



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК542.913

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.029

 EDN: ZHZDWA

РЕВЕРСИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕДОБУРА С ПЛАСТИКОВЫМ ШНЕКОМ

Данил Дементьевич Ефрюшин ¹, Александр Анатольевич Беушев ²

^{1, 2} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

² baa7@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0233-3805>

Аннотация. Реверсивный инжиниринг (реинжиниринг) является востребованной услугой для производителей в случае необходимости импортозаместить любой компонент, изделие или материал, из которого оно изготовлено, восстановить конструкторскую документацию или процесс производства в целом. В данной работе было проведено исследование материалов, из которых изготовлены пластиковые шнеки ледобуров от различных производителей. Проведен анализ элементного состава материала, плотности, растворимости, содержание наполнителя, а также ИК-спектроскопия. По результатам анализа подобраны наиболее предпочтительные материалы для изготовления целевых изделий.

Ключевые слова: реинжиниринг, полипропилен, полиоксиметилен, полиацеталь, полиэтилен, полиамид, синтетическая смола, литье под давлением.

Для цитирования: Ефрюшин Д. Д., Беушев А. А. Реверсивный инжиниринг полимерных материалов на примере производства ледобура с пластиковым шнеком // Ползуновский вестник. 2023. № 4, С. 230–236. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.029. EDN: <https://elibrary.ru/ZHZDWA>.

REVERSE ENGINEERING OF POLYMER MATERIALS ON EXAMPLE OF PRODUCTION OF ICE DRILL WITH PLASTIC AUGER

Danil D. Efrushin ¹, Aleksandr A. Beushev ²

^{1, 2} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

² baa7@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0233-3805>

Abstract. Reverse engineering (reengineering) is a high-demand service for manufacturers if they need to produce any import-substituting component, product, or material, recreate design documentation, or the whole production process. The current paper presents the results of a study of the materials of plastic augers for ice drills from various manufacturers. The authors conducted an analysis of the elemental composition of the material, density, solubility, and filler content, as well as the IR spectrometry analysis. Based on the results of the analysis, the most preferred materials for the manufacture of target products were selected.

Keywords: reengineering, polypropylene, polyoxymethylene, polyacetal, polyethylene, polyamide, synthetic resin, pressure casting.

For citation: Efrushin, D. D. & Beushev, A. A. Reverse engineering of polymer materials on example of production of ice drill with plastic auger. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 230-236. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.029. EDN: <https://elibrary.ru/ZHZDWA>.

РЕВЕРСИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕДОБУРА С ПЛАСТИКОВЫМ ШНЕКОМ

ВВЕДЕНИЕ

Реверсивный инжиниринг – это процесс создания точной копии объекта по уже существующему образцу, обладающей такими же физическими и физико-механическими параметрами. Данный процесс требуется для производителей в случае необходимости импортозаместить компонент, изделие, материал, из которого оно изготовлено, восстановить конструкторскую документацию или процесс производства в целом.

Процесс реверсивного инжиниринга успешно реализуется на экспериментальной производственной площадке химической инженерии ИЦ «ХимБиоМаш» (АлтГТУ, г. Барнаул).

В рассматриваемом случае было проведено исследование материалов, из которых изготовлены пластиковые шнеки ледобуров от различных производителей. Выбрав наиболее предпочтительный и перспективный материал, один из производителей г. Барнаула планирует наладить производство подобных буров.

Для чистоты эксперимента на анализ представлены только фрагменты изделий различного цвета, без указания конкретного производителя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На анализ представлен фрагмент пластикового шнека ледобура зеленого цвета.

Пластмассовая часть представленного образца проанализирована на растворимость и поведение в пламени.

Образец не растворим в серной кислоте, ацетоне, этилацетате, изопропиловом спирте, хлористом метиле, четыреххлористом углероде, уксусной кислоте. В бензоле и толуоле незначительно набухает, растворяясь при кипячении.

Элементный анализ показал наличие углерода и водорода.

Анализ ИК-спектра показал для образца наличие следующих полос поглощения (схема 1): интенсивные при 2940, 1470, 1350, 715 см^{-1} , характерные для полиэтилена. Четкие средней интенсивности 1160, 1000, 970, 840 см^{-1} , интенсивные при 1370 см^{-1} , слабые в области 1330–770 см^{-1} , характерные для полипропилена.

