

З. Хренов О. В., Афанасьев Л. Н., Лешок А. В. Материалы и технология порошковой металлургии: учебно-методическое пособие по дисциплине «Теория и технология получения порошковых материалов» для студентов специальности 1-42 01 02 «Порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия». Минск. Белорусский национальный технический университет, 2010. 37 с.

УДК 69.057:658.513.4

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВОЇ ТВЕРДОСТІ ТА ТЕРМОУСАДКИ ВИРОБІВ З PLA ПРИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННІ МЕТОДОМ 3D ДРУКУ

Н.О. Ротт<sup>1</sup>, В.Е. Дитюк<sup>2</sup>, О.О. Мирний<sup>3</sup>

<sup>1</sup> к.т.н., доцент, доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, E-mail: [Rott.N.O@nmu.one](mailto:Rott.N.O@nmu.one)

<sup>2</sup>асистент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, E-mail: [Dytiuk.V.E@nmu.one](mailto:Dytiuk.V.E@nmu.one)

<sup>3</sup>студент групи 132-20ск-2

<sup>1,2,3</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

**Анотація.** У роботі проведено дослідження показників поверхневої твердості матеріалу та впливу температури друку на термоусадку виробів з PLA-пластику в діапазоні температур 190 – 220 °С.

*Ключові слова:* 3D-друк, PLA пластик, термоусадка, поверхнева твердість.

## RESEARCH OF PARAMETERS OF SURFACE HARDNESS AND THERMAL SHRINKAGE OF PRODUCTS FROM PLA AT THEIR MANUFACTURING BY A METHOD OF 3D PRINTING

Nataliia Rott<sup>1</sup>, Viktoriia Dytiuk<sup>2</sup>, Oleksii Myrnyi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., associated professor, Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, E-mail: [Rott.N.O@nmu.one](mailto:Rott.N.O@nmu.one)

<sup>2</sup>Assistant, Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, E-mail: [Dytiuk.V.E@nmu.one](mailto:Dytiuk.V.E@nmu.one)

<sup>3</sup>Student of group 132-20sk-2, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**Abstract.** This article of surface hardness of the material and the effect of printing temperature on the heat shrinkage of PLA-plastic products in the temperature range 190 - 220°C.

*Keywords:* 3D printing, PLA plastic, heat shrinkage, surface hardness.

**Вступ.** Прогрес не стоїть на місці і кожного дня ми все частіше стикаємося з речами що були виготовленні завдяки 3D принтерам. 3D-принтери настільки глибоко увійшли в наше життя, їх використовують, як для створення пластикових шахових фігурок в домашніх умовах, так і в Голлівуді. А

завдячувати ми повинні вченому на ім'я Чак Хулл, саме він створив перший у світі 3D принтер, його винахід працював виключно на технології, названої стереолітографом (SLA). З тих пір були розроблені численні альтернативні технології 3D друку, такі як: Моделювання методом наплавлення (FDM), Наплавлення нитки (FFF), Вибіркове лазерне спікання (SLS), PolyJetting і багато інших, хоча всі вони засновані на пошаровому створенні об'єктів.

Не дивлячись на безліч технологій 3D друку, найбільшого поширення набули SLA і FDM через невисоку вартість і порівняльну простоту принтерів.

Технологія 3D-друку ґрунтується на пошаровому нарощуванні полімерів. Однак це не всі способи 3D-друку. Також існує:

- Лазерне спікання порошків;
- Стереолітографія;
- Склеювання порошків;
- Струменеве моделювання.

Всі ці способи активно використовуються. Отже 3D-друк в порівнянні з ручним виготовленням той чи іншої продукції має певні переваги:

- швидкість (вручну створення реальної моделі в залежності від складності роботи може займати до місяця часу і більше. Технологія 3D-друку дозволить зробити це за один день);

- ціна (цінова політика безпосередньо залежить від складності моделі, а також використовуваного матеріалу. З упевненістю можна сказати, що 3D-друк буде коштувати на порядок дешевше, ніж ручне або автоматичне виробництво 3D-моделі);

- функціональність (об'єкт, виготовлений 3D-принтером можна використовувати відразу після виготовлення, але не варто забувати про те, що за допомогою 3D-принтеру можна поставити на потік дрібносерійне виробництво) [4].

