

УДК 621.9.06-529:004.925.8

doi: 10.32620/aktt.2024.sup2.16

О. В. ПОДОБНИЙ, М. М. АЛЕЙНИКОВ

*Державне підприємство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна*

## ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ПРИНТИНГУ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ НА ДП «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС»

На теперішній час технологія 3D-принтингу одержала широке поширення у світі. Це пов'язане з теоретично широкими можливостями даної технології по виготовленню деталей складної форми з високою точністю з різних сталей і сплавів, пластику і кераміки, а також із значно меншим часом виготовлення деталей за допомогою 3D-принтингу, ніж виготовлення деталей по звичайних технологіях. Широкі технологічні й конструкторські можливості даної технології дають можливість постійно виконувати нові розробки й дослідження деталей, які виготовлені за допомогою 3D-принтингу, шукати нові види обладнання й матеріалів, які б дозволили нам одержувати деталі складної форми з різних матеріалів. У статті розглядаються загальні питання застосування технології 3D-принтингу на промислових підприємствах. Описаний досвід використання даної технології для виробництва різних деталей авіадвигунів, що виготовляються з металевих, керамічних і пластикових матеріалів. У статті наведений огляд досвіду виготовлення заготовок та деталей за допомогою технології 3D-принтингу: деталей з керамічних матеріалів (стрижнів, супортів, конформаторів); зразків з металевих матеріалів (оксидних дисперсно-зміцнених титано-алюмінієвих і жароміцних сплавів типу Inconel 718, титанового сплаву Ti6Al4V (аналог BT6), алюмінієвих сплавів AlSi і AlMg (подібних по складу до АЛ2 і АМ25 відповідно), алюмінієвого сплаву AlMg5 (аналог АМ25), жароміцного нікелевого сплаву ЭП648 (ВХ4Л), жароміцного сплаву ЖС32-ВІ); деталей з пластикових матеріалів (крильчатка, фланець, трійник) з використанням виготовлення за випалювальними моделями. Надані результати дослідження зразків та виробничих деталей на відповідність технічним вимогам креслень. Дослідження містять аналіз фізичних та хімічних властивостей зразків та деталей, їх механічні властивості, зміну показників після термічної обробки та аналіз мікро та макроструктури матеріалів на різних етапах виготовлення деталей. Окремими пунктами докладно описані результати виготовлення робочих деталей після використання надрукованих на 3D-принтері випалювальних моделей: міцність форми для лиття, якість випалювання моделі, залишки золи та інших шкідливих домішок, шорсткість поверхні відливок.

**Ключові слова:** 3D-принтинг; виливок; зразок; шорсткість поверхні; межа міцності; ударна в'язкість; хімічний склад.

### Вступ

Підприємство ДП «Івченко-Прогрес» протягом 75 років створює двигуни для багатьох типів літаків, а також приводи й спецобладнання індустріального застосування.

Авіадвигуни, розроблені ДП «Івченко-Прогрес», застосовуються на 60 типах літальних апаратів. Тисячі двигунів експлуатуються в більш ніж 100 країнах світу. Загальний наробіток усього парку газотурбінних двигунів в експлуатації - понад 300 млн.годин. В активі підприємства більше 60 сертифікатів, це сертифікати розроблювача авіаційної техніки; сертифікати якості проектування, виробництва, модернізації, ремонту й технічного обслуговування авіаційних двигунів і газотурбінних приводів; сертифікати типу на двигуни.

На сьогоднішній день для потреб авіаційної промисловості при виробництві та ремонті деталей все більшого застосування набуває використання адитивних технологій [1, 2].

Застосування технологій 3D-принтингу при виготовленні деталей авіадвигунів, а також ливарних форм і моделей, дозволяє знизити витрати на виробництво й зменшити час виготовлення та собівартість продукції, особливо в умовах дослідного дрібносерійного виробництва [3].

Представлені нижче роботи виконані на ДП «Івченко-Прогрес» у співдружності з іншими підприємствами.

