

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ
ІМ. А. М. ПІДГОРНОГО

БЕРЛІЗОВА ТЕТЯНА ЮРІЇВНА



УДК 621.438.62-226-2

**СКІНЧЕННО–ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ ТЕРМОПРУЖНОГО СТАНУ
ОХОЛОДЖУВАНОЇ МОНОКРИСТАЛІЧНОЇ ЛОПАТКИ
ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі надійності та динамічної міцності Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України та на кафедрі газогідромеханіки та тепломасообміну Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України (м. Харків).

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Воробйов Юрій Сергійович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України (м. Харків)
провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Зіньковський Анатолій Павлович,
Інститут проблем міцності
ім. Г. С. Писаренка НАН України (м. Київ)
зав. відділу коливачь та вібраційної надійності

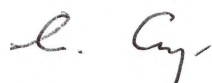
кандидат технічних наук, доцент
Гусєв Юрій Олексійович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» (м. Харків)
професор кафедри конструкції авіаційних двигунів

Захист відбудеться „24” травня 2018 о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01 Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10 та на сайті <http://www.ipmach.kharkov.ua>

Автореферат розісланий „20” квітня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д. т. н., проф.

 О. О. Стрельнікова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Робочі лопатки сучасних газотурбін перебувають в умовах високих температур, дії відцентрових сил і газодинамічного навантаження. Тому вони все частіше виготовляються з жароміцних монокристалічних сплавів з високими показниками міцності. Крім того, сучасні лопатки мають складну систему охолоджуючих каналів і отворів для виходу охолоджуючого повітря. Пружні властивості монокристалічних сплавів є неоднорідними і залежать від напрямку кристалографічних осей. При роботі таких лопаток виникають тривимірні температурні поля з високими градієнтами температур і, як наслідок, термопружний напружено-деформований стан з високими величинами напружень. Важливе значення мають також дослідження залежності напружено-деформованого стану лопатки від орієнтації кристалографічних осей.

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею динаміки та міцності машин є розробка розрахункових моделей та аналіз особливостей температурного та термопружного напружено-деформованого стану монокристалічних охолоджуваних лопаток з урахуванням орієнтації кристалографічних осей.

Результати досліджень дозволяють виявити закономірності розподілу напружень і їх локалізацію, що має велике практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі газогідромеханіки та тепломасообміну Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») та у відділі надійності та динамічної міцності Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України (ІПМаш) відповідно до бюджетних тем «Розробка наукових основ аналізу нестационарного динамічного напруженого стану елементів енергетичного та іншого обладнання з урахуванням пошкоджень» ДР № 0111U001758 і «Аналіз та поліпшення динамічних міцнісних властивостей елементів перспективних енергетичних машин та ракетно-космічної техніки під дією навантаження різної фізичної природи» ДР № 0115U001941, а також господарського договору з підприємством ДП НВКГ «Зоря» – «Машпроект» – «Дослідження напружено-деформованого стану робочої охолоджуваної монокристалічної лопатки газової турбіни ГТД ДН80 під дією відцентрових сил і температурних полів » № 2083/V-26-2013 від 26.02.2013 (2013 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є визначення напружено-деформованого стану (НДС) по об'єму лопатки та впливу на його особливості орієнтації кристалографічних осей монокристалічної охолоджуваної лопатки.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати ряд задач:

- розробити математичну модель охолоджуваної монокристалічної лопатки газотурбінного двигуна з урахуванням конструктивно-технологічних особливостей, форми і неоднорідності матеріалу;

- розробити скінченно-елементну модель монокристалічної охолоджуваної лопатки;
- провести аналіз напружено-деформованого стану лопатки під дією відцентрових сил, температурного поля та з урахуванням обох параметрів;
- визначити та дослідити залежності напружено-деформованого стану лопатки від орієнтації кристалографічних осей (аксіальної та азимутальної).

Об'єктом дослідження є температурний та термопружний напружено-деформований стан.

Предметом дослідження є охолоджувана монокристалічна лопатка газотурбінного двигуна (ГТД).

Методи дослідження. Теоретичні положення дисертації ґрунтуються на сучасних методах моделювання напружено-деформованого стану конструкції. Метод скінченних елементів використовувався для аналізу температурного та термопружного НДС. Сучасні програмні комплекси інженерного аналізу було застосовано для розв'язання практичних задач.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблена математична та скінченно-елементна модель для лопатки з вихровою та частково плівковою системою охолодження, яка враховує зміну термопружного НДС залежно від властивостей матеріалу;
- набули подальшого розвитку розрахункові моделі монокристалічної охолоджуваної лопатки ГТД з урахуванням термопружного НДС, які враховують безперервний перерозподіл температур по об'єму лопатки;
- вперше отримані залежності перерозподілу напружень по об'єму лопатки, вхідній та вихідній кромках, залежно від орієнтації та кута відхилення кристалографічних осей, що дозволило визначити зони локалізації максимальних напружень.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудівної галузі мають дослідження термопружного стану монокристалічних лопаток з вихровою системою охолодження з урахуванням впливу орієнтації кристалографічних осей. Результати досліджень дозволять виявити закономірності розподілу напружень і їх локалізацію та розробити рекомендації на допустимі відхилення орієнтації кристалографічних осей (КГО), що має велике практичне значення.

Деякі отримані в дисертаційній роботі результати було впроваджено на ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект» та ЗМКБ «Прогрес».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати досліджень, що подані у дисертаційній роботі та виносяться на захист, одержані автором особисто. У публікаціях, що виконані у співавторстві, внесок здобувача полягає в такому: чисельні дослідження та аналіз термопружного стану охолоджуваної лопатки ГТД [1]; чисельні дослідження та аналіз особливостей температурного аналізу охолоджуваної лопатки ГТД [2]; чисельні розрахунки та аналіз впливу азимутальної орієнтації КГО на термопружний стан лопатки, участь у розробці практичних рекомендацій щодо відхилення азимутальної орієнтації КГО [3 – 6, 10]; чисельні розрахунки термопружного НДС монокристалічної охолоджуваної лопатки при азимутальному та аксіальному відхиленні КГО,

участь у розробці практичних рекомендацій на відносно відхилення КГО [7 – 8, 14 – 15].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що наведені в дисертації, доповідалися на конференції молодих вчених та спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» (Україна, Харків, 2013 р., 2014 р., 2015 р., 2016 р.); XVIII міжнародному конгресі двигунобудівників (Україна м. Коблево, 2014 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» (Україна, Харків, 2015 р., 2017р.); VI міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (Україна, Запоріжжя, 2017 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 15 наукових праць, серед яких 7 статей у наукових фахових виданнях України, 1 – у іноземному виданні, що входить до наукометричної бази Scopus, 7 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Повний обсяг друкованого тексту становить 142 сторінки, з них 56 рисунків по тексту, 6 таблиць, список використаних джерел зі 128 найменувань на 14 сторінках, 3 додатка на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми роботи, сформульовано мету дисертації, задачі та основні результати, що виносяться на захист, їх новизна, достовірність і практичне значення

Перший розділ дисертації присвячено аналітичному огляду теоретичних та експериментальних наукових досліджень в області лопаток газових турбін та спрямованої кристалізації. Проведено огляд робіт, в яких закладені основи фізичних моделей і аналіз напружено-деформованого стану лопаток турбін. Наведено відомості про різні методи спрямованої кристалізації та методи вирощування охолоджуваних лопаток з монокристалічного матеріалу. Дається опис особливостей монокристалічного матеріалу. Проведено аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень як вітчизняних, так і закордонних авторів. Відзначено фундаментальні дослідження, опис особливостей деформування матеріалу, а також експериментальні дослідження в цій галузі, які надано в роботах таких відомих вчених як І. О. Біргер, А. С. Вольмір, Б. Ф. Шорр, А. П. Зінковський, Є. Р. Шалін, Ю. О. Ножніцький, Ю. М. Шевченко, В. С. Гудрамович, М. Г. Шульженко, Ю. О. Гусєв, Б. П. Зайцев, О. В. Шереметьєв, Ю. С. Воробйов, І. Л. Светлов, Є. Б. Качанов, І. А. Ушаков, Л. П. Селіфанов, J. Cormier, F. Mauget, T. Hino, T. Kobayashi, Y. Koizumi, H. Nagada, T. Yamagata, Г. В. Мельніков, Л. О. Магеррамова, М. М. Суханов, А. І. Кривко та інші. Критичний аналіз відомих результатів показує, що у більшості випадків експериментальні, теоретичні та чисельні дослідження проводились на лопатках, які мають прямоточну систему охолодження або не в повній мірі враховують складну геометричну форму

лопаток. Проведений аналіз сучасного стану досліджень на тему дисертації дозволив сформулювати мету та основні задачі дослідження дисертаційної роботи.