**Мета роботи** – знизити час обробки виробів, виготовлених методом 3D-друку, та дослідити вплив температури друку виробів з PLA-пластику.

**Матеріал і результат досліджень.** Технологія 3D-друку активно використовується в таких сферах діяльності, як: медицина - за допомогою 3D-принтерів створюються окремі клітини людського організму і тестують нові препарати; кіно - об'єкти надруковані для кіноіндустрії часом виглядають набагато реалістичніше, ніж комп'ютерна графіка і коштують дешевше, ніж справжні декорації; будівництво та архітектура; реклама і маркетинг.

Крім описаних вище професійних областей застосування 3D-друку, існують інші напрямки для повсякденного використання даної технології [1].

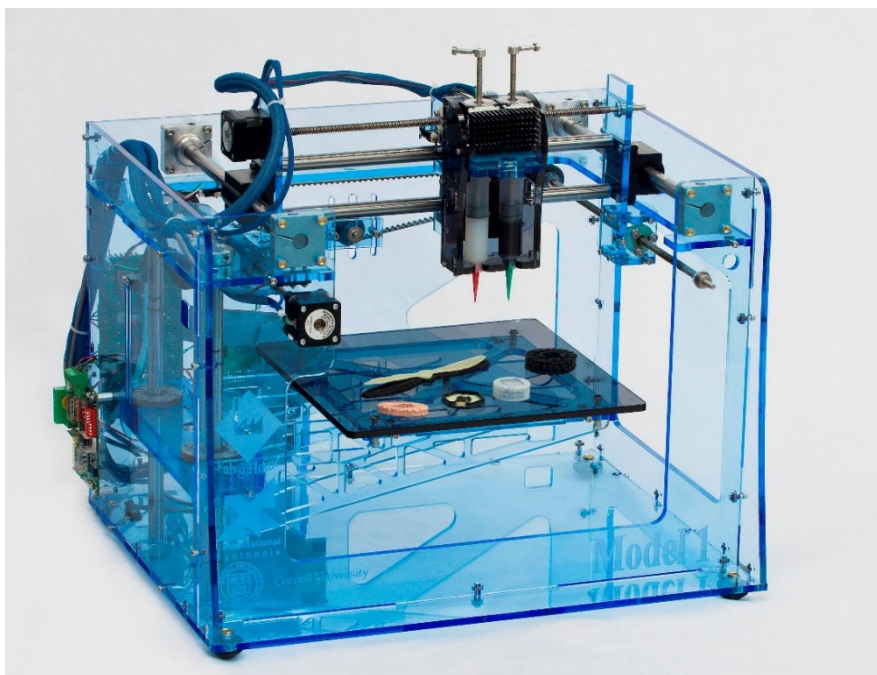


Рис. 1. – Приклад зовнішнього виду 3D-принтера

Існує багато матеріалів, які досліджувалися на предмет застосування в 3D-друку, і на сьогоднішній день домінуючу роль в цій ніші займають – ABS, PLA, SBS та PETG.

Всі вони – термопластики, тобто вони стають м'якими і пластичними при нагріванні, а при охолодженні тверднуть. Цей процес може бути повторений багаторазово. Схильність плавлення і обробки – саме та властивість, що вивела термопластики в лідери в повсякденному використанні і призвела до того, що більшість видів пластику, з якими ми стикаємося в побуті, – термопластики.

