
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«Севастопольский государственный университет»

№ 2(26)

2022

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2022

*Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»*

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2022 г. №2 (26)

*Сборник научных трудов. Издание основано в 2016 году. Периодичность - 4 номера в год.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.*

*Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
и размещается в научной электронной библиотеке (Elibrary.ru)*

*Свидетельство о регистрации в национальном центре ISSN и присвоение международного стандартного номера
серийного издания (International Standard Serial Number) 2618-8201 от 06.07.2018 г.*

*В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:
2.5.6 Технология машиностроения, 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки, 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы;
2.6.17. Материаловедение (по отраслям)*

Главный редактор:

д.т.н., проф. Братан С.М.

Зам. главного редактора:

к.т.н., доц. – Рошупкин С.И.

Научный редактор:

к.т.н., проф. Харченко А.О.

Отв. секретарь:

д.т.н., проф. Покинтелица Н.И.

Редакционная коллегия

*Абдулгизис У.А. д. т. н., проф. (г. Симферополь), Глезер А. М. д. ф-м. н, проф. (г. Москва),
Бохонский А.И. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Дуюн Т.А. д. т. н., доц. (г. Белгород),
Козлов А.М. д. т. н., проф. (г. Липецк),
Копп В.Я. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Малышева Г.В. д. т. н., проф. (г. Москва),
Носенко В.А. д. т. н., проф. (г. Волжский), Обжерин Ю.Е. д. т. н., проф. (г. Севастополь),
Новоселов Ю.К. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Пашиков Е.В. д. т. н., проф. (г. Севастополь),
Суслов А.Г. д. т. н., проф. (г. Москва), Федонин О.Н. д. т. н., проф. (г. Брянск),
Ярошенко А.А. д. т. н., проф. (г. Севастополь)*

Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.
Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».
Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.

Дата выхода в свет: 16.12.2022 г.

Тираж: 100 экз. Заказ №207.

Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 106, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;
Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1362; e-mail: vst_sevsu@mail.ru
Адрес издателей: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября,
д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул.
Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация.
Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Рыбаков, 7 оф. 107.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Тимофеев С.А., Савилов А.В., Пятых А.С., Брызгунова П.С. Повышение эффективности течения титановых сплавов.....	4
Говорков А.С., Еловенко Д.А. Производственная среда, как основа цифрового предприятия...	10
Дмитриева В.В., Собянин А.А., Сизин П.Е. Тормозные режимы ленточного конвейера.....	16
Пелевин И.А., Зотов Б.О., Федоренко Л.В., Громов А.А. Применение УНВ в процессах аддитивного производства алюмоматричных композитов.....	25
Курашкин К.В., Кириллов А.Г., Беляев Р.В. Разработка ультразвукового тензометра для измерения температурных напряжений в рельсах.....	33
Скоморохова А.И., Глебов А.О. Проектирование изделий оптимальной топологии с внутренней пористой структурой.....	39

УДК 621.923

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОЧЕНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

*С.А. Тимофеев¹,
А.В. Савилов¹,
А.С. Пятых¹,
П.С. Брызгунова¹*

¹ *Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

АННОТАЦИЯ

В данном исследовании рассматривается технология обратного продольного точения. При этом применяются современные режущие инструменты со сменными пластинами, высокопроизводительное оборудование с ЧПУ и высокоточная измерительная аппаратура. Приведены результаты анализа сил резания при обратном продольном точении титановых сплавов. Дана оценка применимости стратегии обратного продольного точения в промышленности при обработке деталей из титана.

Ключевые слова: точение, обратное точение, силы резания, титан, титановые сплавы, динамометр, режимы резания, механообработка.

INCREASING THE EFFICIENCY OF TURNING OF TITANIUM ALLOYS

*S.A. Timofeev¹,
A.V. Savilov¹,
A.S. Pyatykh¹,
P.S. Bryzgunova¹*

¹ *Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

ABSTRACT

In this study, reverse turning technology is considered. In this case, modern cutting tools with interchangeable inserts, high-performance CNC equipment and high-precision measuring equipment are used. The results of the analysis of cutting forces during the reverse turning of titanium alloys are presented. The applicability of the reverse turning strategy in the industry in the processing of titanium parts is given.

Keywords: turning, reverse turning, cutting forces, titanium, titanium alloys, dynamometer, cutting conditions, machining.

Введение

Повышение производительности при точении титановых сплавов является актуальной задачей, так как позволяет повысить конкурентоспособность изготавливаемой продукции, путем снижения технологической себестоимости изготовления детали [1, 2]. Данная задача решается различными способами. Например, повышением режимов резания, применением

инновационных режущих инструментов, прогрессивных стратегий обработки и т.п. [3]. Среди инновационных токарных инструментов следует отметить резцы для реверсивного точения [4]. Этот инструмент выполняет обработку, как в прямом, так и в обратном направлении, что значительно сокращает машинное время. Однако применение данного инструмента для обработки деталей из титана требует дополнительных исследований, обусловленных свойствами обрабатываемого материала.

Титановые сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам, так как при их обработке возникают высокие силы резания, что приводит к повышению температуры в зоне резания. Это приводит к негативным изменениям в микроструктуре и свойствах как инструмента, так и самого обрабатываемого материала. Так при обработке титановых сплавов при превышении допустимой скорости резания, происходит ускоренное разрушение режущей пластины [5]. Соответственно, для повышения производительности обработки титановых сплавов, рекомендуется повышать или подачу, или глубину резания. В свою очередь, увеличение подачи и глубины резания ограничено размерами и формой режущих пластин.

Изменение геометрии режущего инструмента также влияет на силы резания и температуру, и, соответственно, позволяет оптимизировать процесс резания. В особенности, токарный инструмент с маленьким главным углом в плане позволяет снизить удельную нагрузку из-за уменьшения толщины стружки, при этом нагрузка на пластину распределяется на большей части режущей кромки, что позволяет эффективней использовать саму режущую кромку и повысить стойкость инструмента (рис.1) [6, 7, 8].

Целью данного исследования является определение оптимальных путей увеличения производительности обработки титановых сплавов, позволяющих в полной мере использовать возможности обрабатывающего станка и не приводящих при этом к критическому росту сил резания. Объектом исследования является токарный резец с возможностью реверсивной рабочей подачи.

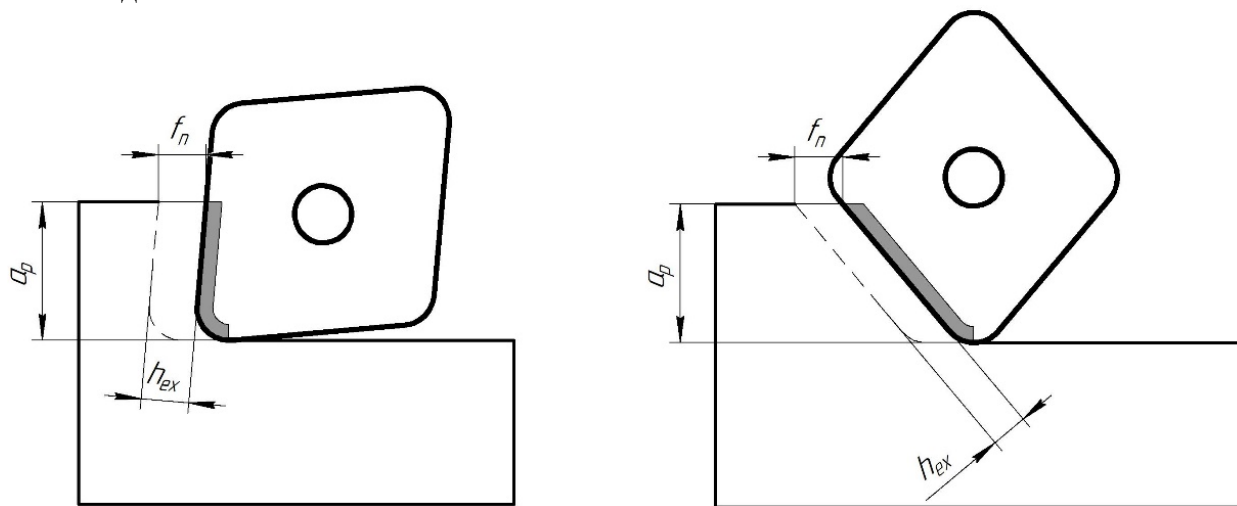


Рисунок 1. Влияние главного угла в плане на толщину стружки

Испытания проводились на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400. В качестве исследуемых материалов были выбраны прутки титановых сплавов BT20 и BT22, применяемые для изготовления реальных авиационных деталей. Химический состав и механические свойства данных материалов приведены в таблицах 1, 2. Закрепление производилось в трехкулачковом патроне с усилием зажима 55 кН, с поджимом задней бабкой.

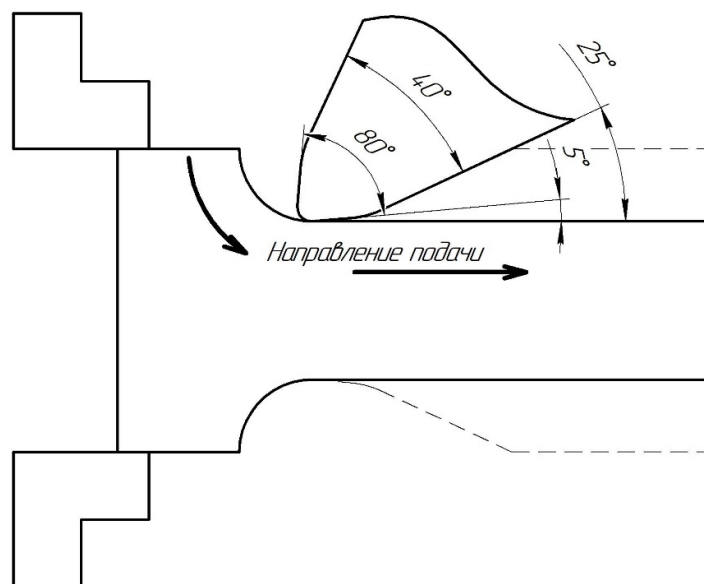
Таблица 1. Химический состав титановых сплавов BT20 и BT22

Материал	Fe	C	Si	Cr	Mo	V	N	Ti	Al	Zr	O	H
BT20	0.25	до 0.1	до 0.15	-	0.5-2	0.8-2.5	до 0.05	85.15-91.4	5.5-7	1.5-2.5	до 0.15	до 0.015
BT22	0.5-1.5	до 0.1	до 0.15	0.5-1.5	4-5.5	4-5.5	до 0.05	79.4-86.3	4.4-5.7	до 0.3	до 0.18	до 0.015

Таблица 2. Механические свойства титановых сплавов BT20 и BT22

Материал	γ , %	δ , %	σ_B , МПа	Твердость HB, МПа
BT20	20-25	8-10	880-1130	341
BT22	17-30	7-10	1080-1280	285

Применялся токарный резец Sandvik Coromant CP-25BL-2020-11 со сменной многогранной пластиной CP-B1108 M5 1115. Отличительной особенностью пластины для обратного продольного точения является то, что вершина двойная (рис.2), соответственно есть два угла при вершине и два главных угла: угол при вершине составляет 80 градусов, а главный угол в плане 5 градусов; угол между основными режущими кромками составляет 40 градусов, а главный угол в плане между основной режущей кромкой и осью подачи – 25 градусов. В работе рассматривалась схема резания – обратное продольное точение. При такой схеме резания инструмент движется от шпинделя к торцу заготовки, при этом врезание инструмента производится по радиусу, а сам инструмент располагается как при прямом продольном точении. Маленький главный угол в плане должен

**Рисунок 2.** Схема резания и геометрические параметры резца для обратного точения

Точение материалов производилось в диапазоне от минимальных до максимальных режимов резания рекомендованных производителем, и варьировались в следующих диапазонах: глубина резания – $a_p=1\ldots 2,5$ мм с шагом 0,5 мм; скорость резания – $V_c=40\ldots 100$ м/мин с шагом 20 м/мин; подача на оборот – $f_n=0,2\ldots 0,5$ мм/об с шагом 0,1 мм/об.

Так как основная задача - это повышение эффективности механической обработки, без значительного увеличения нагрузки на станок, то основным показателем для анализа является сила резания при точении. Для измерения сил резания использовался 3-х компонентный динамометрический комплекс Kistler Type 9129AA. Для расчета мощности при точении использовалась формула (1). Также, по формуле (2) был рассчитан удельный объем снимаемого материала, для показательного сравнения эффективности режимов резания. Полученные результаты представлены в таблице 4.

$$P_c = \frac{F_y \cdot V_c}{60 \cdot 1000} \quad (1)$$

где F_y – тангенциальная сила резания;

V_c – скорость резания.

$$Q = a_p \cdot V_c \cdot f_n \quad (2)$$

где a_p – глубина резания;

f_n – величина подачи.

Таблица 4. Силы резания при точении титановых сплавов BT20 и BT22

Материал	V_c , м/мин	a_p , мм	f_n , мм/об	F_x , Н	F_y , Н	F_z , Н	P_c , кВт	Q , см ³ /мин
BT20	40	1,5	0,3	1484	1391	675	0,91	18
	60	1,5	0,3	1431	1442	575	1,41	27
	80	1,5	0,3	1414	1455	578	1,90	36
	100	1,5	0,3	1436	1463	577	2,39	45
	80	1	0,3	1290	1122	466	1,47	24
	80	1,5	0,3	1414	1455	578	1,90	36
	80	2	0,3	1977	1828	950	2,39	48
	80	2,5	0,3	2363	2239	1107	2,93	60
	80	1,5	0,2	1362	1050	532	1,37	24
	80	1,5	0,3	1414	1455	578	1,90	36
	80	1,5	0,4	1824	1841	771	2,41	48
	80	1,5	0,5	2039	2290	998	2,99	60
BT22	40	1,5	0,3	1292	1423	466	0,93	18
	60	1,5	0,3	1305	1447	481	1,42	27
	80	1,5	0,3	1224	1419	466	1,85	36
	100	1,5	0,3	1256	1369	478	2,24	45
	80	1	0,3	1168	1024	411	1,34	24
	80	1,5	0,3	1224	1419	466	1,85	36
	80	2	0,3	1591	1764	663	2,31	48
	80	2,5	0,3	1958	2265	862	2,96	60
	80	1,5	0,2	1066	999	406	1,31	24
	80	1,5	0,3	1224	1419	466	1,85	36
	80	1,5	0,4	1695	1770	712	2,31	48
	80	1,5	0,5	1876	2065	835	2,70	60

Зависимости силы резания от режимов резания приведены на рисунке 3. Как видно из графиков, радиальная сила (F_x) примерно соразмерна тангенциальной силе резания (F_y), что

объясняется маленьким главным углом в плане, при этом создаются значительные изгибающие усилия на заготовке. Соответственно, такая обработка не рекомендуется для маложестких деталей [9]. Это в отличие от обработки токарными резцами имеющих главный угол в плане ~ 90 градусов, при обработке которыми основное распределение идет на тангенциальную силу, влияющую на мощность точения, и осевую [10, 11, 12].

Также из графиков видно закономерное снижение сил резания при достижении скорости резания $V_c=80$ м/мин, как для сплава ВТ20, так и для ВТ22. Опять же, стоит иметь в виду, что обработка титановых сплавов на больших скоростях резания приводит к быстрому износу режущих пластин, поэтому не рекомендуется обработка на скоростях более 100 м/мин.

Даже на максимальных режимах резания мощность резания не достигла и 50% от мощности станка, соответственно допустима обработка на всех режимах резания, рассмотренных в данной работе.

