

УДК 621.452:62-253.5

Д. В. ПАВЛЕНКО¹, Г. И. ПЕЙЧЕВ², В. Ю. КОЦЮБА³,
Я. Е. БЕЙГЕЛЬЗИМЕР⁴, Э. В. КОНДРАТЮК², Д. В. ТКАЧ¹,
С. Д. ЗИЛИЧИХИС², М. А. ГРЕБЕННИКОВ², С. А. УЛАНОВ¹

¹ Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

² Государственное предприятие "Ивченко-Прогресс", Запорожье, Украина

³ Акционерное общество "Мотор Сич", Запорожье, Украина

⁴ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ СПЛАВА ЭП718-ИД

Представлены результаты экспериментальных исследований качества лопаток компрессора высокого давления из сплава ЭП718-ИД, изготавливаемых по технологическому процессу, основанному на формообразовании пера высокоскоростным фрезерованием. Установлено снижение прочности при переменных нагрузках, что является следствием значительной разнотерности материала. Предложен перспективный метод формирования благоприятной, с точки зрения прочности при переменных нагрузках, структуры материала, основанный на интенсивной пластической деформации исходных заготовок.

Ключевые слова: структура, остаточные напряжения, разнотерность, прочность, интенсивная пластическая деформация.

Введение

Современные тенденции производства авиационной техники направлены на сокращение технологического цикла изготовления изделий, повышения уровня их технико-экономических характеристик и снижение себестоимости [1]. Реализация указанных тенденций возможна за счет применения новых материалов, технологических решений, развития систем автоматизированного проектирования и моделирования. В тоже время применение новых конструкторско-технологических решений для деталей, которые в настоящее время находятся в серийном производстве, могут приводить к снижению эксплуатационных характеристик.

В последнее время в авиадвигателестроении находят широкое применение методы формообразования сложнопрофильных поверхностей путем высокоскоростного фрезерования (ВСФ) на обрабатываемых центрах. Их применение позволяет получать поверхности деталей практически любой конфигурации при высокой точности и качестве обрабатываемых поверхностей. Существенными преимуществами технологических процессов, основанных на применении ВСФ, является их гибкость, что позволяет быстро менять объект производства без существенных вложений в техническое оснащение производства. Последнее особенно важно при выпуске изделий малыми партиями, например, в опыт-

ном производстве [2, 3].

В процессе проведения контрольных испытаний на усталость партий лопаток компрессора высокого давления, изготовленных по новому технологическому процессу, наблюдалось снижение предела выносливости в сравнении с лопатками, изготовленными по серийной технологии. Анализ условий изготовления лопаток показал, что с учетом изменения масштаба производства, внесен ряд существенных изменений в технологический процесс получения заготовки лопаток и механической обработки.

В связи с этим, целью настоящей работы являлась оценка путей повышения эксплуатационных свойств лопаток компрессора высокого давления из сплава ЭП718-ИД, изготавливаемых по технологии, основанной на формообразовании аэродинамических поверхностей высокоскоростным строчным фрезерованием. Для достижения указанной цели поставлены задачи последовательной оценки качества лопаток на всех этапах технологического процесса производства.

Методика проведения исследований

Объектом исследования служил технологический процесс изготовления лопаток компрессора высокого давления (КВД) двухконтурного турбореактивного двигателя, изготовленные по технологии формообразования пера высокоскоростным строч-

ным фрезерованием. Материал лопаток – сплав ЭП718-ИД (ХН45МВТЮБР).

С целью сохранения истинной картины распределения остаточных напряжений в образцах, вырезка из лопаток проводилась на электроэрозионном станке. Для проведения металлографических исследований и параметров наклепа поверхностного слоя материала использовались образцы, вырезанные из пера лопатки и переходной зоны (рис. 1). Металлографические исследования проводили по стандартной технологии [5].

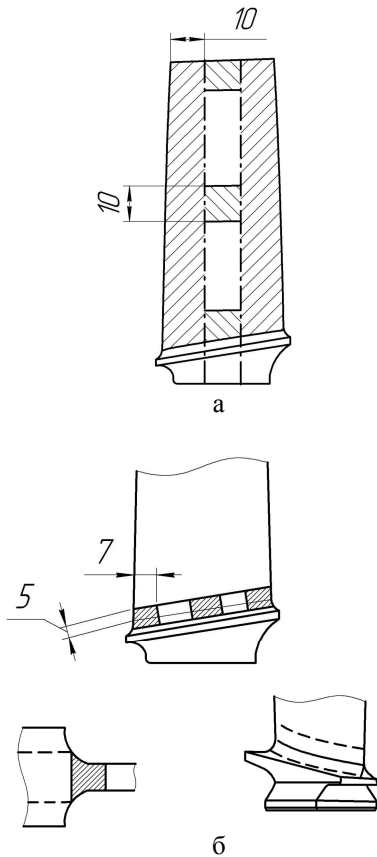


Рис. 1. Схема вырезки образцов из пера лопаток КВД:
а – для исследования остаточных напряжений;
б – для исследования микроструктуры в переходной зоне

