УДК 629.7.017.1
DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771502025347475

Р. В. Білицький[1], *Phd студент*, **Ю. І. Бондар**[2], *к. т. н., доцент*

АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕМЕНТІВ ШАСІ

Ua Наведено порівняння адитивних та традиційних методів виробництва для виготовлення елементів шасі. Порівняння охоплює економічну доцільність, технологічні можливості та відповідність нормативним вимогам. Особливу увагу приділено механічним і довговічним властивостям алюмінієвих, титанових та сталевих сплавів, виготовлених методами *PBF* і *DED*. Визначено основні переваги й недоліки адитивного виробництва елементів шасі та сформульовано висновки щодо подальших досліджень у поставленій задачі.

En A comparison of additive and traditional manufacturing methods for the production of landing gear components is presented. The comparison covers economic feasibility, technological capabilities, and compliance with regulatory requirements. Particular attention is paid to the mechanical and durability properties of aluminum, titanium, and steel alloys manufactured using PBF and DED methods. The main advantages and disadvantages of additive manufacturing of landing gear components are identified, and conclusions are formulated for further research in this area.

Вступ

Протягом останніх десятиліть спостерігається дедалі ширше впровадження адитивного виробництва у різноманітні галузі промисловості, зокрема й в авіаційну. Наразі 3*D*-друк переважно використовують для другорядних, малонавантажених елементів конструкції літака. Необхідно проаналізувати сучасний розвиток адитивного виробництва, оцінити перспективи використання адитивного виробництва для елементів шасі та визна-

[1] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[2] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*

чити основні перешкоди на шляху широкого впровадження цього методу виробництва в авіаційній галузі.

Шасі є одним із ключових елементів конструкції літака, що забезпечує контакт із землею під час зльоту, посадки та руління. Воно має витримувати навантаження від маси літака та динамічні впливи під час посадки, зокрема кінетичну енергію горизонтальної і вертикальної складових швидкості, а також зусилля від гальмування [1].

Історично елементи шасі, як і інші елементи конструкції літака, виготовляли субтрактивними методами виробництва, тобто шляхом механічної обробки заготовки. Як було підкреслено вище, наразі використання 3*D*-друку переважно обмежене другорядними, малонавантаженими елементами конструкції літака. Проте існують приклади сертифікованих деталей авіадвигуна [2], а також компанія *Safran and SLM* Solutions виготовила стійку шасі [3]. Ця стійка не була сертифікована для серійного виробництва, однак сам факт її створення свідчить про те, що авіавиробники рухаються в напрямку широкого впровадження адитивних технологій, включаючи виготовлення відповідальних елементів конструкції.

На рис. 1 наведено прогнозовану еволюцію адитивного виробництва згідно із [4]. Відповідно до цієї схеми, виробництво критичних деталей є питанням близького майбутнього. Тож розглянуте питання виробництва елементів шасі є актуальним сьогодні.

Рис. 1. Прогнозована еволюція адитивного виробництва [4]

Постановка задачі

Необхідно проаналізувати можливість використання адитивних технологій для високонавантажених елементів, зокрема деталей стійки шасі. Слід розглянути сучасний стан розвитку адитивного виробництва та порівняти його із традиційними (субтрактивними) методами. Варто окреслити основні недоліки, переваги та перешкоди для впровадження адитивного виробництва компонентів шасі.

Вирішення задачі

У статті окреслено головні відмінності між адитивними та субтрактивними методами обробки. Проаналізовано механічні та довговічні властивості деталей, виготовлених адитивними технологіями. Сформульовано висновки щодо можливості застосування адитивного виробництва для елементів шасі.

Порівняння адитивних та традиційних методів виробництва

Під час субтрактивного виробництва деталь отримують із заготовки шляхом видалення зайвого матеріалу. При цьому витрачається багато часу та ресурсів. Натомість адитивне виробництво пропонує принципово інший підхід: деталь створюється шар за шаром. Після цього зазвичай потрібна мінімальна механічна обробка та, за необхідності, термообробка. Механічна обробка використовуються для формування необхідної геометрії, а термообробка – для зняття внутрішніх напружень або досягнення потрібних параметрів міцності.

