

УДК 621.438.002.2

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ЛОПАТОК ИЗ ЭВТЕКТИЧЕСКИ УПРОЧНЕННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© **Титов Вячеслав Андреевич**¹, д-р техн. наук; **Злочевская Наталия Константиновна**¹; **Качан Алексей Яковлевич**², д-р техн. наук; **Савчинский Иван Григорьевич**³, канд. техн. наук; **Вишневский Петр Сергеевич**¹

¹ Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». Украина, Киев. E-mail: v.a.titov@list.ru

² Запорожский национальный технический университет. Украина, г. Запорожье

³ ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)». Россия, Москва

Статья поступила 15.10.2013 г.

Рассмотрен комплексный процесс изготовления заготовок лопаток компрессора газотурбинного двигателя из сплава BT22, эвтектически упрочненного боридами титана. Показана эффективность использования двухстадийного прессования сплава системы Ti–TiB_n, при котором на первой стадии обеспечивают предварительное дробление более твердой упрочняющей фазы TiB_n путем деформирования в условиях всестороннего сжатия и больших сдвиговых деформаций, а на второй стадии – непосредственно прессование пера лопатки в условиях, близких к изотермическим. Показано, что реализованные процессы обеспечивают увеличение механических свойств предела прочности материала заготовок по сравнению с литой структурой в замковой части лопатки на 10–16%, а в теле пера лопатки на 17–20%.

Ключевые слова: заготовка лопатки компрессора; эвтектически упрочненные титановые сплавы; изотермическое прессование; винтовая уширяющая экструзия; микроструктура; дробление твердой упрочняющей фазы деформированием.

Перспективность использования наукоемкой техники машиностроения (летательных аппаратов, транспортных средств и других) определяется их надежностью и экономичностью в эксплуатации. Одним из основных факторов, который обеспечивает эти показатели, является применение эффективных металлов и сплавов, обладающих высокими механическими свойствами (прочностью и пластичностью), а также равномерной мелкодисперсной или специальной структурой.

Перспективность повышения механических свойств легированием металлов в последние годы снижается. Так, за последние 40–50 лет удельная прочность конструкционных алюминиевых сплавов увеличилась с 15 до 24–28 и, по прогнозу на ближайшие годы, может достигнуть 30–34. При этом значения удельного модуля упругости практически не изменяются и находятся на уровне $(24–27) \times 10^3$ [1–3]. Поэтому в середине прошлого столетия активно начали развиваться альтернативные технологии производства композиционных материалов и изделий из них.

В настоящее время одним из перспективных направлений является применение конструкционных материалов, упрочненных фазовыми составляющими твердых эвтектик – «квазиком-

позиционных». Особый интерес представляют эвтектически упрочненные материалы системы «титановый сплав – бориды титана (Ti–TiB_n)». Например, эвтектически упрочненный материал системы Ti–TiB_n на основе титанового сплава BT22 обеспечивает повышение предела прочности до 20% и предела выносливости до 10% [4]. Такие «квазикомпозиционные» структурно-неоднородные материалы имеют хорошие перспективы использования для изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей (ГТД), заготовки для которых в промышленных условиях получают прессованием [5, 6].

В процессе прессования заготовок наличие твердой и хрупкой структурной фазы эвтектики TiB_n вызывает определенные трудности, связанные с разрушением в процессе деформирования боридной составляющей. Это может привести к разрушению материала на граничной поверхности «титановый сплав – борид», а также, соответственно, к снижению механических свойств материала и прочности заготовки лопатки в целом [7]. С другой стороны, для обеспечения равномерности распределения механических свойств, а также для их повышения по сравнению со свойствами литой заготовки твердую фазу эвтектики TiB_n следует дробить, например путем деформирова-

ния. Поскольку в процессе дробления возникают условия, способствующие нарушению сплошности на границе контакта TiB_n с титановым сплавом, авторами работ [8, 9] были рассмотрены и установлены условия деформирования, которые обеспечивают сохранение контакта, «залечивание» дефектов и ориентацию частиц дисперсной упрочняющей фазы типа TiB_n .

