

УДК 621.77: 669.24

## УСТРАНЕНИЕ РАЗНОЗЕРНИСТОСТИ В ЛОПАТКАХ КОМПРЕССОРА ГТД ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

БОГУСЛАЕВ В.А.<sup>1</sup>, *д.т.н, профессор*

КОЦЮБА В.Ю.<sup>1</sup>, *аспирант*

ПАВЛЕНКО Д.В.<sup>2</sup>, *к.т.н., доцент*

ТКАЧ Д.В.<sup>3</sup>, *к.т.н.*

<sup>1</sup> АО «Мотор Сич», 69068, г. Запорожье, Украина, пр-т Моторостроителей, 15

<sup>2</sup> Кафедра технологий авиационных двигателей, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина тел. +38(061) 769-82-69 [dvp\\_zntu@mail.ru](mailto:dvp_zntu@mail.ru), ORCID ID: 0000-0001-6376-2879

<sup>3</sup> Кафедра физического материаловедения, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина тел. +38(061) 769-83-82 ORCID ID: 0000-0003-0851-1481

**Цель.** Снижение разнотерности в пера лопаток компрессора газотурбинных двигателей из железоникелевого сплава ЭП718-ИД для повышения их технологичности и несущей способности. **Методика.** Для определения размеров зерен пера лопаток после различных видов обработки использовали методы микроскопического анализа. Для формирования субмикроструктурной структуры использовали интенсивную пластическую деформацию винтовой экструзией. **Результаты.** Установлено, что разнотерность структуры лопаток компрессора высокого давления возникает на этапе изготовления заготовок. Последующая термическая обработка не приводит к ее устранению. Для формирования благоприятной структуры предложено на черновом этапе технологического процесса использовать метод интенсивной пластической деформации – винтовую экструзию. Деформационная обработка такого типа также способствует гомогенизации легирующих элементов по сечению заготовки, что сказывается на повышении комплекса прочностных характеристик лопаток и снижении их рассеяния. Учитывая, что исследуемый сплав имеет низкую пластичность в диапазоне температур деформации, выполнен анализ условий реализации интенсивной пластической деформации заготовок с целью сохранения их целостности и формирования в них субмикроструктурной структуры. Установлено, что существует два альтернативных варианта технологического процесса проведения интенсивной деформации в области высоких и низких температур. Показано, что с точки зрения практической реализации интенсивную деформацию малоразмерных заготовок рационально выполнять в низкотемпературном диапазоне чередуя с операцией закалки. Анализ совокупности факторов, определяющих возможность успешной реализации интенсивной пластической деформации для заготовок лопаток методом винтовой экструзии, позволил определить требования к параметрам технологического процесса, установке и исходным заготовкам. Их выполнение позволяет успешно реализовать предложенную технологию получения лопаток из железоникелевых сплавов с субмикроструктурной структурой. Приведена конструкция специальной установки для его реализации. **Научная новизна.** Показана возможность применения интенсивной пластической деформации методом винтовой экструзии заготовок из железоникелевого сплава ЭП718-ИД для формирования субмикроструктурной структуры, что позволяет увеличить степень их последующей деформации и исключить появление разнотерности. **Практическая значимость.** Спроектирована установка для реализации винтовой экструзии заготовок в контролируемых условиях, что позволяет использовать операцию интенсивной пластической деформации на черновом этапе технологического процесса изготовления лопаток компрессора. Применение заготовок с однородной субмикроструктурной структурой позволяет сократить количество переходов при формообразовании профиля пера лопаток давлением, интенсифицировать режимы обработки лезвийными инструментами и повысить несущую способность лопаток.

**Ключевые слова:** лопатка, заготовка, сплав, пластичность, интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, установка, структура,

## УСТРАНЕННЯ РІЗНОЗЕРНИСТОСТІ В ЛОПАТКАХ КОМПРЕССОРА ГТД ІНТЕНСИВНОЮ ПЛАСТИЧНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ

БОГУСЛАЄВ В.О.<sup>1</sup>, *д.т.н, професор*

КОЦЮБА В.Ю.<sup>1</sup>, *аспірант*

ПАВЛЕНКО Д.В.<sup>2</sup>, *к.т.н., доцент*

ТКАЧ Д.В.<sup>3</sup>, *к.т.н.*

<sup>1</sup> АТ «Мотор Січ», 69068, м. Запоріжжя, Україна, пр-т Моторобудівників, 15

