

УДК 621.45.778

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.211752

## Забезпечення функціональних властивостей відповідальних конструктивних пластикових елементів засобами 3-D друку

О. Ф. Саленко, П. П. Мельничук, Є. Є. Лашко, О. О. Ченчева,  
О. М. Титаренко, І. І. Деревянко, О. А. Самусенко

*Розглядаються питання використання засобів 3-D друку для виготовлення конструкційних елементів машин і апаратів. Проведено аналіз особливостей друкування PLA-Carbon і PEEK (PEEK-Carbon) пластиками. Показано, що друкування PEEK-пластиком супроводжується рядом проблем, пов'язаних із високими залишковими термічними напруженнями при охолодженні матеріалу, а також із проблемою адгезії до поверхні викладання, яка має зберігати свої властивості до температур 420 °С. Проаналізовано причини виникнення браку при друкуванні виробів, що мають значну тривалість процесу (понад 12 год). Показано, що найбільш гострою залишається проблема міжшарового зчеплення, яка обумовлює анізотропію властивостей готового виробу.*

*Доведено, що використання пластмаси PEEK дозволяє виготовляти силові елементи за допомогою спеціальних друкувальних головок. Особливу увагу варто приділити надійному з'єднанню елемента, який друкується, з основою (столом), оскільки луцення та деформація поверхні основи є однією з головних причин появи геометричних дефектів, які у подальшому обумовлюють дефекти структурні.*

*Виконані механічні випробування готових виробів, включаючи вакуумно-дегазаційні дослідження. Установлено, що руйнування зразків в цілому відповідає класичним уявленням про руйнування квазікрихкого тіла, коли мова йде про явища, що відбуваються в площині шарів матеріалу. Таким чином, будь-яка форма, надрукована принтером, є ортотропним виробом, поведінка якого задовільно описується теорією Гріффітса. У той же час міцнісні характеристики, а також пружнопластичні властивості виробу мають значні осьові (ортотропні) відмінності.*

*Також показано, що забезпечення функціональних властивостей виробу здійснюється комплексом динамічно-рухомого та термобаричного впливу на розплав матеріалу в засопловом просторі, завдяки чому формуються площинки адгезії та порожнистість готового виробу.*

*Сформульовані рекомендації щодо попередження браку та усунення явищ розшиарування, похибок геометричних параметрів виробу, зроблено висновок про доцільність впровадження даних процесів у виробництво.*

*Ключові слова: 3-D друк, адитивні процеси, PEEK-філамент, екструзія, вакуумне дослідження, механічне випробування.*

### 1. Вступ

Останнім часом спостерігається активний розвиток наукових досліджень, спрямованих на виготовлення різних деталей та їх прототипів засобами 3-D

друку. Використовувані адитивні технології, як правило, передбачають точкове, безперервно-лінійне або пошарове нанесення матеріалу на плоску основу, завдяки чому формування об'єкту здійснюється поетапно, шар за шаром, до повного відтворення заданої форми. Самі об'єкти виготовляють як із полімерів (що початково постачаються у вигляді філаментів або фотополімерних смол), так і з металів (порошків різної дисперсності та складу).

Зазвичай дослідники зосереджують увагу переважно на точності відтворення форми виробу, нехтуючи іншими функціональними властивостями виробу. Серед останніх для відповідальних елементів та деталей найбільш актуальними є параметри міцності, твердості, а для окремих виробів – щільності, порожнистості та газопроникненості. Тож очевидно, що зазначені функціональні властивості мають бути забезпечені відповідно до технічних вимог спеціальними прийомами друку, режимами та способом укладання екструдованого матеріалу, а також застосуванням того чи іншого використовуваного матеріалу.

Відсутність систематизованої інформації щодо умов і особливостей формування структури друкованих виробів, утворення адгезійних ділянок на площинах контакту викладуваних шарів, структурні особливості, стримує впровадження FDM-процесів та звужує межі їх застосування. У той же час нині з'являється велика кількість нових видів пластику, різних композитів, які у тому числі використовуються для формування виробів традиційними способами.

Тож дослідження, направлені на опис явищ та встановлення закономірностей формування структури і функціональних властивостей отриманого методом FDM виробу, є актуальними та такими, що дозволять розширити межі використання даного процесу. Водночас це забезпечить наукове підґрунття для удосконалення методу та для подальших оптимізаційних досліджень процесу з метою адаптації його для інженерної практики.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Наразі є багато робіт, присвячених можливостям адитивних технологій, перспективі їх використання у різних галузях, у тому числі, і у біології, хірургії, будівництві тощо. Практично усі ці процеси поєднує головний принцип формування виробів: з підготовленого матеріалу формується одиничний шар поверхні шляхом екструзії (FDM-процес), поверхневого розплаву (LS) або фотохімічного перетворення. Так, робота [1] зазначає, що FDM-процес є найбільш простим, для його реалізації використовується пластикова нитяна заготовка (філамент), яка розплавляється в екструдері та далі механічно екструдується на поверхню основи. Але залишилися невирішеними питання пов'язані з подоланням існуючих обмежень щодо матеріалів. У роботах [2, 3] представлені результати досліджень багатьох сучасних 3-D принтерів як професійного, так і побутового використання, які відрізняються, перш за все, компонуванням та сервісними функціями. Проте, авторам не вдалося узагальнити закономірності щодо типу машин і обладнання для 3-D друку та відповідних матеріалів, які варто використовувати в кожному типі машин.

Принтери, що формують шар шляхом лазерного спікання, показані у роботі [4], але вони мають невелику робочу зону, значну вартість, оскільки, викори-

стовують спеціальні оптичні системи, лазерну головку, вартісні фотополімерні смоли. Усе це накладає обмеження щодо використання LS-процесу для виготовлення високоточних моделей, зокрема, у аерокосмічній галузі. Розміри робочих столів становлять від 60×60 мм до 200×200 мм, однак висока вартість та недостатність номенклатури фотополімерних смол не дозволяють активно залучати такі принтери для розв'язку виробничих задач.

Принтери лазерного спікання є промисловим устаткуванням, як показано у [4, 5], що викликає об'єктивні складнощі, пов'язані з потребами у спеціальних приміщеннях, комунікаціях, відповідного електричного живлення тощо. Для спікання використовуються порошки різних металів; отримувана якість порівняна із якістю шарів після напівчистої механічної обробки, точність відтворення моделі – не гірша за IT9...10, роздільна здатність – до 0,05 мм.

Варіантом подолання відповідних складнощів може бути саме FDM-процес, зважаючи на те, що сучасне виробництво все більше орієнтується на використання пластичних мас, на що звернено увагу у роботі [6]. При цьому автори розглядають виключно ABS-пластик, не враховуючи нові матеріали, що володіли б кращими фізико-механічними властивостями, стійкістю до агресивних середовищ, витривалістю до циклічних та знакозмінних навантажень тощо. Частково цей недолік виправляє робота [7], в якій автори аналізують показники міцності матеріалів для друку у початковому стані (у вигляді філаменту) та після екструзії. При цьому у роботі [8] автори висвітлюють результати досліджень армованих матеріалів, зміцнених волокнами. Такі матеріали володіють більшою стійкістю до пошкодження, але поза увагою залишилися питання, пов'язані із застосуванням філаменту з полілактиду, армованого просоченим вуглецевим волокном.

Варто зазначити, що традиційно поширені компонування принтерів, використовувані друкувальні головки та полімерні матеріали орієнтовані переважно на створення моделей з точністю відтворення розмірів за IT 10–12. Водночас, друк деталей, спроможних нести певні технологічні навантаження, ускладнений. Такий стан справ обумовлює доцільність дослідження щодо пошуку нових прийомів ведення друку на основі аналізу явищ, що відбувається як в екструдері, так і в момент викладання розплаву на робочу поверхню.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є забезпечення функціональних властивостей елементів та виробів, отримуваних FDM-процесами на основі встановлення обумовленості вихідних параметрів умовами та режимами друку. Це дозволить встановити раціональні прийоми та методи відтворення відповідальних виробів на принтерах традиційного кмпонування.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

– на основі типової конструкції силового елемента виконати аналіз умов викладки полімерного композиту та встановити обумовленість вихідних параметрів точності та шорсткості умовами викладки;

– розглянути процес екструзування матеріалу та встановити вплив умов екструзії на характеристики міцності готового виробу, анизотропію його властивостей;

– оцінити газопроникненість виробів, а також обумовленість цього параметру умовами друку.

#### 4. Матеріали та методи досліджень

При дослідженнях використовувалися аналітичні методи прогнозування напруженого стану елементів [9], виготовлених засобами 3-D друку. Оцінювався вплив тріщин та розшарувань, утворених при викладанні філаменту, на міцнісні характеристики виробу, здійснювалися механічні, теплові та вакуумні випробування готових виробів.

У якості об'єкту друку обрали фланець паливного баку (рис. 1, б), отриманого намотуванням вуглецевих волокон на лейнер з установленням двох таких фланців.

Фланець встановлюється у вуглецевий бак з наступним його склеюванням з намотаною зовнішньою оболонкою (рис. 1, а). Встановлення у бак відбувається до моменту намотування (укладки препрега), перед просочуванням та полімеризацією оболонки бака в цілому.