**PLA-пластик** (поліактид) – біорозкладаний пластик для 3D-друку методом пошарового наплавлення. Основу матеріалу складають натуральні інгредієнти: кукурудза, цукровий очерет, крохмаль, целюлоза. У натуральному вигляді PLA-пластик є прозорим. Його можна фарбувати в будь-який колір, при бажанні - зі збереженням прозорості. При нагріванні PLA піддається більш значним фазовим змінам і стає більш текучим. При активному охолодженні під час друку можна домогтися більш загострених елементів і кутів – без ризику отримати крихкий об'єкт. Підвищена плинність забезпечує також краще зчеплення між шарами, і результат виходить більш міцним.

По міцності PLA не поступається ABS, але він більш жорсткий, що призводить до крихкості. Крихкість в поєднанні з біорозкладністю матеріалу призводить до того, що термін служби таких виробів недовгий. Як правило, він становить не більше 2 років.

Технологія 3D-друку з PLA пластика на даний момент вважається дуже перспективною з кількох причин. По-перше, пластик виробляється з поновлюваних ресурсів, що дуже важливо з точки зору раціонального ставлення до природних ресурсів. По-друге, виробництво PLA пластика екологічно безпечно. При його створенні в атмосферу виділяється в два рази менше вуглекислого газу, в порівнянні з виробництвом пластиків на основі нафти.

**ABS-пластик** (акрилонітрил бутадієн стирол, хімічна формула  $(C_8H_8) x \cdot (C_4H_6) y \cdot (C_3H_3N) z$ ) – ударостійка технічна термопластична смола на основі сополімера акрилонітрилу з бутадієном і стиролом (назва пластика утворена з початкових букв найменувань мономерів). Пропорції можуть варіюватися в межах: 15 – 35% акрилонітрилу, 5 – 30% бутадієну і 40 – 60% стиролу[3].

В цілому, це міцний і більш піддатливий в порівнянні з PLA пластик. Натуральний ABS має бежевий (молочний) відтінок. Пластичність ABS дозволяє легко створювати елементи різних з'єднань і кріплень. Він легко шліфується і обробляється. Важливо відзначити, що ABS розчиняється в ацетоні, що дозволяє склеювати деталі і добиватися дуже гладкої поверхні.

Спрощуючи тисячі чинників, в силу яких одному пластику слід віддати перевагу іншому, підведемо короткий підсумок.

**ABS** часто застосовують в інженерних і професійних додатках через його міцність, пластичність, легкість в обробці і високу термостійкість. Нагрітий ABS, як і будь-який пластик на основі нафтопродуктів, має неприємний для багатьох запах. Необхідність наявності підігрітою підкладки робить його майже непридатним для задовільної якості друку на деяких принтерах.

**PLA.** Широка гамма доступних кольорів, ступенів прозорості, а також що виходить глянцева поверхня робить цей пластик привабливим для виготовлення арт-об'єктів і господарського начиння. Багато хто поважає рослинне походження цього пластика і вважають за краще його напівсолодкий запах замість запаху ABS. При правильному режимі охолодження максимальна швидкість друку PLA вище, шари більш тонкі, кути більш гострі.

**SBS.** Новий і дуже перспективний матеріал для 3D-друку. Своїми властивостями він перевершує традиційні ABS або PLA. Якщо давати загальну оцінку для розглянутих матеріалів, то SBS встане на перше місце як універсальний, та не примхливий, зручний і красивий матеріал.

**PETG.** Покликаний замінити ABS і PLA в області 3D-друку, за своїми властивостями перевершує ці матеріали, зручний у використанні, довговічний, безпечний [2].



Під час виготовлення виробів з пластику, що роздруковані за різних температур друку необхідно враховувати такі фактори, як термоусадка та поверхнева твердість виробу. Тому базуючись на цих характеристиках нами було проведено 2 досліді:

1. Визначення параметрів термоусадки виробів з PLA пластику
2. Дослідження параметрів поверхневої твердості виробів з PLA.

Виготовлені 4 зразки з PLA пластика (рис.2) температура друку яких склала 190, 210, 215, 230 °С при температурі столу 80 °С і температурі навколишнього середовища 18 °С та наявністю примусового охолодження.