Полученный спектр согласуется с базой данных как polypropyleneandpoly (ethylene-copropylene).

При термической обработке образца в муфельной печи при температурах 600, 800 и 1000 °С установлено, что полимерный образец содержит минеральный наполнитель (каолин) в количестве 10,14 %.

Анализ плотности изучаемого материала показал значение 1,002 $\text{г}/\text{см}^3$ [1].

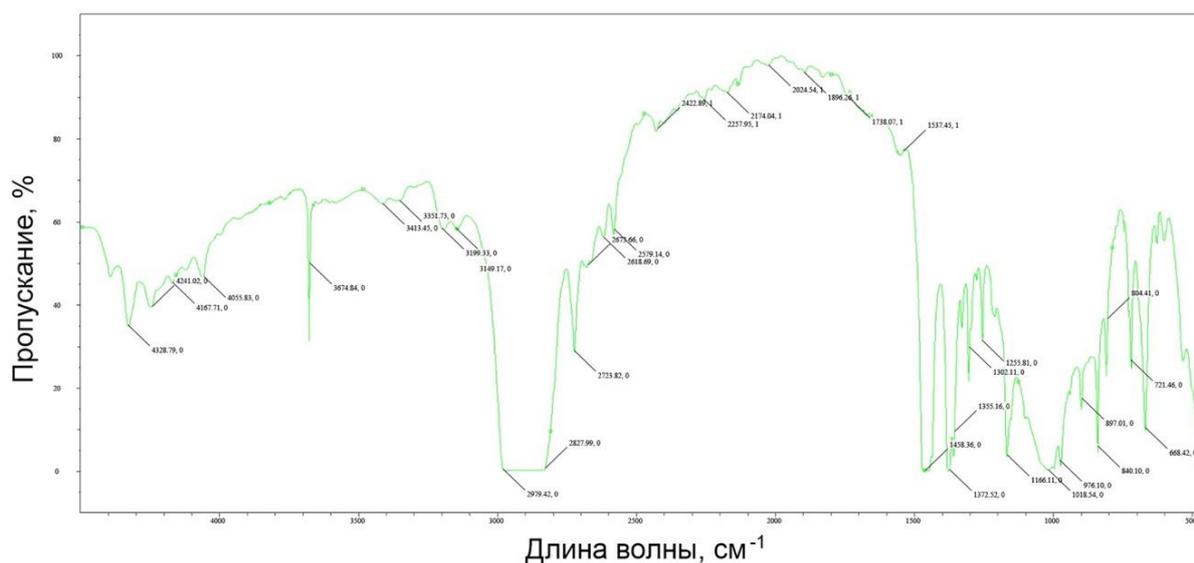


Рисунок 1 – ИК-спектр изучаемого образца зеленого цвета

Figure 1 – IR spectrum of the studied green sample

Сопоставляя данные, полученные при исследовании представленного образца органолептическим методом, определения растворимости, элементного состава, плотности, а также ИК-спектрометрии, можно сделать выводы, что представленный образец относится к классу полиолефинов, а именно смесью полиэтилена высокого давления и полипропилена [2].

При подборе конкретной марки аналогов представленного на анализ образца следует руководствоваться результатами химического анализа, плотности, наличия наполнителя, а также условиями работы изделия.

Термодинамически изотактический полипропилен (ПП) и полиэтилен высокого давления (ПЭВД) являются несовместимыми

материалами, т.к. образуют кристаллографические решетки различного типа. Их структура формируется отдельно в зависимости от условий, что непосредственно связано с различием температур плавления.

Основным полимером в данном случае является ПП, а ПЭВД служит вспомогательной добавкой, которая приводит к более совершенному структурообразованию основного материала. ПЭВД выполняет роль структурного модификатора, облегчающего деформирование материала, способствующего структурным перестройкам и увеличивающего степень ориентации ПП-компонента.

Рассматриваемую композицию на основе более жесткого полимера (ПП) с добавками гибкоцепного (ПЭВД) называют структурно модифицированными термопластами.