### Зміст і результати досліджень

#### 1. Деталі з керамічних матеріалів

У даний момент на нашому підприємстві працює верстат фірми «CERAMAKER» для виготовлення деталей методом 3D-принтингу з керамічних матеріалів. З його допомогою були виготовлені деталі:

**1.1. Стрижні для оформлення внутрішньої порожнини лопаток**, які виготовлялися з пасти «3DMIX ALUMINA PASTE AL-PO2» з розміром

шару принтингу 0,05 мм, з наступними сушінням, очищенням і спіканням (рис. 1). Далі було виконано контроль зовнішнього вигляду, геометрії й шорсткості стрижнів, який показав місцеву деформацію кераміки, шорсткість поверхні стрижнів Ra 6,3...6,9 мкм і відповідність розмірів стрижня вимогам креслення. Перевірка межі міцності й ударної в'язкості стрижнів показала їхню відповідність заданим вимогам.

Надалі, було проведено роботу по виливку робочих лопаток з використанням керамічних стрижнів, виготовлених за допомогою 3D принтера «CERAMAKER» (рис. 2). Результати роботи виявили, що при виготовленні виливків відбувається руйнування керамічного стрижня внаслідок його низької пластичності.

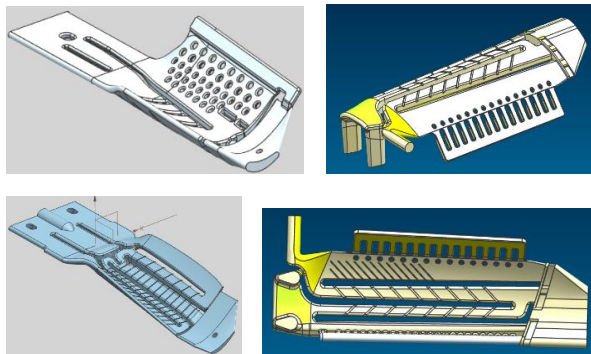
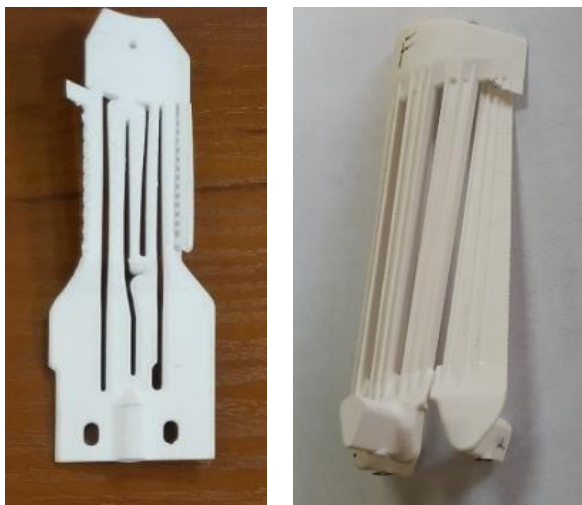


Рис. 1. Зовнішній вигляд керамічного стрижня

**1.2. Для принтингу й термообробки стрижнів** було запроєктовано й виготовлено деталі супорт і конформатор (рис. 3). Супорт виготовлявся в якості підтримки стрижня, як при виготовленні, так і при термообробці. Конформатор виготовлявся для підтримки стрижня при термообробці в трубчастій печі, у якій відбувається обдування азотом і повітрям.

**1.3. Інші керамічні вироби:** зразки, прес-форми, платформи для термообробки деталей у трубчастій печі й ін. (рис. 4, 5).



Рис. 2. Зовнішній вигляд стрижня залитого пластиковою моделлю й розріз виливка лопатки