Для металлографических исследований использовались образцы, вырезанные из пера лопатки и переходной зоны. При этом чтобы получить более полную картину, исследовали как сечение лопатки, так и поверхностный слой. Для уточнения влияния технологических операций на поверхностный слой лопатки изготавливали косые шлифы. Образцы, вырезанные из пера лопатки КВД, металлографический шлиф и рентгеновский снимок образца, подготовленного для исследования поверхностного слоя, показаны на рис. 2.

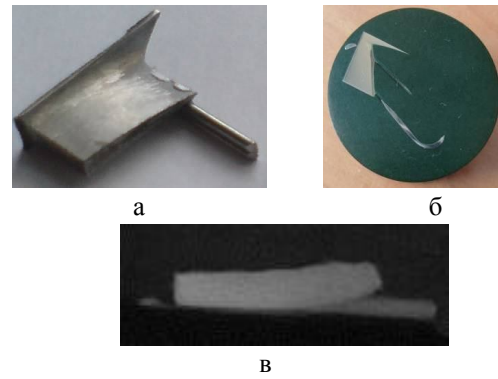


Рис. 2. Общий вид образцов из лопатки КВД (а) и металлографического шлифа (б), рентгеновский снимок образца для исследования поверхностного слоя (в)

Микротвердость поверхностного слоя исследовали методом вдавливания алмазной пирамидки на приборе ПМТ-3М [6], оснащенный приставкой для автоматического нагружения и контроля размеров отпечатков.

Исследование структуры лопаток после различных видов обработки проводили на оптическом универсальном микроскопе CarlZeiss Jena NU-2 при увеличении 200-500 крат. В процессе исследования изучали влияние технологических операций на изменение микроструктуры сплава. Оценку размеров структурных составляющих проводили по методу случайно секущей с использованием программного обеспечения IMAGE PRO PLUS. Статистическую обработку результатов измерений структурных составляющих выполняли в системе STATISTICA 7.0.

Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток выполняли методом послойного удаления тонких слоев металла на приборе ПИОН-2 [4] при консольном закреплении образцов (рис. 3).

Результаты исследований и их анализ

Новый технологический процесс получения лопаток базируется на изготовлении индивидуальных заготовок из круглого проката, последующего формообразования пера и хвостовика на высокоскоростном обрабатывающем центре Starrag-051B/C, и упрочняющей обработки на ультразвуковой установке стальными шариками.



Рис. 3. Общий вид образца для исследования остаточных напряжений

На рисунке 4. представлена микроструктура поверхности лопаток КВД после полного цикла технологического процесса по новой (а) и серийной (б) технологии, основанной на формообразовании пера лопаток вальцеванием.

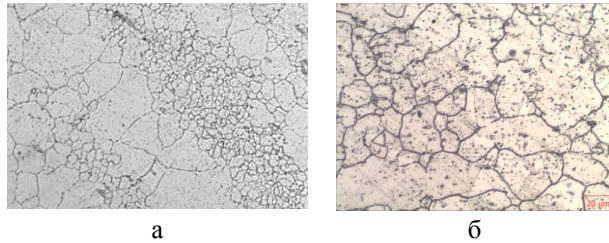


Рис. 4. Микроструктура лопаток КВД, изготовленных по перспективной (а) и серийной (б) технологиям (x200)

В процессе анализа микроструктуры на заключительном этапе изготовления установлено, что в лопатках, полученных по перспективной технологии наблюдается значительная разнотернистость материала в поверхностном слое. Это может быть вызвано рядом причин, как на этапе получения заготовки, так и в процессе изготовления лопаток.

Для определения причин появления разнотернистости материала поверхностного слоя выполняли комплекс исследований материала после каждого из этапов технологического процесса: заготовка-пруток, штамповка, термическая обработка (закалка-старение), высокоскоростное фрезерование, ручное полирование и ультразвуковое упрочнение пера.

Для исследуемых заготовок проведен анализ химического состава материала на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном анализаторе. Установлено, что химический состав заготовок лопаток находится в пределах технических условий, предъявляемых к железоникелевому сплаву ЭП718-ИД.

