

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### STUDY OF STATIC TEMPERATURE DEFORMATIONS OF GEARWHEELS MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

УДК 621.9

**В.В. Дрюков\*, А.Н. Гришаев, С.М. Кузьменков, А.А. Котов**

*Витебский государственный технологический университет*

<https://doi.org/10.24411/2079-7958-2019-13603>

**V. Dryukov\*, A. Grishaev, S. Kuzmenkov, A. Kotow**

*Vitebsk State Technological University*

#### РЕФЕРАТ

*АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ, ЗУБЧАТЫЕ КОЛЁСА, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА*

*Объектом исследований являются статические температурные деформации зубчатых колёс, изготовленных из ABS Plus-пластика методом аддитивных технологий.*

*Цель работы – определение реального температурного порога, при котором зубчатое колесо из ABS Plus-пластика начинает деформироваться.*

*В результате экспериментальных исследований образцов зубчатых колёс определены значения температуры нагрева, до которых важнейшие геометрические характеристики зубчатых колес, изготовленных из ABS Plus-пластика методом аддитивных технологий, сохраняют стабильность.*

*Получены математические модели изменения диаметров окружностей вершин и впадин, а также шага зубьев от температуры нагрева зубчатых колес, изготовленных из ABS Plus-пластика.*

#### ABSTRACT

*ADDITIVE TECHNOLOGIES, TEMPERATURE DEFORMATIONS, GEARWHEELS, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES*

*The research object is static temperature deformations of gearwheels, manufactured from ABS Plus plastics with additive technologies.*

*The work purpose is to determine the real temperature thresholds at which the ABS Plus plastic gear starts to deform.*

*As a result of experimental studies of gearwheels, the values of heating temperature have been determined, at which the most important geometrical characteristics of gearwheels made of ABS Plus plastic by the method of additive technologies remain stable.*

*Mathematical models of changes in the diameters of the circles of the tops and valleys, as well as the pitch of the gearwheels resulting from heating temperature, are obtained.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Зубчатые колеса широко применяются в машинах любого назначения. Изготовление их при помощи аддитивных технологий открывает новые перспективы. Важнейшим преимуществом здесь является возможность получения зубчатых колес сложной формы относительно дешево. При этом возникает проблема правильного выбора материала, особенно при существенных рабочих температурах [1], в которых должна при-

меняться деталь. Наиболее перспективным для таких условий представляется выбор ABS-пластика. Изделия, изготовленные из ABS-пластика, имеют лучшую температурную устойчивость, чем изделия из PLA-пластика [2]. Однако конкретный диапазон этой устойчивости на сегодняшний день определяется в справочной информации слишком неточно. В то же время сфера применения изделий из указанных материалов быстро расширяется и предприятиям важны рекомен-

\* E-mail: [tiomp.vstu@mail.ru](mailto:tiomp.vstu@mail.ru) (V. Dryukov)

дации по практическому применению различных деталей.

При проведении исследований мы использовали технические требования, выданные ООО «Рубикон» (г. Витебск), которое применяет зубчатые колеса, изготовленные при помощи аддитивных технологий, в своих промышленных установках в рамках программы импортозамещения. Согласно этим требованиям, диапазон рабочих температур для изделий различного назначения составляет от 100 до 150 °С. При этом применяемые машины нескоростные и имеют небольшую нагрузку на колесо шестерни. Здесь необходим обоснованный выбор материала на основе экспериментального исследования.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является определение температурного порога, при котором зубчатое колесо, изготовленное из ABS Plus-пластика, начинает деформироваться.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе для изготовления экспериментальных образцов зубчатых колес использовался филамент ABS Plus. Физико-механические показатели филамента из ABS Plus-пластика представлены в таблице 1.

При исследовании контролировались следующие геометрические показатели зубчатого колеса: минимальный диаметр окружности вершин зубьев  $D$ , минимальный диаметр окружности впадин  $d$ , максимальный шаг зубьев  $P$ . Исследования проводились с зубчатыми колесами номинальным диаметром окружности вершин

96 мм, числом зубьев 30.