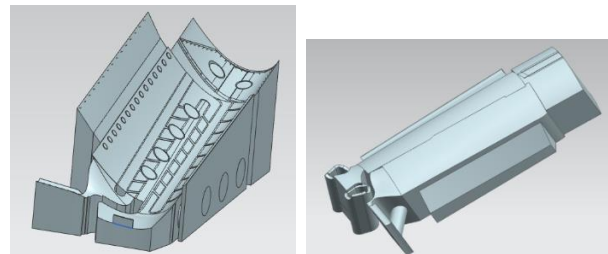


Рис. 3. Зовнішній вигляд супорта й конформатора

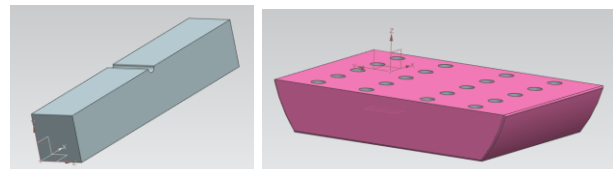


Рис. 4. 3D-Моделі зразка й платформи для термообробки деталей у трубчастій печі

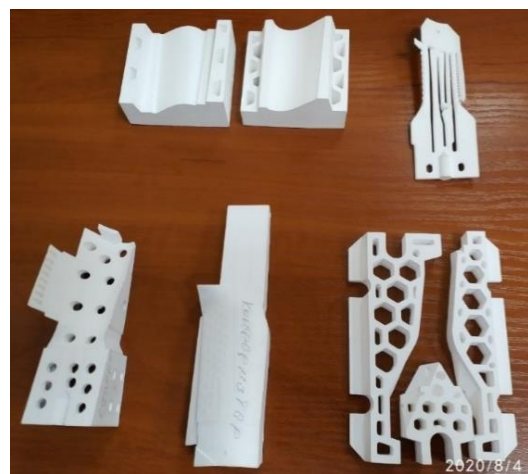


Рис. 5. Різні керамічні вироби

## 2. Виготовлення й дослідження деталей з металевих матеріалів

Роботи з виготовлення й дослідження зразків і деталей з металевих матеріалів проводилися разом з іншими організаціями в рамках спільних проектів:

**2.1. Роботи із проекту OXIGEN.** Роботи із проекту OXIGEN міжнародного консорціуму, до складу якого ввійшли 11 учасників з 6 країн: п'ять науково-дослідних інститутів, два університети й чотири промислових підприємства. У рамках цього проекту були розроблені оксидні дисперсно-зміцнені (ODS) титан-алюмінієві й жароміцні сплави, виготовлені методом 3D-принтингу (рис. 6). Зразки, пройшли дослідження хімічних і механічних властивостей, а також придатність до механічної обробки.



Рис. 6. Зовнішній вигляд зразків

За результатами дослідної роботи визначене наступне:

1. Механічні властивості матеріалу LMD OX 45-3, визначені при випробуваннях зразків, складають:

- межа міцності при кімнатній температурі ( $\sigma_b$ ) становить 18,4 кгс/мм<sup>2</sup>...28,5 кгс/мм<sup>2</sup>;
- відносне подовження ( $\delta$ ) - 0%;
- відносне звуження ( $\varphi$ ) - 0%;
- визначити межу міцності при 650 °C не вдалося.

2. З заготовок матеріалу, отриманого методом лазерного осадження порошку сплаву OX 45-3 зі зміцненням дисперсними оксидними частками (LMD OX 45-3 ODS), виготовлено 3 стандартних зразка. Одна заготовка (№ D047) зруйнувалася при механічній обробці.

3. Механічні властивості матеріалу LMD OX 45- ODS, визначені при випробуваннях зразків, складають:

- межа міцності при кімнатній температурі ( $\sigma_b$ ) становить 65,7 кгс/мм<sup>2</sup>;
- ударна в'язкість KCU – 0 кгс м/см<sup>2</sup>.

4. Матеріали, що досліджувалися - пористі, розмір пор у матеріалі LMD OX 45-3 ODS становить  $\varnothing$  0,02...0,1 мм, у матеріалі LMD OX 45-3 –  $\varnothing$  0,02...0,5 мм.

5. Матеріали мають задовільну здатність до обробки шліфуванням і електроерозійній дробовій вирізці.

**2.2. Роботи з виготовлення деталей з жароміцного сплаву Inconel 718,** зразки якого виготовлені з порошку фірми LPW (Великобританія) на установці 3D-принтингу «EOS M400» (рис.7, 8).

Для зразків деталей проведено металургійне дослідження, отримані результати:

- хімічний склад зразків відповідає вимогам AMS 5662M;
- механічні й жароміцні властивості зразків відповідають вимогам AMS 5662M;
- макроструктура термооброблених зразків щільна, однорідна, характеризується дрібнозернистою будовою. Виявлено мікропори з розміром до 35 мкм;
- у будові зламів, а також у макро- і мікроструктурі зразків спостерігається структурна неоднорідність, обумовлена формуванням зерен, які витягнуті у напрямку росту зразка.