Примусове охолодження застосовується для пластиків, що наплавляються на гарячий стіл при відносно високій площі горизонтальної поверхні для зменшення деформування тіла внаслідок різкої зміни температури.

Перегрів пластику чи його недостатня температура змінюють механічні властивості поверхневого шару та призводять до крихкого стану, що врешті призводить до швидкого розтріскування.

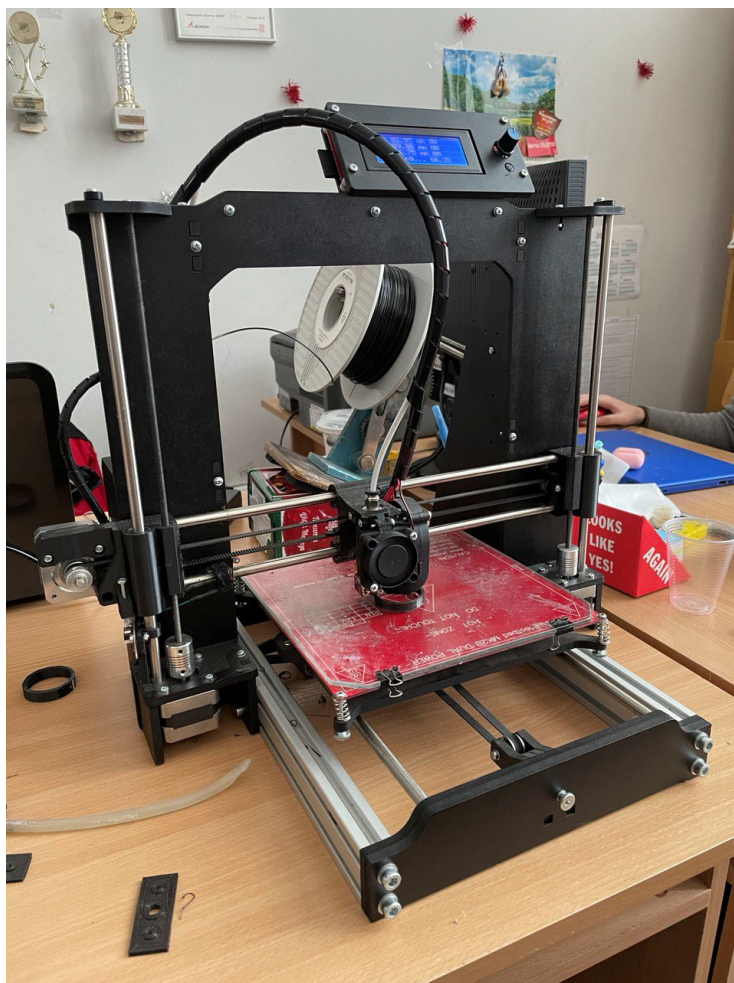


Рис. 2. – Друк зразків для дослідження

**Перший дослід.** 4 циліндричні деталі з номінальним внутрішнім діаметром 35 мм. Деталі зовнішньо мали ідентичний вигляд. Проте, зменшення внутрішнього діаметру склало від 0,2 до 1,8 мм

В результаті, деталі із усадкою 1,8 можуть бути відбраковані або потребують значної механічної обробки після друку для досягнення номінальних розмірів, наприклад, при виготовленні зубчастих коліс, втулок, роликів, футеровок тощо.

Для виміру діаметрів застосовували електронний штангенциркуль King Tony 77141-06.