Предварительные исследования показали, что деформирование заготовки лопатки из непосредственно литого материала затруднено из-за высокого градиента деформаций в переходной зоне от исходной заготовки к перу лопатки, что связано с необходимостью значительного дробления твердой фазы. Уменьшение степени дробления упрочняющего компонента при окончательном прессовании заготовки лопатки может быть достигнуто предварительным формированием мелкодисперсной структуры литой заготовки. Одним из перспективных направлений формирования мелкодисперсной микроструктуры металлов и сплавов является деформирование в условиях больших пластических деформаций сдвига при всестороннем сжатии [10, 11]. При реализации технологических схем обработки металлов деформацией простого сдвига при равноугловом прессовании [10, 11] или деформацией сдвига кручением при винтовом прессовании [12–14] под высоким гидростатическим давлением теоретически и экспериментально обосновано, что развитие деформаций сдвига однозначно связано с дроблением элементов структуры и повышением механических свойств. При этом также может быть обеспечено более равномерное распределение механических свойств и армирующих компонентов в замковой части заготовки лопатки после окончательного прессования.

В статье приведено экспериментальное обоснование эффективности комплексного двустадийного прессования квазикомпозиционного структурно-неоднородного эвтектически упрочненного материала из титанового сплава системы $Ti-TiB_n$ при изготовлении заготовок лопатки компрессора. Цель работы – обоснование комплексного процесса изготовления заготовок лопаток из эвтектически упрочненного боридом титана сплава VT22.

Исследованиями установлены закономерности формирования микроструктуры и свойств

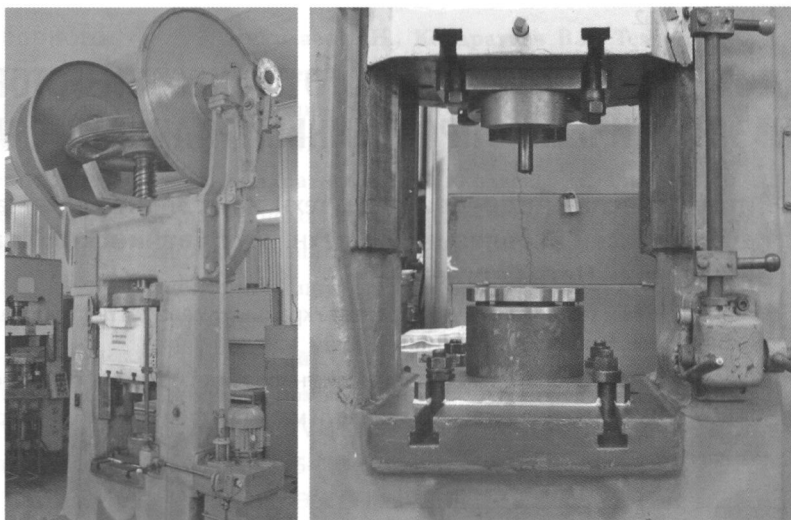


Рис. 1. Пресс и оснастка для винтовой уширяющей экструзии

материала в последовательно выполняемых процессах винтовой уширяющей экструзии [15] и последующего изотермического прессования заготовки лопатки из титанового «квазикомпозиционного» сплава системы $Ti-TiB_n$, а также сформулированы технологические рекомендации по реализации процессов.

Процесс винтовой экструзии реализован с использованием специальной оснастки, установленной на фрикционном пресс-молоте ФА-124 усилием 1,6 МН (рис. 1).

Для образцов использован материал системы $Ti-TiB_n$ эвтектического состава (бор – 1,55%, титановый сплав VT22 – основа), что соответствует объемному содержанию TiB_2 около 10%. Образцы после литья обрабатывали на электроэрозионном станке до размеров исходной заготовки диам. 29,5 мм и высотой 50 мм. Перед деформированием заготовку нагревали в печи типа СНОЛ 7,2/1000 до 930 °С – верхнего предела интервала температуры штамповки.