Є багато причин, чому адитивне виробництво все ширше впроваджують у авіаційній галузі. Окрім очевидних переваг у зменшенні ваги, воно має значну економічну перевагу при правильному застосуванні. За допомогою 3*D*-друку можна виготовляти деталі надзвичайно складної геометричної форми, які неможливо отримати традиційними методами виробництва. Як приклад зменшення ваги можна навести кронштейн гондоли двигуна літака *A*350**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**. Його масу вдалося знизити на 45%, а вартість — на 25% [5].

Головну перевагу адитивного виробництва – зменшення ваги – досягають використанням топологічної оптимізації. Це ітеративний процес перепроектування деталі або ж цілого вузла. Перепроектування деталі відбувається за наведеною схемою на рис. 3. Тож за умови використання адитивного виробництва для елементів шасі є перспектива значного зменшення ваги.

Рис. 2. Кронштейн гондоли двигуна літака *A*350, (*а*) виготовлений традиційними методами, (*б*) виготовлений методами адитивного виробництва [5]

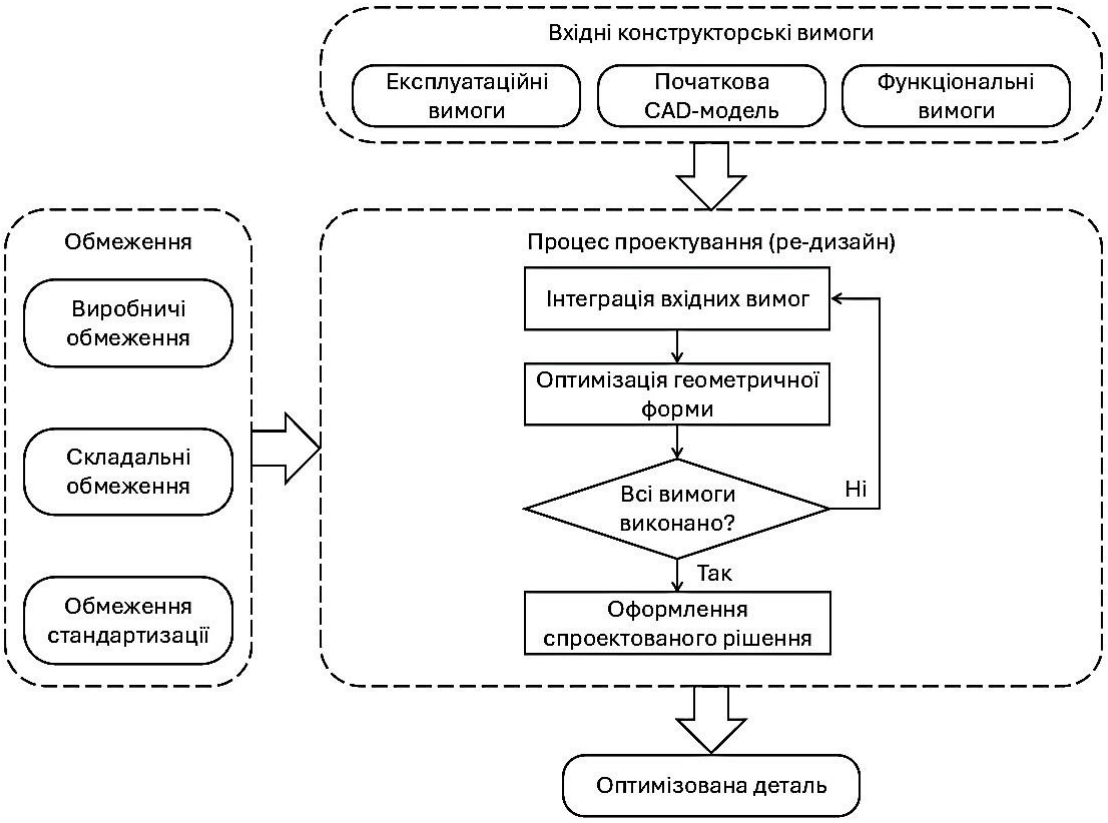

Рис. 3. Блок-схема проектування деталі для адитивного виробництва [6]

Після адитивного виробництва необхідно лише мінімальна механічна обробка, що дозволяє економити на кількості технологічних операцій, обладнання та інструментів порівняно з традиційними методами. Зокрема, при одиничному та малосерійному виробництві адитивне виробництво значно дешевше за традиційні методи [7]. Чітко простежуються тенденції до його використання в авіації, зокрема з алюмінієвих, титанових та сталевих сплавів.