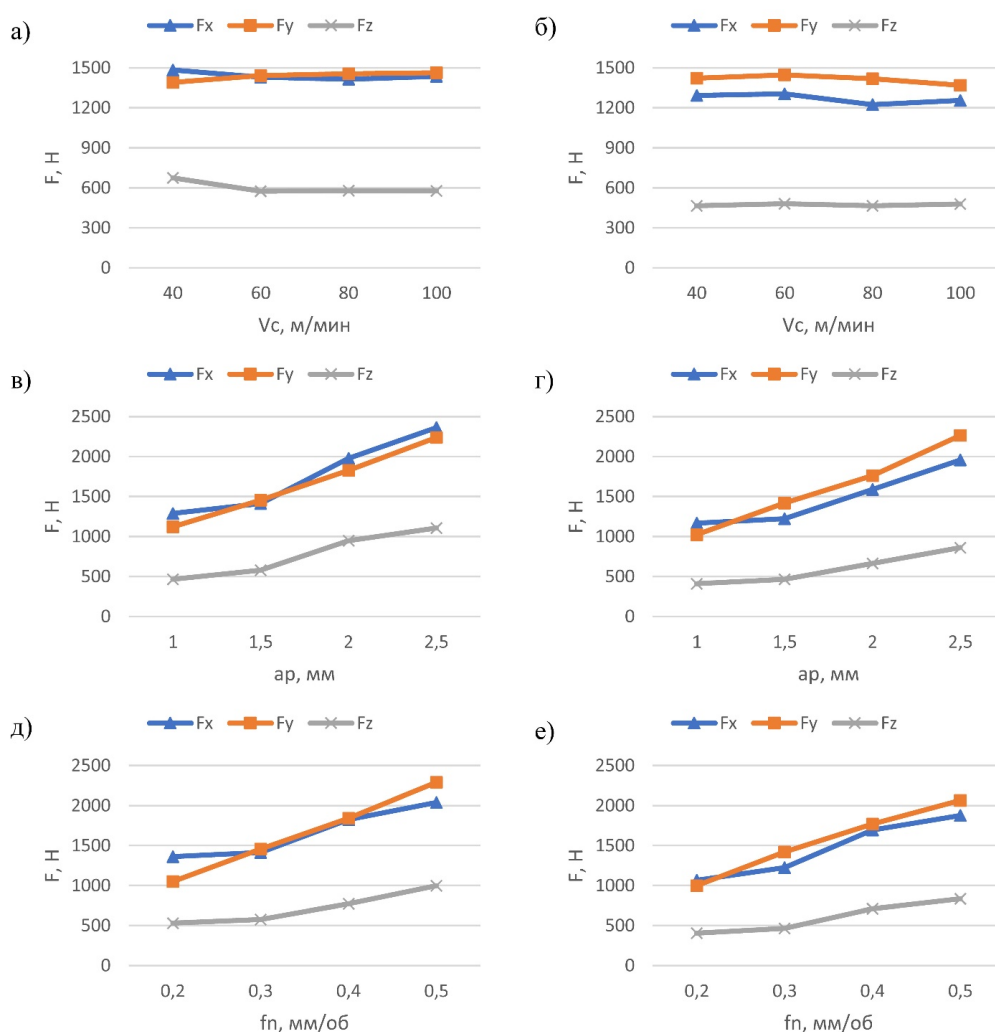


Рисунок 3. Силы резания при точение титановых сплавов ВТ20 и ВТ22: а – зависимость сил резания от скорости резания для ВТ20; б – зависимость сил резания от скорости резания для ВТ22; в – зависимость сил резания от глубины резания для ВТ20; г – зависимость сил резания от глубины резания для ВТ22; д – зависимость сил резания от подачи для ВТ20; е – зависимость сил резания от подачи для ВТ22.

В результате проведенных работ подтверждена целесообразность применения реверсивного точения для повышения эффективности обработки титановых сплавов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов точения деталей из титановых сплавов в условиях реального производства. Продолжение исследований рекомендуется проводить с учётом анализа большего числа выходных параметров. Например, наряду с силами резания необходимо измерять температуру в зоне резания, вибрации и шероховатость. В некоторых случаях важное значение имеют остаточные напряжения. Также практическую значимость исследований можно повысить за счёт комплексной оценки работы инструмента как в прямом, так и в обратном направлении.

Список литературы

1. Вепрев А.А., Сергунов А.В., Головных И.М., Пашков А.Е., Ахатов Р.Х., Шмаков А.К., Савилов А.В. Опыт и перспективы участия вузовской науки в создании передовых технологий авиастроения на базе корпорации "Иркут" // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. 2012. № 4. С. 50-57.
2. Oxley P.L.B. Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability/ P.L.B. Oxley // Ellis Horwood Ltd. – 1989. Vol. 242.
3. Carmita Camposeco-Negrete C.: Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA, J. Cleaner Production, 53 (2013) 195-203.
4. NOSOL, Adrian & Bartoszek, Marian & Winiarski, Przemysław. (2017). BADANIA ENERGOCHŁONNOŚCI PROCESU TOCZENIA WSTECZNEGO COROTURN PRIME. Scientific Letters of Rzeszow University of Technology - Mechanics. 361-368. 10.7862/rm.2017.32.
5. Серебренникова, А. Г. Титановый сплав BT22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента / А. Г. Серебренникова, В. Б. Гурылев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 3(152). – С. 548-560. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-3-548-560. – EDN SJUZW.
6. Altintas, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / Y. Altintas // Cambridge University Press. – 2012. – 366 p.
7. Mavliutov A.R., Zlotnikov E.G. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Vol. 327. 2018. 042069.
8. Jagadesh T, Samuel GL (2014) Investigation into cutting forces and surface roughness in micro turning of titanium alloy using coated carbide tool. Procedia Materials Science 5:2450-2457
9. Свинин В.М., Пешкова Е.А., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю. Исследование регенеративных колебаний при токарной обработке нежестких валов// Системы. Методы. Технологии. 2016. №3 (31) С. 47- 52.
10. Железнов Г.С., Схиртладзе А.Г. Процессы механической и физико-технической обработки материалов: учебник/ Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе. – 2-изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 46 с.
11. Грановский Г.И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов./ Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. М.: Высш. шк., 1985. 304 с., ил.
12. И. Дж. А. Армарего, Р.Х. Браун. Обработка металлов резанием. Пер. с англ. В.А. Пастунова. М.: Машиностроение. 1977. 325 с.

УДК 621.9

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СРЕДА, КАК ОСНОВА ЦИФРОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

*А.С. Говорков¹,
Д.А. Еловенко¹*

¹ФГБОУ ВО ИРНИТУ, Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ

В настоящее время основой структуры любого производственного предприятия, осуществляющего выпуск продукции широкой номенклатуры, является производственная среда (ПС). Она представляет собой совокупность производственных, информационных, управленческих, вспомогательных процессов, которые предназначены для эффективного и безопасного выпуска продукции, а также для удовлетворения требований потребителя.

Производственная среда имеет иерархическую структуру и множество отдельных параметров, от каждого из которых зависит эффективность технологического процесса.

Ключевые слова: производственная среда, иерархия, конструктивные решения, предприятие, информационный процесс, эффективность, организационная структура.

THE PRODUCTION ENVIRONMENT AS THE BASIS OF THE DIGITAL ENTERPRISE

*A.S. Govorkov¹,
D.A. Elovenko¹*

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT

Nowadays, the basis of the structure of any manufacturing enterprise, which produces a wide range of products, is the production environment. It is a set of production, information, management, support processes which are designed to produce products efficiently and safely, as well as to meet customer requirements.

The production environment has a hierarchical structure and many individual parameters, on each of which depends on efficiency of the technological process.

Keywords: manufacturing environment, hierarchy, design solutions, enterprise, information process, efficiency, organizational structure.

Основной функцией любого производственного предприятия является выпуск готовой продукции, качество которой должно в полной мере удовлетворять требованиям потребителя. В связи с этим, на предприятии формируется определенная структура его производственной деятельности, позволяющая выполнять все необходимые производственные процессы.

Рассмотрим некоторые особенности производственной системы, которая свойственна машиностроительным предприятиям.

При рассмотрении следует отметить исследования сторонних авторов, которые стали основой разработанной производственной среды на Иркутском авиационном заводе.

В [1] ПС представлена, как совокупность множества однотипных параметров, которые расположены в порядке их иерархии. При этом верхний уровень ПС занимают параметры, показанные на рисунке 1.

В этой иерархической системе множество параметров ПС составляют параметры выпускаемых изделий. К этим параметрам относятся: конструктивные решения, характеристики технологических операций, параметры, которые характеризуют средства применяемого технического оснащения, а также прочие параметры, которые не входят в рассматриваемые подмножества параметров.

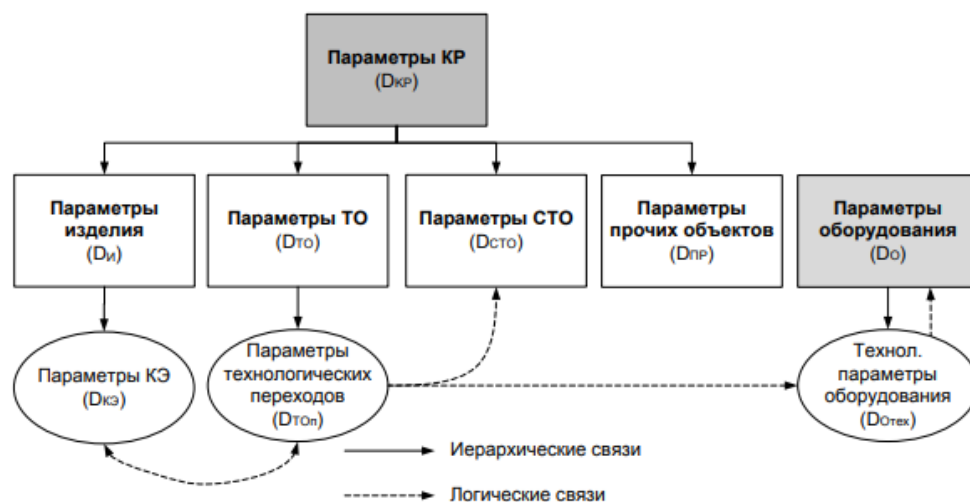


Рисунок 1. Множество параметров производственной среды.

Таким образом, по результатам изучения работы [1], следует отметить, что ПС представляет собой только узкое понятие, в которое заключены параметры выпускаемой продукции, оборудования и технологических операций.

Авторы [2] осуществили очень удачный переход от понятия «производственная среда» к более широкому понятию «производственная система». Она представляет собой совокупность:

- людских ресурсов, которые задействованы в производственном процессе;
- материальную базу предприятия;
- производственные процессы;
- научно-технический потенциал предприятия;
- информационные процессы, которые управляют предприятием.

Структура этой производственной системы приведена на рисунке 2 [2].

Таким образом, понятие «производственная система» включает в себя также людские ресурсы, которые играют огромную роль в работе предприятия. При этом производственная система представляет собой иерархическую структуру, совершенство которой возрастает от наименее простых элементов (отдельных видов выпускаемой продукции) к наиболее сложным (производственным участкам, на которых осуществляется выпуск сложных агрегатов и узлов).

Показанная на рисунке 2 производственная структура предприятия на всех уровнях включает людские ресурсы, которые являются ценнейшим элементом любого предприятия. Хотя при этом, руководством предприятия не всегда верно оценивается их высокая значимость для производственного процесса.



Рисунок 2 Структура производственной системы [2]

В связи с этим, в последнее время на некоторых крупных производственных предприятиях возник дефицит в квалифицированных кадрах, обеспечивающих выпуск продукции надлежащего качества. Прежде всего, это связано с нежеланием компаний вкладывать средства в повышение квалификации своих сотрудников, а также с дефицитом специалистов некоторых высоко технологичных специальностей.

На рисунке 3 приведена общая модель производственной системы международной консультационной компании Kaizen Institute, рассмотренная в [3].



Рисунок 3. Общая модель производственной системы.

По мнению автора [3], основными показателями производственной системы являются:

- производительность;
- абсолютный объем производства;
- численность персонала;
- время переналадки оборудования;
- эффективность загрузки оборудования;
- объем запасов.

В [3] отмечено, что осуществление модернизации какого-либо производственного участка, выпускающего оборудование, может происходить только с учетом модернизации отдельных составляющих производственной системы, которые неразрывно связаны с выпуском основной продукции.

Кроме того, на выпуск продукции оказывает влияние ресурсная база, которую имеет предприятие, и которая используется на всех этапах жизненного цикла производства наукоемкой продукции [4].

Как показывают результаты работы, приведенные в [5], важной проблемой при функционировании производственной системы являются ее эффективность, организационная структура, а также внешние и внутренние факторы, оказывающие на нее влияние.

По мнению автора [6], производственная система представляет собой целенаправленную хозяйственную деятельность, которая имеет в своем составе элементы, ресурсы, необходимые для выпуска конечной продукции.

По результатам изучения приведенных выше исследований можно заключить, что производственная среда представляет собой важную часть производственной системы.

Модель интеграции производственной среды в производственную систему предприятия интересно рассмотреть на примере крупного производственного гиганта – Иркутского авиастроительного завода (ИАЗ).

Предприятие выпускает авиационную технику полной заводской готовности. При этом выпуск начинается от отдельной детали и заканчивается полностью готовым к использованию воздушным судном.

Такое предприятие имеет специфическую структуру производственной среды, которая также имеет иерархическую структуру от более простого объекта к более сложному.

Предлагаемая модель производственной среды предприятия на примере ИАЗ, приведена на рисунке 4.

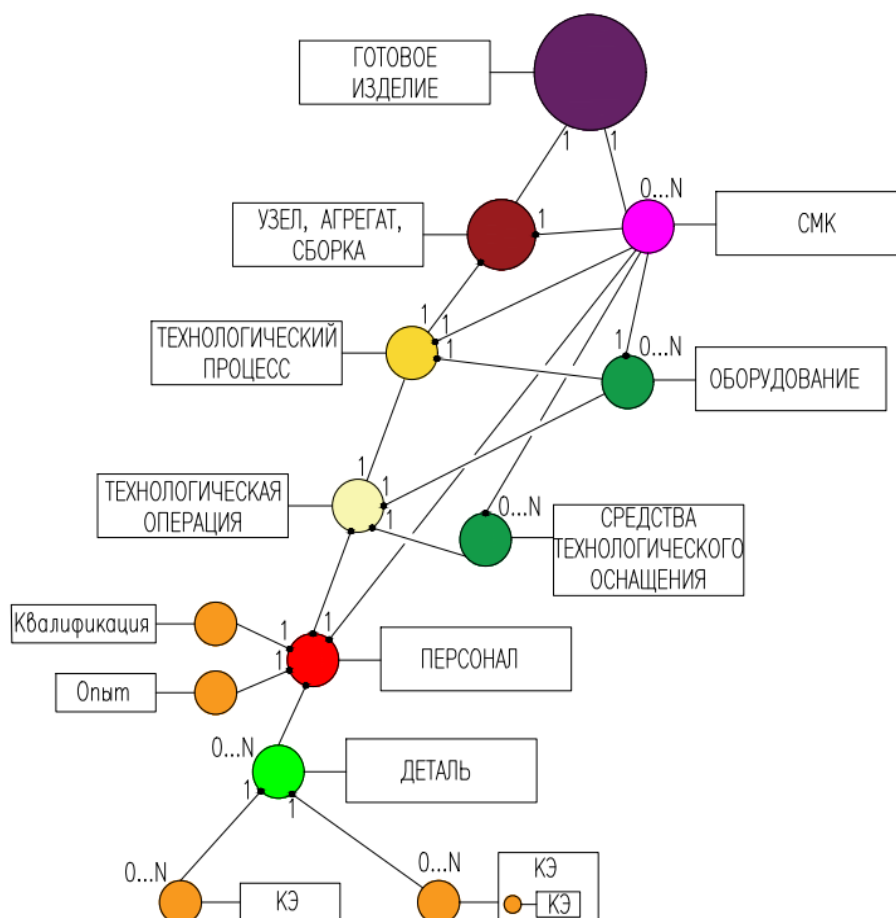


Рисунок 4. Иерархия объектов в производственной среде

Каждый из объектов производственной среды, показанный на рисунке 4, обладает своими строго определенными характеристиками и отличается от других объектов, которые также обладают своими свойствами.