У другому розділі зроблено математичну постановку задачі. Обґрунтовано необхідність використання тривимірних математичних моделей для аналізу термопружного НДС лопатки. Розглядається стаціонарна задача теплопровідності, яка зводиться до розв'язання варіаційного рівняння $\delta J = 0$ для функціонала

$$J = \frac{1}{2} \int_V \int \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz + \frac{1}{2} \sum_k \int_{(S_k)} h_k (T - T_k)^2 dS_k, \quad (1)$$

де V – об'єм тіла;

S_k – поверхня ділянок лопатки і охолоджуючих каналів;

h_k – коефіцієнт тепловіддачі на ділянках лопатки;

k – номери ділянок поверхні лопатки і її охолоджуючих каналів.

Процес теплопровідності описується нелінійним диференціальним рівнянням у частинних похідних.

У загальному випадку визначення температурного стану охолоджуваної лопатки є крайовою задачею математичної фізики в тривимірному просторі. Процес теплопровідності описується нелінійним диференціальним рівнянням у частинних похідних

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + Q, \quad (2)$$

де T – температура;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

c – питома теплоємність;

Q – характеристика внутрішнього джерела або стоку;

ρ – густина матеріалу лопатки;

t – час.

Дана лопатка має перепад температур як у поздовжньому напрямку, так і в поперечних перерізах. Тому задача повинна розв'язуватися як тривимірна. Варіаційне рівняння $\delta J = 0$ для функціонала (1) відображає рівняння теплопровідності і граничні умови III роду на різних ділянках лопатки з охолоджуючими каналами. Ці умови мають вигляд

$$h_k (T_{zk} - T) = \lambda \frac{\partial T}{\partial n},$$

$$h_k (T - T_{ek}) = \lambda \frac{\partial T}{\partial n},$$

де T_{zk} – температура газу;

T_{ek} – температура повітря на різних ділянках охолоджуючих каналів;

n – нормаль до поверхні лопатки або охолоджуючих каналів.

Температура охолоджуючого повітря на різних ділянках каналів вибирається згідно з вхідними даними. Анізотропний матеріал характеризується дев'ятьма незалежними константами, а його матриця податливості S має вигляд

$$S = K^{-1} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{12} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де K – матриця жорсткості;

s_{ij} – коефіцієнти матриці податливості, які можуть бути подані через технічні пружні константи

$$S = K^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

для яких справедливі рівняння

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}, \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x}, \frac{\nu_{zy}}{E_z} = \frac{\nu_{yz}}{E_y}, \quad (5)$$

де E_x, E_y, E_z – модулі пружності при розтягуванні або стисненні в напрямку осі, зазначеної в індексі;

G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} – модулі зсуву (подвійні індекси відповідають осям, між якими при зсуві відбувається зміна прямого кута);

$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$ – коефіцієнти поперечної деформації в напрямку другої з осей, зазначених в індексі, при дії нормальних напружень в напрямку першої осі.

Залежності коефіцієнтів матриці податливості (3) від температури T для монокристалічної лопатки можуть бути подані у вигляді

$$\begin{aligned} s_{11} &= h_{11} + h_{12}T + h_{13}T^2, \\ s_{12} &= h_{21} + h_{22}T + h_{23}T^2, \\ s_{44} &= h_{31} + h_{32}T + h_{33}T^2, \end{aligned} \quad (6)$$

де h_{ij} – коефіцієнти, що визначаються для конкретного матеріалу.

Полярний графік показує технічні константи матеріалу (E_1 , E_2 и G_{12}), повернені на кут від 0 – 360 градусів. Цей графік висвітлює анізотропію матеріалу і вплив орієнтації КГО.

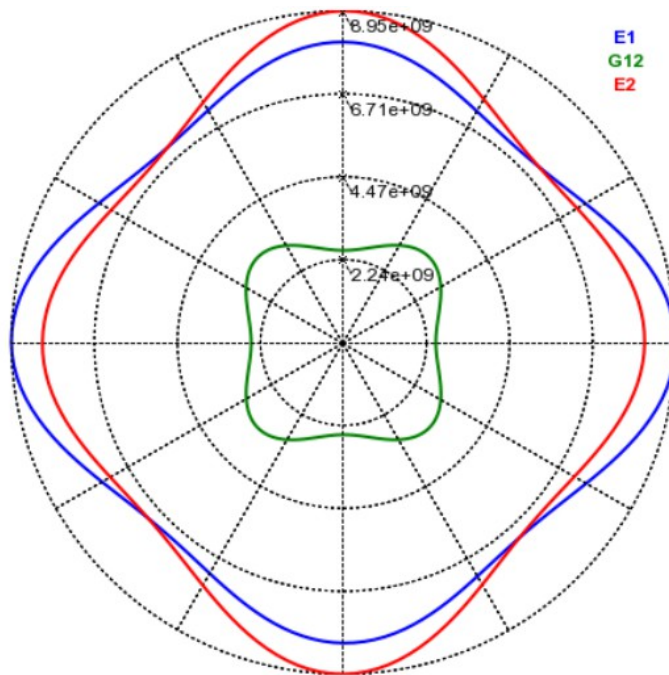


Рис. 1. Зміна технічних констант анізотропного матеріалу в полярній системі координат

У третьому розділі наведені результати досліджень охолоджуваної монокристалічної лопатки зі складною вихровою системою охолодження і каналами для виходу охолоджуваного повітря. На рис. 2 показано охолоджувану лопатку та її систему охолодження у вигляді вихрової матриці. У рамках задачі, яка розв'язується, було зроблено припущення, що розглянута лопатка жорстко закріплена в диску за відповідними поверхнями «ялинкового замка». З урахуванням відомих значень температур на поверхні лопатки та в охолоджуючих каналах розв'язується температурна задача.

