

УДК 621.7-4

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-79-88

Владислав Полюшко, Андрій Єрошенко

## ПРОВЕДЕННЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КРОНШТЕЙНА ТА ПІДГОТОВЛЕННЯ ДО 3D-ДРУКУ

**Актуальність теми дослідження.** Зниження маси та збільшення питомої міцності конструкцій, що використовуються в різних галузях машинобудування – на сьогодні найважливіші завдання конструкторів всього світу. Рішення цих проблем безпосередньо пов'язане із завданням пошуку оптимальних геометричних параметрів проектного виробу. Застосування топологічної оптимізації дозволить зменшити вагу виробу зі збереженням вимог до міцності деталі.

**Постановка проблеми.** Отримати топологічно оптимізовану деталь, зменшивши масу на 30–50 %. Зберегти статичні характеристики та конструктивну міцність деталі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Опіраючись на досвід та роботу спеціалістів у цьому напрямі, проблема, яка зазначена вище, може бути вирішена за допомогою топологічної оптимізації та адитивних технологій.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Нині малодослідженим питанням залишається параметризація фізичної моделі для вирішення завдань топологічної оптимізації.

**Постановка завдання.** Зробити дослідження топології з метою отримання найкращого відношення міцності до маси кронштейна, зменшивши при цьому масу на 50 %. Зробити порівняння результатів досліджень у різних програмних пакетах. Підготувати вихідні моделі для швидкого прототипування за допомогою 3D-друку.

**Виклад основного матеріалу.** У цій роботі проводиться топологічна оптимізація кронштейна. Зменшуємо його масу на 50 %, зберігаючи всі статичні характеристики та параметри. Проектуємо деталь у програмному пакеті SolidWorks. Проводимо оптимізацію у двох програмних пакетах: SolidWorks та Fusion 360, порівнюємо отримані результати. Друкуємо оптимізовану деталь на 3D-принтері, використовуючи програмний пакет Simplify 3D.

**Висновки відповідно до статті.** Оптимізовано конструкцію кронштейна в програмних пакетах SolidWorks і Fusion 360, зменшивши його масу на 50 %. Кронштейн, оптимізований в SolidWorks, виглядає естетично краще. Коefіцієнт запасу міцності кронштейна, оптимізованого в SolidWorks, дорівнює 12, а в Fusion 360 – 15. Це свідчить про те, що необхідно виконувати нове дослідження топології, видаляючи 60–65 % матеріалу.

При підготовці до прототипування методом 3D-друку на виході отримали текстовий документ з g-кодом.

**Ключові слова:** топологічна оптимізація; адитивні технології; 3D-друк.

Рис.: 14. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** У сучасному світі, коли технології стрімко змінюють як повсякденне життя, так і область промислового виробництва, одним з ключових завдань для підприємств стає випуск більш якісної і конкурентоспроможної продукції. При цьому вимоги до окремих вузлів і агрегатів, зокрема й досить відповідальних, з часом можуть тільки зростати. Зниження маси і збільшення питомої міцності конструкцій в різних галузях виробництва – найважливіші завдання, що стоять сьогодні перед конструкторами всього світу. Рішення цих проблем безпосередньо пов'язане із завданням пошуку оптимальних геометричних параметрів проектного виробу.

Процес розробки та проектування деталей вийшов на новий рівень з використанням адитивних технологій. Особливо це проявляється з нововведенням та застосуванням новітньої методики – топологічної оптимізації деталі, яка відіграє важливу роль у створенні полегшених конструкцій і ефективному використанні матеріалу [1; 2; 3]. Оптимізація деталі також сприяє більш рівномірному розподілу напружень по всій поверхні об'єкта оптимізації [4].

Крім завдань оптимізації жорсткості й міцності, топологічна оптимізація використовується в напрямку, розробки мікроструктур метаматеріалів. Наприклад, сконструювати таку мікроструктуру, щоб після її певного періодичного повторення і усереднення на макрорівні отримати пружні властивості, які б задовольняли умовам поставленої задачі [5].

У професійній мові авіабудівників є фразеологізм *buy-to-fly ratio*, який можна перекласти як «відношення того, що купили, до того, що полетіло». Тобто скільки матеріалу було куплено і скільки реально «полетіло» в ролі деталі у складі літака. За різними даними, цей показник становить 15:1 або навіть 20:1 для складних деталей. Використання адитивних технологій та топологічної оптимізації дозволяє звести цей показник до 1,5-2,0:1 [6].

**Постановка проблеми.** На сьогодні основними методами отримання заготовок деталей є лиття і обробка тиском. За допомогою цих методів можна отримати різноманітні деталі, різних габаритів та форм. Топологічна оптимізація та адитивні технології – це новий етап розвитку машинобудування. За допомогою цього методу можливе отримання деталей будь-яких форм та розмірів, які за допомогою лиття або обробки тиском було б отримати досить складно. Виготовлення надскладних пресформ вимагає залучення додаткової обробки на верстатах з ЧПК [7]. Це зумовлює великі економічні затрати, багато операцій, що впливає на час отримання кінцевого продукту.