Исследуемый образец представлен на рисунке 1, схема контроля – на рисунке 2.

Для нагрева образцов применялось электрическое термоустройство MEMMERT со следующими характеристиками: мощность – 2200 Вт; установка диапазона температур – 20–300 °С; точность регулировки – 0,5 °С.

Методика проведения исследований состояла из следующих этапов:

- изготовление образцов зубчатых колес из ABS Plus-пластика;
- установка образцов в нагревательную камеру термоустройства на неподвижный кронштейн;
- нагрев экспериментальных образцов до заданной температуры;
- контроль геометрических показателей образцов зубчатых колес.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с правилами планирования эксперимента [3].

В нашем исследовании фактором эксперимента является температура нагрева. Интервал варьирования установлен от 80 до 160 °С. Шаг составляет 5 градусов.

Для контроля использовалось сканирование с разрешением 360 dpi и программное обеспечение Artec Studio 11 и среда SOLIDWORKS, которые позволяют сравнивать геометрические параметры исследуемого зубчатого колеса с расчетными значениями, как показано на рисунке 3.

Таблица 1 – Физико-механические показатели филамента из ABS Plus-пластика

Показатель	Значение показателя
Диаметр нити, мм	1,75/3,00±0,05
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1060
Линейная масса, м/кг (длина 1 кг)	395
Модуль упругости при растяжении, МПа, не менее	2800
Прочность при растяжении, МПа, не менее	38
Прочность при изгибе, МПа	70–80
Температура печати, °С	215–230
Скорость печати, мм/с	40–80

