 18 с.
4. Rohani, A.B. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk / A.B. Rohani, Y. Rosiyah, N.G. Seng // Procedia Chemistry. – 2016. – V. 19. – P. 189-195.
5. Lee, S. Effect of a ZnO addition on the thermal properties of diopside-based glass ceramics for LED packages / S. Lee, S. Kang // Contemporary Engineering Sciences, 2016. – V. 9. – N. 29. – P. 1425-1436.
6. Bernardo, E. Novel akermanite-based bioceramics from preceramic polymers and oxide fillers / E. Bernardo, J.F. Carlotti, P.M. Dias, [et al.] // Ceramics International. – 2014. – V. 40. – I.7. – Part A. – P. 9473-9484.
7. Briscoe, B. J. Tribological applications of polymers and their composites: past, present and future prospects / B.J. Briscoe // Tribology of Polymeric Nanocomposites / Ed. by K. Friedrich. – Amsterdam, 2008. – P. 1-14.
8. Бахарева, В.Е. Улучшение функциональных свойств антифрикционных полимерных композитов для узлов трения скольжения / В.Е. Бахарева, Г.И.

Николаев, А.В. Анисимов // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – 2009. – Т. LIII. – № 4. – С. 4–18.

9. Валеева, А.Р. Термостойкость эпоксидных материалов, наполненных рисовой и гречневой шелухой и их золой / Е.М. Готлиб, Р.Ш. Нцуму, А.Р. Валеева, А.Р. Гимранова // Материалы IX Международной конференции «Композит-2022». Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология. – Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2022. – С. 171-174.

10. Готлиб, Е.М. Сравнение модифицирующего действия в эпоксидных композициях диоксид содержащих наполнителей на основе техногенного и растительного сырья / Е.М. Готлиб, И.Д. Твердов, Э.Р. Галимов, [и др.] // Известия КГАСУ. – 2023. – №3 (65). – С. 36-44.

11. Gotlib, E. Epoxy Materials Filled with Buckwheat Husk Ash / E. Gotlib, R.S. Ntsoumou, A. Valeeva, [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2023.– V. 282. – P. 55–64.

УДК 629.735.33(07)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДАЛЬНЕ-МАГИСТРАЛЬНОГО БПЛА С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ «УТКА»

Трубякова Е.М.¹, Дмитриенко Г.В.²

1 – аспирант 1 года обучения кафедры «Самолетостроение» УлГТУ, г. Ульяновск

2 – д.т.н., профессор кафедры «Самолетостроение» УлГТУ, г. Ульяновск

Аннотация. В работе спроектирована конструкция многофункционального БПЛА роторного типа (пентакоптер) с аэродинамической системой «утка», заявляющий более высокие по отношению к существующим БПЛА аэродинамические качества, высокую транспортную эффективность и меньшую массу.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты (БПЛА), проектирование БПЛА, БПЛА с аэродинамической схемой «утка», пентакоптер, аккумуляторная батарея.

DESIGN OF THE STRUCTURE A LONG-RANGE UAV WITH AN AERODYNAMIC SYSTEM "DUCK"

Trubyakova E.M.¹, Dmitrienko G.V.²

1 – postgraduate student of 1 year of study at the Department of "Aircraft Engineering" UISTU, Ulyanovsk

2 – doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Aircraft Engineering" UISTU, Ulyanovsk

Abstract. The paper designs a multifunctional rotary-type UAV (pentacopter) with an aerodynamic system "duck", claiming higher aerodynamic qualities in relation to existing UAVs, high transport efficiency and lower weight.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs), UAV design, UAV with an aerodynamic system "duck", pentacopter, rechargeable battery.

Важным этапом создания любого технического средства является проектирование конструкции. Под проектированием понимают определение оптимального конструктивного оформления, присваивание уникальных характеристик, обеспечивающих более эффективное выполнение либо традиционных для аппарата функций, либо новых народнохозяйственных, гражданских функций, выполнение которых другими способами или невозможно, или неэффективно. Этап проектирования принято рассматривать от момента проработки идей до испытания опытного образца изделия, включает в себя решение различных по своему типу задач, таких как:

- поиск технических идей, решений и физических принципов действия, основанных на исследовании достижений научно-технического прогресса.

- выбор рационального технического и технологического решения при заданных параметрах физического принципа действия.

- определение и выбор оптимальных значений параметров выбранного решения, к которым принято относить размеры элементов, расстояния между ними, массу, температуру, частоту колебаний, напряжение, характеристики надежности и ряд других показателей.

- конструирование и проработка технической документации и рабочих

чертежей. Данный этап считается самым трудоемким, несмотря на почти полную автоматизацию производства. Требуется технического и творческого подхода.

- оценка инженерных моделей с применением компьютерных технологий.

- планирование и проведение натурного эксперимента, обработка результатов. Подтверждение работоспособности конструкции и расчетных показателей эффективности [16].

Проектирование БПЛА начинается с его изучения базовой конструкции и конфигурации, добиваясь желаемого технического результата, к которому мы стремимся.

Для выявления слабых мест конструкции и его конфигурации на этапе проектирования БПЛА, проведем системный анализ упрощенной базовой конструкции БПЛА.

Структура и принцип работы компонентов БПЛА самолетного типа

Аэродинамика. Конструкция БПЛА спроектирована по аэродинамической схеме «утка», при которой горизонтальное оперение расположено впереди основного крыла. К преимуществам данной аэродинамической схемы относят отсутствие потерь «на балансировку», т.к. в данной конструктивной схеме для компенсации пикирующего момента основного крыла стабилизатор, размещенный впереди крыла, создает положительную подъемную силу, поддерживает носовую часть БПЛА, и управляемость в штопоре. Последнее преимущество основано на том, что в схеме «утка» почти нет эффекта «сваливания», это связано с тем, что основное крыло смещено назад от центра тяжести самолета и стабилизирует корпус при падении. Кроме того, при потере скорости или большом угле атаки, срыв воздушного потока происходит прежде в стабилизаторе, и БПЛА опуская переднюю часть корпуса («клюет»), предотвращая срыв потока на основном крыле и переводя корпус БПЛА в режим пикирования.

Среди недостатков данной аэродинамической схемы выделяют «тенденции к клевку» и большую радиолокационную заметность.

Выбрав классическую схему центровки БПЛА схемы утка изображенную на рис. 1.

Используем толкающий двигатель, смонтированный непосредственно на задней стороне фюзеляжа, электрооборудования, размещенного на корпусе БПЛА, и подъемного двигателя, прикрепленного к планеру посредством двух несущих рычагов, состоящих из углеродных трубок, расположенных параллельно друг другу на верхней стороне крыльев. В качестве несущих рычагов используем углеродные трубки диаметром 20 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 1 м.

При установке подъемных двигателей должны быть соблюдены: конструктивные, аэродинамические и определенные требования

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России
соответствующие назначению БПЛА, указанные ниже.

1) Расстояние между центрами двигателей по оси вращения должно быть как можно меньше.

2) Площадь кругов, очерченных лопастями при вращении, должна оставаться вне площади, занимаемой БПЛА.

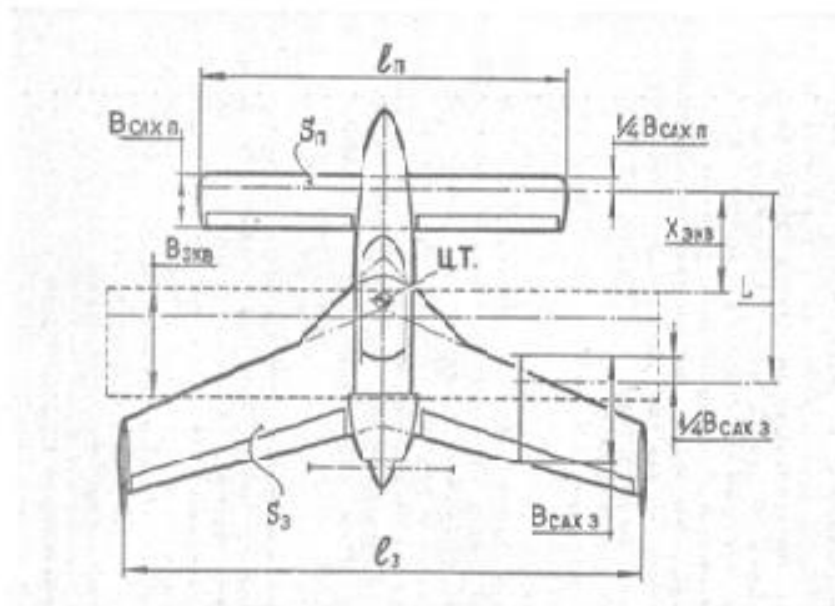


Рис. 1. БПЛА аэродинамической схемы «утка»

Первое требование относится к конструкторской категории и необходимо для уменьшения момента сил, действующего на несущие рычаги, а следовательно, и нагрузки на БПЛА. При выполнении данного требования следует учитывать, что минимальное расстояние между центрами по оси вращения задних двигателей, служащих вертикальному взлету, ограничено длиной лопасти толкающего двигателя.