Топологічна оптимізація та адитивні технології дають можливість отримати кінцевий продукт без залучення додаткових операцій обробки [8]. При цьому маса деталі зменшується на 30–50 %, зберігаючи всі статичні характеристики. Це дає можливість заощадити на матеріалі для виготовлення деталі, часі на підготовку виробництва, обсязі механічної обробки деталей тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Адитивні технології в поєднанні з топологічною оптимізацією активно почали застосовуватися в різних галузях: машинобудуванні, медицині, архітектурі тощо [9; 10]. За допомогою даного підходу, друкуються габаритні конструкції, деталі машин, каркаси будівель, які можуть бути оптимізовані та зменшені у своїй вазі [11; 12].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Структурна оптимізація, тобто генерація оптимального дизайну навантажених конструкцій висвітлена в [11]. Однією із задач структурної оптимізації є топологічна оптимізація. Типова задача топологічної оптимізації виглядає приблизно так: для якоїсь заданої просторової конструкції, маючи конкретні обмеження у вигляді матеріалів, технологій та інших вимог, маючи інформацію про зовнішні навантаження, потрібно змодельовати оптимальну структуру, яка буде витримувати навантаження і задовольняти обмеженням.

Оптимальність може бути виражена, наприклад, у вигляді вимоги мінімізації загальної ваги конструкції. При обмеженнях у вигляді максимально допустимих напружень у матеріалі й допустимо можливих зміщеннях при заданих навантаженнях.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження топології з метою найкращого відношення міцності до маси кронштейна, зменшивши при цьому масу на 50 %. Порівняння результатів досліджень у програмних пакетах SolidWorks та Fusion 360. Підготовка вихідної моделі для швидкого прототипування за допомогою 3D-друку.

**Виклад основного матеріалу.** Для правильної постановки завдання необхідно розуміти, як деталь, яку необхідно оптимізувати, взаємодіє з іншими елементами складальної одиниці, який фізичний вплив на неї виконується. Приймаємо за предмет дослідження кронштейн, який тримає спойлер автомобіля. Для більш змістовної оцінки кінцевих результатів дослідження, топологічну оптимізацію кронштейна виконуємо у двох програмних пакетах: SolidWorks і Autodesk Fusion 360. Послідовність виконання розрахунків однакова.

**Послідовність виконання досліджень:**

- моделювання геометричної моделі;
- створення розрахункової моделі;
- створення дослідження в програмних пакетах;
- призначення матеріалу;
- визначення навантажень і граничних умов;
- створення сітки;
- виконання розрахунку;
- обробка результатів.

За допомогою методів розрахункової динаміки визначаються навантаження, які виникають на кронштейні. Відповідно до даних аналогів робимо таку розрахункову схему (рис. 1).

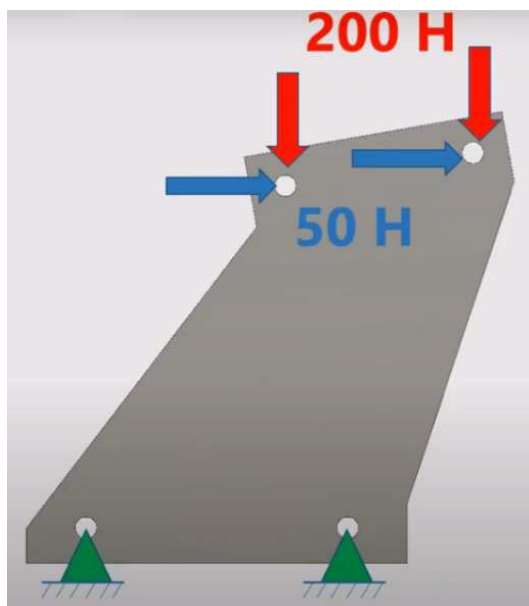


Рис. 1. Розрахункова модель

Сили діють у двох напрямках. 50 Н – горизонтальна сила, 200 Н – притискна сила, яка діє від спойлера. Кріплення – шарнірні.

Виконуємо статичний аналіз змодельованого кронштейна. Запускаємо нове дослідження і вибираємо статичний аналіз (рис. 2).

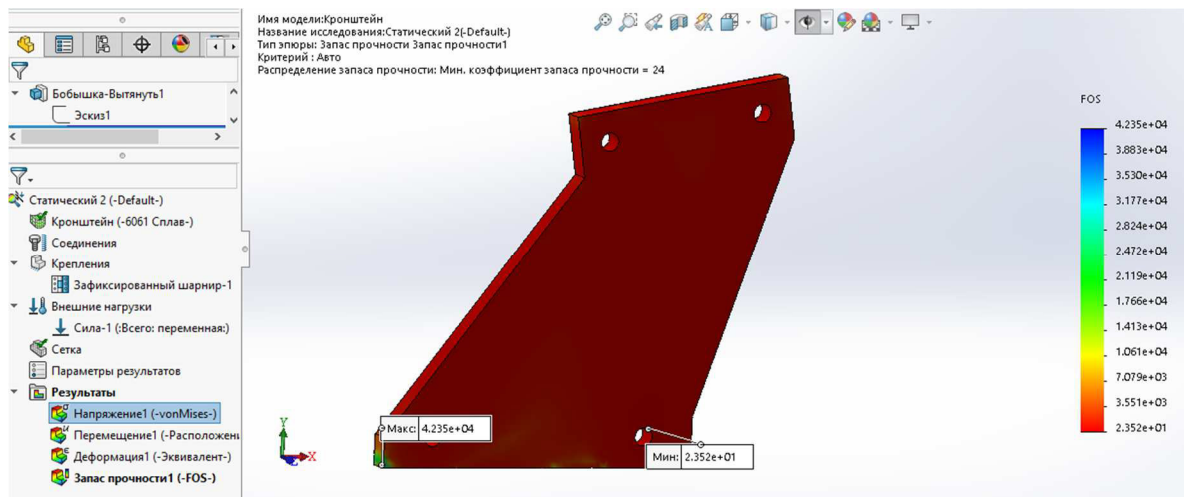


Рис. 2. Еюра запасу міцності

Як видно з рис. 2 запас міцності становить 24.