<sup>2</sup> Кафедра технологій авіаційних двигунів, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна тел. +38(061) 769-82-69 [dvp\\_zntu@mail.ru](mailto:dvp_zntu@mail.ru), ORCID ID: 0000-0001-6376-2879

<sup>3</sup> Кафедра фізичного матеріалознавства, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна тел. +38(061) 769-83-82 ORCID ID: 0000-0003-0851-1481

**Мета.** Зниження різнозеренності в пері лопаток компресора газотурбінних двигунів з залізонікелевого сплаву ЭП 718-ИД для підвищення їх технологічності та несучої здатності. **Методика.** Для визначення розмірів зерен пера лопаток після різних видів обробки використовували методи мікроскопічного аналізу. Для формування субмікроструктуральної структури використовували інтенсивну пластичну деформацію гвинтовою екструзією. **Результати.** Встановлено, що різнозеренність структури лопаток компресора високого тиску виникає на етапі виготовлення заготовок. Наступна термічна обробка не дозволяє її усунути. Для формування сприятливої структури запропоновано на чорновому етапі технологічного процесу використовувати метод інтенсивної пластичної деформації – гвинтову екструзію. Деформаційна обробка такого типу також сприяє гомогенізації легуючих елементів по перетину заготовки, що позначається на підвищенні комплексу характеристик міцності лопаток і зниженню їх розсіювання. Враховуючи, що досліджуваний сплав має низьку пластичність у діапазоні температур деформації, виконаний аналіз умов реалізації інтенсивної пластичної деформації заготовок з метою збереження їх цілісності й формування в них субмікроструктуральної структури. Встановлено, що існує два альтернативні варіанти технологічного процесу проведення інтенсивної деформації в області високих і низьких температур. Показано, що з погляду практичної реалізації, інтенсивну деформацію малорозмірних заготовок раціонально виконувати в низькотемпературному діапазоні чергуючи з операцією загартовування. Аналіз сукупності факторів, що визначають можливість успішної реалізації інтенсивної пластичної деформації для заготовок лопаток методом гвинтової екструзії, дозволив визначити вимоги до параметрів технологічного процесу, установки й вихідних заготовок. Їх виконання дозволяє успішно реалізувати запропоновану технологію одержання лопаток з залізонікелевих сплавів з субмікроструктуральною структурою. Наведена конструкція спеціальної установки для його реалізації. **Наукова новизна.** Показана можливість застосування інтенсивної пластичної деформації методом гвинтової екструзії заготовок з залізонікелевого сплаву ЭП 718-ИД для формування субмікроструктуральної структури, що дозволяє збільшити ступінь їх наступної деформації й виключити появу різнозеренності. **Практична значимість.** Спроектовано установку для реалізації гвинтової екструзії заготовок у контрольованих умовах, що дозволяє використовувати операцію інтенсивної пластичної деформації на чорновому етапі технологічного процесу виготовлення лопаток компресора. Застосування заготовок з однорідною субмікроструктуральною структурою дозволяє скоротити кількість переходів при формоутворенні профілю пера лопаток тиском, інтенсифікувати режим обробки лезовими інструментами та підвищити несучу здатність лопаток.

**Ключові слова:** лопатка, заготовка, сплав, пластичність, інтенсивна пластична деформація, гвинтова екструзія, установка, структура,

## ELIMINATION OF INEQUIGRANULARITY IN GAS TURBINE ENGINE COMPRESSOR BLADES BY MEANS OF INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION

V. A. BOGUSLAYEV<sup>1</sup>, *D.Eng.Sc., professor*

V. YU. KOTSIUBA<sup>1</sup>, *Ph.D. student*

D. V. PAVLENKO<sup>2</sup>, *Ph.D., assistant professor*

D. V. TKACH<sup>3</sup>, *Ph.D.*

<sup>1</sup> Motors Sich JSC, 15 Motorostroiteley Avenue, Zaporozhye, 69068, Ukraine

<sup>2</sup> Chair of Aero-engines Technologies, Zaporozhye National Technical University, 64 Zhukovsky Street, Zaporozhye, 69063, Ukraine.