В результате исследования микроструктуры в различных сечениях пера лопаток установлено, что уже после операции штамповки формируется неоднородная микроструктура, характеризующаяся значительной разнотернистостью (рис. 5, 6). При этом величина и расположение участков неоднородности несколько различались, наблюдалась как строчечная, так и зональная разнотернистость. В процессе дальнейшей термической обработки структуру исправить не удастся, поскольку данный сплав не претерпевает фазовых превращений, с повышением температуры происходит лишь растворение упрочняющих фаз.

Таким образом, неравномерная деформация заготовки лопаток приводит к возникновению неоднородной структуры, вследствие неоднородности деформации по сечению заготовки, т.к. в процессе го-

рячей деформации и дальнейшего нагрева рекристаллизация проходит неравномерно, что приводит к значительной разнотернистости.

На степень разнотернистости также может влиять наличие дисперсных фаз, тормозящих рост зерен. Проведение дальнейших технологических операций не позволило снизить уровень разнотернистости, и уже на заключительных операциях наблюдалась полосовая структура.

Исследование микроструктуры исходного прутка как в продольном, так и в поперечном сечении позволило установить, что структура представляет собой твердый γ -раствор и упрочняющие фазы. Размер зерен по сечению не изменялся и находился в пределах 5,5...12 мкм, наблюдались карбиды со средним размером 1,8 мкм (рис. 5а). Таким образом, исходная заготовка имела удовлетворительную структуру для дальнейшей обработки.

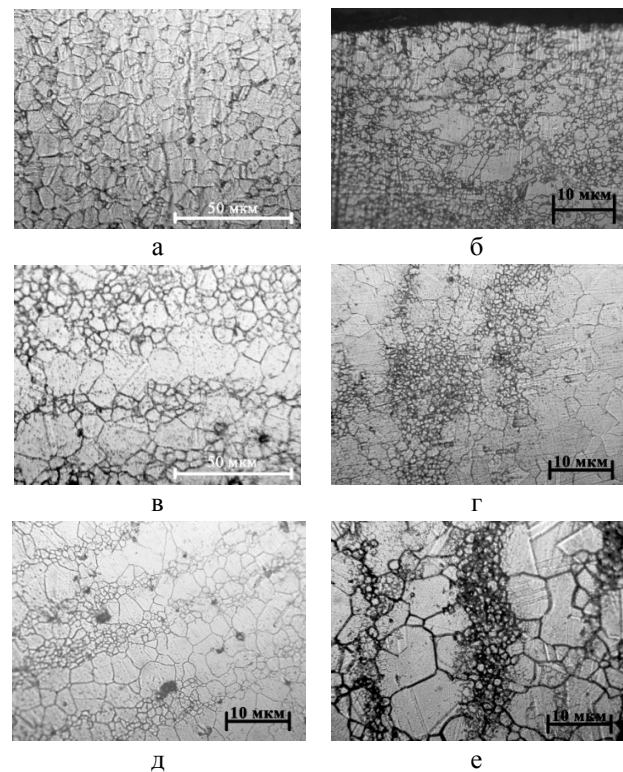


Рис. 5. Микроструктура поверхности лопаток после основных этапов изготовления по новому технологическому процессу: а - заготовка (пруток); б - заготовка (штамповка) без термической обработки; в - заготовка (штамповка) закалка и старение; г - высокоскоростное фрезерование; д - термическая обработка; е - ультразвуковое упрочнение

Исследования микроструктуры заготовки лопаток позволили установить, что в процессе предварительной прокатки и вырубки индивидуальных заготовок происходит неравномерный рост зерна, что сопровождается возникновением разнотернистой

структуры во всех сечениях заготовок лопаток (рис. 5б). В структуре материала заготовки наблюдались зерна размером как 15...20 мкм, так и 2...5 мкм.

Зоны с различным размером зерен имели некоторую полосчатость, что, возможно, связано с неоднородной деформацией по сечению заготовки. В зонах, в которых в процессе деформации заготовки критическая величина деформации не была достигнута, наблюдались достаточно крупные зерна.

Таким образом, на этапе изготовления заготовок лопаток КВД по перспективному технологическому процессу штамповки, формировалась неоднородная структура: наблюдалась значительная разнородность как в пера, так и в хвостовике лопаток (рис. 6), неравномерное распределение карбидов по сечению лопатки и увеличение их размеров.