Все объекты производственной среды формируют общую базу данных, которая периодически пополняется с введением в производство новых деталей, агрегатов и узлов.

С целью составления базы данных этих объектов, требуется выполнить их классификацию, которая осуществляется по их общим признакам. По общим признакам объекты производственной среды объединяются в одну общую группу. Классификацию их предлагается производить, прежде всего, по назначению. Каждый объект весьма важен в общем объеме производства. Объем его производства обусловлен теми функциями, которые он выполняет в производственной среде.

В соответствии с рисунком 5, наиболее рационально классифицировать объекты не только по их назначению, но и по уровню, который они занимают в производственной среде предприятия.

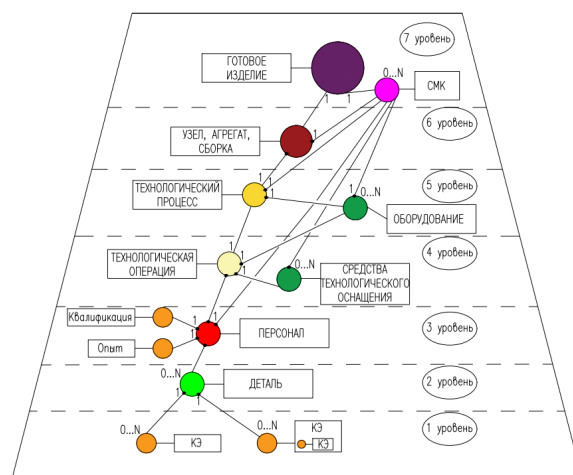


Рисунок 5. Уровни производственной среды

Так, например, к уровню №1 относятся конструктивные элементы, которые составляют конструкцию объекта «деталь». К ним относятся: зубья, впадины, фаски, буртики, пазы и т.д.

Объекты, относящиеся к уровню №1, являются конструктивно менее сложными, чем объекты уровня №2. Они входят в состав конструкции объектов уровня №2 и не могут существовать отдельно от объекта «деталь».

Аналогично объект «деталь», относящийся к уровню №2 не может быть произведен без участия объекта «персонал», то есть является зависимым от объекта уровня №3.

Проходя вверх по иерархической системе, и рассматривая следующий уровень №4, на котором находятся объекты «технологическая операция» и «средства технологического оснащения» можно заключить, что их наличие также обеспечивает производство объекта «деталь». Без их наличия нельзя даже с весьма квалифицированным персоналом произвести деталь невозможно.

Аналогично, рассматривая верхние уровни, следует заметить, что СМК относится к самому высокому №7 уровню, так как не зависит от нижележащих объектов и может существовать, и функционировать независимо от них.

К каждому уровню производственной среды относится множество отдельных объектов a_i , b_i , c_i и т.д, которое для каждого уровня N_i можно выразить следующей зависимостью:

$$N_i = \{a_i, b_i, c_i \dots\} \quad (1)$$

Таким образом, каждый объект производственной среды можно классифицировать по принадлежности к определенному уровню.

Уровни №1...7 представляют собой уровни значимости объекта производственной среды, которые характеризуют значимость объекта в общей структуре предприятия. При этом чем ниже номер уровня, тем менее значимым в производственной структуре предприятия является этот объект.

Еще одним признаком, которым характеризуется объект производственной системы, является нормативно-техническая документация, а также стандарты предприятия и стандарты отрасли. Эти документы предъявляют определенные требования к размерам детали, чистоте поверхности, технологии обработки, точности обработки и многим другим. Выполнение требований нормативных документов обеспечивает качество выпускаемой продукции.

Заключение

Таким образом, классификацию объектов производственной системы рационально выполнить по 3 основным критериям:

- назначению;
- уровню значимости;
- нормативно-технической документации.

Производственная система представляет собой иерархическую структуру, на каждом уровне которой находится строго определенный набор объектов, который объединен между собой по назначению и выполняемым функциям. Объекты каждого уровня однотипны.

Производственная система является частью производственной среды предприятия, которая характеризует всего его особенности, бизнес-процессы, состав материально-технических ресурсов, а также структурные подразделения, входящие в состав.

Значимость структуры производственной среды предприятия состоит в том, что в настоящее время она является основой цифрового предприятия.

Список литературы

1. Цифровое предприятие: трансформация в новую реальность. Ананьин В.И., Зимин К.В., Лугачев М.И. и др. / Журнал «Бизнес-информатика», №2(44) -2018. С.45-53.
2. Черняк Л.И. Как создать цифровое предприятие. 6 этапов на пути к Индустрии 4.0. / Электронный журнал «Государство. Бизнес. ИТ», 2017/08/22.
3. Лысенков, М. С. Влияние цифровых технологий на развитие предприятий / М. С. Лысенков. - Текст: непосредственный // Молодой ученый. -2020. - № 41 (331). — С. 243-244. — URL: <https://moluch.ru/archive/331/74027/> (дата обращения: 05.02.2021).
4. Грибанов Ю.И. Цифровая трансформация социально-экономических систем на основе развития института сервисной интеграции. Автореферат на соискание ученой степени доктора экономических наук. Санкт – Петербург, 2019 – 40 с.
5. Кузнецова Т.И., Иванов Г.М., Опарин О.И. Цифровое предприятие в концепции «Индустрия 4.0» / Журнал «Гуманитарный вестник», №12 – 2017. С.1-11.
6. Днепровская Н.В. Формирование инновационной среды цифровой экономики. Автореферат на соискание ученой степени доктора экономических наук. Москва, 2020 – 356 с.

УДК 621.313.334

ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

**В.В. Дмитриева¹,
А.А. Собянин¹,
П.Е. Сизин²**

¹РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва, Россия,

²НИТУ МИСИС, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Цель работы - рассмотреть режимы торможения конвейерной ленты. При останове или торможении конвейера в ленте возникают волны сжатия и растяжения, распространение которых приводит к пробуксовке и проскальзыванию ленты. Это влечет износ ленты и поломку другого оборудования, что требует дорогостоящего ремонта. В статье представлены результаты моделирования торможения конвейера в программах *SimPowerToolbox* и *Simulink*.

Основные результаты работы – переходные процессы скорости вращения двигателя при торможении конвейера, скорости движения конвейерной ленты, усилий в ленте и тягового фактора, КПД двигателя. Разработанная модель позволяет исследовать динамические режимы работы двигателя и механической части конвейера, анализировать усилия, возникающие в ленте при торможении, оценивать скольжение ленты и величину коэффициента тяги. Полученные результаты позволяют сравнивать свободный выбег конвейера и принудительное торможение. В обоих случаях на графиках хорошо видно увеличение скорости хвостового барабана, вызванное волной сжатия, проходящей в грузовой ветви и приводящей к ускорению через 2 секунды масс на приводном барабане и на грузовой ветви. Перемещение хвостового барабана объясняет падение натяжений в ленте конвейера и снижение тягового фактора и, как следствие – проскальзывание ленты и пробуксовку привода.

Ключевые слова: пуско-тормозные режимы, тормозной момент принудительное торможение, свободный выбег, управляемое натяжное устройство, тяговый фактор, динамические усилия в ленте, математическое моделирование.

MODELING OF VARIOUS MODES OF BELT CONVEYOR BRAKING

*V.V. Dmitrieva¹,
A.A. Sobyenin¹,
P.E. Sizin²,*

¹ *Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia,*

² *NUST MISIS, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The purpose of the work is to consider the braking modes of the conveyor belt. When the conveyor is stopped or decelerated, compression and stretching waves occur in the belt, the propagation of which leads to slipping and slipping of the belt. This entails the wear of the tape and the breakdown of other equipment, which requires expensive repairs. The article presents the results of modeling conveyor braking in the programs SimPowerToolbox and Simulink. The main results of the work are the transients of the engine rotation speed during conveyor braking, the speed of the conveyor belt, the forces in the belt and the traction factor, the efficiency of the engine. The developed model makes it possible to investigate the dynamic operating modes of the engine and the mechanical part of the conveyor, analyze the forces arising in the belt during braking, evaluate the slip of the belt and the magnitude of the traction coefficient. The results obtained allow us to compare the free run-out of the conveyor and forced braking. In both cases, the graphs clearly show an increase in the speed of the tail drum caused by a compression wave passing through the cargo branch and leading to acceleration after 2 seconds of the masses on the drive drum and on the cargo branch. The movement of the tail drum explains the drop in tension in the conveyor belt and the decrease in the traction factor and, as a result, the slip of the belt and the slip of the drive.

Keywords: starting and braking modes, braking torque, forced braking, free run-out, controlled tensioner, traction factor, dynamic forces in the belt, mathematical modeling.

Ленточные конвейеры являются наиболее распространенной составляющей транспортных систем горных предприятий. К сожалению, применение транспортных машин

непрерывного действия, в частности ленточных конвейеров, характеризуется низкой эффективностью. Технические сложности и особенности работы ленточных конвейеров, такие как проскальзывание ленты, ударные нагрузки в приводе, повышенный износ оборудования, значительный расход электроэнергии при неполной загрузке и работе вхолостую, приводят к поиску решения задач оптимизации и автоматизации процессов работы конвейерных установок с целью повышения эффективности их работы. Регулирование скорости движения ленты [1], оптимизация пусковых и тормозных процессов и контроль проскальзывания ленты [2-5] позволяют существенно повысить эффективность транспортных машин [6].

При разгоне или торможении конвейера на приводном барабане могут возникать проскальзывания ленты, что отрицательно влияет на срок службы ленты и привода. Этот фактор можно исключить или свести к минимуму, осуществляя управление натяжным устройством в зависимости от величины тягового фактора ленты конвейера на барабане. Используя современные аппаратные и программные средства и решения, основанные на них, процесс управления можно сделать автоматическим, и тем самым повысить производительность конвейеров, увеличить срок службы их компонентов, исключив при этом человеческий фактор.

Рассмотрим моделирование совместного движения ленты конвейера, привода и натяжного устройства.

Расчетная схема конвейера приведена на рис. 1.

Напомним, что это конечномерная модель, и такие модели используются для упрощения описания систем с распределенными параметрами [7, 8, 9], что в этой модели в качестве координат состояния перемещения и скорости сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства m_i : $X = (x_1, x_2, \dots, x_{10})^T$.

В модели конвейера переменными являются перемещения x_1, x_2, x_3, x_4 , скорости $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4$ и ускорения $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3, \ddot{x}_4$ четырех сосредоточенных масс (заметим, что размерность системы при исключении из описания натяжного устройства естественным образом уменьшилась) в модели натяжного устройства – скорость и перемещение натяжных грузов или каретки натяжного устройства: $\delta = z_1, \dot{\delta} = z_2 = \dot{z}_1$. В системе уравнений, описывающих модель конвейера, сигналы, связанные с ходом натяжного устройства δ , будем считать внешними воздействиями U_1 , кроме того введем $U_3 = M_{TOP}$ – тормозной момент. Останов конвейера может осуществляться как простым отключением привода (свободный выбег), так и с одновременным торможением одного или нескольких барабанов конвейера с помощью тормозных устройств. Второй способ обычно применяется для экстренного торможения конвейера, либо в случае, если свободный выбег занимает значительное время. При задействовании тормозного устройства на валу барабана, торможение которого производится, возникает дополнительный (тормозной) момент, направленный противоположно направлению движения барабана конвейера.

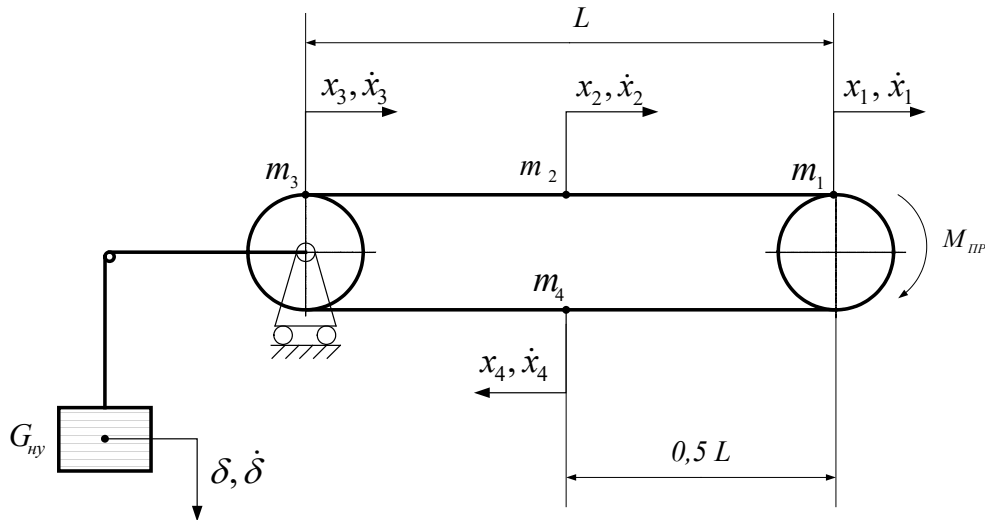


Рисунок 1. Расчетная схема конвейера с пятью сосредоточенными массами

Запишем систему уравнений, описывающих движение ленты конвейера в виде:

$$\dot{X} = AX + B_{пр}M_{пр} + B_{тор}M_{тор} + B_1U_1 + B_s \text{sgn}X. \quad (1)$$

Матрица состояния системы A представляет собой блочную матрицу, включающую в себя матрицы коэффициентов, описывающие упругие связи элементов и демпфирующие связи. Матрицы управления также блочные: матрица $B_{пр}$ связана с движущим моментом привода, B_s - с силами сопротивления, B_1 - с перемещением натяжного устройства, $B_{тор}$ - с тормозным моментом.

Связь между моделями замкнутого контура ленты и натяжного устройства представлена в виде структурной схемы на рис.2.

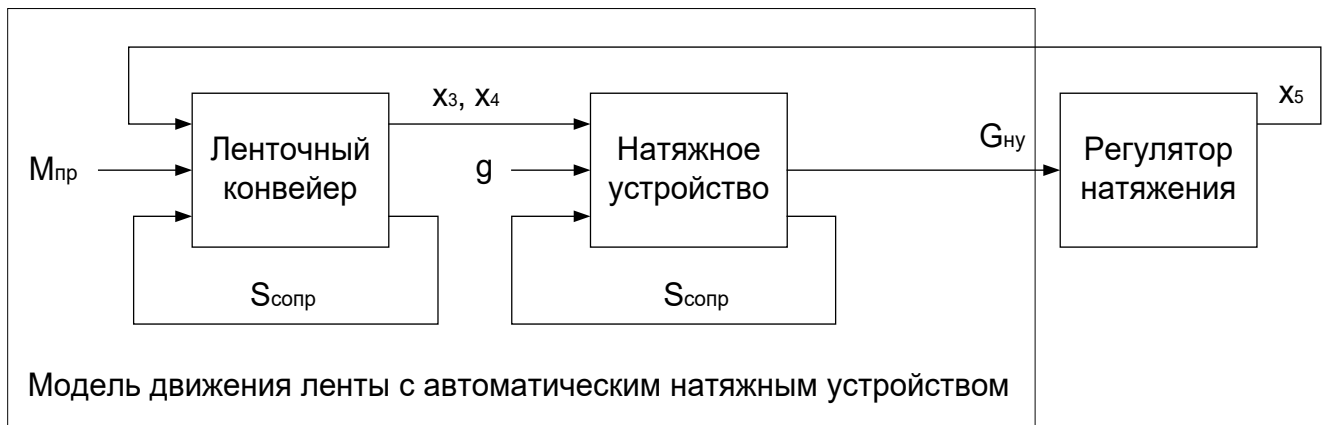


Рисунок 2. Структурная схема связи моделей конвейера и натяжного устройства для синтеза регулятора натяжения

В этой модели можно реализовать торможение и управление натяжным устройством. Анализ процесса останова конвейера преследует следующие цели: оценка параметров переходных процессов, определение максимально допустимых усилий тормозных устройств, обеспечивающих экстренное торможение, определение натяжения грузовой ветви, при котором не происходит потери ее поперечной устойчивости, определение алгоритмов управления и

методов, необходимых для оптимизации переходных процессов останова и торможения [2, 4, 5, 13].