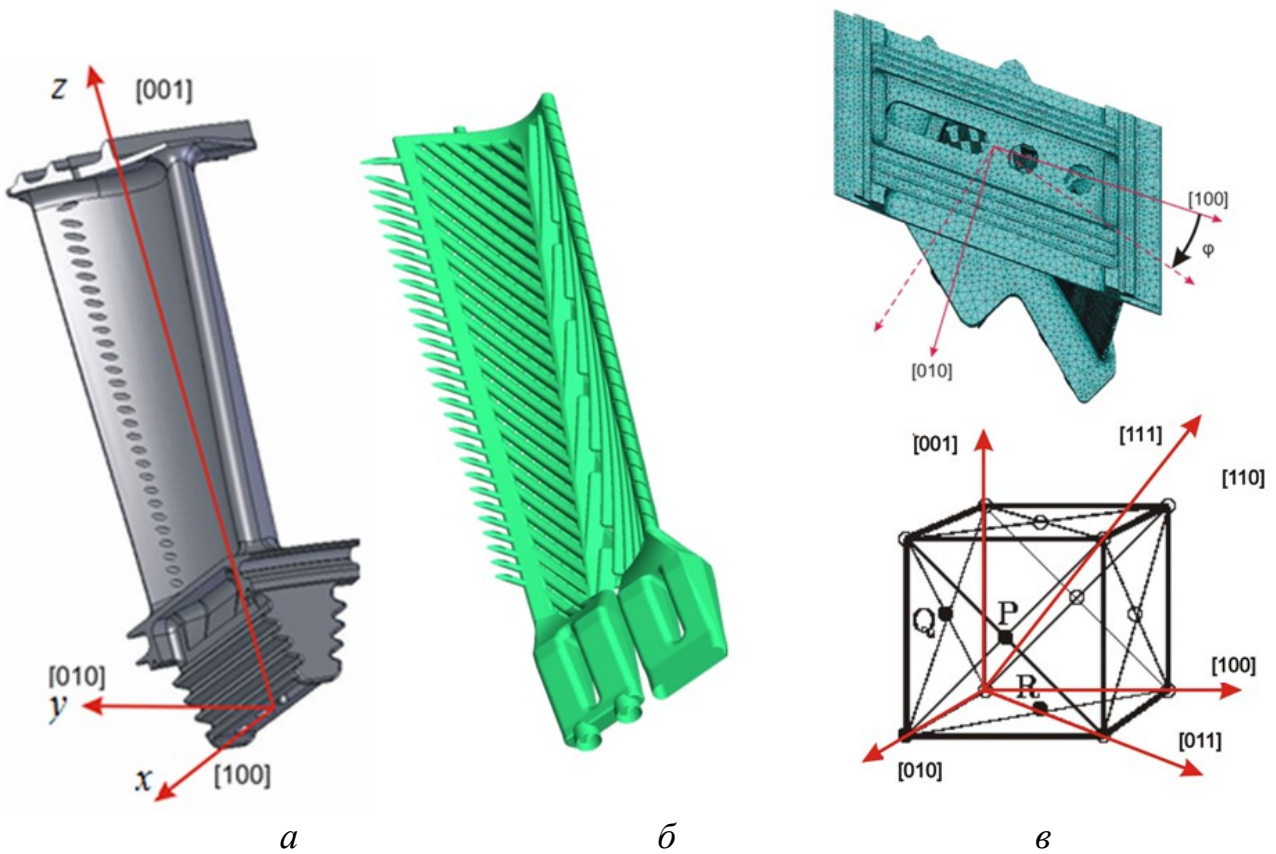


Рис. 2. Охолоджувана лопатка з позначенням монокристалічних напрямків КГО (а), система охолодження у вигляді вихрової матриці (б), напрям повороту КГО (в)

Температурні поля охолоджуваної лопатки визначаються температурою газу і охолоджуючим повітрям. Вони викликають температурне розширення лопатки, яке слід враховувати при визначенні зазорів у лабіринтовому ущільненні. Статичний напружено-деформований стан лопатки визначається з урахуванням температурних полів і відцентрових сил. Розв'язання температурної задачі на основі рівняння (3) з граничними умовами III роду дозволило отримати розподіл температур по об'єму лопатки. Задане температурне поле та отримане в результаті розв'язання задачі теплопровідності порівнювалися і осереднювалися. Остаточне температурне поле відображено на рис. 3 у поздовжньому і поперечному перерізах лопатки.

Для попереднього аналізу напружено-деформованого стану лопатки був проведений розрахунок її переміщень і напружено-деформованого стану під дією відцентрових сил, швидкість обертання 815 рад/с.

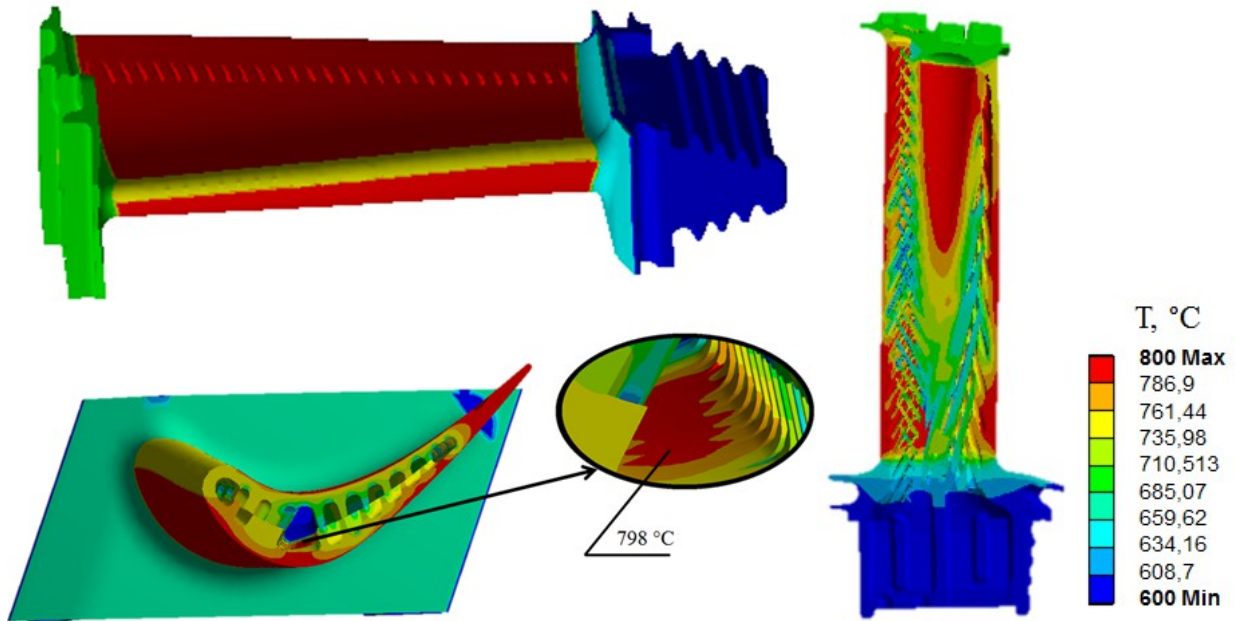


Рис. 3. Розподіл температурного поля по поверхні лопатки та у поздовжньому і поперечному перерізах

На рис. 4, 5 подано розподіл еквівалентних напружень в кориті та по спинці лопатки й у поздовжньому перерізі. Видно, що максимальні напруження на поверхні лопатки виникають в області кореневого перерізу.

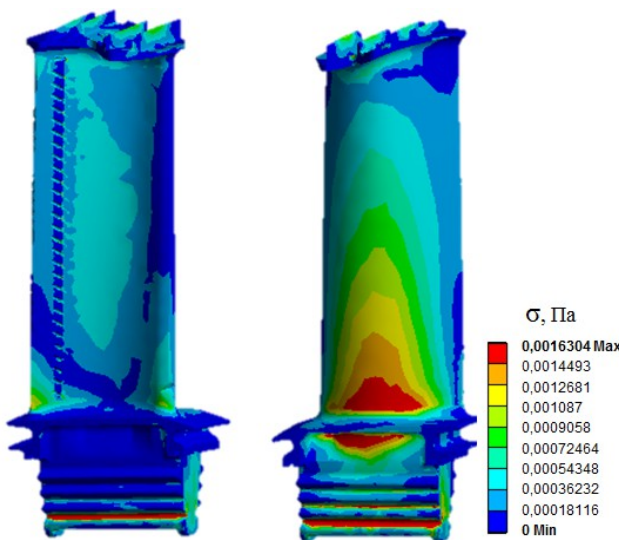


Рис. 4. Розподіл еквівалентних напружень в кориті і по спинці лопатки при дії відцентрових сил

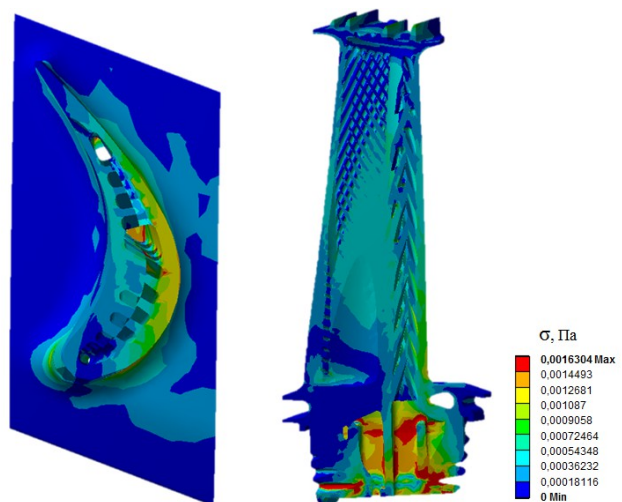


Рис. 5. Розподіл еквівалентних напружень у поперечному та поздовжньому перерізах лопатки під дією відцентрових сил

Далі розв'язувалась сумісна задача впливу відцентрових сил та температурного поля на монокристалічну лопатку ГТД. На рис. 6, 7 наведені

графічні результати розрахунку НДС охолоджуваної лопатки під дією відцентрових сил та температурного поля.

