

УДК 621.39

## Розрахунок статичної міцності рами протеза верхньої кінцівки людини

К.М. Лукьяненко<sup>1,2</sup>; М.С. Сущенко<sup>2</sup>

1 – ТОВ “ІПП-Центр”, Київ, Україна

2 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**Анотація.** У роботі представлено розрахунки на міцність протезу верхньої кінцівки людини, виготовленого з поліаміду ПА 12, за методом скінченних елементів (МСЕ). Для проведення розрахунків протезу створено тривимірну геометричну модель, за допомогою операцій експорту-імпорту, передано в ПК «ANSYS», розрахунок виконано у нелінійній постановці, значення сили прийнято в інтервалі  $0 \div 1500$  Н. Оцінка міцності проводилася шляхом порівняння допустимих напружень та деформацій. Представлений у роботі аналіз проводився за спрощеною моделлю, що не враховує елементи кріплення до кінцівки людини. За результатами розрахунку було отримано діапазони статичного навантаження у горизонтальному і вертикальному напрямках, за яких руйнування протезу не відбувається.

**Ключові слова:** метод скінченних елементів; розрахунок статичної міцності; протез верхньої кінцівки людини; поліамід ПА 12.

### Вступ

Метод скінченних елементів (МСЕ) часто використовується для вирішення складних виробничих завдань, які потребують підвищених вимог щодо надійності та безпеки [1]. Аналіз досліджень, пов'язаних із застосуванням МСЕ до виробів, що виготовляються за технологією 3D-друку, засвідчив неоднозначні результати. Наприклад, Аюку та ін. [2] досліджували моделювання поведінки матеріалу шляхом включення рівномірно розподілених пор. Вони повідомили про розумну оцінку експериментальних тестів на початковій стадії, тобто лінійну поведінку, але не змогли відтворити руйнування поліаміду ПА 12, надрукованого методом SLS-друку. Існує багато можливих причин, чому застосування МСЕ не може бути використаний для 3D-друкованих виробів [3]. Анізотропія 3D-друкованих деталей є однією з них. Це призводить до невизначеності щодо введення механічних характеристик матеріалу, необхідних для моделювання за допомогою МСЕ. Наявність різних методів адитивного виробництва та відсутність достатнього обсягу результатів механічних випробувань зразків, виготовлених за цими методами, додають складності у розрахунках на міцність таких виробів [4]. Метою цієї роботи є дослідити і продемонструвати, яким чином МСЕ може бути використаний в якості інструменту для дослідження характеристик міцності протезів верхньої кінцівки.

### Характеристики матеріалу та допустимі напруження

Для виготовлення рами протезу верхньої кінцівки людини, використовується поліамід ПА 12 (інша назва – капрон) механічні характеристики за згинання якого наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Механічні характеристики ПА-12 за згинання

Характеристики міцності	$\sigma_{xy}$ , МПа	65
	$\sigma_z$ , МПа	70
Модулі пружності	$E_{xy}$ , МПа	1730
	$E_z$ , МПа	1730
Видовження	$\delta_{xy}$ , %	20
	$\delta_z$ , %	15

Діаграми руйнування для випадку горизонтального та вертикального друку зображені на рис. 1 та рис. 2 [6].