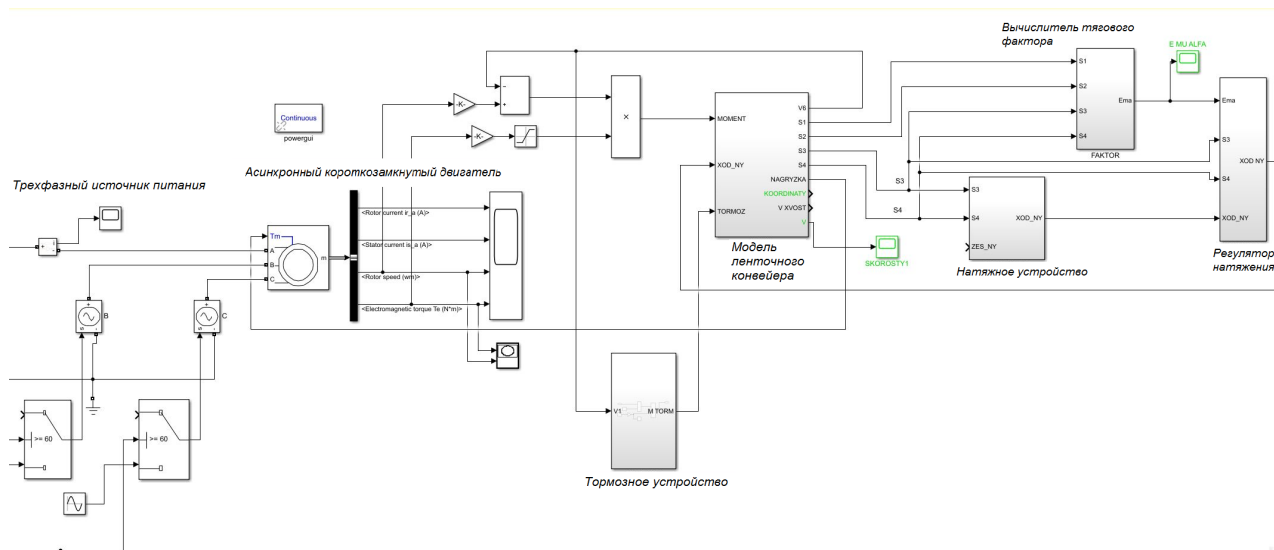


Рисунок 3. Схема моделирования в Matlab ленточного конвейера с асинхронным неуправляемым приводом и тормозным устройством

Моделирование проведем в Matlab. На рис.3 представлена схема моделирования, основные элементы модели конвейерной установки - это асинхронный короткозамкнутый двигатель, источник трехфазного питания [11, 12], модель движения ленты конвейера [3, 13], регулятор натяжения ленты, вычислитель величины тягового фактора и модель тормозного устройства [4, 5].

Все эти блоки представлены и обозначены на схеме моделирования.

Рассмотрим останов конвейера без применения торможения (свободный выбег). Технологически эта операция осуществляется отключением привода. После отключения лента некоторое продолжает движение под действием сил инерции, скорость движения постепенно уменьшается. Проведем моделирование останова конвейера при скорости движения ленты, равной 2 м/с. На рис.4 представлены графики переходных процессов в асинхронном приводе конвейера. Питающее напряжение отключалось на 60 секунде.

Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты приведены на рис.5а. Останов конвейера длится 7 секунд. Из рис.5 видно, что скорость первой сосредоточенной массы, находящейся в точке набегания ленты на приводной барабан, падает по экспоненциальному закону. Падение скоростей остальных сосредоточенных масс происходит медленнее за счет наличия упругих деформаций в ленте конвейера.

Натяжное устройство в момент отключения привода начинает движение и перемещается примерно на 3 м, что приводит к перемещению хвостового барабана в сторону, совпадающую с направлением движения ленты. На графиках хорошо видно увеличение скорости перемещения массы m_3 . Вызванная перемещением натяжного устройства волна сжатия в грузовой ветви приводит к ускорению через 2 секунды масс m_1 и m_2 , что тоже видно на рис.5. Перемещение хвостового барабана объясняет падение натяжений в ленте конвейера и снижение тягового фактора и, как следствие – проскальзывание ленты и пробуксовку привода [14, 15].

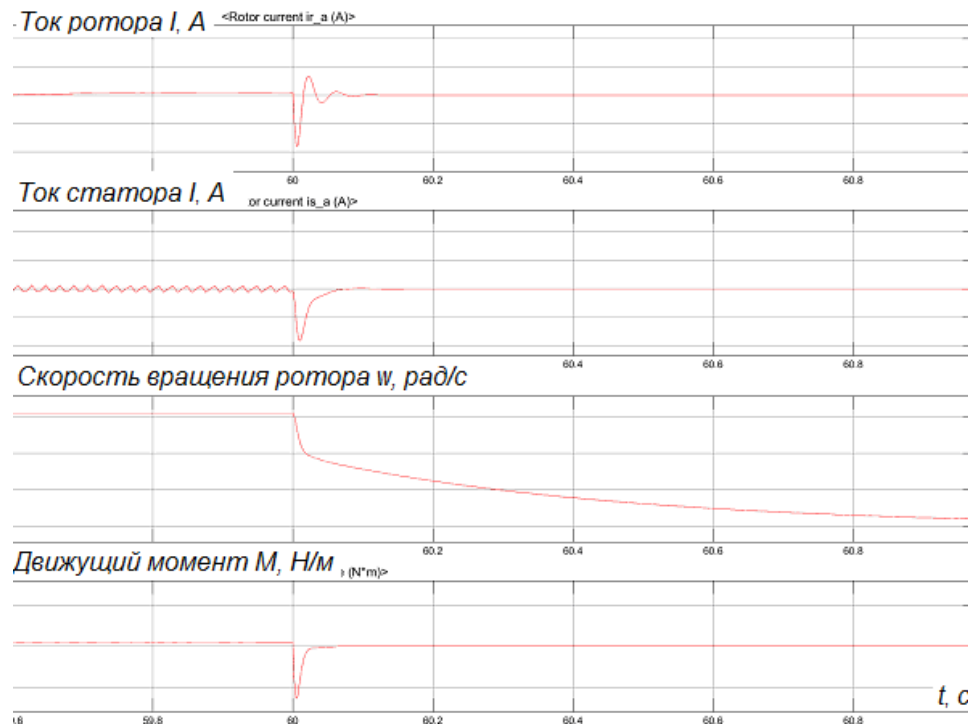


Рисунок 4. Изменение технологических характеристик двигателя

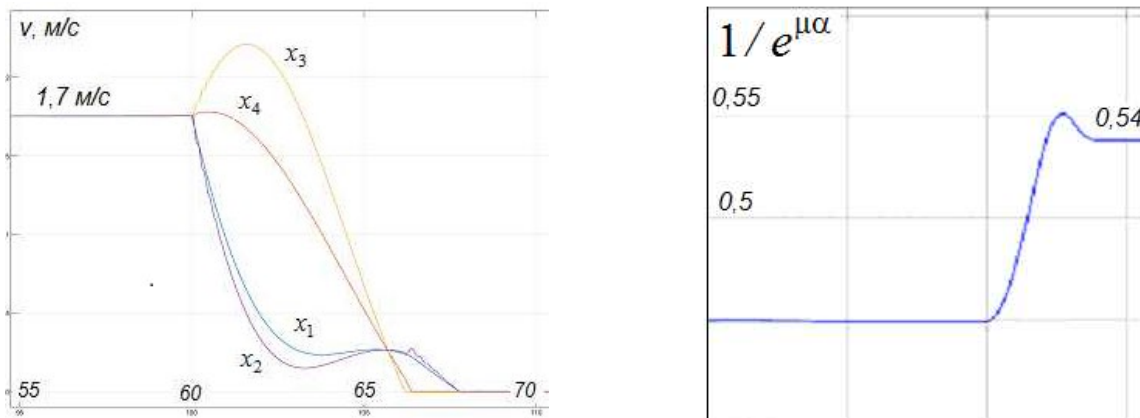


Рисунок 5. а) Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс и б) изменение тягового фактора при свободном выбеге конвейера

На рис. 5.б. Представлено изменение величины тягового фактора при торможении конвейера, вычисленное по формуле:

$$\frac{S_{сб}}{S_{наб}} \leq \frac{1}{e^{\mu\alpha}}, \quad (2)$$

где $e^{\mu\alpha}$ - тяговой фактор конвейера, μ - коэффициент сцепления ленты с барабаном, α - угол охвата лентой приводного барабана.

При останове конвейера без применения тормозных устройств в момент отключения привода натяжение в точке набегания ленты на приводной барабан $S_{наб}$ уменьшается до

величины 51100 Н, натяжение в точке сбега лент с приводного барабана $S_{сб}$ уменьшается до 24900 Н. Результирующее значение тягового фактора для режима торможения, определяемое экспериментально, увеличивается и становится больше 0,4, что говорит о наличии проскальзывания ленты конвейера на протяжении всего времени останова.

Рассмотрим теперь торможение конвейера с использованием тормозных колодок. Этот способ торможения применяется при экстренном останове конвейера или при останове груженого наклонного конвейера. В данной статье будем использовать тормоз на головном барабане. Рассчитаем максимально допустимую величину тормозного момента, необходимую для уменьшения проскальзывания ленты [14, 15]:

$$F_{\text{торм}} = \frac{0,5G_{\text{н}} \cdot k_m - (0,5G_{\text{н}} + W_0) \exp(\mu\alpha) + W_0 \left[1 - \exp\left(\frac{-2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot L}{m_{\text{пр}}}\right) \right]}{1 - \exp\left(\frac{-2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot L}{m_{\text{пр}}}\right)}, \quad (3)$$

где $G_{\text{н}}$ - вес натяжного устройства, $k_m=1,15$ - коэффициент запаса сил трения на приводном барабане, $W_0 = S_{\text{наб}} - 0,5G_{\text{н}}$ - разность между усилием в точке набегания на приводной барабан и усилием на хвостовом барабане, $\exp(\mu\alpha)$ - величина тягового фактора конвейера, ρ_{Γ} - плотность груза, ρ_{Π} - плотность порожней ветви конвейера, L - длина конвейера, $R_{\text{б}}$ - расстояние от оси вала приводного барабана конвейера до точки приложения тормозного усилия (плечо), J - момент инерции привода, $m_{\text{пр}}$ - приведенная к радиусу приводного барабана масса движущихся частей конвейера, рассчитываемая по формуле:

$$m_{\text{пр}} = \frac{J}{R_{\text{б}}^2} + L(\rho_{\Gamma} + \rho_{\Pi}). \quad (4)$$

При следующих числовых данных: масса натяжного устройства 8 тонн, плотность донецкого угля $\rho_{\Gamma} = 0.9 \text{ т/м}^3$, длина конвейера $L=1000$ м, величина тягового фактора для одноприводного конвейера $\exp(\mu\alpha) = 2.5$, $J=0.1326 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $m_{\text{пр}}=900,5$ кг получена максимально допустимая величина тормозного усилия равная 3252 Н. Момент найдем по формуле [18, 19]:

$$M_{\text{ТОРМ}} = F_{\text{ТОРМ}} R_{\text{б}}. \quad (5)$$

Предельное значение тормозного момента $M_{\text{ТОРМ}}=64500$ Н.

Время торможения определим по формуле

$$t_{\text{торм}} = \frac{m_{\text{пр}} \omega}{g(M_{\text{ТОРМ}} + M_{\text{СТ}})}, \quad (6)$$

где $M_{\text{СТ}}$ - статический тормозной момент, $M_{\text{ТОРМ}}$ — момент, создаваемый тормозным устройством.

На рис. 6.а. и 6.б. приведены графики изменения скоростей сосредоточенных масс и величины тягового фактора.

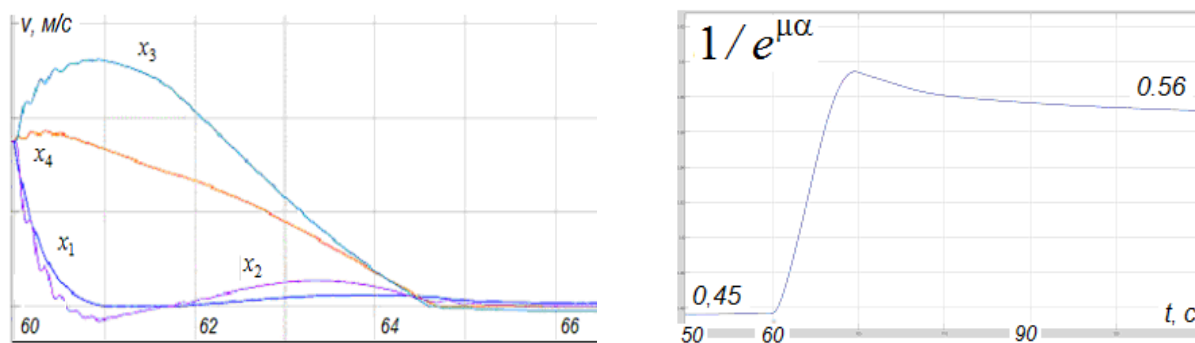


Рисунок 6. Изменение а) скоростей сосредоточенных масс и б) тягового фактора при торможении

Обратим внимание на то, что привод по-прежнему останавливается свободным выбегом. Дополнительно проведем анализ изменения мощностей, потерь мощности и КПД привода при свободном выбеге. Результаты представлены на рис. 7. Анализ полученных осциллограмм позволяет определить, что:

- машина потребляет из сети 50 кВт активной мощности, с учётом того, что номинальная мощность данного двигателя составляет 37 кВт, однако это допустимо, т. к. машина развивает большой крутящий момент;
- максимальная мощность на валу ротора во момент пуска составляет 110 кВт;
- максимальная механическая мощность АД в момент пуска составляет 113 кВт;
- суммарные потери мощности в пике могут достигать 35 кВт, в среднем при пуске суммарные потери изменяются в пределах 10-30 кВт;
- потери мощности в обмотках статора в пике составляют 150 кВт в первые доли секунды запуска после того, как был создан пусковой момент, данные потери практически сравнялись с нулём;
- КПД в процессе пуска плавно нарастает до номинального значения в 0,92 относительные единицы;
- После отключения питания на графиках видно, что возникает переходный процесс, длящийся 80 мс, после этого все показатели принимают значение 0.

В результате моделирования в Matlab`е получены временные зависимости скоростей сосредоточенных масс, усилий и тягового фактора ленточного конвейера при двух способах торможения: свободном выбеге и торможении тормозными колодками, расположенными на головном барабане. Установлено, что даже применение управляемого натяжного устройства не дает возможности полностью устранить проскальзывание ленты на приводном барабане. Это проскальзывание отрицательно влияет не только на срок службы ленты, но и на срок службы привода конвейера. Этот фактор можно исключить или свести к минимуму, применяя различные дополнительные способы управления, которые основаны на своевременном изменении натяжений в ветвях конвейера. Одним из способов является заведомое увеличение натяжений ленты в статических режимах для создания запаса по величине тягового фактора. Однако использование такого режима, когда лента 90% времени находится в перетяннутом состоянии, ведет к ее быстрому износу. Вторым способом может являться предварительное торможение хвостового барабана так, чтобы соблюдалось условие Эйлера. Величина тормозного усилия может быть рассчитана заранее с использованием пропорциональной

S_1 и S_4 в точках набегания и сбегания ленты с приводного барабана до требуемых величин, и стабилизируется величина тягового фактора $E^{\mu\alpha}$ до технологически необходимого значения, что позволит осуществить снижение скорости, останов или торможение конвейера без проскальзывания ленты на приводном барабане.