Добавка инертного наполнителя, в данном случае каолина, в количестве 10 масс. % вводится с целью снижения стоимости сырья, улучшения физико-механических характеристик и придания непрозрачности (матовости) готовому изделию. Также каолин увеличивает прочностные характеристики и сопротивление к истиранию, а также имеет меньший абразивный эффект на шнек и материальный цилиндр перерабатывающего оборудования, чем мраморная мука, которая применяется для наполнения подобных изделий.

Таблица 1 – Характеристики полипропилена марки Толен 23007-30Т

Table 1 – Characteristics of polypropylene of the Tolen 23007-30T brand

Наименование показателя	Значение
Показатель текучести расплава, г/10 мин	0,2–0,9
Разброс ПТР, %, не более	±15
Предел текучести при растяжении, Мпа, не менее	23
Массовая доля летучих веществ, %, не более	0,12
Относительное удлинение при пределе текучести, %, не менее	12
Относительно удлинение при разрыве, %, не менее	500
Стойкость к термоокислительному старению, ч, не менее	2000

На анализ также был представлен плаستيковый фрагмент желтого цвета.

Образец не растворим в бензоле, толуоле, ацетоне, изопропиловом спирте, хлористом метиле, четыреххлористом углероде. В этилацетате незначительно набухает. Растворяется в холодной серной кислоте и горячей уксусной кислоте с окрашиванием раствора в желтый цвет. В горячей серной кислоте разлагается.

Элементный анализ показал наличие углерода, водорода и кислорода.

Анализ ИК-спектра (схема 2) показал для образца наличие следующих полос поглощения. Полосы 938 и 1097 см⁻¹ соответствуют симметричным и асимметричным колебаниям групп С-О. Полоса 903 см⁻¹ обусловлена взаимодействием маятниковых колебаний групп СН и скелетных

В качестве альтернативного материала можно использовать полипропилен марки Толен 23007-30Т. Данный материал предназначен для производства водопроводных и канализационных труб, изделий методом выдува, тонкостенных изделий технического и бытового назначения со сложным профилем.

Основные характеристики Толена 23007-30Т представлены в таблице 1.

Также в качестве основного материала допускается использование любого экструзионного полипропилена с показателем текучести расплава 3,0 г/10 мин.

Согласно ГОСТ 16337-77, полиэтилен высокого давления, производимый в Российской Федерации, выпускается двух базовых марок в зависимости от способа изготовления (№ 108 – в автоклавах, № 158 – в трубчатых реакторах) и трех сортов для каждой марки. ПВД-10803-020 – один из лучших материалов для изготовления экструдированных изделий, он не гниет, не разрушается и не поддается коррозии, является умеренно жестким материалом, устойчив к агрессивным средам. ПВД-158 может давать самые тонкие материалы. В качестве структурирующей добавки ПВД может использоваться полиэтилен обеих марок.

колебаний цепи полиоксиметилена. Полоса 1238 см⁻¹ обусловлена взаимодействием маятниковых колебаний групп СН и деформационных колебаний в цепи ПОМ.

Полосы в области 400–1500 см⁻¹ связаны с конформацией цепи гексагонального ПОМ.

Гексагональный ПОМ в области валентных колебаний групп СН имеет полосы поглощения 2790, 2920, 2978 см⁻¹.

Полученный спектр согласуется с базой данных как polyacetal (polyoxymethylene).

При термической обработке образца в муфельной печи при температурах 600, 800 и 1000 °С минеральных наполнителей не обнаружено. Анализ плотности изучаемого материала показал значение 1,410 г/см³ [1].

РЕВЕРСИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕДОБУРА С ПЛАСТИКОВЫМ ШНЕКОМ