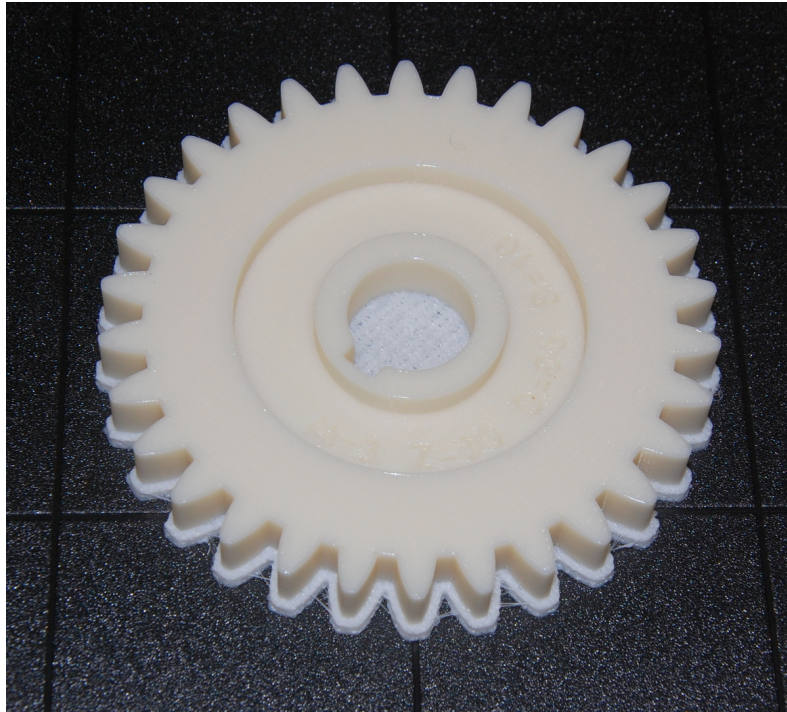


Рисунок 1 – Исследуемый образец зубчатого колеса

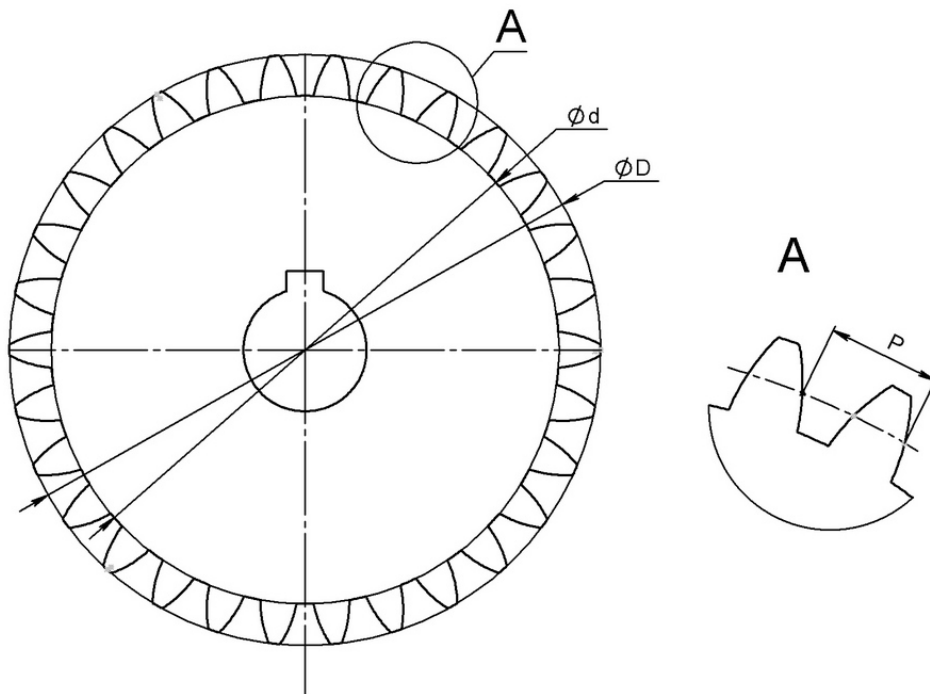


Рисунок 2 – Схема контроля геометрических характеристик зубчатого колеса:  
 $D$  – диаметр окружности вершин зубьев;  $d$  – диаметр окружности впадин;  $P$  – шаг зубьев