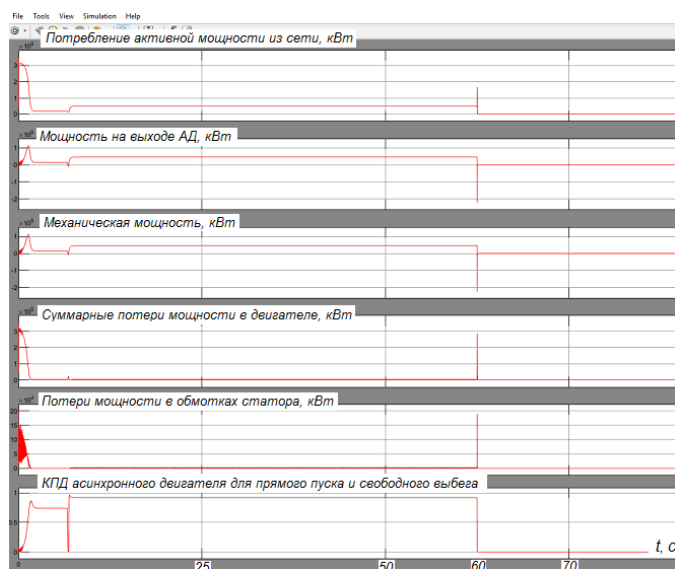


Рисунок 7. Изменения мощностей, потерь мощности в двигателе, потерь мощности в обмотках статора, КПД двигателя при торможении и свободном выбеге

Список литературы

1. Дмитриева В.В., Сизин П.Е. Эффективность эксплуатации ленточного конвейера в зависимости от алгоритмов регулирования скорости ленты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11, с. 128–139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-128-139.
2. Ke Qian Key Technology of Starting and Braking for Downward Belt Conveyor with Large Inclination, Article, January 2020, Mine Engineering 08(04): 451-454, DOI:10.12677/ME.2020.84056
3. Дмитриева В. В., Собянин А. А., Сизин П. Е. Моделирование плавного пуска для асинхронного двигателя ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6, с. 77–92. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_77.
4. Бухаров Р.А. Разработка и компьютерное моделирование алгоритма управления для оптимизации процесса торможения магистрального ленточного конвейера, статья, Горные науки и технологии. – 2014 – с. 27-38.
5. Дмитриева В.В. Моделирование пуско-тормозных режимов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 3, с. 65-72.

6. N.V. Sarathbabu, C.S.N. Murthy, Mangalpady Aruna, Minimization of specific energy of a belt conveyor drive system using space vector modulated direct torque control, *Articl*, January 2019, DOI:10.18698/0536-1044-2019-2-3-10
7. Дмитриева В. В., Сизин П. Е. Анализ моделей ленточного конвейера при различном числе аппроксимирующих масс // Горный информационно-аналитический бюллетень.— 2022. — № 1, с. 34–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_34.
8. Wen-Qiang Zhand, Guang-Fu Bin, Xue-Jun Li, Qiang-Kia Han The dynamic analysis of belt conveyor driving drum based on finite element model, *Conference Paper*, Conference: 2015 International Conference on Energy and Mechanical Engineering, May 2016, DOI:10.1142/9789814749503_0124
9. Запенин И.В., Бельфор В.Е., Селищев Ю.А. Моделирование переходных процессов ленточных конвейеров, – М., "Недра", 1969 – с.56.
10. Xi Pingyuan, Song Yandong Dynamic Simulation on the Belt Conveyor on Emergency Braking, *Article*, 2009, DOI:10.1109/ICICTA.2009.245
11. Греман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink, Проектирование мехатронных систем на ПК. – Санкт-Петербург: Корона. Век, 2011. – 368 с.
12. Терехин, В.Б., Дементьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink. - М.: Юрайт, 2018. – 306 с.
13. V. V. Dmitrieva, P. E. Sizin and A. A. Sobyenin "Application of the soft starter for the asynchronous motor of the belt conveyor" Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 942, XXI Conference of PhD Students and Young Scientists (CPSYS 2021) 23rd-25th June 2021 (virtual), Wroclaw, Poland 12 pages
14. Дмитриев В.Г., Шахмейстер Л.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. – М.: Машиностроение, 1987 – 336 с.
15. Дмитриев В.Г., Вержанский А.П. Основы теории ленточных конвейеров. – М.: Горная книга, 2017 – 590 с.

УДК 621.923

ПРИМЕНЕНИЕ УНВ В ПРОЦЕССАХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

*И.А. Пелевин¹,
Б.О. Зотов¹,
Л.В. Федоренко¹,
А.А. Громов¹*

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Экспериментально была показана возможность использования УНВ для изготовления алюмоматричных композиционных материалов (АМК) аддитивными методами. Было

определено технологическое окно для АМК и определены оптимальные параметры СЛП, обеспечивающие высокую плотность и низкую остаточную пористость синтезированных образцов. Сохранение в структуре АМК УНВ и формирование включений Al_4C_3 , обладающих более высокой прочностью и твердостью по сравнению с исходным алюминиевым сплавом $AlSi10Mg$ приводит к упрочнению материала после СЛП.

Ключевые слова: алюмоматричный композиционный материал, селективное лазерное плавление, углеродные нановолокна, аддитивные технологии.

THE USE OF CNF IN THE PROCESSES OF ADDITIVE PRODUCTION OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITES

*I.A. Pelevin¹,
B.O. Zotov¹,
L.V. Fedorenko¹,
A.A. Gromov¹*

¹ *NUST "MISIS", Moscow, Russia*

ABSTRACT

The possibility of using CNF for the manufacture of aluminum matrix composite materials (AMC) by additive methods was experimentally shown. The technological window for AMA printing and the optimal parameters of the SLM were determined, providing high density and low residual porosity of the synthesized samples. Preservation of CNFs in the AMC structure and the formation of Al_4C_3 inclusions, which have higher strength and hardness compared to the initial aluminum alloy $AlSi10Mg$, leads to strengthening of the material after SLM.

Keywords: aluminum matrix composites, composite material, selective laser melting, carbon nanofiber, additive technologies.

Введение

В настоящее время в мире наблюдается постепенный переход от традиционных (субтрактивных) методов производства материалов, таких как литьё и механическая обработка к аддитивным, при которых производство детали происходит при послойной 3D печати материала по заданной CAD-модели [1]. Существует множество методов 3D печати, однако одним из наиболее популярных методов для производства металлов является селективное лазерное плавление (СЛП) [2]. Данный метод позволяет создавать сложные детали и изделия различных типов, видов и форм с использованием послойного сплавления порошкового слоя при помощи лазерного излучения. В результате свойственных методу СЛП высоких скоростей кристаллизации, формируется мелкодисперсная структура металла, обеспечивающая его высокие эксплуатационные характеристики [3]. При 3D печати чаще всего используют сплавы на основе титана, железа, никеля и алюминия [4-7]. Одним из перспективных вариантов решения задачи повышения свойств легких сплавов является модифицирование сплавов на основе алюминия, легированных кремнием (силумины). Хорошие литейные характеристики и технологичность, а также высокие удельные характеристики прочности обуславливают применение силуминов (таких как $AlSi10Mg$) в процессе аддитивного производства [8-11].

В настоящее время нанотехнологии активно используются в различных отраслях промышленности. Благодаря своим уникальным свойствам наноразмерные материалы способны существенно влиять на характеристики композиционных материалов, поэтому наноматериалы довольно часто используются в качестве армирующей или модифицирующей добавки. Модифицирование наноматериалами оказывает положительное влияние на свойства получаемых изделий, приводит к повышению механических свойств и твердости готовых изделий, повышает их функциональные характеристики. Одним из представителей наноразмерных модификаторов являются углеродные нановолокна (УНВ), благодаря своим исключительным механическим свойствам, низкой плотности, низкому коэффициенту теплового расширения и высокой теплопроводности [12]. Введение УНВ в состав композиционных материалов способствуют повышению эксплуатационных свойств изделия, а также улучшает технологические свойства исходного композиционного порошкового материала [13]. Таким образом, УНВ являются перспективной модифицирующей добавкой для материалов, используемых в аддитивном производстве.

Экспериментальная часть

Исходным порошком алюминиевого сплава для приготовления АМК являлся порошок $AlSi10Mg$, который был модифицирован УНВ в количестве 0.5 масс. %. Внешний вид и морфология исходных порошков и порошковой композиции после смешивания были изучены использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на оборудовании Tescan Vega 3. Дополнительно химический состав образцов и распределение элементов АМК был охарактеризован по результатам энергодисперсионного анализа (EDX) с использованием приставки Oxford Instruments. Гранулометрический анализ исходного порошка был произведен с использованием лазерного анализатора размеров частиц Fritsch Analysette 22. Текучесть порошков была определена по стандартной методике с использованием воронки Холла. Спектры комбинационного рассеяния получены с использованием рамановского конфокального микроскопа Thermo DXR. Микротвердость образцов определялась с использованием твердомера Wilson Tukon 1102, нагрузка при индентировании составляла 200 грамм.

Изготовление порошка АМК с добавлением 0,5 масс. % УНВ проводилось в 2 этапа. Первым этапом являлся засев с использованием ультразвукового диспергатора. В емкости объемом 1 литр были смешаны 500 грамм порошка $AlSi10Mg$ и 2,5 грамма УНВ. Оставшийся объем емкости был залит спиртом. Продолжительность ультразвуковой обработки составила 1 час при частоте 22 кГц. После проведения ультразвукового засева полученная смесь была высушена в термошкафу при температуре 90 °С в течение 10 часов. На втором этапе порошок был подвержен смешиванию в шаровой мельнице в течение 12 часов при частоте вращения 50 об/мин. В качестве рабочих тел мельницы были использованы шары из закаленной стали. Предложенная методика смешивания обеспечивала равномерное распределение УНВ в объеме порошкового материала, что было проконтролировано по результатам СЭМ.

Изучение возможности использования подготовленного АМК в процессе СЛП определялось по результатам печати образцов-кубов размером 5х5х5 мм. Контролируемым параметром являлась относительная плотность образцов, определенная методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018-74. Дополнительно контролировалась пористость и микроструктура образцов после печати методом оптической микроскопии с использованием микроскопа Carl Zeiss Axioscope. Процесс СЛП был реализован с использованием принтера AddSol D50. Отличительной особенностью принтера является то, что он обладает малым диаметром зоны построения (50 мм), который позволяет печатать образцы

из малого объема экспериментальных порошков. При печати был использован волоконный иттербиевый лазер IPG Photonics YLR, с номинальной мощностью в 400 Вт и диаметром пятна 80 мкм.

Подбор оптимальных режимов сплавления АМК производился с использованием параметра объемной плотности энергии (ED_v , Дж/мм³), который учитывает все основные технологические параметры процесса СЛП и определяется формулой 1:

$$ED_v = \frac{P}{vht}; \quad (1)$$

где P – мощность лазера, Вт;

V – скорость движения лазера, мм/с;

t – толщина порошкового слоя, мкм;

h – расстояние между соседними треками движения лазерного пучка или ширина перекрытия, мкм.

Обсуждение результатов

По результатам просвечивающей электронной микроскопии, средняя длина углеродных нановолокон, используемых в работе составляет 500-900 нм. По результатам гранулометрического анализа медианный диаметр частиц $D_{50} = 36 \mu\text{m}$. По результатам анализа, частицы обладали достаточной сферичностью и узким распределением по размерам, необходимым для печати методом СЛП. Подобные требования к порошковому материалу необходимы для формирования равномерного и плотного слоя порошкового материала перед лазерным сплавлением. Результаты сканирующей электронной микроскопии порошка АМК с добавлением 0,5 % УНВ после смешивания приведены на рисунке 1. По результатам сканирующей электронной микроскопии порошка АМК можно сделать вывод о том, что в процессе смешивания не произошло изменение морфологии и геометрии частиц исходного порошка (Рисунок 1 а, б). В структуре АМК не наблюдается агломератов УНВ, а сами волокна равномерно распределены по поверхности частиц AlSi10Mg порошка (рисунок 1 в,г).

Основополагающим фактором, который влияет на изменение окна оптимальных режимов сплавления АМК с добавлением УНВ является большая разница в коэффициентах поглощения лазерного излучения между компонентами АМК. Так, по данным авторов публикации [14] коэффициент поглощения излучения для порошка алюминиевого сплава составляет 62,4 % при длине волны лазера 1070 нм, используемого в данной работе. Коэффициент поглощения УНВ при данной длине волны находится в пределах 85–90 %. Таким образом, добавление частиц УНВ в структуру исходного порошка заметно увеличит коэффициент поглощения лазерного излучения и уменьшит значения плотности энергии (ED_v), необходимые для успешного процесса СЛП. Учитывая этот фактор, были выбраны следующие режимы СЛП, представленные в таблице 1. Уменьшение энерговклада достигалось за счет увеличения скорости сканирования, выбранные значения которой превышали 1000 мм/с. На синтезированных образцах была определена относительная пористость, результаты измерения которой также представлены в таблице 1.

По полученным результатам были построены зависимости основных варьируемых параметров мощности лазерного излучения (P), скорости сканирования (V) и плотности энергии (ED_v) От значений относительной плотности синтезированных образцов.

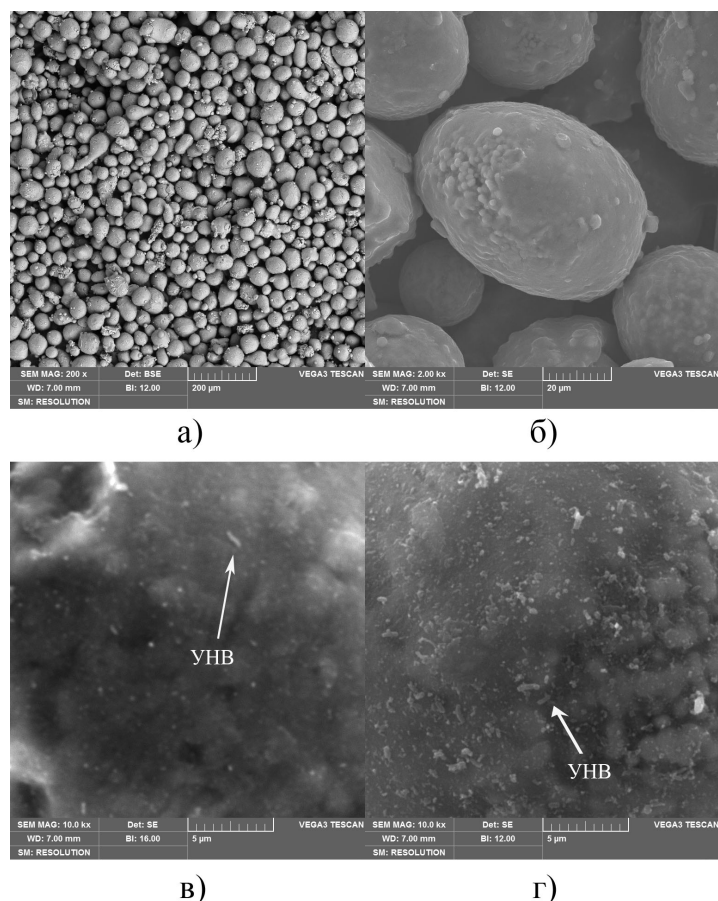


Рисунок 1. Результаты сканирующей электронной микроскопии порошка АМК с добавлением 0,5% УНВ

Анализ полученных зависимостей показал, что высокая плотность образцов (выше 99 %) достигается при мощности лазерного излучения 280–325 Вт и скорости сканирования 1400–1600 мм/с. При этом оптимальная плотность энергии находится в пределах 54,7–72,5 Дж/мм³. После синтеза образца по режиму 4, который характеризуется наивысшим значением относительной плотности, видны мелкие поры сферической формы (до 5 мкм), присутствующие в незначительном количестве. Отсутствие пор нерегулярной формы свидетельствует о достаточном уровне энергии процесса СЛП, обеспечивающего оптимальный синтез материала и низкое содержание остаточных пор в структуре после кристаллизации материала. Таким образом, все дальнейшие исследования были проведены для образца, синтезированного по режиму номер 4, так как его относительная плотность была наилучшей, что свидетельствует о синтезе по оптимальному режиму процесса СЛП. На рисунке 2а видна микроструктура образца АМК после СЛП по режиму 4. Структура характеризуется наличием двух основных зон. Структура внутри бассейна расплава состоит из более дисперсных дендритов, представляющих собой твердый раствор основных элементов сплава, окруженный фазой кремния. Дендриты, кристаллизующиеся по границам бассейна расплава, обладают большим размером по причине более низких скоростей кристаллизации. Дендриты, формирующиеся в результате процесса СЛП являются мелкодисперсными (2–5 мкм длиной и 0.5–1 мкм шириной), что обуславливается высокими скоростями кристаллизации в результате процесса СЛП. Результаты построения карт распределения элементов методом энергодисперсионного анализа также приведены на рисунке 2.