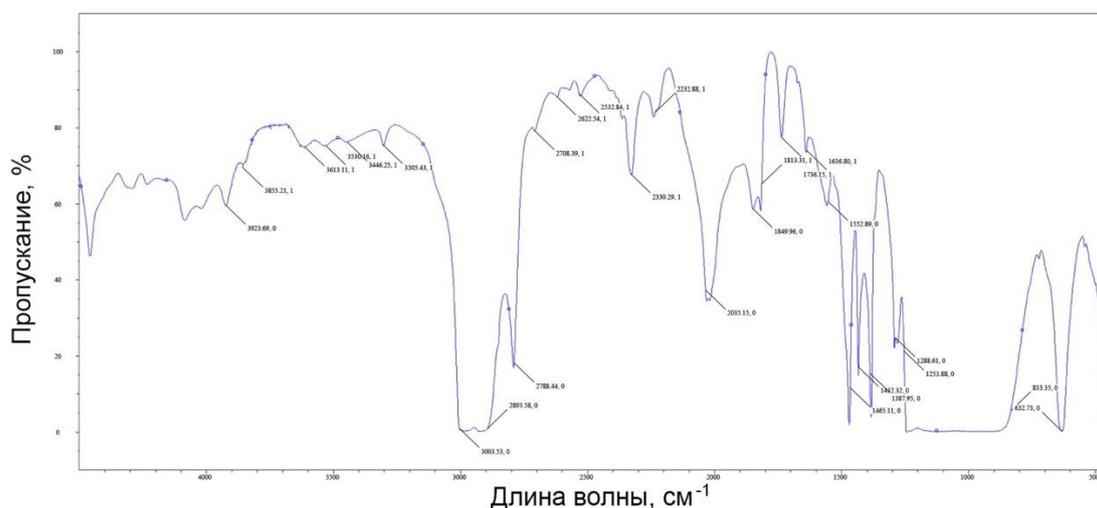


Рисунок 2 – ИК-спектр изучаемого образца желтого цвета

Figure 2 – The IR spectrum of the studied yellow sample

Сопоставляя данные, полученные при исследовании представленного образца органолептическим методом, определения растворимости, элементного состава, плотности, а также ИК-спектрометрии, можно сделать выводы, что представленный образец относится к классу полиацеталей (полиоксиметилен, полиформальдегид).

При подборе конкретной марки аналогов представленного на анализ образца следует руководствоваться результатами химического анализа, плотности, наличия наполнителя, а также условиями работы изделия.

Полиоксиметилен (РОМ, полиацеталь, полиформальдегид) – продукт полимеризации формальдегида. Различают две группы данного инженерного пластика, незначительно отличающиеся друг от друга свойствами и способом получения (таблица 2):

- РОМ-Н (гомополимер) имеет более высокую температуру плавления и более высокую прочность, но чувствителен к гидролизу с непрерывным воздействием горячей воды более 60 °С и к пару.

- РОМ-С (сополимер) имеет ниже прочность, но более высокую ударную вязкость, высокая стойкость к щелочам и хорошая стойкость к гидролизу при воздействии горячей воды и пара.

Данный полимер устойчив к действию агрессивных сред, таких как автомобильные масла, различные виды топлива, органические растворители, слабые кислоты и растворы минеральных кислот. Материал не гигроскопичен,

не выделяет вредных веществ, следовательно, абсолютно безопасен для человека.

Среди отличительных особенностей полиоксиметилена следует отметить:

1. Высокую жесткость, твердость, стойкость к динамическим нагрузкам, самосмазываемость.
2. Материал термопластичен.
3. Высокую ударную вязкость и модуль упругости при растяжении и сжатии (3000 МПа).
4. Материал не подвергается усталостным изменениям.
5. При высоких нагрузках не подвержен ползучести.
6. Износоустойчивость.
7. Низкий коэффициент трения.
8. Легкая обработка.
9. Стабильность параметров при нагревании, глубоком охлаждении и высокой влажности.
10. Является диэлектриком.
11. Поверхность изделий характеризуется твердой, гладкой и блестящей фактурой.
12. Изделия легко подвергаются окрашиванию.

Исходя из полученных данных, образец выполнен из полиоксиметилена марки РОМ-С, наиболее подходящим альтернативным вариантом является РОМ-С KEPITAL F20-03 (базовая марка; ПТР 9 г/10 мин; стандартные и сбалансированные свойства).

На анализ представлен пластиковый фрагмент черного цвета.