Скорость деформирования заготовки составляла 0,7–1,0 м/с. Оснастку нагревали газовой горелкой до 850 °С (до нижней границы интервала горячей штамповки материала заготовки). Температуру внутренней рабочей поверхности матрицы контролировали термомпарами. Условия деформирования были приближены к изотермическим. В качестве рабочего инструмента использовали матрицу для винтового прессования, которая обеспечивает деформирование заготовок по схеме «круг–эллипс–круг» [15]. В эллипсной части матрицы происходит сдвиг материала заготовки по винтовой образующей, таким образом обеспечивается максимальная степень деформации сдвига – до 2,5 за один проход – и дополни-

тельная равномерная по поперечному сечению деформация до 0,21. Осевой подпор заготовки для образования напряжений сжатия в очаге деформации реализован путем редуцирования с коэффициентом 0,9 [16].

Прессование заготовок производили в указанной ниже последовательности [14, 16]: 1 – для создания противодействия на первой операции в матрицу была запрессована фальш-заготовка из алюминиевого сплава Д16. Вследствие ее деформирования в канале матрицы для первой заготовки из материала Ti–TiB_n создавалось противодействие 0,4–0,5 МН; 2 – на последующих операциях проводили прессование исходных заготовок последовательно (одна за другой) в необходимом количестве; каждая предыдущая заготовка создавала противодействие для последующей; 3 – на последней операции заготовки выпрессовывали «на вылет» двумя шайбами на основе графита диам. 29,5 мм и суммарной высотой 55 мм. Максимальное усилие выпрессовки равнялось усилию прессования.

Далее выполняли повторное прессование заготовок, полученных на предыдущих операциях, по схеме первого перехода. Количество операций повторного прессования определяло степень деформации заготовки для последующего исследования.

Для сравнения микроструктуры материала в исходном состоянии (рис. 2, а) и после обработ-

ки винтовой уширяющей экструзией (рис. 2, б) были проведены металлографические исследования. Анализ микроструктуры показывает, что в результате пластической деформации происходит дробление твердой фазы боридов. Уменьшение размеров фазы TiB_n после прессования пропорционально величине деформаций сдвига, как это показывает фракционный анализ. Элементы твердой фазы приобретают упорядоченное расположение в направлении преимущественных градиентов деформаций сдвига. При этом периферийные зоны имеют большую степень упорядоченности, чем центральные зоны.

Поскольку измельчение происходит в условиях всестороннего сжатия при горячей пластической деформации титановой фазы, то на границах излома твердой фазы TiB_n происходит «залечивание» возникающих повреждений, что подтверждают результаты исследования поверхности шлифа при травлении.

В результате пластической деформации происходит дробление твердой фазы, размер частиц TiB_n уменьшается в 1,5–3,0 раза в слоях, близких к периферии, и в центральной зоне – в 1,1–1,3 раза. Это происходит вследствие неравномерного распределения деформаций сдвига в поперечном сечении образца. В результате такой обработки получают сплав системы Ti–TiB_n с измельченной фазой TiB_n и повышенными механическими свойствами (рис. 3, 4).

Механические свойства определяли при испытаниях на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497–84 [7].