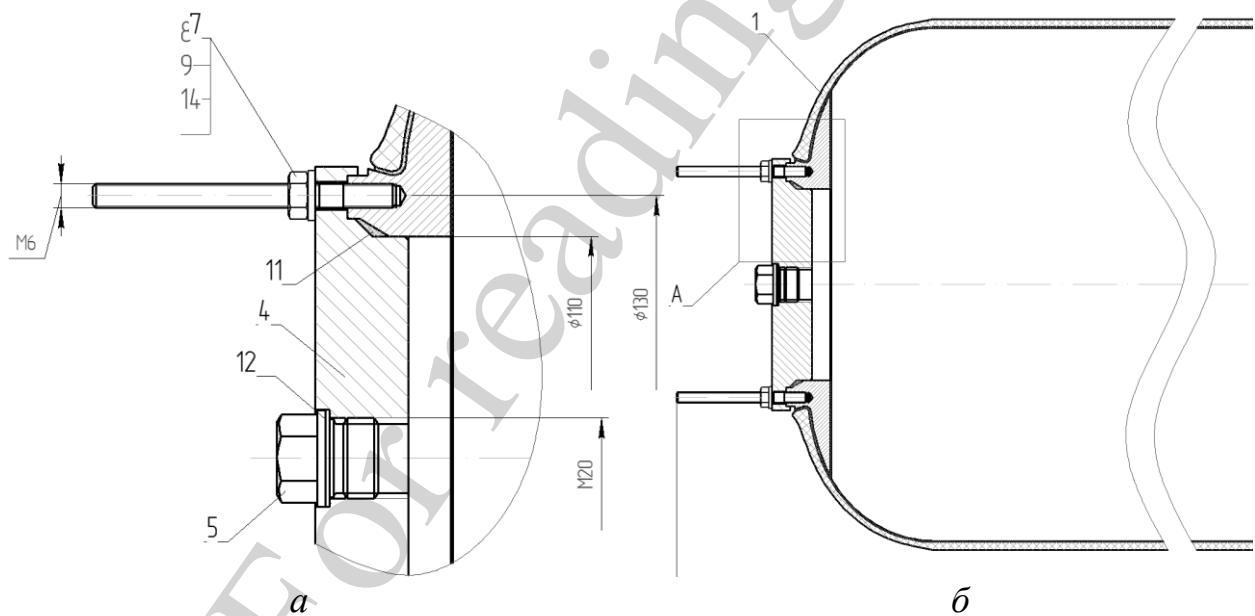


Рис. 1. Готовий виріб: а – фланець із кришкою, встановлений у виріб; б – паливний бак

Застосовували принтери типу «Дельта», з розмірами робочої зони 290×290×260 мм та портального типу з розмірами робочої зони 200×200×150 мм. Перші принтери було оснащено Боуден-головкою, тобто із засобами подачі філаменту окремо від нагрівальної частини екструдеру, і на цьому принтері виконували друкування PLA-Carbon пластиком (температура екструзії 260–265 °С). Другий принтер (рис. 2, а) було оснащено високотемператур-

ною головкою із рідинним охолодженням для роботи із РЕЕК пластиком (температура плавлення 420–430 °С).

Головку було виготовлено самостійно (рис. 2, б), а керування процесом екструзії здійснювалося шляхом залучення додаткових каналів керуючого пристрою RUMBA.

Філаменти з полілактиду, армованого посіченим вуглецевим волокном (PLA-Carbon) мали заявлену межу міцності на розтягування 55 МПа, РЕЕК-Carbon матеріали – 110 МПа.

Властивості матеріалів подано в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Властивості PLA-carbon матеріалу

Показники	ASTM	Умови випробування	Одиниці виміру	Типові значення
Механічні				
Міцність на розрив	D638	50 мм/хв	МПа	56
Подовження	D638	50 мм/хв	%	9
Сила гнучкості	D790	2 мм/хв	МПа	89
Модуль згинання	D790	2 мм/хв	МПа	2570
Сила удару, IZOD	D256	3,2 мм; 23 °С	kJ/m <sup>2</sup>	3,4
Теплові				
Температура вигину під навантаженням	D648	0,45 МПа; 6,4 мм	°С	130–140
Інші				
Швидкість потоку розплаву	D1238	190 °С; 2,16 кг	g/10min	5
Питома вага	D792	23 °С	г/см <sup>3</sup>	1,282
Усадка	D955	23 °С	%	0,5

Таблиця 2

Властивості РАЕК-пластиків

Показники	ТЕСАРЕЕК (РЕЕК)	ТЕСАРЕЕК НТ (РЕК)	ТЕСАРЕЕК ST (РЕКЕКК)
$T_g$	150 °С	160 °С	165 °С
Щільність	1,31 г/см <sup>3</sup>	1,31 г/см <sup>3</sup>	1,32 г/см <sup>3</sup>
Модуль еластичності	4,200 МПа	4,600 МПа	4,600 МПа
Робоча температура, пост.	260 °С	260 °С	260 °С
Робоча температура, крат.	300 °С	300 °С	300 °С
Мінімальна робоча температура (виключення при $t$ до –100 °С, підвищення крихкості)	–40 °С	–40 °С	–40 °С

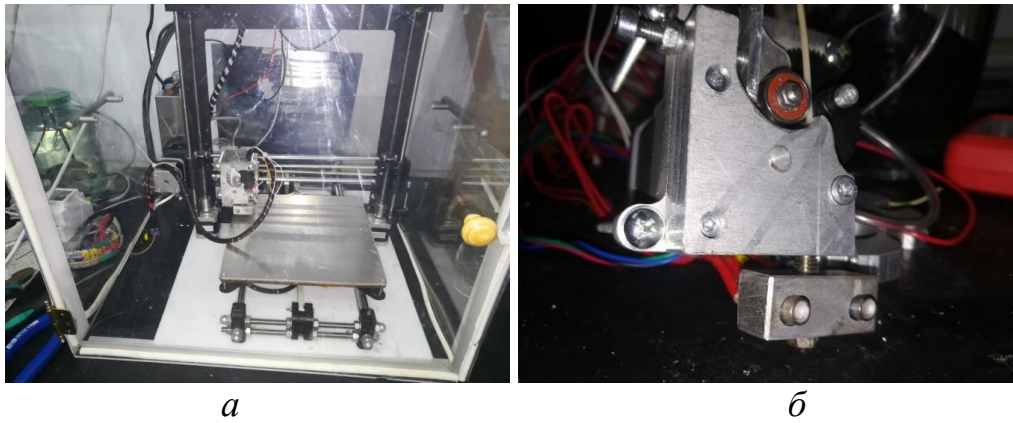


Рис. 2. Використовуване обладнання: *а* – 3-D принтер; *б* – високотемпературна робоча головка

Оскільки серед властивостей виробу найбільш важливими є міцність, геометрична точність та газопроникненість, головну увагу при дослідженнях було зосереджено саме на цих характеристиках.

Перед роботою матеріал піддавали механічним випробуванням, мікроелектронному дослідженню та зважуванню з метою визначення його щільності (за умови відсутності вологи). Мікроелектронна фотографія ( $\times 300$ ) подана на рис. 3, що дозволило підтвердити характеристики, заявлені виробником.

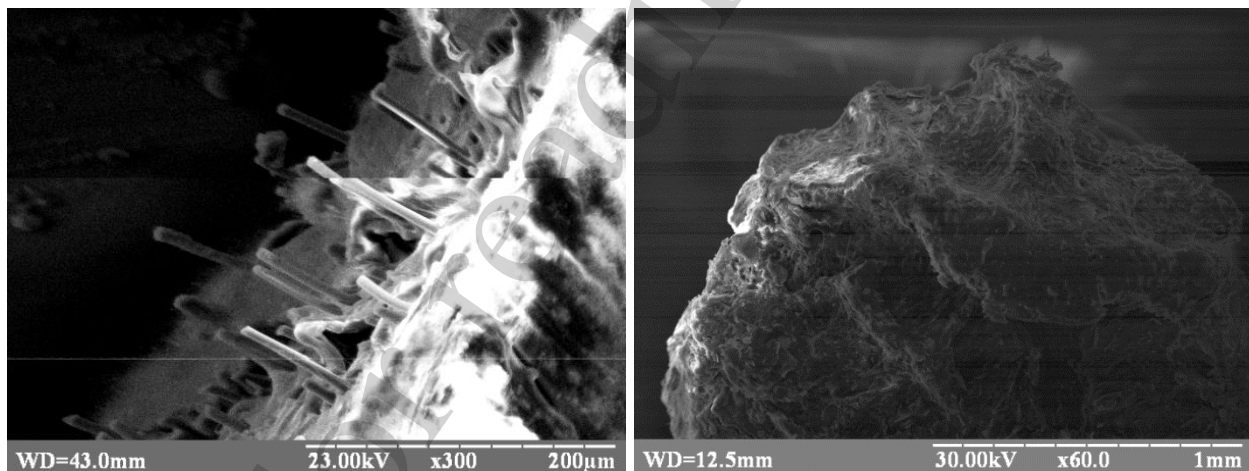


Рис. 3. Мікроелектронне зображення торця філаменту PLA-Carbon та PEEK пластику

Також філамент перевіряли на наявність дефектів у вигляді утворень більшого або меншого (від 1,75 мм) діаметра.