Наступним етапом є дослідження топології. Створюємо нове дослідження і вибираємо дослідження топології. Аналогічно зі статичним аналізом вказуємо такі ж матеріали, кріплення і сили.

Аналогічно зі статичним аналізом створюємо сітку. Запускаємо розрахунок і на виході отримуємо оптимізовану топологію у вигляді полігональної сітки з епюрою, яка відображає, які з ділянок можна видалити, а які необхідно зберегти (рис. 3).

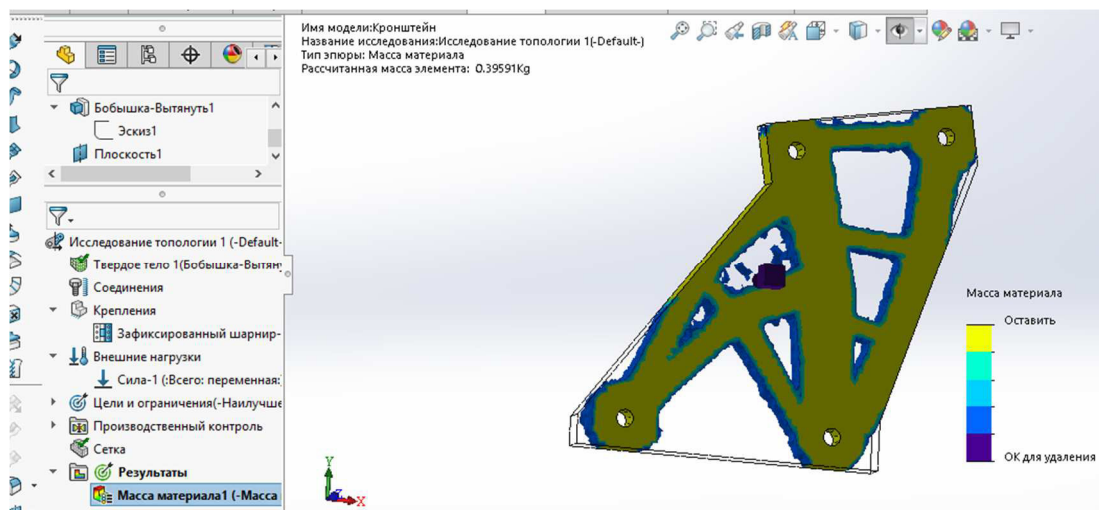


Рис. 3. Результат оптимізації топології

Створюємо ескіз і на основі результатів дослідження видаляємо зайвий матеріал (рис. 4).

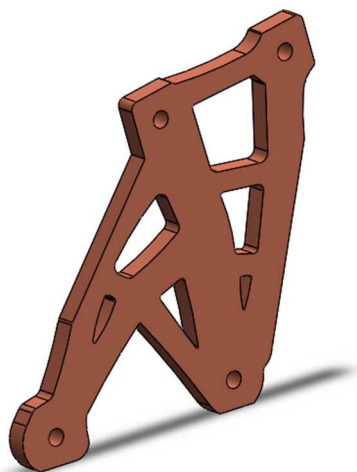


Рис. 4. Оптимізований кронштейн

Обов'язково виконуємо статичний аналіз оптимізованої деталі з такими ж заданими умовами, як і до оптимізації. Результати дослідження вказані на рис. 5.

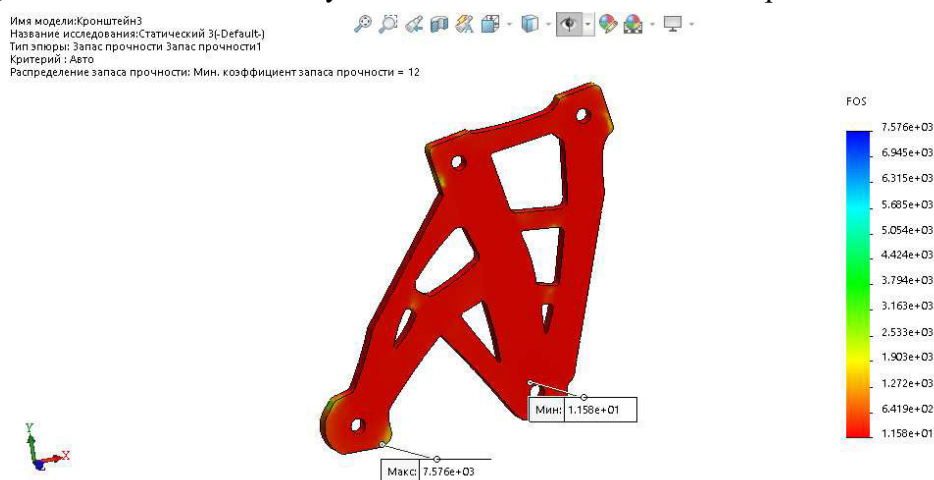


Рис. 5. Етюра запасу міцності

Мінімальний коефіцієнт запасу міцності дорівнює 12.