Второе требование, из области аэродинамики, обеспечивает максимальное использование подъемной силы двигателей. В противном случае подъемная сила двигателя будет уменьшаться в результате рассеивания воздушного потока, исходящего от лопасти вниз по вертикальному направлению, пропорционально степени покрытия крылом площади окружности, охватываемой при вращении.

В целях картографирования, а также электронно-оптической разведки стратегических объектов БПЛА требуется оснастить видеокамерой, установленной спереди в нижней части фюзеляжа. Допустимо съемное крепление аппаратуры, при использовании БПЛА как транспортного средства-перевозчика. При вращении возникает ситуация, что лопасти могут попасть в поле зрения объектива камеры, если БПЛА сам выступает в качестве фиксирующего устройства, и негативно сказаться на качестве изображения.

Для обеспечения устойчивого равновесия БПЛА в воздухе, двигатели установить на верхней части крыльев. Место крепления к планеру

толкающего двигателя, обеспечивающего горизонтальный полет, расположим в задней части фюзеляжа.

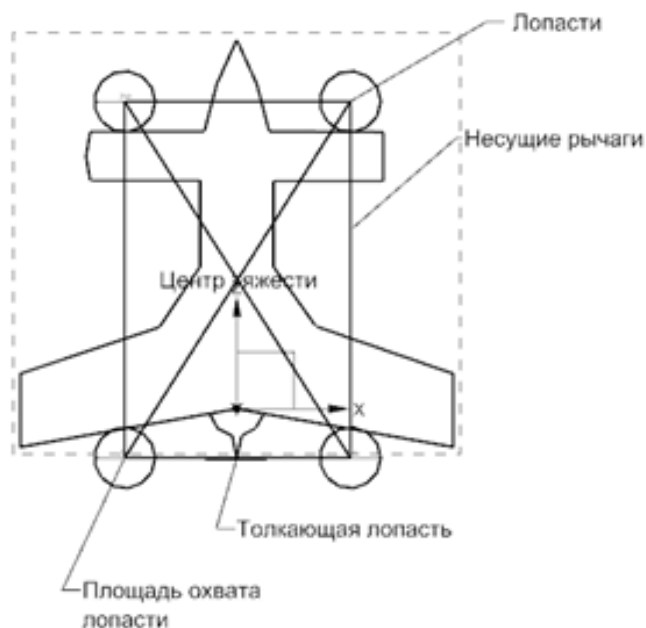


Рис. 2. Вид БПЛА сверху

Турбулентный поток воздуха, создаваемый установленной спереди лопастью, воздействует на одно из крыльев снизу, а на второе сверху, то есть возникает стимуляция закрутить самолет вокруг главной оси и, нарушить его горизонтальное равновесие по крену. Для сохранения горизонтального равновесия необходимо создать на крыльях различную подъемную силу за счет изменения положения мелких подвижных частей – элеронов – на задней части крыльев. А это приводит к увеличению сопротивления воздуху и расхода энергии самолета и уменьшению времени полета. Вид сверху схемы расположения двигателей на планере показан на рисунке 2.

Энергетическая система

Энергетическая система БПЛА состоит из двух параллельно соединенных литий-полимерных аккумуляторных батарей (АБ) и четырех преобразователей напряжения со стабилизированными выходными напряжениями.

Значение рабочего напряжения каждой из АБ, используемых в качестве источника энергии, равно 22,2 В, их энергоемкость составляет 5000 мАч.

Преобразователи напряжения преобразуют относительно высокие напряжения АБ в требуемые стабильные напряжения с низким значением. Первый снабжает полетный контроллер, включая его комплектующие, энергией напряжением 5В, второй снабжает сервоприводы и низковольтную цепь электронного регулятора скорости тягового двигателя энергией напряжением 5 В, третий снабжает видеопередатчик энергией напряжением 12 В, а четвертый снабжает камеру энергией напряжением 8,4 В. За исключением преобразователей напряжения, входящих в состав

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России комплектующих ПК, остальные преобразователи напряжения собраны в один блок и размещены внутри фюзеляжа.

Координаты центра тяжести (ЦТ) «утки» можно рассчитать по следующим известным формулам:

$$X_t = \frac{\sum G_i x_i}{G}, \quad Y_t = \frac{\sum G_i y_i}{G}, \quad (1)$$

где X_t и Y_t – координаты центра тяжести летательного аппарата; x_i и y_i – координаты ЦТ отдельных частей летательного аппарата; G_i – вес отдельных частей летательного аппарата; G – общий вес летательного аппарата.

При этом центр тяжести БПЛА аэродинамической схемы «утка» [8–10] рассчитывался на основе методики, приведенной в литературе.

Система питания

В систему питания БПЛА входит пять бесколлекторных электродвигателей и их электронных регуляторов скорости и два сервомеханизма. Функциональная блок-схема электрических цепей беспилотного аппарата, по аэросхеме конкретно для этой проектировки показана на рисунке 3.

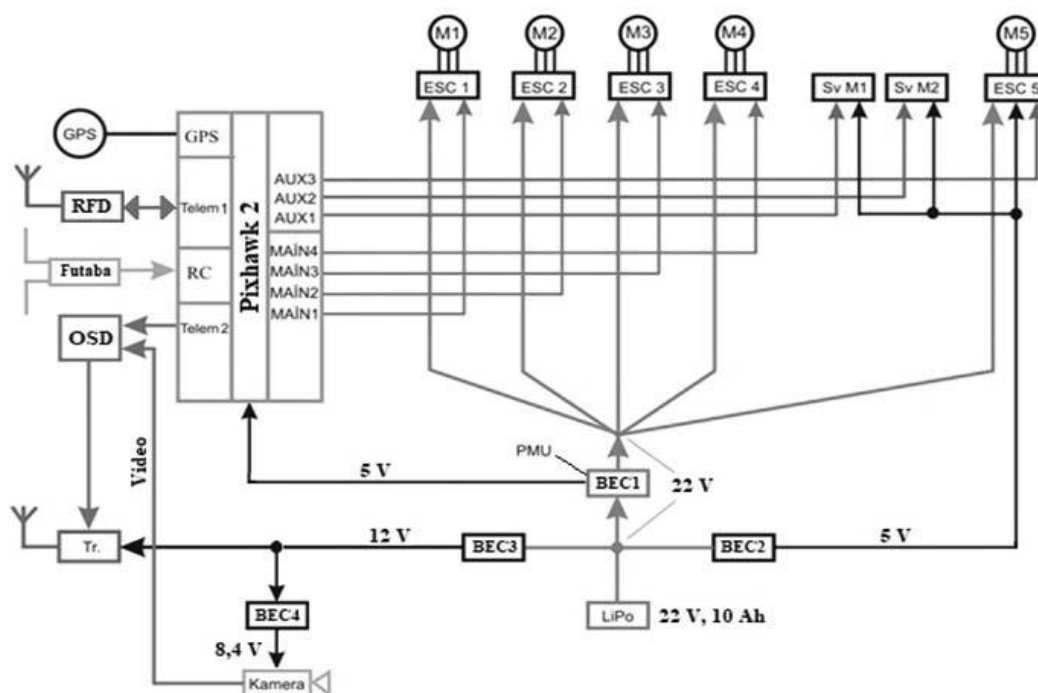


Рис. 3. Функциональная блок-схема электрических цепей конвертоплана

Лопасть вместе с бесколлекторным электродвигателем и его электронным регулятором скорости образуют лопастно-моторную группу (ЛМГ). Четыре ЛМГ служат вертикальному взлету и посадке и одна ЛМГ – горизонтальному полету «утки». В качестве исполнительного органа для управления двумя элеронами, подвижно закрепленными на правом и левом крыльях, используются сервомеханизмы. Элероны стабилизируют воздушный баланс беспилоника во время выполнения «тангажа», рысканья»

и «крена». Принципы построения системы питания летательного аппарата подробно проанализированы в литературе.

ESC (Elektron speed controller), или электронный регулятор скорости, схематично расположен между аккумулятором и двигателем и подсоединяется к ним двумя и тремя проводами соответственно. В качестве оптимального выхода размещаем ESC на нижней стороне двигателей. Во-первых, за счет электропроводности углерода значительно снижается воздействие электромагнитных помех от проводов на окружающие устройства. Во-вторых, длина силовых кабелей, соединяющих двигатель и ESC, минимальна. [4].

Расположение и направление установки толкающего двигателя на планере требует того, чтобы его ESC находился внутри фюзеляжа. В этом случае для улучшения температурного режима целесообразно выбрать относительно большой коэффициент запаса мощности ESC, либо обеспечить поток воздуха, служащий для передачи тепла через фюзеляж [5–7].

