

УДК 539.373: 621.438

**Качан А. Я.** д-р техн. наук, зав. кафедрой технологии авиационных двигателей Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: opt.ugt@motorsich.com;  
**Уланов С. А.** аспирант кафедры технологии авиационных двигателей Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: opt.ugt@motorsich.com

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕРЕ ЛОПАТОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ

**Цель работы.** Повышение качества формирования поверхностного слоя пера рабочих лопаток осевого компрессора авиационного двигателя.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования формирования остаточных напряжений в поверхностном слое пера рабочих лопаток компрессора на формообразующем и отделочно-упрочняющем этапах их изготовления различными технологическими методами.

**Полученные результаты.** Представлены результаты экспериментальных исследований формирования остаточных напряжений в поверхностном слое пера рабочих лопаток компрессора, изготавливаемых точной горячей штамповкой, калибровкой, холодным вальцеванием, виброполированием, ручной доводкой, ультразвуковым упрочнением и термообработкой, выполняемой после применения каждого технологического метода и на этапе формообразования.

Проведен системный анализ величины, знака и эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток, как на формообразующем, так и на отделочно-упрочняющем этапах изготовления с учетом проявления технологической наследственности, как после применения каждого технологического метода, так и их совокупности.

Показано, что после точной горячей штамповки и калибровки в поверхностном слое пера заготовок рабочих лопаток наблюдаются растягивающие остаточные напряжения.

Холодное вальцевание пера лопатки, выполняемое за три перехода после точной горячей штамповки с соответствующей термообработкой на каждом переходе, приводит к резкому изменению эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое. Растягивающие остаточные напряжения снижаются и стабилизируются в поверхностном слое на более низком уровне.

Для повышения качества поверхностного слоя пера рабочей лопатки компрессора после формообразующего этапа выполняют отделочно-упрочняющую обработку, которая включает вибрационное полирование, ручную доработку профиля пера и ультразвуковое упрочнение стальными шариками.

Вибрационное полирование, ручная доводка профиля пера и ультразвуковое упрочнение формируют в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия с максимальной величиной на поверхности и максимальной глубиной распространения.

**Научная новизна.** Установлены закономерности формирования остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое пера рабочих лопаток компрессора с учетом проявления технологической наследственности после каждого применяемого технологического метода и термообработки. Установлено влияние совокупности технологических методов и вида термообработки на величину и характер эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое пера рабочих лопаток из титанового сплава.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что полученные результаты позволяют технологически обеспечить повышение качества изготовления рабочих лопаток компрессора.

**Ключевые слова:** технологические методы; рабочая лопатка; остаточные напряжения; поверхностный слой; качество; упрочнение; полирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Ресурс и надежность авиационных двигателей в основном определяются несущей способностью рабочих лопаток компрессора, на которые в процессе их эксплуатации воздействуют

знакопеременные и циклические нагрузки с большой частотой.

При изготовлении рабочих лопаток осевого компрессора наибольшее применение получили методы пластического деформирования и механической обработки, которые используют в ос-

новном при их формообразовании, а для обеспечения их несущей способности применяют отделочно-упрочняющие технологии.

При разработке технологии изготовления рабочих лопаток осевого компрессора с высокими значениями параметров качества поверхностного слоя аэродинамических поверхностей учитывают влияние технологической наследственности предшествующих операций.

## 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В процессе изготовления деталей различными технологическими методами обработки образуется поверхностный слой, состояние которого определяет качество поверхности [1–5].

Качество поверхностного слоя деталей определяется совокупностью характеристик шероховатости, волнистости, физико-механических свойств, микроструктуры металла и остаточных напряжений [6].

Качество поверхностного слоя – шероховатость поверхности, структура, наклеп и остаточные напряжения оказывают существенное влияние на такие важные эксплуатационные свойства деталей как износостойкость, статическую, длительную прочность и сопротивление усталости.

Экспериментальными исследованиями установлено, что растягивающие остаточные напряжения снижают предел выносливости, а сжимающие остаточные напряжения его повышают [7, 8].

Поэтому в процессе изготовления деталей очень важным является технологическое обеспечение формирования в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений [9].

В процессе формирования в поверхностном слое рациональных сжимающих остаточных напряжений необходимо учитывать проявление технологической наследственности, под которой подразумевается явление переноса свойств от предшествующих операций к последующим [8, 9].