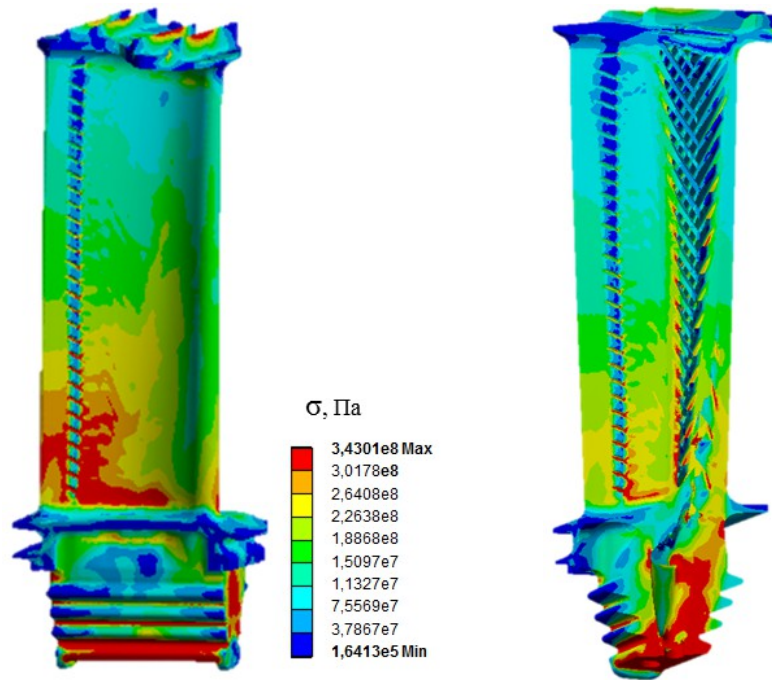


Рис. 6. Розподіл напружень по об'єму та у повздовжньому перерізі лопатки

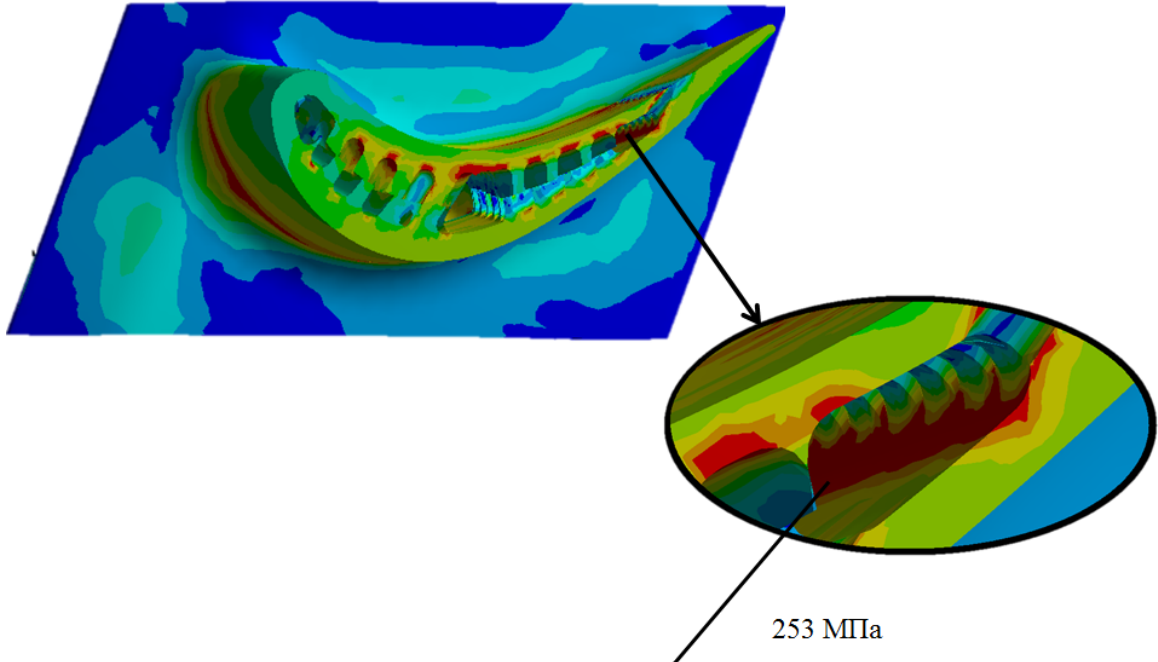


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень у поперечному перерізі монокристалічної охолоджуваної лопатки

На рис. 8 наведені результати порівняння залежностей еквівалентних напружень і деформацій від температурного поля. Крива 1 описує максимальні

значення еквівалентних напружень і деформацій без урахування впливу температурного поля (при $t = 20^\circ \text{C}$).

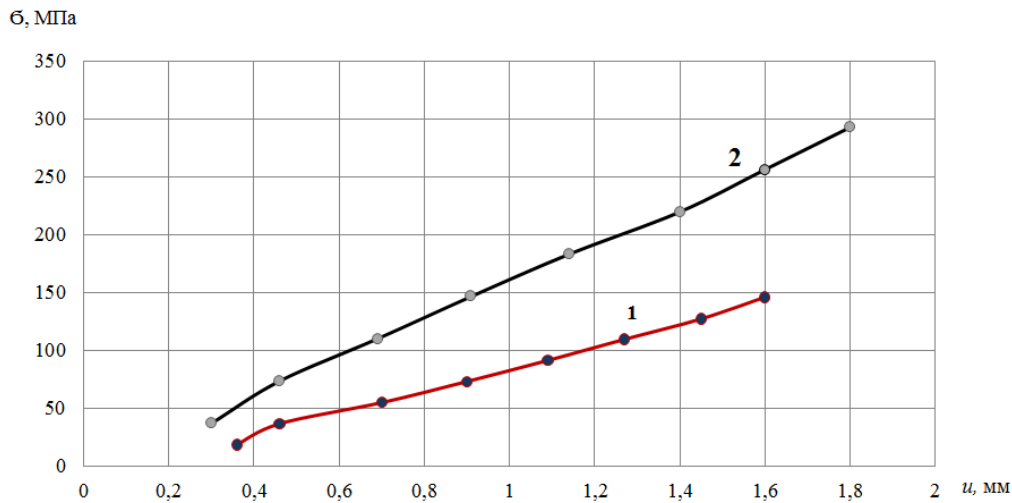
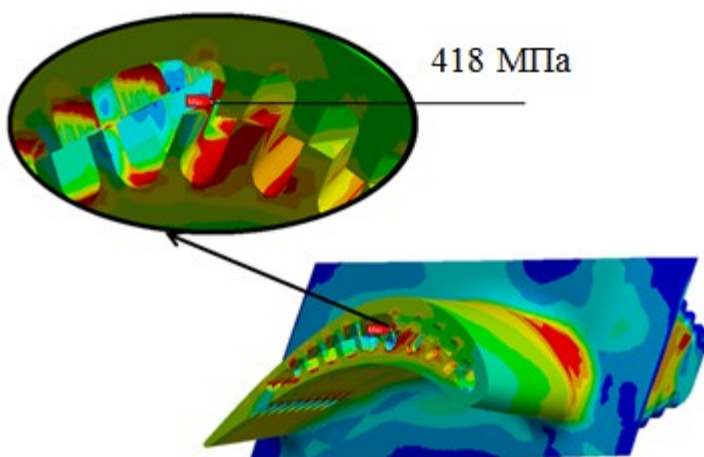


Рис. 8. Залежності еквівалентних напружень і деформацій від температурного поля

На кривій 2 показані залежності деформацій і еквівалентних напружень під впливом робочої температури. Порівняння напружено-деформованого стану монокристалічної охолоджувальної лопатки за температурою 20°C і робочої температури $600 - 800^\circ \text{C}$ показує, що основний вплив на напружено-деформований стан чинить температурне поле.