**2.3. Роботи з виготовлення деталей з жароміцного сплаву Alloy 718 (Inconel 718),** зразки якого отримані методом дугового наплавлення MIG.

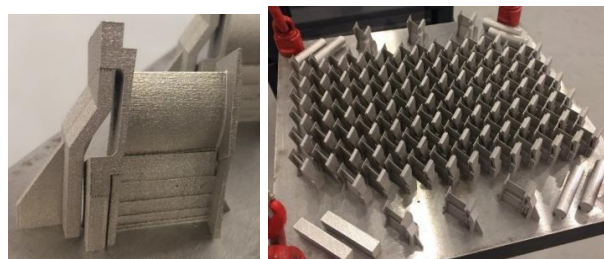


Рис. 7. Деталі типу лопатка зі сплаву Inconel 718

Зразки деталей пройшли металургійне дослідження, отримані результати:

- мікроструктура вирощених зразків методом дугового наплавлення MIG характерна для сплаву Alloy 718 у нормальному термообробленому стані;
- межа міцності термооброблених зразків не відповідає вимогам AMS 5662M для сплаву Alloy 718;

- подовження й поперечне звуження термооброблених зразків відповідає вимогам AMS 5662M для сплаву Alloy 718.

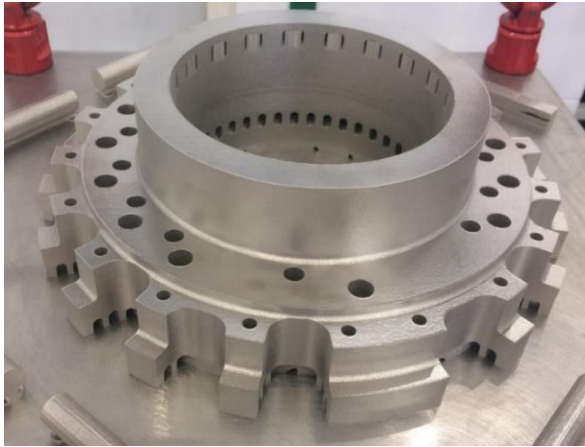


Рис. 8. Деталь типу диск зі сплаву Inconel 718

**2.4. Роботи з дослідження зразків** із порошків сплаву Ti6Al4V (аналог BT6) фірми «Sino-Euro», виготовлених методом селективного лазерного спікання DMLS на установці EOS M400.

Зразки деталей пройшли металургійне дослідження, отримані результати:

- хімічний склад зразків відповідає вимогам AMS 4928, ASTM F1472-14 і технічним даним на матеріал;

- межа міцності, подовження, звуження й ударна в'язкість усіх зразків відповідають нормам AMS 4928, ASTM F1472-14, при цьому властивості міцності вище після термообробки. Показники міцності зразків з горизонтальною побудовою незначно (на 1,3 %) перевищують властивості зразків з вертикальною побудовою, інші властивості перебувають приблизно на одному рівні;

- макроструктура зразків характеризується виявленням макрозерна величиною, що відповідає 3-му балу шкали макроструктур; тріщин, розшарувань, металевих і неметалічних включень, ділянок ликваційного походження в макроструктурі досліджуваних зразків не виявлено;

- мікроструктура всіх зразків ідентична: має тонкопластинчасту будову  $\alpha/\beta$ -фаз, границі  $\beta$ -перетвореного зерна не виявлені. Повної ідентичності такої мікроструктури по шкалі № A.2 немає;

- в усіх зразках виявлені одиничні мікропори переважно округлої форми розмірами 12...50 мкм.

**2.5. Роботи з дослідження зразків** зі сплавів AlSi (близький по складу до AL2) і AlMg (близький по складу до AMg5), виготовлених методом прямого вирощування (CMT) на напівавтоматі Transplussynergic 2700CMT.