### Проводимо аналіз в Fusion 360:

Змодельовану деталь зберігаємо у форматі *.step* і відкриваємо в Fusion 360. Послідовність виконання досліджень така ж сама, як і в SolidWorks.

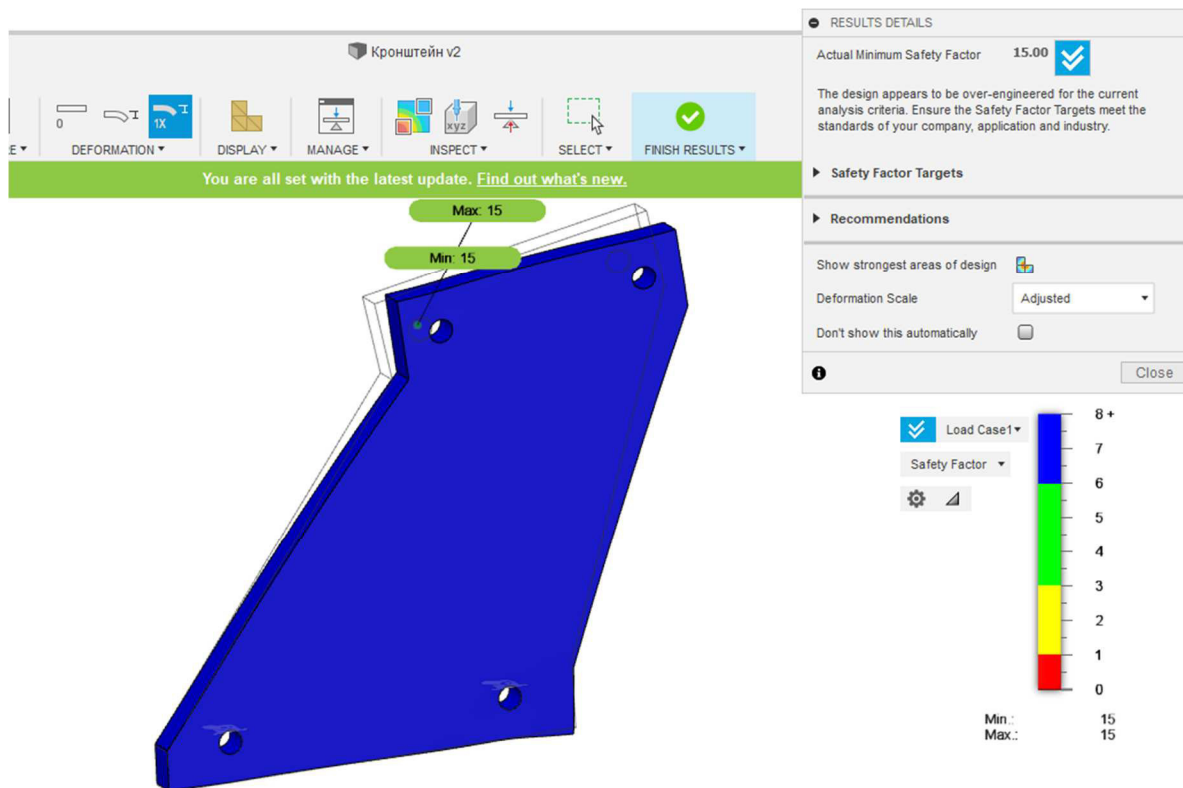


Рис. 6. Коефіцієнт запасу міцності

Коефіцієнт запасу міцності становить 15.

Створюємо дослідження оптимізації форм. Аналогічно зі статичним аналізом вказуємо такі ж матеріал, кріплення і сили. Створюємо скінчено-елементну сітку.

Визначаємо області, які необхідно зберегти (рис. 7).

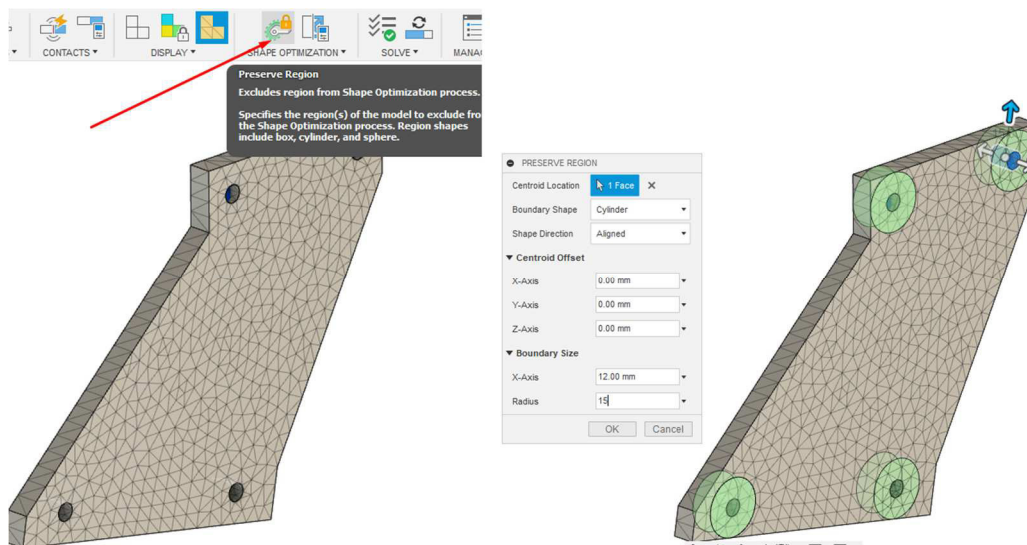


Рис. 7. Визначення областей, які необхідно зберегти

У результаті отримуємо ешюру, на якій відображено частини тіла, які можна видалити, а які необхідно зберегти (рис. 8).