Приемник РУ

Приемник РУ не выполняет вычислительных операций, и его вес не оказывает существенного влияния при равномерном распределении нагрузки, его месторасположение, например, относительно ЦТ ЛА, не является определяющим. При размещении приемника РУ требуется, чтобы токопроводящие элементы конструкции ЛА не закрывали его антенну в направлении земли. Также для повышения надежности приема сигнала используются двухлучевые антенны, установленные под углом 90° друг к другу. Таким образом, учитывая малые геометрические размеры, относительно легкий вес и изготовление планера из радиопрозрачного материала, было принято решение поместить приемник РУ в секции, созданной внутри фюзеляжа.

В ходе испытательных полетов КП было выполнено надежное радиоуправление на расстоянии 500 м [12].

Как было сказано в начале, КП предназначался для картографирования, и используемая для этой цели видеокамера была неподвижно прикреплена в передней части к нижней стороне фюзеляжа. С целью обеспечения равномерного распределения веса ЛА относительно ЦТ и снижения влияния на аэродинамические качества планера корпус видеокамеры был расположен внутри фюзеляжа. При этом её объектив выходит за пределы фюзеляжа и при горизонтальном полете наводится на землю.

В связи с аналогичными режимами работы требования к расположению видеопередатчика могут быть применены и к бортовому телеметрическому устройству. Поскольку по сравнению с видеопередатчиком и приемником GPS телеметрическое устройство работает с длинноволновыми (низкочастотными) радиосигналами, его расположение в нижней или верхней части фюзеляжа не имеет решающего значения. С учетом влияния веса на условия равновесия и вышеизложенного, телеметрическое устройство было

размещено вблизи центральной оси планера и закреплено в верхней части фюзеляжа.

Отражение от поверхности

Возможность обнаружения летательного аппарата во время полета различными техническими средствами остается актуальным вопросом. Основным параметром, характеризующим вероятность обнаружения, используемым в качестве показателя техничности и секретности, является коэффициент отражения от поверхности.

Отражение от поверхности зависит от габаритных размеров летательного аппарата и параметров радара (генератора), генерирующего направленные на ЛА электромагнитные волны. Согласно отчетным книгам и опросникам, значение коэффициента отражения от поверхности летательного аппарата небольшого размера составляет $0,1-0,01 \text{ м}^2$ ($-10... -20 \text{ дБ}$). В летательных аппаратах средних размеров отражение от поверхности составляет 30 м^2 и выше. Учитывая изготовление БПЛА из полимерно-композитного материала на диэлектрической основе, электромагнитные волны, генерируемые радаром, поглощаются поверхностью ЛА и не отражаются. Эта функция снижает вероятность обнаружения ЛА радаром [14].

Акустическое обнаружение

Из-за низкого уровня шума бесколлекторных электродвигателей, используемых в ЛА, вероятность обнаружения БПЛА акустическими средствами обнаружения очень мала [15]. Коэффициент визуального обнаружения зависит от уровня освещенности ЛА и рассчитывается по формуле (2).

$$p = \frac{\Phi_r}{\Phi_0} \quad (2)$$

где Φ_r – световой поток, отраженный от поверхности; Φ_0 – световой поток, падающий на поверхность.

Диапазон яркости света, который может поглотить человеческое зрение, очень велик ($10-6...106 \text{ кд}\cdot\text{м}^2$). Изготовление разрабатываемого БПЛА светло-голубого (небесного) цвета снижает вероятность его визуального обнаружения на малых высотах ($200-300 \text{ м}$) [16, 17].

Испытания

Проведя всесторонний обзор и анализ данной и желаемой конструкции, была составлена Матрица целевых показателей и ресурсных ограничений. На основании этой матрицы были созданы математические и цифровые модели, которые были выполнены на ПО типа Ansys и Fidesys. Математические модели испытываются и отлаживаются в процессе моделирования на Simulink Matlab 2022.

Испытания конструкций БПЛА проводятся на базе прикладного ПО типа Ansys или Fidesys, реализующего в себе многопараметрический подход и единственность решения на этапах предварительного и эскизного проектирования, позволяет совершенствовать процесс и выявлять недочеты

конструкции на этапе проработки. Моделирование и анализ конструкций БПЛА позволит избежать дорогостоящих и длительных циклов изготовления.

Также использование ПО позволит просчитывает возможные риски при конвертации модульной конструкции. То есть в процессе тестирования, видоизменив раму дрона, мы можем из пентакоптера сделать трикоптер, или наоборот, и просчитать его параметры.

Заключение

В ходе конструктивного размещения элементов в БПЛА аэродинамической схемы типа «утки» были соблюдены условия равновесия и выполнены требования аэродинамической и электромагнитной совместимости. Условия статического и динамического равновесия были достигнуты за счет равномерного распределения массы и сил относительно центра тяжести планера. Для выполнения аэродинамических требований были сведены к минимуму выступы на поверхности планера, создающие обратные аэродинамические силы, а для выполнения требований электромагнитной совместимости были использованы как радиоэлектронные устройства с резко отличающимися рабочими частотами, так и чувствительные и силовые устройства были размещены на определенном расстоянии и в определенном положении. Были использованы электрические провода со слоем изоляции, устойчивым как к высоким температурам, так и к механическим воздействиям.

Координаты размещения приборов управления и навигации относительно центра тяжести летательного аппарата были учтены в программе, записанной на приборе управления. Диаграммы ориентации антенн радиоэлектронных средств были максимально направлены в сторону канала связи.

Изготовление приемника РУ из радиопрозрачного композитного материала позволило расположить его внутри фюзеляжа.

Предложенное изготовление из композитного материала приведет к снижению коэффициента отражения от поверхности и веса БПЛА типа «утка», сильно снизится вероятность его обнаружения радиолокационными устройствами, а также средствами акустического и визуального обнаружения вследствие использования бесколлекторных электродвигателей и окраски планера в небесно-голубой цвет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А. БПЛА конвертопланового типа: Текущее состояние и перспективы // Естественные и технические науки. М., 2021. № 3 (154). С. 146–162. doi: 10.25633/ETN.2021.03.13
2. Nabiyev R.N., Garayev G.I., Abdullayev A.A. Conceptual functional design of hybrid energy source of unmanned convertiplane. IOP Conference Series: Conference Scopos. Materials Science and Engineering. 862 (2020) 022043,

doi:10.1088/1757-899X/862/2/022043.

3. Набиев Р.Н., Абдуллаев А.А., Гараев Г.И. Разработка концептуальной функциональной схемы беспилотного конвертоплана с гибридным источником энергии // Авиакосмическое приборостроение. М., 2021. № 5. С. 1–16. doiA: 10.25791/aviakosmos.5.2021.1217
4. Савельев Л.М., Ахмедьянов И.С. Прочность летательных аппаратов. Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. Ун-т им. С.П. Королева. Самара, 2012. 274 с.
5. Курочкин Ф.П. Проектирование и конструирование самолётов с вертикальным взлётом и посадкой. М.: Машиностроение, 1977. 224 с.
6. Крылов Е.Д. Методика проектирования конструкций беспилотных летательных аппаратов из композиционных материалов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Технические науки. М. С. 96–97.
7. Чистяков Н.В., Силкин А.А., Павлов Ю.А. Разработка беспилотных летательных аппаратов для аэрофотосъемки и мониторинга местности // Доклад на симпозиуме «Неделя Горняка – 98». М., МГГУ. С. 1–4.
8. Пашаев А.М., Гасанов А.Р., Набиев Р.Н., Искендеров И.А. Структурная модель системы бесконтактного определения веса и центра тяжести воздушных судов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. С. 156–167. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-3-156-167>
9. Искендеров И.А. Аналитико-имитационная модель системы бесконтактного определения массы и центра тяжести самолётов // Измерительная техника. М. 2021. № 12. С. 35–41. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-35-41>
10. Пашаев А.М., Гасанов А.Р., Искендеров И.А., Агаев Э.А. Способ бесконтактного определения степени загрузки и центровки воздушных судов. Патент-изобретение, I2016 0003 // Промышленная собственность. Офиц. бюлл. комит. по стандартиз., метрологии и патентам. Азербайджанская Республика. 2016. № 5. С. 51. URL: http://patent.copat.gov.az/_files/Ixtira_2016_05.pdf (дата обращения: 28.11.2021).
11. <https://ardupilot.org/copter/docs/common-mounting-the-flight-controller.html>
12. http://www.eagletreesystems.com/Manuals/vector_new_rus.pdf
13. Филин Е.Д., Киричек Р.В. Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 2. С. 87–93.
14. Арбузов С.А., Грицкевич Е.В. и т.д. Измерение спектральных коэффициентов отражения поверхностей при мультиспектральной воздушной съемке цифровой камерой.
15. Карташов В.М., Шейко С.А. и т.д. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. М., 2018. № 1995. С. 235–243.
16. Голубев И.С., Самарин А.В. «Проектирование конструкций летательных аппаратов.