Для випробування на герметичність виконували друк круглих заготовок діаметром  $80,0 \pm 0,25$  мм та товщиною 4,8 мм та фланця відповідно до креслення замовника. Щільність заповнення складала 90 % серцевини та 100 % укладеної нитки на площинах товщиною 2,8 мм. Надрукований виріб перевіряли у вакуумній камері зі зміною температури дослідження та у робочих умовах. Для цього кришку закріплювали на штатне місце, а центральний отвір глушили пробкою.

Після монтажу отримували конструкцію, яку встановлювали на стенд для визначення герметичності.

Для більш точної кількісної оцінки рівня герметичності виробів необхідні більш точні вакуумні дослідження із відповідним метрологічним забезпеченням.

Методологія проведення випробувань була такою. Для кількісного визначення герметичності готового виробу виходили з того, що потік течі  $B$  характеризується кількістю газу, що проникає через течі в одиницю часу. Течі утворюються внаслідок порушення щільності викладання шарів, а також внаслідок деформування виробу під час робочих навантажень. Залежність набуває вигляду добутку об'єму  $V$ , займаного газом, на швидкість зміни тиску  $\Delta P/\Delta t$  після припинення відкачки:

$$B = \frac{V \Delta P}{\Delta t}. \quad (1)$$

Стандартними умовами для визначення течі  $B$  [Па·м<sup>3</sup>/с] є: перепад тисків між внутрішньою і зовнішньою стороною виробу  $\Delta P=105$  Па, пробний газ – повітря (у дослідженнях був використаний чистий азот), температура – 298 К.

Співвідношення між величиною потоку течі  $B$  в стандартних умовах і потоком  $Q$  в довільних умовах у в'язкісному режимі течії газу виражається з рівняння Пуазейля і має вигляд:

$$B = Q \frac{\eta_{\Gamma} P_{\text{атм}}^2}{\eta_n P_2^2 - P_1^2}, \quad (2)$$

де  $\eta_n$  – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря,  $\eta_{\Gamma}$  – коефіцієнт динамічної в'язкості пробного газу,  $P_2$  і  $P_1$  – парціальний тиск пробного газу з зовнішньої і внутрішньої сторони об'єкта,  $P_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск.

Для молекулярного режиму течії співвідношення визначається відношенням молекулярних мас газів і набуває вигляду:

$$B = Q \frac{M_{\Gamma} P_{\text{атм}}}{M_n P_2 - P_1}, \quad (3)$$

де  $M_n$  – молекулярна маса повітря,  $M_{\Gamma}$  – молекулярна маса пробного газу.

Для вибору характеру витікання газу використовуються наступні загальні положення: для течі потоком менш  $10^{-8}$  Па·м<sup>3</sup>/с має місце молекулярний режим течії, більш  $10^{-5}$  Па·м<sup>3</sup>/с – в'язкісний. У проміжній області – комбінований режим. Розрахунки в ньому виробляються по обом співвідношенням з подальшим вибором переважаючого потоку течі.

При вакуумному випробуванні виробу, встановленого у бак, час зміни тиску  $\Delta t$ , що відкачали в пристрої можна обчислити за формулою:

$$\Delta t = 2,3 \frac{V}{S} \ln \left( \frac{P_{\text{поч}}}{P_{\text{доп}}} \right), \quad (4)$$

де  $V$  – об'єм відкачуваного об'єкта ( $\text{м}^3$ ),  $S$  – ефективна швидкість відкачки ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $P_{\text{поч}}$  – початковий тиск газу в виробі (Па);  $P_{\text{доп}}$  – допустимий максимальний тиск газу в виробі (Па).

При нехтуванні потоком дегазації зі стінок та прийнятті до уваги припущення про абсолютну герметичність мотної зовнішньої оболонки, потік газу через відкриті частини фланця визначатиметься порожнистістю матеріалу та утвореними наскрізними течами. Розрахунок проводиться по робочому газу, що заповнює герметизований виріб при експлуатації або зберіганні. Тоді максимальний допустимий потік течі  $Q$  по робочому газу для пристрою буде визначатися співвідношенням:

$$Q = 2,3 P_{\text{поч}} \frac{V}{S} \ln \left( \frac{P_{\text{поч}}}{P_{\text{доп}}} \right). \quad (5)$$

Для дослідження герметичності зразків круглої форми використовували універсальний вакуумний пост ВУП-5, встановивши спеціальне технологічне оснащення у контрольне вікно. Параметр течі  $B$  оцінювали за зміною тиску у вакуумній камері, вважаючи зовнішній тиск постійним і таким, що дорівнює  $0,113$  МПа. Тоді залишковий тиск  $P_{\text{поч}}=10^{-3}$  Па.

## 5. Результати досліджень процесу 3-D друку

### 5.1. Аналіз способів викладки полімерного композиту

Процес пошарового викладання філаменту, незалежно від використовуваного пластику, полягає у тому, що розплав екструдуюється з сопла та вкладається на поверхню, формуючи шар із застиглого матеріалу. При цьому обсяг видавлювання, обумовлений швидкістю екструзії, відстань до поверхні викладки обумовлюють форму укладеної частини розплаву, а також силу притискання до поверхні [10, 11].

Оскільки друк іде від базової площини поверхні, а сам процес є багатофакторним і багатостадійним, вплив на міцність, як було показано в [3, 10], мають:

- тип матеріалу (межа міцності, відносне подовження);
- температура екструзії  $T_e$ ;
- температура столу  $T_o$  (опосередковано визначає також і внутрішні напруження  $\sigma_c$  і  $\tau$ );
- коефіцієнт екструзії  $k_e$ ;
- щільність заповнення  $k$ ,  $k=1,0-0,99$ ;
- діаметр екструдера  $d_e$  і товщина шару  $t_s$ ,  $t_s \sim 0,2-0,3d_e$ .

Останнє визначає і досягнути шорсткість  $Ra$  ( $Rz$ ). Для одиничних горизонтальних шарів  $Ra \sim 6,3-12,5$  мкм. Для вертикальних поверхонь  $Rz$   $80-40$  мкм (можливо і вища, до  $6,3$  мкм). Для криволінійних  $Rz$   $80$  мкм. Точність виконан-



ня розмірів відповідає квалітету  $\pm \frac{IT9}{2}$  (при відповідному налагодженні), однак більш традиційним є квалітет  $\pm \frac{IT11}{2}$ . Температурні деформації для різних матеріалів різні, для PLA і ABS  $\sim 1,5\text{--}1,25\%$ , PEEK-Carbon  $\sim 0,6\text{--}0,8\%$ . Компенсуються деформації відповідним коригуванням. Для характеристик міцності важливим моментом є укладання шарів. Необхідно, щоб були синхронізовані між собою коефіцієнт екструзії  $k_e$ , заповнення  $k$  і товщина шару  $t_s$ . Похибка призводить або до розшарування, або до падіння адгезії.

Температура і її стабільність  $T_{\text{ABS, PLA}} \sim 30\text{--}245\text{ }^\circ\text{C}$ .  $T_{\text{PEEK}} \sim 410\text{--}420\text{ }^\circ\text{C}$  (початок екструзії при  $T \sim 370\text{--}380\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Оскільки до готового виробу висувалися вимоги щодо міцності, а також герметичності в цілому, друкування виконували із 100 % заповненням шарів поверхонь та 90 % заповненням серцевини. Цим самим досягали певної економії ваги при збереженні механічних характеристик та щільності поверхні.

Важливим моментом є укладання шарів матеріалу, яке може бути лінійним або концентричним (рис. 4). Оскільки об'єкт у вигляді фланця, прийнято рішення про роботу із лінійним викладанням шарів.

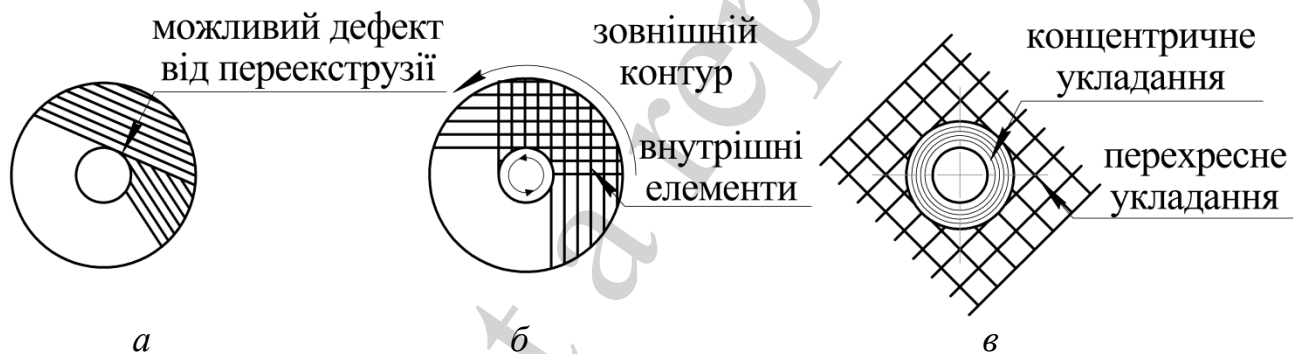


Рис. 4. Схема укладання шарів на базову площину

Укладання шарів відбувалося за класичною схемою – ортотропно екструдованими нитками, із пошаровим нарощуванням товщини за координатою  $z$ . При обході контуру укладання нитки відбувалося по дотичній до згинаючої контуру на величину  $\delta=2,0\text{ мм}$ .