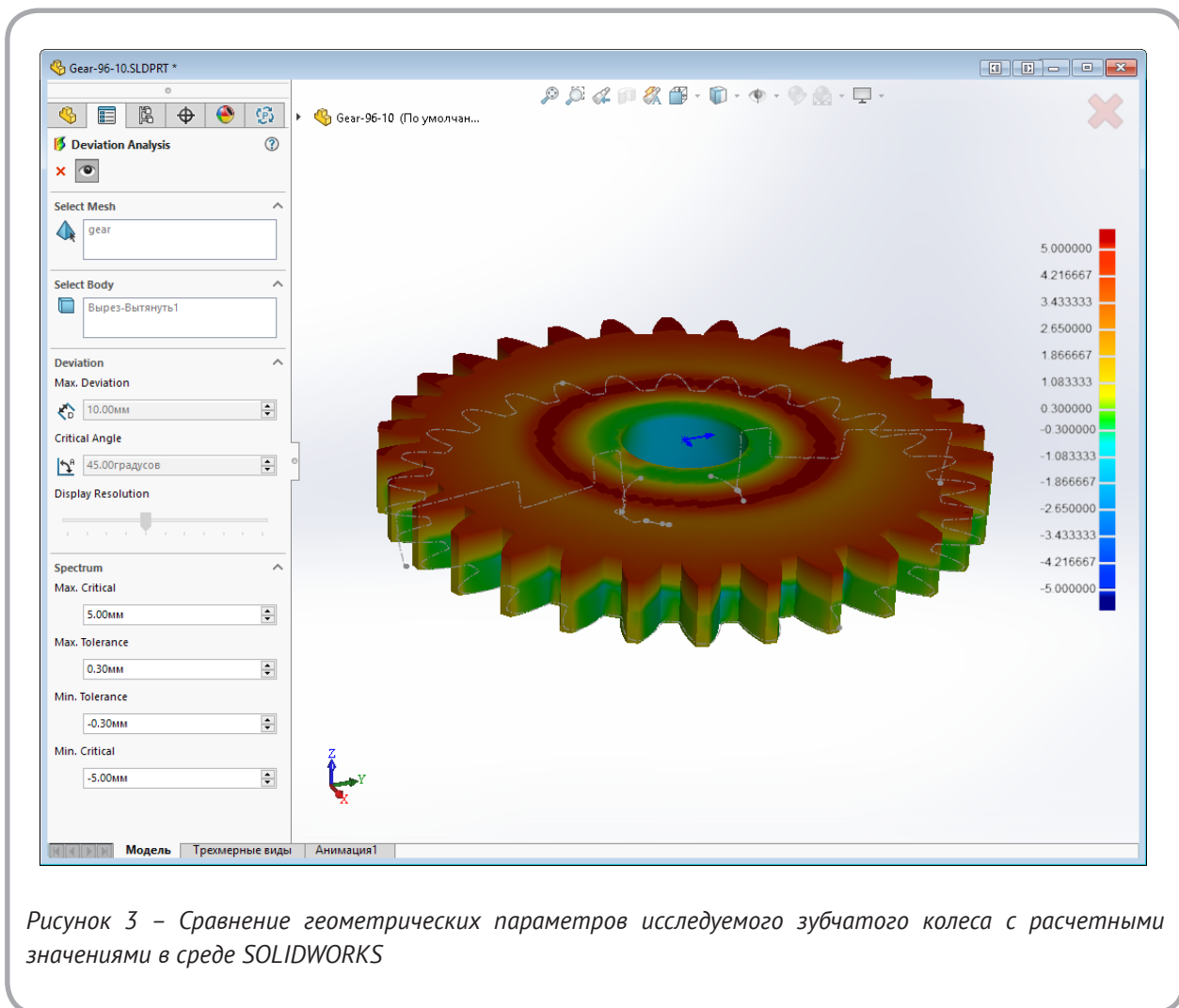


Рисунок 3 – Сравнение геометрических параметров исследуемого зубчатого колеса с расчетными значениями в среде SOLIDWORKS

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Графические зависимости контролируемых показателей от температуры нагрева, представляющие результаты экспериментов, приведены на рисунках 4 и 5.

Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее. Температурный нагрев особенно существенно влияет на изменение диаметра окружности вершин и на изменение величины шага зубьев. Указанные геометрические показатели сохраняют стабильность до температуры 115–120 °С, после чего начинается быстрое нарастание деформаций. Изменение геометрии диаметра окружности впадин носит постепенный характер. Стабильность этого показателя сохраняется до температуры 135–140 °С.

Согласно показателям кинематической точности, заданным ГОСТ 643-81 «Основные нормы

взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические», соответствие им исследуемых зубчатых колес сохраняется до температуры нагрева 110 °С.

По результатам экспериментов методом наименьших квадратов были получены регрессионные модели.

Зависимость изменения диаметра окружностей вершин зубьев от температуры нагрева характеризуется следующей зависимостью:

$$D = -0,0025t^2 + 0,4588t + 74,976, \quad (1)$$

где  $t$  – температура нагрева, °С.