## 2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Повышение качества формирования поверхностного слоя пера рабочих лопаток осевого компрессора авиационного двигателя.

## Материалы и методы исследования

В качестве материала при изготовлении рабочих лопаток III ступени КНД осевого компрессора двигателя Д-36 применялся титановый сплав ВТ3-1.

Экспериментально исследовались следующие технологические методы изготовления рабочих лопаток компрессора: точная горячая штамповка и калибровка, холодное вальцевание, термообработка, виброполирование, ручная доводка эластичным абразивным инструментом, ультразвуковое упрочнение стальными шариками.

### Точная горячая штамповка

Наиболее производительным и экономичным методом формообразования пера рабочих лопаток компрессора является точная горячая штамповка, которая выполняется по следующей технологической схеме (рис. 1) [7].

Горячая штамповка рабочих лопаток компрессора выполнялась на гидровинтовом прессе LVH-1000 (рис. 2) [9].

Режимы точной горячей штамповки заготовок рабочих лопаток из титановых сплавов: температура нагрева заготовки, °С ...  $920_{-10}^{+20}$ ; максимальное время выдержки, мин ...30,0; температура конца штамповки, °С ...650.

Штамповка заготовок лопаток производилась в штампе напряженной конструкции, подогретым до 150...350 °С газовыми горелками. Профиль ручья во вставке штампа выполнялся в соответствии с геометрией заготовки лопатки с точностью  $\pm 0,01$  мм и шероховатостью рабочих поверхностей  $R_a = 0,2$  мкм. В качестве смазки применялся нитрид бора.

Температурное поле на поверхности контакта заготовки лопатки с верхним и нижним штампами распределялось неравномерно и изменялось в диапазоне от 316 до 396 °С в контакте с верхним штампом и в диапазоне от 339 до 393 °С - с нижним штампом [9]. Максимум температуры на поверхности контакта заготовки лопатки с нижним и верхним штампом практически совпадает с максимумом полного усилия, развиваемым прессом (рис. 3) [9].

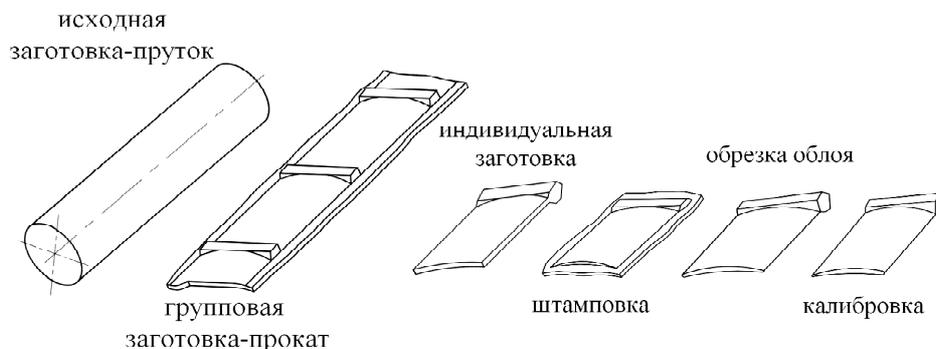


Рисунок 1. Последовательность технологических переходов точной горячей штамповки рабочих лопаток компрессора из прутка

**Холодное вальцевание пера лопаток**

Холодное вальцевание пера лопаток из титанового сплава ВТ3-1 выполнялось на специальной установке УВЛ-100-6 [9].

В заготовках лопаток после точной штамповки был изготовлен хвостовик и образованы поверхности перехода пера к полке в корневом сечении, а также входные и выходные кромки.

Припуск по перу составлял 0,05...0,2 мм на сторону.

Процесс холодного вальцевания пера лопатки определяется совокупностью геометрических силовых параметров.

Геометрические параметры заготовки:

- толщина входной кромки,  $C_1$ ;
- наибольшая толщина пера,  $C_{max}$ ;
- толщина выходной кромки,  $C_2$ ;
- смещение пера лопатки в направлении оси у от номинального.

Силовые параметры установки вальцевания:

- давление в цилиндре вальцевания,  $V_B$ ;
- противодействие в цилиндре;
- распорное усилие,  $P$ .

Изменение параметров процесса холодного вальцевания во времени показано на осциллограмме (рис. 4) [9].