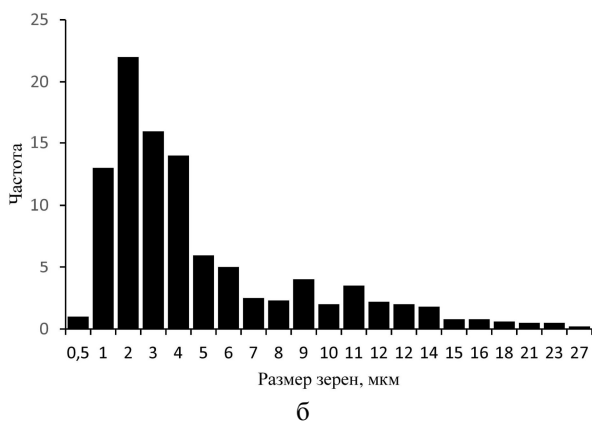
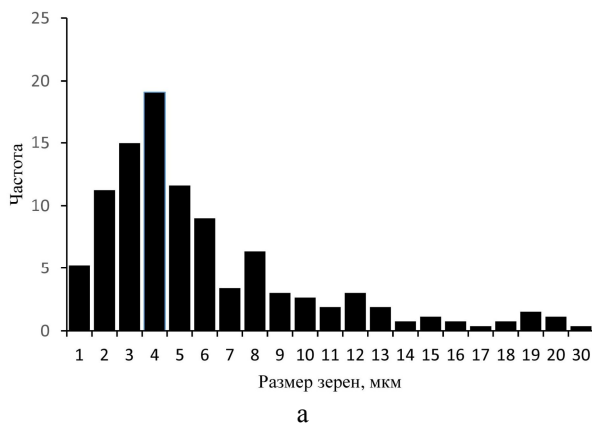


Рис. 6. Гистограмма распределение зерен в заготовке-штамповке (а) и лопатке КВД (б)

Микроструктура сечения пера лопатки после штамповки и термической обработки достаточно неоднородна, наблюдались как равноосные зерна, так и вытянутые зерна неправильной формы. Распределение карбиды достаточно равномерно, но они сильно различались по размеру (на данном этапе, величина упрочняющих фаз не является определяющим параметром, т.к. некоторое "перестаривание" сплава может в дальнейшем облегчать механи-

ческую обработку). Размер равноосных зерен находился в пределах 6...12 мкм. Размер вытянутых зерен колебался в пределах 2...20 мкм. Такие различия в размере зерен, вероятно, свидетельствуют о неоднородности деформации по сечению заготовки, вследствие чего неоднородно развиваются процессы рекристаллизации, что приводит к различию в размерах зерен.

Поверхность пера лопатки характеризовалась также неравномерным распределением в размерах зерен от 2 до 15 мкм. Карбиды распределялись также неравномерно. Также наблюдалась неоднородная микроструктура хвостовика лопаток: у поверхности наблюдались очень мелкие зерна, а в сечении как равноосные, так и вытянутые размером 2...20 мкм. Исследования микроструктуры поверхности пера и хвостовика лопаток позволили установить, что значительная разнородность формируется на заготовительном этапе технологического процесса и наследуется при последующих операциях.

На этапе формообразования пера лопаток исследовали лопатки после высокоскоростного строчного фрезерования (ВСФ) и термической обработки (рис. 7).



Рис. 7. Заготовки лопаток КВД после высокоскоростного фрезерования пера

На аэродинамических поверхностях пера лопаток после фрезерования наблюдался регулярный микрорельеф в виде поперечных строчек. Ширина строчек фрезерования составляла 0,7 мм. Термическая обработка лопаток после высокоскоростного фрезерования не приводила к изменению топографии аэродинамических поверхностей пера (рис. 8).

Выявлено, что ручное полирование способствовало устранению выступов на границе строчек от предшествующего фрезерования (рис. 9).

В результате исследования поверхности радиуса перехода от хвостовика к перу для трех различных лопаток установлено, что состояние поверхности переходной зоны для исследованных лопаток различается – на ряде лопаток наблюдаются поперечные риски. Особенности морфологии наблюдаемых рисков свидетельствуют об их образовании в процессе ручного полирования.