Полученные после винтовой уширяющей экструзии заготовки сплава системы Ti–TiB_n с повышенными механическими свойствами использовали при формообразовании заготовки

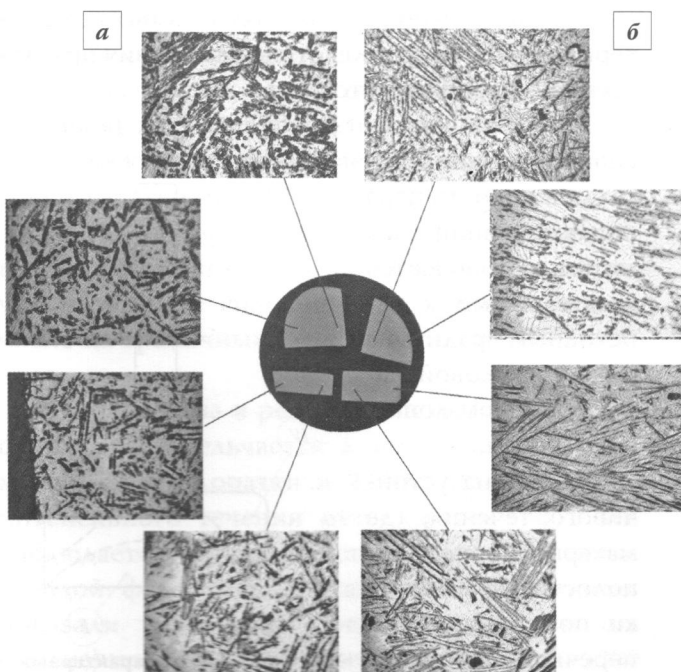


Рис. 2. Микроструктура материала: а – необработанный образец; б – образец после обработки винтовой уширяющей экструзией

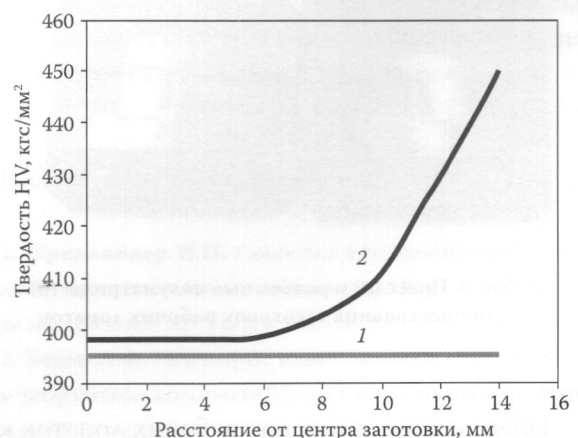


Рис. 3. Зависимость микротвердости по Виккерсу вдоль радиальной координаты до (1) и после обработки (2)

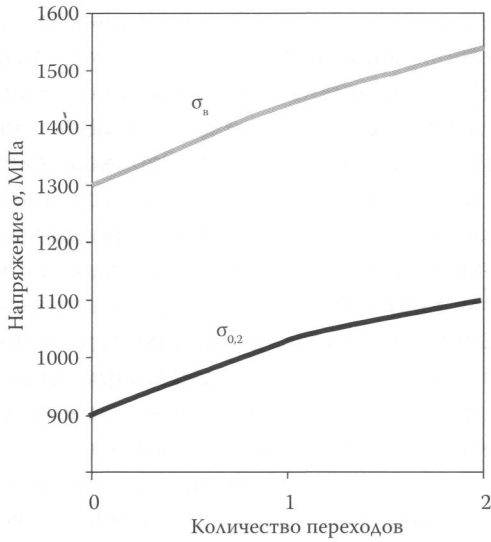
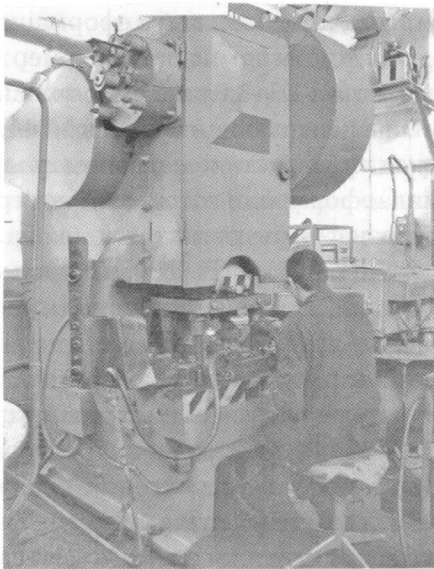


Рис. 4. Зависимость механических свойств от количества переходов изотермического винтового прессования образца (исходный образец – ноль переходов)



а



б

Рис. 5. Пресс (а) и разъемные полуматрицы (б) для прессования заготовок рабочих лопаток

пера лопатки.

