

Тітов А. В.  
Балушок К. Б.  
Тітов В. А.  
Бурган М. А.  
Холявік О. В.

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ІЗОТЕРМІЧНОГО ШТАМПУВАННЯ МОНОКОЛЕСА З АКсіАЛЬНИМИ ТОНКОСТІННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМГ6

*Розглянуті особливості технічної підготовки процесу ізотермічного штампування моноколеса. Технологічний процес виготовлення цільноштампувальних робочих коліс (моноколіс) газотурбінного двигуна високошвидкісним фрезеруванням має високу трудомісткість та низький коефіцієнт використання металу. Найбільш перспективним технологічним процесом виготовлення таких деталей є ізотермічне штампування, яке дозволяє отримати сприятливе формування текстури матеріалу в тілі диска та лопатки. Наведено оцінку особливостей переміщення металу при ізотермічному штампуванні моноколеса з аксіальним розташуванням лопаток за допомогою програмного комплексу Deform-3D. Встановлено енергосилові параметри та напружено-деформований стан на різних етапах формоутворення моноколеса зі сплаву АМг6. Розроблено типовий штамп та установку для ізотермічного штампування. Проведені експериментальні роботи по ізотермічному штампуванню моноколеса з аксіальним розташуванням лопаток зі сплаву АМг6 та визначені механічні властивості виходу після ізотермічного штампування. Проведені статичні випробування для оцінки механічних властивостей матеріалу виходу моноколеса із аксіальними тонкостінними елементами після ізотермічного штампування. Результати вимірювань твердості показали незначне зменшення мікротвердості від 115 до 104 HV при віддаленні від осі відштампованого моноколеса із аксіальними тонкостінними елементами.*

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, моноколесо, ізотермічне штампування, алюмінієві сплави, метод скінченних елементів, силові режими, напружено-деформований стан

Надійність та ресурс сучасної авіаційної техніки в значній мірі залежить від ефективності авіаційних двигунів. Тому до деталей авіаційних двигунів пред'являються високі вимоги по параметрам якості, в першу чергу по механічним та експлуатаційним властивостям і точності. Характерним видом деталей авіаційних двигунів, до яких пред'являють високі вимоги є моноколеса. Вони представляють собою диски, виконані єдино із лопатками аеродинамічної форми. В залежності від функціонального призначення по конструктивній ознаці моноколеса можуть розділятися на типи, які відрізняються взаємним розташуванням пера лопатки із диском [1].

На сьогодні, моноколеса, як правило, виготовляються методами механічної обробки, в результаті чого 50–80 % металу виходить в стружку [2]. Також при механічній обробці моноколеса не вдається отримати прийнятний розподіл металу, що сприяло би максимальному опору виникаючим в ході експлуатації навантаженням, вібронавантаженням і т. д. Перспективним способом отримання моноколіс є гаряче об'ємне штампування (ГОШ), використання якого дозволяє отримати сприятливе формування текстури матеріалу в тілі диску та лопатки. Це забезпечує підвищений опір навантаженням, що виникають в ході експлуатації, забезпечує збільшення ресурсу деталі, зменшує витрати матеріалу, а також значно зменшує трудомісткість її виготовлення на 50–60 %. ГОШ моноколіс дає можливість отримати деталь із робочими поверхнями (пера лопатки), що не вимагають наступної механічної обробки або із мінімальними припусками та напусками на наступну механічну обробку. Це дозволяє зберігати отримані механічні властивості матеріалу, як результат течії його в порожнину ручая штамп [3, 4].

Таким чином метою роботи є оцінка енергосилових параметрів та напружено-деформованого стану (НДС) при формоутворенні моноколіс із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву АМг6 в умовах ізотермічного штампування із різними швидкостями деформування та геометріями вихідної заготовки.

Оцінка енергосилових параметрів та напружено-деформованого стану заготовки в процесі формоутворення проведена чисельними методами з використанням програмного

комплексу DEFORM-3D для обраної схеми формоутворення.

Моделювання проводили для типової деталі дифузور радіальний, модель якої показано на рис. 1. Деталь має кільцеву форму (зовнішній діаметр 330 мм, а внутрішній 205 мм), на якій розташовані лопатки. Конструктивною особливістю деталей такого типу є наявність конструктивних елементів (пера лопатки), що розташовані в аксіальному напрямку (паралельно осі моноколеса). Відносна висота пера лопатки до товщини диску  $k = h_p/h_0$  складає 3...4; при цьому відносна товщина пера лопатки  $\delta_p/h_p$  складає 0,33...0,25. Відносна товщина полотна диску  $\delta_0/D$  складає 0,009...0,010.