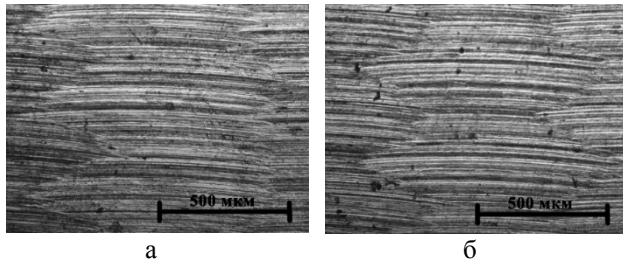


Рис. 8. Аэродинамические поверхности пера лопатки после высокоскоростного фрезерования: а – спинка; б – корыто

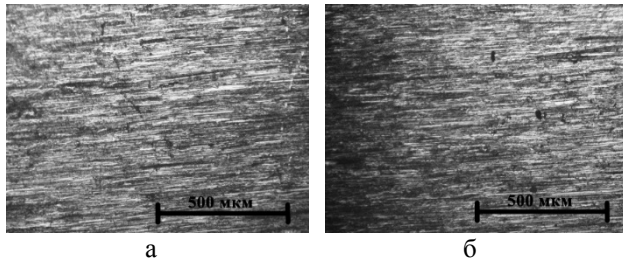


Рис. 9. Аэродинамические поверхности пера лопатки после высокоскоростного фрезерования, термической обработки и ручного полирования: а – спинка; б – корыто

Различия в топографии поверхности переходной зоны исследуемых лопаток свидетельствуют о нестабильности процесса ручного полирования.

Последующая упрочняющая обработка поверхностного слоя аэродинамических поверхностей стальными шариками приводила к смятию выступов микронеровностей (рис. 10).

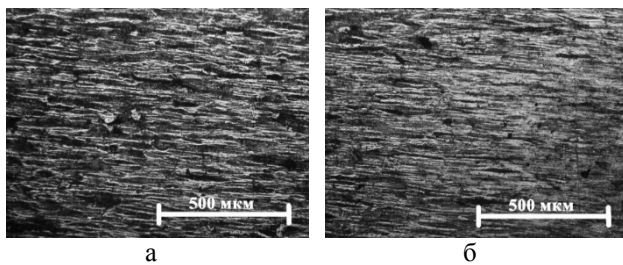
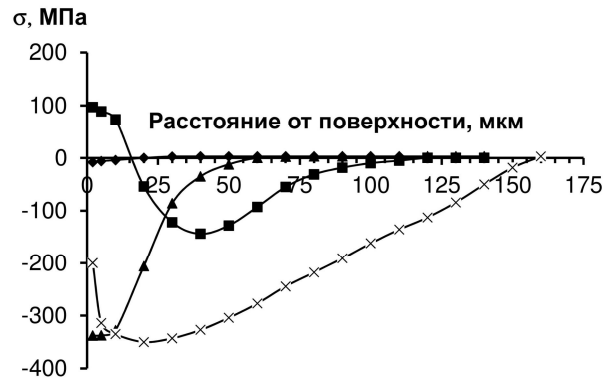


Рис. 10. Аэродинамические поверхности пера лопатки после высокоскоростного фрезерования, термической обработки, ручного полирования и ультразвукового упрочнения стальными шариками: а – спинка; б – корыто

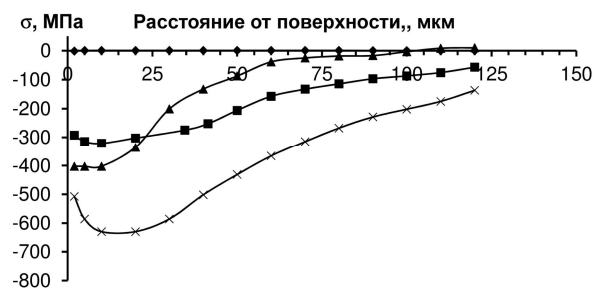
Исследования остаточных напряжений формируемых в поверхностном слое пера лопаток КВД после различных технологических операций позволили установить, что после высокоскоростного строчного фрезерования на поверхности наблюдались растягивающие напряжения, величина которых не превышала 100 МПа. В поверхностном слое пера после ВСФ наблюдались сжимающие остаточные напряжения,

максимальная величина которых достигает 150 МПа при глубине залегания 125 мкм (рис. 11а).

В переходной зоне лопатки, формообразование которой выполнялось при линейном контакте режущей кромки фрезы и обрабатываемой поверхности, формировались сжимающие остаточные напряжения, величина которых составляла 300...330 МПа при глубине залегания более 125 мкм (рис. 11б).



а



б

Рис. 11. Эпюры остаточных напряжений на поверхности спинки лопаток (а) и в переходной зоне (б): ♦ – термическая обработка после ВСФ; ■ – ВСФ; ▲ – полирование; х – УЗУ

Термическая обработка способствовала практически полной релаксации остаточных напряжений после фрезерования. Величина остаточных напряжений после старения не превышала 8...10 МПа (рис. 11а, б).