Прессование заготовок рабочих лопаток компрессора авиационного двигателя проводили в условиях, близких к изотермическим, на кривошипном одностоечном прессе усилием 1000 кН

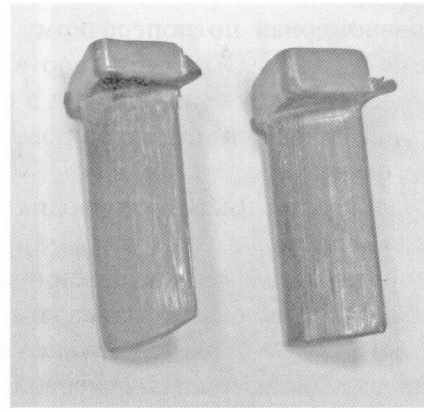


Рис. 6. Заготовки лопаток после прессования

(рис. 5, а) [5, 6]. Прессование проводили в разъемных матрицах с использованием серийной оснастки (рис. 5, б).

Перед прессованием на поверхность заготовки наносили защитный слой медного покрытия толщиной 9–12 мкм. Использование слоя меди с графитовой смазкой обеспечило снижение коэффициента трения, уменьшение числа дефектов поверхности заготовки (рис. 6), повышение стойкости рабочих поверхностей матрицы, улучшение заполнения формы матрицы.

В результате металлографического анализа поперечного сечения заготовки определены основные характерные зоны развития деформаций при изотермическом прессовании (рис. 7) в зависимости от характера течения металла:

I – зона контакта заготовки с пуансоном; материал в этой зоне вследствие сил трения практически не деформируется;

II – зона интенсивного течения металла в полость пера лопатки; линии тока металла являются касательными к переходным радиусам между замковой частью и пером лопатки;

III – зона устойчивого течения, где материал заполняет полость пера лопатки постоянного поперечного сечения;

IV – угловая зона – зона торможения течения материала.

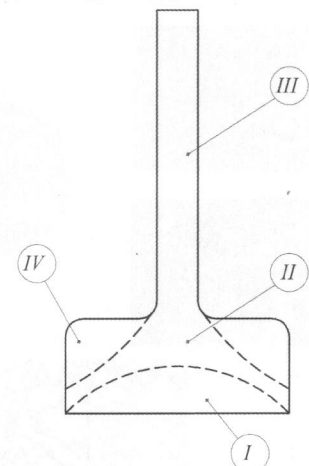


Рис. 7. Схема характерных зон течения металла в поперечном сечении образца заготовки лопатки

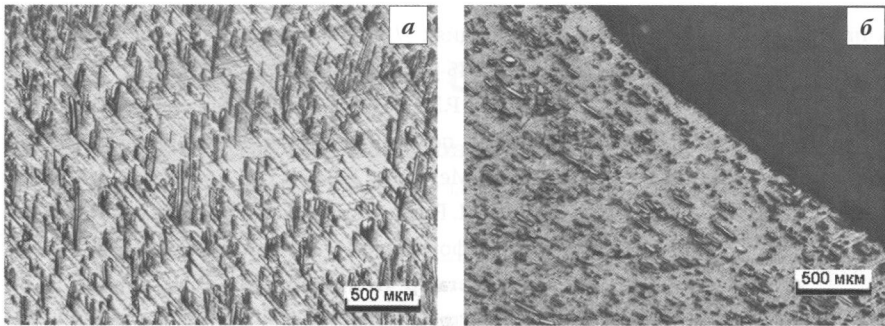


Рис. 8. Микроструктура металла в замковой зоне II течения (а) и в зоне радиуса перехода от замковой части к перу лопатки (б)