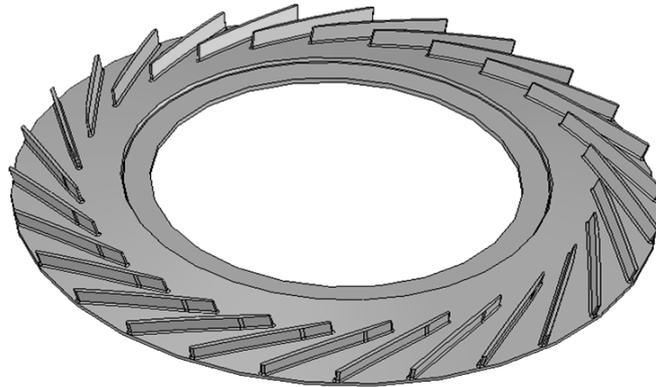


Рис. 1. Модель моноколеса з аксіальним розташуванням лопаток

При реалізації процесу деформування прийнята схема прямого пресування кільцевої заготовки, яка приведена на рис. 2. Заготовка 1 вкладається в штамповий простір, який складається з центральної вставки 3, формовочних матриць 4 і 5 і зовнішньої вставки 6. Штампування деталі відбувається при ході пуансона 2 вниз з постійною швидкістю  $V_y$ .

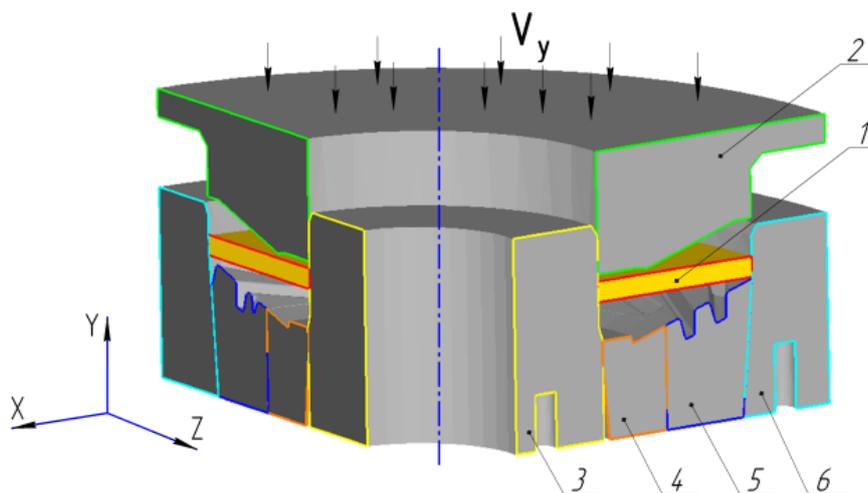


Рис. 2. Схема прямого пресування моноколеса з аксіальним розташуванням лопаток:

1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – центральна вставка; 4, 5 – формовочні матриці; 6 – зовнішня вставка

Розрахункову схему ізотермічного штампування моноколеса із аксіальними тонкостінними елементами із програмного комплексу DEFORM-3D на початку та в кінці процесу показано на рис. 3. Параметри для моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) в DEFORM-3D технологічного процесу ізотермічного штампування моноколеса із аксіальними тонкостінними елементами із плоскої кільцевої заготовки наведено в табл. 1.

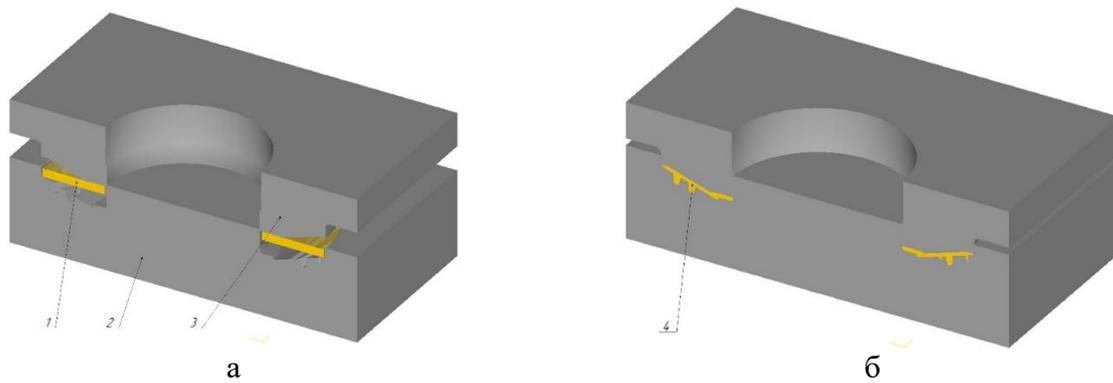


Рис. 3. Розрахункова схема процесу ізотермічного формоутворення моноколеса із аксіальними тонкостінними елементами із програми DEFORM-3D:

а – на початку штампування; б – в кінці штампування

Таблиця 1

Параметри технологічного процесу для скінченоелементного моделювання ізотермічного штампування моноколеса

| №  | Параметри технологічного процесу | Показник           |
|----|----------------------------------|--------------------|
| 1. | Матеріал заготовки               | АМг-6              |
| 2. | Температура заготовки, °С        | 450                |
| 3. | Температура оснащення, °С        | 450                |
| 4. | Матеріал інструменту             | абсолютно жорсткий |
| 5. | Змащення                         | Рідке              |
| 6. | Коефіцієнт тертя                 | 0,3 по Зібелю      |
| 7. | Кількість скінченних елементів   | 200 000            |
| 8. | Швидкість пуансона, мм/с         | 0,0001-100         |

За результатами моделювання процесу ізотермічного штампування заготовки моноколеса із алюмінієвого сплаву АМг-6 з різними швидкостями деформування побудовано графік залежності технологічного зусилля від логарифму швидкостей переміщення пуансона (рис. 4).

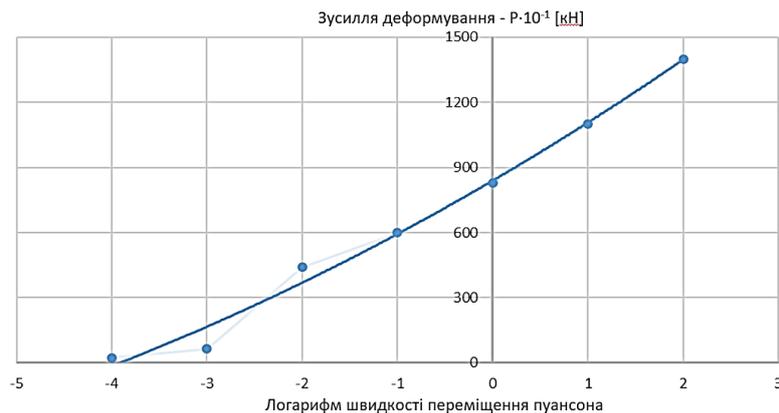


Рис. 4. Графік залежності технологічного зусилля ізотермічного штампування заготовки моноколеса із алюмінієвого сплаву АМг-6 від логарифму швидкостей переміщення пуансона

В результаті чисельного моделювання методом скінченних елементів процесу гарячого ізотермічного штампування моноколеса із аксіальними тонкостінними елементами в програмному середовищі DEFORM-3D було отримано графік залежності зусилля деформування від переміщення пуансона. Графік показано на рис. 5. Як бачимо, із рис. 5 різке зростання зусилля деформування відбувається в кінці робочого ходу пуансона. Це можна пояснити тим, що в цей

момент відбувається заповнення порожнин матриці в місцях пер лопаток. У даному випадку максимальне зусилля деформування при переміщенні пуансона на 22 мм становить 4400 кН.

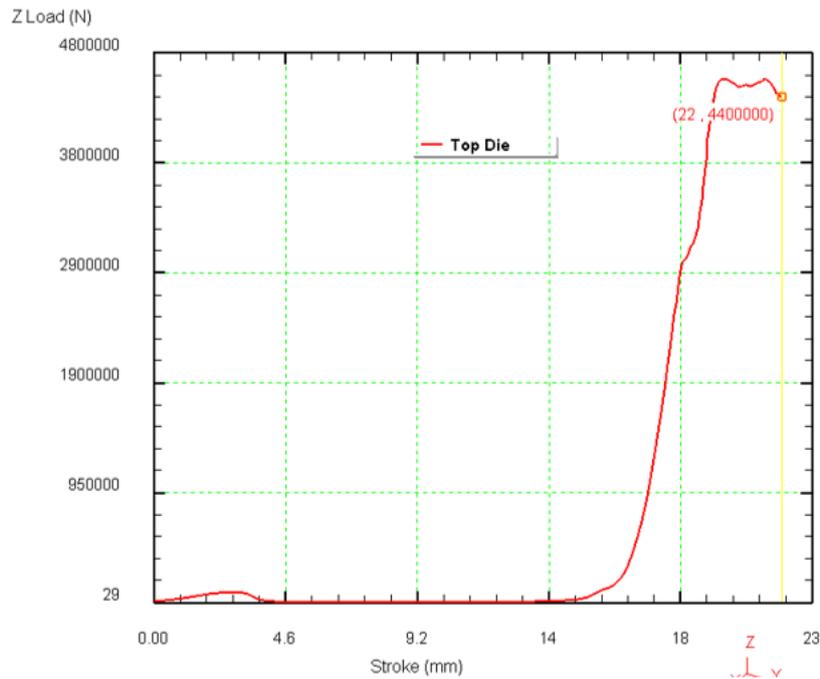


Рис. 5. Графік залежності зусилля деформування від переміщення пуансона при гарячому ізотермічному штампуванні моноколеса зі швидкістю деформування 0,01 мм/с.