Таблица 1. Режимы СЛП для АМК с добавлением 0.5 % УНВ

№ режима	P, Вт	V, мм/с	h, мкм	t, мкм	EDv, Дж/мм ³	Относительная плотность образца, %
1	280	1000	80	40	87,5	97,3
2	280	1200			72,9	98,2
3	280	1400			62,5	99,2
4	280	1600			54,7	99,8
5	300	1000			93,8	96,6
6	300	1200			78,1	97,8
7	300	1400			67,0	99,4
8	300	1600			58,6	99,6
9	325	1000			101,6	96,7
10	325	1200			84,6	97,5
11	325	1400			72,5	99,1
12	325	1600			63,5	99,5
13	350	1000			109,4	97,2
14	350	1200			91,1	98
15	350	1400			78,1	98,5
16	350	1600			68,4	98,7
17	375	1000			117,2	95,8
18	375	1200			97,7	96,9
19	375	1400			83,7	97,7
20	375	1600			73,2	98,9

По результатам анализа (рисунок 2б) в структуре наблюдаются области с повышенной концентрацией углерода, которые наблюдаются вследствие сохранения УНВ после кристаллизации. Дополнительно с области образца, отмеченной на рисунке 4а, был сделан рентгеноспектральный анализ, который показал высокое содержание углерода в структуре образца (рисунок 2в). По полученным результатам можно сделать вывод о сохранении УНВ в структуре материала после СЛП по оптимальному режиму и отсутствию процесса агломерации УНВ. При процессе СЛП происходило смачивание УНВ сплавом AlSi10Mg, а высокие скорости сканирования обеспечивали равномерное распределение УНВ в структуре после кристаллизации. По результатам микроструктурного анализа наблюдалось сохранение УНВ в объеме ванны расплава, что говорит о хорошей смачиваемости частиц. При отсутствии смачивания УНВ основная концентрация частиц УНВ наблюдалась бы по границам бассейнов расплава, так как происходило бы их выбрасывание на поверхность ванны расплава в следствие эффекта Марангони.

Сохранение в структуре АМК частиц УНВ и формирование включений Al₄C₃, обладающих более высокой прочностью, сдвиговым модулем и твердостью по сравнению с исходным алюминиевым сплавом AlSi10Mg приводит к упрочнению материала, что было показано по результатам измерения микротвердости. Микротвердость АМК после СЛП по режиму 4 составила 149 ± 8 HV, что соответствует увеличению на 20 % по сравнению с исходным материалом AlSi10Mg (120 HV). Такое упрочнение материала происходит при реализации механизма Орована, так как мелкодисперсные частицы УНВ и Al₄C₃ являются барьерами при движении дислокаций в объеме материала.

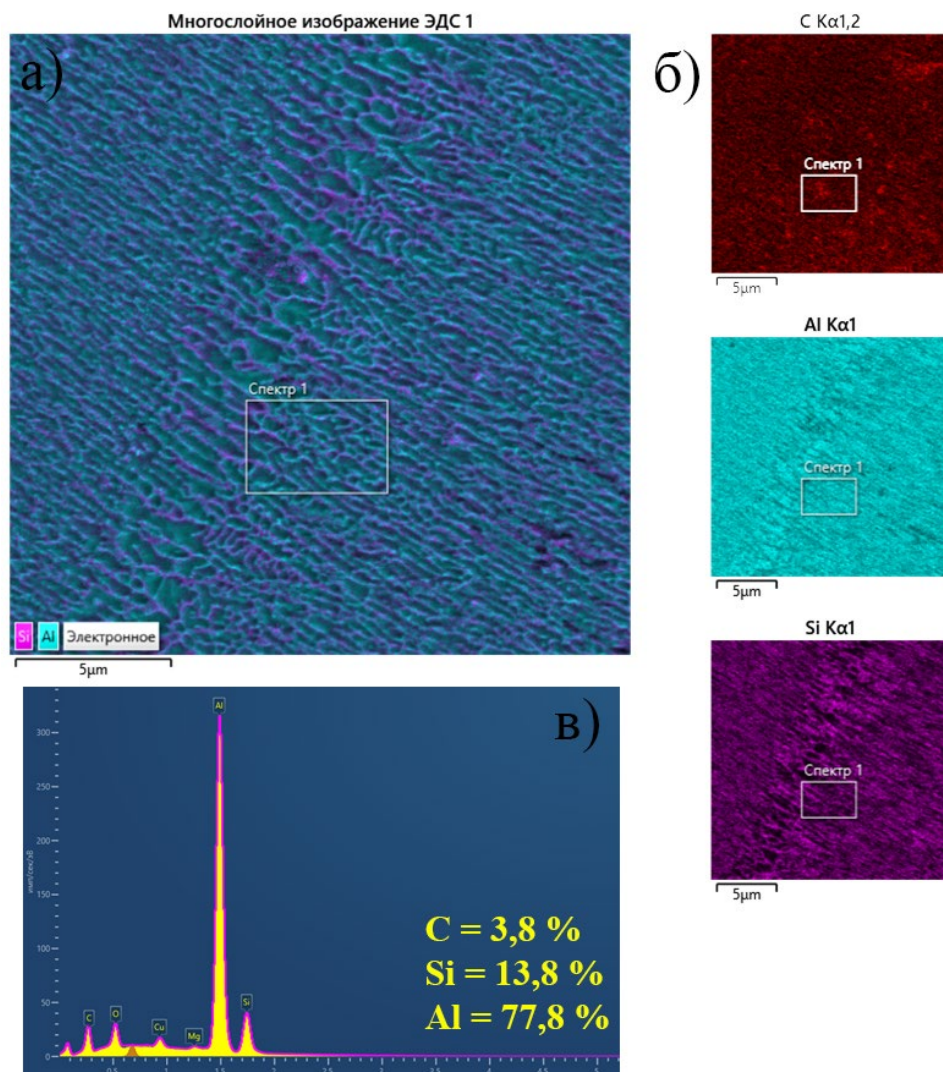


Рисунок 2. Результаты энергодисперсионного анализа образца АМК после СЛП по режиму 4: а) область анализа; б) карты распределения элементов; в) результаты анализа в области «Спектр 1»

Заключение

Была показана возможность использования УНВ для изготовления алюмоматричных композиционных материалов методом СЛП. С использованием ультразвукового диспергирования и смешивания в шаровой мельнице был подготовлен композиционный порошковый материал, состоящий из смеси порошка AlSi10Mg с добавлением 0,5 масс. % УНВ. Было определено технологическое окно для АМК с содержанием 0,5 % УНВ и определены оптимальные параметры СЛП, обеспечивающие высокую плотность и низкую остаточную пористость синтезированных образцов. В результате процесса СЛП по оптимальным режимам лазерная энергия в первую очередь поглощается УНВ, происходит их частичное разрушение по причине высоких температур. Процесс СЛП сопровождается формированием включений Al_4C_3 в структуре материала и сохранением УНВ после синтеза. Сохранение в структуре АМК УНВ и формирование включений Al_4C_3 , обладающих более

высокой прочностью и твердостью по сравнению с исходным алюминиевым сплавом AlSi10Mg приводит к упрочнению материала после СЛП.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00268-20-02 (идентификатор: 0718-2020-0040).

Список литературы

1. Liu Z.Y., Zhao D.D., Wang P., Yan M., Yang C., Chen Z.W., Lu J., Lu Z.P. Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control // Journal of Materials Science & Technology, Volume 100, 2022, Pages 224-236
2. Aboulkhair N.T. et al. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting // Progress in Materials Science. 2019.
3. Nalivaiko A.Y., Ozherelkov D.Y., Pelevin I.A. et al. Comprehensive Study of the 3D Printing of Single Tracks and Cubic Samples by Selective Laser Melting of AlSi10MgCu Alloy // Met. Mater. Int. 28, 787–801 (2022)
4. Saboori A. et al. An overview of additive manufacturing of titanium components by directed energy deposition: Microstructure and mechanical properties // Applied Sciences (Switzerland). 2017. Vol. 7, № 9.
5. Mercado Rojas J.G. et al. Plasma transferred arc additive manufacturing of Nickel metal matrix composites // Manuf. Lett. 2018. Vol. 18.
6. Clem W.C. et al. Mesenchymal stem cell interaction with ultra-smooth nanostructured diamond for wear-resistant orthopaedic implants // Biomaterials. 2008. Vol. 29, № 24–25.
7. Rashed M.G. et al. Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications // Mater. Des. 2016. Vol. 95.
8. Romankiewicz R., Romankiewicz F. THE INFLUENCE OF MODIFICATION FOR STRUCTURE AND IMPACT RESISTANCE OF SILUMIN ALSI11 // Prod. Eng. Arch. 2014. Vol. 3/2.
9. Nalivaiko A.Y. et al. Al-Si-Cu and Al-Si-Cu-Ni alloys for additive manufacturing: Composition, morphology and physical characteristics of powders // Mater. Res. Express. 2019.
10. Zakharov V.O. Topological optimization on the example of the small spacecraft “Aist-2D” // Mod. Sci. 2017. Vol. 3. P. 27–32.
11. Garg P. et al. Advance research progresses in aluminium matrix composites: Manufacturing & applications // Journal of Materials Research and Technology. 2019.
12. Wang X. et al. Effect of carbon nanotube length on thermal, electrical and mechanical properties of CNT/bismaleimide composites // Carbon N. Y. 2013. Vol. 53.
13. Ozherelkov D. Yu., Eremin S. A., Anikin V. N., Chernyshikhin S. V., Nalivaiko A. Yu., Gromov A. A. On the mechanism of electrochemical deposition of graphene on Al foils and AlSi10MgCu particles // Materials Chemistry and Physics, Volume 267, 2021, 124673
14. Dong M. et al. Microstructure and mechanical property of graphene oxide/AlSi10Mg composites fabricated by laser additive manufacturing // Mater. Charact. 2020. Vol. 170.

В качестве приводимого механизма выберем главный насос нефтеперекачивающей станции (НПС) магистрального трубопровода [4]. В качестве главных насосов на НПС используются насосы серии НМ. Для анализа выберем насос НМ-7000-210, паспортные данные которого представлены в таблице 1.

УДК 620.1.08; 625.042

РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕНЗОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСАХ

*К.В. Курашкин¹,
А.Г. Кириллов²,
Р.В. Беляев²*

¹ *Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород, Россия,*

² *Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

АННОТАЦИЯ

Представлена структурная схема и изложен принцип работы опытного образца ультразвукового тензометра для измерения температурных напряжений в рельсовых плетях. Приведен алгоритм определения напряжений на основе измерения времени распространения головной волны в рельсе. Представлены результаты предварительных испытаний. Выполнена оценка точности измерений. Установлена чувствительность по напряжению и температуре.

Ключевые слова: температурные напряжения; рельсы; акустоупругий эффект; головные волны; ультразвуковая тензометрия.

DEVELOPMENT OF ULTRASONIC TENSOMETER FOR MEASURING THERMAL STRESSES IN RAILS

*K.V. Kurashkin¹,
A.G. Kirillov²,
R.V. Belyaev²*

¹ *Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia,*

² *Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

ABSTRACT

The block diagram is presented and the operating principle is described for a prototype of ultrasonic tensometer for measuring thermal stresses in rails. An algorithm for determining stresses based on measuring the propagation time of Lcr wave in the rail is given. The results of preliminary tests are presented. The measurement accuracy is evaluated. Sensitivity to stress and temperature is established.

Keywords: thermal stresses; rails; acoustoelastic effect; Lcr waves; ultrasonic tensometry.

На современных железных дорогах широко используются бесстыковые пути из непрерывно-сваренных рельсов, что позволяет существенно повысить скорость движения поездов, тем самым увеличить грузооборот и повысить комфорт пассажиров. Серьезной проблемой при эксплуатации бесстыкового пути является риск температурного выброса, в результате которого рельсы деформируются и становятся непригодными для работы, возникает

угроза безопасности движения поездов. Из-за почти полного отсутствия температурных компенсаторов, закрепленные рельсовые плети не могут свободно расширяться и сжиматься при изменении температуры, поэтому в жаркую погоду рельсы подвергаются воздействию сжимающих напряжений, а в холодную – растягивающих. Температурный выброс происходит, когда из-за сильного повышения температуры в сечении рельса возникает критическое сжимающее продольное напряжение, которое вызывает потерю устойчивости и изгиб рельсовой плети. Создание способа и устройства контроля температурных напряжений в рельсах в условиях эксплуатации требует инновационных научных и технических решений и представляет очевидный практический интерес. Применение таких разработок для периодического мониторинга потенциально опасных участков железнодорожных путей позволит избежать аварийных ситуаций, связанных с температурным выбросом рельсовых плетей, и повысить уровень безопасности движения железнодорожного транспорта.

При изменении температуры по сравнению с температурой закрепления (нейтральной температурой) в сечении рельса возникает продольное напряжение [1-3]

$$\sigma = \alpha E (T_N - T), \quad (1)$$

где σ – продольное напряжение, $E = 210$ ГПа – модуль Юнга, $\alpha = 11,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – коэффициент линейного теплового расширения, T_N – температура закрепления рельса, T – температура, при которой определяется напряжение.

Из уравнения (1) следует, что при увеличении температуры на 10°C по сравнению с температурой закрепления в рельсе возникает сжимающее напряжение 25 МПа.

Для контроля продольных температурных напряжений в рельсовых плетях бесстыкового железнодорожного пути представляется перспективным использовать ультразвуковую тензометрию. Целью данной работы является апробация разрабатываемого ультразвукового тензомера для измерения температурных напряжений в рельсовых плетях.

Принцип работы ультразвукового тензомера основан на акустоупругом эффекте, который отражает влияние напряжений (деформаций) на скорости распространения упругих волн в материале. На практике, как правило, измеряется время распространения упругих волн, а не скорость. Относительное изменение времени распространения упругой волны линейно зависит от температуры и напряжения, что в общем виде выражается следующим образом [4-6]:

$$\frac{t - t_0}{t_0} = k_\sigma \sigma + k_T (T - T_0), \quad (2)$$

где t_0 – время распространения волны в материале без напряжения при температуре T_0 , t – время распространения волны в материале с напряжением σ при температуре T , k_σ – соответствующий коэффициент акустоупругости, k_T – соответствующий температурный коэффициент.

Напряжение можно определить, если измерить времена распространения t и t_0 , а также температуры T и T_0 :

$$\sigma = \frac{1}{k_\sigma} \left(\frac{t - t_0}{t_0} - k_T (T - T_0) \right). \quad (3)$$

Таким образом, для достоверного определения температурных напряжений в рельсовых плетях необходимы высокая точность измерений времени распространения упругих волн и учет влияния температуры.