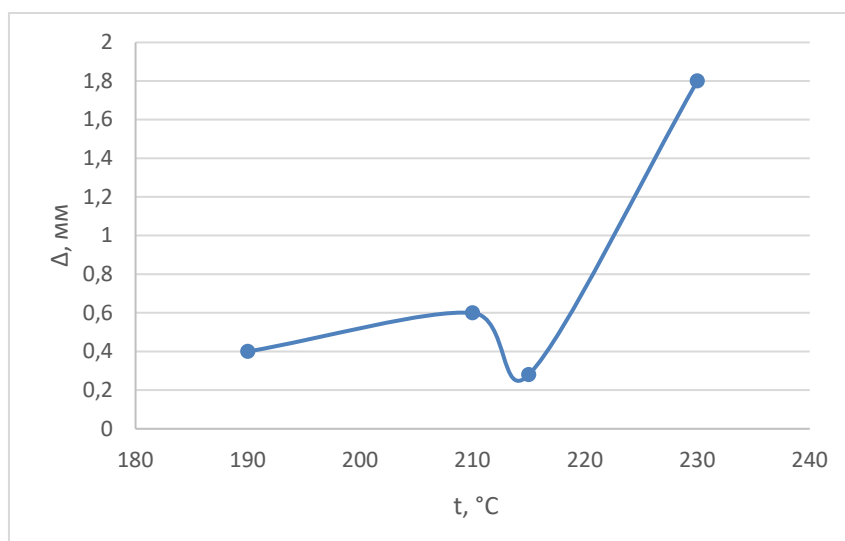


Рис. 3. - Діаграма термоусадки зразків при примусовому охолодженні

Як видно із графіка (рис. 3) найбільша усадка без примусового охолодження спостерігається при температурі друку 230 °C (1,8 мм), що пояснюється значним розширенням пластику при такому нагріві та його стискання при охолодженні. Оптимальним, з точки зору усадки є температура 215 °C. Похибка складає 0,38 мм.

Як видно із графіка (рис. 4) найбільша усадка без примусового охолодження спостерігається при температурі друку 230 °C (1,4 мм), що пояснюється значним розширенням пластику при такому нагріві та його стискання при охолодженні. Оптимальним, з точки зору усадки є температура 210 °C. Похибка складає 0,38 мм.

В результаті, отримані значення можуть слугувати в якості коефіцієнтів для корегування 3-D моделі на стадії створення. Таким чином, створені 3-D моделі із допусками на термоусадку зменшать часові та ресурсні витрати на подальшу механічну обробку, чим підвищить продуктивність роботи принтерів та якість виготовлених деталей.

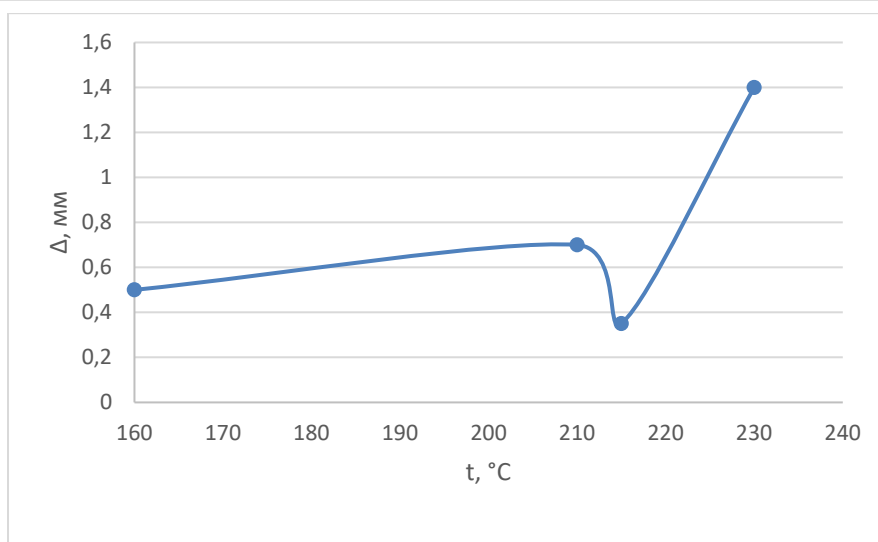


Рис. 4. - Діаграма термоусадки зразків без охолодження

Як видно із графіка (рис. 4) найбільша усадка без примусового охолодження спостерігається при температурі друку 230 °C (1,4 мм), що пояснюється значним розширенням пластику при такому нагріві та його стискання при охолодження. Оптимальним, з точки зору усадки є температура 210 °C. Похибка складає 0,38 мм.