На рис. 6, а та рис. 7, а показано розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  та розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  відповідно в zdeформованому викові моноколеса. Як бачимо, найбільша інтенсивність деформацій  $\varepsilon_i$  (рис. 6, а) відповідає місцям радіусного переходу від диска моноколеса до пера лопатки. Найбільша інтенсивність напружень  $\sigma_i$  (рис. 7, а) відповідає цим же зонам.

На рис. 6, б та рис. 7, б показано розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  та розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  відповідно в zdeформованому викові моноколеса в характерному перерізі області пера лопатки. Як бачимо, найбільші значення інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  (рис. 6, б) та інтенсивності напружень  $\sigma_i$  (рис. 7, б) відповідають зонам радіусного переходу від диска моноколеса до пера лопатки. Після того, як метал проходить радіусний перехід відбувається формування пера лопатки, де значення  $\varepsilon_i$  та  $\sigma_i$  практично однакові по об'єму пера лопатки.

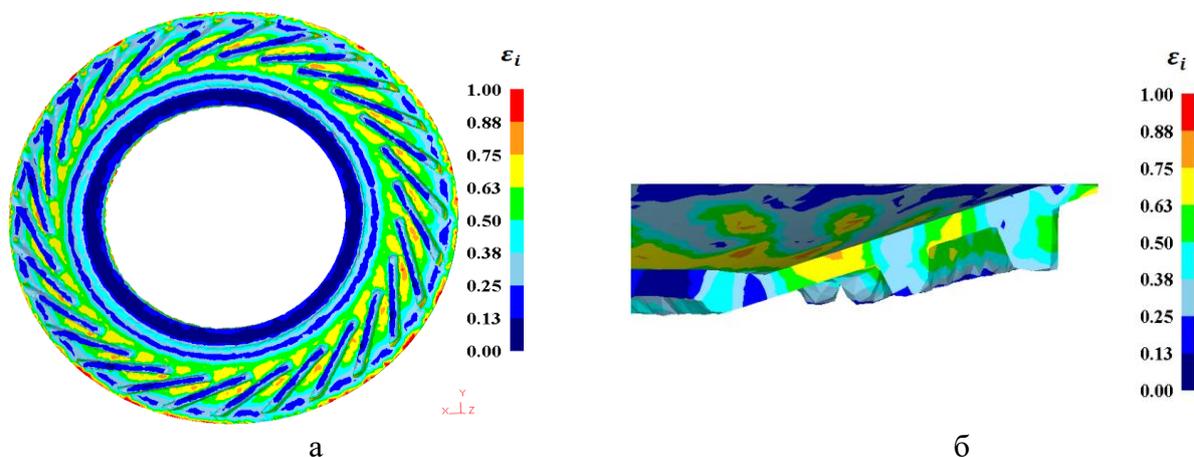


Рис. 6. Розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  в zdeформованому викові моноколеса: а – по всьому об'єму заготовки, б – в характерному перерізі області пера лопатки

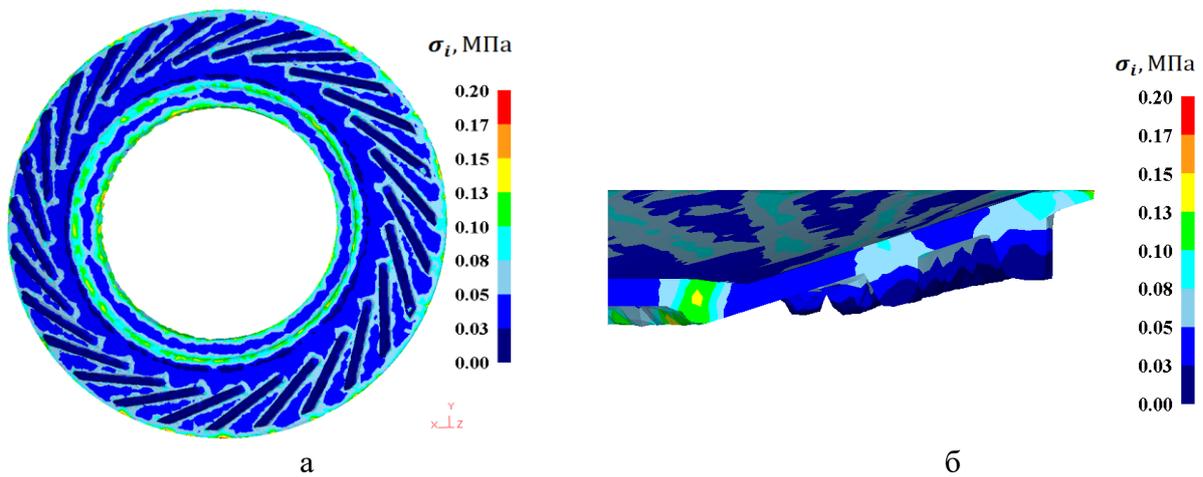


Рис. 7. Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  в zdeформованому викові моноколеса: а – по всьому об'єму заготовки, б – в характерному перерізі області пера лопатки

При гарячому ізотермічному штампуванні викову моноколеса відбувається інтенсивний перерозподіл та течія всього металу заготовки. На рис. 8 показано напрям течії металу матеріалу в плані (а) та в характерному перерізі деталі – тілі лопатки (б).