Виникаючі на місцях закладки напруження призводять до появи на концентраторах умов для активного тріщиноутворення.

## 5. 2. Прогнозування міцності виробу та умов втрати працеспроможності

При розрахунку конструкцій за межею текучості  $\sigma_T$ , або межі міцності  $\sigma_{\text{mm}}$  припускають застосування матеріалу з підвищеною міцністю при одноосьовому навантаженні. Однак практика показує, що навіть використання нових високоміцних матеріалів не виключає виходу з ладу конструкції внаслідок її швидкого макрокрихкого руйнування. Крихке руйнування твердого тіла відбувається при

порівняно малих пластичних деформаціях, тому питома робота, що здійснюється при пластичному плинні матеріалу, близька до нуля:

$$W_p = \int_0^{\varepsilon_{ij}^{(p)}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^{(p)} \approx 0. \quad (6)$$

Таке руйнування характеризується нестабільним поширенням тріщини в тілі матеріалу, тобто, якщо тріщина почала зростати, то система напружень сприяє її прискореному зростанню. Саме цей момент викликає дискусію, оскільки використовувані для друку матеріали не можна вважати квазікрихкими. Наявність у тілі матеріалу значної кількості початкових дефектів у вигляді порожнин між укладеними нитками стимулює розміцнення матеріалу, водночас передусь активному зростанню тріщин і переходу їх у магістральні.

Крихке руйнування розглядають з позицій механізму накопичення пошкоджень й поширення тріщин в результаті перетворення накопиченої пружної енергії тіла, що деформується. Процес руйнування складається з двох послідовних стадій: зародження та зростання тріщини. Вочевидь, механізм крихкого (квазікрихкого) руйнування може бути застосований для опису явищ руйнування надрукованих тіл.

Відомо, що напруження у вершині тріщини в залежності від пластичних властивостей середовища можуть бути рівні межі текучості  $\sigma_T$ , якщо середовище пластичне, або оцінюється величиною  $K_\sigma \sigma$ , якщо середовище крихке (квазікрихке). Тут  $\sigma$  – середнє напруження, прикладене на відстані від тріщини;  $K_\sigma \geq 1$  – ефективний коефіцієнт концентрації напружень.

Початок руйнування конструкцій зумовлений високими локальними напруженнями і деформаціями у місцях концентрації напружень. Необхідні розрахункові залежності для кількісного опису напружено-деформованого стану навколо різних розрізів отримані для статичних та квазістатичних завдань лінійної теорії пружності у разі малих деформацій.

Оскільки при друкуванні шари укладаються один до одного із можливим невеликим проміжком між двома сусідніми нитками, порожнина виникнення або поширення тріщини може умовно бути обраною у вигляді еліпсу. З [12] відомо, що максимальні напруження у вершинах еліптичного вирізу визначаються за формулою:

$$\sigma_y = \sigma \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{l}{R}} \right), \quad (7)$$

де  $R$  – радіус кривизни у вершині головної осі еліптичної тріщини (рис. 7).

Якщо дефекти мають форму гострої тріщини, то  $R \rightarrow 0$  і  $\sqrt{2l/R} \gg 1$ , тоді:

$$\sigma_y = 2\sigma\sqrt{\frac{l}{R}}. \quad (8)$$

Для кристалічних матеріалів максимальне напруження у вершині гострої тріщини становитиме:

$$\sigma_{\max} = \sigma_y = 2\sigma\sqrt{\frac{l}{R}}, \quad (9)$$

що дозволяє коефіцієнт концентрації напружень визначити так:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = 2\sqrt{\frac{l}{R}}. \quad (10)$$

Для матеріалів, що схильні до напружень під час друку, умовно можна прийняти  $R=a_0$ , де  $a_0$  – міжатомна відстань, і  $\sigma_y=\sigma_{\max}$ , однак для полімеру руйнівне напруження у вигляді  $\sigma = \sigma_f = \sqrt{\frac{E\gamma}{4l}}$ , потребує уточнення значення коефіцієнту  $\gamma$ .

Наявність тріщини в тілі істотно змінює його напружено-деформований стан і ускладнює математичний опис. Те саме стосується і заготовки, надрукованої шляхом викладання волокна. Однак, оскільки за [13] тріщини прийнято імітувати ідеальними нескінченно тонкими розрізами, зведемо задачу прогнозування поширення тріщин у тілі до задачі у класичній постановці.

Найбільш проблемним з точки зору міцності є випадок розшарування друкованою виробу (рис. 5, а, б). У випадку плоскої деформації компоненти напружень і деформацій поблизу тріщини [14, 15] визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right); \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2};$$

$$\sigma_z = V(\sigma_x + \sigma_y);$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0;$$

$$u_x = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - 2V + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right);$$

$$u_y = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 1 - 2V - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right);$$

$$u_z = 0,$$

де  $K_I$  – коефіцієнт інтенсивності напружень;

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{2\pi l}} \int_{-l}^l \sigma(\xi) \sqrt{\frac{l+\xi}{l-\xi}} d\xi. \quad (12)$$

В механіці руйнування коефіцієнти інтенсивності напружень є одним з найбільш важливих параметрів, що характеризують розподіл напружень біля тріщин в пружних тілах. Вони лежать в основі застосування принципів лінійної механіки руйнування при розрахунках на міцність й довговічність елементів конструкцій [16, 17].

В формулах (12) при  $y=0, x>0$ :

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi l}}, \quad \tau_{xy} = 0;$$

при  $y=0, x<0$ :

$$u_y = \frac{K_I}{G} (2 - 2V) \sqrt{\frac{r}{2\pi}}; \quad u_x = 0.$$

Плоско-напружений стан визначається так:

$$\sigma_z = 0; \quad u_z = \frac{V}{E} \int (\sigma_x + \sigma_y) dz. \quad (13)$$

за умови що  $V = \frac{\nu}{1+\nu}$ .

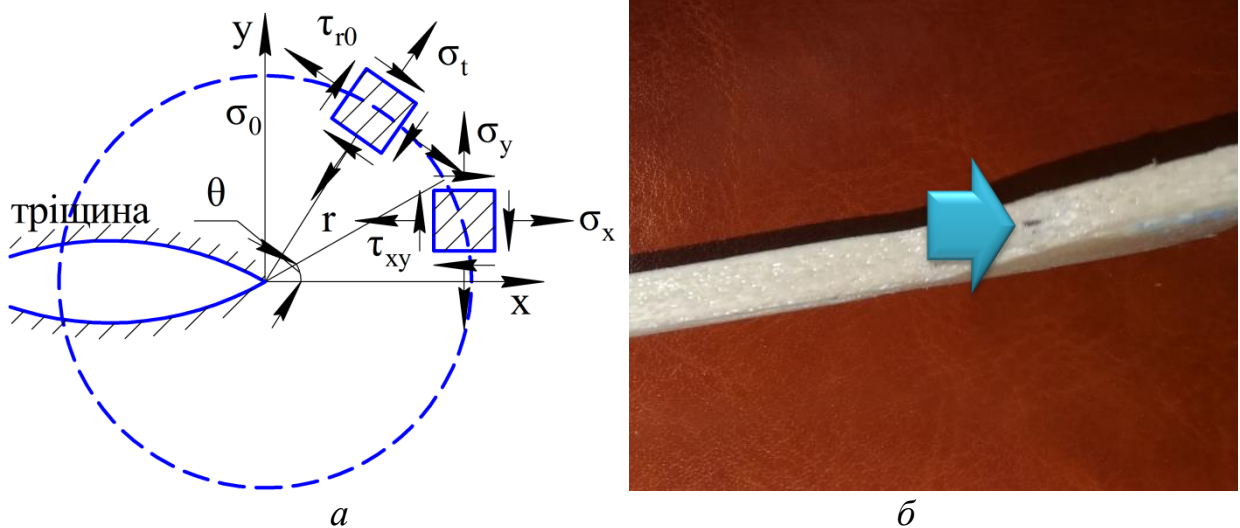


Рис. 5. Розшарування друкованого виробу: *a* – компоненти напружень і деформацій при плоскій деформації; *б* – фото зразка із дефектом у вигляді розшарування

При досить малих  $r > 0$  ці залежності можуть служити для оцінки параметрів напружено-деформованого стану навколо берегів тріщини.

Проаналізуємо коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$ . Нехай для тріщини нормального відриву  $\theta = 0$ . Тоді  $\sigma_y \rightarrow \infty$  у відповідності до (7) при  $r \rightarrow 0$ . Таке поведіння функцій називається особливістю, а коефіцієнт  $K_I$  – коефіцієнтом при особливості. Отже, у всіх відношеннях (12), напруження мають особливість  $1/\sqrt{r}$ , а переміщення  $\sqrt{r}$ , тобто  $K_I, K_{II}, K_{III}$  це коефіцієнти при особливостях.