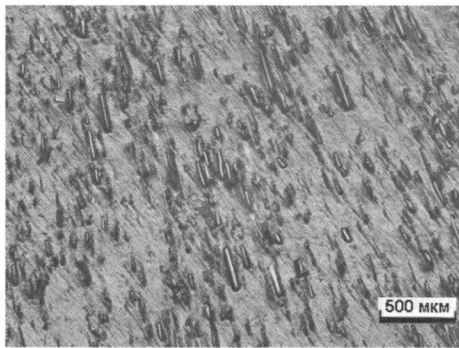


Рис. 9. Микроструктура металла в зоне пера лопатки

В зонах торможения I и IV металл имеет структуру, близкую к структуре исходной заготовки, которая сформирована при винтовом прессовании. В деформированных зонах II и III интенсивного течения включения TiB_n дополнительно измельчаются и ориентируются в направлении течения металла (рис. 8). В замковой зоне наблюдается четкая ориентация боридной составляющей в направлении течения металла. Такая же картина наблюдается в зоне пера заготовки лопатки (рис. 9).

Металлографические исследования поверхности шлифов после травления показали также, что нарушение сплошности материала, в том числе на граничных поверхностях, не наблюдается.

Твердая фаза в результате пластической деформации измельчается в замковой части и в металле пера лопатки в 2,5–5,5 раза. В зонах интенсивного течения металла (зоны II и III) наблюдается преимущественная ориентация твердой фазы TiB_n . Механические испытания показали увеличение предела прочности (на сжатие) по сравнению с литой структурой (1300 МПа) до 1500–1550 МПа в теле пера лопатки и до 1420–1460 МПа в замковой части, т.е. механические свойства для пера лопатки возрастают

на 10–16%, а для замковой части – на 17–20%.

Выводы. 1. Экспериментальное исследование комплексного процесса изготовления заготовок лопаток компрессора газотурбинного двигателя из эвтектически упрочненного титанового сплава BT22 боридами титана показало эффективность двухстадийного прессования эвтектически упрочненного материала системы $Ti-TiB_n$, при котором (первая стадия) обеспечивается предварительное дробление более твердой упрочняющей фазы TiB_n путем изотермического прессования в условиях всестороннего сжатия и больших сдвиговых деформаций и непосредственное прессование металла пера лопатки в условиях, близких к изотермическим (вторая стадия).

2. Установлено, что в результате пластической деформации происходит дробление твердой фазы боридов, так, на первой стадии размер частиц TiB_n уменьшается в 1,5–3,0 раза, а на второй стадии в 2,5–5,5 раза. Использование изотермических условий прессования и всестороннего сжатия обеспечивает залечивание повреждений, возникающих на границе излома твердой фазы TiB_n .

3. Реализованный процесс обеспечивает увеличение предела прочности материала заготовки по сравнению с литой структурой в замковой части лопатки на 10–16%, а в теле пера лопатки на 17–20%. При этом наблюдается анизотропия свойств, а их максимальная величина соответствует направлению ориентации частиц боридной фазы, достигнутой в результате преимущественных пластических деформаций.

Библиографический список

1. Фридляндер И.Н. Свойства композиционных материалов и эффективность их применения: В сб. «Композиционные материалы». М.: Наука, 1981. С. 5–11.
2. Белов А.Ф. Некоторые новые технологические принципы разработки конструкционных материалов на основе металлических сплавов: Кн. «Металловедение и технология легких сплавов». М.: Наука, 1979. С. 5–8.
3. Бастц Дж. Время композитов пришло / Аэрокосмическая техника. 1989. № 2. С. 181–186.

4. Ильин А.А., Колячев Б.А., Полюкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИАС – МАТИ, 2009. 520 с.