Рис. 9. Деталі зі сплаву Ti6Al4V

Зразки деталей пройшли металургійне дослідження, отримані результати:

- хімічний склад зразків задовольняє нормам для сплавів AL2 і AMg5;

- механічні властивості зразків зі сплаву AlSi відповідають нормам для литого сплаву AL2, механічні властивості зразків з AlMg не відповідають нормам для деформованих напівфабрикатів-плит зі сплаву AMg5;

- у макроструктурі зразка зі сплаву AlSi виявлені наплавлені шари шириною 1,5...2 мм із чіткою границею розділу без прояву макрозерна. У макроструктурі зразка з AlMg виявлені дрібні пори, більшість із яких зосереджені з боку підкладки;

- мікроаналізом у зразках зі сплаву AlSi виявлені мікропори  $\varnothing$  20...50 мкм округлої форми, мікроструктура матеріалу зразка як у зоні лінії сплавлення, так і в шарах ідентична, являє собою дендрити  $\alpha$ -твердого розчину + евтектика (Si);

- у наплавленій пластині з матеріалу AlMg виявлені мікропори округлої форми  $\varnothing$  30...150 мкм, розташовані поблизу підкладки й одиничні усадочні пори до 25 мкм. Мікроструктура матеріалу зразків як у зоні лінії сплавлення, так і в шарах ідентична і являє собою  $\alpha$ -твердий розчин і зміцнені фази, характерні для сплавів типу AMg.

**2.6. Робота з дослідження зразка** зі сплаву AlMg5 (аналог AMg5), виготовлені на фірмі «SBI» методом роботизованого плазмового наплавлення з використанням присадного дроту.

Зразок деталі пройшов металургійне дослідження, отримані результати:

- хімічний склад зразка відповідає вимогам AWSA5.10 для сплаву AlMg5 і близький до складу сплаву AMg5. Рентгеноскопічний мікроаналіз показав, що в матеріалі зразка є концентраційні неоднорідності змісту Fe, Mg, Mn за місцем виділення зміцнених фаз;

- механічні властивості зразків, вирізаних уздовж та поперек наплавлених шарів, перебувають

приблизно на одному рівні. Після відпалу при  $T=330\text{ }^{\circ}\text{C}$  відбулося зниження міцності й пластичності. Механічні властивості металу зразка до відпалу відповідають нормам на деформуємі плити зі сплаву АМг5, після відпалу – не відповідають за значеннями міцності й пластичності;

- макроструктура наплавленого зразка має однорідний матовий фон, без прояву макрозерна й ліній з'єднання наплавлених шарів. У структурі зразка по всьому перетину мають місце дрібні пори округлої форми  $\varnothing 60\ldots 90\text{ мкм}$ ;

- мікроструктура наплавленого зразка неоднорідна по перетину – на поверхні зразка по лінії сплавлення шарів металу характерна для перегрітого стану, перегрітий шар залягає на глибину близько 1 мм, далі по перетину зразка – складається з більш дисперсних виділень зміцнених фаз в  $\alpha$ -твердому розчині, характерна для сплавів типу АМг. Мікроструктурних змін у матеріалі зразків після відпалу не виявлено.

**2.7. Робота з дослідження зразків,** виготовлених прямим виروشунням методом мікроплазмового порошкового наплавлення на роботизованій установці Starweld 190HP зі сплаву ЕП648 (ВХ4Л).

Зразки деталей пройшли металургійне дослідження і отримані результати:

- механічні властивості досліджуваних зразків, виращених методом мікроплазмового порошкового наплавлення зі сплаву ЕП648 (ВХ4Л) після термообробки відповідають вимогам нормативних документів для сплаву ВХ4Л-ВІ;

- мікроструктура матеріалу зразків після термообробки відповідає нормально термообробленому стану сплаву типу ЕП648 у литому стані, перегріву немає.

**2.8. Робота з дослідження зразків** у литому й термообробленому стані, виготовлених прямим виروشунням методом мікроплазмового порошкового наплавлення на роботизованій установці Starweld 190HP зі сплаву ЖС32-ВІ.

Зразки деталей пройшли металургійне дослідження і отримані результати:

- механічні властивості досліджуваних зразків зі сплаву ЖС32-ВІ після термообробки відповідають вимогам 500ТУМ-2;

- мікроструктура зразків після термообробки при  $T=1270\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  характерна для перегрітого стану матеріалу ЖС32-ВІ і не відповідає вимогам шкали мікроструктур;

- мікроструктура матеріалу зразків після термообробки при  $T=1255\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  відповідає нормально термообробленому стану сплаву ЖС32-ВІ, перегріву немає.