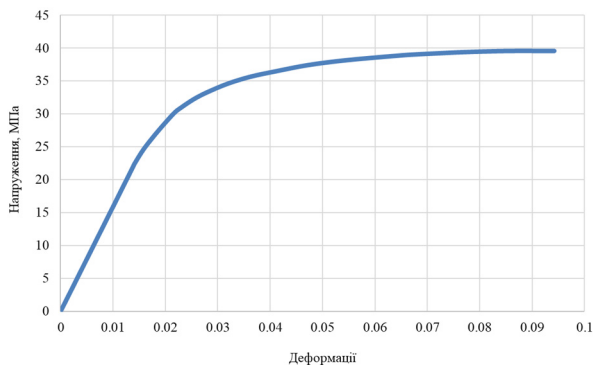


Рис. 1. Діаграми руйнування горизонтально-друкованих зразків з ПА-12

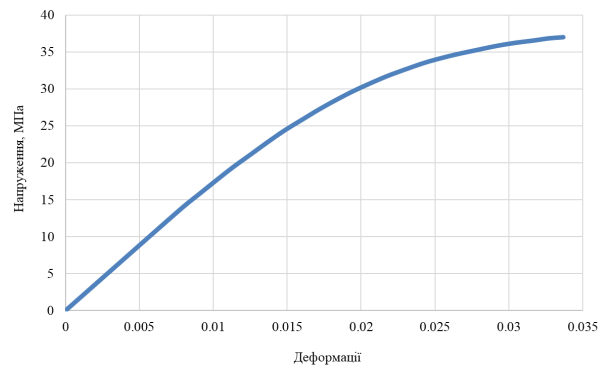


Рис. 2. Діаграми руйнування вертикально-друкованих зразків з ПА-12

У розрахунку використовувалась мультилінійна модель матеріалу (multilinear isotropic hardening [5]).

### Опис граничних умов

В даній роботі використано наступні граничні умови:

- прикладалось поступово зростаюче зусилля з кроком 50 Н в діапазоні від 0 до 1500 Н до торця протезу в горизонтальному та вертикальному напрямках (див рис. 4)
- жорстке защемлення в зоні фіксації протезу (див. рис. 5)

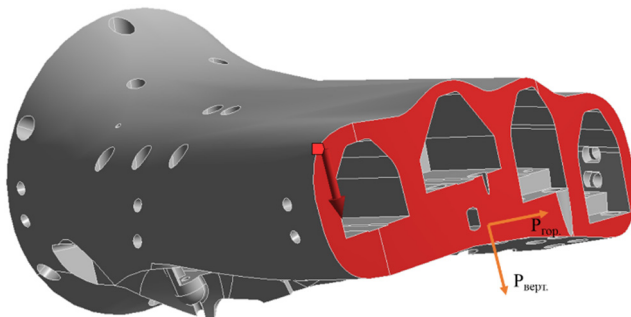


Рис. 4. Прикладання вертикального навантаження

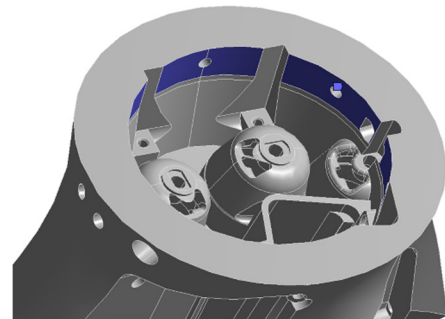


Рис. 5. Зона жорсткого защемлення

### Результати розрахунку

Оцінка міцності протезу відбувалась поетапно, шляхом поступового прикладання до нього сили від 0 до 1500 Н. Розглядалось дві окремі задачі, 1) навантаження горизонтальною силою, 2) навантаження вертикальною силою. Механічні характеристики пружної області задавались як ізотропні, характеристики пластичної області задавались як multilinear isotropic hardening відповідно до рис. 1.

Нижче на рис. 6 та рис 7 наведені результати розрахунку еквівалентних напружень за Мізесом та максимальних переміщень, що виникають у рамі протезу.

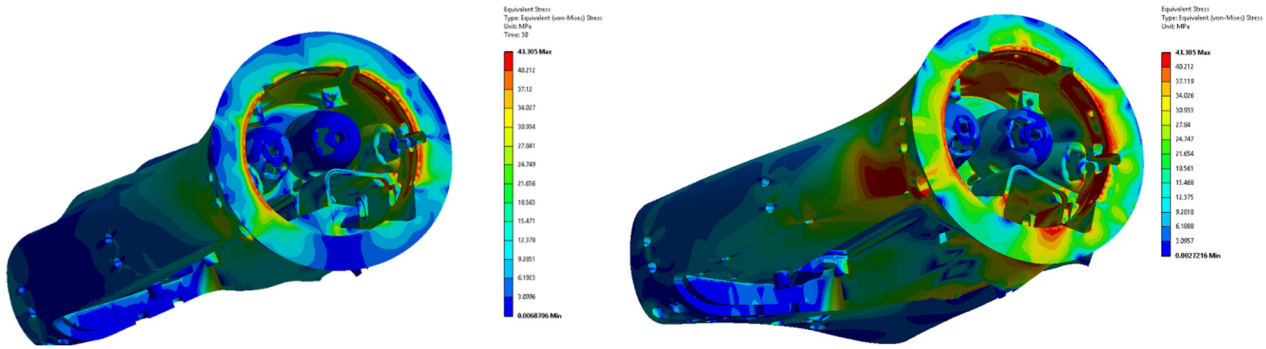


Рис. 6. Еквівалентні напруження за Мізесом (МПа) в протезі: а) навантаження горизонтальною силою, б) навантаження вертикальною силою