У четвертому розділі досліджувався вплив повороту кристалографічних осей відносно осей лопатки. На рис. 9, 10 наведено розподіл полів еквівалентних напружень, а також значення максимального напруження у поперечному, повздовжньому зрізах та за об'ємом лопатки при азимутальному відхиленні кристалографічних осей (на різні кути відхилення).

З наведених рисунків видно нерівномірний характер розподілу еквівалентних напружень залежно від кристалографічної орієнтації.



При зміні орієнтації кристалографічних осей відбувається перерозподіл всіх напружень і зміна всієї картини НДС лопатки. Оскільки найбільші еквівалентні напруження можуть бути при цьому в новій області лопатки, то вони залежатимуть також від геометричних особливостей цієї області та її температури.

Рис. 9. Розподіл еквівалентних напружень при повороті кристалографічних осей на кут 30°

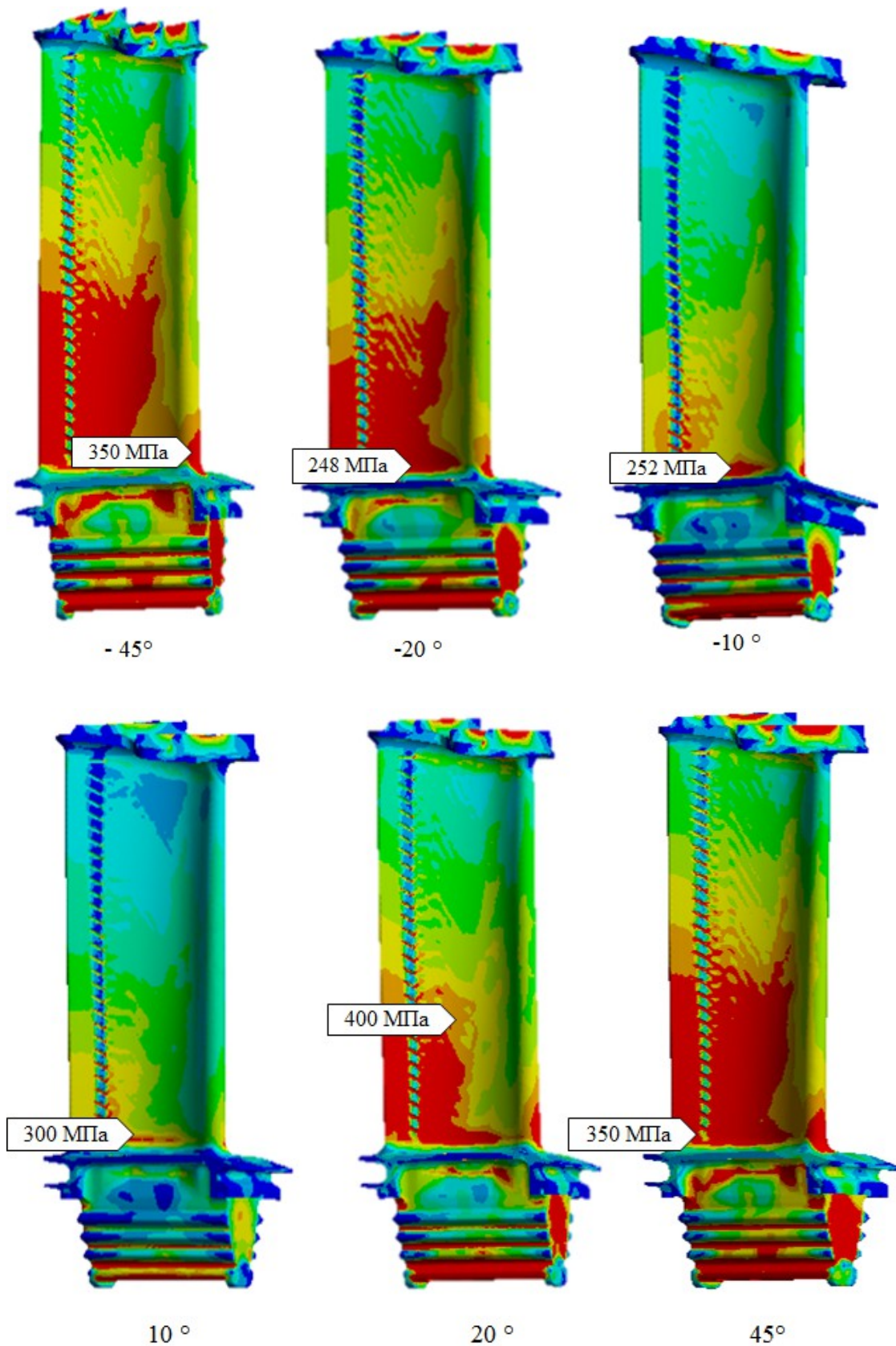


Рис. 10. Зміна полів еквівалентних напружень на поверхні лопатки при азимутальному відхиленні кристалографічних осей на кути 45° , 20° та 10°

На рис. 11, 12 наведені графіки, які відображають зміну найбільших еквівалентних напружень на вхідній та вихідній кромках лопатки, при зміні азимутальної орієнтації КГО.

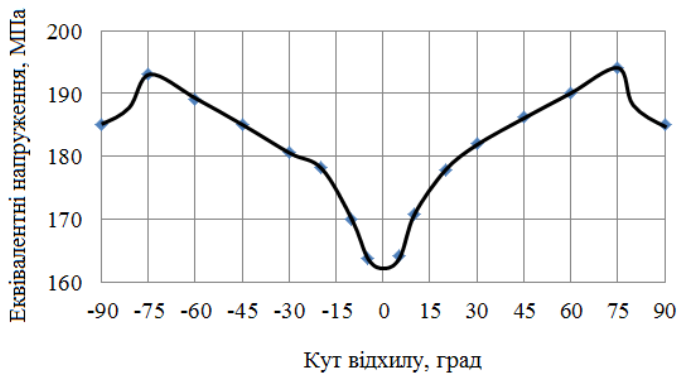


Рис. 11. Зміна еквівалентних напружень на вхідній кромці лопатки при повороті КГО навколо осі [001]

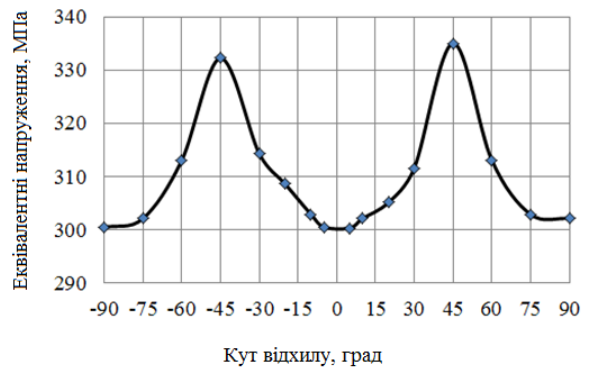


Рис. 12. Зміна еквівалентних напружень на вихідній кромці лопатки при повороті КГО навколо осі [001]

В обох випадках найбільші напруження не перевищують максимальних напружень, які виникають по об'єму лопатки (рис. 13).