Коэффициент детерминации, характеризующий достоверность аппроксимации, состав-

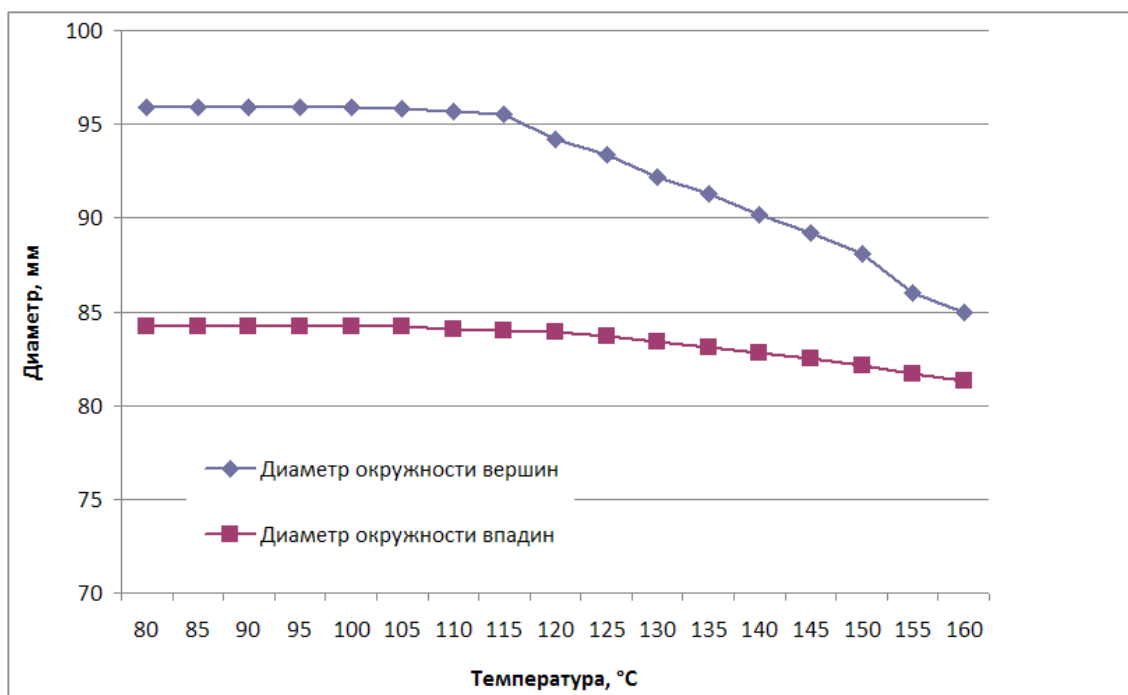


Рисунок 4 – Графическая зависимость диаметров окружностей вершин и впадин зубьев от температуры