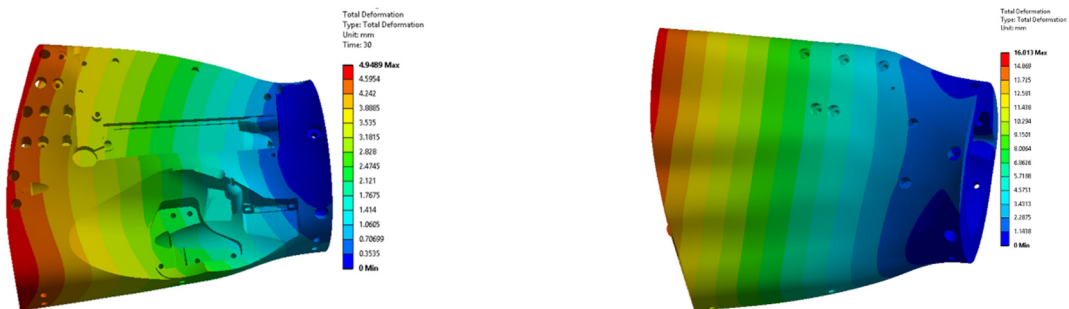


Рис. 7. Максимальні переміщення (мм) в протезі: а) навантаження горизонтальною силою, б) навантаження вертикальною силою

### Аналiтичний розрахунок

Для порівняння отриманих результатів, виконано аналітичний розрахунок. Розглянуто консольно защемлену балку рис. 8, (для прикладу наведена схема для вертикальної сили).

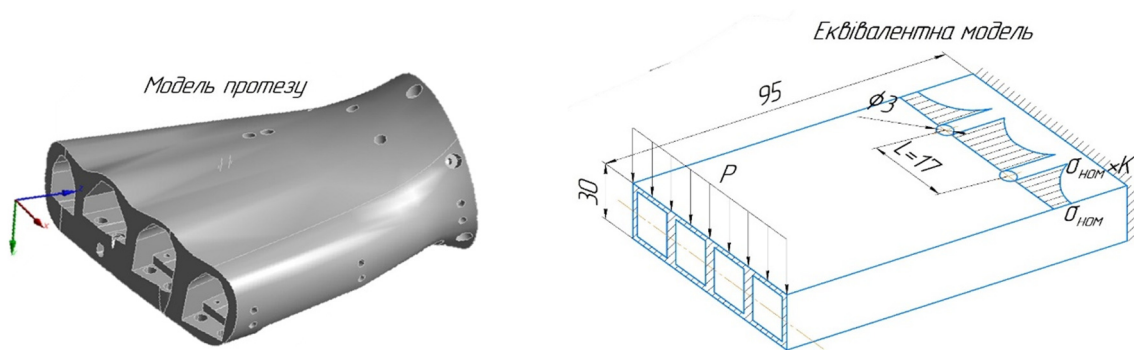


Рис. 8. Розрахункова схема

Використовуючи вищеописані характеристики матеріалу та граничні умови, визначено максимально допустиму силу  $P$  в кожному з напрямів:

$$\text{для вертикальної сили } P = \frac{\sigma_{nom} \cdot W}{l} = \frac{21.6 \cdot 4670}{95} = 1061 \text{ Н};$$

$$\text{для горизонтальної сили } P = \frac{\sigma_{nom} \cdot W}{l} = \frac{21.6 \cdot 12150}{95} = 2830 \text{ Н},$$

де  $P$  – сила, що діє на балку,  $l$  – довжина балки;  $W$  – осьовий момент опору;  $\sigma_{nom}$  – номінальні напруження з урахування коефіцієнту концентрації в отворах  $k = 3$ .

### Порівняння результатів чисельного та аналітичного методів

У табл. 3 розміщено результати розрахунку зусилля руйнування. Для розрахунку МСЕ наведені граничні значення напружень та деформації, що визначені для зовнішньої поверхні.