УДК 621.981

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Турундаев К.В.

к.т.н., ведущий инженер-конструктор АО «Ульяновский НИАТ», г. Ульяновск
e-mail: ulniat2012@rambler.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам повышения качества профилей для летательных аппаратов. Автор решает задачу анализа показателей качества профилей.
Ключевые слова: профиль, показатели качества, профилирование, авиационная техника, летательный аппарат

ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS OF PROFILES FOR AVIATION PRODUCTS

Turundaev K.V.

Ph.D., leading design engineer, JSC «Ulyanovsk NIAT», the city of Ulyanovsk
e-mail: ulniat2012@rambler.ru

Abstract. The article is devoted to the issues of improving the quality of profiles for aircraft. The author solves the problem of analyzing profile quality indicators.
Key words: profile, quality indicators, profiling, aviation technology, aircraft

Важной проблемой при производстве изделий авиакосмической техники является получение высоких и обоснованных показателей качества, как самого изделия, так и входящих в него деталей, в нашем случае профилей. Для решения данного вопроса рассмотрим, что такое качество, пути его повышения и оценка, а также показатели качества.

В последнее время понятие качество прочно вошло в обиход науки, производства, потребителя. Освещению данного вопроса посвящено множество монографий, статей и т.д. Понятие качество имеет более сотни значений [1]. Это связано с тем, что оно развивалось на стыке философии и материального производства. Исторически в области материального производства было три этапа трактовки понятия качества:

1. На первом этапе качество характеризовало одно свойство продукта (предмета), то главное свойство, которое выделяло продукт из других продуктов, определяло его использование. А остальные свойства данного продукта были малозначимы, не использовались.

2. На втором этапе, по мере усложнения производимого продукта, для потребителя представляли интерес уже несколько свойств, с точки зрения удовлетворения потребности. Для учета производством этих свойств возникла необходимость причинно-следственную связь «свойство продукта-потребности потребителя» увязать с показателями в документации (ГОСТ, ОСТ, техническое условие, техническое задание, чертежи на изделие и т.д.).

3. На третьем этапе повысились требования и потребности потребителя. Помимо требований по документации добавились требования

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России по надежности, технологичности, эстетичности и т.д., те совокупность составляющих.

Путь повышения качества продукта заключается в количественной оценке (предварительной и последующей) изменения качества продукта (исходного и последующего), что является областью деятельности науки квалиметрии. Это важный фактор в реализации продукта на всех этапах его рождения: техническое задание, техническое условие, рабочий проект, опытный образец, серийное производство. С другой стороны, при неправильной оценке и необоснованного повышения качества продукта по некоторым показателям, предприятие понесет убытки из-за соотношения «цена – качество», в связи с малым спросом на свою продукцию.

Далее, для дальнейшей работы, «оценку уровня качества продукции» разобьем на этапы (рис.1) [2]. При этом, на этапе «выбор номенклатуры показателей качества» нужно учесть: для чего предназначен продукт; в каких условиях данный продукт будет эксплуатироваться; потребности потребителя в определенных показателях качества продукта; требования ГОСТ, ОСТ к данному продукту. А на этапе «выбор базовых показателей качества» отбираем те, без которых продукт не может нормально функционировать.

Для упрощения работы сведем «основные типы показателей качества продукта» в таблицу 1 [3], где показатели качества разбиты на группы по признаку классификации и дадим по ним пояснения.

Первый признак характеризует отношение к свойствам продукта, то есть входящие в эту группу показатели качества отражают какое-либо из свойств.

Показатель назначения определяет основные функции продукта необходимые для его применения. Для профильной продукции показатель назначения является: несущая (прочностная) способность – для силовых профилей; выдерживание (жесткость) и амортизация удара - применение в качестве ограждений [4].

Показатель надежности описывает возможность объекта выдерживать свою работоспособность на определенном уровне при определенных условиях эксплуатации (влажность, механические нагрузки, температура и т.д.). В понятие надежность входят и описывают его такие термины, как безопасность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Показатель надежности для силовых профилей играет большую роль в конструкциях летательных аппаратов [5].

Показатель технологичности характеризует наиболее рационально затраченные ресурсы (время, материалы, финансы) при подготовке производства, изготовлении, эксплуатации, ремонте. В данный показатель входят: удельная трудоемкость изготовления изделия; удельная материалоемкость; коэффициент использования материала; себестоимость. Наиболее высокая технологичность при изготовлении профилей будет у способа профилирования [6,7,8]

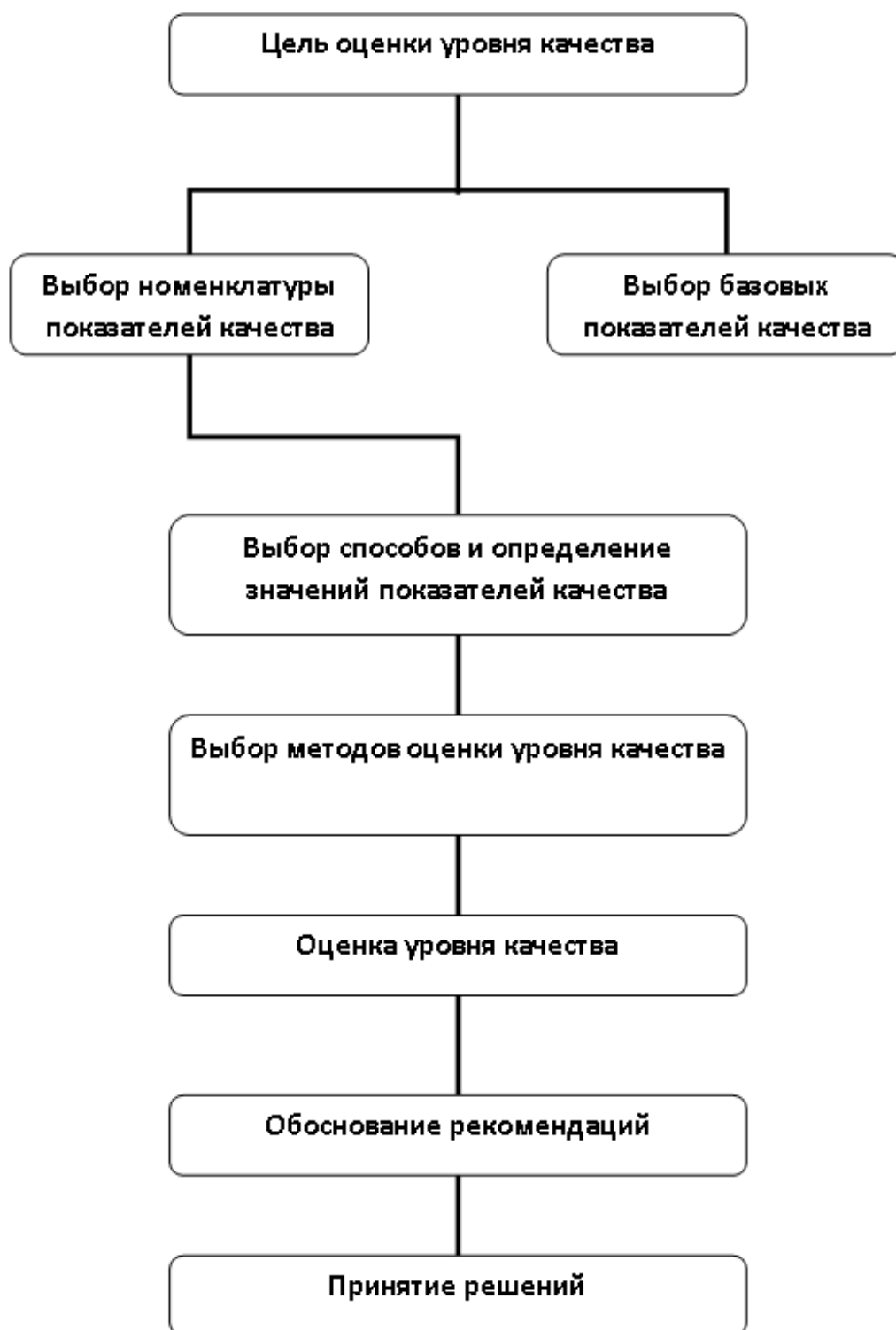


Рис.1. Этапы оценки уровня качества продукции

Таблица 1

Основные типы показателей качества

	Признак классификации	Типы показателей
1.	Отношение к свойствам продукции	1.1.Назначение
		1.2.Надежности
		1.3.Технологичности
		1.4.Эргономические
		1.5.Эстетические
		1.6.Стандартизации
		1.7.Патентно-правовые
		1.8.Экономические
		1.9.Транспортабельность
		1.10.Экологические
		1.11.Безопасности
2.	Количество отражаемых свойств	2.1.Единичные
		2.2.Комплексные
		2.3.Интегральные
3.	Метод определения	3.1.Инструментальные
		3.2.Расчетные
		3.3.Статистические
		3.4.Органолептические
		3.5.Экспертные
		3.6.Социологические
		3.7.Комбинированные
4.	Стадия определения	4.1.Проектные
		4.2.Производственные
		4.3.Эксплуатационные
		4.4.Прогнозируемые
5.	Размерность отражаемых величин	5.1.Размерные
		5.2.Безразмерные
6.	Значимость при оценке качества	6.1.Основные
		6.2.Дополнительные

Эргономические показатели характеризуют комфортное использование продукта, удобство в эксплуатации. Благодаря профильной продукции входящей в какое-либо изделие даются большие возможности его приспособлять под нужды человека.