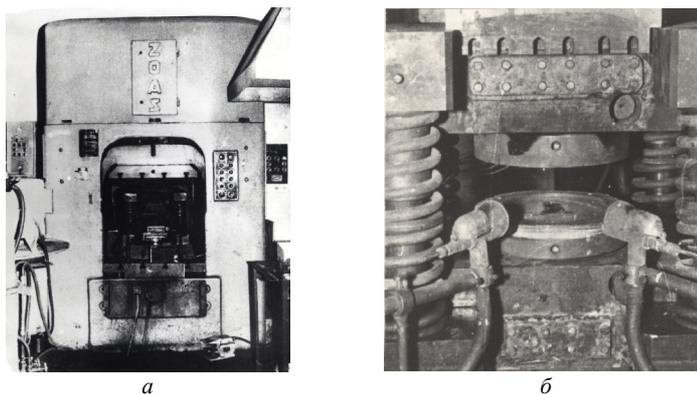


Рисунок 2. Гидровинтовой пресс типа LVH – 1000 (а) и его рабочая зона (б)

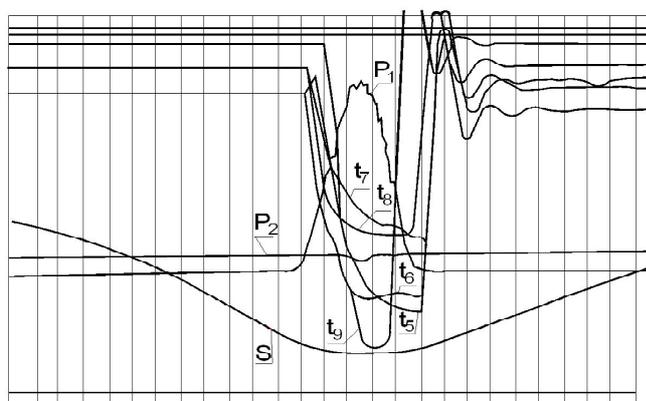


Рисунок 3. Осциллограмма контактных температур и усилий при горячей штамповке заготовок лопаток

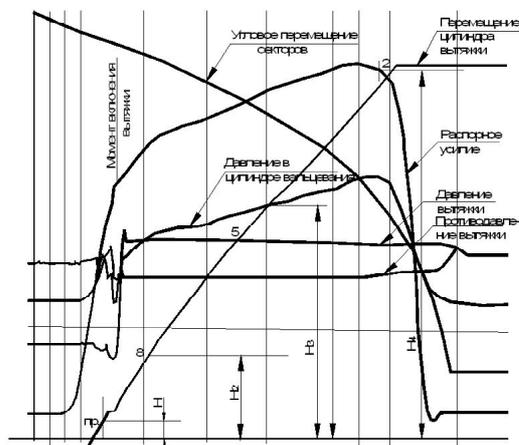


Рисунок 4. Осциллограмма изменения параметров процесса холодного вальцевания пера лопатки

Холодное вальцевание пера заготовки лопатки компрессора выполнялось за 3 перехода. После горячей штамповки и калибровки профиля осуществляют обесчку облоя и скругления входных и выходных кромок, а также проводят их термообработку – закалку при температуре 930 °С с выдержкой 20...30 мин. Охлаждение в воде с температурой не более 40 °С (рис. 5).

После выполнения каждого перехода холодного вальцевания пера заготовок лопаток выполняли обесчку облоя по контуру профиля пера

лопатки и скругление входных и выходных кромок, а также термообработку – высокотемпературный отжиг при температуре 920°С в вакууме в течение 2 часов.

После выполнения холодного вальцевания пера рабочих лопаток производился, при температуре 590 °С в аргоне, низкотемпературный отжиг.

Отделочно-упрочняющую обработку рабочих лопаток компрессора с учетом проявления технологической наследственности проводили в соответствии с технологической схемой (рис. 6).