5. Кресанов Ю.С., Качан А.Я., Чигиринский В.В. и др. Влияние параметров горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток компрессора на качество их изготовления // Вісник двигунобудування (Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ»). 2009. № 2. С. 108–115.

6. Тітов В.А., Качан О.Я., Моляр О.Г. и др. Особливості процесів формоутворення заготовок лопаток з титанового сплаву системи Ti–TiB_n // Вест. НТУУ «Киевский политехнический институт». Сер. Машиностроение. 2011. № 61. С. 95–101.

7. Тітов В.А., Злочевская Н.К. Определение эффективных упругих характеристик композитов с несовершенным контактом компонентов: Міжвуз. зб. (за напрямом «Інженерна механіка») «Наукові нотатки Луцького НТУ. 2009. № 25, частина II. С. 276–280.

8. Тітов В.А., Лавріненков А.Д., Злочевська Н.К. Деякі особливості пластичного деформування металевих композиційних матеріалів з армуючими компонентами довільної форми // Вест. НТУУ «Киевский политехнический институт». Сер. Машиностроение. 2010. № 59. С. 135–139.

9. Тітов В.А., Лавріненков А.Д., Злочевская Н.К. Некоторые особенности механики поведения дисперсного включения в металлической матрице при больших пласти-

ческих деформациях // Обработка материалов давлением. 2012. № 2(31). С. 45–52.

10. Валиев Р.З. Развитие равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов // Металлы. 2004. № 1. С. 15–22.

11. Сегал В.М. Развитие обработки материалов интенсивной сдвиговой деформацией // Металлы. 2004. № 1. С. 5–14.

12. Бейгельзмер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков Г.С. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций. Донецк: фил. ТЕАН, 2005. 87 с.

13. Павленко Д.В., Овчинников А.В., Качан А.Я. и др. Применение винтовой экструзии для получения субмикросталлической структуры и гомогенизации титанового сплава VT 3-1 // Вестн. двигателестроения. 2007. № 2. С. 185–188.

14. Семенченко А.И., Злочевская Н.К., Вернидуб А.Г., Шеневидько Л.К. Изотермическое прессование литых заготовок из сплава Ак7ч // Вест. НТУУ «Киевский политехнический институт». Сер. Машиностроение. 2011. № 62. С. 237–241.

15. Пат. 64346 України. Матрица для зміцнення матеріалу при багаторазовому пресуванні // В.А.Тітов, М.С.Тривайло и др., опубл. 10.11.2011.

16. Злочевская Н.К., Дука В.М., Піманов В.В., Вишневський П.С. Деякі закономірності формування структурних властивостей ливарного сплаву АК7ч в умовах інтенсивних пластичних деформацій // Вест. НТУУ «Киевский политехнический институт». Сер. Машиностроение. 2011. № 62. С. 251–254.

FEATURES OF COMPLEX PROCESS OF BLADE'S WORKPIECES MANUFACTURING FROM EUTECTIC REINFORCED TITANIUM ALLOYS

© Titov V.A., Dr Sci. (Eng.); Zlochevskaya N.K.; Kachan A.Ya., Dr Sci. (Eng.); Savchinskiy I.G., Cand. Sci. (Eng.); Wisniewski P.S.

The complex process of manufacturing of blades of gas turbine compressor made from eutectic reinforced titanium alloy VT22 is investigated. The effectiveness of usage of two-stage pressing of eutectic reinforced material Ti–TiB_n was shown. The preliminary shattering of more hard reinforced phase TiB_n is ensures at the first stage of process by deformation in conditions of uniform compression and intense shear deformation. The pressing of blade in conditions near of isothermal pressing is carried out at the second stage of process. It was shown that realized process ensures increasing ultimate strength of material in the pull end of blade at 10–16% and in blade's body at 17–20% as compared to cast structure.

Keywords: workpiece of blade for compressor; eutectic reinforced titanium alloys; isothermal pressing; spiral widen extrusion; microstructure; shattering of hard reinforced phase by deformation.