Эстетические показатели характеризуют чувственное восприятие благодаря совершенству формы, цвета и т.д. Большую роль эстетические показатели играют в декоративных профилях.

Показатель стандартизации характеризует уровень использования в изделии готовых стандартных единиц. Профильная продукция помимо соответствия ГОСТ, в зависимости от области применения должна соответствовать отраслевым стандартам и т.д.

Патентно-правовые показатели характеризуют применение новых технологий и технических решений в производстве. В данный показатель

входит: патентная защита; патентная чистота. В современных рыночных отношениях играет ведущую роль при применении передовых решений в производстве.

Экономические показатели характеризуют затраты на разработку, изготовление, эксплуатацию продукта.

Показатель транспортабельности характеризует возможность продукта к транспортировке. У профильной продукции высокая транспортабельность.

Экологические показатели характеризуют воздействие продукта (при изготовлении, во время эксплуатации) на окружающую среду.

Показатель безопасности характеризует степень безопасности потребителя при эксплуатации, ремонте и т.д.

По второму признаку классификации имеем характеристику по количеству отражаемых свойств. Здесь единичному типу показателя качества соответствует первый исторический этап трактовки качества. Комплексному показателю качества соответствует второй этап. Интегральному показателю качества соответствует третий этап.

По третьему признаку классификации имеем характеристику по методу определения.

Инструментальные показатели характеризуется использованием инструментов (весы, линейка, штангельциркуль, микрометр и т.д.) для снятия показаний. Для профильной продукции определяется фактическая масса, размеры (линейные, угловые) и т.д.

Расчетные показатели характеризуются использованием расчетов по теоретическим и/или эмпирическим формулам для получения интересующих нас значений. Для профилей определяется развертка, теоретическая масса и т.д.

Статистические показатели характеризуются использованием математического аппарата специального раздела высшей математики, для получения интересующих нас значений. Для профилей определяется средние размеры (линейные, угловые) по снятию определенного количества показаний.

Органолептические показатели характеризуются использованием органов чувств человека (зрение, тактильные ощущения и т.д.) для получения интересующих нас значений. Для профильной продукции определяется нарушение покрытия профилей, волна по кромке боковой полки и т.д.

Экспертные показатели характеризуются использованием экспертной группы (специалистов в данной конкретной области), для получения интересующих нас значений. Для профильной продукции применяется при приемке-сдаче профилей, при определении годности профилей по эстетическим показателям (волна, хлопуны и т.д.).

Социологические показатели характеризуются использованием мониторинга потребителей (нынешних и потенциальных) данной продукции для получения интересующих нас мнений. Для профильной продукции

Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России применяется при планировании ввода в эксплуатацию новых профилей, а также сбора мнений по существующим профилям, для учета и увеличения конкурентоспособности.

Комбинированные показатели характеризуются использованием нескольких методов для получения интересующих нас значений.

По четвертому признаку классификации имеем характеристику по стадии определения. Проектные показатели характеризуются определением на стадии рабочего проекта. Производственный показатель характеризуется определением на стадии производства продукта. Эксплуатационные показатели характеризуются определением на стадии эксплуатации продукта. Прогнозируемые показатели характеризуются определением предварительного прогноза на любой стадии рождения продукта.

По пятому признаку классификации имеем характеристику по размерности отражаемых величин. Показатели качества могут выражаться количественными или качественными величинами. Количественные величины могут иметь размерность или быть безразмерными. Качественные величины могут иметь только безразмерную размерность. У профильной продукции характерно для величин имеющих размерность: масса профиля - показатель экономичности (характеризует экономические затраты при эксплуатации самолета); жесткость профиля - показатель технологичности (для элементов конструкции сборочного приспособления в производстве); прочность профиля - показатель надежности (для силовых элементов конструкции планера самолета); ресурс профиля - показатель надежности летательного аппарата. У профильной продукции характерно для безразмерной размерности: коэффициент использования материала - показатель технологичности.

По шестому признаку классификации имеем характеристику по значимости при оценке качества. Основные показатели характеризуются указанием доминирующих показателей для данного продукта. Дополнительные показатели характеризуют дополнение до общей картины - номенклатура показателей, характеризующих качество данного продукта.

Таким образом, проходя по цепочке “этапы оценки уровня качества продукции”, производя выбор “номенклатуры показателей качества” и “базовых показателей качества” мы проводим оценку, обосновываем рекомендации, принимаем решение для оптимального соотношения “цена-качество” и тем самым решаем вышеозначенную проблему.

Список литературы

1. Мазур, И.И. Управление качеством [Текст] / И.И. Мазур, В.Д. Шапиро. – 2-е изд. – М.: Омега-Л, 2005. – 400 с.
2. Гиссин, В.И. Управление качеством продукции [Текст] / В.И. Гиссин. – Ростов н./Д.: Феникс, 2000. – 256 с.

3. Розова, Н.К. Управление качеством [Текст] / Н.К.Розова. – СПб.: Питер, 2002. – 224 с.
4. Житомирский, Г.И. Конструкция самолетов [Текст] / Г.И. Житомирский. – М.: Машиностроение, 1991. – 400 с.
5. Александров, В.Г. Авиационный технический справочник (эксплуатация, обслуживание, ремонт и надежность) [Текст] / В.Г.Александров, А.В.Майоров, Н.П.Потюков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1975. – 432 с.
6. Колганов, И.М. Процессы стесненного изгиба при различных методах формообразования [Текст] / И.М. Колганов. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 108 с.
7. Филимонов, В.И. Разработка процессов интенсивного формообразования листовых заготовок в роликах при производстве гнутых профильных деталей на основе моделей механики деформируемого твердого тела [Текст]: дисс. докт. техн. наук: 05.03.05., 01.02.04 / Филимонов Вячеслав Иванович. – Ульяновск, 2004. – 550 с.
8. Тришевский, И.С. Производство и применение гнутых профилей проката [Текст] / Под ред. И.С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1975. – 536 с.

Секция 4

**Гуманитарные науки
в авиационно-космических
технологиях**

УДК111.1

**ЗАБОТА В ЕЁ СУЩНОСТНОМ ИСПОЛНЕНИИ.
АНАКСИМАНДР И М. ХАЙДЕГГЕР О МЕТАФИЗИКЕ ЗЕМЛИ**

Марковцева О. Ю.

Д-р философ. наук, директор Центра социально-этнических исследований (НИИ «МИТОМ»), г. Ульяновск

Аннотация. В статье описываются базовые понятия, закономерности, характеристики, принципы особой научной сферы – философии планеты «Земля». Представлен краткий анализ подходов к этой проблематике со стороны древнегреческого мыслителя Анаксимандра и философа XX в. М. Хайдеггера. В данной статье также раскрываются основные атрибуты планеты «Земля» (время, пространство, энергия, движение, скорость, субстратность, биомасса и др.). Показана неразрывно-генетическая связь структуры «Земля – Человек».

Ключевые слова: метафизика космоса, планета, Земля, пространство, время, движение, субстрат, жизнь, Сущее, Бытие, Анаксимандр, М. Хайдеггер, философия.

**CARE IS IN ITS ESSENTIAL FULFILLMENT. ANAXIMANDER
AND M. HEIDEGGER ON THE METAPHYSICS OF THE EARTH**

Markovtseva O. Yu.

Doctor of Philosophy, Director of the Center for Socio-Ethnic Studies (MITOM Research Institute), Ulyanovsk

Annotation. The article describes the basic concepts, laws, characteristics, principles of a special scientific field – the philosophy of the planet "Earth". A brief analysis of the approaches to this problem by the ancient Greek thinker Anaximander and the philosopher of the twentieth century M. Heidegger is presented. This article also reveals the main attributes of the planet "Earth" (time, space, energy, movement, speed, substrate, biomass, etc.). The inextricable genetic connection of the structure "Earth – Man" is shown.

Keywords: metaphysics of the cosmos, planet, Earth, space, time, motion, substrate, life, Being, Being, Anaximander, M. Heidegger, philosophy.

