

Д.В. Павленко, к.т.н., доц.

Запорозький національний технічний університет

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ СПЕЧЕННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Рассмотрена актуальная для производства газотурбинных двигателей задача повышения пластичности заготовок из спеченных титановых сплавов технологическими методами. На основании теории деформационной микропористости выполнено моделирование состояния поверхностного слоя заготовок в исходном состоянии, а также после интенсивной пластической деформации методом винтовой экструзии. Приведены результаты моделирования микропористости при механической и деформационной обработке спеченных титановых сплавов.

Установлено, что предварительная интенсивная пластическая деформация винтовой экструзией, за счет диспергирования хрупкого оксидного каркаса по границам зерен, способствует существенному повышению уровня технологической пластичности заготовок из спеченных титановых сплавов и приводит к увеличению допустимой степени деформации. При обработке резанием это позволяет не допустить разрушения поверхностного слоя и интенсифицировать режимы обработки. Сделан вывод о возможности формообразования лопаток компрессора газотурбинных двигателей из заготовок, синтезированных методами порошковой металлургии.

Ключевые слова: порошок; титан; спеченная заготовка; деформация; пористость; пластичность; интенсивная пластическая деформация; винтовая экструзия; резание.

Анализ последних исследований и публикаций. Согласно концепции, рассмотренной в [1], для снижения стоимости изготовления одних из массовых деталей газотурбинных двигателей (ГТД) – лопаток компрессора (рис. 1), для их производства применяют заготовки, полученные путем синтеза из смеси порошковых компонентов на основе порошка титана. В [2] было показано, что характеристики прочности и пластичности образцов, полученных методом порошковой металлургии и интенсивного уплотнения винтовой экструзией, превышают значения, характерные для сплавов в литом, и приближенные к сплавам в деформированном состоянии.

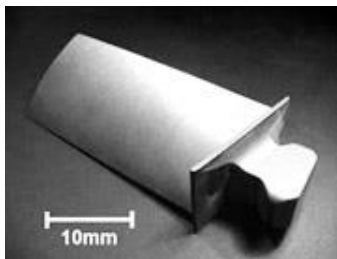


Рис. 1. Лопатка компрессора высокого давления газотурбинного двигателя

Особенностью технологии получения деформированных полуфабрикатов на основе методов порошковой металлургии и интенсивной пластической деформации (ИПД) является то, что в отличие от традиционных преимуществ методов порошковой металлургии, обеспечивающей высокое значение коэффициента использования материала, а в некоторых случаях полностью исключая необходимость дальнейшей механической обработки получаемых заготовок (рис. 2, а), она обеспечивает значительное снижение стоимости получения полуфабрикатов (рис. 2, б).



а)



б)

Рис. 2. Заготовки, получаемые методом порошковой металлургии по существующей (а) и опытной (б) технологиям

Особенности технологии получения деформированных полуфабрикатов из порошков определяют необходимость их дальнейшей механической обработки. В связи с этим, для изготовления из них лопаток компрессора ГТД неизбежно использование методов обработки давлением и резанием [3, 4]. Одним из условий возможности применения полуфабрикатов из смеси порошковых компонентов для изготовления лопаток компрессора является возможность их механической обработки лезвийными и

абразивними інструментами, а також методами пластического деформування.

Найбільше небезпечними, з точки зору руйнування поверхнового шару, є методи обробки, при яких матеріал піддається розтягуючим навантаженням, а також стисненню при переобладанні зсувних напружень і низькому рівню гідростатического тиску. До таких методів обробки можна віднести більшість методів лезвийної обробки і методи пластического деформування в відкритих прес-формах. Існуючі технології виготовлення лопаток включають періодическу прокатку, штамповку і вальцевання заготовок, а також видавлювання пера лопаток з циліндрическої заготовки або формообладання з прутка методами механіческої обробки [3]. Відомі також технології виготовлення лопаток, включаючі в себе виготовлення штамповкої заготовки лопатки з поетапною закруткою профіля пера, з послідовним удаленням припусков обробкою різанням, електрофізическими і іншими методами [4]. Таким образом, всі існуючі технології виготовлення лопаток ГТД передбачають значительну деформацію заготовок.

Формування проблеми в загальному вигляді і її зв'язок з науковими або практическими знаннями. Полуфабрикати титанових сплавів, застосовувані для виготовлення лопаток компресора ГТД, мають достатньо хорошу оброблюваність різанням [5, 6]. Особливістю заготовок, отримуваних методами порошкової металургії, є спекання частинок порошкової суміші в твердому стані. Відомо, що при твердофазному спеканні порошків титана на границях зерен знаходяться тонкі оксидні плівки і домішки, суттєво зменшуючі пластичність, що є однією з причин обмеженого застосування спеканих титанових сплавів. Підвищення їх пластичності є актуальною проблемою авіадвигателестроення. Її рішення дозволить більш широко застосовувати полуфабрикати і заготовки деталей ГТД, отримуваних методами порошкової металургії, і таким образом знизити вартість виробів.

Формування цілей статті. Метою нинішньої роботи є оцінка технологіческої пластичності полуфабрикатів, отриманих шляхом спекання суміші порошкових компонентів на основі титана і наступного ущільнення винтової екструзією.

Результати досліджень. Для руйнування оксидного каркаса по границям зерен в спеканих сплавах може бути використана технологія інтенсивної пластическої деформації заготовок,

например винтовой экструзией (ВЭ) [7]. Ее особенностью является создание в очаге деформации высокого уровня гидростатического давления, что препятствует разрушению, а также формированию мультифрактальных вихревых явлений [8]. Возникающие в плоскости деформации вихри способствуют массопереносу и перемешиванию, что приводит к диспергированию оксидного каркаса (рис. 3).

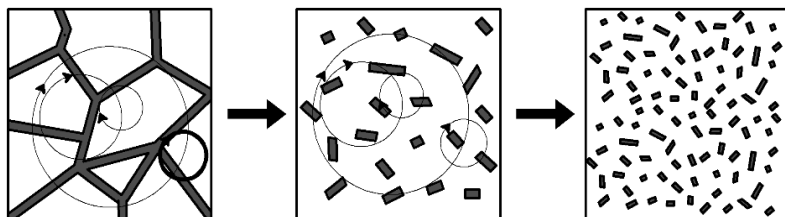


Рис. 3. Схема разрушения оксидного каркаса в спеченных заготовках при винтовой экструзии

Применение в технологическом процессе изготовления лопаток ГТД операции ВЭ позволит повысить технологическую пластичность и обеспечить приемлемую обрабатываемость при последующих операциях обработки давлением (штамповке и вальцевании), а также резанием. Количественный анализ технологической пластичности может быть выполнен на основе теории деформационной микропористости материалов, развитой Я.Е. Бейгельзимером с коллегами в [9–11]. Основой данной теории является оценка микропор, зарождающихся в материале в процессе пластического деформирования. В качестве критерия разрушения материала, не зависимо от схемы деформации, принято значение пористости 0,01 [12].

В [9] показано, что 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 увеличить предельную деформацию материала и обеспечить его более высокую устойчивость к локализации деформации [9].

В [9, 10] приведено кинетическое уравнение для оценки деформационной пористости, позволяющее рассчитать ее величину в

зависимости от показателя жесткости напряженного состояния и величины деформации материала:

$$\frac{d\theta}{d\gamma} = a + 6\alpha\theta\eta, \quad (1)$$

где Θ – деформационная пористость; a – параметр аккомодации, характеризующий скорость зарождения микропор; γ – интенсивность девиатора деформаций; α – параметр, характеризующий форму пор; η – коэффициент жесткости напряженного состояния, отражающий соотношение гидростатической составляющей тензора напряжений к девиаторной.

Уравнение (1) позволяет учитывать как возникновение, так и залечивание деформационных пор и может быть использовано двумя путями. Исследование его относительно параметров, контролирующих пористость, при фиксировании параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) позволяет оценивать пластичность сплава. Оценивая НДС и соответственно пористость в зоне пластической деформации при обработке резанием, а также в процессе обработки давлением и деформационного упрочнения, возможно проведение оптимизации режимных параметров обработки.

Величина α является количественной мерой способности структурных составляющих материала к взаимной аккомодации и, таким образом, характеризует пластичность. Наличие в материале твердых включений и оксидного каркаса по границам зерен, характерного для сплавов, полученных методами порошковой металлургии, существенно ограничивает возможность к взаимной аккомодации. В [9] показано, что величина $\alpha = 0$ соответствует случаю, если имеется возможность полной аккомодации структурных элементов друг к другу при деформации. При этом значение α растет с увеличением числа ограничений на совместную пластическую деформацию. То есть, чем менее эффективны механизмы аккомодации при пластической деформации структурных элементов, тем выше величина α [9].

Уравнение (2) позволяет выполнять дифференцированную оценку вклада в параметр аккомодации наличие твердого оксидного каркаса (α_1) и тела зерна (α_2). C_1 и C_2 – соответственно относительные вклады указанных механизмов в процесс порообразования.

$$\alpha = C_1\alpha_1 + C_2\alpha_2. \quad (2)$$

Исходя из физического смысла параметров уравнения (2) и результатов интегрирования выражений для постоянных C_1 и C_2 , в [9]

получено кинетическое уравнение для оценки деформационной пористости:

$$\frac{d\theta}{d\gamma} = \alpha_1 \exp(-\lambda\gamma) + \alpha_2 (1 - \exp(-\lambda\gamma))\gamma^n + 6a\theta\eta, \quad (3)$$

где α_2 , λ и n – постоянные параметры.

Уравнение (3) качественно верно описывает процесс разрушения материала в различных состояниях. Однако для получения количественных характеристик необходимо выполнить трудоемкую процедуру идентификации входящих в него переменных. В связи с этим, для оценки технологической пластичности на качественном уровне использовали предельные значения переменных, исходя из их физического смысла.

Применительно к рассматриваемым состояниям материала, переменными величинами, определяющими характер его поведения при обработке, являются α_1 и n . Жесткость напряженного состояния определяется видом и условиями обработки. Значение параметра α_1 , характеризующего механизм образования деформационных микропор, связанный с разрушением сплава по границам зерен из-за наличия хрупкого оксидного каркаса, может изменяться в диапазоне 0,1...1,0. Т.е., чем больше величина α_1 , тем больший вклад в увеличение пластичности вносит механизм разрушения оксидного каркаса по границам зерен. Так, для порошковых (неспеченных) заготовок, в которых частицы порошка не имеют прочных связей между собой, значение α_1 – минимально и составляет 0,1. Для спеченных заготовок и заготовок после ВЭ $\alpha_1 = 1$.

Значение параметра α_2 , характеризующего порообразование в теле зерна, зависит от деформации по степенному закону в связи с чем, в уравнении (3) этот механизм определяется постоянной величиной α_2 и показателем степени n , изменяющейся в диапазоне 0,1...1,0. Чем больше величина n , тем больший вклад в механизм зарождения деформационных микропор при обработке вносит тело зерна. Для порошковых материалов значение n – максимально и составляет 1,0. Для спеченных заготовок $n = 0,1$, для заготовок после ВЭ $n = 0,5$.

Значение коэффициента жесткости напряженного состояния определяется видом и режимом обработки. Для его оценки при лезвийной обработке использовали численную модель резания в системе LS-DYNA. Результаты моделирования позволили установить, что значение коэффициента η зависит от глубины резания, подачи и

скорости резания, и в процессе формирования, схода стружки циклически изменяется. Максимальное значение коэффициента η для режимов, соответствующих диапазону резания титановых сплавов, находится в диапазоне $-0,7 \dots -2,5$. При использовании методов обработки давлением, например осадки цилиндрических заготовок, значение коэффициента η составляет $-1/\sqrt{3}$ [9].

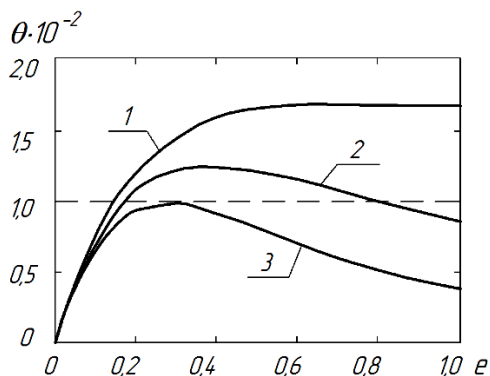
Исследование технологической пластичности выполняли для двух типов модельных материалов. Под материалом первого типа понимали материал, у которого разрушение происходит преимущественно путем зарождения в процессе деформации микропор на границах зерен. К материалам такого типа можно отнести спеченные сплавы, получаемые методами порошковой металлургии. Характерными значениями переменных для них являются $\alpha_1 = 1$; $\alpha_2 = 0,005$; $a = 0,1$; $\lambda = 5$; $n = 0,1$.

Под материалом второго типа понимали материал, у которого разрушение происходит преимущественно путем зарождения в процессе деформации микропор в теле зерна, что связано с наличием, например, частиц второй фазы, крупных карбидов неправильной формы и других включений. К материалам такого типа можно отнести сплавы в деформированном состоянии, а также сплавы, предварительно подвергнутые интенсивной деформации. Характерными значениями переменных для них являются: $\alpha_1 = 0,1$; $\alpha_2 = 0,005$; $a = 0,1$; $\lambda = 5$; $n = 1$.

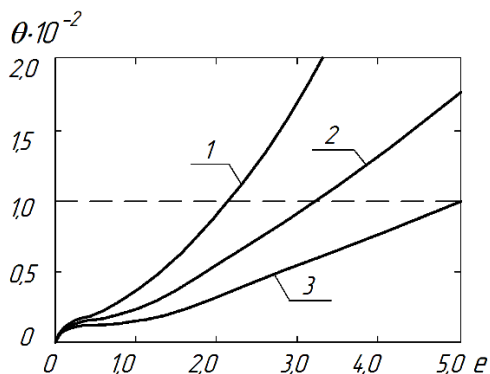
Решения уравнения (3) численным методом в системе Mathcad для начальных условий, соответствующих материалам первого и второго типов при различных значениях коэффициента жесткости напряженного состояния, показаны на рисунке 4.

Анализ зависимостей (рис. 4) позволяет сделать выводы о влиянии предварительной интенсивной пластической деформации методом ВЭ на способность к дальнейшей обработке спеченных сплавов резанием и давлением. Так, для материала в спеченном состоянии предельная степень деформации до разрушения, при жесткости напряженного состояния, соответствующего диапазону обработки резанием, не превышает $0,17 \dots 0,18$, что ограничивает интенсификацию режимов резания при лезвийной обработке. При жесткости напряженного состояния более -4 , характерного для обработки методами интенсивной пластической деформации и изостатического прессования, предельная степень деформации превышает $5,0$, 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.



а)



б)

Рис. 4. Зависимости деформационной пористости от степени деформации для материала первого (а) и второго (б) типов:

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

Модель материала, учитывающая отсутствие оксидного каркаса по границам зерен и предполагающая преимущественное разрушение

путем зарождения микропор в теле зерна, указывает на возможность реализации гораздо больших степеней деформации (рис. 4, б). Так, при осадке разрушение не произойдет до степени деформации 2,2...2,3, при лезвийной обработке – 3,2...3,3 и более 5,0 при интенсивной деформации винтовой экструзией. Полученные результаты объясняют низкую пластичность материалов, получаемых методами порошковой металлургии, и высокую пластичность для деформированных сплавов.

Принимая во внимание то, что для получения из спеченного материала, который условно относим к первому типу (рис. 4, а), материала второго типа (рис. 4, б) необходимо преобразование путем интенсивной пластической деформации, а также учитывая необходимость учета истории нагружения, интегрирование уравнения (3) выполняли с начальными условиями, соответствующими результатам предшествующей обработки методом ВЭ. Результаты решения уравнения (3) с начальными условиями $\gamma_0 = 7$; $\theta_0 = 2.3 \cdot 10^{-3}$, соответствующие пяти циклам деформации винтовой экструзией, показывают (рис. 5), что 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 5,0.

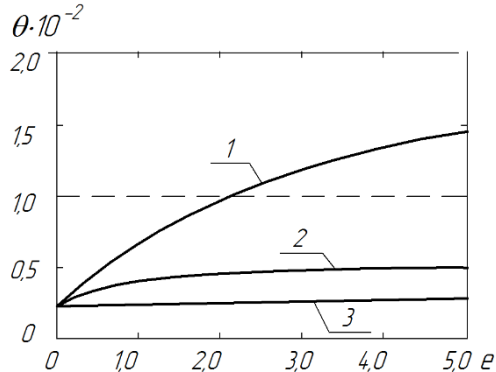


Рис. 5. Зависимости деформационной пористости от степени деформации для материала, предварительно подверженного винтовой экструзии: 1 –

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

Выводы и перспективы исследований. Моделирование поведения материалов при пластической деформации в результате технологической обработки на основании использованной модели

пластичности позволило установить следующие основные закономерности. Предварительная интенсивная пластическая деформация материала, полученного путем спекания порошков, за счет диспергирования хрупкого оксидного каркаса по границам зерен, способствует существенному повышению технологической пластичности. Повышение допустимой степени деформации при обработке заготовок резанием позволяет не допустить разрушения поверхностного слоя и интенсифицировать режимы резания.

Таким образом, повышение технологической пластичности полуфабрикатов спеченных титановых сплавов путем их интенсивной пластической деформации приводит к улучшению обрабатываемости резанием, что позволяет реализовать процесс механической обработки для изготовления лопаток компрессора ГТД.

Список использованной литературы:

1. Павленко Д.В. Материаловедческие аспекты ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов / Д.В. Павленко // Технологические системы. – 2013. — № 4 (65). – С. 21–29.
2. Павленко Д.В. Влияние исходного состояния титановых полуфабрикатов, подверженных интенсивной пластической деформации, на структуру и свойства / Д.В. Павленко, А.В. Овчинников // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – № 1. – С. 15–24.
3. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Ч. I : монография / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.
4. Крымов В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин. – М. : Машиностроение–Полет, 2002. – 376 с.
5. Изготовление заготовок деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, К.С. Колтуни др. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2000. – 288 с.
6. Исследование технологической наследственности при изготовлении деталей ГТД из титановых сплавов / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье, 2001. – 120 с.

7. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / *Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков.* – Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.
8. *Beigelzimer Y. Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation / Y.Beigelzimer // Materials Science Forum.* – 2011. – Vol. 683. – P. 213–224.
9. *Бейгельзимер Я.Е.* Физическая механика гидростатической обработки материалов / *Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Б.М. Эфрос.* – Донецк : ДонФТИ НАНУ, 2000. – 196 с.
10. *Beigelzimer Ya.E.* Continuum model of the structural -inhomogeneous porous body and its application for the study of stability and viscous fracture of materials deformed under pressure / *Ya.E. Beigelzimer, B.M. Efros, V.N. Varukhin, A.V. Khokhlov // Engineering Fracture Mechanics.* – 1994. – Vol. 48, № 5. – Pp. 629–640.
11. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминийсодержащих отходов : монография / *А.И. Шевелев, Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин* и др. – Донецк : Ноулидж, 2010. – 270 с.
12. *Черемской П.Г.* Поры в твердом теле / *П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин.* – М. : Энергюатомиздат, 1990. – 376 с.

ПАВЛЕНКО Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии авиационных двигателей» Запорожского национального технического университета.

Научные интересы:

- прогрессивные технологии авиадвигателестроения;
- порошковая металлургия титана;
- численное моделирование в системах ANSYS, LS-DYNA.

Тел.: (061) 769–82–69.

E-mail: dvp_zntu@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 30.06.2015