Phone: +38 (061) 769-82-69 [dvp\\_zntu@mail.ru](mailto:dvp_zntu@mail.ru), ORCID ID: 0000-0001-6376-2879

<sup>3</sup> Chair of Material Physics, Zaporozhye National Technical University, 64 Zhukovsky Street, Zaporozhye, 69063, Ukraine. Phone: +38 (061) 769-83-82 ORCID ID: 0000-0003-0851-1481

**Purpose.** Decrease of inequigranularity in gas turbine engine compressor blades airfoil made of ЭП718-ИД iron-nickel alloy aimed at increase of their processibility and bearing capacity. **Technique.** Methods of microscopic analysis were used in order to determine grain sizes of blades airfoil after different processing methods. Method of intensive plastic deformation by means of twist extrusion was used in order to form submicrocrystalline structure. **Results.** It is established that inequigranularity of high pressure compressor blades structure occurs at the stage of blanks production. Subsequent thermal treatment does not eliminate the defect. In order to form favorable structure it is offered to use method of intensive plastic deformation (twist extrusion) at preliminary stage of technological process. Such deformation treatment also improves homogenization of alloying elements all over the blank section. It results in increase of the blade strength properties and decrease of their dispersion. Considering the fact that investigated alloy has low plasticity within the range of deformation temperatures, there was made analysis of conditions for impementation of intensive plastic deformation of blanks aimed at preservation of their integrity and formation of submicrocrystalline structure in them. It is established that two alternative variants of technological process of intensive deformation at high and low temperatures are possible. It is shown that from the point of view of practical implementation, it is rational to perform intensive deformation of small blanks within the low temperature range, alternating it with hardening procedure. Analysis of the combination of factors determining possibility of successful implementation of intensive plastic deformation of the blade blanks by means of twist extrusion, has

allowed to determine requirements to parameters of technological process, to the unit and initial blanks. Their fulfilment allows to implement successfully the offered blades production technology based on iron-nickel alloys with submicrocrystalline structure. It is given the design of special production unit. **Scientific novelty.** It is proven feasibility of application of intensive plastic deformation by means of twist extrusion of blanks made of ЭП718-ИД iron-nickel alloy in order to form submicrocrystalline structure that increases degree of their subsequent deformation and excludes occurrence of inequigranularity. **Practical importance.** It is designed a special unit for implementation of twist extrusion of blanks under controlled conditions that allows to use intensive plastic deformation at preliminary stage of compressor blades production process. Application of blanks with uniform submicrocrystalline structure allows to reduce quantity of transitions during the blade airfoil forming by pressure, intensify the blade tool machining conditions and increase the blades bearing capacity.

**Keywords:** blade, blank, alloy, plasticity, intensive plastic deformation, twist extrusion, unit, structure,

### Введение

Повышение долговечности деталей газотурбинных двигателей (ГТД) является актуальной задачей авиадвигателестроения. Развитие новых методов обработки таких как высокоскоростное резание, глубинное шлифование и др. приводит к изменениям в структуре технологических процессов. Их применение позволяет снизить себестоимость изделий, повысить качество и надежность. Одними из прогрессивных методов обработки являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД). В последнее время они находят самое широкое применение для формирования в объемных заготовках изделий машиностроения субмикроструктурной структуры. Особенности структуры и свойств металлов, подвергнутых ИПД достаточно хорошо изучены в работах [1-7 и др.] и являются основной причиной повышенного интереса к ним.

Сплавы на железоникелевой основе типа ЭП718-ИД, Inconel 718, благодаря сочетанию прочностных свойств и способности работать в области повышенных температур находят широкое применение в конструкции роторов ГТД. Например, они применяются в компрессоре высокого давления турбореактивных двухконтурных двигателей Д-18Т различных серий для изготовления рабочих лопаток. Учитывая конструктивные особенности лопаток компрессора (рис. 1) и необходимость использования в качестве исходной заготовки для их изготовления сортового проката (прутка), для формообразования аэродинамических профилей применяют методы обработки давлением, механическую обработку лезвийным, а также абразивными инструментами.



Рис. 1 - Общий вид лопатки компрессора высокого давления. / General view of high pressure compressor blade

Однако известно [7, 8], что сплавы на железоникелевой основе склонны к образованию в процессе деформационной и термомеханической обработок разнотекстурности, приводящей к снижению уровня прочностных и служебных свойств (рис. 2).