Введение. Поставим вопрос о планетарной метафизике. Для этого проведём анализ феномена «Земля» в качестве условий существования человека, живых существ в целом. Раскрывая сущность планеты Земля как специализированную предметную область, или особую онтолого-практическую тему о человеке (как он возможен?). Получается, что ранее его рождения имеются основания или заданные пред-условия или способы, раскрывающиеся им в явленном (очевидном) материале смыслов общего континуального наличия. Последнее – это то, что существует в виде «самого-по-себе-данного» без восприятия его человеком.

Основной текст. Начнем разговор с изречения Анаксимандра, которое привлекло внимание М. Хайдеггера в работе «Изречение Анаксимандра» [1]. «Откуда вещи берут свое происхождение, туда же должны они сойти по

необходимости...сообразно порядку времени.». На какие главные моменты следует, как нам представляется, обратить внимание?

1. речь идет о *времени*, следовательно, делаем вывод, и о пространстве, так как «пространство-время» – единый феномен.
2. *вещи*, о которых идет речь, нечто проявленное в постоянно переменчивых материальных образцах предметных свойств. Вещи понимаются как «естественные вещи» [1;36].
3. в тезисе выражение «откуда вещи берут...» мыслится конституция «*первичного*» порядка в виде возможности «быть» проявленной структурой плана, противоположенного материальному бытию физических «объектов». Тут говорится о бытии материи, её свойствах: длина, высота, объём, время, движение, элементность и прочих параметрах, которые относятся к «чувственным» характеристикам материи.
4. «Происхождение» вещей следует понимать целостно. Оно – созидающее начало, связанное с *жизнью, рождением, перерождением, распадом* вещей. Ведь «откуда начинается» всё «туда» и возвращается.

Земля, согласно этому положению вещей, – особый «объект», благодаря которому любое живое вещество производится, преобразуется, синтезируется в различных формах, имеет способы динамизировать в прежнем живом организме. С этой точки зрения в данной статье рассматривается планета Земля, как всегда непосредственно творящаяся жизнь. Назовём данный процесс «актуальным жизне-становлением» и обозначим этот феномен в виде основной, назовём, «заботы» Земли, т.е. «заботы» относительно себя планетарного уровня. Он скрыто или неосознанно наличествует и в повседневной культуре человечества в качестве единой естественно-бытийной «заботы». Как правило, это активность широкого использования земельных ресурсов для житейских целей обеспечить себя питанием, пространством, энергией – всем необходимым для различных видов реализации потребительских задач. Чтобы все эти необходимые первичные жизненные «программы» человека были адекватны генетике Земли, он вынужден познавать сущностные свойства планеты.

Живое вещество в единой структуре Земли субстратно, атрибутивно в её планетарной целостности. Органика Земли, пространственно-временные соотнесённости элементов, органов, циклов, энергетических потенциалов и других подобных параметров суть свойства (органичность, цикличность, энергичность, инновационность, пр.) связанных между собой оснований вещей. Границы подобных вещественных образований есть некоторые пределы качественных, количественных показателей становящейся вещественной предметности, Она вербализуется словами, предложениями и прочими языковыми комплексами, знаками. Поэтому условно обозначим высказывание Анаксимандра неким «Законом сохранения первоосновы» или

«Законом сохранения первовещества материи», указывающим на базовые атрибутивные характеристики устройства оснований как таковых.

М. Хайдеггер вышепредставленный тезис Анаксимандра рассматривал в тематике своих философских исследовательских задач. Кратко отметим их. Немецкий философ выделял в данном тексте

1. направление (вектор) – «Откуда в своё время все вещи берут начала, туда в свое время и возвращаются».
2. разнообразие восприятия смысла текста при переводе его в другую языковую культуру. Исходя из этого смысл тезиса Анаксимандра можно рассматривать различно. Главное условие – не разрушать общий смысл оригинала.
3. различие и сходство переводов Ф. Ницше и Дильса.

Наша авторская задача имеет другой смысл. Он сводится к экспликации и описанию планетарного контекста связи Земли и Человека. Речь пойдёт о сущностном восприятии, практическом исполнении главной «заботы» Земли-планеты в структуре Бытия и социального Человека в смысле Закона сохранения первооснов миров, первичного вещества материально-духовного наличия того, что мы относим к человеческой жизни. В этом случае сущность нашей планеты следующая – то, что связано с существованием, явно дано представленным в «оче-видном» (чувственном) материале. Тогда уже Бытие не скрывает себя, а показывается сущностными аспектами в повседневной практике, культуре людей, в археографии живой истории. Можно сказать, что Бытие сущностно, а Сущность со-бытийна в их единой связи «Бытие-Сущность». Последняя – особый способ, режим напряжения реализующегося многообразия Сущего в качестве особой структуры Бытия. Эта проблематика всегда привлекала внимание мыслителей, философов, ученых, описывающих особенность мира, относящегося к человеку. Бытие считалось трансцендентным уровнем («простор» в философии Хайдеггера), контекст трансцендентального порядка («горизонт») отнесён к практической области повседневного бытия. О том и другом порядке вещей человек «знает» своей врождённой генетической памятью, понимая, что мир бесконечно «есть» как наличный в объёме всех своих функций. Это, вероятно, то, что имел в виду Аристотель, говоря, что всегда есть нечто такое, которое «производит себя самого». Другими словами, сохранение первоосновы материального мира – одновременно механизм («Закон») и вещество чего-то такого, как «из себя самого себя самого» производящее. Так и планета «Земля» и другие системы космических «объектов», рождаются «для себя самих» как взаимно связанные «организмы» бытийного плана. Если переведём это положение в актуальные причинно-следственные обстоятельства, то получим вывод: нечто действует или производится в любом формате «по причине своей», по тем сложившимся внешним («объективным») и внутренним («субъективным») обстоятельствам, которые совместно тяготеют к целям, результатам, следствиям и последствиям.

Таковыми являются общие знания о прошлых эпохах, космических, природных, социальных фактах истории планеты, которых всегда недостаточно. Научная мысль восполняет имеющийся интеллектуально-практический дефицит знаний. М. Хайдеггер «эстафету» передачи между поколениями людей целей и задач называл «хронологическое историческое передавание». Однако Земля, Человек имеют свой и общий, непосредственный, повседневный путь со скоростью «хронологическое историческое» движения. Этот путь не без проблем, так как поведение людей охвачено стремлением к бесконтрольному господству в глобальных сферах социума, мироздания, т.к. носит коммерческий характер. С такой прочной стратегией человечество относится и к Земле. Наша планета, в свою очередь, активно изменяет свои климатические условия под влиянием деятельности человека и общих перемен, идущих со стороны Солнечной системы. Учёные постоянно наблюдают, фиксируют изменения режимов времени, скоростей, других параметров известных на сегодняшний день космических объектов. Возможно, такие перемены по своему характеру созидательны, но не предсказуемы относительно выживания человечества. М. Хайдеггер с тревогой ставит вопрос о будущем человечества: «Не стоим ли мы в предвечерье наиболее чудовищной перемены всей земли и того времени исторического пространства, в котором держится эта земля? Не стоим ли мы в вечернем кануне некоторой ночи перед какой-то иной утренней ранью? Не для того ли мы вышли в путь, чтобы иммигрировать в историческую страну этого вечернего заката Земли»? [1; 32].

В этой статье не ставится задача составлять прогнозы истории, поэтому следующим исследовательским шагом поставим вопрос о лингвистических особенностях вышеприведённого текста Анаксимандра. Подобный анализ проводил М. Хайдеггер, интересуясь спецификой перевода тезиса Анаксимандра, зависящего от смысловых приоритетов исследователей, изучающих этот тезис. Данная античная мысль касается темы «метафизика связи структуры Земля – Человек». В лингвистическом ключе поставим вопрос: что такое Земля сама-по-себе без языковых семиотических значений её предметов, феноменов, названия которых укоренены в речевой специфике сознания? Только «у-словно» обозначенное что-либо становится явным и может быть осмыслено. Хайдеггер по-своему трактует высказывание Анаксимандра, однако с помощью слов/смыслов современного немецкого языка. В таких же особых лингвистических «установках» философ формулирует доказательства принципиальной «несокрытости» земли от интересов человечества. Подобный повседневный аспект связи телесного и духовного уровней, определяет планету Землю в качестве многообразных «угодий» существования биомасс. В этом значении условия суть питание, родина, место, путь, движение, энергия, вещество, время истории человечества, народов, государств, «классов», сообществ как её собственная планетарная история. Какими способами описать *логику* и содержание этой продуктивной практической «несокрытости» планеты и существ,