Таблиця 3

**Результати розрахунку зусилля руйнування, Н**

	Критерій	Горизонтальний напрямок	Вертикальний напрямок
Аналітичний розрахунок	$[\sigma] = 65 \text{ МПа}$	2830	1061
Розрахунок за напруженнями	$[\sigma] = 65 \text{ МПа}$	1500	700
Розрахунок за деформаціями	$[\epsilon] = 15 \%$	1500	810

### Висновки

В даній роботі проведено розрахунок статичної міцності рами протезу. Для цього виконано аналіз критеріїв руйнування полімерних матеріалів та розроблена скінчено-елементна модель.

За результатами аналітичного розрахунку при навантаженні рами протезу горизонтальною силою вона почне руйнуватися при навантаженні 2830 Н, для вертикальної сили цей показник складає 1061 Н.

За результатами чисельного розрахунку отримано:

1. Переміщення рами протезу за навантаження граничною силою 1500 Н досягають значення 5 мм, за навантаження вертикальною силою – 16 мм.
2. Пружні деформації за навантаження горизонтальною силою спостерігаються в діапазоні від 0 до 150 Н, за навантаження вертикальною силою від 0 до 130 Н.
3. Оцінку максимального зусилля здійснювали шляхом порівняння результатів за допустимими деформаціями та напруженнями:
4. за навантаження горизонтальною силою в 760 Н спостерігається перевищення допустимої деформації, для вертикальної сили цей показник складає 710 Н;
5. у розрахунку за допустимими напруженнями при навантаженні горизонтальною силою, рама протезу витримує весь заданий діапазон навантажень від 0 Н до 1500 Н, за вертикальної сили цей діапазон складає від 0 Н до 700 Н.
6. За навантаження в 1500 Н (як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках) максимальні напруження та деформації мають локальний поверхневий характер і не розповсюджуються в об'ємі рами протезу. Максимальні значення напружень та деформацій сконцентровані у місці защемлення, що звісно є консервативною ідеалізацією закріплення протезу.

Таким чином, можна стверджувати, що руйнування рами протезу у випадку навантаження горизонтальною силою в діапазоні від 0 до 1500 Н не відбувається. У випадку навантаження вертикальною силою, за досягнення навантаженням 700 – 810 Н, у тілі протезу, а саме в районі отворів починають зароджуватися тріщини, що призводить до подальшого руйнування протезу.

### Список літератури

1. G. Dhatt, G. Touzot, E. Lefrançois, Finite Element Method, ISTE, John Wiley & Sons, Croydon, 2012.
2. U. Ajoku, N. Hopkinson, M. Caine, Experimental measurement and finite element modelling of the compressive properties of laser sintered Nylon-12, Mater. Sci. Eng. A 428 (1-2) (2006) 211–216.
3. J. Dizob, A. Espera, Q. Chen, R. Advincula, Mechanical characterization of 3D-printed polymers, Addit. Manuf. 20 (2018) 44–67.

4. G. Grob, GrabCad blog, GrabCad, 27 April 2016. [Online]. Available: <https://blog.grabcad.com/blog/2016/04/27/fea-and-3d-printing-challenges/>. (Accessed 19 June 2018).
5. ANSYS Help Manual 2018
6. Lindberg, J. Alfthan, H. Pettersson, G. Flodberg, Li Yang, Mechanical performance of polymer powder bed fused objects – FEM simulation and verification. Additive Manufacturing 24 577–586 (2018).
7. Infomir 3D printing. <https://3dprint.infomir.eu/en/hp-polyamide/>.

## Static Strength Calculation of the Frame of a Human Upper Limb Prosthesis

**K. Lukianenko<sup>1,2</sup>; M. Sushchenko<sup>2</sup>**

1 – IPP-CENTRE LLC, Kyiv, Ukraine

2 – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The research presents strength calculations for a human upper limb prosthesis made of polyamide PA 12, using the finite element method (FEM). A three-dimensional geometric model of the prosthesis was created for the calculations, exported and imported into the ANSYS software. The analysis was performed under nonlinear conditions, with the applied force ranging from 0 to 1500 N. The strength evaluation was carried out by comparing allowable stresses and deformations. The analysis presented in the study was conducted using a simplified model that does not account for the fasteners to the human limb. Based on the results, ranges of static loads in both horizontal and vertical directions were determined, within which the prosthesis does not fail.

**Keywords:** finite element method; static strength calculation; human upper limb prosthesis; polymer material.