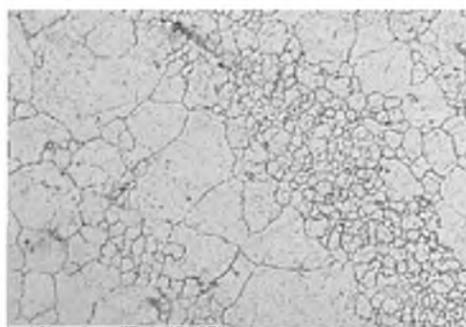


Рис. 2 – Микроструктура поверхностного слоя лопаток (x200). / Microstructure of high pressure compressor blades produced by means of high-speed milling (x200)

В связи с этим, разработка методов устранения разнотекстурности в лопатках компрессора ГТД является актуальной задачей для авиадвигателестроения.

### Цель

Целью данной работы является устранение разнотекстурности в перьях лопаток компрессора газотурбинных двигателей из железоникелевого сплава ЭП718-ИД для повышения их технологичности и несущей способности

### Методика

Объектом исследования служил технологический процесс изготовления лопаток компрессора высокого давления (КВД) турбореактивного двухконтурного двигателя. Материал лопаток – железоникелевый сплав ЭП718-ИД (ХН45МВТЮБР).

Исследование структуры пера лопаток выполняли на оптическом микроскопе CarlZeiss Jena NU-2. Изучали влияние технологических операций на изменение микроструктуры сплава. Оценку размеров структурных составляющих проводили методом

случайных секущих с использованием программного обеспечения IMAGE Pro Plus.

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) использовали метод конечных элементов. Расчет выполняли в системе ANSYS.

### Результаты

Анализ микроструктуры на заключительном этапе изготовления лопаток позволил установить, что в поверхностном слое пера, после формообразования высокоскоростным строчным фрезерованием, наблюдается значительная разнотернистость материала. Это может быть вызвано рядом причин, как при получении заготовки, так и в процессе ее обработки.

Для определения причин появления разнотернистости исследовали поверхностный слой после каждого из этапов технологического процесса: заготовка-пруток, штамповка, термическая обработка (закалка-старение), высокоскоростное фрезерование, ручное полирование и ультразвуковое упрочнение пера.

В результате исследования микроструктуры в различных сечениях пера лопаток установлено, что уже после операции штамповки формируется неоднородная микроструктура, характеризующаяся значительной разнотернистостью (рис. 3). При этом величина и расположение участков неоднородности несколько различались. Наблюдалась как строчечная, так и зональная разнотернистость. В процессе дальнейшей термической обработки структура не изменялась, поскольку данный сплав не претерпевает фазовых превращений, с повышением температуры происходит только растворение упрочняющих фаз.

Таким образом, неравномерная деформация заготовки лопаток приводит к возникновению неоднородной структуры, т.к. в процессе горячей деформации и дальнейшего нагрева рекристаллизация проходит неравномерно.

Установлено, что в процессе предварительной прокатки и вырубки заготовок вследствие неоднородной деформации по сечению заготовки происходит неравномерный рост зерна, что сопровождается возникновением разнотернистой структуры во всех сечениях заготовок (рис. 3). Наблюдалось зерна размером как 15...20 мкм, так и 2...5 мкм. Зоны с различным размером зерен имели некоторую полосчатость. В зонах, в которых в процессе деформации заготовки критическая величина деформации не была достигнута, наблюдались достаточно крупные зерна.

Таким образом установлено, что на этапе изготовления заготовок лопаток КВД формировалась неоднородная структура: наблюдалась значительная разнотернистость как в пера так и в хвостовике лопаток, неравномерное распределение карбидов по сечению лопатки и увеличение их размеров.

Перспективным методом формирования благоприятной, с точки зрения прочности и повышения технологичности заготовок, структуры материала, является интенсивная пластическая деформация [1-7]. В процессе ИПД заготовок происходит фрагментация структурных элементов сплава (рис. 4), формируется мелкодисперсная структура с размером зерен порядка 100...300 нм. ИПД также способствует гомогенизации легирующих элементов по всему сечению заготовки, что сказывается на снижении рассеяния прочностных характеристик [9].