На рис. 9 показаний розподіл середніх напружень  $\sigma_{сер}$  по об'єму викову в кінці деформування. Як бачимо значення середніх напружень в zdeформованому викові знаходиться у межах від  $-9$  до  $3$  МПа.

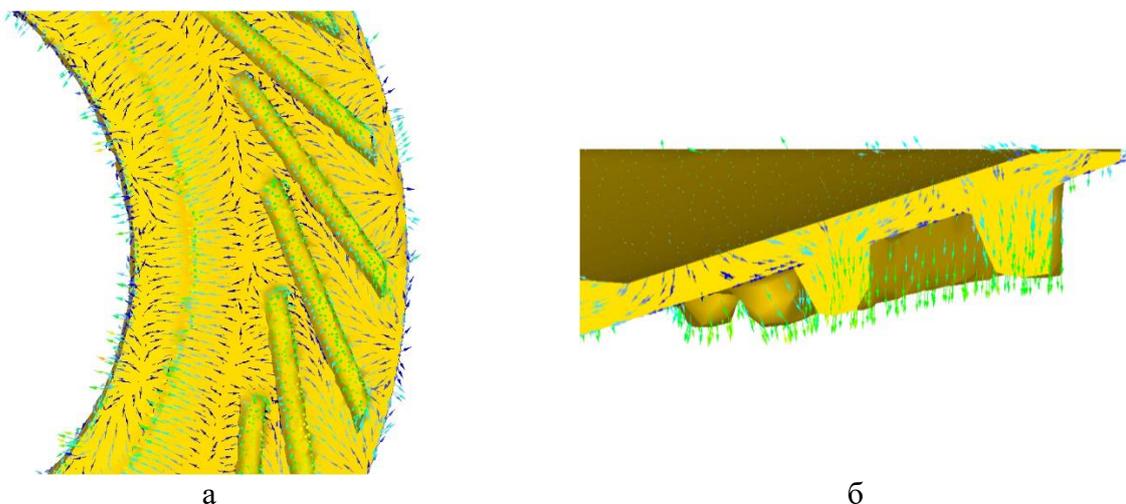


Рис. 8. Напрямок течії металу матеріалу при гарячому ізотермічному штампуванні моноколеса: а – в плані викову, б – в характерному перерізі – тілі лопатки

Результати розрахунку показують, що при проектуванні процесів необхідно враховувати ресурс пластичності в небезпечних зонах ізотермічного штампування, які співпадають із місцем переходу від диска моноколеса до тіла пера лопатки. При цьому зменшення коефіцієнта використання ресурсу пластичності доцільно досягати за рахунок зміни форми вихідної заготовки. На рис. 10 показаний розподіл коефіцієнта використання ресурсу пластичності по всьому об'єму zdeформованого викову моноколеса в кінці деформування. Як бачимо, найбільше значення коефіцієнта використання ресурсу пластичності є в тілі пера лопаток та не перевищує  $0,3$ , що є допустим та не призведе до руйнування.

В результаті комп'ютерного моделювання ізотермічного штампування моноколеса з аксіальними тонкостінними елементами в системі DEFORM-3D виконаний розрахунок технологічного зусилля процесів, виконаний вибір форми та розмірів заготовок, а також параметрів процесу, що дало змогу виконати проектування установки для ізотермічного пресування.

Установка спроектована під гідравлічний прес зусиллям 400 тонн, який знаходиться в лабораторії кафедри технології виготовлення літальних апаратів КПІ ім. Ігоря Сікорського та призначена для встановлення та нагріву штампів для ізотермічного формоутворення точних заготовок моноколес ГТД.

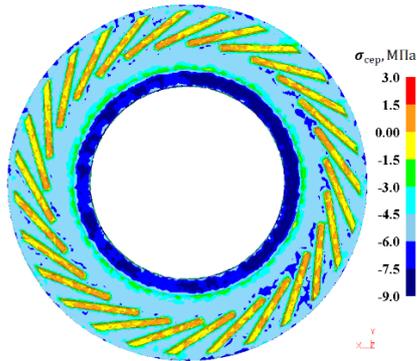


Рис. 9. Розподіл середніх напружень  $\sigma_{сер}$  по об'єму zdeформованого викову моноколеса

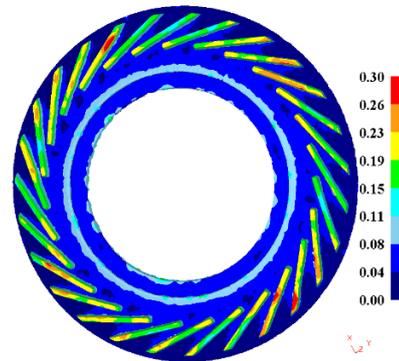


Рис. 10. Розподіл коефіцієнта використання ресурсу пластичності по об'єму zdeформованого викову моноколеса

Схема установки наведена на рис. 11.