В процессе ручного полирования как пера лопатки (рис. 11а), так и переходной зоны (рис. 11б) в поверхностном слое формировались остаточные напряжения сжатия. При этом величина напряжений и глубина залегания максимума в переходной зоне несколько больше, чем аналогичное значение для пера. Наблюдаемая закономерность может объясняться большим удельным давлением при полировании переходной зоны.

Упрочняющая обработка поверхности стальными шариками в ультразвуковом поле формировала как в пера лопатки (рис. 11а), так и в переходной зоне (рис. 11б) напряжения сжатия. Максимальная

величина напряжений сжатия достигала 350 МПа и 600 МПа, соответственно, для пера и переходной зоны. Глубина залегания напряжений в обоих случаях превышала 150 мкм.

Таким образом, исследования остаточного напряженного состояния поверхностного слоя лопаток КВД на различных этапах технологического процесса изготовления показали, что на финишных этапах технологического процесса в нем формируются значительные по величине и глубине залегания напряжения сжатия.

На основании рентгенодифрактометрических исследований установлено, что на различных этапах технологического процесса фазовый состав материала лопатки не изменялся (рис. 12). Термическая обработка приводила к значительному уменьшению уширения пиков, что свидетельствовало о снятии внутренних напряжений в сплаве. Наблюдаемое перераспределение интенсивностей дифракционных максимумов (рис. 12), свидетельствует о наличии текстуры. Интенсивность дифракционных максимумов после термической обработки отличалась от их интенсивности от образцов, вырезанных из прутка, и лопаток после фрезерования, что связано с формированием текстуры поверхностного слоя.

После полирования и УЗУ интенсивность дифракционных максимумов вновь перераспределялась, что, вероятно, также являлось следствием формирования некоторой текстуры в поверхностном слое вследствие пластической деформации.

Наблюдаемая неоднородность размеров зерен в лопатках и возможное формирование неблагоприятной текстуры в поверхностном слое материала являются основными причинами снижения эксплуатационных свойств лопаток при периодическом нагружении.

Перспективным методом формирования благоприятной, с точки зрения прочности при переменных нагрузках, структуры материала, является интенсивная пластическая деформация (ИПД) [6-8]. В процессе ИПД заготовок происходит фрагментация структурных элементов сплава (рис. 13), формируется мелкодисперсная структура с размером зерен порядка 100...300 нм. Интенсивная пластическая деформация заготовок также способствует гомогенизации легирующих элементов по всему сечению заготовки, что сказывается на снижении рассеяния прочностных характеристик материалов [9].

Мелкодисперсная структура, предварительно сформированная в заготовках из сплава ЭП718-ИД используемых для изготовления лопаток КВД, позволяет выполнять дальнейшую обработку давлением (например, штамповку или вальцевание пера), которая не сопровождается ростом зерен.

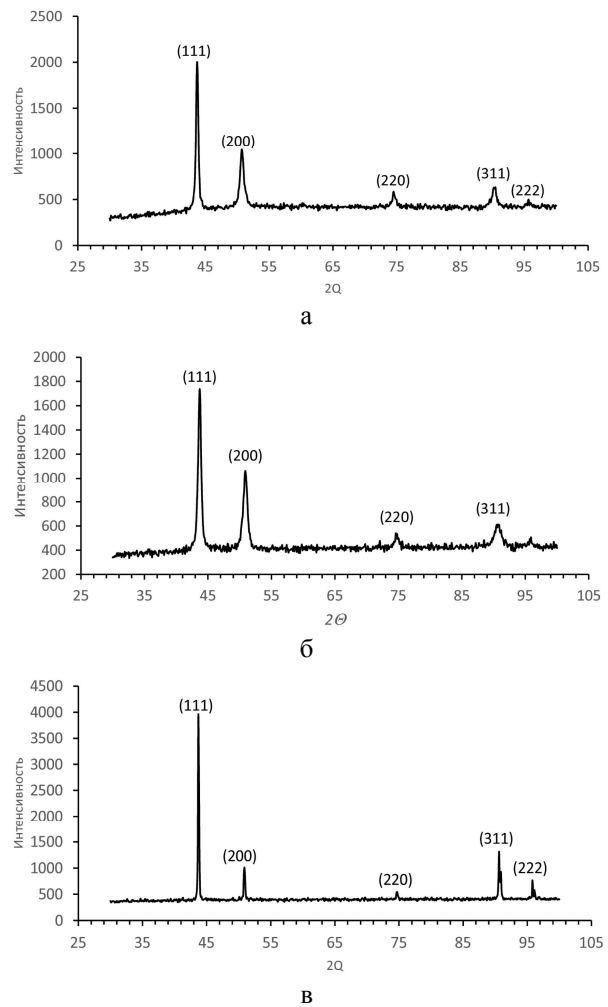


Рис. 12. Дифрактограмма поверхности лопаток после основных этапов изготовления: а – исходная заготовка; б – высокоскоростное фрезерование; в – термическая обработка