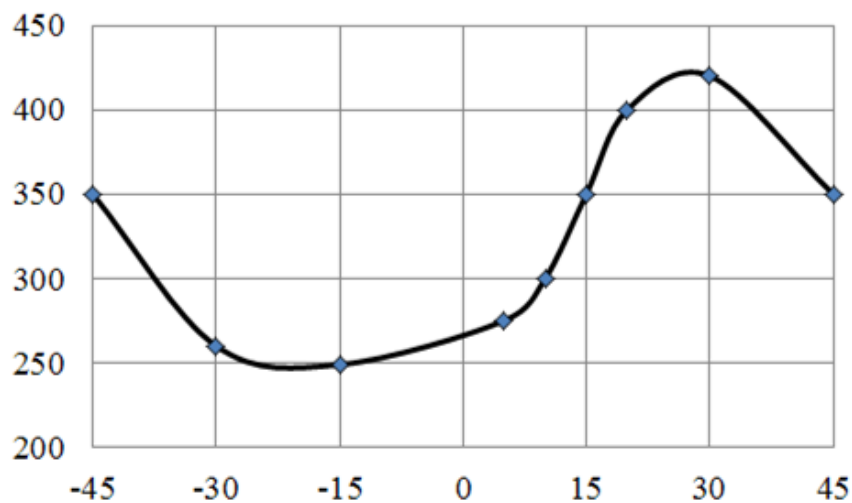


Рис. 13. Зміна еквівалентних напружень по об'єму лопатки при азимутальному відхиленні кристалографічних осей

Далі в дисертаційній роботі розглядається вплив зміни аксіальної орієнтації кристалографічних осей на термонапружений стан охолоджуваної монокристалічної лопатки газотурбінного двигуна. На рис. 13, 14 показано вплив аксіальної орієнтації кристалографічних осей на розподіл еквівалентних напружень у поперечному перерізі та по об'єму лопатки на різні кути відхилення КГО.

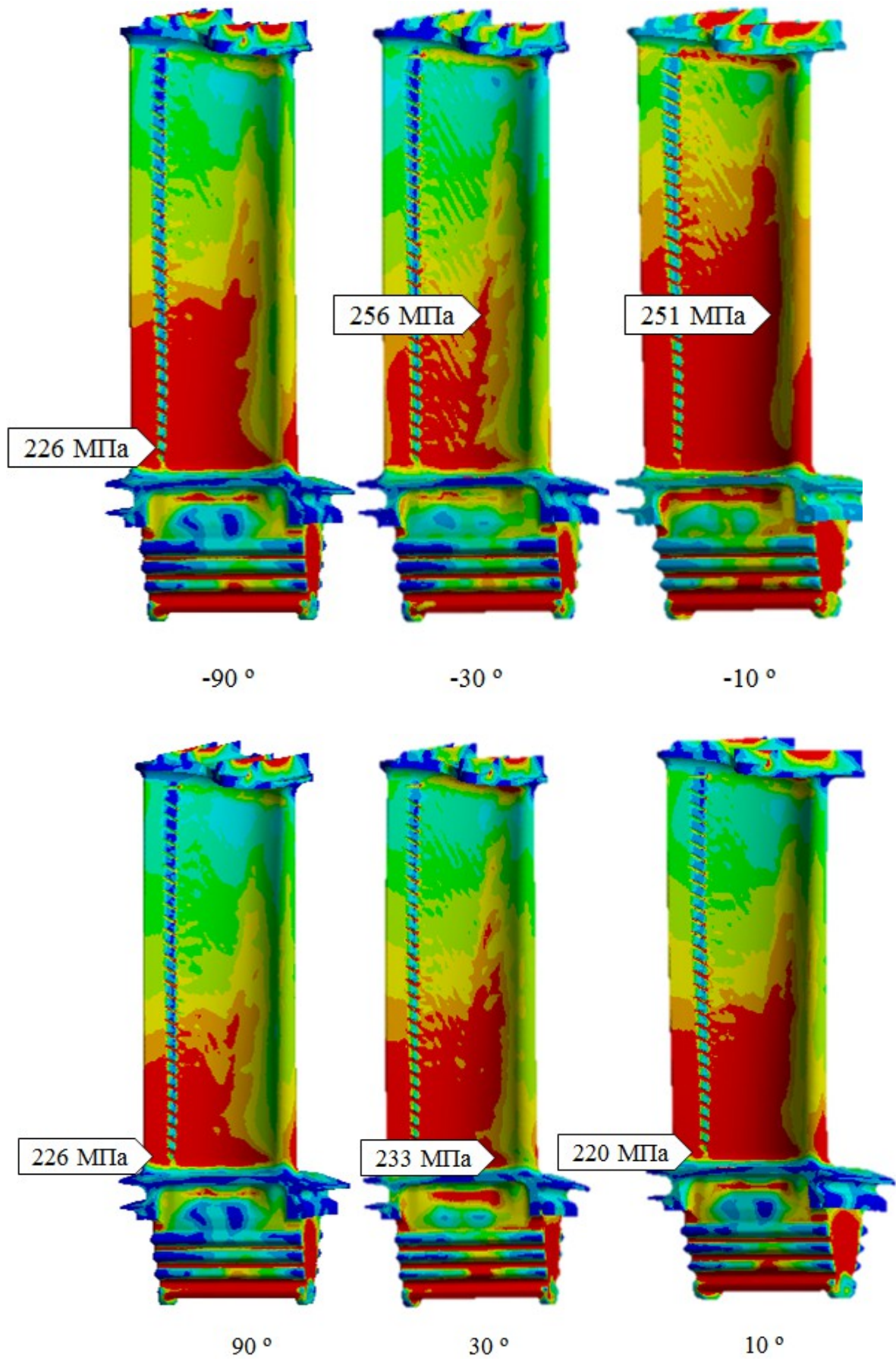


Рис. 14. Розподіл еквівалентних напружень на поверхні лопатки при аксіальній орієнтації КГО

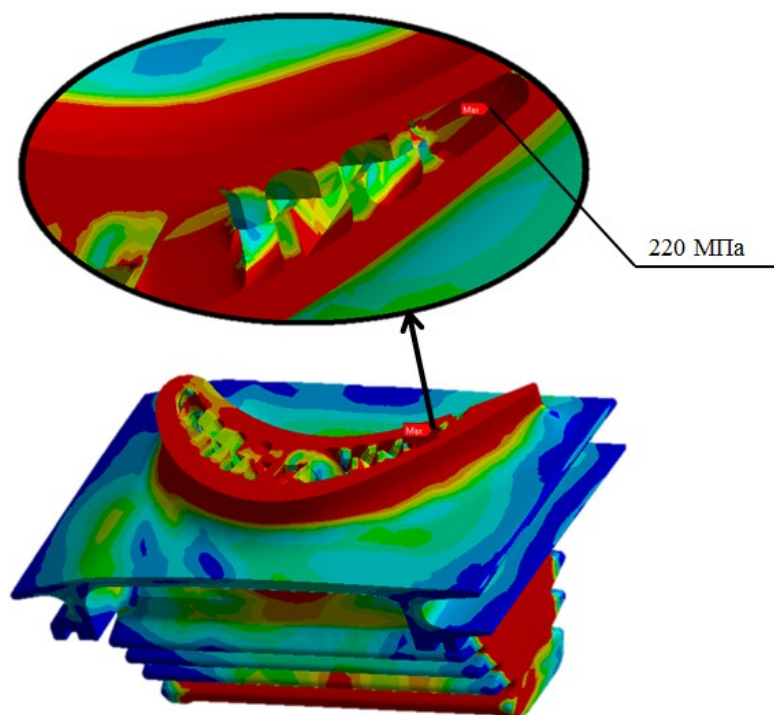


Рис. 15. Розподіл еквівалентних напружень у поперечному перерізі лопатки при повороті на кут 10°

Поперечні перерізи лопатки відображають, що концентрації максимальних еквівалентних напружень знаходяться безпосередньо у каналах для охолоджуваного повітря. З рис. 10, 14 видно, що при повороті кристалографічних осей відбувається перерозподіл всіх напружень. У зв'язку з цим доцільно побудувати деякі криві (рис. 16, 17), які відображають зміну найбільших і найменших еквівалентних напружень незалежно від місць їх локалізації.