В результаті, отримані значення можуть слугувати в якості коефіцієнтів для корегування 3-D моделі на стадії створення. Таким чином, створені 3-D моделі із допусками на термоусадку зменшать часові та ресурсні витрати на подальшу механічну обробку, чим підвищить продуктивність роботи принтерів та якість виготовлених деталей.

**Другий дослід.** Для виготовлених зразків було визначено поверхневу твердість за допомогою методу неруйнівного контролю. Застосований динамічний твердомір NOVOTEST Т-Д2 дозволяє виконати вимір за шкалою Бринеля та визначити середній показник поверхневої твердості.

Твердомір застосовує динамічний метод вимірювання твердості (метод Ліба), стандартизований згідно ASTM A596 і ідеально підходить для вимірювання твердості масивних деталей, матеріалів з крупнозернистою структурою, чавунів і кольорових металів з поверхнями погано підготовленими для вимірювання.

Як видно з графіку (рис. 5), найбільша поверхнева твердість досягається при другій температурі 215 °C. При збільшенні температури підвищується термоусадка пластику, що робить його крихким та зменшує міцність слоїв.

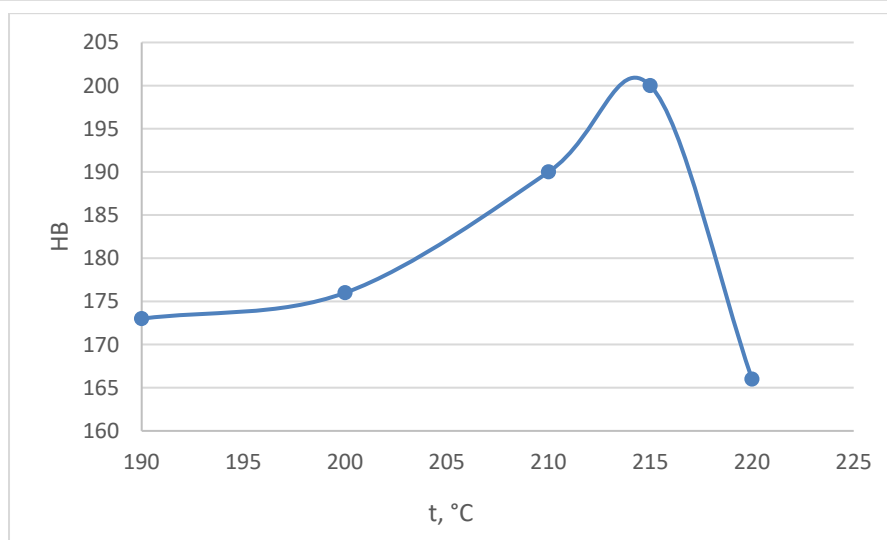


Рис. 5. – Твердість пластика при примусовому охолодженні

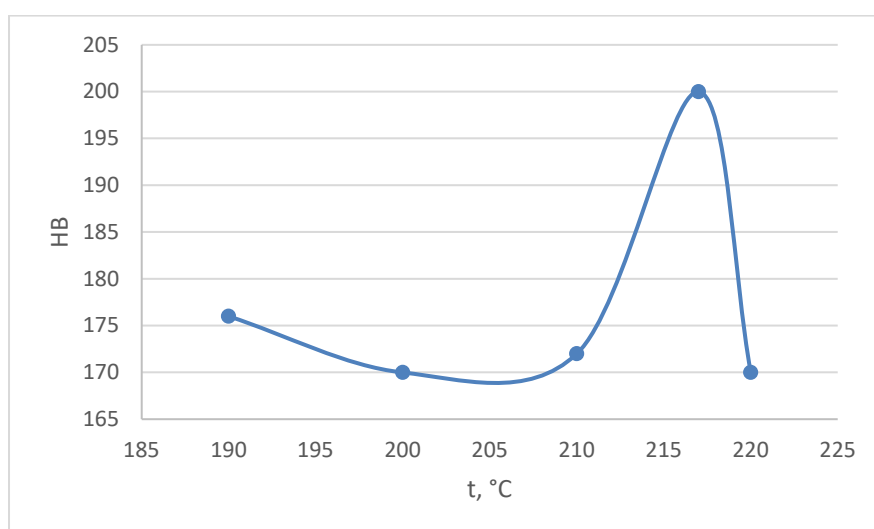


Рис. 6. – Твердість пластика без примусовому охолодженні

Примусове охолодження змінює картину твердості виробів (рис. 6) залежно від температури друку. Зокрема, максимальна твердість HB200 досягається при температурі 220 °C

У порівнянні із друком без охолодження, збільшення температури на 5 град дозволяє друкувати деталі PLA пластиком без додаткових налаштувань принтера. При цьому, спостерігається зменшення поверхневої твердості, при друку за температури 200 °C із охолодженням, що пояснюється слабкою когезією.

**Висновки.** Отримані результати слугують для корегування параметрів 3D моделей на етапі їх створення, із допусками на термоусадку слугують для підвищення точності виготовлених деталей та зменшення часу подальшої механічної роботи що в результаті підвищує продуктивність роботи 3D принтерів.



При друку деталей із великою площею тіла у горизонтальній площині варто застосувати налаштування із температурою 220°C та примусовим охолодженням. В інших випадках – 200 °C із пасивним охолодженням.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Крохмаль А. С., Казакова Н. Ю. Применение 3D-печати в формировании образа современных городских пространств. // Вестник МГХПА «Декоративное искусство и предметно-пространственная среда». — № 1 — 2, 2020. — С. 260—267.