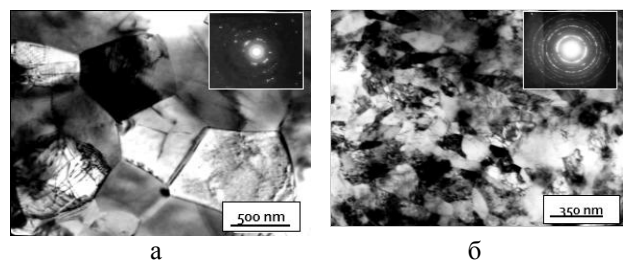


Рис. 13. Микроструктура заготовки в исходном состоянии (а) и после интенсивной пластической деформации винтовой экструзией (б)

Результаты экспериментов по ИПД методом винтовой экструзии призматических образцов, полученные на образцах из сплава аналога ЭП718-ИД – Inkonel 718 в Донецком национальном техническом университете им. А.А. Галкина, показали значительное снижение разнорзернистости. В исходных заготовках наблюдались зерна в диапазоне

4... 52 мкм (рис. 14а), в то время как в заготовках подвергнутых ИПД наблюдались зерна в диапазоне 1...15 мкм (рис. 14б). При этом после ИПД 72...73% зерен в заготовке имеют 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.

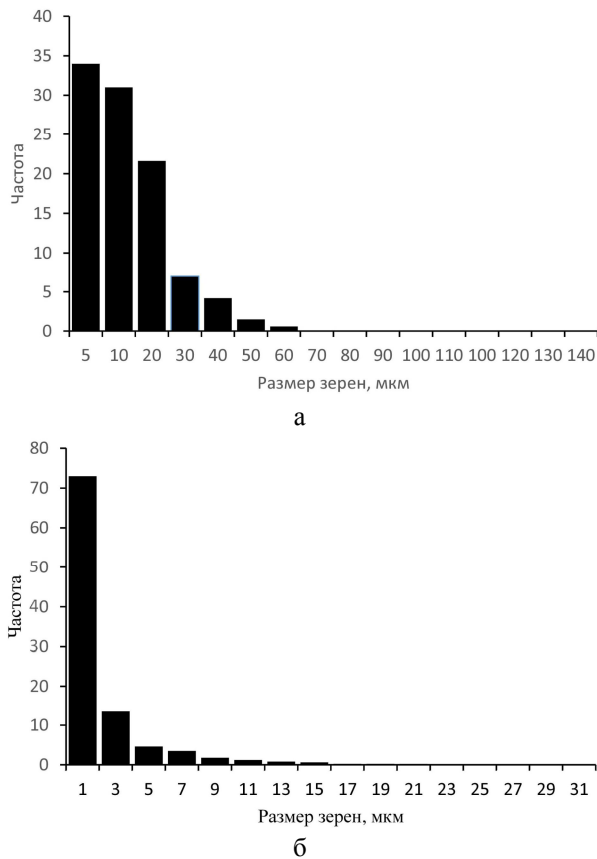


Рис. 14. Распределение размеров зерен в сплаве Inconel 718 в исходном состоянии (а) и после интенсивной пластической деформации винтовой экструзией (б)

Также установлено, 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 деформации образца, она превышает некоторую пороговую величину, являющуюся критической для данного сплава. Установлено, что при повторной деформации сплава, размер зерна практически не изменяется (рис. 15).

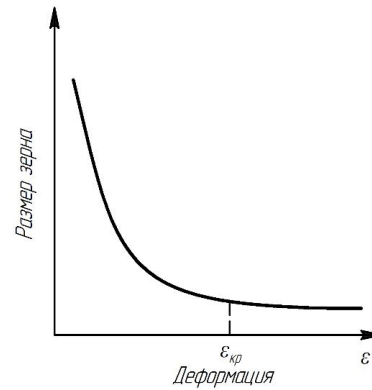


Рис. 15. Зависимость размера зерен от степени деформации

Выводы

Таким образом, для формирования мелкозернистой однородной структуры необходимо проведение "холодной" деформации исходных заготовок лопаток КВД для получения степеней деформации выше критических, например, с использованием методов интенсивной пластической деформации. В процессе последующей штамповки заготовок размер зерен не претерпевает существенных изменений как в пера, так и в хвостовике лопатки. Реализация ИПД и последующей термической обработки для заготовок лопаток позволяет обеспечить во всех сечениях пера и хвостовика регламентированную структуру, отличающуюся низким значением коэффициента разнотерности, что способствует повышению комплекса эксплуатационных характеристик лопаток компрессора.