Класифікація адитивних методів виробництва

Згідно зі стандартом *ASTM/ISO* 52900 адитивне виробництво класифікують на сім основних методів (див. Таблиця 1). З них два – *PBF* і *DED* – є найбільш використовуваними і впровадженими в різних галузях промисловості, зокрема в авіаційній [8]. Інші процеси наразі менш поширені й застосовуються для виготовлення некритичних деталей.

***Таблиця* 1.**

Методи адитивного виробництва

Метод	***Опис***
Powder bed fusion (PBF)	Деталь формують у шарі порошку шляхом локального плавлення матеріалу.
Directed energy deposition (DED)	Плавлення матеріалу відбувається під час осадження. Матеріал (порошок або дріт) подається безпосередньо в зону дії лазера.
Binder jetting	Порошок змішують зі зв'язуючим елементом, після чого деталь піддають спіканню.
Material jetting	Розпилення фотополімеру або воску з подальшою полімеризацією.
Material extrusion	Розплавлений матеріал подається пошарово через сопло.
Vat photopolymerization	Деталь формують шляхом вибіркової полімеризації рідкого фотополімеру у ванні під дією УФ-випромінювання.
Sheet lamination	Деталь формують склеюванням або сплавленням листів матеріалу.

Варто зауважити, що в залежності від обраного методу адитивного виробництва формується різна внутрішня структура матеріалу та поверхня деталі. Відповідно, отримуємо різні механічні та довговічні властивості. Тож розглянемо нижче детальніше аспекти міцності та довговічності під час адитивного виробництва.

Міцність та довговічність під час адитивного виробництва

Як відомо, в авіації широко застосовуються алюмінієві сплави серій 2*** та 7***, а також титанові й сталеві сплави для більш навантажених елементів. Розглянемо обмеження, що виникають для цих сплавів при адитивному виробництві.

Алюмінієві сплави

Деталі з алюмінієвих сплавів серій 2*** та 7***, виготовлені адитивними методами, часто мають розтріскування, пористість та дефекти несплавлення. В алюмінієвих сплавах з міддю спостерігається чутливість до гарячого розтріскування. На рис. 4 наведено приклади дефектів, що виникають у процесі адитивного виробництва деталей.

Також відзначається зміна хімічного складу через випаровування низькокиплячих елементів, зокрема цинку, який є основним легуючим елементом у сплавах 7*** серії [8].