В разрабатываемом устройстве используются головные волны, распространяющиеся вдоль направляющей рельса, которые наиболее чувствительны к продольному напряжению. Излучение и прием таких волн осуществляется с поверхности катания головки рельса с помощью контактных пьезоэлектрических преобразователей номинальной частотой 1,25 МГц, расположенных на призмах из полиметилметакрилата (угол призм 27°). В опытном образце реализуется дифференциальная схема измерений времени распространения головной волны с одним излучателем и двумя приемниками (Рисунок 1). Такая схема измерений позволяет компенсировать влияние теплового расширения призм из полиметилметакрилата и значительно уменьшить влияние слоя контактной жидкости и линий задержки [7,8]. Фактически, измеряемое время соответствует времени распространения головной волны в материале на расстояние, равное расстоянию между двумя приемниками. База измерений составляет около 240 мм.

Структурная схема разрабатываемого ультразвукового тензометра (Рисунок 2) включает автономный источник питания, измерительный блок, цифровой блок и планшет.

В лабораторных условиях на нескольких фрагментах рельсов длиной 500 мм выполнялись измерения времени распространения головных волн. Температура в помещении составляла $+21^\circ\text{C}$. В качестве контактной жидкости использовался УЗИ гель. Задача тестов состояла в том, чтобы оценить влияние на погрешность и стабильность измерений условий контакта измерительного блока с поверхностью рельса и вариаций позиционирования измерительного блока на рельсе. Измерения проводились по 10 раз на каждом фрагменте. Позиционирование измерительного блока варьировалось за счет перемещения по рельсу, условия контакта при этом естественным образом несколько изменялись.



Рисунок 1. Дифференциальная схема измерений времени распространения головной волны

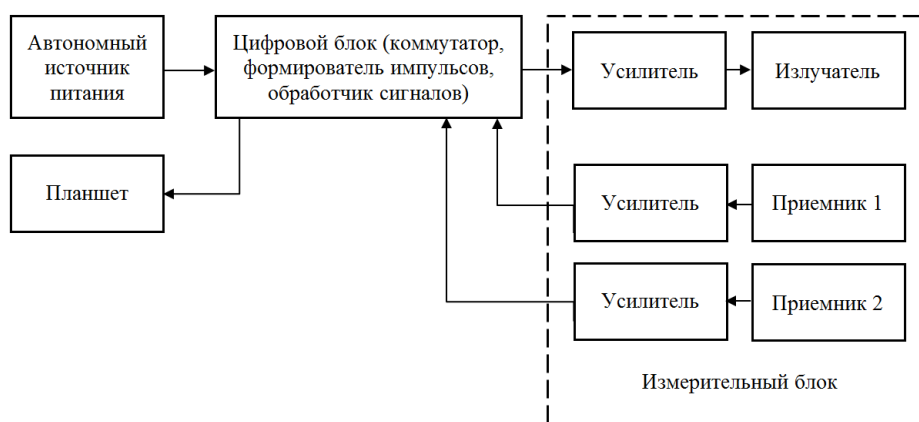


Рисунок 2. Структурная схема разрабатываемого ультразвукового тензометра

В результате проведенных тестов установлено, что опытный образец ультразвукового тензометра позволяет измерять время распространения головных волн в головке рельса с высокой точностью, регистрируемые показания весьма стабильны, вариации позиционирования и случайные изменения условий контакта практически не влияют на измеряемое время, а лишь увеличивают погрешность. Однако времена распространения головных волн в нескольких исследованных фрагментах рельсов значительно отличаются, что объясняется различием структурного состояния. В среднем время распространения головной волны в рельсах составляет около 40 мкс, при этом абсолютная погрешность не превышает 8 нс, а относительная погрешность не превышает 0,02%.

С учетом формулы (3) можно оценить погрешность определения напряжения при постоянной температуре:

$$\Delta_{\sigma} \approx \frac{\delta_t \sqrt{2}}{k_{\sigma}}, \quad (4)$$

где Δ_{σ} – абсолютная погрешность определения напряжения, δ_t – относительная погрешность измерения времени распространения головной волны.

Для головных волн, распространяющихся вдоль направляющей рельса, коэффициент акустоупругости k_{σ} , который определяет чувствительность к продольному напряжению, имеет значение в диапазоне $0,0120 \div 0,0134 \text{ ГПа}^{-1}$ [5,7,9,10]. Следовательно, при относительной погрешности измерения времени распространения головной волны 0,02%, погрешность определения продольного напряжения составит около 22 МПа.

Для оценки влияния температуры на результаты измерений напряжений в рельсах с помощью разрабатываемого ультразвукового тензометра выполнялись температурные тесты. Фрагмент рельса длиной 500 мм и установленный на нем измерительный блок помещались в камеру из теплоизоляционного материала и нагревались с помощью фена с цифровым управлением температурой. Температура рельса контролировалась с помощью двух термопар К типа и цифрового термометра AZ8852. Ввиду габаритов и большой массы фрагмента рельса температурное равновесие внутри камеры устанавливается около 20 мин. В качестве контактной жидкости использовалось силиконовое масло ПМС-1000. Во время температурных тестов положение опытного образца на фрагменте рельса не изменялось, и относительная погрешность измерения времени распространения головной волны не превышала 0,0035%. Полученные экспериментальные данные (Рисунок 3) позволяют определить температурный коэффициент $k_T = 107 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, при этом абсолютная погрешность составляет $5 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Таким образом, изменение температуры на 1°C приводит к относительному изменению времени распространения головной волны на 0,01%. Для сравнения, продольное напряжение 8 МПа вызывает аналогичное изменение.

Для проверки работоспособности разрабатываемого ультразвукового тензометра выполнялись акустомеханические испытания фрагмента рельса длиной 500 мм при сжатии с помощью машины для статических испытаний ГМС-100. Фрагмент рельса с закрепленным на нем измерительным блоком устанавливался между упорными площадками машины для испытаний. Далее давалась сжимающая нагрузка, и проводилось измерение времени распространения головной волны. Тесты повторялись при нагружении с шагом 5 т до максимальной нагрузки 90 т. В качестве контактной жидкости использовался УЗИ гель. Температура в помещении составляла $+25^{\circ}\text{C}$. В результате акустомеханических испытаний фрагмента рельса, подтвердилось, что время распространения головной волны линейно зависит от приложенной нагрузки (Рисунок 4). В лабораторных условиях при фиксированном положении опытного образца на фрагменте рельса во время акустомеханических испытаний

максимальная относительная погрешность измерения времени распространения головной волны составила 0,0035%.

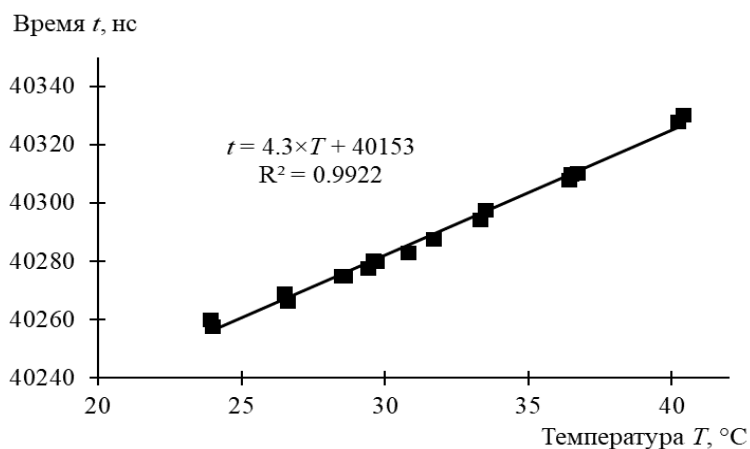


Рисунок 3. Температурная зависимость времени распространения головной волны

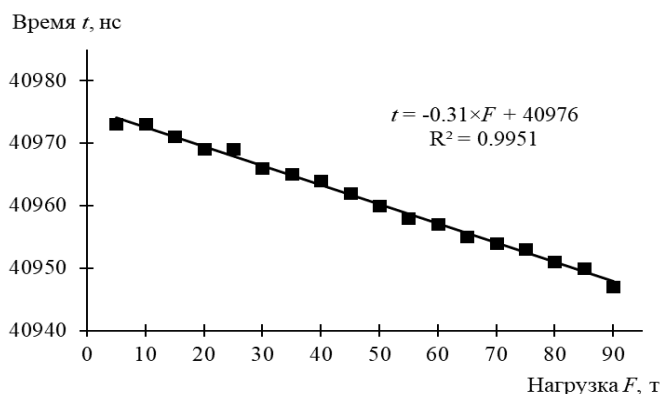


Рисунок 4. Зависимость времени распространения головной волны от нагрузки

Условия сжатия оказались такими, что основное пятно контакта пришлось на подошву рельса. Соответственно нагрузка неравномерно распределилась по сечению рельса. Напряжения в головке рельса вычислялись по данным ультразвуковых измерений с помощью формулы (3) при постоянной температуре и $k_{\sigma} = 0,0127 \text{ ГПа}^{-1}$. Максимальная погрешность определения напряжения, вычисленная по формуле (4), составила 4 МПа. Сравнение теоретических и экспериментальных значений напряжения (Рисунок 5) показывает, что фактические напряжения в головке рельса меньше.

Таким образом, можно констатировать, что выбранная дифференциальная схема измерения времени распространения головных волн, распространяющихся вдоль направляющей рельса, при базе измерений 240 мм с использованием контактных пьезоэлектрических преобразователей с частотой 1,25 МГц полностью работоспособна и позволяет измерять время распространения головных волн в головке рельса с высокой точностью. В лабораторных условиях при фиксированном положении измерительного блока на фрагменте рельса максимальная относительная погрешность измерения времени распространения головной волны составила 0,0035%; при варьировании положения

измерительного блока и случайном изменении условий контакта максимальная относительная погрешность составила 0,02%.

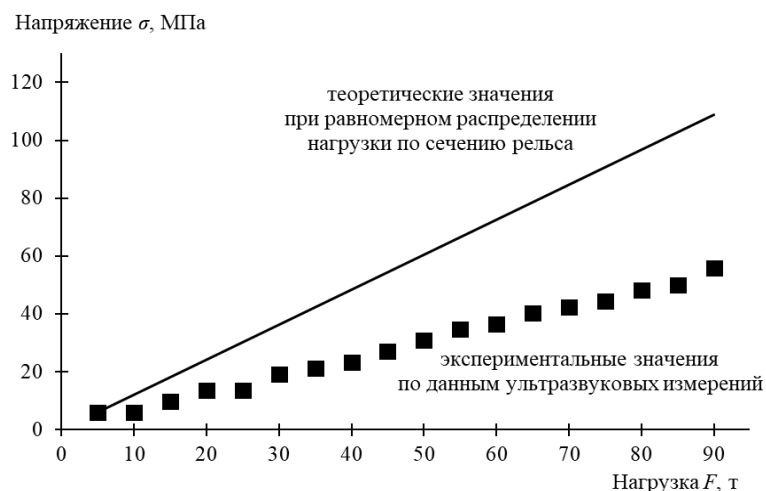


Рисунок 5. Продольные сжимающие напряжения в головке рельса

В целом, опытный образец ультразвукового тензометра позволяет устойчиво определять относительное изменение времени вследствие упругой нагрузки и изменения температуры и может применяться для исследований температурных напряжений в рельсах.

Финансирование: собственные внебюджетные средства ИПФ РАН в рамках ОКР по теме № 1992450 (0112) «Разработка опытного образца акустического тензометра для измерения температурных напряжений в рельсовых плетях», заказчик АО «НПП «ПОЛЕТ».

Список литературы

1. Phillips, R.R., Nucera, C., Coccia, S., Lanza di Scalea, F., Bartoli, I., Fateh, M., Carr, G.A. Monitoring thermal stresses and incipient buckling of continuous-welded rails: results from the UCSD/BNSF/FRA large-scale laboratory test track / *Proc. SPIE* 7981, 2011: 79813T. <https://doi.org/10.1117/12.880241>
2. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. / Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. N 2544р.
3. Xiangyu, D., Liqiang, Z., Zujun, Y., Xining, X. The verification of rail thermal stress measurement system / *Period Polytech Transport Eng* 48, 2020: 45-51. <https://doi.org/10.3311/PPTR.12062>
4. Szelażek, J. Ultrasonic measurement of thermal stresses in continuously welded rails / *NDT&E Int* 25, 1992: 77-85. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(92\)90497-5](https://doi.org/10.1016/0963-8695(92)90497-5)
5. Bray, D.E., Stanley, R.K. Nondestructive evaluation: a tool in design, manufacturing and service. / Boca Raton: CRC Press, 1997. – 586. <https://doi.org/10.1201/9781315272993>
6. Vangi, D., Virga, A. A practical application of ultrasonic thermal stress monitoring in continuous welded rails. / *Exp Mech* 47, 2007: 617-623. <https://doi.org/10.1007/s11340-006-9016-6>
7. Szelażek, J. Sets of piezoelectric probeheads for stress evaluation with subsurface waves / *J Nondestruct Eval* 32, 2013: 188-199. <https://doi.org/10.1007/s10921-013-0172-1>

8. Liu, H., Li, Y., Li, T., Zhang, X., Liu, Y., Liu, K., Wang, Y. Influence factors analysis and accuracy improvement for stress measurement using ultrasonic longitudinal critically refracted (LCR) wave / *Appl Acoust* 141, 2018: 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.07.017>
9. Sun, L., Li, Z., Zhu, W.F., He, Y., Fan, G., Fang, W., Shao, W. A method for long-term on-line monitoring of temperature stress of continuously welded rail / *Adv Mech Eng* 13, 2021: 1-14. <https://doi.org/10.1177/16878140211041432>
10. Hwang, Y., Kim, G., Kim, Y., Park, J., Choi, M.Y., Kim, K. Experimental measurement of residual stress distribution in rail specimens using ultrasonic Lcr waves / *Appl Sci* 11, 2021: 9306. <https://doi.org/10.3390/app11199306>

УДК 621.9

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ С ВНУТРЕННЕЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

*А.И. Скоморохова¹,
А.О. Глебов¹*

¹ Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрено применение топологической оптимизации при проектировании механически нагруженного изделия методом BESO. Представлена блок-схема алгоритма оптимизации, а также расчетная модель с нагрузками и граничными условиями. Выполнена доработка полученной конструкции для повышения ее технологичности. Для повышения эксплуатационных характеристик и уменьшения массы конструкции предложено изготавливать деталь с внутренней пористой структурой определенной плотности. Рассчитана рациональная величина относительной плотности внутренней структуры, обеспечивающая требуемые величины деформации изделия при заданных нагрузках. Представленный в работе подход к проектированию новых деталей позволит значительно сократить временные и материальные ресурсы на изготовление опытных образцов, не удовлетворяющих своему функциональному назначению.

Ключевые слова: топологическая оптимизация; метод BESO; пористая структура; метод конечных элементов.

DESIGN OF OPTIMAL TOPOLOGY PRODUCTS WITH INTERNAL POROUS STRUCTURE

*A.I. Skomorokhova¹,
A.O. Glebov¹*

¹ Tambov State Technical University, Tambov, Russia

ABSTRACT

The application of topological optimization in the design of a mechanically loaded product by the BESO method is considered. A block diagram of the optimization algorithm and a calculation model with boundary conditions and an applied load are presented. The resulting design was improved to improve its manufacturability. To improve performance and reduce the mass of the structure, it is proposed to manufacture a part with an internal porous structure of a certain density. The rational value of the relative density of the internal structure is calculated, which provides the required values of the deformation of the product under given loads. The approach to the design of new parts presented in the paper will significantly reduce the time and material consumption for the manufacture of prototypes that do not satisfy their functional purpose.

Keywords: topological optimization; BESO method; porous structure; finite element method.