Критерії оцінки граничного стану тріщин основані на моделі ідеального крихкого тіла. Місцеве руйнування у вершині тріщини може перейти у мимовільне при виконанні певної умови із енергетичних міркувань (за Гріффітсом). Крихке руйнування для мимовільного розповсюдження поодинокі тріщини в лінійно пружному тілі відбудеться, коли при малому подовженні тріщини виділятиметься більше пружної енергії, ніж потрібно для питомої енергії утворення нових поверхонь тріщини.

Якщо еліптичний виріз у пружній площині, яка рівномірно розтягується на нескінченності напруженням  $\sigma$ , замінити нескінченно тонким розрізом довжиною  $2l$ , робота напружень  $\sigma$  на переміщеннях  $u_y$  при розкритті тріщини і при переміщенні її берегів становить:

$$\begin{aligned}
 A &= 2B \left( -\frac{1}{2} \sigma \int_{-l}^l u_y dx \right) = 2B \left( -\frac{1}{2} \sigma \int_{-l}^l 2\sigma \frac{\sqrt{l^2 - x^2}}{E} dx \right) = \\
 &= -\frac{2B\sigma^2}{E} \cdot \frac{1}{2} \left[ x\sqrt{l^2 - x^2} + l^2 \arcsin \frac{x}{l} \right]_{-l}^l = \frac{\pi l^2 \sigma^2}{E} B,
 \end{aligned} \tag{14}$$

де  $B$  – ширина пластини.

Величина  $A$  являє собою роботу розкриття тріщини. Зміна повної пружної енергії  $\Delta u_e$  для плоского напруженого стану:

$$\Delta u_e = -\frac{\pi l^2 \sigma^2}{E} B, \quad (15)$$

а для плоскої деформації:

$$\Delta u_e = -(1 - V^2) \frac{\pi l^2 \sigma^2}{E} B. \quad (16)$$

Тоді критерій Гріффітса для плоского напруженого стану має вигляд  $\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l}}$  та для плоскої деформації:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l(1 - V^2)}}. \quad (17)$$

Співвідношення (17) представляє собою вираз для руйнівного навантаження в залежності від початкової довжини тріщини та являє собою досягненням теорії Гріффітса. Згідно (11) процес відбувається таким чином: із збільшенням навантаження  $\sigma$ , початкова довжина тріщини не змінюється до тих пір, поки  $\sigma$  не досягає граничного значення  $\sigma_c$ .

Тож відповідно до викладеного стає зрозумілим, що зниження міцності надрукованого виробу обумовлюватиметься не тільки зменшенням контакту адгезії, а і проявами явищ тріщиноутворення при досягненні певних критичних напружень. Ці напруження тим більші, чим менша площа контакту між шарами.

Місця виникнення тріщин. Розглядаючи виріб у вигляді фланця (рис. 1, а), зазначимо, що останній має також і інтегровані елементи у вигляді заформованих гайок або болтів (рис. 6). Таке заформування можливе, оскільки друкувальна головка може сформувати порожнину для кріпильного елемента, який в певний момент часу буде інтегрований у виріб. Однак задача виникнення напружень і критичних деформацій значно ускладнюється.

Проведено твердотільне моделювання фланця для отримання макету засобами 3-D друку та визначення напружено-деформованого стану виробу під дією навантажень. Змодельовано сили зосереджені на шпильки з боку кришки та дії тиску на внутрішню поверхню пера фланця та ділянки із за формуванням гайок. Навантаження у вигляді тиску 0,75 МПа також прикладене до горловини фланцю, що імітує дію тиску з внутрішньої порожнини. Створена твердотільна модель та схема силового навантаження подані на рис. 7, а, б. Розрахунки виконувалися у програмному середовищі Solid Works.

Під дією тиску виріб знаходиться в об'ємному напруженому стані, а відповідні діаграми виниклих напружень та переміщень в елементах фланця подані

на рис. 8. Стає очевидним, що максимальні переміщення при нерухомій верхній площині очікуються на нижньому торці; при цьому місця закладки гайок за прогнозами можуть зрушити зі свого положення, що викликатиме можливу розгерметизацію баку. При цьому зміна умов навантаження істотно впливає на виникаючі напруження і деформації.

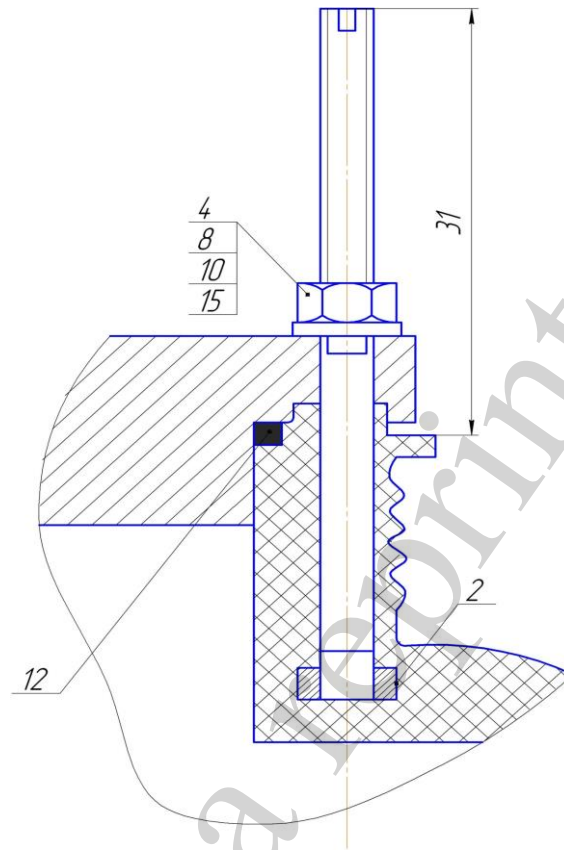


Рис. 6. Фрагмент конструкції фланця із закладним елементом у вигляді гайок

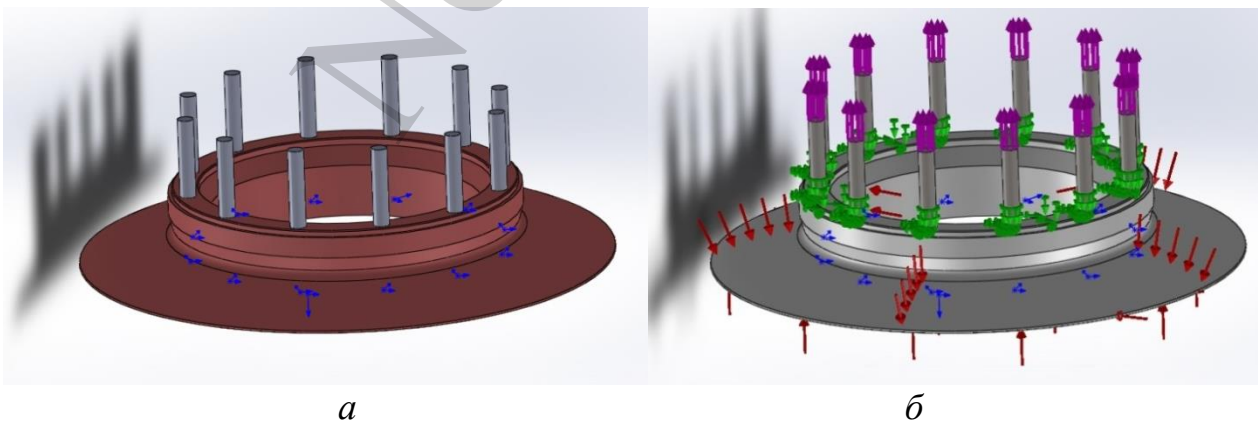


Рис. 7. Твердотільне моделювання: *а* – створена твердотільна модель фланця із закладними елементами; *б* – прикладене силове навантаження на основу фланця і на елементи кріплення кришки

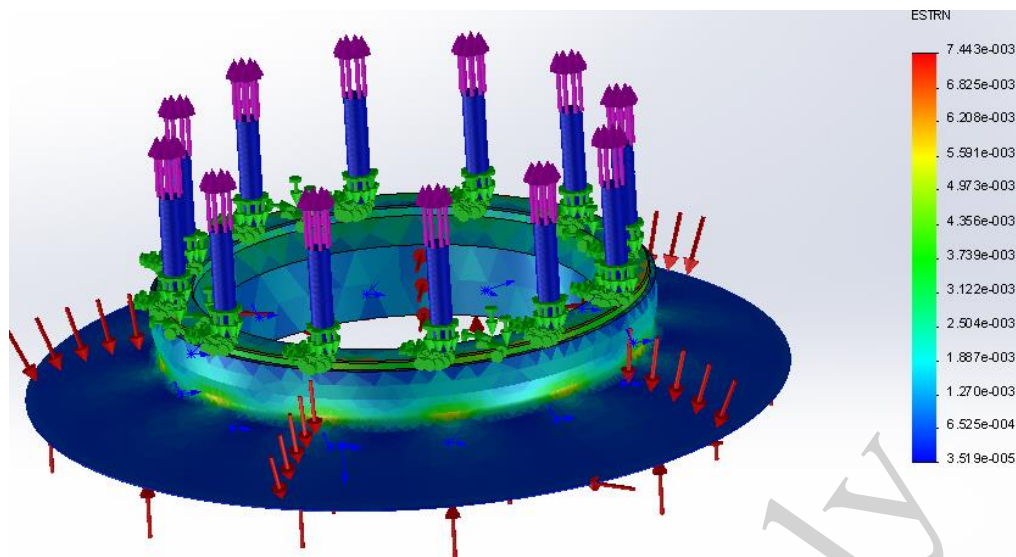


Рис. 8. Зони максимальних деформувань, що виникають в місцях закладних елементів, а також ділянки зародження радіальних тріщин

Таким чином, на основі аналітичного аналізу можна зазначити, що надруковані вироби будуть володіти певною анізотропією властивостей, обумовленою відмінністю межі міцності матеріалу  $\sigma_b$  після викладання на основу та міцністю адгезійного зчеплення  $\sigma_a$ . Міцність адгезійного зчеплення залежить від щільності укладання пластику (як правило 100 % заповнення використовується рідко і спряжене із складнощами точного дозування матеріалу).

