

УДК 621.7.043

Орлюк М. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІЛЬНОГО ЗГИНУ ЛОПАТКИ ТУРБІНИ РЕВЕРСА

Однією з важливих задач у вітчизняному машинобудуванні є створення високоефективних технологічних процесів, які забезпечують зниження трудомісткості, витрат матеріалу і скорочення ручної праці з одночасним підвищенням якості, експлуатаційних і технологічних властивостей продукції, що випускається. Це завдання актуальне і в сучасному виробництві авіадвигунів, зокрема при виготовленні лопаток.

В залежності від призначення та умов роботи лопатки виготовляють гарячим штампуванням, пресуванням, прокаткою або вальцюванням з подальшою механічною обробкою [1, 2].

З метою зменшення тривалості циклу виробництва та витрат при виготовленні лопатки турбіни реверса фахівцями НВО «Мотор Січ» запропонована схема формоутворення лопатки шляхом гнуття попередньо спрофільованої заготовки по схемі консольного згину в штампі (рис. 1).

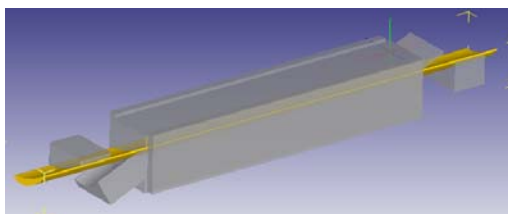


Рис. 1. Схема консольного вільного гнуття

При цьому заготовка має встановлюватись в штамп у такому положенні, яке вона займає в конструкції турбіни, а саме – хорда профілю повернута приблизно на кут $22,4^\circ$ (рис. 2).

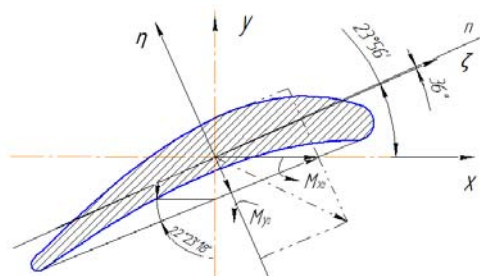


Рис. 2. Профіль лопатки

Мета роботи – встановлення особливостей процесу формоутворення лопатки турбіни шляхом консольного відгину кінців лопатки в штампі та розробка рекомендацій для проектування штампового оснащення.

Відомо [3, 4], що для більшості аеродинамічних профілів хорда практично паралельна одній із головних центральних осей (похибка не перевищує 3–4 %). При цьому зусилля при гнутті прикладається в напрямку осі OY (рис. 2), тобто згин проходить в площині XOY , яка не співпадає з площиною головних центральних осей і поворот площин поперечних перерізів проходить навколо осі OX під дією моменту M_x , вектор якого направлений в напрямку цієї осі.

Для аналізу НДС і визначення розподілу напружень та деформацій в поперечному перерізі згинаючий момент M_x розкладають на два моменти згину, що діють по головних центральних осях $O\zeta, O\eta$:

$$M_\zeta = M_x \cos \alpha, \quad M_\eta = M_x \sin \alpha, \quad (1)$$

де α – кут нахилу головних осей, $\alpha = 23,9^\circ$ (кут визначено засобами КОМПАС – Графік).

Тоді в пружній стадії деформування деформації, напруження і переміщення можна знаходити алгебраїчним сумування деформацій, напружень і переміщень від кожного з цих моментів, користуючись відомими з теорій пружності і опору матеріалів залежностями [3]. Так напруження відносно головних осей розраховують наступним чином:

$$\sigma_{M_{\zeta}}(\zeta, \eta) = \frac{M_{\zeta}}{I_{\zeta}} \eta, \quad \sigma_{M_{\eta}}(\zeta, \eta) = \frac{M_{\eta}}{I_{\eta}} \zeta, \quad (2)$$

де I_{ζ} , I_{η} – відповідні моменти інерції, мм⁴;

ζ , η – координати точки, для якої розраховують напруження, мм.

Рівняння нейтральної лінії при гнутті знаходять з рівності:

$$\sigma(\zeta, \eta) = 0, \quad (3)$$

де $\sigma(\zeta, \eta) = \sigma_{M_{\zeta}} + \sigma_{M_{\eta}}$.

З урахуванням залежностей (2) отримаємо:

$$\eta = -\frac{M_{\eta}}{M_{\zeta}} \cdot \frac{I_{\zeta}}{I_{\eta}} \zeta, \quad (4)$$

або

$$\eta = -k \cdot \zeta, \quad (5)$$

де $k = \frac{M_{\eta}}{M_{\zeta}} \cdot \frac{I_{\zeta}}{I_{\eta}}$ – кутовий коефіцієнт нахилу нейтральної лінії до осі ζ , $k = \operatorname{tg} \psi$.

З урахуванням (1) отримаємо:

$$\operatorname{tg} \psi = -\frac{I_{\zeta}}{I_{\eta}} \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (6)$$

Тоді кут нахилу нейтральної лінії становить:

$$\psi = \operatorname{arctg} \left(-\frac{I_{\zeta}}{I_{\eta}} \cdot \operatorname{tg} \alpha \right) = \operatorname{arctg} \left(-\frac{62382,4}{1986226,3} \cdot \operatorname{tg} 23,9^{\circ} \right) = -0,8^{\circ}, \quad (7)$$

тобто $23,1^{\circ}$, що практично співпадає з хордою. Значення моментів інерції визначені засобами КОМПАС – Графік.

Результати комп'ютерного моделювання у середовищі DEFORM 3D консольного гнуття кінців лопатки підтверджують, що нейтральна лінія практично співпадає з однією із головних центральних осей, або паралельна хорді (рис. 3), однак при вільному гнутті відбувається викривлення заготовки (рис. 4).

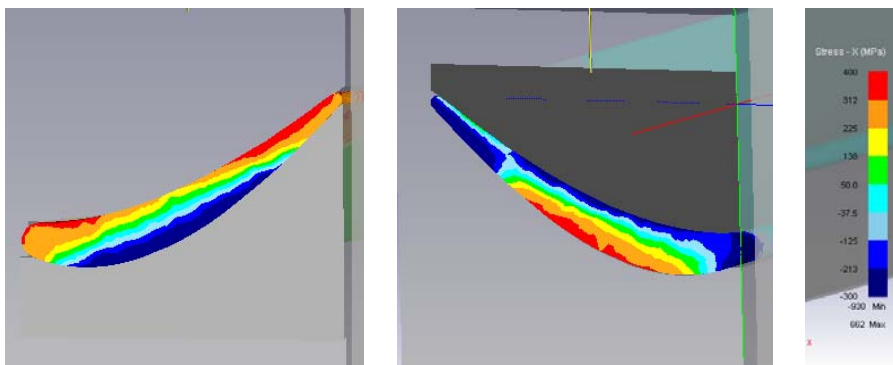


Рис. 3. Розподіл окружних напружень в місці згину кінців лопатки

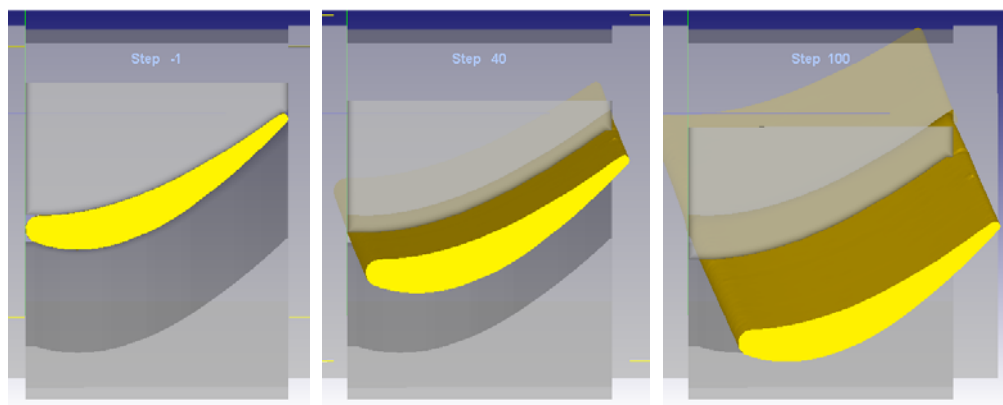


Рис. 4. Послідовність вільного гнуття кінців лопатки.

При цьому у тих частинах поперечного перерізу, що знаходяться в стисненому (в повздовжньому напрямку) стані і мають малу жорсткість, можлива втрата стійкості (рис. 5).

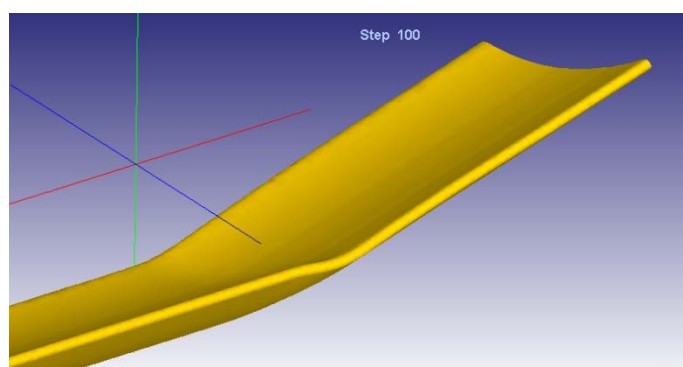


Рис. 5. Втрата стійкості пера лопатки в стисненій зоні

Слід звернути увагу на те, що стискаючі напруження в цих зонах викликають обидва компоненти моменту M_x (як M_ζ , так і M_η). І одним з способів компенсації їх впливу може бути додатковий згин навколо осі $O\zeta$. При цьому необхідного результату можна досягти застосовуючи згин по схемі «розтяг + поперечний згин при постійному розтягу», тобто згин в розтягнутому стані [5], або згин з додатковим скручуванням [6].

Для реалізації згину в розтягнутому стані елементи штампа, що затискають кінці лопатки, повинні мати можливість переміщуватись в процесі згину одночасно як в напрямку осі OY , так і в напрямку $O\zeta$. При цьому зміщення консольної частини лопатки в напрямку осі OX (або $O\zeta$) має викликати такий момент відносно осі $O\eta$, при якому в крайніх волокнах профілю напруження досягли величини σ_T .

Розглянемо принципову схему такого згину (рис. 6):

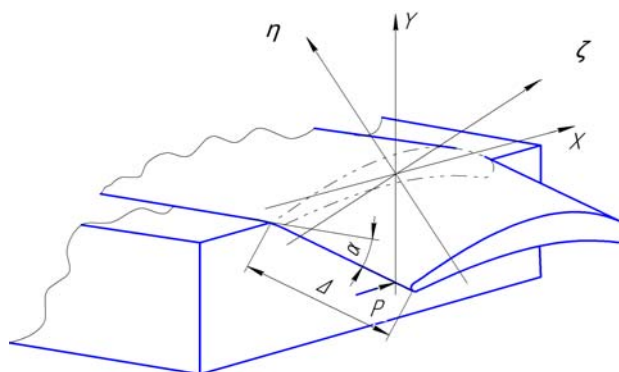


Рис. 6. Принципова схема згину

Розглянемо згин в головній площині $\zeta O\eta$. Виходячи з умови рівності моментів зовнішніх і внутрішніх сил та приймаючи до уваги, що момент зовнішніх сил $M_{зн}$ повинен дорівнювати по модулю моменту внутрішніх сил M_η , запишемо:

$$M_{зн} = M_\eta = M_x \sin \alpha. \quad (8)$$

Припустимо, що частину лопатки, яка підлягає згину, має довжину Δ і її потрібно відігнути в напрямку головної осі інерції $O\zeta$ зусиллям, прикладеним до кінця. Тобто, прийемо схему згину консолі зусиллям P . Тоді момент зовнішніх сил $M_{зн} = P \cdot \Delta$ і

$$M_\eta = M_{зн} = P \cdot \Delta. \quad (9)$$

На відстані z від затиснутої частини лопатки момент дорівнює:

$$M_\eta(z) = (\Delta - z)P. \quad (10)$$

Рівняння пружної лінії, як відомо має вигляд [3]:

$$\frac{d^2W}{dz^2} = \frac{M_\eta(z)}{EI_\eta} = \frac{P}{EI_\eta}(\Delta - z)C. \quad (11)$$

Після інтегрування одержимо:

$$\frac{dW}{dz} = \varphi(z) = \frac{P}{EI_\eta} \left(\Delta \cdot z - \frac{z^2}{2} \right) + C_1, \quad (12)$$

$$W(z) = \frac{P}{EI_\eta} \left(\Delta \cdot \frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{6} \right) + C_1 z + C_2, \quad (13)$$

При $z = 0$ лівий кінець консолі затиснутий притискачем, і $W(z) = 0$ і $\varphi(z) = 0$. Тоді

$$W(\Delta) = \frac{P}{EI_\eta} \left(\frac{\Delta^3}{2} - \frac{\Delta^3}{6} \right) = \frac{P}{EI_\eta} \cdot \frac{\Delta^3}{6} = \frac{P \cdot \Delta}{EI_\eta} \cdot \frac{\Delta^2}{6}. \quad (14)$$

З урахуванням (8) і (9) отримаємо

$$W(\Delta) = \frac{M_x}{EI_\eta} \cos \alpha \cdot \frac{\Delta^2}{6}. \quad (15)$$

При допущенні чисто пластичного поперечного згину в напрямку осі OY без деформаційного зміцнення матеріалу заготовки момент M_x можна представити у вигляді:

$$M_x = M_{зн} + M_{вн}, \quad (16)$$

де $M_{зн}$ – момент згину частини площі поперечного перетину заготовки, що лежить вище нейтральної лінії, Нм;

$M_{вн}$ – момент згину частини площі поперечного перетину заготовки, що лежить нижче нейтральної лінії, Нм.

В свою чергу

$$M_{зн} = \sigma_T \cdot F_{зн} \cdot \eta_{цв}^{зн}, \quad M_{вн} = \sigma_T \cdot F_{вн} \cdot \eta_{цв}^{вн}, \quad (17)$$

де σ_T – межа текучості матеріалу, МПа;

$F_{зн}, F_{вн}$ – відповідні частини площі поперечного перетину заготовки, мм²;

$\eta_{цв}^{зн}, \eta_{цв}^{вн}$ – відповідні відстані центрів ваги частин площ до осі, мм.

З урахуванням (16) і (17) вираз (15) можна представити у вигляді:

$$W(\Delta) = \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{\Delta^2}{6I_\eta} \cdot \left(F_{зн} \cdot \eta_{цв}^{зн} + F_{вн} \cdot \eta_{цв}^{вн} \right) \cos \alpha. \quad (18)$$

Тобто, щоб компенсувати момент M_η від поперечного згину в напрямку осі η слід відігнути кінець консолі на величину $W(\Delta)$ в напрямку осі $O\zeta$ або повернути її на кут, що визначається із співвідношення:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{W(\Delta)}{\Delta} = \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{\Delta}{6I_\eta} \cdot (F_{3H} \cdot \eta_{ц\epsilon}^{3H} + F_{вH} \cdot \eta_{ц\epsilon}^{вH}) \cos \alpha. \quad (19)$$

Виходячи з отриманих залежностей слід проектувати механізми штампу для згинання.

Однак викладені залежності параметрів пластичного згину отримані з суттєвими припущеннями і потребують подальшого уточнення.

ВИСНОВКИ

В статті проведено теоретичний аналіз та моделювання процесу формоутворення лопатки турбіни шляхом консольного відгину кінців лопатки в штампі. Отримані результати дозволяють спрогнозувати поведінку матеріалу заготовки в процесі деформування та усунути виявлені недоліки вільного гнуття при проектуванні штампового оснащення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Демин Ф. И. *Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей.* / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М. : Машиностроение, 2002. – 328 с.
2. Крымов В. В. *Производство лопаток газотурбинных двигателей.* / В. В. Крымов, Ю. С. Елисеев, К. И. Зудин – М. : Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2002. – 376 с.
3. Писаренко Г. С. *Справочник по сопротивлению материалов* / Г. С. Писаренко – Киев, «Наукова думка», 1988. – 736 с.
4. Еришов А. Г. *Теория и технология формообразования криволинейных деталей летательных аппаратов из профилей сложных несимметричных и замкнутых форм сечений* : диссертация ... доктора технических наук: 05.03.05. / А. Г. Еришов – Москва, 1993. – 436 с. : ил.
5. Попов Е. А. *Основы теории листовой штамповки* / Е. А. Попов – М. : Машиностроение, 1968. – 283 с.
6. Перевалов А. А. *Исследование процесса гибки с одновременной закруткой длинномерных деталей летательных аппаратов из прессованных профилей* : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов» / А. А. Перевалов. – Комсомольск-на-Амуре, 2012. – 24 с.

REFERENCES

1. Demin F. I. *Tehnologija izgotovlenija osnovnyh detalej gazoturbinyh dvigatelej.* / F. I. Demin, N. D. Pronichev, I. L. Shitarev. – M. : Mashinostroenie, 2002. – 328 s.
2. Krymov V. V. *Proizvodstvo lopatok gazoturbinyh dvigatelej.* / V. V. Krymov, Ju. S. Eliseev, K. I. Zudin – M. : Mashinostroenie/Mashinostroenie-Polet, 2002. – 376 s.
3. Pisarenko G. S. *Spravochnik po soprotivleniju materialov* / G. S. Pisarenko – Kiev, «Naukova dumka», 1988. – 736 s.
4. Ershov A. G. *Teorija i tehnologija formoobrazovanija krivolinejnyh detalej letatel'nyh apparatov iz profilej slozhnyh nesimmetrichnyh i zamknutyh form sechenij* : dissertacija ... doktora tehniceskikh nauk: 05.03.05. / A. G. Ershov – Moskva, 1993. – 436 s. : il.
5. Popov E. A. *Osnovy teorii listovoj shtampovki* / E. A. Popov – M. : Mashinostroenie, 1968. – 283 s.
6. Perevalov A. A. *Issledovanie processa gibki s odnovremennoj zakrutkoj dlinnomernyh detalej letatel'nyh apparatov iz pressovannyh profilej* : avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.07.02 «Proektirovanie, konstrukcija i proizvodstvo letatel'nyh apparatov» / A. A. Perevalov. – Komsomol'sk-na-Amure, 2012. – 24 s.

Орлюк М. В. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»

НТУУ «КПІ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: minorkpi@ukr.net