населяющих её? Каждое историческое время по-своему, оригинально создавало стиль и способ нарративного описания своей жизнедеятельности. Земля позволяла такое творчество для живых существ, будучи относительно креативной, однако дозволенность её была в определённых рамках. При описании деятельности исторического сознания человека, его различных, а также всевозможных состояниях земли Хайдеггер использовал такие выражения: «прыжок через некий ров», «ров этот шире и глубже, чем...», «мы твёрдо стоим на своём краю», «разбег для отскока», «легко прыгнуть слишком коротко» [1; с. 33, 34, 35]. Эти и другие подобные обороты речи носят физический, ландшафтный, планетарно-образный характер. Вывод: антропологический анализ Земли возможен только с помощью речевого опыта. В этом ключе Земля, предположим, дополнительным образом «приобретает» мысль о себе самой. Например, в данном случае это происходит минимум трижды: когда планета «мыслит» (мысль осуществляется) *саму себя*, также повседневные «заботы» *человеческих и иных существ*, а также «запрограммированно» вращается вокруг мемориальной «оси», создавая планетарную *историю – историю Земли*. Другими словами, Земля «запоминает» свою историю, реализует свои способы «памяти». Человек всегда пользовался историко-информационным арсеналом планеты. Так, он познал, например, какой и когда животный мир населял Землю, какие и когда существовали цивилизации, как взаимодействовала наша планета с другими космическими объектами и т. д. Получается, естественно-научным образом история Земли открывается человечеству, явленно вписывается в его историю, органично размещая антропологические факты в своих анналах. Последние составляют планетарно-информационный «справочник» планетарно-космического характера. В эти разнородные тексты также включён такой, который М. Хайдеггер называл «родоплеменным хозяйством в равнопребывающем домострое природы» [1; 34 – 35]. То есть широкая сеть возможностей хозяйственной и другой деятельности человека естественным путём консервируется планетой Земля. В этом практическом акценте «простор» (термин Хайдеггера) как не познанная человеком часть истории жизни Земли концентрирует повседневно-жизненные заботы индивидов «трясиной», суестью озабоченности актуальным исполнением существования как проблема антропологического выживания. В этом смысле территория земли становится «панорамой» производства, распределения, перераспределения площадей, границ, времени, способом проживания народов, а также уровень и возможность существования на том или ином живом земельном «просторе». Вышесказанное прямо связано со степенью приспособления в планетарных реалиях. В этом случае Земля «являет» себя практически, общедоступными условиями для индивидо-рождения. Именно в таком качестве она – коренная структура продуктивного сознания и поведения человека, что самодостаточно как нечто «иннервируемое» в субстратной целостности чувствительного, экзистенциального, регенерируемого в структурах живого

вещества земли. Субстрат ощущается живыми организмами и обозначен как то, из чего «сделано», сотворено как натуральный, искусственный, синтетический орган. Субстратный материал податлив, гибкий в смысле изменчивости, то есть образования одного вещественного вида продукции на основе создания другого вида. Преходящие и переходные состояния субстрата как его разрушения, созидания, становления или некоторый закон организационной сущности Земли итоговым образом возвращает к началу исхода. Данный «закон» возврата к основы к самой себе может быть иллюстрирован примером действий диалектических законов и механизмов, их составляющих. Земля «субстратна» собственным, оригинальным, адекватным ей *производным веществом*. Его микро-и-макро-вещные предметы (минералы, химические элементы) образуют единую связь: они со, формы вмещены друг с другом настолько тесно, корректно, что один элемент или частица не возможны без других. Такая «тонкая» сопричастность всего представленного в целостности органично во всём живом. Однако планетное субстратное простое вещество Земли (набор элементов) – это завершённая целостность, но нечто большее, чем, укажем, просто «это» вещество, воспринятое нами. Земля, понятно, связана с другими планетами, звёздами, феноменами общего космоса. Земля обладает «о-веществлённым характером», в котором элементы, их синтез, характер связей между собой (общая структура) может в чём-то совпадать, а также не совпадать с иными планетарными реалиями космогонического порядка.. Поэтому глобальное переселения человечества с планеты Земля следует считать проблематичной задачей. Имеет большое значение другое: сконцентрировать внимание на постоянной оптимизации условий проживания человечества в структурах главной родины. Добавим, сознание, мысль, язык человека, имеющие образы ландшафта земли. Мы говорим: предметное «поле», «глубина» (мыслей), «стихия» (условий, задач, проблем), «текучесть» (кадров, мембран), «океан» (возможностей). Эти и прочие речевые примеры показывают, что человек «разговаривает» образами, феноменами общего устройства Земли. Становится не вполне ясно: сама Земля «ведёт речь» лингвистическим аппаратом человека, отражая саму себя, или он, сын Земли, открывает её «образ и подобие» как своё человеческое. Нам важно *осознать* принципиальную взаимосвязь, единство, причастность, адекватность, гармонию, общий порядок всех макро-и-микро-уровней, исполняя их бытийное предназначение. Возможно, тогда человек перестанет задавать волнующий его фундаментальный вопрос: «не пребываю ли я во сне о самом себе, отражённый в глубине Бытия, рассчитывая на спасительное, безнаказанное пробуждение?».

Список литературы

1. Хайдеггер М. Изречение Анаксимандра / Хайдеггер Мартин. Разговор на просёлочной дороге. Сборник: Пер. с нем. / Под ред. А. Л. Доброхотова. – М.: Высшая шк., 1991. –192 с.

УДК 111.1

О ПЛАНЕТАРНОЙ МЕТАФИЗИКЕ ЗЕМЛИ. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Марковцева О. Ю.

Д-р философ. наук, директор Центра социально-этнических исследований (НИИ «МИТОМ»), г. Ульяновск

Аннотация. Специальная философская область «планетарная метафизика Земли», имеет свою объектно-предметную сферу. данную область носит инновационный характер. Может ли быть поставлен вопрос относительно «планетарной метафизики Земли»? Какова актуальность этой научно-гуманитарной проблемы? Можно ли определить специфику её «объекта», «предмета»? Эти и другие вопросы философского смысла поставлены в данной статье в виде анализа зада, связанных с экспликацией и способами описания общего теоретического исследования проблематики «планетарная метафизика Земли».

Ключевые слова: философия, метафизика, планета, Земля, объект, предмет, вопрошание.

ABOUT THE PLANETARY METAPHYSICS OF THE EARTH. PROBLEM STATEMENT

Markovtseva O. Yu.

Doctor of Philosophy, Director of the Center for Socio-Ethnic Studies (MITOM Research Institute), Ulyanovsk

Annotation. The special philosophical field "planetary metaphysics of the Earth" has its own object-subject sphere. This area is innovative in nature. Can a question be raised regarding the "planetary metaphysics of the Earth"? What is the relevance of this scientific and humanitarian problem? Is it possible to determine the specifics of its "object", "subject"? These and other questions of philosophical meaning are posed in this article in the form of an analysis of the tasks associated with the explication and methods of describing the general theoretical study of the problematic "planetary metaphysics of the Earth"

Keywords: philosophy, metaphysics, planet, Earth, object, subject, questioning.

Актуальность проблемы. Почему мы ставим онтологический вопрос о планете «Земля»? Почему данное историческое время существования человека остро актуализирует данную тему? Ведь любое вопрошание не само по себе вопрошание. Его подбирает время, чтобы сконцентрировать мысли о чём-либо в той точке текущей истории, которая уже вынуждена решать накопившиеся противоречия, чтобы продолжаться дальше. В этом случае мы говорим: «вовремя поставленный вопрос».

Основной текст. Начнем поиск ответов на него с беседы М. Хайдеггера с корреспондентами журнала «L'Express» от 20 – 26 oct. 1969. [1; 148].

Тезис: «Кор. – Вы первым заговорили об «эре планетарной техники». Что Вы имели в виду?

Х. – «Планетарная эра», «атомная эра» – это выражения, которые свидетельствуют о заре наступающих времён. Никто не может предвидеть, чем они станут. Никто не знает того, чем станет мысль.

Кор. – Означает ли эпоха планетарной техники конец метафизики?

Х. – Нет. Она есть лишь её осуществление (исполнение [*accomplishment*]). ...».

Вывод: 1. Планетарный характер метафизических исследований возможен. 2. При таком способе рассмотрения важно определить, что представляет собой Сущее, Бытие, время, материя, движение, техника и пр. атрибутивные свойства, качества, принципы организации планеты Земля. Они векторны инновационным выжиданием, ведь, по мнению немецкого философа, «Будущее – вот что важно». [1; 148].

Конструируя направление мысли в этом контексте, становится понятно, что речь идёт о выживании как самой планеты земля, так и всей наличности животворного, принадлежащего ей. Поэтому технический вопрос деятельности человека – это не только проблема или вопрос, затрагивающий личное существование индивидов, он прежде всего касателен земли, её предельных качеств, в рамках которых техника размещена, становится возможной. Вопрос: что означает «выживание» относительно планетарных параметров Земли? На наш взгляд, речь идёт о таком существовании «объекта», чтобы обеспечивались основные атрибуты, модусы её актуального, наличного Бытия.