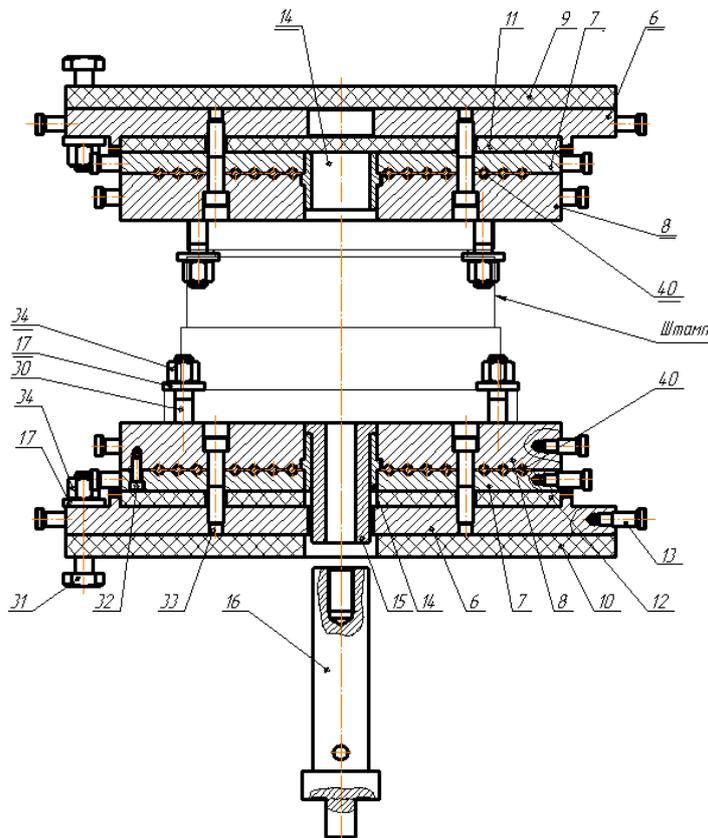


Рис. 11. Схема установки для ізотермічного пресування:

6 – основа; 7 – плита середня; 8 – плита верхня; 9, 10, 11, 12 – асбестові прокладки; 13 – штирі для транспортування окремих плит та устаткування в сборі; 14 – втулка спрямовуюча; 15 –грибок для виштовхування; 16 – виштовхувач; 17 – шайба; 30, 31 – болти; 32, 33 – гвинти; 34 – гайки

Нижній комплект плит відрізняється від верхнього наявністю грибка 15 та виштовхувача 16, які використовуються при потребі видалити (виштовхнути) виготовлені деталі поковки зі штампу. Плити 8 мають Т-образні пази, через які болтами 30 та гайками 34 до установки кріпиться змінне оснащення (штампи). Між плитами 8 та 7 розміщені нагрівальні елементи – тенти 40. Через плити 6 та проміжні шари азбесту 9, 10 установка кріпиться до стола та до плити повзуна преса болтами 31. Проміжні шари азбесту 9, 10 та 11, 12 служать для термоізоляції та запобігання втрати тепла.

Для експериментального відпрацювання процесу виготовлення викову моноколеса з аксіальними тонкостінними елементами розроблено штамп для ізотермічного пресування (рис. 12), який встановлюється на установку для ізотермічного пресування. Виков деталі має припуск 1,5 мм та напуски в місцях зі складною геометрією. Напуски дозволяють значно спростити конструкцію штампу, в результаті чого ми маємо тільки одну площину роз'єму. Технологічні припуски та напуски видаляються при подальшій механічній обробці на станках з ЧПК.

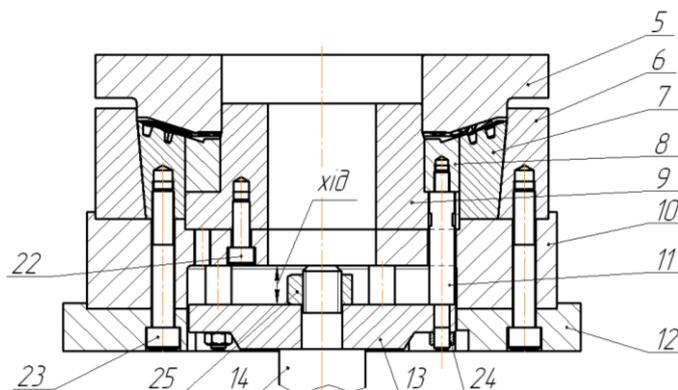


Рис. 12 Штамп для ізотермічного пресування:

5 – пуансон; 6 – бандаж; 7 – матриця; 8 – вставка-знімач; 9 – вставка центральна; 10 – плита опорна; 11 – штовхач; 12 – плитанижня; 13 – плита кріплення штовхачем; 14 – штовхач центральний; 22, 23 – гвинти; 24, 25 – гайки

Загальний вигляд установки і штампа для ізотермічного пресування, який встановлений на пресі, показаний на рис. 13.