### 3. Виготовлення й дослідження деталей із пластикових матеріалів

Перспективним напрямком застосування 3D-принтингу є виготовлення пластикових випалюваних ливарних моделей деталей. По даному напрямку проводилися спільні роботи з іншими фірмами в частині виготовлення деталей складної форми типу фланець, лопатка, крильчатка, колесо й т.п. Надалі проводилися перевірка ливарних властивостей даних моделей, їх відповідність усім технічним вимогам до точності і якості одержуваних виливків.

**3.1. Роботи по виливку деталей** типу «крильчатка» з використанням випалюваних моделей, виготовлених за технологією Voxeljet компанією «3D Smartprint». Отримані результати:

- випалюваність моделей була задовільною;
- залишків золи не виявлено;
- шорсткість поверхні отриманих виливків не відповідає вимогам креслення Ra 1,6 мкм і становить 6,12...10,5 мкм.

**3.2. Роботи по виливку деталей** типу «фланець» з використанням випалюваних моделей, виготовлених методом FDM з PLA-Пластику. Результати роботи:

- випалюваність моделей задовільна;
- незначні залишки золи вилучені промиванням форми водою;
- шорсткість поверхні отриманих виливків не відповідає вимогам креслення Ra 1,6 мкм і становить 5,56...10,5 мкм.

**3.3. Роботи по виливку деталей** типу «крильчатка» і «трійник» з використанням випалюваних моделей, виготовлених на 3D принтері Uniontech Pilot з матеріалу Somos Element. Результати даної роботи:

- на стадії видалення модельної маси ливарна форма потріскалася в районі розташування випалюваних моделей, самі випалювані моделі зруйнувалися через високий коефіцієнт термічного розширення матеріалу моделі.

**3.4. Роботи по виливку деталей** типу «крильчатка» з використанням випалюваних моделей з матеріалу Tetrashell і ливарного воску, виготовлених компанією «3D Smartprint». Результати даної роботи:

- на стадії випалювання моделей з матеріалу Tetrashell спостерігалось розтріскування оболонки литникової живильної системи й відшарування лицьового шару оболонок після випалювання пластикової моделі через високий коефіцієнт термічного розширення випалюваних моделей;

- на моделях з ливарного воску спостерігалось задовільне видалення підтримок теплим спиртом;
- шорсткість поверхні отриманих виливків не відповідала вимогам креслення Ra 1,6 мкм і становила 5,3...8,1 мкм.

**3.5. Роботи по виливку деталей** типу «Колесо ТК» з використанням випалюваних моделей, виготовлених компанією «3D Smartprint» методом 3D-принтингу з фотополімерних матеріалів «Somos Elements» і «ABS plus». Результати даної роботи:

- шорсткість виливків, отриманих за допомогою моделі з матеріалу «Somos Elements» не відповідала вимогам креслення Ra 1,6 мкм і становила Ra 3,2 мкм;
- шорсткість виливків, отриманих за допомогою моделі з матеріалу «ABS plus» не відповідала вимогам креслення Ra 1,6 мкм і становила Ra 12,6 мкм. Деталь мала пухку структуру матеріалу.

### Висновки

Результати проведеної роботи мають теоретичне і практичне значення для розширення можливостей сучасного виробництва авіадвигунів по виготовленню деталей складної форми з високою точністю з різних сталей і сплавів, пластику і кераміки.

У майбутньому для ДП «Івченко-Прогрес» є перспективним продовження робіт із прямого вирощування деталей: виготовлення керамічних стрижнів, виготовлення деталей (лопатки, диски) з оксидних дисперсно-зміцнених (ODS) титан-алюмінієвих і жароміцних сплавів, виготовлення корпусних деталей зі сплавів на основі алюмінію.

**Внесок авторів:** формулювання проблеми, керування проектом – **О.В. Подобний**, аналіз та оформлення результатів – **М.М. Алєйніков**.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

### Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

### Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

### Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

### Подяка

Автори висловлюють подяку к.т.н., **Кондратьоку Едуарду Васильовичу**, Головному технологу ДП «Івченко-Прогрес».

Автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

### Література

1. Combined laser manufacturing for complex turbine blades [Текст] / B. Graf, S. Gook, A. Gumenyuk, M. Rethmeier // Глобальная ядерная безопасность. 2016. – № 3 (20). – С. 34-42.
2. Вехов, А. С. Применение аддитивных технологий в современном производстве [Текст] / А. С. Вехов, С. А. Титаренко // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 1, № 22. – С. 90-92.
3. Применение цифровых технологий при изготовлении выжигаемых моделей лопаток ГТД без применения оснастки [Текст] / В. А. Дорошенко, Е. В. Скворцов, А. И. Чудайкин и др. // Литейное производство. – 2012. – № 6. – С. 38-40.

### References

1. Graf, B., Gook, S., Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. Combined laser manufacturing for complex turbine blades. *Global'naja jadernaja bezopasnost'*, 2016, no. 3(20), pp. 34-42.
2. Vekhov, A. S., & Titarenko, S. A. Primenenie additivnykh tekhnologii v sovremennom proizvodstve [The use of additive technologies in modern production]. *Reshetnevskie chteniya*, 2018, vol. 1, no. 22, pp. 90-92.
3. Doroshenko, V. A., Skvortzov, E. V., Tchudai-kin, A. I., & Yudin, V. A. Primeneniye tzyfrovyykh tekhnologii pri izgotovlenii vyzhygaemykh modeley lopatok GTD bez primeneniya osnastki [Application of digital technologies in production of consumable patterns of GTE blades without using tooling]. *Liteynoye proizvodstvo*, 2012, no. 6, pp. 38-40.

**SELECTION OF 3D PRINTING TECHNOLOGY  
AT SE “IVCHENKO-PROGRESS” APPLICATION*****Oleksandr Podobnyi, Mykhaylo Alyeynikov***

Currently, 3D printing technology is widespread throughout the world. This relates to the wide theoretical resources of this technology for manufacturing irregularly shaped parts with high precision from different steels and alloys, plastics, and ceramics with much lesser production time for parts with 3D printing than parts manufacturing using regular technologies. The wide technological and engineering resources of 3D printing give the possibility for permanently new parts development and testing, as well as the search for new types of equipment and materials that allow irregularly shaped parts from different materials. This article analyses the general subjects of 3D printing applications in industrial enterprises. Described the experience of this technology application in the manufacturing of different parts of aviation engines produced from metal, ceramic, and plastic materials. Given the results of research on metallurgical models and completed parts, information about the accuracy and quality of completed surfaces performed using 3D printing. Perform review and research of blanks and parts 3D printer manufactured: parts (bars, supports, conformatores) from ceramic materials; models from metal materials (metal-oxide dispersion-hardened titanium aluminum and heat-resistant alloys, heat-resistant alloy Inconel 718, titanium alloy Ti6Al4V (BT6 analogue), aluminium alloys AlSi and AlMg (composition close to АЛ2 and АЛ5), aluminium alloy AlMg5 (AMr5 analogue), heat-resistant nickel alloy ЭП648 (BX4Л), heat-resistant alloy ЖС32-ВИ); parts from plastic materials (impellers, flanges, T-branch) using burned-out models. The models and parts research obey the engineering specifications of the design drawings are given. Research contains models and parts' physical and chemical properties analyses, their mechanical properties, ratings after heat treatment, as well as materials' micro- and macrostructure analyses during different steps of parts manufacturing. Single shown results for parts manufactured after 3D printing using burned-out models: cast strength, model burn-out quality, remaining ash and other detrimental impurities, and cast roughness.

**Keywords:** 3D printing; cast; model; roughness; breaking point; resilience; chemical composition.

**Подобний Олександр Віталійович** – Заступник директора підприємства - Головний інженер, Державне підприємство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Алєйніков Михайло Миколайович** – інженер-технолог, Державне підприємство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Oleksandr Podobnyi** – Chef Engineer State Enterprise “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail podobnyyav@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0002-3368-7641.

**Mykhaylo Alyeynikov** – Engineer, State Enterprise “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: alyeynikovmn@ivchenko-progress.com, ORCID: 0009-0003-4406-7645.