Литература

1. Проблемы и перспективы развития рынка пассажирских авиационных перевозок в Украине [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://icps.com.ua/pub/files/40/Aviation_policy_RUS.pdf. – 05.06.2014.
2. Сахнюк, Н. В. Технологические особенности изготовления лопаток компрессора методом высокоскоростного фрезерования [Текст] / Н. В. Сахнюк, В. К. Яценко, С. Д. Зиличихис // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ : ДДМА. – 2004. – № 16. – С. 126-131.
3. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД [Текст] : моногр. / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и др. – Запорожье : Мотор Сич, 2005. – 559 с.
4. Биргер, И. А. Остаточные напряжения. [Текст] / И. А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.
5. Брандон, Д. Микроструктура материалов.

Методы исследования и контроля [Текст] / Д. Брандон, У. Каплан. – М. : Техносфера, 2004. – 384с.

6. *Винтовая экструзия – процесс накопления деформации [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов и др. – Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.*

7. *Валиев, Р. З. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформации [Текст] / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Логос, 2000. – 272 с.*

8. *Валиев, Р. З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации [Текст] / Р. З. Валиев // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т. 1, № 1-2. – С. 208-216.*

9. *Применение винтовой экструзии для получения субмикроструктурной структуры и гомогенизации титанового сплава ВТ3-1 [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Я. Качан и др. // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 185-188.*

Поступила в редакцию 5.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологий производства авиационных двигателей А. И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", Харьков.

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРУ ВИСОКОГО ТИСКУ ЗІ СПЛАВУ ЕП718-ІД

Д. В. Павленко, Г. І. Пейчев, В. Ю. Коцюба, Я. Ю. Бейгельзимер, Е. В. Кондратюк, Д. В. Ткач, С. Д. Зілічихіс, М. О. Гребенников, С. О. Уланов

Представлено результати експериментальних досліджень якості лопаток компресора високого тиску зі сплаву ЕП 718-ІД, що виготовляють за технологічним процесом заснованому на формоутворенні пера високошвидкісним фрезеруванням. Встановлено, що для лопаток спостерігається зниження міцності при змінних навантаженнях, що є наслідком значної різнозеренності матеріалу. Запропоновано перспективний метод формування сприятливої, з погляду міцності при змінних навантаженнях, структури матеріалу, заснований на інтенсивній пластичній деформації вихідних заготовок.

Ключові слова: структура, залишкові напруження, різнозеренність, міцність, інтенсивна пластична деформація.

INCREASE OF OPERATING CHARACTERISTICS THE HIGH-PRESSURE COMPRESSORS BLADES FROM ALLOY ЭП718-ИД

D. V. Pavlenko, G. I. Pejchev, V. Ju. Kocjuba, Ja. Ju. Bejgel'zimer, E. V. Kondratjuk, D. V. Tkach, S. D. Zilichihis, M. O. Grebennikov, S. O. Ulanov

Results of experimental researches of quality of shovels of the high-pressure compressor from alloy ЭП718-ИД, made on a process based on morphogenesis feather are presented by high-speed milling. It is shown, that for blades strength decrease is observed at variable loads that is a consequence considerable inequigranular of a material. The perspective method of formation favorable, from the point of view of strength is offered at variable loads, the material structures, based on severe plastic deformation of billet.

Keywords: structure, residual stresses, inequigranular, strength, severe plastic deformation.

Павленко Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии авиационных двигателей, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: dvp_zntu@mail.ru.

Пейчев Георгий Иванович – технический директор, ГП "Ивченко-Прогресс", Запорожье, Украина.

Коцюба Виктор Юрьевич – заместитель технического директора, ПАО "Мотор Сич", Запорожье, Украина.

Бейгельзимер Ян Ефимович – д-р техн. наук, проф., начальник отдела, Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, Донецк, Украина.

Кондратюк Эдуард Васильевич – канд. техн. наук, главный технолог, ГП "Ивченко-Прогресс", Запорожье, Украина.

Ткач Дарья Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры физического материаловедения, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Зиличихис Сергей Давыдович – начальник бюро, ГП "Ивченко-Прогресс", Запорожье, Украина.

Гребенников Михаил Александрович – ведущий инженер, ГП "Ивченко-Прогресс", Запорожье, Украина.

Уланов Сергей Александрович – студент, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.