Важным этапом проектирования является разработка оптимальной для тех или иных задач конструкции изделия с целью повышения эксплуатационных характеристик. Наряду с оптимизацией форм и размеров объектов, существует топологическая оптимизация (ТО), которая предполагает определение наилучшего распределения материала в области проектирования под заданными нагрузками при сохранении определенных характеристик конструкции, таких как жесткость, прочность и др. [1]. С помощью ТО можно добиться значительного снижения массы деталей без потери функциональности, что важно в отрасли машиностроения. Влиять на показатели функциональности готовых изделий можно также путем организации внутренней пористой структуры, что способствует не только дополнительному снижению массы и экономии материала, но и позволяет создавать композиты за счет заполнения свободного пространства определенными компонентами [2, 3]. Теоретический расчет параметров таких структур сделает возможным прогнозирование поведения конструкций на их основе при различных нагрузках. Это позволит подбирать параметры пористой структуры, обеспечивающие заданные эксплуатационные характеристики, и проверять, насколько разработанная деталь удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям. Таким образом, исключаются лишние затраты времени и материалов на изготовление непригодных образцов с их последующими испытаниями.

Цель работы заключается в выполнении ТО на примере конкретного изделия и определении рационального процента заполнения внутренней структуры полученной конструкции.

В качестве объекта проектирования выбрано предплечье промышленного робота РМ-01 [4] (рис. 1).

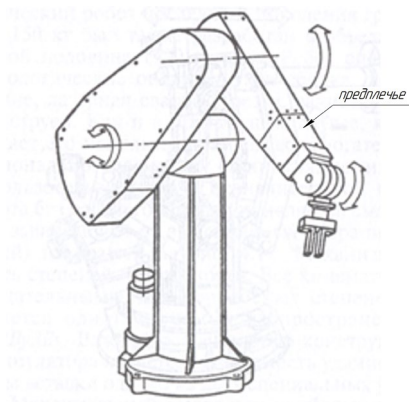


Рисунок 1. Промышленный робот РМ-01

ТО выполнялась методом двунаправленной эволюционной структурной оптимизации (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization – BESO) в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Расчетная модель показана на рис. 2. Слева задано граничное условие жесткой заделки, справа приложена распределенная нагрузка, действующая в направлении осей Y и Z.

Задача эволюционной оптимизации с ограничением по объему формулируется следующим образом [5]:

$$\begin{aligned} \min : C &= \frac{1}{2} \mathbf{f}^T \mathbf{u} \\ s.t. : V^* - \sum_{i=1}^N V_i x_i &= 0, \\ x_i &\in \{0,1\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{f}$ – вектор нагрузки; $\mathbf{u}$ – вектор перемещений; C – механическая податливость (целевая функция); V_i – объем i -го конечного элемента; V^* – заданный объем конструкции; N – общее число конечных элементов; x_i – расчетная переменная, принимающая значение 0 или 1 и обозначающая отсутствие или наличие конечного элемента, соответственно.

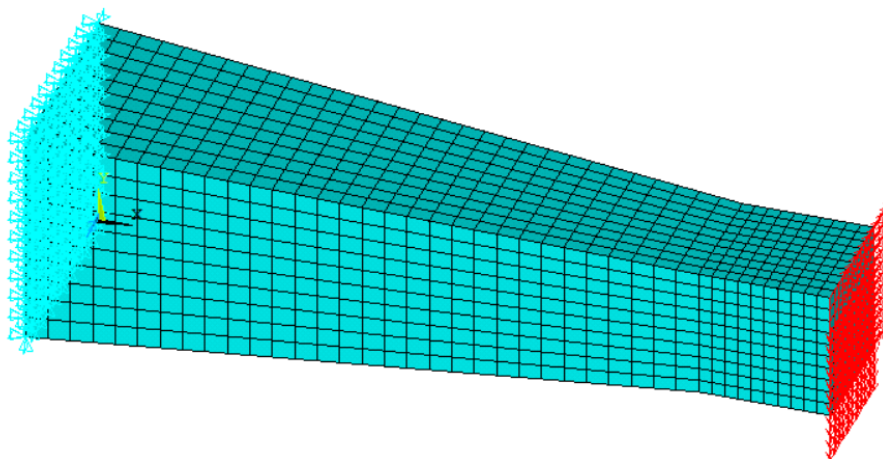


Рисунок 2. Модель для выполнения ТО в системе ANSYS

Для выполнения ТО задавалось ограничение на объем 15% от начального объема конструкции. Оптимизация выполнялась при допуске сходимости целевой функции 10^{-3} . Алгоритм, по которому выполнялась оптимизация, представлен на рис. 3.

В результате получена модель, представленная на рис. 4.

Данная конструкция нуждается в некоторой доработке для упрощения условий ее изготовления. Кроме того, при выполнении оптимизации рассматривалась только часть, а не все предплечье манипулятора. Также необходимо учесть, что при оптимизации нагрузка задавалась только в одном направлении осей Y и Z. Однако она может действовать в противоположном направлении. Поэтому модель, полученную в результате ТО, необходимо зеркально отразить. На основании этого была создана трехмерная модель, которая показана на рис. 5.

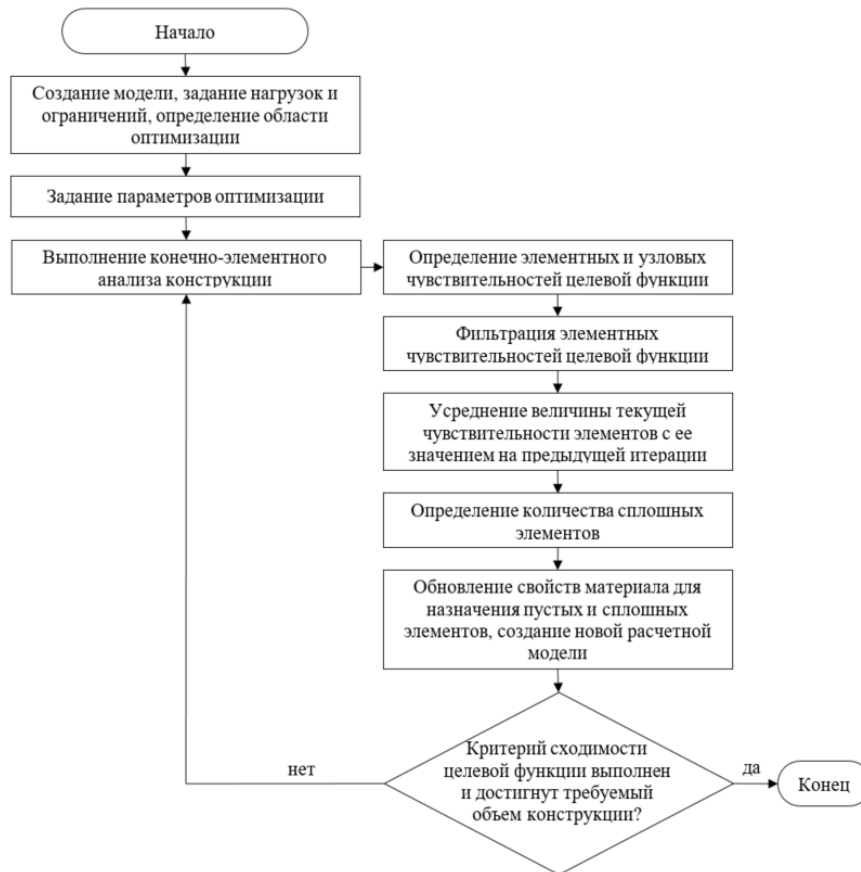


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма ТО по методу BESO

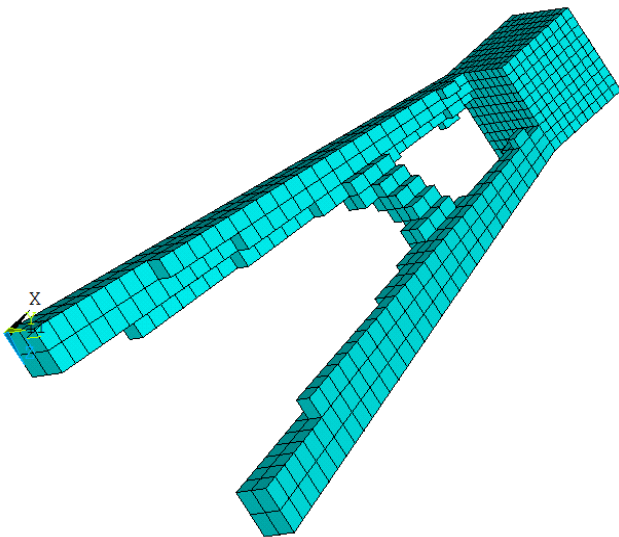


Рисунок 4. Модель, полученная в результате ТО

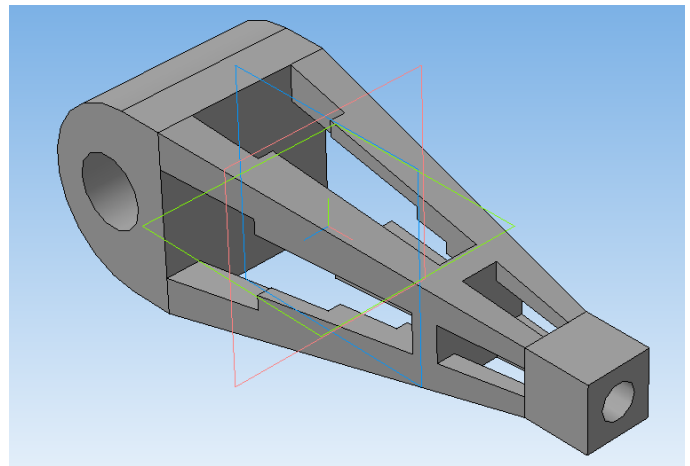


Рисунок 5. Окончательная модель предплечья манипулятора

На следующем этапе проводится расчет требуемой относительной плотности внутренней пористой структуры. Для этого в системе ANSYS создана расчетная модель (рис. 6). С целью сокращения объема вычислений рассматривалась половина детали с соответствующими ограничениями.

Модель состоит из оболочки с действительными модулями упругости, соответствующими свойствам АБС пластика (модуль Юнга – $2 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона – 0,4), и внутренней части с эффективными модулями упругости, найденными по гипотезе континуума. Двухкомпонентная модель учитывает, что при печати внешняя часть конструкции изготавливается сплошной, а процент заполнения меняется только для внутренней структуры.

Относительная плотность заполнения внутренней структуры определялась методом бисекции; для каждого значения рассчитывались эффективные свойства и производилось моделирование напряженно-деформированного состояния детали, как описано в работе [6].

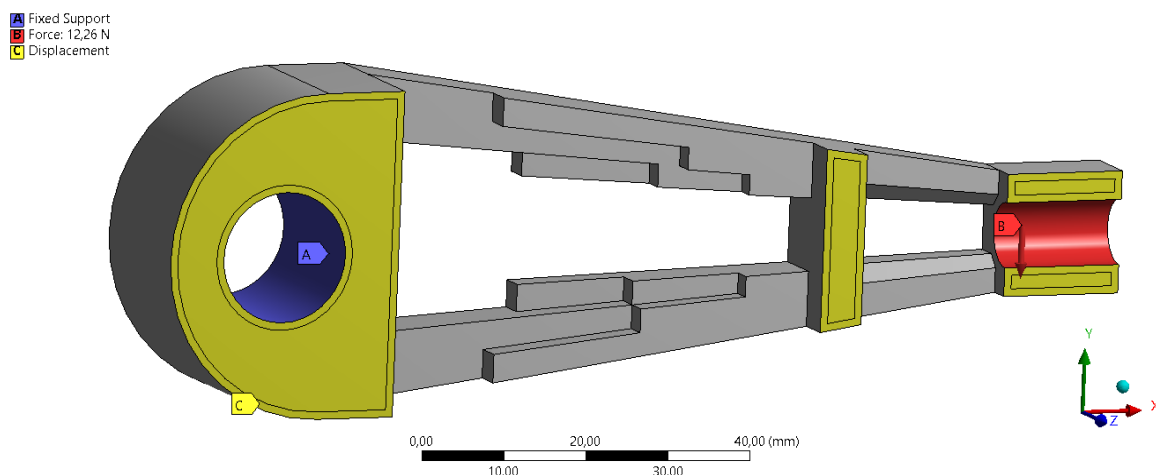


Рисунок 6. Расчетная модель для определения требуемой относительной плотности

Задача заключалась в подборе такого заполнения, при котором деформация рассматриваемого образца не будет превышать 0,35 мм при нагрузке 24,52 Н (2,5 кгс). Выполнение условия было достигнуто при относительной плотности 0,35. Ей соответствуют эффективные модули сжатия $3,4 \cdot 10^8$ Па и сдвига $2,2 \cdot 10^8$ Па. Максимальная деформация модели при этом составила 0,34 мм (рис. 7).

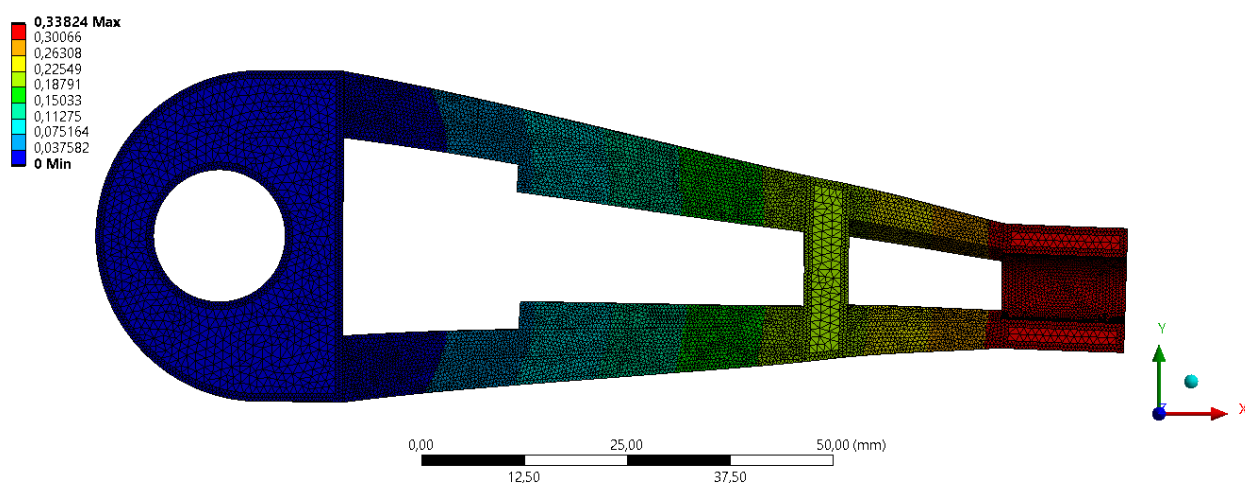


Рисунок 7. Деформация расчетной модели

Представленный подход к проектированию механически нагруженных конструкций позволяет получать изделия оптимальной топологии с последующим подбором относительной плотности внутренней структуры. При этом учитываются требуемые эксплуатационные показатели, что позволяет сократить время изготовления и требуемое количество материала, а также получить меньшую массу при сохранении функциональных характеристик разрабатываемого изделия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-1088.2021.4).

Список литературы

1. Bendsoe, M.P. Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications / M. P. Bendsoe, O. Sigmund. – Berlin: Springer, 2003. – 368 p.
2. Slater, A. G. Function-led design of new porous materials / A. G. Slater, A. I. Cooper // Science. – 2015. – Vol. 348 (6238).
3. Van Der Voort, V.P. Introduction to Porous Materials / V.P. Van Der Voort, K. Leus, E. De Canck. – Wiley, 2019. – 448 p.
4. Челпанов, И. Б. Устройство промышленных роботов / И. Б. Челпанов. — СПб.: Политехника, 2001. – 203 с.
5. Huang, X. Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method / X. Huang, Y. M. Xie // Finite elements in analysis and design. – 2007. – Vol. 43 (14). – P. 1039-1049.
6. Скоморохова, А.И. Тестирование численного метода расчета эффективных модулей упругости пористых материалов / А.И. Скоморохова, А.О. Глебов // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 1. – С. 122-125.