Моделювання поведінки виробу довело, що істотну роль відіграватимуть умови розташування закладних елементів, а навантаження внутрішнім тиском викликатиме появу на пері фланця радіальних ділянок розвитку тріщин та руйнування виробу.

Циклічні та знакозмінні навантаження виробів потребують уточнення впливу нещільності матеріалу на розкриття тріщин, а температурні поля – на залишкові термічні напруження, що виникають між шарами.

## 6. Практична реалізація FDM-процесу виготовлення відповідальних деталей

Після кількох невдалих спроб виконати формування простих об'єктів (у вигляді пластини-зразка для випробування на вигин та кругу для випробування на міжшаровий розрив) здійснено доопрацювання обладнання:

- виконаний захисний екран, спроможний стабілізувати температуру на робочому столі, а також попереджаючий потрапляння хімічних летких сполук та випаровувань у робоче приміщення;
- встановлено додатковий драйвер для нагрівання столу (із окремим блоком живлення), який забезпечував нагрівання столу в межах 110–120 °С;
- встановлено окремий драйвер для нагрівання хотенду (застосовано два нагрівачі загальною потужністю 250 Вт) до робочої температури 420–435 °С.

Об'єкт для формування – лопатка композиційна для механічних випробувань відповідно до ДСТУ. Товщина лопатки – 5,0<sub>-0,21</sub> мм. Відпрацювання про-



грами виконували після досягнення температури столу 112 °С, температури в екструдері – 420–435 °С.

Установлено закономірність виникнення дефектів при друкуванні РЕЕК матеріалом внаслідок відшарування від опорної платформи.

Показано, що РЕЕК-пластик може задовільно видруковуватися виключно після ретельного видалення вологи з поверхні мононитки, наприклад, у сушильних шафах протягом 10–12 годин і відносної вологості в приміщенні не більшої за 45 %.

Робоча зона має бути абсолютно закритою. Навіть незначний рух повітря викликає збурення при друкуванні, що виявляється у певних деформуваннях елементів поверхні.

Проблема початкового фіксування моделі при виготовленні була і залишається однією із найбільш актуальних [2]. Зазвичай навіть неповне відшарування початкових укладок моделі призводить до похибок форми, і, як правило, завершується вибраковкою деталі. Саме тому вибір засобів початкової фіксації об'єктів є основою для надійного відтворення, особливо деталей, що вимагають значного часу для прототипування.

Стабільність електропостачання та відсутність мережевих перешкод і збурень також безпосередньо впливають на якість і надійність друку. Установлено, що досить часто саме збурення мережі, а також різкий перепад напруги може викликати певні порушення ходу процесу друку і призвести до пропуску кроків приводних двигунів.

Іншим важливим висновком є твердження про неможливість простого копіювання форми виробів із металу засобами 3-D друку. Оскільки укладання матеріалу є досить складним термічним процесом, що залежить від багатьох факторів, готовий виріб може мати значні термічні залишкові напруження. Впливає на такі напруження і кількість екструдованого пластику, відхилення навіть у долю відсотка при друкуванні виробів вагою понад 50 г може призводити до значних незворотніх деформацій виробу. Як наслідок, виріб відшаровується від основи і нормальний хід технологічного процесу порушується. Відшарування веде не тільки до дефектів форми, а і до зміни умов викладання, отже, міцність починає значно знижуватися, а готовий виріб має меншу щільність.

Показано, що подібні дефекти усуваються введенням спеціальних баластних елементів, які після оброблення механічно видаляються (рис. 9). Однак усунення недоліків відшарувань не змінює напружень, які залишаються в готовому виробі після друку.

Після механічних випробувань та навантаження зразків до повного руйнування стало очевидним, що в цілому тріщини, що утворюються при руйнуванні, властиві певним умовам друкування. Перший – тріщина нормального відриву, тут відбувається розтягування площини з тріщиною (рис. 10, а); цьому типу задач відповідає розшарування матеріалу в площині адгезії. Другий – тріщина поперечного зсуву, тут відбувається розріз в полі зсуву (рис. 10, б); цьому типу задач відповідає чистий зсув шарів, у тому числі, і внаслідок термічних напружень. Третій – тріщина поздовжнього зсуву, що виникає при деформуванні пластини (рис. 10, в).

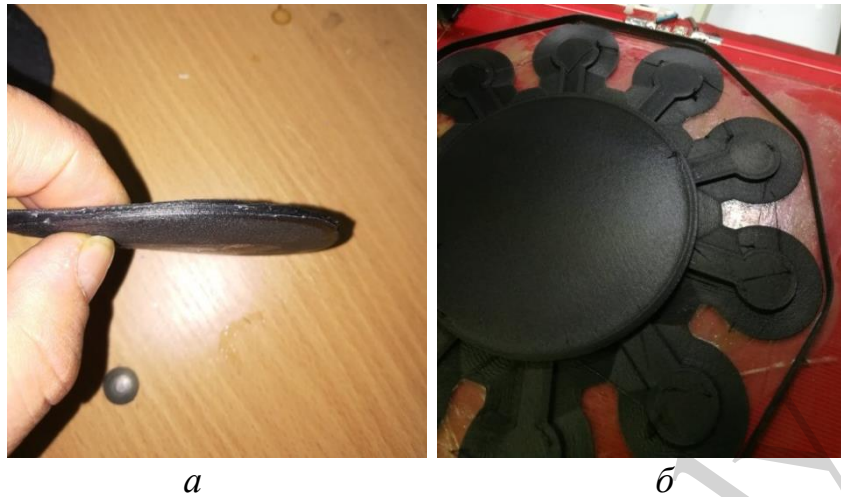


Рис. 9. Надруковані зразки: *а* – деформована пласка деталь, отримана без засобів компенсації напружень (100 % заповнення); *б* – придатна деталь із компенсуючими елементами на столі принтеру

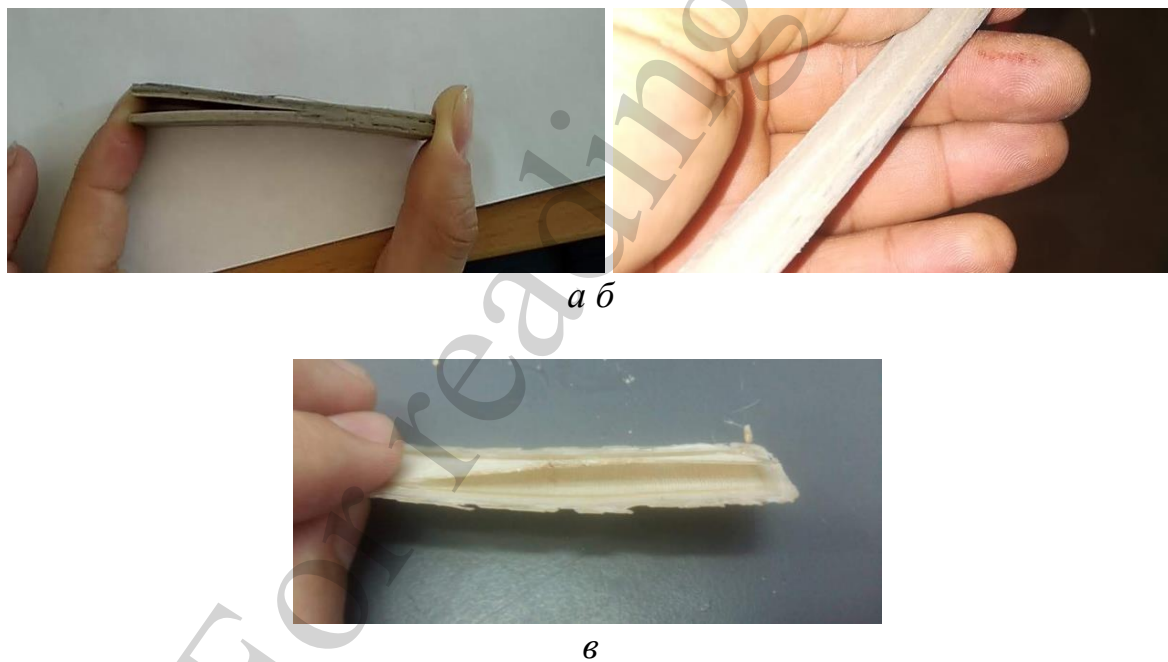


Рис. 10. Приклади зразків випробувань на руйнування під час: *а* – нормального навантаження; *б* – повздовжнього переміщення; *в* – поперечного переміщення

Тож матеріали РЕЕК, як і армований PLA, проявляють квазікрихкі властивості, і у певних умовах їх поведінку можна описувати класичною теорією механіки руйнування пружного тіла.