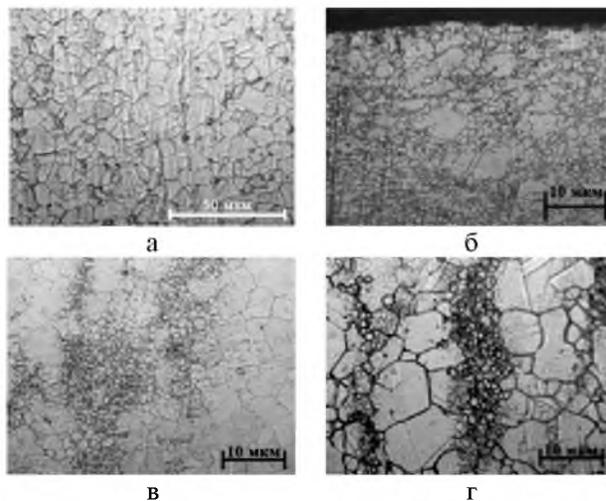


Рис. 3 - Микроструктура поверхности лопаток после основных этапов изготовления: а - заготовка (пруток); б - штамповка в - высокоскоростное фрезерование; г - ультразвуковое упрочнение / Microstructure of blades surface after main production stages: a - blank (rod); b - forging; c - forging after hardening and ageing; d - high-speed milling; e - thermal treatment; f - ultrasonic reinforcement

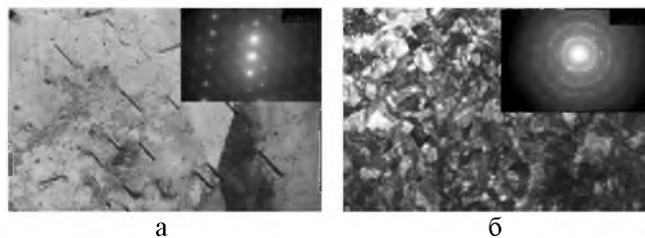


Рис. 4. – Микроструктура заготовки в исходном состоянии (а) и после интенсивной пластической деформации винтовой экструзией (б), x10000 / Microstructure of blank surface in initial condition (a) and after intensive plastic deformation by means of screw-type extrusion (b)

Субмикроструктурная (СМК) структура, предварительно сформированная в заготовках из сплав ЭП718-ИД, позволяет выполнять дальнейшую обработку давлением (например штамповку или

вальцевание пера), которая не сопровождается ростом зерен.

Так, в исходных заготовках наблюдались зерна в диапазоне 4... 52 мкм в то время как в заготовках подвергнутых ИПД наблюдались зерна в диапазоне 1...15 мкм. После ИПД 72...73% зерен в заготовке имели размер менее 1 мкм. При термической обработке лопаток, за счет протекания процесса собирательной рекристаллизации, при наблюдаемом распределении зерен по размеру возможно получение регламентированной для лопаток компрессора структуры при минимальной величине разнотерности.

Исследования микроструктуры позволили также установить, что ИПД способствует дроблению карбидов, которые являются значительными концентраторами напряжений, и, учитывая малую толщину сечения пера лопаток, являются существенными факторами в снижении прочностных характеристик при переменных нагрузках.

Принимая во внимание, что при ИПД степень деформации составляет 7...10, в зависимости от конструкции матрицы и числа циклов обработки заготовки, она превышает некоторую пороговую величину, являющуюся критической для данного сплава. Дальнейшее деформирование в процессе обработки давлением и резанием не приводит к росту зерен (рис. 5).

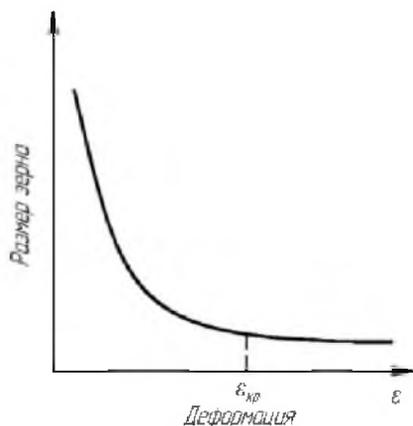


Рис. 5 – Зависимость размера зерен от степени деформации / Dependence of grain size on deformation degree

Учитывая низкую пластичность при температурах деформации вследствие значительного насыщения твердого раствора легирующими элементами, узкого температурного интервала деформации и значительной чувствительности к перегреву, реализация процесса ИПД железоникелевых сплавов сопровождается рядом технологических трудностей. Основные из них связаны, в первую очередь, с необходимостью проведения деформации в узком диапазоне

температуры порядка 940...995°C. Альтернативным технологическим процессом является деформирование в области низких температур. При этом необходимо выбрать такой интервал температур деформации, который будет удовлетворять ряду противоречивых требований. Основными из них являются повышение пластичности сплава, сохранение частиц  $\eta$ - ( $\delta$ -) фазы и карбидов, обеспечение стойкости технологической оснастки и состояния рабочей среды и смазки. Также необходимо обеспечить условия для дробления структурных составляющих сплава и формирование СМК структуры.