штамповка + калибровка → закалка → вальцевание за 3 перехода → низкотемпературный отжиг

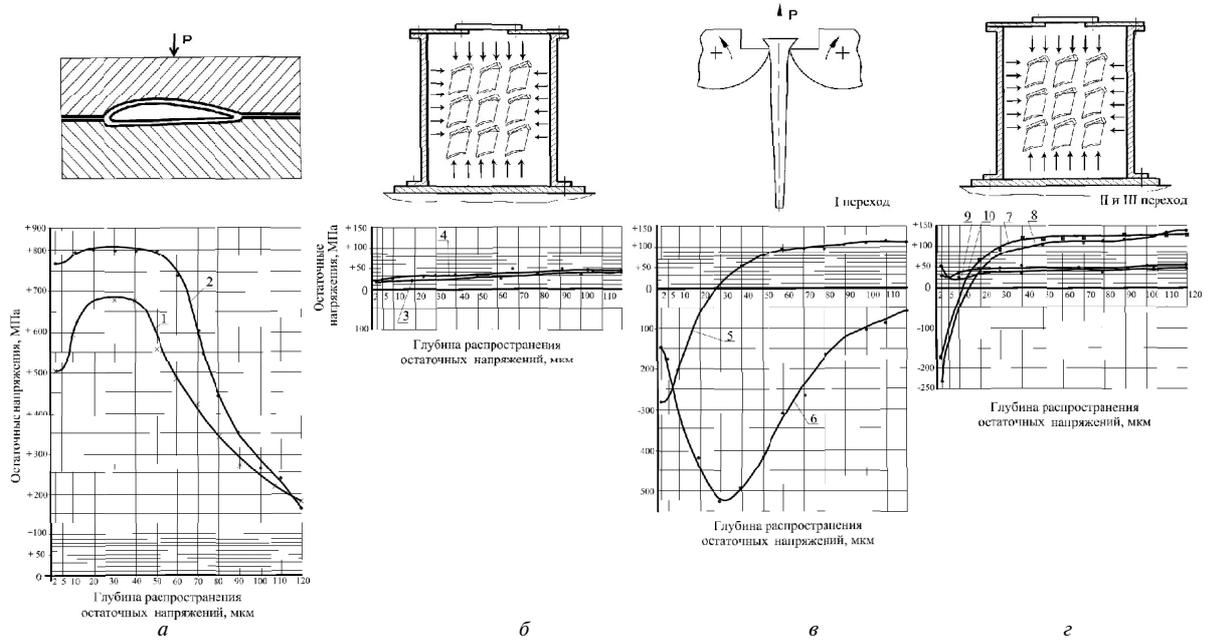


Рисунок 5. Технологическая схема формообразования пера рабочей лопатки компрессора

виброполирование → ручная доводка → УЗУ

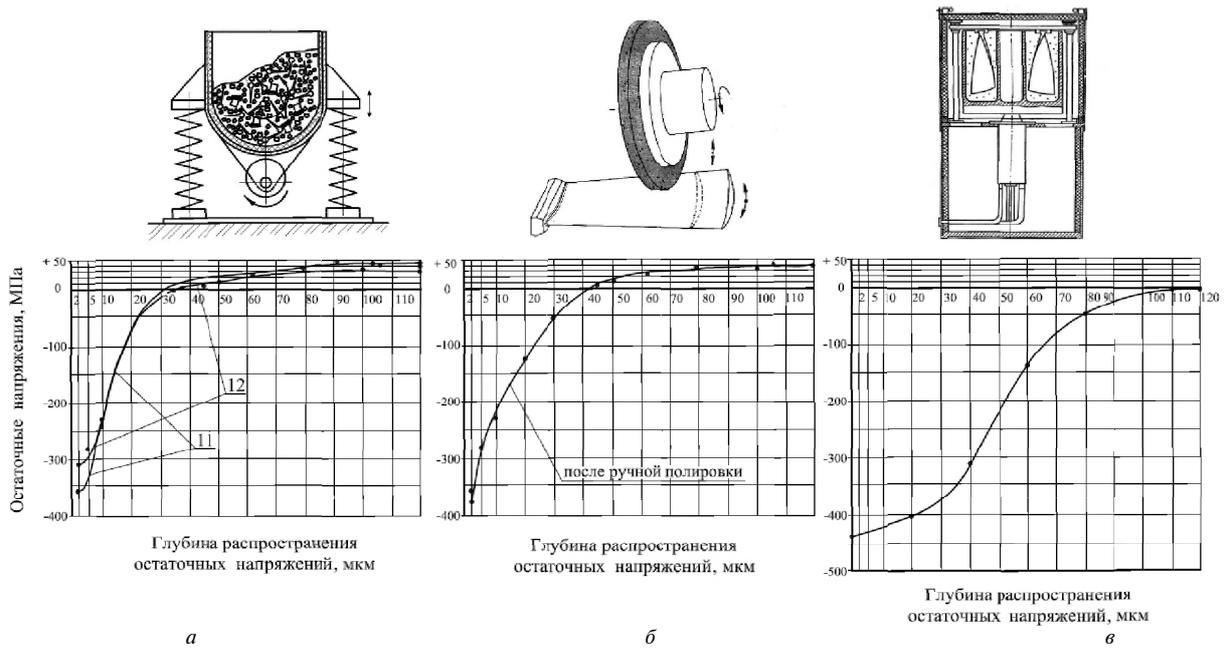


Рисунок 6. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностей пера рабочих лопаток компрессора