На основі отриманих результатів, перевірки механічних характеристик зразків перейшли до видруккування фланця.

Друккування здійснювали одночасно на двох принтерах – типу «Дельта» і типу «MaketBot». Етапність відтворення фланця та готовий фланець подано на рис. 11.



Рис. 11. Етапність відтворення фланців та отримані дослідні зразки

Після отримання задовільних результатів випробувань, було виготовлено кілька робочих зразків фланців, які згодом були піддані механічному випробуванню навантаженням робочим тиском 1,2 МПа. З чотирьох надрукованих фланців два відповідали технічним умовам, маючи практично однакову масу та механічні властивості; один із виробів мав більшу шорсткість, але відхилення заданих розмірів не перевищувало 0,7 % від заданого розміру.

Здійснено випробування фланців у вакуумній камері. Контрольований елемент – кільцева крайка  $\varnothing 135,0\text{--}138,5$  мм, з шириною пояску 9,5 мм (рис. 12). В результаті було встановлено таке. Температура випробувань відіграє істотну роль у газопроникненості виробу. Газопроникнення на кілька порядків менше при температурах 20–60 °С, і стрімко зростає при підвищенні температури понад температуру скловання пластику (у даному випадку – 120 °С).

Газопроникнення не є постійним, і збільшується із плином часу. Збільшення відбувається циклічно, і вочевидь наближається до критичних значень за певний період часу (біля 20 хв).

Для встановлення умов руйнування та визначення критичних напружень фланець встановлено у спеціальному пристрої і затиснуто кришкою з ущільнювачем, по окружності встановлено 8 датчиків переміщення (точність керованого значення до 0,01 мм). Установлено, що падіння тиску при випробуванні круглого зразка з рівня 0,5 МПа становило не більш 0,12 % за час випробувань, а на поверхні зразка пухирці повітря (робочого середовища) не з'являлися. Таким

чином, можна констатувати, що суттєвої негерметичності друковані вироби із заповненням 90 % середини та 100 % контуру не мають.

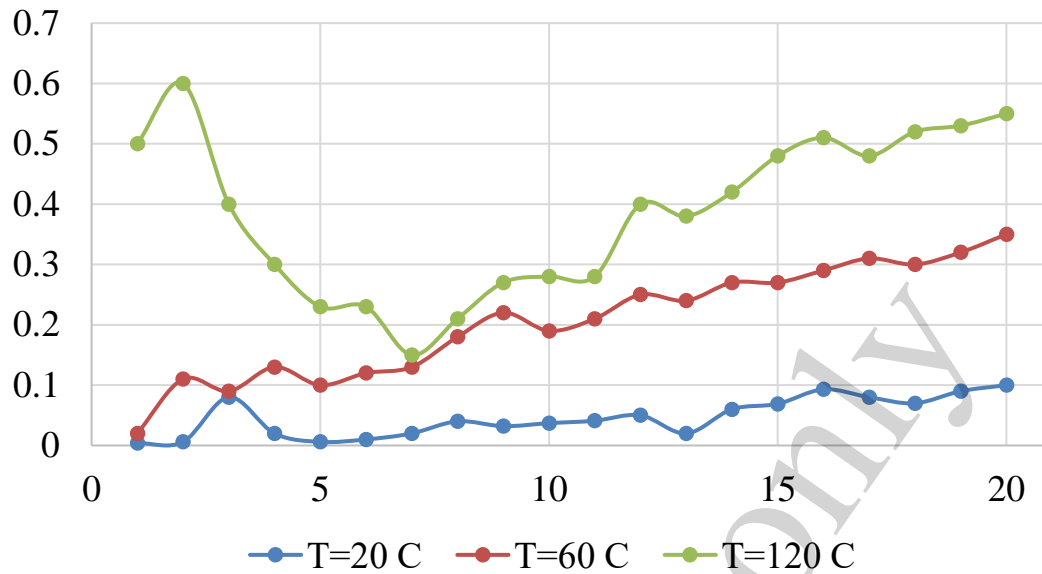


Рис. 12. Зміна рівня вакууму ( $P_{\text{поч}}$ , Па) при випробуванні зразків з моменту досягнення залишкового тиску у камері  $10^{-3}$  Па (час у хв)

Датчики були підключені мостовим контуром, що дозволило найбільш точно оцінити переміщення. Датчики розташовувались з протилежних сторін діаметра.

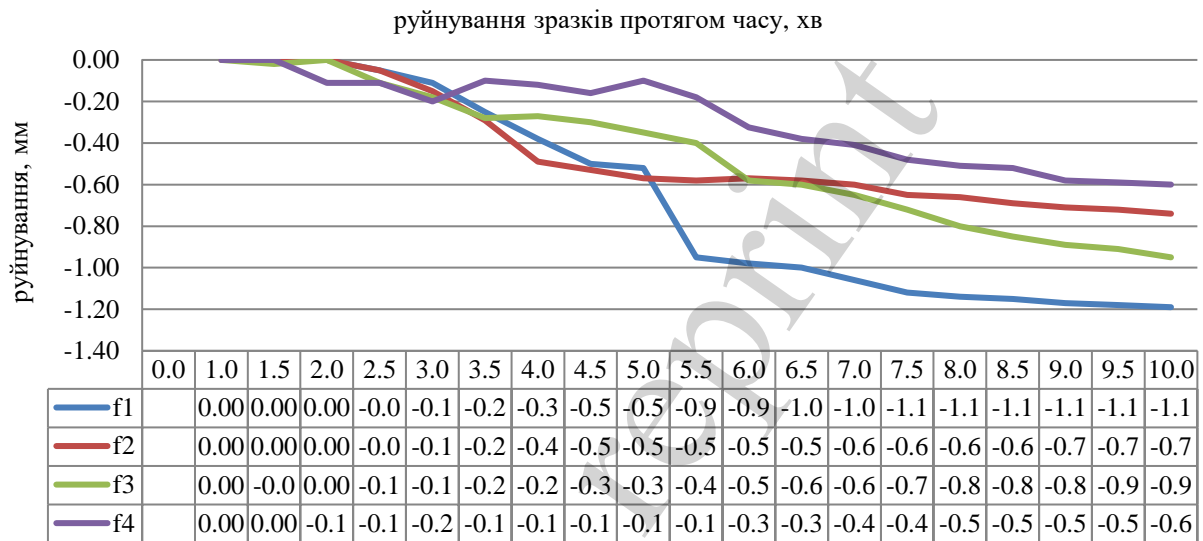
Навантаження під тиском проводилося вище критичного значення, змінюючи тиск з 0,2 МПа до 1,4 МПа. На кожному рівні тиску фланець залишали на 1 год для релаксації. Коли тиск зріс понад 1,2 МПа, цілісність виробу була втрачена і він був зруйнований (рис. 13, а). Його руйнування відбулося з послідовним виникненням тріщини та подальшим її асиметричним розкриттям. Виходячи з параметрів міцності матеріалу, руйнування має відбутися при досягненні тиску 1,8–2,0 МПа, що відповідає напруженням на критичних ділянках при нормальному навантаженні 45–55 МПа (рис. 13, б). Однак реальна картина була такою: при викладанні філаменту (рис. 4, а) руйнування зразка наступало при нормальному навантаженні 34–39 МПа, а при викладанні (рис. 4, в) – 28–30 МПа. Найбільш близьким до очікуваних показників був зразок із ортотропним викладенням (рис. 4, в) який було зруйновано під тиском 1,67–1,72 МПа (відповідно із  $\sigma=44\text{--}48$  МПа).

Відповідно, вираз (9) може задовільно описати явище втрати цілісності тільки для ортотропного викладення філаменту, особливо для матеріалу фланця РЕЕК, а тому рівняння (12), (13) можна використовувати для аналізу поведінки матеріалу.

Це міркування також підтверджує характер руйнування зразків, показаних на рис. 13, а. То ж маємо, що за певних умов навантаження руйнування досліджуваного зразка відбувається через розвиток нормальних тріщин розділення, поперечного і поздовжнього зсувів.



*a*



*б*

Рис. 13. Руйнування фланця: *a* – під час випробування; *б* – діаграма переміщення деяких елементів при випробуванні

Отже, з практичної точки зору забезпечення стабільних характеристик міжниткової адгезії є важливим параметром отримання максимальних характеристик міцності. У той же час, анізотропія властивостей дозволяє зробити припущення щодо забезпечення максимальних показників  $\sigma$  та  $\tau$  шляхом оптимізації схеми викладання філаменту.