Анализ условий ИПД железоникелевых сплавов указывает на возможность ее реализации в низкотемпературной области в диапазоне температур 300...400°C. Для исключения разрушения заготовок в процессе ИПД при низких температурах, связанного со снижением их пластичности, необходимо предусматривать мероприятия, по созданию в плоскости деформации высокого уровня гидростатической компоненты тензора напряжения.

Анализ методов формирования в заготовках из исследуемого сплава, размеры которых удовлетворяют условиям изготовления лопаток компрессора, СМК структуры показал, что наиболее рациональным является метод винтовой экструзии [1]. Суть метода заключается в том, что призматическую заготовку циклически пропускают через матрицу с винтовым каналом постоянного поперечного сечения (рис. 6.).

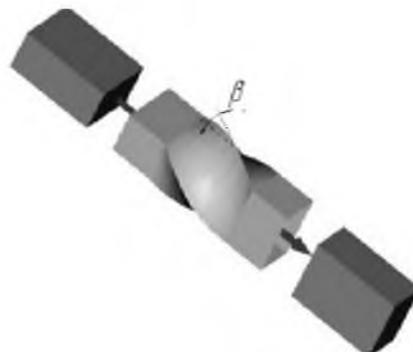


Рис. 6 – Схема интенсивной пластической деформации призматических заготовок методом винтовой экструзии [1]. / Scheme of intensive plastic deformation of prismatic samples by means of screw-type extrusion [1]

Угол наклона винтовой линии к направлению экструзии ( $\beta$ ) изменяется по высоте матрицы, причем на ее начальном и конечном участках он равен нулю. Указанные особенности геометрии канала приводят к тому, что при выдавливании через него форма заготовки не изменяется, что позволяет осуществлять ее многократное деформирование с целью накопления пластических деформаций. При этом происходит изменение структуры и свойств заготовки.

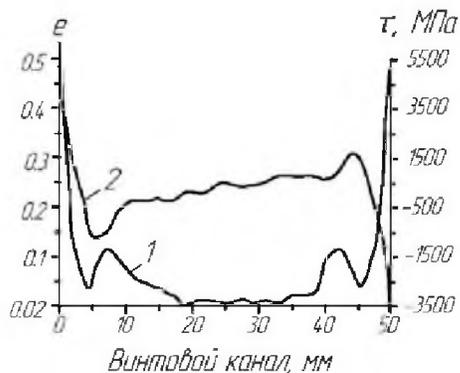


Рис. 7 – Распределение эквивалентных деформаций (1) и касательных напряжений (2) вдоль винтового канала.  
/ Distribution of equivalent deformations (1) and shearing stresses (2) along screw channel

Моделирование НДС заготовок подверженных ВЭ позволило установить, что максимальное значение деформации достигается на начальном и конечном участках винтового канала (рис. 7). В средней части канала происходит «перетекание» материала в пределах поперечного сечения способствующее перемешиванию структуры, и, таким образом, гомогенизации.



Рис. 8 – Эскиз установки для реализации процесса ИПД заготовок лопаток компрессора из сплава ЭП-78ИД методом винтовой экструзии.  
/ Outline of the unit for implementation of intensive plastic deformation of ЭП-78ИД alloy by means of screw-type extrusion

Для успешной реализации ИПД заготовок методом ВЭ, учитывая требования, предъявляемые к температуре, скорости и условиям НДС, была спроектирована специальная установка, позволяющая выполнять деформацию в полуавтоматическом режиме (рис. 8). Учитывая узкий температурный диапазон, в котором может быть реализован процесс ВЭ,

деформации подвергают заготовки сечением 28x18 мм и длиной не менее 60 мм, что позволяет исключить большие градиенты температур в связи с теплообменом.

Установка монтируется на гидравлический пресс усилием 630 кН, оснащенного числовым программным управлением, что позволяет деформировать объёмные заготовки в полуавтоматическом режиме. Для нагрева образцов предусмотрена печь.