Таблица 2 – Основные показатели марок полиоксиметилена

Table 2 – Main indicators of polyoxymethylene grades

Показатели	РОМ-Н	РОМ-С
Предельная отрицательная температура эксплуатации, °С	-60	-60
Плотность, г/см ³	1,43	1,41
Эластичность, Мпа	3,600	2,800
Рабочая температура, °С	110	100
Предельная температура, °С	150	140
Температура плавления, °С	173–180	164–172
Степень кристалличности, %	70–100	60–80

Образец не растворим в бензоле, толуоле, ацетоне, этилацетате, изопропиловом спирте, хлористом метиле, уксусной кислоте, холодной серной кислоте. Медленно растворяется в горячем четыреххлористом углероде. В горячей серной кислоте медленно разлагается.

Элементный анализ показал наличие углерода и водорода.

Анализ ИК-спектра (рисунок 8) показал для образца наличие следующих полос по-

глощения: интенсивные при 2940, 1470, 1350, 715 см⁻¹, характерные для полиэтилена.

Полученный спектр согласуется с базой данных как poly(ethylene).

Анализ плотности изучаемого материала показал значение 0,931 г/см³ [1].

При термической обработке образца в муфельной печи при температурах 600, 800 и 1000 °С минеральных наполнителей не обнаружено.

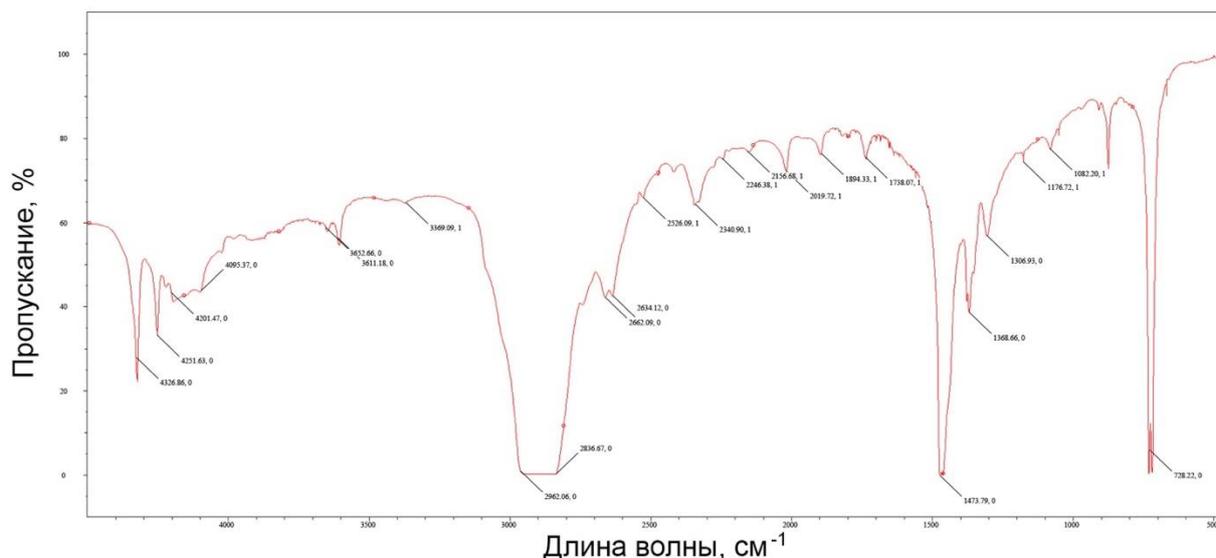


Рисунок 3 – ИК-спектр изучаемого образца черного цвета

Figure 3 – The IR spectrum of the studied black sample

Сопоставляя данные, полученные при исследовании представленного образца органолептическим методом, определения растворимости, элементного состава, плотности, а также ИК-спектрометрии можно сделать выводы, что представленный образец относится к классу полиолефинов, в частности, полиэтилену.

При подборе конкретного аналога представленного на анализ образца следует руководствоваться результатами химического анализа, плотности, наличия наполнителя, а также условиями работы изделия.

Полиэтилен высокого давления (ПВД, ПЭВД, полиэтилен низкой плотности, ПНП, ПЭНП) – это термопластичный полимер с

общей формулой (C₂H₄)_n, получаемый методом полимеризации этилена под действием высоких температур (до 180 °С), давления (до 300 атм) в присутствии кислорода. Материал изготавливается в виде гранул плотностью 900–930 кг/м³. Температура плавления 100–115 °С, температура хрупкости до –120 °С.