а



б



в

Рис. 13. Штамп для ізотермічного пресування моноколеса:

а – загальний вигляд; б – пуансон; в – матриця

Перед укладанням заготовки (рис. 14, а, б) в штамп на верхню (рис. 13, б) та нижню (рис. 13, в) частину штампа наносилось консистентне змащення.



Рис. 14. Заготовка (а) для ізотермічного штампування моноколеса та її розміщення в ручаї штампу

Формоутворення моноколіс з аксіальним розташуванням лопаток з алюмінієвого сплаву АМгб проводили при температурі 410 °С (рис. 15, а) та 450 °С (рис. 15, б). При більшій температурі спостерігається більше заповнення ручая штампу. Витримка під тиском до 5 хв також забезпечує більш повне заповнення ручая штампу

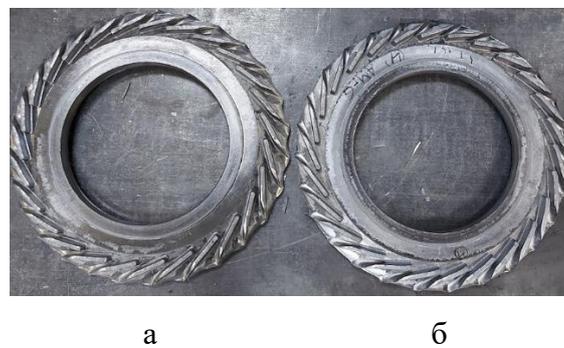


Рис. 15. Відштамповані моноколеса з аксіальним розташуванням лопаток з алюмінієвого сплаву АМгб: а – при температурі 410 °С, б – при температурі 450 °С

Відштамповані моноколеса механічно розрізались для проведення статичних випробувань для оцінки механічних властивостей матеріалу деталей після їх ізотермічного штампування (рис. 16).

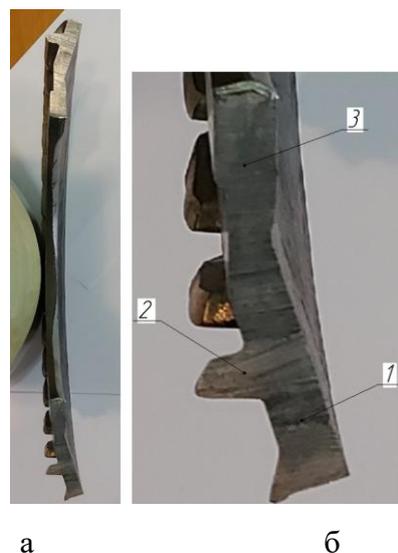


Рис. 16. Розріз викову моноколеса з аксіальним розташуванням лопаток: а – загальний вигляд, б – схема точок для виміру мікротвердості

Вимірювання твердості проводили по Вікерсу за схемою представленою на рис. 16, б.

Результати вимірювань твердості показали незначне її зменшення від 115 до 104 HV при віддаленні від осі відштампованої деталі.

Результати механічних випробувань на одновісний розтяг:  $\sigma_{0,2} = 130\text{--}155$  МПа,  $\sigma_B = 305\text{--}315$  МПа та  $\delta = 14\text{--}15$  %. При віддаленні від осі деталі спостерігається незначне зменшення межі міцності  $\sigma_B$  та незначне збільшення  $\delta$ .

## ВИСНОВКИ

В роботі були викладені результати по чисельному моделюванню методом скінченних елементів в програному середовищі DEFORM-3D процесу ізотермічного штампування викову моноколеса із аксіальними тонкостінними елементами із алюмінієвого сплаву АМг-6 із різними швидкостями деформування.

Вказані розрахункові схеми процесу, задані граничні умови, вихідні заготовки та інші технологічні параметри для моделювання процесу ізотермічного штампування. Показані графіки залежності зусилля деформування від переміщення пуансона при гарячому ізотермічному штампуванні моноколеса при різних швидкостях деформування. Встановлений напружено-деформований стан здеформованих виковів та розподіл температур й критерію руйнування в кінці деформування.

Також за результатами моделювання процесу ізотермічного штампування викову моноколеса із алюмінієвого сплаву АМг-6 з різними швидкостями деформування побудовано графік залежності технологічного зусилля від логарифму швидкостей переміщення пуансона.

Проведені статичні випробування для оцінки механічних властивостей матеріалу викову моноколеса із аксіальними тонкостінними елементами після ізотермічного штампування.