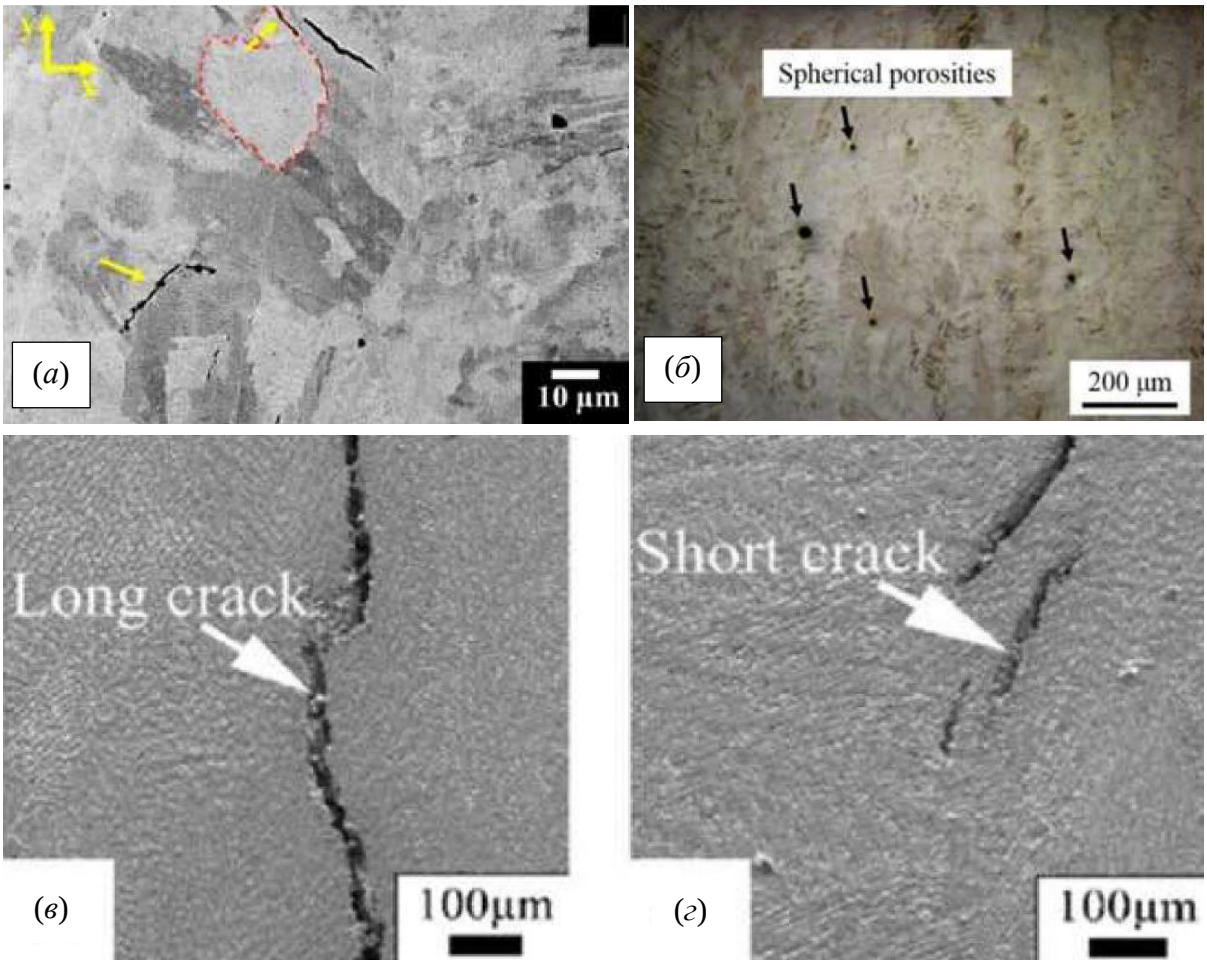

Рис. 4. Дефекти при адитивному виробництві [6]: (*а*) гаряче розтріскування, (*б*) пористість, (*в*, *г*) розтріскування спричинене залишковими внутрішніми напруженнями

Межі текучості та міцності на розтяг адитивно виготовлених алюмінієвих деталей часто перевищують традиційні аналоги, проте спостерігається зменшення відносного видовження [9].

Оскільки алюмінієві сплави серій 2*** та 7*** широко використовується в авіації, наведені вище дефекти є серйозною перепоною для впровадження адитивного виробництва деталей із алюмінію. Багато досліджень зосереджені на модифікації складу сплавів для усунення проблем випаровування й розтріскування, а також для покращення механічних властивостей при використанні адитивних методів [8].

Титанові сплави

Для титанових сплавів, так само як і для алюмінієвих, характерна проблема пористості і випаровування низькокиплячих елементів. Наприклад, у поширеному сплаві *Ti*-6*Al*-4*V* втрата алюмінію в складі становить 0,922% (рис. 5), що негативно впливає на механічні та довговічні властивості деталей.