Изделия, изготовленные из ПЭВД, обладают следующими свойствами:

- гибкостью и мягкостью;
- гладкой и блестящей поверхностью;
- механической и ударной прочностями, устойчивостью к растяжению и сжатию;
- возможностью эксплуатации изделий при низкой температуре;

РЕВЕРСИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ
ПРОИЗВОДСТВА ЛЕДОБУРА С ПЛАСТИКОВЫМ ШНЕКОМ

- полной влаго- и воздухопроницаемо-
стью материала;
- свето- и озоностойкостью;

- абсолютной безопасностью для чело-
века и окружающей среды.

Таблица 3 – Характеристики ПВД 10803-020 108 ГОСТ 16337-77

Table 3 – Characteristics of LDPE 10803-020 108 GOST 16337-77

Наименование показателя	Высший сорт
Плотность, г/см ³	0,917–0,920
Показатель текучести расплава, г/10 мин	1,8–2,2
Разброс показателя текучести расплава в пределах партии, %, не более	±5
Предел текучести при растяжении, МПа (кгс/см ²), не менее	9,3 (95)
Прочность при разрыве, МПа (кгс/см ²), не менее	12,2 (125)
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	550
Стойкость к растрескиванию, ч, не менее	2
Запах и привкус водных вытяжек, балл, не выше	1
Массовая доля экстрагируемых веществ, %, не более	0,7

На анализ представлен пластиковый фрагмент красного цвета.

Образец не растворим в ацетоне, этилацетате, изопропиловом спирте, бензоле, толуоле. В серной кислоте изменяет окраску на зеленую с последующим растворением, в горячей уксусной кислоте растворяется с образованием красного раствора.

Элементный анализ полимерной части показал наличие углерода, водорода, кислорода и азота.

Анализ ИК-спектра (схема 4) показал для образца наличие следующих полос поглощения: карбоксильные группы (характеристические полосы поглощения в области 2560 и 1730 см⁻¹), аминогруппы (полоса поглощения в области 3200–3400 см⁻¹), амидные группы (полосы поглощения в областях 3500, 1580 см⁻¹).

При термической обработке образца в муфельной печи при температурах 600, 800 и 1000 °С минеральных наполнителей не обнаружено.

Анализ плотности изучаемого материала показал значение 1,103 г/см³ [1].

Сопоставляя данные, полученные при исследовании представленного образца органолептическим методом, определения растворимости, элементного состава, плотности, а также ИК-спектрометрии, можно сделать выводы, что представленный образец относится к классу полиамидов.

Анализируемый образец – это полиамид-66, известен под торговой маркой «нейлон» (в РФ не производится), однако его полным аналогом является полиамид-6, торговая марка «капрон» (производится в РФ). Данные полимеры имеют схожие свойства.

В качестве аналога использовать экструзионные полиамиды. Для улучшения физико-механических показателей можно использовать стеклонанополненные полиамиды, например, марки ПА 6 СВ 25 красный 194 или ПА 6 СВ 30 желтый 217 (табл. 4) [5, 6].