Результати вимірювань твердості показали незначне зменшення мікротвердості від 115 до 104 HV при віддаленні від осі відштампованого моноколеса із аксіальними тонкостінними елементами.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Богуслаєв В.О., Качан О.Я., Долматов А.І. та інші. Технологія виробництва авіаційних двигунів. Випробування авіаційних двигунів: підручник. Запоріжжя: АТ «Мотор Січ», 2015. 330 с.
2. A. Calleja, H. González, R. Polvorosa, G. Gómez, I. Ayesta, M. Barton, L.N. López de Lacalle, 2019, Blisk blades manufacturing technologies analysis, 8th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2019, 19-21 June 2019, Madrid, Spain <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.062>
3. Liubov Magerramova, Eugene Kratt, Development of the Design and Technological Solutions for Manufacturing of Turbine Blisks by HIP Bonding of the PM Disks with the Shrouded Blades, Materials Research Proceedings, Vol. 10, pp 39-46, 2019 <https://dx.doi.org/10.21741/9781644900031-6>
4. Теорія та практика обробки металів тиском / Під ред. Богуслаєва В.О., Бобиря М.І., Тітова В.А., Качана О.Я. Запоріжжя, вид., АТ «Мотор Січ», 201. 522 с.

## REFERENCES

1. Bohuslaiev V.O., Kachan O.Ya., Dolmatov A.I. ta insh. Technology of production of aircraft engines. Testing of aircraft engines: a textbook. Zaporizhzhia: JSC «Motor Sich», 2015. 330 p.
2. A. Calleja, H. González, R. Polvorosa, G. Gómez, I. Ayesta, M. Barton, L.N. López de Lacalle, 2019, Blisk blades manufacturing technologies analysis, 8th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2019, 19-21 June 2019, Madrid, Spain <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.062>
3. Liubov Magerramova, Eugene Kratt, Development of the Design and Technological Solutions for Manufacturing of Turbine Blisks by HIP Bonding of the PM Disks with the Shrouded Blades, Materials Research Proceedings, Vol. 10, pp 39-46, 2019 <https://dx.doi.org/10.21741/9781644900031-6>
4. 4. Theory and practice of metal processing by pressure / Ed. Bohuslaieva V.O., Bobyria M.I., Titova V.A., Kachana O.Ya. Zaporizhzhia: JSC «Motor Sich», 2016, 522 p.

**Titov A., Balushok K., Titov V., Burtan M., Kholiavik O. The features of the process of isothermal stamping of a monowheel with axial thin-walled elements made of aluminum alloy AMg6.**

*The features of the technical preparation of the process of isothermal stamping of a monowheel are considered. The technological process of manufacturing solid stamped impellers (monowheels) of a gas turbine engine by high-speed milling is highly labor-intensive and has a low metal utilization factor. The most promising technological process for manufacturing such parts is isothermal stamping, which allows for favorable formation of the material texture in the body of the disk and blade. An assessment of the features of metal movement during isothermal stamping of a monowheel with axial arrangement of blades is presented using the Deform-3D software package. The energy-power parameters and the stress-strain state at different stages of the formation of a monowheel made of AMg6 alloy are established. A typical stamp and installation for isothermal stamping are developed. Experimental work on isothermal stamping of a monowheel with axial arrangement of blades made of AMg6 alloy is carried out and the mechanical properties of the forging after isothermal stamping are determined. Static tests were conducted to assess the mechanical properties of the material forging a monowheel with axial thin-walled elements after isothermal stamping. The results of hardness measurements showed a slight decrease in microhardness from 115 to 104 HV when the stamped monowheel with axial thin-walled elements was removed from the axis.*

**Keywords:** gas turbine engine, monowheel, isothermal stamping, aluminum alloys, finite element method, force regimes, stress-strain state

**Тітов Андрій Вячеславович** – канд. техн. наук, доцент, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

**Titov Andrii** – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

E-mail: [titov.andrii@iit.kpi.ua](mailto:titov.andrii@iit.kpi.ua)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2245-5650>

**Балушок Костянтин Броніславович** – канд. техн. наук, головний інженер, АТ «Мотор Січ»

**Balushok Kostyantyn** – Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer, JSC “Motor Sich”

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8212-9275>

**Тітов Вячеслав Андрійович** – д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

**Titov Viacheslav** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

E-mail: [vat.kpi@gmail.com](mailto:vat.kpi@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4234-6961>

**Буртан Микола Андрійович** – магістрант, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

**Burtan Mykola** – Master Student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

**Холявік Ольга Віталіївна** – канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

**Kholiavik Olha** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

E-mail: [k\\_omd@ukr.net](mailto:k_omd@ukr.net);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6539-4467>

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

АТ «Мотор Січ» – Акціонерне Товариство «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна

JSC “Motor Sich” – Joint-stock company “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine