

УДК 621.77: 669.2

Д. В. ПАВЛЕНКО¹, В. Ю. КОЦЮБА², С. Н. ПАХОЛКА²¹ Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина² АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина

ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В СЕРИЙНЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛАХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований условий формирования субмикроструктурной структуры в заготовках из легированных титановых сплавов ВТ8 и железоникелевых сплавов ЭП718-ИД и Inkonel 718. Показано, что дробление структурных элементов сплавов с сохранением целостности заготовки возможно в узком температурном диапазоне. Приведены результаты моделирования деформационной пористости при механической и деформационной обработке перспективных материалов лопаток ГТД – спеченных титановых сплавов и сплавов на основе алюминидов титана. Установлено, что предварительная интенсивная пластическая деформация винтовой экструзией способствует существенному повышению уровня технологической пластичности заготовок, что приводит к увеличению допустимой степени деформации и интенсификации режимов резания.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, титановый сплав, порошок, спеченная заготовка, железоникелевый сплав, сплав на основе алюминидов титана

Введение

Одними из прогрессивных методов обработки современных конструкционных материалов, применяемых в авиационно-космической технике, являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД). В последнее время они находят самое широкое применение для формирования в объемных заготовках субмикроструктурной структуры (СМК). Особенности структуры и свойств металлов, подвергнутых ИПД, достаточно хорошо изучены в работах [1-6] и являются основной причиной повышенного интереса к ним.

Анализ возможных путей применения методов ИПД в авиационном двигателестроении показывает, что наиболее перспективными являются повышение эксплуатационных характеристик конструкционных материалов для "холодной" части двигателя [6], снижение разнородности для сплавов на железоникелевой основе [8], получения присадочных материалов для восстановления моноколес и крупногабаритных лопаток вентилятора [9], а также для повышения технологической пластичности малопластичных материалов, таких как спеченные титановые сплавы, сплавы на основе алюминидов титана и вторичные алюминиевые сплавы [10].

Применяемые в конструкции компрессора ГТД в настоящее время серийные титановые сплавы и сплавы на железоникелевой основе исчерпали свои

возможности с точки зрения повышения прочностных характеристик путем легирования. Это приводит к ограничению нагрузок на детали ГТД. В тоже время их прочность может быть повышена за счет формирования СМК структуры методами ИПД.

Особую роль играют методы ИПД для перспективных материалов лопаток компрессора – спеченных сплавов и сплавов на основе алюминидов титана [11, 12]. Так, спеченные титановые сплавы характеризуются меньшей себестоимостью по сравнению с деформированными, получаемые по традиционной технологии. Сплавы на основе алюминидов титана обладают меньшей плотностью и большей жаропрочностью в сравнении с серийно применяемыми. Однако, невысокая ($\delta < 1...3\%$) пластичность предопределяет ряд технологических и эксплуатационных трудностей на пути их активного использования. Повышение пластичности в процессе ИПД, например, винтовой экструзией (ВЭ), является перспективной операцией для их промышленного применения. Однако, в настоящее время она исследована и применяется с целью повышения пластичности, в основном, для вторичных алюминиевых сплавов [10].

В связи с этим, исследования направленные на совершенствование методов ИПД и технологий их применения являются актуальными для развития авиационного двигателестроения.

Цель

Целью настоящей работы является анализ и экспериментальное исследование условий формирования субмикроструктурной структуры и повышения комплекса свойств в титановых и железоникелевых сплавах, а также возможность применения ВЭ для спеченных сплавов и сплавов на основе алюминидов титана.

Методика исследований

Деформацию заготовок осуществляли методом ВЭ на гидравлическом прессе усилием 1,6 МН. В поперечном сечении канал винтовой матрицы представлял собой плоский овал с размерами 12×20 мм. Длина винтового канала 7мм, угол поворота поперечного сечения канала 40°. Поперечное сечение заготовки повторяло геометрию канала винтовой матрицы. Для уменьшения трения поверхность заготовки омедняли и использовали специальную смазку на основе гидрида титана.

Исследования микроструктуры проводили на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100CXII при ускоряющем напряжении 100кВ, а также на растровых электронных микроскопах JSM-T300 и РЭМ-106И с применением химического анализа по линии и в точке. Количественный анализ структурных составляющих выполняли методом секущих с использованием в качестве анализируемой поверхности область шлифа размером 100×100мкм для определения количества структурных составляющих размером до 1000нм и 10×10мкм для определения количества структурных составляющих размером до 500нм. В качестве секущих использовали линейку в программном обеспечении оборудования.

С целью определения изменения механических свойств в различных зонах деформированных образцов определяли микротвердость на приборе ММ7Т фирмы «BUENLIER» при нагрузке индентора равной 50г в течение 10 с.

Результаты исследований

Успешная реализация методов ИПД, при которой в заготовке формируется СМК структура и сохраняется ее целостность возможна в узком температурном диапазоне. Согласно [13], температура статической рекристаллизации сплава ВТ8 происходит при температурах 900...950°С, поэтому верхний уровень температурного диапазона нагрева под деформационную обработку приняли равным 900°С. Нижний уровень приняли равным 650°С, исходя из того, что в районе 600...650°С имеет место скачко-

образное снижение пластичности и повышение сопротивления деформации. Режимы деформации, микротвердость и результаты анализа структуры образцов приведены в табл. 1. Как следует из анализа данных представленных в табл. 1, при температурах 800...900°С имела место динамическая рекристаллизация деформированных зерен, что подтвердил анализ структуры сплава.

Таблица 1

Режимы деформации и результаты исследований структуры и свойств сплава ВТ8 после ВЭ [14]

Температура нагрева, °С	Относительное кол-во рекристаллизованных зерен, %	Относительное кол-во СМК зерен с размером менее 500нм	Н _ц , МПа
900	100	0	2215...2800
850	90	0	2700...3050
800	30	10	3230...4100
750	≤ 5%	48%	3980...4220
700	≤ 5%	≥ 90%	4100...4280
650	образцы разрушились		

Снижение температуры деформации привело к уменьшению количества рекристаллизованных зерен и при 750°С процесс динамической рекристаллизации практически прекратился. Снижение температуры до 700°С способствовало большей деформационной проработке структуры, на что указывает повышение количества структурных составляющих с размерами менее 500 нм до 90% (см. табл. 1). При дальнейшем снижении температуры до 650°С установлено появление несплошностей, трещин на поверхности заготовок, а также полное разрушение заготовок в поперечном.

В микроструктуре сплавов деформированных при температурах 700...750°С установлено дробление основных структурных составляющих α- и β-фаз. В полученной структуре отсутствовали характерные для стандартных сплавов границы исходных β-зерен и α-оторочка. Границы α-фазы имели нечеткое очертание, что по нашему мнению связано с существенным уменьшением толщины границ, а также появлению общих когерентных плоскостей между двумя структурными составляющими, что является следствием высокой подвижности атомов в процессе деформации. Размер фрагментов структуры полученных при обработке ВЭ в указанном диапазоне температур составил 200...500 нм. Исследование микротвердости деформированной структуры показали, что в заготовках с размером структурных составляющих порядка 500 нм, микротвердость составляла 4280 МПа, что более чем в 1,5 раза выше, чем в исходном прутке [14].

Сплавы на железоникелевой основе, благодаря сочетанию прочностных свойств и способности работать в области повышенных температур находят широкое применение в конструкции роторов ГТД, например, в компрессоре высокого давления. Однако известно [15, 16], что сплавы на железоникелевой основе склонны к образованию в процессе деформационной и термомеханической обработок разнородности, приводящей к снижению уровня прочностных и служебных свойств. Формирование СМК структуры в исходных заготовках является эффективным методом устранения разнородности в сплавах такого класса.

Пластическая деформация железоникелевых сплавов достаточно затруднительна, что связывают с их низкой пластичностью при температурах деформации вследствие значительного насыщения твердого раствора легирующими элементами, узким температурным интервалом деформации и значительной чувствительностью к перегреву.

В группе железоникелевых сплавов наиболее распространенными и исследованными являются сплавы ЭП718-ИД и Inconel 718. Несколько отличаюсь содержанием легирующих элементов они относятся к различным подгруппам по механизмам упрочнения, что предопределяет особенности их упрочнения и поведения, в процессе термомеханической обработки.

Горячее деформирование сплава Inconel 718 целесообразно проводить в интервале температур 900...1120 °С с постепенным снижением температуры до 900...950 °С, что позволяет сохранить пластичность при дальнейшей обработке. С целью формирования в заготовке мелкого зерна деформацию проводят при температурах выше температуры сольвус γ' (γ'')-фаз и ниже температуры сольвус η (δ)-фаз. В этом температурном диапазоне сопротивление деформации сплава мало (от 200 МПа при скорости деформации 10^{-3} с^{-1} до 350 МПа при 10 с^{-1}), что резко снижает усилие деформирования. При этом частицы η (δ)-фаз способствует фрагментации зерен во время деформации и сдерживает их рост.

При приближении температуры нагрева сплава к температуре сольвуса возможно формирование двух типов микроструктуры – с однородными, динамически рекристаллизованными зернами или с зернами типа «ожерелье». Такая структура может образовываться в начале процесса пластической деформации, когда в результате динамической рекристаллизации на границах крупных деформированных, но нерекристаллизованных зерен формируется сеть окружающих мелких зерен.

На формирование зеренной структуры значительное влияние оказывает скорость деформации. При скорости деформации 10^{-3} с^{-1} , формируется

равномерное зерно соответствующее 11-9 баллу. При скорости деформации от 10^{-2} с^{-1} до 1 с^{-1} образуется структура типа «ожерелье». Размер зерна колеблется от 12-11 балла при скорости деформации 10^{-2} с^{-1} до 14-13 при скорости 1 с^{-1} . Скорость деформации 10 с^{-1} приводит к формированию однородного зерна 13-12 балла. Следовательно, при ИПД необходимо выбирать такую скорость деформации сплава, которая позволяла бы получать структуру с равномерно рекристаллизованными зернами.

В процессе пластической деформации важную роль играет морфология упрочняющих фаз [17]. Например, для сплава Inconel 718 сфероидизация частиц δ -фазы происходит в процессековки, но если температураковки приближается к температуре выделения этой фазы, на границах зерен формируются частицы реечного типа. Нагрев сплава в том же диапазоне температур, но без деформации, приводит к игольчатым выделениям частиц δ -фазы в теле зерна.

Таким образом, проведение винтовой экструзии сплава ЭП718-ИД является достаточно сложной задачей. Однако, на основании ранее проведенных работ по винтовой экструзии сплава Inconel 718 [18], а также того, что упрочнение металлов при кручении, характерном для ВЭ гораздо меньше, чем при удлинении или осадке, характерных для прокатки и прямой экструзии [19]. Успешная реализация ВЭ возможна в узком температурном и скоростном диапазоне, а также при условии проведения дополнительной термомеханической обработки заготовок (табл. 2).

Анализ условий выделения упрочняющих фаз и изменений микроструктуры сплавов ЭП718-ИД и Inconel 718 в процессе термомеханической обработки предопределяет проведение дополнительной термической обработки заготовок в процессе ВЭ. Для повышения пластичности после каждого цикла деформации ВЭ необходимо выполнять выдержку заготовки в температурном диапазоне 940...995°С (915...995°С для Inconel 718) с последующим быстрым охлаждением в воде. Это позволит растворить выпавшую при деформации упрочняющую γ' (γ') - фазу, не приводя к росту зерна.

Деформацию винтовой экструзией необходимо реализовывать при температурах нагрева оснастки порядка 300...400 °С, что определяется условием перевода рабочей среды ВЭ (графито-стеклянной смеси) в квазижидкое состояние. Для исключения температурных градиентов по объему заготовок перед ВЭ обеспечивают их нагрев до температуры нагрева технологической оснастки.

Таким образом, анализ условий интенсивной пластической деформации железоникелевых сплавов указывает на необходимость ее реализации в

низкотемпературной области (рис. 1) при температуре в диапазоне 300...400°C.

Таблица 2

Критерии и условия температурного интервала реализации ИПД сплавов ЭП718-ИД и Inconel 718

№	Критерии реализации	Условия реализации	T, °C	
			Inconel 718	ЭП718-ИД
1	Повышение пластичности	в диапазоне температур сольвус частиц $\gamma''(\gamma')$ и δ -(η -) фаз	915 995	940 995
2	Сохранение частиц η - (δ -) фазы и карбидов	ниже линии сольвус частиц η - или δ -фаз	< 995	< 995
3	Стойкость технологической оснастки	в области рабочих температур инструментальных сталей	< 500	< 500
4	Состояние рабочей среды	Обеспечение квазизжидкого состояния граффито-стеклянной смеси	300 400	300 400
5	Формирование СМК структуры	теплая деформация (0,3...0,4) ТПЛ	250 500	250 500

Преимуществом деформации в низкотемпературной области является возможность дробления и сфероидизации твердых и хрупких включений большого размера (карбидов, частицы $\eta(\delta)$ - и $\gamma'(\gamma'')$ -фаз, фазы Лавеса).

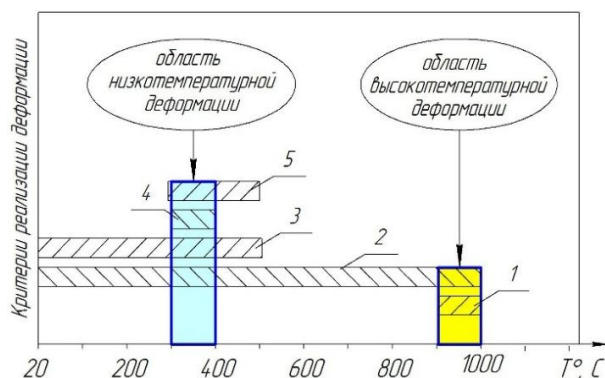


Рис. 1. Диаграмма температурных интервалов реализации ИПД сплавов ЭП718-ИД и Inconel 718 (обозначения согласно табл. 2)

Приведенный анализ показал, что это практически невозможно сделать путем деформации при высоких температурах, т.к. твердые частицы не имеют опоры и «плавают» в мягкой матрице. Для

исключения разрушения заготовок в процессе ВЭ при низких температурах, связанной со снижением их пластичности, необходимо предусматривать мероприятия, по созданию в плоскости деформации высокого уровня гидростатической компоненты тензора напряжения. Применительно к процессу деформации винтовой экструзии данное условие может быть реализовано путем деформации с противодавлением.

Для формирования методом ВЭ мелкозернистой структуры в заготовках из сплава ЭП718-ИД относительно малых размеров, может быть использована технология, основанная на операциях растворения основной упрочняющей γ' -фазы при температурах 940...995°C с последующим фиксированием полученной структуры путем быстрого охлаждения в воде, и ИПД методом ВЭ в диапазоне температур 300...400°C. Операции закалывания с температуры 940...995°C и единичный цикл деформации ВЭ проводят последовательно. В этом случае закалка позволяет снизить сопротивление деформации сплава благодаря растворению упрочняющей γ' -фазы, имеющейся в исходной заготовке и выпадающей в ходе предшествующей ВЭ в низкотемпературной области. При этом выделения частиц η -фазы будет сдерживать рост зерна во время ВЭ.

Операция ИПД будет приводить к фрагментации матричной фазы. При этом предполагается, что ВЭ при довольно низких температурах будет также способствовать измельчению и сфероидизации частиц η -фазы, а также карбидов, что благоприятно сказывается на комплексе механических свойствах.

Перспективным направлением применения ИПД является повышение технологической пластичности заготовок из малопластичных сплавов, например, спеченных из смеси порошковых компонентов и сплавов на основе алюминидов титана. Наиболее привлекательным способом для обработки таких материалов является винтовая экструзия. Ее особенностью является создание в очаге деформации высокого уровня гидростатического давления, что препятствует разрушению, а также формированию мультифрактальных вихревых явлений. Возникающие в плоскости деформации вихри способствуют массопереносу и перемешиванию, что приводит к диспергированию оксидного каркаса.

Пластическая деформация твердых тел неизбежно сопровождается микроразрушением, т.е. появлением и накоплением микронесплошностей. Последние разрыхляют материал и, в итоге, приводят к локализации деформации и макроскопическому разрушению. Значительное влияние на интенсивность микроразрушения оказывает величина гидростатической составляющей тензора напряжений. Повышение гидростатического давления позволяет уве-

личить предельную деформацию материала и обеспечить его более высокую устойчивость к локализации деформации [20]. Такая особенность процесса ВЭ обуславливает возможность обработки малопластичных материалов, таких как спеченные заготовки и заготовки из алюминидов титана.

Моделирование процесса деформации материалов с наличием хрупкого каркаса по границам зерен (спеченные заготовки) и заготовки подверженные ВЭ показывает (рис. 2), что для материала в спеченном состоянии предельная степень деформации до разрушения, при жесткости напряженного состояния советующего диапазону обработки резанием, не превышает 0,17...0,18.

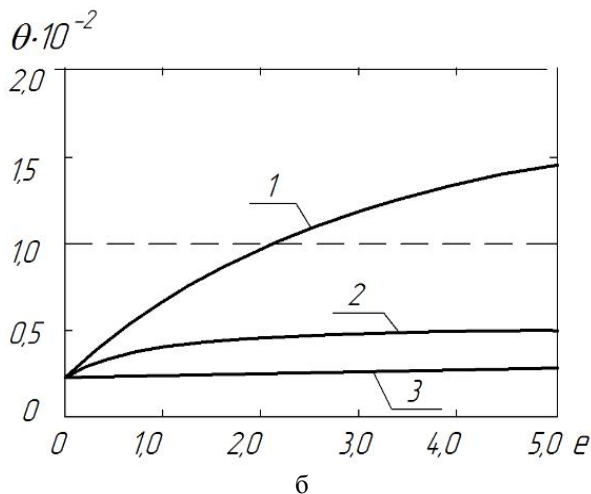
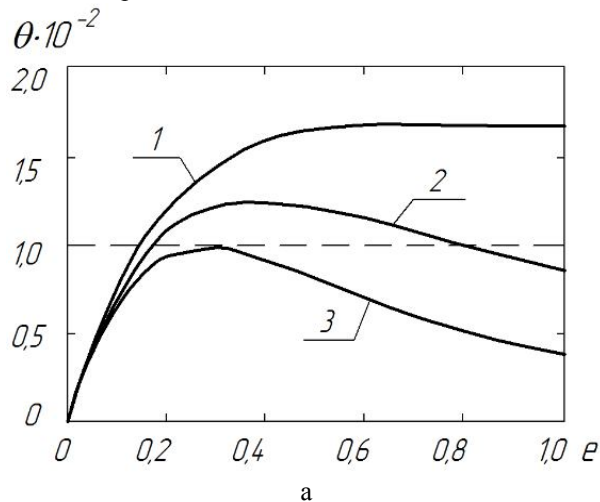


Рис. 2. Зависимости деформационной пористости от степени деформации для материала в исходном состоянии (а) и подвергнутого ВЭ (б) при различной жесткости напряженного состояния:

$$1 - \eta = -1/\sqrt{3}; 2 - \eta = -2; 3 - \eta = -4$$

Это ограничивает интенсификацию режимов резания при лезвийной обработке. При жесткости напряженного состояния более - 4, характерном для обработки методами интенсивной пластической деформации и изостатическому прессованию, пре-

дельная степень деформации превышает 5, что объясняет возможность их обработки и неразрушение при данных видах обработки. При этом кривая зависимости деформационной пористости для ВЭ имеет экстремальный характер. До степени деформации 0,25...0,3 наблюдается зарождение пор. Дальнейшая деформация приводит к их залечиванию. После ВЭ материал может обрабатываться осадкой до уровня деформации 2,1...2,2, в то время как допустимая степень деформации без разрушения при обработке лезвийным инструментом превышает 5 (рис. 2 б).

Выводы

Установлен интервал температур 700...770°C, позволяющий реализовывать процесс ИПД методом ВЭ жаропрочных титановых сплавов. Получен эффект дробления структурных составляющих $\alpha+\beta$ -сплава ВТ8 до размеров 200...500 нм. Полученные результаты исследований дают возможность реализации технологической схемы изготовления лопаток ГТД из титановых сплавов в СМК состоянии.

Установлено, что формирование СМК структуры в железоникелевом сплаве ЭП718-ИД возможно осуществить методами интенсивной пластической деформации по двум альтернативным технологиям. Первый вариант технологии предполагает деформирование в горячей области в диапазоне температур 940...995°C. Второй вариант предполагает реализацию деформации в холодной области в диапазоне температур 300...400°C. С точки зрения практической реализации в условиях серийного производства малоразмерных полуфабрикатов для лопаток компрессора ГТД, наиболее перспективным является второй вариант схемы построения технологического процесса. Проведение ИПД в низкотемпературной области возможно при условии чередования операций закалки с температуры 940...995°C и циклами деформации ВЭ при температуре заготовки 300...400°C при значительном уровне противодействия.

На основании моделирования показано, что повышение технологической пластичности путем ИПД приводит к улучшению обрабатываемости резанием, что позволяет реализовать процесс механической обработки для изготовления лопаток компрессора ГТД из малопластичных материалов, таких как спеченные сплавы и сплавы на основе алюминидов титана.

Литература

1. Бейгельзимер, Я. Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации [Текст] / Я. Е. Бей-

гельзимер, В. Н. Варюхин, Д.В. Орлов. – Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.

2. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства [Текст] / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Академкнига, 2007. – 397 с.

3. Useful properties of twist extrusion [Text] / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 503, № 1. – P. 14–17.

4. Утяшев, Ф. З. Деформационные методы получения наноструктурированных материалов и возможности их использования в авиационно-космической технике и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 7-11.

5. Совершенствование конструкций штамповой оснастки, средств автоматизации и прессового оборудования для реализации процесса винтовой экструзии [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, А. Ф. Тарасов, Р. Ю. Кулагин, А. В. Алтухов // Обработка материалов давлением. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 4 (37). – С. 184-189.

6. Алтухов, А. В. Систематизация процессов интенсивного пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в объемных заготовках [Текст] / А. В. Алтухов, А. Ф. Тарасов, А. В. Периг // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2, № 1. – С. 54-59.

7. Формирование субкристаллической структуры в сложнолегированных титановых сплавах [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников [и др.] // Перспективные материалы – 2009. – № 7. – С. 240-244.

8. Устранение разнородности в лопатках компрессора ГТД интенсивной пластической деформацией [Текст] / В. А. Богуслаев, В. Ю. Коцюба [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Вып. 80. – Дн-вск : ПГАСА, 2015. – С. 373-379.

9. Овчинников, А. В. Применение субмикрористаллических присадочных материалов для восстановления деталей из сложнолегированных титановых сплавов [Текст] / А. В. Овчинников // Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів : тези доп. XII міжнар. наук.-техн. конф., 6-8 жовтня 2010 р., Запоріжжя. – Запоріжжя, 2010. – С. 192-194.

10. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминий содержащих отходов [Текст] : моногр. / А. И. Шевелев, Я. Е. Бейгельзи-

мер, В. Н. Варюхин и др. – Донецк : Ноулидж, 2010. – 270 с.

11. Павленко, Д. В. Технично-економические аспекты технологических схем получения заготовок из титановых сплавов для лопаток ГТД [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников // Вестник двигателестроения – 2014. – № 1. – С. 98-103.

12. Куликовский, Р. А. Перспективы промышленного применения алюминидов титана в авиационно-двигателестроении [Текст] / Р. А. Куликовский, С. Н. Пахолка, Д. В. Павленко // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Вып. 80. – Дн-вск : ПГАСА, 2015. – С. 369-372.

13. Обработка титановых сплавов давлением [Текст] / Г. Е. Мажарова, А. З. Комановский, Б. Б. Чечулин, С. Ф. Важецин. – М. : «Металлургия», 1977. – 96 с.

14. Технологические особенности изготовления лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов с применением винтовой экструзии [Текст] / А. Я. Качан, А. В. Овчинников, Д. В. Павленко и др. // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 1. – С. 92-97.

15. Гинергарт, О. Ю. Влияние размера зерен на свойства жаропрочных сплавов [Текст] / О. Ю. Гинергарт // Динамика систем, механизмов и машин : мат. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Омск, 2009. – С. 338-342.

16. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок [Текст] : пер. с англ. В 2-х книгах. Кн. 1 / под ред. Ч. Т. Симса, Н. С. Столоффа, У. К. Хагеля. – М. : Metallurgia, 1995. – 384 с.

17. Wilkinson, N. A. Forging of 718 - the importance of T.M.P. [Text] / N. A. Wilkinson // Superalloy 718-Metallurgy and Applications. - The Minerals, Metals & Materials Society, 1989. - P. 119-133;

18. Пат. US 2008/0145691 А1 МПК С22С 38/00 С22С 19/00 Articles having a continuous grain size radial gradient and methods for making the same Pazhayannur R. Subramanian, Michael F. X. Gigliotti, D. V. Orlov, S. G. Snykov, Judson Sloan Marté, Jonathan Paul Blank, Y. Y. Beygelzimer ; заявник і патентовласник General Electric. – № 11/612,514 ; заявл. Dec. 19,2006 ; опубл. Jun. 19, 2008.

19. Горячее гидропрессование металлических материалов [Текст] / А. И. Колпашиков, В. А. Вялов, А. А. Федоров, А. П. Петров. – М. : Машиностроение, 1977. – 271 с.

20. Бейгельзимер, Я. Е. Физическая механика гидростатической обработки материалов [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Б. М. Эфрос. – Донецк : ДонФТИ НАНУ, 2000. – 196 с.

Поступила в редакцию 14.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры А. Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

**ФОРМУВАННЯ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ В СЕРІЙНИХ
ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ МАТЕРІАЛАХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД**

Д. В. Павленко, В. Ю. Коцюба, С. М. Пахолка

Представлено результати експериментальних і теоретичних досліджень умов формування субмікрористалічної структури у заготовках з легованих титанових сплавів BT8 і залізонікелевих сплавів ЭП718-ИД та Inkonel 718. Показано, що дроблення структурних елементів сплавів зі збереженням цілісності заготовки можливо у вузькому температурному діапазоні. Наведено результати моделювання деформаційної пористості при механічній та деформаційній обробці перспективних матеріалів лопаток ГТД – спечених титанових сплавів і сплавів на основі алюмінідів титану. Встановлено, що попередня інтенсивна пластична деформація гвинтовою екструзією сприяє істотному підвищенню рівня технологічної пластичності заготовок, що приводить до збільшення припустимого ступеня деформації та інтенсифікації режимів різання.

Ключові слова: інтенсивна пластична деформація, гвинтова екструзія, титановий сплав, порошок, спечена заготовка, залізонікелевий сплав, сплав на основі алюмініду титану

**THE FORMATION OF THE SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURE
IN THE SERIAL AND PERSPECTIVE OF MATERIALS FOR THE COMPRESSOR BLADE
OF GAS TURBINE ENGINE**

D. V. Pavlenko, V. Yu. Kotsjuba, S. N. Paholka

The results of experimental and theoretical studies of the formation conditions of submicrocrystalline structure of the billets made of titanium alloys BT8 and iron-nickel alloys ЭП718-ИД and Inkonel 718 are presented. It is shown that the crushing of the structural elements of alloys of preserving the integrity of the billet is possible in a narrow temperature range. The results of modeling of perspective materials gas turbine engine blades sintered titanium alloys and alloys based on titanium aluminide are presented. It is found that pre-intensive plastic deformation twist extrusion contribute substantially to the level of technological plasticity of the billets, which leads to an increase in the allowable degree of deformation and intensification of the cutting regimes.

Keywords: severe plastic deformation, twist extrusion, titanium alloy, powder, sintered alloy, iron-nickel alloy, alloy based on titanium aluminide.

Павленко Дмитрій Вікторович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології авіаційних двигателів Запорозького національного технічного університета, Запорозьке, Україна, e-mail: dvp_zntu@mail.ru.

Коцюба Віктор Юрьевич – аспірант каф. технології авіаційних двигателів Запорозького національного технічного університета; АО "Мотор Сич", Запорозьке, Україна.

Пахолка Сергій Николаевич – аспірант каф. технології авіаційних двигателів Запорозького національного технічного університета; АО "Мотор Сич", Запорозьке, Україна.