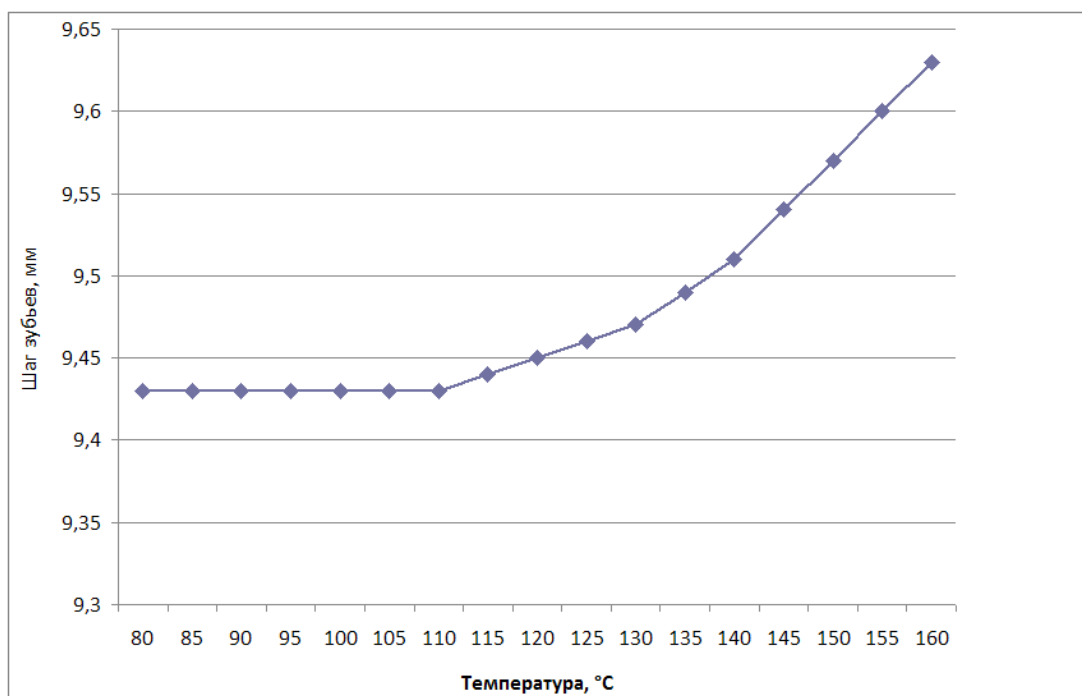


Рисунок 5 – Графическая зависимость шага зубьев от температуры

ляет  $R^2 = 0,9945$ . Расчетное значение критерия Кохрена  $G_{расч.} = 0,11$ . Табличное значение  $G_{табл.} = 0,47$ . Таким образом,  $G_{расч.} < G_{табл.}$ , следовательно, дисперсии однородны.

Расчетная величина критерия Фишера  $F_{расч.} = 1,09$ . Выполняется условие  $F_{расч.} < F_{табл.} = 4,45$ , следовательно, предложенная модель является адекватной.

Зависимость изменения диаметра окружностей впадин зубьев от температуры нагрева соответствует уравнению:

$$d = -0,0007t^2 + 0,1334t + 77,946. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0,9979$ . Критерий Кохрена  $G_{расч.} = 0,109 < G_{табл.} = 0,47$ . Условие однородности дисперсий выполняется. Расчет по критерию Фишера:  $F_{расч.} = 1,06 < F_{табл.} = 4,45$ , следовательно, математическая модель адекватна.

Аналогично получаем уравнение зависимости изменения шага зубьев от температуры нагрева:

$$P = 5 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0104t + 9,9328. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации модели высокий и составляет  $R^2 = 0,9942$ . Критерий Кохрена  $G_{расч.} = 0,13 < G_{табл.} = 0,47$ , значит дисперсии однородны. По критерию Фишера:  $F_{расч.} = 1,08 < F_{табл.} = 4,45$ , что показывает адекватность предложенной модели.

#### ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что важнейшие геометрические характеристики зубчатых колес, изготовленных из ABS Plus-пластика методом аддитивных технологий, при статическом нагреве сохраняют стабильность до температуры 110 °С, после чего начинается быстрое нарастание деформаций. Эти данные позволяют точнее определить возможности применения зубчатых колес из указанного материала в проектируемых механизмах.

2. Разработаны математические модели изменения диаметров окружностей вершин и впадин, а также шага зубьев от температуры нагрева зубчатых колес, изготовленных из ABS Plus-пластика методом аддитивных технологий.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кэнесс, Э., Фонда, К., Дзеннаро, М. (2013), *Доступная 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития*, Москва, 192 с.
2. Lipson, H., Kurman, N. (2013), *Fabricated: The New World of 3D Printing*, Wiley, 280 с.
3. Григорьев, Ю. Д. (2015), *Методы оптимального планирования эксперимента*, Санкт-Петербург, 320 с.

#### REFERENCES

1. Keness, E., Fonda, C., Dzennaro, M. (2013), *Affordable 3D printing for science, education and sustainable development* [Dostupnaya 3D pechat dlya nauki, obrazovaniya i ustoychivogo razvitiya], Moscow, 192 p.
2. Lipson, H., Kurman, N. (2013), *Fabricated: The New World of 3D Printing*, Wiley, 280 p.
3. Grigoriev, Yu. D. (2015), *Methods for optimal experiment planning* [Metody optimalnogo planirovaniya eksperimenta], Saint-Petersburg, 320 p.

Статья поступила в редакцию 13. 11. 2018 г.