## 7. Обговорення результатів досліджень можливості забезпечення функціональних властивостей елементів та виробів, отримуваних FDM-процесами

Процес друку відповідальних деталей є досить трудомістким і ресурсозатратним. Дане дослідження дозволило установити значну кількість обмежень та особливостей реалізації процесу, що мають безпосереднє відношення до показників якості та відтворюваності механічних характеристик виробу, а також його функціональних властивостей.

Зокрема, проблемним є прогнозування напружено-деформованого стану виробів на основі класичних теорій механіки деформованого тіла, зважаючи на

розміри зародкових тріщин (або початкових дефектів)  $l$  та встановленими за (11) напруженнями.

Навіть для випадку відсутності закладних елементів (рис. 9) виникаючі радіальні тріщини розкриваються при напруженнях  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , що становлять 0,75–0,8 [ $\sigma$ ] та 0,55–0,62 [ $\tau$ ]. Про це свідчать реальні результати випробувань (рис. 12) за час понад 2 с, а також відмінності у досягнутій міцності зразків із різними видами викладання (рис. 4). Отже, закономірності (11), (12) та (17) потребують уточнення для різних видів викладання філаменту.

Досить широкий діапазон розсіювання контрольованих ( $i$ , відповідно, розрахункових величин) може пояснюватися певними збуреннями процесу, коли повного контролю на друком досягти не вдається. Причому чим складніша деталь, тим більше втрачається контроль та тим більші початкові відхилення процесів друку відбуватимуться.

Так, зокрема, показано, що на механічні характеристики виробу впливає вологість матеріалу, а також температурні явища після екструдуювання пластику. При цьому, для РЕЕК-пластику вимоги щодо вологості є більш жорсткими, ніж для армованого PLA-пластику. Для останнього наявність вологи викликає появу зон внутрішніх дефектів у вигляді каверн. Механізм їх утворення можна пояснити накопиченням на поверхні мультимолекулярного шару води, яка нагрівається, утворює порожнину із пересиченою парою. Порожнина підтримується замкненою внаслідок дії тиску від філаменту, який подається у гарячу зону та сопла, яке формує розплавлений пластик.

У подальшому, після екструдуювання, зовнішній тиск різко падає і порожнина починає зростати, одночасно із охолодженням пластику і зниженням його в'язкості (загущенням). Якщо за час охолодження порожнина зросте понад критичний розмір, відбудеться її розрив із характерним звуком схлопування, який супроводжує процес друку. Саме тоді виникає розрив на межі адгезійного зчеплення, тобто на поверхні, яка має максимальний градієнт температури. Так формується мікророзрив, який в подальшому вже не заповнюється пластиком; наступне викладання шарів збільшує дотичні напруження і ще більше послаблює поверхню адгезії.

Очевидним висновком є те, що волога визначатиме і газопроникненість виробу, адже розкриті каверни (мікророзриви) знижують опір протіканню газу.

Стосовно результатів (рис. 12) слід зазначити, що певні циклічні зміни газопроникненості можна пояснити поступовими температурними змінами структури пластику. До такого висновку спонукає і порівняння газопроникнення при різних температурах. Так, при  $T=20$  °C газопроникненість росте повільніше, ніж при  $T=60$  °C і  $T=120$  °C.

Геометричні параметри виробу, особливо при друкуванні на високих температурах (понад 400 °C), мали істотне розсіювання. Так, встановлено, що для розмірів у 150–200 мм розсіювання може становити  $\pm 0,24$ – $0,45$  мм, що відповідає IT9–IT10 та гірше. Отже, вочевидь необхідна додаткова механічна обробка, яка, одночасно із поліпшенням якості поверхневого шару (зниженням його шорсткості) може істотно зменшити область 100 % заливки.

Таким чином, забезпечення функціональних властивостей відповідальних виробів, отриманих засобами 3-D друку із конструкційних полімерних армованих матеріалів вбачається у розробці системи прийомів і методів укладання пластику традиційними екструзійними головками. Відповідно, потрібно охоплювати питання визначення форми виробу, наявності компенсаторів та вибору відповідного пластику.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на встановлення закономірностей міцнісних характеристик від різних методів отримання, викладання шарів та використання певних домішок у філаменті. Додатково потребує вивчення можливість переходу від планарного викладання до викладання на поворотних столах, що дозволить сформувати циліндричну форму виробів надійніше.

## **8. Висновки**

1. Отримано закономірності впливу умов 3-D друку щодо досяжної шорсткості (на рівні 6,3 мкм) та точності виконання розмірів, що відповідають квалітету IT9–IT10. Визначено температурні деформації (для РЕЕК-Carbon ~ 0,6–0,8 %). Показано залежність появи дефектів у вигляді розшарування та падіння адгезії від схеми укладання екструдованого матеріалу (коефіцієнту екструзії, заповнення, товщини шару).

2. Визначено, що зниження міцності готового виробу зумовлюється не тільки зменшенням контакту адгезії, а і проявами явищ тріщиноутворення при досягненні критичних напружень від робочих навантажень. Ці напруження тим більші, чим менша площа контакту між шарами. Експериментально доведено, що руйнування надрукованого фланця з матеріалу РЕЕК відбувається при досягненні тиску 1,2 МПа, що відповідає напруженням на критичних ділянках при нормальному навантаженні 30–35 МПа. Існує обумовленість критичного навантаження способом викладання філаменту; максимальні показники забезпечуються при ортотропному викладанні.

3. Встановлено закономірності газопроникненості друківаних виробів та показано, що проникненість залежить від температури і стрімко зростає з наближенням температури до рівня скловання пластику (основи). Для PLA+Carbon ця температура становить 120 °С.

4. Зроблено висновок, що забезпечення функціональних властивостей відповідальних виробів вбачається в одночасній реалізації конструктивних доопрацювань виробу із внесенням додаткових компенсуючих елементів (що у подальшому видаляються). Також важливим чинником є ортотропне викладання філаменту з мінімізацією зовнішніх впливів на процес екструзії та охолодження.

## **Література**

1. Xu, Y., Deng, C. (2017). An investigation on 3D printing technology for power electronic converters. 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). doi: <https://doi.org/10.1109/pedg.2017.7972486>

2. Shahrubudin, N., Lee, T. C., Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286–1296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
3. Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
4. Joshi, S. C., Sheikh, A. A. (2015). 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*, 10 (4), 175–185. doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1111519>
5. Wang, Y., Blache, R., Xu, X. (2017). Selection of additive manufacturing processes. *Rapid Prototyping Journal*, 23 (2), 434–447. doi: <https://doi.org/10.1108/rpj-09-2015-0123>
6. Samykano, M., Selvamani, S. K., Kadirgama, K., Ngui, W. K., Kanagaraj, G., Sudhakar, K. (2019). Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102 (9-12), 2779–2796. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03313-0>
7. Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
8. Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-Moreno, I., Rodríguez, G. P. (2018). Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93–103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.054>
9. Gardan, J., Makke, A., Recho, N. (2016). A Method to Improve the Fracture Toughness Using 3D Printing by Extrusion Deposition. *Procedia Structural Integrity*, 2, 144–151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.019>
10. Baumann, F., Bugdayci, H., Grunert, J., Keller, F., Roller, D. (2015). Influence of slicing tools on quality of 3D printed parts. *Computer-Aided Design and Applications*, 13 (1), 14–31. doi: <https://doi.org/10.1080/16864360.2015.1059184>
11. Keleş, Ö., Blevins, C. W., Bowman, K. J. (2017). Effect of build orientation on the mechanical reliability of 3D printed ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 23 (2), 320–328. doi: <https://doi.org/10.1108/rpj-09-2015-0122>
12. Yang, Y. F., Tang, C. A., Xia, K. W. (2012). Study on crack curving and branching mechanism in quasi-brittle materials under dynamic biaxial loading. *International Journal of Fracture*, 177 (1), 53–72. doi: <https://doi.org/10.1007/s10704-012-9755-6>
13. Ma, G., Dong, Q., Wang, L. (2018). Experimental investigation on the cracking behavior of 3D printed kinked fissure. *Science China Technological Sciences*, 61 (12), 1872–1881. doi: <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9192-7>
14. Zeng, Q., Tonge, A. L., Ramesh, K. T. (2019). A multi-mechanism constitutive model for the dynamic failure of quasi-brittle materials. Part I: Amorphization as a failure mode. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 130, 370–392. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.06.012>
15. Zeng, Q., Tonge, A. L., Ramesh, K. T. (2019). A multi-mechanism constitutive model for the dynamic failure of quasi-brittle materials. Part II: Integrative



model. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 131, 20–42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.06.015>

16. Salenko, A., Chencheva, O., Lashko, E., Shchetynin, V., Klimenko, S., Samusenko, A. et. al. (2018). Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (94)), 61–72. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139556>

17. Salenko, A., Chencheva, O., Glukhova, V., Shchetynin, V., Budar, M. R. F., Klimenko, S., Lashko, E. (2020). Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (105)), 38–51. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203279>

Not a reprint