Рис. 16. Зміна максимальних еквівалентних напружень

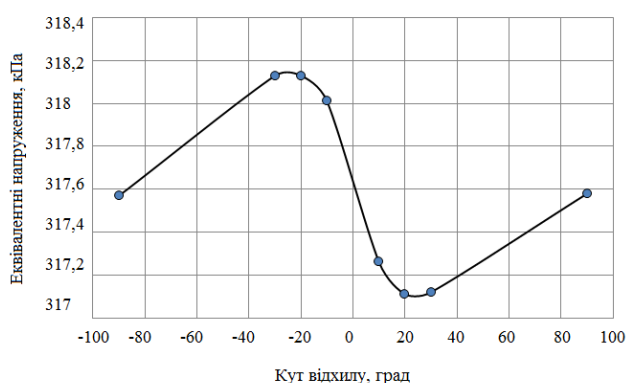


Рис. 17. Зміна мінімальних еквівалентних напружень

На рис. 18 показано вплив повороту кристалографічних осей на розподіл еквівалентних напружень на поверхні лопатки (в площині xu навколо осі z , яка відповідає кристалографічній осі $[001]$). Орієнтація кристалографічних осей істотно впливає на розподіл полів напружень. Кристалографічні осі $[100]$, $[010]$, $[001]$

у даному випадку збігаються з осями лопатки x , y , z . На рис. 17 показано обмеження на поворот кристалографічних осей на кути $\varphi \leq 15^\circ$ та $\psi \leq 15^\circ$.

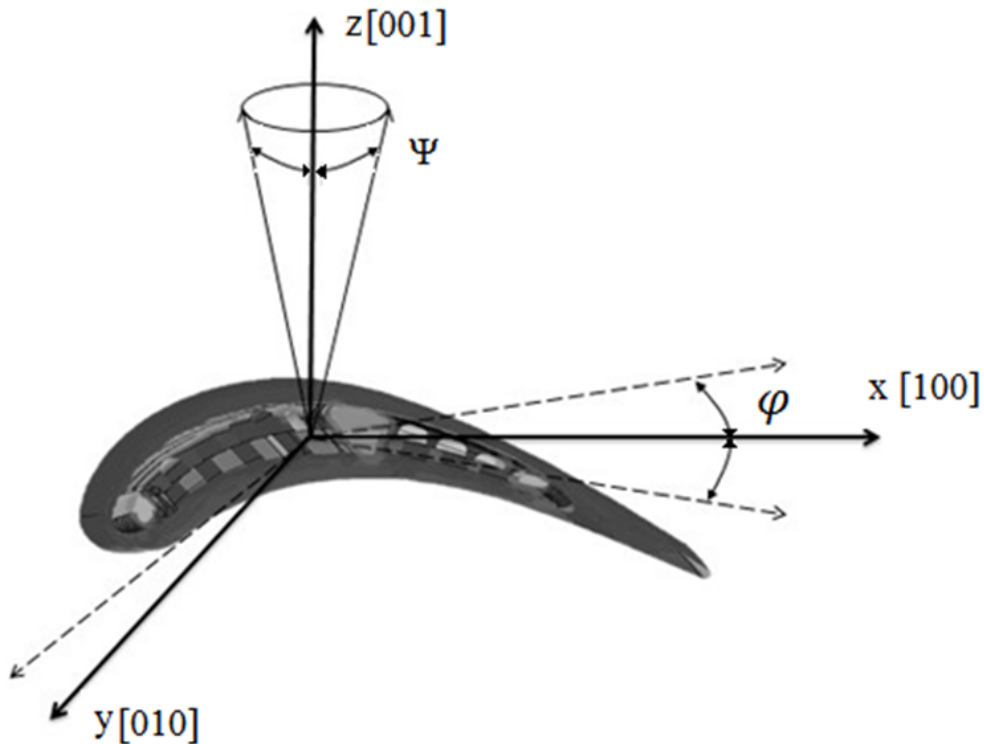


Рис. 18. Область обмеження повороту кристалографічних осей

Деякі результати дослідження впроваджено на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» та ЗМКБ «Прогрес».

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язана актуальна науково-технічна задача динаміки і міцності машин з визначення термопружного напружено-деформованого стану лопатки, а також впливу відхилення орієнтації кристалографічних осей на термопружний стан лопатки.

Основні наукові і практичні результати виконаних досліджень полягають у такому:

1. На основі наведеного аналізу сучасного стану досліджень вибору орієнтації кристалографічних осей, урахування геометрії лопаток, температурних полів, впливу відцентрових сил як напрям дисертаційної роботи обрано визначення впливу відхилення орієнтації кристалографічних осей на термопружний стан лопатки та аналіз розподілу загального термопружного напружено-деформованого стану.

2. Розроблені математична та тривимірна скінченно-елементна моделі охолоджуваної монокристалічної лопатки газотурбінного двигуна з урахуванням конструктивно-технологічних особливостей, форми і

неоднорідності матеріалу, що дозволило провести зв'язані розрахунки з визначення температурного і термопружного станів лопатки.

3. Розв'язано задачу впливу робочої температури і охолоджуючого повітря на розподіл температурного поля за об'ємом монокристалічної охолоджувальної лопатки. Показано безперервну зміну полів температур.

Проведено аналіз напружено-деформованого стану лопатки під дією відцентрових сил. Показано, що найбільше впливає на зміну термопружного НДС лопатки температурне поле (понад 60%).

4. Виявлені місця локалізації та концентрації напружень, показано, що найбільші градієнти напружень виникають безпосередньо в охолоджуючих каналах, що обумовлено перепадом температур;

5. Виявлено вплив зміни орієнтації КГО на НДС лопатки, а саме побудовано залежності:

- найбільших еквівалентних напружень при відхиленні кристалографічних осей у діапазоні від -45° до $+45^\circ$ незалежно від їх місця розташування в лопатці. Показаний циклічний характер зміни еквівалентних напружень;

- зміни еквівалентних напружень від кута повороту для вхідної та вихідної кромки лопатки у точках.

- зміни еквівалентних напружень від кута повороту при аксіальній та азимутальній орієнтації КГО.

6. Проведено оцінку обмежень на зміну кутів повороту КГО для запобігання появі небезпечних термопружних напружень. Показана необхідність обмежень на відхилення кристалографічних осей. При виготовленні монокристалічних лопаток слід дотримуватись того, щоб відхилення кристалографічних осей в площині xu не перевищувало $12^\circ - 15^\circ$, а також до згладжування поверхні кутових форм в охолоджуючих каналах і отворах для виходу охолоджуючого повітря.

7. Деякі результати роботи впроваджені в ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект» та ЗМКБ «Прогрес».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Евченко Т.Ю., Жондковски Р., Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю. Анализ термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД // Механіка та машинобудування. 2013. № 1. С. 23 – 28.

2. Берлизова Т.Ю., Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю., Кулишов С.Б., Скрицкий А.Н. Особенности температурного и термоупругого состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 10 (117). С. 75 – 78.