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования влияния технологической наследственности применяемых технологических методов изготовления рабочих лопаток компрессора на закономерности формирования остаточных напряжений в поверхностном слое пера проводились в соответствии с технологическими схемами (см. рис. 5, 6).

Кривые 1, 2 – соответственно распределение остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопатки после точной горячей штамповки и калибровки.

После точной горячей штамповки в заготовках поковок наблюдаются растягивающие остаточные напряжения, которые на глубине до 50 мкм достигают значения 800 МПа.

После калибровки поковок растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое снижаются и на глубине 30...40 мкм их величина достигает 675 МПа (см. рис. 5а).

Кривые 3, 4 – распределение остаточных напряжений в поверхностном слое после закалки заготовок лопаток перед их вальцеванием.

После закалки величина растягивающих остаточных напряжений снижается до 25...50 МПа (см. рис. 5б).

Кривые 5, 6 – распределение остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок лопаток после первого вальцевания, высокотемпературного отжига и закалки соответственно. После вальцевания характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое резко изменится и на глубине 2 мкм они становятся сжимающими, а в зависимости от вида термообработки принимают значения 500...550 МПа, а на глубине 30...40 мкм плавно переходят в растягивающие, равные 100 МПа (см. рис. 5б, в).

Кривые 7, 8 – распределение остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок лопаток после второго вальцевания, прошедших отжиг и закалку.

Кривые 9, 10 – распределение остаточных напряжений в поверхностном слое пера заготовки лопаток после третьего вальцевания и низкотемпературного отжига.

После второго вальцевания и последующей термообработки на поверхности наблюдаются остаточные сжимающие напряжения, величиной 175...230 МПа, которые на глубине 10...15 мкм плавно переходят в растягивающие.

После третьего вальцевания и термообработки в поверхностном слое лопаток наблюдаются растягивающие напряжения величиной до 50 МПа (см. рис. 5г).

Таким образом, после выполнения формообразующей обработки пера лопатки пластическим деформированием, в соответствии с технологической схемой (см. рис. 5а–г) в поверхностном слое наблюдается стабилизация величины (до

50 МПа) растягивающих остаточных напряжений, что снижает параметры качества поверхностного слоя.

На втором этапе изготовления рабочих лопаток компрессора применяют отделочно-упрочняющую обработку в соответствии с технологической схемой (см. рис. 6а–в), которая включает: виброполирование, ручную доводку профиля пера и ультразвуковое упрочнение (УЗУ).

Виброполирование наводит на глубине 2 мкм в поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения с максимальной величиной 315...360 МПа, которые на глубине 30 мкм плавно переходят в растягивающие с величиной до 50 МПа (см. рис. 6а).

Ручная доводка профиля пера лопаток эластичным абразивным инструментом позволяет получить в поверхностном слое на глубине 2 мкм остаточные напряжения сжатия величиной 375 МПа, которые плавно переходят в растягивающие остаточные напряжения с величиной 40 МПа (см. рис. 6б).

После УЗУ на поверхности пера лопаток наводятся остаточные напряжения сжатия величиной 440 МПа с глубиной распространения до 100 мкм (см. рис. 6в).

### ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлены основные закономерности распределения остаточных напряжений в поверхностном слое пера рабочих лопаток компрессора из титанового сплава после применения различных технологических методов как на формообразующем, так и на отделочно-упрочняющем этапах с учетом проявления технологической наследственности.

2. Показано, что в процессе изготовления рабочих лопаток термообработка и отделочно-упрочняющие методы являются эффективным средством для снижения и нейтрализации растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое после применения различных технологических методов.

3. Показано, что учет проявления технологической наследственности как после каждого применяемого технологического метода обработки, так и после их применения в совокупности, позволяет целенаправленно формировать в поверхностном слое благоприятное распределение остаточных напряжений сжатия, являющихся основным параметром качества поверхностного слоя пера лопаток.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маталин А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А. А. Маталин. – М. Л. : Гос. науч.-тех. издат. машиностроительной литературы, 1956. – 252 с.

2. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – К. : Техніка, 1971. – 142 с.

3. Сулима А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. — М. : Машиностроение, 1974. — 255 с.

4. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. — М. : Машгиз, 1963.

5. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. — Минск : Наука и техника, 1977. — 256 с.

6. Ящерицын П. И. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин / П. И. Ящерицын, Ю. В. Скороын. — Минск : Наука и техника, 1978. — 120 с.

7. Богуслаев В. А. Технология производства авиационных двигателей: монография. Часть I. / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой и др. — Запорожье : АО «Мотор Сич», 2000. — 944 с.

8. Богуслаев В. А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и др. — Запорожье : изд. АО «Мотор Сич», 2005 — 559 с.

9. Богуслаев В. А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора: монография. 2-е изд. перераб. и доп. / В. А. Богуслаев, П. Д. Жеманюк, А. Я. Качан и др. — Часть I. — Запорожье : АО «Мотор Сич», 2017. — 500 с.

Статья поступила в редакцию 26.04.2019

**Качан О. Я.** д-р техн. наук, зав. кафедры технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: opt.ugt@motorsich.com;

**Уланов С. О.** аспірант кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: opt.ugt@motorsich.com

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПЕРІ ЛОПАТОК ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ

*Ціль роботи.* Підвищення якості формування поверхневого шару пера робочих лопаток осьового компресора авіаційного двигуна.

*Методи дослідження.* Експериментальні дослідження формування залишкових напружень у поверхневому шарі пера робочих лопаток компресора на формотворному і обробно-зміцнювальному етапах їхнього виготовлення різними технологічними методами.

*Отримані результати.* Представлено результати експериментальних досліджень формування залишкових напружень у поверхневому шарі пера робочих лопаток компресора, які виготовляються точним гарячим штампуванням, калібруванням, холодним вальцюванням, віброполіруванням, ручним доведенням, ультразвуковим зміцненням і термообробкою, що виконується після застосування кожного технологічного методу і на етапі формоутворення.

Проведено системний аналіз величини, знака і епюри розподілу залишкових напружень у поверхневому шарі пера лопаток, як на формотворному, так і на обробно-зміцнювальному етапах виготовлення з урахуванням прояву технологічної спадковості, як після застосування кожного технологічного методу, так і їх сукупності.

Показано, що після точного гарячого штампування і калібрування в поверхневому шарі пера заготовок робочих лопаток спостерігаються залишкові напруження, що розтягують.

Холодне вальцювання пера лопатки, яке виконується за три переходи після точного гарячого штампування з відповідною термообробкою на кожному переході, приводить до різкої зміни епюри розподілу залишкових напружень у поверхневому шарі. Залишкові напруження, що розтягують, знижуються і стабілізуються в поверхневому шарі на більш низькому рівні.

Для підвищення якості поверхневого шару пера робочої лопатки компресора після формотворного етапу виконують обробно-зміцнювальну обробку, що включає вібраційне полірування, ручну доробку профілю пера і ультразвукове зміцнення сталевими кульками.

Вібраційне полірування, ручне доведення профілю пера і ультразвукове зміцнення формують у поверхневому шарі залишкові напруження стиску з максимальною величиною на поверхні і максимальною глибиною поширення.

*Наукова новизна.* Встановлено закономірності формування залишкових стискаючих напружень у поверхневому шарі пера робочих лопаток компресора з урахуванням прояву технологічної спадковості після кожного застосованого технологічного методу і термообробки. Встановлено вплив сукупності технологічних методів і виду термообробки на величину і характер епюри розподілу залишкових напружень у поверхневому шарі пера робочих лопаток з титанового сплаву.

*Практична цінність* роботи полягає в тому, що отримані результати дозволяють технологічно забезпечити підвищення якості виготовлення робочих лопаток компресора.

**Ключові слова:** технологічні методи; робоча лопатка; залишкові напруження; поверхневий шар; якість; зміцнення; полірування.

**Kachan A. Ya.** Grand PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Aviation Engine Technology, National University «Zaporizka politehnika», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: opt.ugt@motorsich.com;

**Ulanov S. A.** PhD student of the Department of Aviation Engine Technology, National University «Zaporizka politehnika», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: opt.ugt@motorsich.com

## REGULARITIES OF RESIDUAL STRESSES FORMATION IN BLADE AIRFOIL AFTER APPLIED PROCESSES WITH REGARD TO TECHNOLOGICAL HEREDITY

**Objective.** Improving the quality of formation of the surface layer of airfoil of the axial compressor rotor blades of the aircraft engine.

**Research methods.** Experimental studies of the formation of residual stresses in the surface layer of the compressor rotor blade airfoil at the forming stage, as well as finishing-and-hardening stage of their manufacture using various processes.

**Results.** The results of experimental studies of the formation of residual stresses in the surface layer of the rotor blade airfoil of the compressor manufactured by means of precise hot forging, calibration, cold rolling, vibropolishing, manual finishing, ultrasonic hardening and heat treatment performed after each applied process and at the forming stage are presented.

System analysis of the magnitude, sign and residual stress distribution curves in the surface layer of the blade airfoil is performed, both at the forming stage, as well as finishing-and-hardening stage of manufacture with regard to technological heredity, both after each process and their combination.

It is shown that tensile residual stresses are observed in the surface layer of airfoil of the rotor blade blanks after precise hot forging and calibration.

Cold rolling of the blade airfoil performed in three steps after precise hot forging and heat treatment at each step leads to a drastic change in the surface layer residual stress distribution curves. Tensile residual stresses are reduced and stabilized in the surface layer at a lower level.

To improve the quality of the surface layer of airfoil of the compressor rotor blade after the forming stage, the finishing-and-hardening treatment is performed, including vibratory polishing, manual adjustment of the airfoil profile and ultrasonic hardening with steel balls.

Vibratory polishing, manual adjustment of the airfoil profile and ultrasonic hardening form residual compressive stresses in the surface layer with a maximum value on the surface and a maximum distribution depth.

**Scientific novelty.** Regularities of formation of residual compressive stresses in the surface layer of airfoil of the compressor rotor blades are established with regard to technological heredity after each applied process and heat treatment. It is established influence of the combination of processes and type of heat treatment on the magnitude and nature of the residual stress distribution curves in the surface layer of airfoil of the rotor blades made of titanium alloy.

**Practical value** of the work lies in the fact that the obtained results make it possible to technologically improve quality of the compressor rotor blades manufacture.

**Key words:** applied processes; rotor blade; residual stresses; surface layer; quality; hardening; polishing.

### REFERENCES

1. Matalin A. A. (1956) Kachestvo poverkhnosti i ekspluatatsionniye svoystva detaley mashin. M. L.: Gos. nauch-tekh. izdat. mashinostroitelnoy literatury, 252.
2. Matalin A. A. (1971) Tekhnologicheskiye metody povisheniya dolgovechnosti detaley mashin. Kiyev: Tekhnika, 142.
3. Sulima A. M., Yevstigneyev M. I. Kachestvo poverkhnostnogo sloya i ustalostnaya prochnost detaley iz zharoprochnykh i titanovykh splavov. M. : Mashinostroyeniye, 255.
4. Birger I.A. (1963) Ostatochniye naprazheniya. M. : Machgiz
5. Yashcheritsin P. I., Ryzhov E. V., AVerchenkov V. I. (1977) Tekhnologicheskaya nasledstvennost v mashinostroyenii. Minsk : Nauka i tekhnika, 256.
6. Yashcheritsin P. I., Skorynin Y. (1978) V. Tekhnologicheskaya i kspluatatsionnaya nasledstvennost i yeyo vliyaniye na dolgovechnost mashin. Minsk : Nauka i tekhnika, 120.
7. Boguslayev V. A., Kachan A. Y., Mozgovoy V. F. i dr. (2000) Tekhnologiya proizvodstva aviatsionnykh dvigateley: monografiya. Chast I. Zaporozhye : AO Motor Sich, 944.
8. Boguslayev V.A., Yatsebo V.K., Zhemanyuk P.D. i dr. (2005) Otdelchno-uprochnyayuscshaya obrabotka detaley GTD. Zaporozhye : AO Motor Sich, 559.
9. Boguslayev V. A., Zhemanyuk P. D., Kachan A. Y. i dr. (2017) Tekhnologicheskoye obespecheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley GTD. Lopatki kompressors i ventilatora: monografiya. 2-e izd. pererab. i dop. Chast I. Zaporozhye : AO Motor Sich, 500.