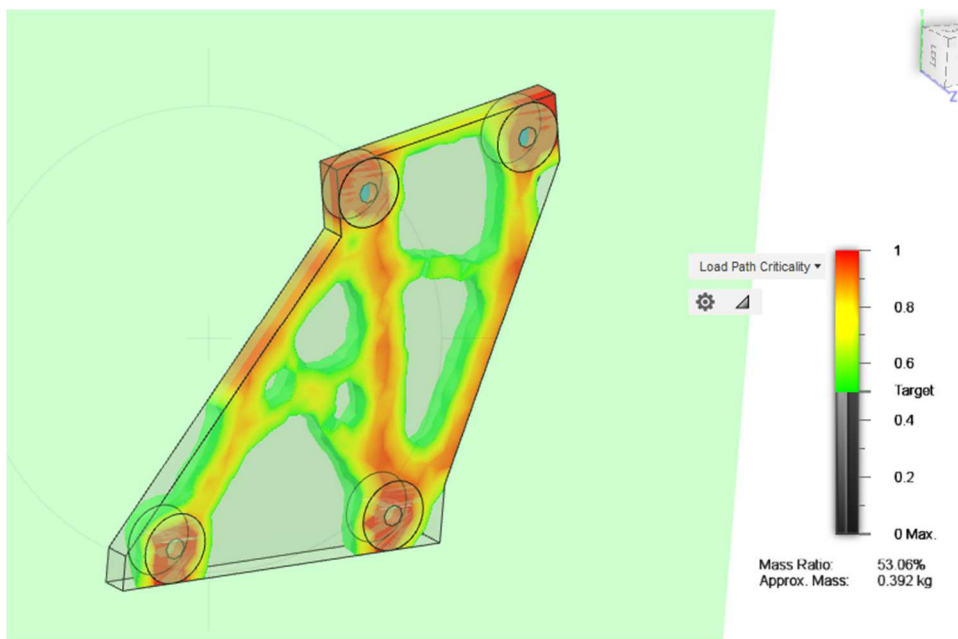


Рис. 8. Результат оптимізації

Зберігаємо результат як полігональну сітку (рис. 9).

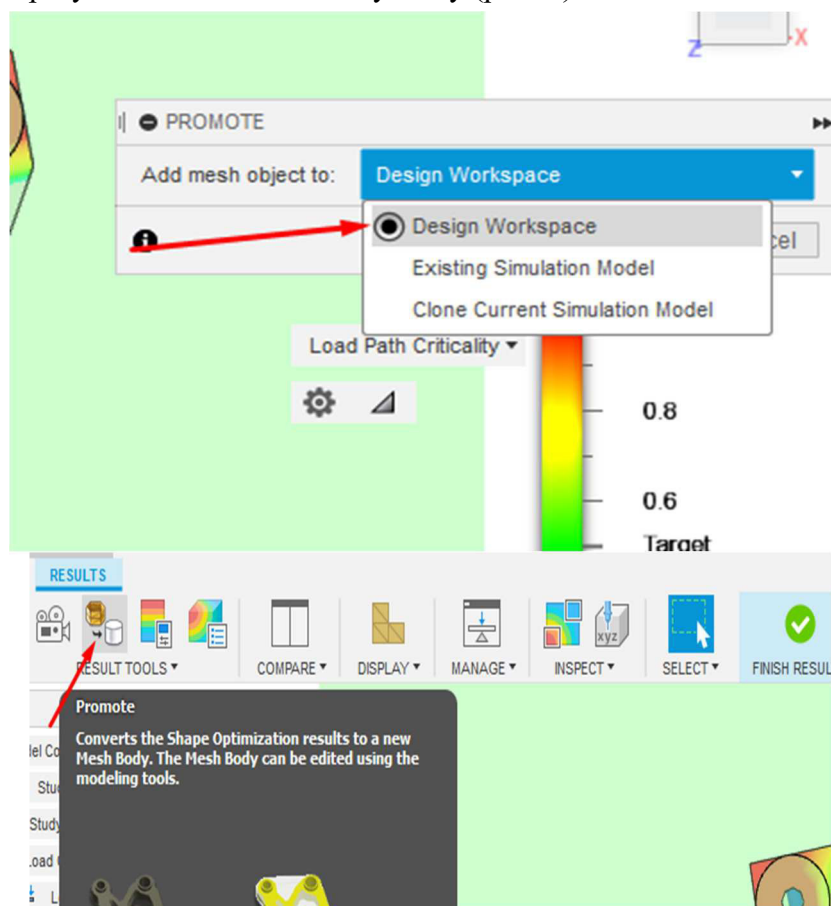


Рис. 9. Збереження результатів у вигляді полігональної сітки

Створюємо ескіз і на основі результатів дослідження видаляємо зайвий матеріал (рис. 10).