3. Берлизова Т.Ю., Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю. Зависимость термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки от азимутальной ориентации кристаллографических осей // Вісник НТУ «ХП». Сер. Нові рішення в сучасних технологіях: зб. наук. пр. Харків: НТУ «ХП», 2015. № 39 (1148). С. 21 – 25.

4. Берлизова Т.Ю., Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю., Жондковски Р. Напряженно деформированное состояние охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД в температурном поле с учетом влияния ориентации кристаллографических осей // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2015. №4. С. 15 – 19.
5. Берлизова Т.Ю., Воробьев Ю.С., Махненко О.В., Овчарова Н.Ю., Кулаков П.Н. Проблемы использования новых материалов для лопаточного аппарата турбомашин // Вісник НТУ «ХП». Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування: зб. наук. пр. Харків: НТУ «ХП», 2016. № 9(1181). С. 44 – 49.
6. Берлизова Т.Ю., Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю., Жондковски Р. Влияние азимутальной ориентации кристаллографических осей на термоупругое состояние лопатки ГТД с вихревой системой охлаждения // Проблемы прочности. 2016. №3. С. 15 – 24.
7. Берлизова Т. Ю., Воробьев Ю.С., Жондковски Р., Овчарова Н.Ю. Комплексный анализ термоупругого и вибрационного состояния монокристаллической лопатки с вихревой системой охлаждения // Механіка та машинобудування. 2017. № 1. С. 22 – 31.
8. Berlizova T.Yu., Vorob'ev Yu.S., Ovcharova N.Yu., Êondkowski R. The Influence of Azimuth Orientation of Crystallographic Axes on Thermoelastic State of a GTE Blade with a Vortex Cooling System // Strength of Materials. 2016. Vol. 48. P. 349–356.
9. Берлизова Т.Ю. Термонапряженное состояние охлаждаемых монокристаллических лопаток ГТД с учетом азимутальной ориентации кристаллографических осей // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: междунар. науч.-техн. конф. Харьков: ИПМаш НАН України. 2015. С. 1 – 7.
10. Евченко Т.Ю., Овчарова Н.Ю. Особенности термоупругой задачи для охлаждаемой монокристаллической лопатки газотурбинного двигателя // Сучасні проблеми машинобудування: Тези доповідей. конф. молодих вчених та спеціалістів. Харків: ИПМаш НАН України. 2013. С. 1.
11. Берлизова Т.Ю. Термоупругое состояние охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД с учетом ориентации кристаллографических осей // Сучасні проблеми машинобудування: Тези доп. конф. молодих вчених та спеціалістів. Харків: ИПМаш НАН України. 2014. С. 3.
12. Берлизова Т.Ю. Температурное и термоупругое состояние охлаждаемых монокристаллических лопаток ГТД с учетом ориентации кристаллографических осей // Сучасні проблеми машинобудування: Тези доп. конф. молодих вчених та спеціалістів. Харків: ИПМаш НАН України. 2015. С. 1.
13. Берлизова Т.Ю. Влияние поворота кристаллографических осей на термонапряженное состояние охлаждаемой монокристаллической лопатки // Сучасні проблеми машинобудування: Тези доп. конф. молодих вчених та спеціалістів. Харків: ИПМаш НАН України. 2016. С. 8.
14. Берлизова Т.Ю., Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю., Жондковски Р., Кулаков П.Н. Проблемы статической и вибрационной прочности лопаток

турбомашин при использования новых материалов // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: междунар. науч.-техн. конф. Харьков: ИПМаш НАН України. 2017. С. 1 – 2.

15. Берлизова Т.Ю., Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю. Влияние кристаллографических осей на термонапряженное состояние монокристаллической охлаждаемой лопатки // Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій: VI міжнар. наук.-техн. конф. Запоріжжя. 2017. №1. С. 57 – 64.

АНОТАЦІЯ

Берлізова Т. Ю. Скінченно-елементний аналіз термопружного стану охолоджуваної монокристалічної лопатки газотурбінного двигуна.

– На правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин. – Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, Харків, 2018.

В дисертації розв’язана актуальна науково-технічна задача впливу орієнтації кристаллографічних осей на термопружний стан монокристалічної охолоджуваної лопатки газотурбінного двигуна.

На основі тривимірної моделі монокристалічної лопатки, з урахуванням неперервного розподілу тепла по об’єму лопатки, а також властивостей матеріалів отримані залежності перерозподілу напружень при азимутальній та аксіальній орієнтації кристаллографічних осей. Отримані нові залежності перерозподілу напружень на вхідній та вихідній кромках лопатки, що дозволило надати рекомендації на відхилення азимутальної орієнтації КГО. Вперше отримані залежності перерозподілу еквівалентних напружень для лопатки з вихровою та частково плівковою системами охолодження, при відхиленні аксіальної орієнтації КГО у діапазоні від -45° до $+45^\circ$, що дозволило визначити зони локалізації максимальних напружень і розробити рекомендації на відхилення аксіальної орієнтації КГО.

Ключові слова: газотурбінний двигун, монокристалічна лопатка, азимутальна та аксіальна орієнтація, кристаллографічна вісь.

АННОТАЦИЯ

Берлизова Т. Ю. Конечно-элементный анализ термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки газотурбинного двигателя. – На правах рукописи.

Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, 2018.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача определения влияния ориентации кристаллографических осей на термоупругое состояние монокристаллической охлаждаемой лопатки газотурбинного двигателя.

На основе трехмерной модели монокристаллической лопатки, которая учитывает непрерывное распределение тепла по объему лопатки, а также свойства материала получены зависимости перераспределения напряжений при азимутальной и аксиальной ориентации кристаллографических осей. Определены новые зависимости перераспределения напряжений на входной и выходной кромках лопатки, что позволило определить рекомендации на отклонение азимутальной ориентации кристаллографических осей. Впервые рассчитаны зависимости перераспределения эквивалентных напряжений для лопатки с вихревой и частично пленочной системой охлаждения, при отклонении аксиальной ориентации кристаллографических осей в диапазоне от -45° до $+45^\circ$, что позволило определить зоны локализации максимальных напряжений и разработать рекомендации на отклонение аксиальной ориентации кристаллографических осей.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, монокристаллическая лопатка, азимутальная и аксиальная ориентация, кристаллографическая ось.

ABSTRACT

T.Yu. Berlizova Finite element analysis of the thermoelastic state of a cooled single-crystal blade of a gas turbine engine. – Manuscript copyright

The thesis for a candidate of technical sciences degree in specialty 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines (engineering sciences). – A. Podgorny Institute for mechanical engineering problems NAS Ukraine, Kharkov, 2018.

The thesis solves an actual scientific and technical problem of determining the effect of orientation of crystallographic axes on the thermoelastic state of a single-crystal cooled blade of a gas turbine engine.

The redistribution of stresses under the azimuthal and axial orientations of the crystallographic axes is obtained based on the three-dimensional model of a single-crystal blade, which takes into account the continuous heat distribution over the volume of the blade, and material properties. New dependencies of stress redistribution at the input and output edges of the blade have been determined, which made it possible to develop the recommendations for the deviation of the azimuthal orientation of the crystallographic axes. The dependences of the redistribution of equivalent stresses for a blade with a vortex and partially film cooling system with the axial orientation of the crystallographic axes in the range from -45° to $+45^\circ$ have been calculated for the first time. It allowed determining the location zones of

maximum stresses and developing recommendations for deviation of the axial orientation of the crystallographic axes.

Key words: gas turbine engine, single-crystal blade, azimuthal and axial orientation, crystallographic axis.

Підписано до друку 17.04.2018 р. Формат 60x84/16.
Папір офсетн. Друк – цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Тираж 100 прим. Замовлення № 27

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ» (ФО-П Миронов М.В.)
Свідоцтво ВО4№022953
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua