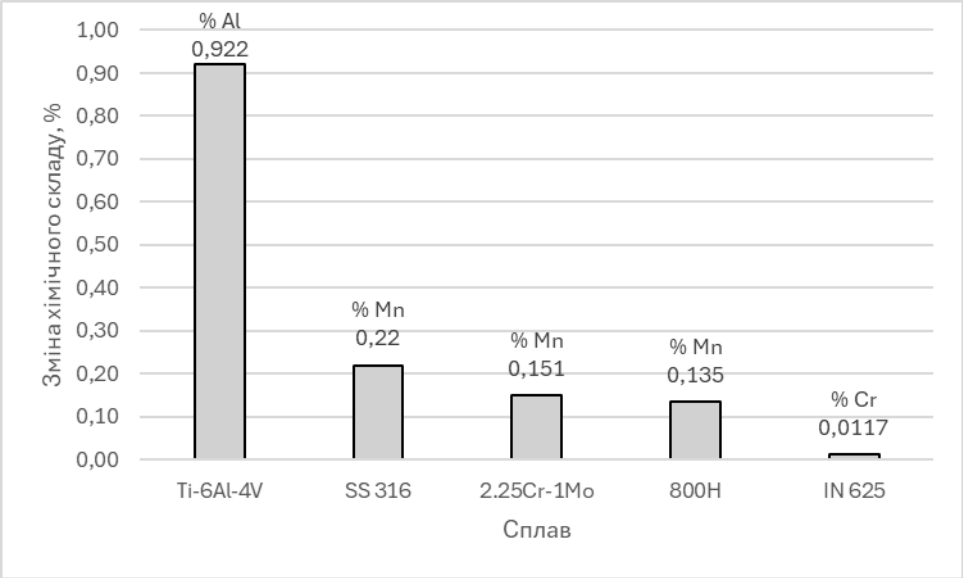

Рис. 5. Зміна хімічного складу під час адитивного виробництва [6]

Ще одна проблема пов’язана із високою швидкістю охолодження, що є типовою для адитивного виробництва. Широко використовуваний в авіації сплав *Ti*-6*Al*-4*V* класифікується як α+β сплав. Структура α+β повинна формуватися під час поступового охолодження із β-фази. Через високу швидкість охолодження під час адитивного виробництва формується метастабільна фаза із великими стовпчастими зернами, що погіршує характеристики довговічності [8]. Для вирішення цієї проблеми потрібно контролювати швидкість охолодження або використовувати додаткове джерело тепла, щоб знизити швидкість охолодження щойно надрукованого матеріалу.

Окрім цього, титанові сплави схильні до розтріскування, яке є наслідком великих температурних градієнтів і, відповідно, залишкових напружень у зоні термічного впливу. Ці залишкові напруження негативно впливають на характеристики втоми. Тому потрібна додаткова термообробка для їхнього зняття й покращення довговічності. Через труднощі у формуванні дрібної мікроструктури також проводиться модифікація титанових сплавів [8, 9].

Аналогічно до алюмінієвих сплавів, механічні властивості титанових деталей, виготовлених адитивними методами, кращі, ніж у деталей, отриманих традиційними методами, за винятком меншого відносного видовження [9]. На рис. 5 наведено порівняння механічних властивостей деталей, виготовлених різними адитивними методами, із деталями, отриманими традиційними способами.

Сталеві сплави

Сталеві сплави у адитивному виробництві також мають мікроструктурні проблеми через високу швидкість охолодження, однак, згідно із [9], механічні властивості адитивно виготовлених деталей не поступаються традиційним аналогам. Більше того, відносне видовження адитивно виготовлених деталей зі сталевих сплавів перевищує показники деталей, отриманих традиційними методами. Таким чином, на відміну від алюмінієвих і титанових сплавів, деталі зі сталевих сплавів, виготовлені адитивними методами, демонструють одночасно кращі характеристики на розтяг і відносне видовження.