Какие структуры образуют характер атрибутивности и модусности нашей планеты? В философско-гуманитарной мысли, как правило, считается, что атрибутивное противоположно модусному, т.к. первое понятие имеет отношение к материи, а второе – к тому, что обозначают как нематериальную (смысловую) сферу. Думается, что структурность Сущего планеты имеет и то, и другое качества как единство их взаимодействий. Так, если речь идёт о материальной сущности планеты, её физико-химических, биологических и других естественно-научных формах, то имеются в виду атрибутивные свойства материи. Например, время, пространство, вещество, форма, качество, количество, синтез, система и пр.. Если мыслятся или «пребывают» вещи в виде их некоторого актуального состояния (как со-бытиё), имеющего только в текущий момент времени сложившийся вид многоплановых разнородных связей, то проявляется их модусный аспект. Так, Сущее, Бытие могут быть со-относительны, со-дополнительны, диалектичны, синтезны, вариативны, многоплановы, непредсказуемы, структурны и др.. Подобные модусные параметры и их проявления имеют временный характер, они предполагаются как изменчивое текущее положение вещей, фактов, событий, однако они также устойчивы атрибутивными «программами». Например, такие планетарные явления как «день», «ночь» (сутки) имеют одновременно атрибутивные и модусные показатели. Они находятся в атрибутике времени и одновременно в структуре обстоятельств плана модусов, т. к. день и ночь –

это циклы происходящего, они неизменны, однако всегда различны, зависимы от времени года, годовых различий, места их протекания и т. д..

О подобных соотносительных отношениях актуального существования живых существ в различных био-химических, био-физических и иных обстоятельствах общего взаимодействия (Бытия) планет рассуждает К. Э. Циолковский в работе «Космическая философия». [2; 60 – 70].

В этих соотношениях планета Земля имеет свою «форматность». В данной структуре речь идёт о форме планеты. Информация о ней дана в любом научном справочном материале на тему «Земля». Однако следует подчеркнуть, что подобные описания относительны, они носят антропологический характер восприятия и описания, а также техногенны исследовательскими текстами, параметрами, предоставляемые различными техническими устройствами, средствами математической логики, которыми располагают прежние и современные науки. Они, принято считать, «развиваются», приумножая фактический материал о том или ином [феномене] Земли, других планет, космических объектов в целом. Учитывая это, при анализе фактов, явлений следует иметь в виду «оговорку» – «на сегодняшний день наука предоставляет такую-то информацию о...». Поэтому форматность – это не только форма или внешний вид планеты (вещи, предмета), а также планетарные характеристики соотносительности различных сторон, показателей, фактов, норм, а также способы их имеющихся на данный момент времени связей, отношений, и, конечно, набор стилей, способов описаний планетных и планетарных состояний. Почему на смысл «форматность» следует обратить особое внимание? Потому что данное понятие, концепт непосредственно включён в основания общей системы того стабильного существования, где выживание дано как норма или режим многих условий совместных взаимодействий всех жизненных форм, видов, существ, процессов Земли как её собственное внутреннее самопорождающееся, самотворящееся выживание. В этом проявляется устойчивая сущность планеты среди всех других планетарных объектов космического порядка.

Список литературы

1. Хайдеггер М. Беседа с Хайдеггером / Мартин Хайдеггер. Разговор на просёлочной дороге. Сборник: Пер. с нем. / Под ред. А. Л. Доброхотова. – М.: Высшая шк., 1991. – 192 с.
2. Циолковский К. Э. Космическая философия/ К. Э. Циолковский. Космическая философия. – СПб.: Изд. группа «Лениздат», «Команда А», 2013. – 224 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Приветственное слово	5
-----------------------------------	----------

Секция 1

ЗАГОТОВИТЕЛЬНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО В МАШИНОСТРОЕНИИ

Маслова В.Д., Нестеренко Е.С. УСТРАНЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ	7
Мишов Н.В. АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ (ХОШ) В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	3
Халилов Ф.Х., Попов А.Г. УСТАНОВКА ПРАВИЛЬНО- ГИБОЧНАЯ РОЛИКОВАЯ, ПРИМЕНЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ НА АВИАЦИОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РОССИИ.....	12

Секция 2

ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Булычов О.И., Марковцев В.А., Илюшкин М.В. РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ КОМПАС-3D API	17
Волгин Д.С., Поворов С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДОБИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОФИЛЕГИБКИ НА ПРИМЕРЕ ЗЕТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ	24
Гу Цзявэй, Евсюков С.А., Артюховская Т.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫТЯЖКИ ДВОЙНОЙ МОЙКИ.....	35

Илюшкин М.В., Марковцев В.А., Халилов Ф.Х. ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИСТОВЫХ И ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ	39
Казаков А.В., Ерисов Я.А. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ QFORM V10.....	55
Каргин В.Р., Каргин Б.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОКОВКИ «ДИСК С ДУВУСТОРОННИМИ СТУПИЦАМИ» ПРИ ОСАДКЕ В ПОДКЛАДНЫХ КОЛЬЦАХ.....	60
Каргин В.Р., Каргин Б.В., Муртазин Р.М. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ НА ВРАЩАЕМОЙ ОПРАВКЕ	72
Михеев В.А., Чемпинский Л.А., Булычов О.И., Илюшкин М.В., Сурудин С.В., Гусев Д.В., Тарасов В.А., Баранова М.М., Воробьев Д.И. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБТЯЖКОЙ ЛИСТОВОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ДЕТАЛИ ПЕРЕМЕННОЙ КРИВИЗНЫ С УЧЕТОМ СИММЕТРИЧНЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ.....	80
Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Пономарева А.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИБКИ КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ ШВЕЛЛЕРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ВАГОНОСТРОЕНИИ	103

Секция 3

ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА

Астапов В.Ю., Бушуев М.А. КОНЦЕПЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО УЧАСТКА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ СБОРКЕ	115
Галкин В.В. К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	122

Демьяненко Е.Г., Батина А.В., Куксенко Е.С. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКОСТЕННОЙ ЗАГОТОВКИ	130
Кокорин В.Н., Морозов О.И., Мишов Н.В., Родионов Д.А. ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШТАМПОВОЧНОЙ ОСНАСТКИ ПРОЦЕССА ЧИСТОВОЙ ВЫРУБКИ СО СЖАТИЕМ.....	135
Кокорин В.Н., Морозов О.И., Мишов Н.В., Родионов Д.А. К АНАЛИЗУ ДЕФОРМАЦИОННОГО И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЙ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ	140
Кокорин В.Н., Морозов О.И., Мишов Н.В., Родионов Д.А. АНАЛИЗ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ TIN	145
Кокорин В.Н., Морозов О.И., Мишов Н.В., Родионов Д.А. К ВЫБОРУ ТОЛЩИНЫ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕТАЛЛЕ ОСНОВЫ ИНСТРУМЕНТА ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ	149
Кокорин В.Н., Морозов О.И., Мишов Н.В. СТРУКТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ АДГЕЗИИ СИСТЕМЫ «СУБСТРАТ-АДГЕЗИВ»	152
Марковцев В. А., Попов А. Г., Соснин В. В., Халилов Ф.Х. ИСПЫТАНИЕ ПРАВИЛЬНО-ГИБОЧНОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ АВИАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	159
Твердов И.Д., Валеева А.Р., Гимранова А.Р., Готлиб Е.М. ЭПОКСИДНЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАПОЛНЕННЫЕ КАЛЬЦИЙ МАГНИЕВЫМИ СИЛИКАТАМИ	165
Трубякова Е.М., Дмитриенко Г.В. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДАЛЬНЕ- МАГИСТРАЛЬНОГО БПЛА С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ «УТКА».....	173

Турундаев К.В.

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ	182
---	-----

Секция 4

ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ В АВИАЦИОННО- КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Марковцева О. Ю.

ЗАБОТА В ЕЁ СУЩНОСТНОМ ИСПОЛНЕНИИ. АНАКСИМАНДР И М. ХАЙДЕГГЕР О МЕТАФИЗИКЕ ЗЕМЛИ	190
---	-----

Марковцева О. Ю.

О ПЛАНЕТАРНОЙ МЕТАФИЗИКЕ ЗЕМЛИ. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ.....	196
---	-----

Благодарим за участие!



Электронное научное издание

**НАУКА, ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА
АВИАЦИОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КЛАСТЕРА
СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ**

Материалы IX Всероссийской научно-производственной конференции,
приуроченной ко Дню Российской науки
и 40-летию АО «Ульяновский НИАТ»
(г. Ульяновск, 8 февраля 2024 г.)

Сборник научных трудов

Отв. за выпуск В. В. Марковцева

ЛР № 020640 от 22.10.97

Дата подписания к использованию 23.05.2024.
ЭИ № 1936. Объем данных 8,5 Мб. Заказ № 229.

Ульяновский государственный технический университет
432027, Ульяновская обл., г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.
ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, Ульяновская обл., г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.
Тел.: (8422) 778-513
e-mail: venec@ulstu.ru
venec.ulstu.ru