Создание в плоскости деформации заготовки высокого уровня гидростатической компоненты тензора напряжения реализуется путем прикладывания к нижнему торцу противодействия, величина которого может варьироваться в широком диапазоне. Конструкция приемного контейнера предусматривает устройство для быстрого извлечения заготовки, что исключает неблагоприятное ударное воздействие.

Эти, и ряд других конструкторских решений примененных в разработанной установке позволили автоматизировать процесс загрузки, выгрузки заготовки, а также процесс деформации, что обеспечивает возможность выполнять интенсивную пластическую деформацию заготовок из сплава ЭП718-ИД в контролируемых условиях. Так, длительность пребывания любого поперечного сечения заготовки в винтовом участке матрицы задается с точностью  $\pm 5$  с. Для возможности управления микроструктурой материала, длительность одного цикла обработки заготовки, от момента ее выгрузки из печи перед деформацией, до момента ее полного извлечения из приемного контейнера после деформации, задается с точностью  $\pm 10$  с и не превышает 180 с. Установка также позволяет обеспечивать обработку в режиме «заготовка за заготовкой».

### Выводы

Установлено, что устранение разнотерности в лопатках компрессора газотурбинных двигателей из железоникелевого сплава ЭП718-ИД и повышение его технологичности может быть достигнуто путем формирования однородной субмикроструктурной структуры в исходных заготовках. Для достижения требуемой структуры необходимо проведение "холодной" деформации исходных заготовок для достижения степеней деформации выше критических методами интенсивной пластической деформации, например винтовой экструзией. Учитывая особенности поведения исследуемого сплава в процессе термомеханической обработки спроектирована установка для реализации процесса интенсивной пластической деформации методом винтовой экструзии в контролируемых условиях.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ /  
REFERENCES**

1. Бейгельзимер, Я.Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации [Текст] / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов. – Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.
2. Ткач, Д.В. Особенности структуры и разрушения титана марки ВТ1-0 в субмикроструктурном состоянии при циклическом нагружении [Текст] / Д.В. Ткач, Д.В. Павленко, В.Е. Ольшанецкий // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2011. - №1. – С. 11-18.
3. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров – М.: Академкнига, 2007. - 397 с.
4. Y. Beygelzimer\*, V. Varyukhin, S. Synkov & D. Orlov Useful properties of twist extrusion Materials Science and Engineering A 503 (2009) 14–17.
5. Утяшев Ф.З. Деформационные методы получения наноструктурированных материалов и возможности их использования в авиадвигателестроении [Текст] / Ф.З. Утяшев // Авиационно-космическая техника и технология.-- 2009. – № 10 (67). – С. 7-11.
6. Павленко, Д.В. Применение винтовой экструзии для получения субмикроструктурной

структуры и гомогенизации титанового сплава ВТ3-1 [Текст] / Д.В. Павленко, А.В. Овчинников, А.Я. Качан, В.Г. Шевченко, Я.Е. Бейгельзимер, Т.П. Заика, А.В. Решетов, Р.Ю. Кулагин // Вестник двигателестроения. – 2007. – №2. – С. 185-188.

7. Y. Beygelzimer, A. Reshetov, S. Synkov, O. Prokof'eva, R. Kulagin Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method journal of materials processing technology 209 (2009) 3650–3656

8. Гинергарт, О.Ю. Влияние размера зерен на свойства жаропрочных сплавов [Текст] / О.Ю. Гинергарт // Динамика систем, механизмов и машин: материалы VII Международной научно-технической конференции. - Омск, 2009. -С. 338-342.

9. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Симса Ч.Т., Столоффа Н.С., Хагеля У.К.: Пер. с англ. В 2-х книгах. Кн. 1 / Под ред. Шалина Р.Е. – М.: Металлургия, 1995.- 384 с.

10. Павленко Д.В. Применение винтовой экструзии для получения субмикроструктурной структуры и гомогенизации титанового сплава ВТ3-1 [Текст] / Д.В. Павленко, А.В. Овчинников, А.Я. Качан, В.Г. Шевченко, Я.Е. Бейгельзимер, Т.П. Заика, А.В. Решетов, Р.Ю. Кулагин // Вестник двигателестроения. – 2007. – №2. – С. 185-188.

*Статья рекомендована к публикации докт. техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); докт. техн. наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина)*

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015