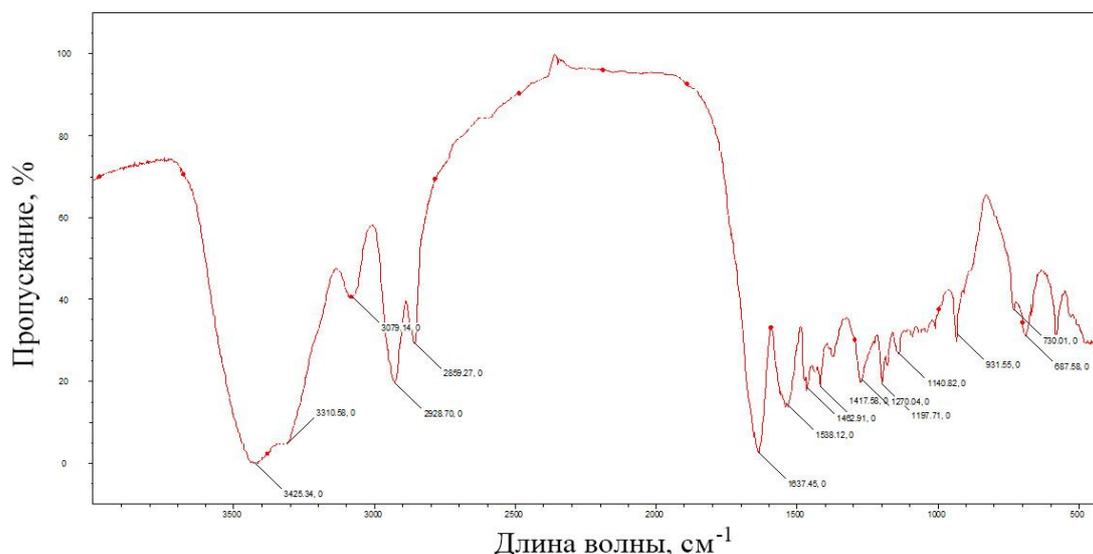


Рисунок 4 – ИК-спектр изучаемого образца красного цвета

Figure 4 – The IR spectrum of the studied red sample

Таблица 4 – Основные свойства полиамидов, предлагаемых в качестве альтернативных
Table 4 – Main properties of polyamides offered as alternatives

Основные свойства	Полиамид ПА 6 СВ 25 красный 194	Полиамид ПА 6 СВ 30 желтый 217
ПТР, г/10 мин при стандартных нагрузках и температуре	4,0–12,0	4,0–12,0
Предел текучести при растяжении, МПа, не менее	110	120
Относительное удлинение при разрыве, % не менее	5	4
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м	> 35	> 35
Модуль упругости при изгибе, МПа	7500	8200

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассматриваемой работе был проведен реверсивный инжиниринг полимерных материалов, из которых изготавливаются пластиковые шнеки ледобуров различных производителей.

Экспериментальным путем установлено, что представленные образцы являются различными материалами с различными свойствами. А именно: образец зеленого цвета выполнен из полипропилена с добавкой полиэтилена, а также содержит 10,14 % каолина в качестве инертного наполнителя; желтого цвета, выполнен из полиоксиметилена (он же POM, полиацеталь, полиформальдегид); образец черного цвета, выполнен из полиэтилена высокого давления (низкой плотности); красного цвета, выполнен из полиамида-6.

Для каждого из представленных на реинжиниринг материалов были подобраны аналоги, доступные на рынке Российской Федерации.

Наиболее предпочтительным материалом, который может использоваться для производства пластиковой части ледобура, является композиция на основе полипропилена марки Толен 23007-30Т со структурирующей добавкой ПВД-108 или ПВД-158, а также полиоксиметилена POM-C KEPITAL F20-03.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 15139-68 (СТ СЭВ 891-78) Пластмассы. Метод определения плотности (объемной массы). Введен в действие постановлением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 26 марта 2023; одобрена после рецензирования 18 сентября 2023; принята к публикации 20 ноября 2023.

The article was received by the editorial board on 26 Mar 2023; approved after editing on 18 Sep 2023; accepted for publication on 20 Nov 2023.

при Совете Министров СССР от 17 декабря 1969 г. № 1365, 1970, 17 с.

2. ГОСТ 26996-86. Полипропилен и сополимеры пропилена. Технические условия; введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 23 сентября 1986 г. № 2749, 1988, 34 с.

3. ГОСТ 16337-77. Полиэтилен высокого давления; утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 11.10.77 № 2425, 1979, 78 с.

4. ГОСТ 16338-85. Полиэтилен низкого давления. Введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20 декабря 1985 г. № 4272 (дата введения установлена 01.01.87), 1987, 33 с.

5. ГОСТ 17648-83. Полиамиды стеклонеполненные; утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 18.02.83 № 848, 1984, 18 с.

6. ГОСТ 10589-87. Полиамид 610 литьевой. Технические условия; разработан и внесен Министерством химической промышленности, 1988, 20 с.

Информация об авторах

Д. Д. Ефрюшин – к.х.н., доцент кафедры ХТ АлтГТУ.

А. А. Беушев – к.х.н., доцент кафедры ХТ АлтГТУ.

Information about the authors

D. D. Efryushin - PhD, Associate Professor of the Department of HT AltSTU;

A. A. Beushev - PhD, Associate professor of the Department of HT AltSTU.