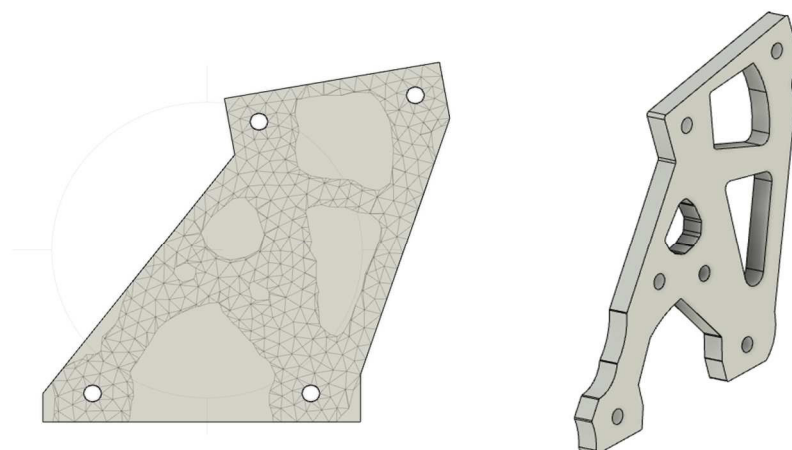


Рис. 10. Оптимізований кронштейн

Виконуємо статичний аналіз оптимізованої деталі згідно з заданою розрахунковою моделлю. Результати дослідження вказані на рис. 11.

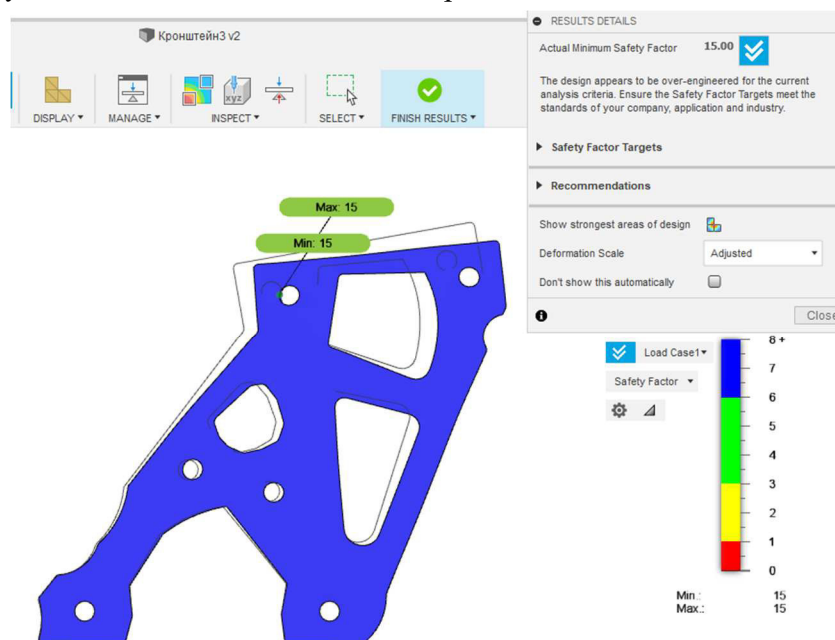


Рис. 11. Коефіцієнт запасу міцності

Коефіцієнт запасу міцності дорівнює 15.

Проводимо підготовку оптимізованих моделей до прототипування за допомогою 3D-друку.

Адитивні технології для виготовлення кінцевого продукту в цьому випадку не раціональні, але їх можемо використати в цілях швидкого прототипування. Прототип дає можливість адекватно оцінювати його естетичні і фізико-механічні характеристики.

Для прототипування будемо використовувати FDM технологію за наявності дельта 3D-принтера.

Є програмні пакети, в яких можемо підготувати моделі для слайсингу (Simplify 3D, Cura, PrusaSlicer). Не дивлячись на те, що Cura і PrusaSlicer у вільному доступі, зупиняємось на Simplify3D завдяки ряду переваг.

Після того, як вказали всі необхідні параметри, натискаємо кнопку «підготувати до друку» (рис. 12).

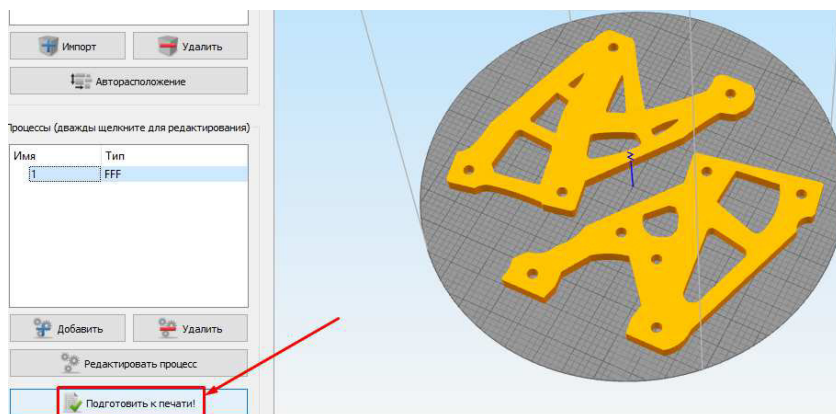


Рис. 12. Підготовка до друку

Після цього відкривається режим попереднього перегляду (рис. 13), де є можливість переглянути траєкторії руху екструдера, визначити місце розташування ретрактів, задавати потрібний для аналізу діапазон шарів.