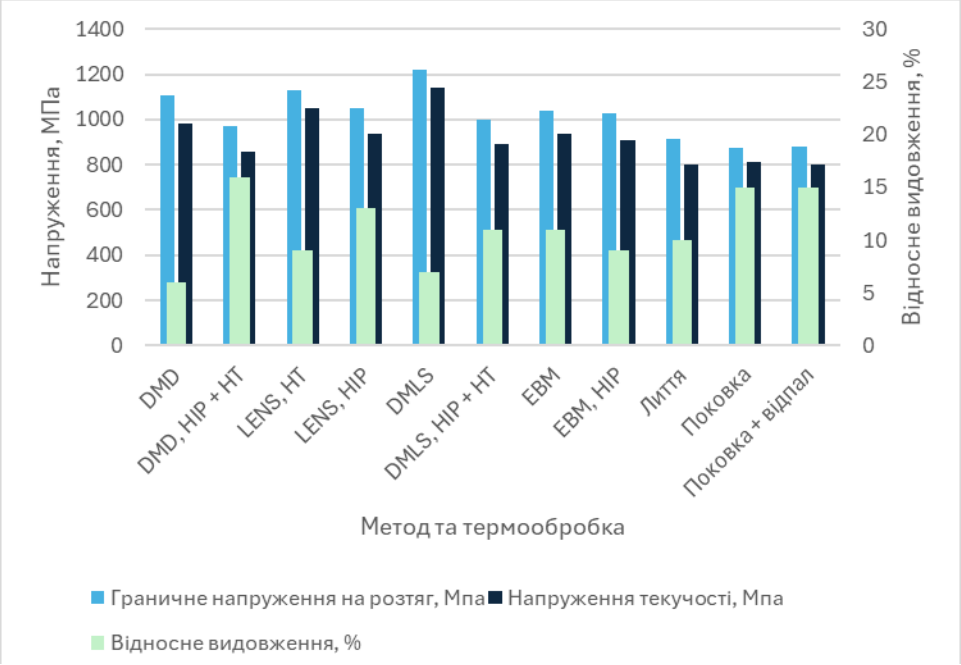

Рис. 6. Порівняння механічних властивостей деталей отриманих адитивними та традиційними методами [10]

Висновки

Адитивне виробництво має багато переваг, але водночас існують значні ризики. Зокрема, недостатньо вивченими залишаються характеристики втоми таких металів. Проблеми втоми деталей, виготовлених адитивними методами, пов'язані з наявністю різних дефектів під час виробництва. Наразі багато досліджень зосереджені на їх вирішенні, адже саме надійність і добрі характеристики втоми є ключем до широкого впровадження адитивних методів у авіаційній галузі [8].

Попри значний потенціал адитивних технологій в авіації, необхідно подолати низку проблем перед їх масовим застосуванням. Зокрема, відсутність стандартизованих механічних характеристик і методів неруйнівного контролю для критичних елементів є головною перепоною для широкого впровадження адитивного виробництва в авіації. Провідні організації світу працюють над вирішенням цих проблем. *MMPDS* та *SAE* займаються стандартизацією адитивного виробництва [11], що має стати поштовхом до його масового застосування в авіаційній галузі.

Тож можна стверджувати, що виробництво компонентів шасі за допомогою адитивних методів є перспективним. Найбільш ймовірним матеріалом для такого виробництва є титанові сплави, а серед технологій друку – методи *PBF* або *DED*. Подальші дослідження варто зосередити на питаннях міцності та довговічності деталей, виготовлених адитивними методами.

Список використаної літератури

1. *Kuşhan, M. C., Gürgen, S.* and *Sofuoğlu, M. A.* (2022) *Materials, structures and manufacturing for aircraft*. Cham: Springer.
2. Metal additive manufacturing in the aerospace sector (2024a) Metal Additive Manufacturing. Available at: https://www.metal-am.com/articles/metal-am-in-the-aerospace-sector-from-early-successes-to-the-transformation-of-an-industry/
3. Safran and SLM Solutions Evaluate SLM® technology for additively manufactured main fitting of a Bizjet (2021) Safran. Available at: https://www.safran-group.com/pressroom/safran-and-slm-solutions-evaluate-slmr-technology-additively-manufactured-main-fitting-bizjet-2021-03-29
4. Regulatory Considerations for AM Qualification and Status of FAA AM Roadmap. Available at: https://www.nrc.gov/docs/ML1733/ML17338A886.pdf
5. D. *L. Bourell, W. Frazier, H. Kuhn,* and *M. Seifi, ASM Handbook, Volume 24: Additive Manufacturing Processes*, ASM International, 2020.

6. *B. Dutta*, *S. Babu*, and *B. Jared*, *Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing*, Elsevier, 2019.
7. *Lancaster*, *R. J.*, *Fortunato*, *A.* and *Kolisnychenko*, *S.* (2020) *Metal Additive Manufacturing*. Baech, Switzerland: Trans Tech Publications, Ltd.
8. *Berto*, *F*. (2024) *Fatigue in additive manufactured metals*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
9. *Srivatsan*, *T. S.* and *Sudarshan*, *T. S.* (2016) *Additive Manufacturing: Innovations, advances, and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
10. *J. Pelleg*, Additive and Traditionally Manufactured Components*: A* Comparative Analysis of Mechanical Properties, 1st ed., Elsevier, Apr. 2020.
11. *Schmidt*, *R. K.* (2021) *The design of Aircraft Landing Gear*. Warrendale, Pa. (400 Commonwealth Dr, Warrendale PA USA): Society of Automotive Engineers.