2. Сравнение ABS, PLA, SBS, PETG. Различие пластиков: свойства, хранение, применение. [Електронний ресурс] Режим доступу <https://rusabs.ru/blogs/blog/razlichie-mezhdu-abs-i-pla-dlya-3d-pechati>
3. PLA-пластик для 3D-печати [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3d-plastic-spb.ru/pla-plastik/>
4. Що таке 3D друк? Як працює 3d принтер? [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://xn--3--klcb4a9av.xn--j1amh/%D1%89%D0%BE-%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%B5-3d-%D0%B4%D1%80%D1%83%D0%BA-%D1%8F%D0%BA-%D0%BF%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%8E%D1%94-3d-%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80/>

УДК 539.4.01:004.42

## ПРО КОМП'ЮТЕРНІ ПРОГРАМИ СПРОЩЕНОГО РОЗРАХУНКУ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК НА МІЦНІСТЬ І ЖОРСТКІСТЬ

Ю.С. Холодняк<sup>1</sup>, О.А. Костіков<sup>2</sup>, С.В. Капорович<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, зав. кафедрою технічної механіки, e-mail: [holodhjak.yuri@gmail.com](mailto:holodhjak.yuri@gmail.com)

<sup>2</sup>к.ф.-м.н., доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, e-mail: [alexkst63@gmail.com](mailto:alexkst63@gmail.com)

<sup>3</sup>к.т.н., ст.викладач кафедри технічної механіки, e-mail: [kaporovych@gmail.com](mailto:kaporovych@gmail.com)

<sup>1, 2, 3</sup> Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна

**Анотація.** Розроблено додатковий розрахунковий блок до раніше створених комп'ютерних програм спрощеного розрахунку на міцність статично визначуваних двотаврових балок. Удосконалені програми визначають опорні реакції балок, будують епюри поперечних сил і згинальних моментів, підбирають потрібні номери двотаврів, а також визначають шукані переміщення і будують графіки їх зміни по довжині балок. Впровадження цих програм у навчальний процес надасть студентам нові можливості в формуванні у них професійних навичок. Також розроблені програми будуть корисними і для фахівців-практиків при розв'язанні ними реальних технічних задач.

*Ключові слова:* двотаврові балки, міцність, переміщення, спрощені розрахунки, Mathcad, комп'ютерні програми.