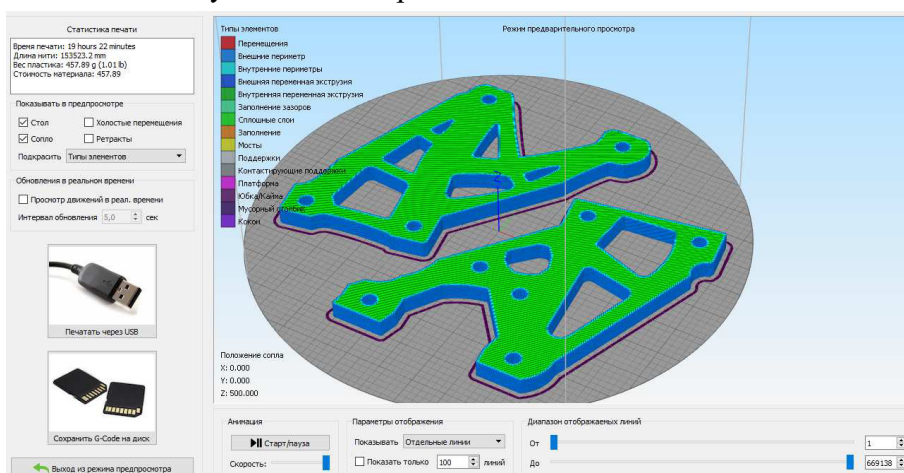


Рис. 13. Режим попереднього перегляду

При таких заданих параметрах, час друку становить 19 годин 22 хвилини, маса дорівнює 457,89 грама (пластик PLA). Зберігаємо g-код на диск і запускаємо 3D-друк.

**Висновки відповідно до статті.** Актуальність адитивних технологій і топологічної оптимізації тільки зростає. Дедалі більше виробництв не тільки прототипує, а й переходить на серійне виробництво, використовуючи адитивні технології. У цій роботі оптимізували конструкцію кронштейна в програмних пакетах SolidWorks і Fusion 360, зменшивши масу на 50% (рис. 14).

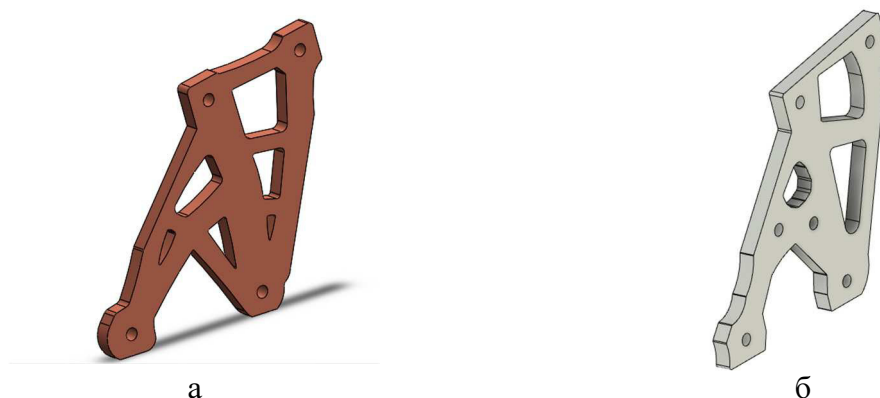


Рис. 14. Оптимізовані кронштейни: а – в SolidWorks; б – в Fusion 360



Коефіцієнт запасу міцності кронштейна, оптимізованого в SolidWorks, дорівнює 12, а в Fusion 360 – 15. Це свідчить про те, що необхідно виконувати нове дослідження топології, видаляючи 60-65 % матеріалу. Суб'єктивно, кронштейн, оптимізований в SolidWorks, виглядає естетично краще.

При підготовці до прототипування методом 3D-друку на виході отримано текстовий документ з g-кодом.

### Список використаних джерел

1. Weiss C. M., Marcus H. L. Selective Area Laser Deposition for Silicon Nitride Joining. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium / The University of Texas at Austin*, August 6-8, 2012. 8 p.
2. Weiss C. M. Selective Area Laser Deposition For the Purpose of Ceramic Joining and Repair: a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. Mansfield : University of Connecticut, 2013. 130 p.
3. Boboulos M. A. CAD-CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation. Frederiksberg : Ventus Publishing ApS, 2010. 174 p.
4. Pham D. T., Dimov S. S. Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling. London : Springer-Verlag, 2001. 214 p.
5. Теміс Ю. М., Якушев Д. А. Оптимізація конструкції деталей і вузлів ГТД. *Вісник СГАУ*. 2011. № 3-1. С. 183–188.
6. Боровиков А. А., Тененбаум С. М. Топологічна оптимізація перехідного відсіку КА. *Аерокосм. науч. журнал. МГТУ ім. Н. Е. Баумана*. 2016. № 05. С. 16–30.
7. Ковров О. М., Єрошенко А. М. Комплексне використання CAD/CAM/CAE систем у проектуванні та виготовленні прес-форм для лиття деталей зі складними криволінійними поверхнями. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія: Технічні науки*. 2013. № 3(67). С. 111–119.
8. Kalchenko V. V., Yeroshenko A. M., Boyko S. V., Ignatenko P. L. Development and Research of Thermoplastic Methods for Hardening Details. *Natsionalnyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*. 2020. Iss. 2. Pp. 53-60.
9. Камаєв С. В., Марков М. А., Новиков М. М., Вермель В. Д., Громишков А. Д. Виготовлення моделей складної просторової форми. *Перспективні матеріали*. 2011. № 13. С. 154–158.
10. Оганесян П. А., Шевцов С. Н. Оптимізація топології конструкцій в пакеті ABAQUS. *Вісник Самар. науч. центру РАН*. 2014. Т. 16. С. 543–549.
11. Jikai Liu, Yongsheng Ma. A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Softwar*. 2016. August. Pp. 161–175.
12. Munk D. J., Vio G. A., Steven G. P. Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review. *Struct Multidisc Optim*. September 2015. Vol. 52, iss. 3. Pp. 613–631.

### References

1. Weiss, C. M., Marcus, H. L. (August 6-8, 2012). Selective Area Laser Deposition for Silicon Nitride Joining. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. The University of Texas at Austin.
2. Weiss, C. M. (2013). *Selective Area Laser Deposition For the Purpose of Ceramic Joining and Repair: a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy*. University of Connecticut.
3. Boboulos, M. A. (2010). *CAD-CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation*. Ventus Publishing ApS.
4. Pham, D. T., Dimov, S. S. (2001). *Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*. Springer-Verlag.
5. Temis, Yu. M., Yakushev, D. A. (2011). Optimization of construction details and gas-turbine engine parts. *News of SSAU*, 3-1, pp. 183–188.
6. Borovikov, A. A., Tenenbaum, S. M. (2016). Topologichna optymizatsiia perekhidnoho vidsiku KA [Topology of optimizing the transition of spacecraft]. *Aerokosm. науч. zhurnal. MHTU im. N. E. Bauman – Aerospace. scientific magazine. MSTU im. NOT. Bauman: electron. Journal*, 05, pp. 16–30.
7. Kovrov, O. M., Yeroshenko, A. M. (2013). Kompleksne vykorystannya cad/cam/cae system u proektuvanni ta vyhotovlenni pres-form dlya lyttya detaley zi skladnymy kryvoliniynymy poverkhnymy [Integrated use of cad / cam / cae systems in the design and manufacture of molds for casting

parts with complex curved surfaces]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho univer-sytetu: Seriya: Tekhnichni nauky – Bulletin of Chernihiv State Technological University: Series: Technical Sciences*, 3(67), pp. 111–119.

8. Kalchenko, V. V., Yeroshenko, A. M., Boyko, S. V., Ignatenko, P. L. (2020). Development and Research of Thermoplastic Methods for Hardening Details. *Natsionalnyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*, 2, pp. 53-60.

9. Kamaev, S. V., Markov, M. A., Novikov, M. M., Vermel, V. D., Gromishkov, A. D. (2011). Vigotovlennya models folding folding space [Making models of complex spatial shape]. *Prospective materials*, 13, pp. 154–158.

10. Oganesyanyan, P. A., Shevtsov, S. N. (2014). Optimization of topology design in the ABAQUS package. *News Samar. scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 16, pp. 543–549.

11. Jikai Liu, Yongsheng Ma. (August 2016). A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Softwar* (pp. 161–175).

12. Munk, D. J., Vio, G. A., Steven, G. P. (September 2015). Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review. *Struct Multidisc Optim*, 52(3), pp. 613-631.

UDC 621.7-4

*Vldyslav Polushko, Andriy Yeroshenko*

## TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE SUPPORT AND PREPARATION FOR 3D PRINTING

**Urgency of the research.** Reducing the weight and increasing the specific strength of structures used in various fields of mechanical engineering - the most important tasks facing designers around the world today. The solution of these problems is directly related to the task of finding the optimal geometric parameters of the designed product. The use of topological optimization will reduce the weight of the product while maintaining the requirements for the strength of the part.

**Target setting.** Get a topologically optimized part, reducing the weight by 30 - 50%. Preserve static characteristics and structural strength of the part.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Based on the experience and work of specialists in this field, this problem, which is mentioned above, can be solved with the help of topological optimization and additive technologies.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Currently, the little-studied issue is the parameterization of the neural network of the physical model to solve problems of topological optimization.

**The research objective.** To study the topology in order to best match the strength to the weight of the support, reducing the weight by 50%. Make a comparison of research results in different software packages. Prepare source models for rapid prototyping using 3D printing.

**The statement of basic materials.** In this work, the topological optimization of the support is performed. We reduce its weight by 50%, preserving all static characteristics and parameters. We design a part in the SolidWorks software package. We perform optimization in two software packages: SolidWorks and Fusion 360, we compare the results. We print the optimized part on a 3D printer using the Simplify 3D software package.

**Conclusions.** The support design in the SolidWorks and Fusion 360 software packages has been optimized, reducing its weight by 50%. The support optimized in SolidWorks looks aesthetically better. The margin of safety of the support optimized in SolidWorks is 12, and in Fusion 360 - 15. This indicates that it is necessary to perform a new topology study, removing 60-65 % of the material. In preparation for prototyping by 3D-printing at the output received a text document with g-code.

**Keywords:** Topological optimization, additive technologies, 3D printing.

*Fig.: 14. References: 12.*

**Єрошенко Андрій Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Yeroshenko Andrii** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Wood technology, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** yeroshenkoam@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1629-9516>

**Researcher iD:** G-6757-2014

**Scopus Author ID:** 57193700687

**Полюшко Владислав Юрійович** – магістрант кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Polushko Vladyslav** – master of mechanical engineering and wood technology department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** vpolushko.cntu@gmail.com