

УДК 621.77+621.431.75

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК
ИЗ $\alpha+\beta$ -ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ
ПРИ ИХ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ШТАМПОВКЕ
С НАГРЕВОМ ЗАГОТОВОК ВЫШЕ ТОЧКИ ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ**

© 2012 И. Л. Шитарев, А. И. Хаймович

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье обсуждаются методы повышения длительной прочности компрессорных лопаток ГТД за счёт формирования требуемых свойств структуры заготовок из $\alpha+\beta$ -титановых сплавов при их высокоскоростной штамповке (ВСШ) с нагревом исходных заготовок выше точки полиморфных превращений.

$\alpha+\beta$ -титановые сплавы, высокоскоростная штамповка, полиморфные превращения, длительная прочность, термомеханические режимы деформирования.

Одной из основных проблем жизненного цикла ГТД является ресурс компрессора, который во многом определяется механическими свойствами компрессорных лопаток, в частности их длительной прочностью. В этой связи в последнее время опубликовано большое количество исследований, направленных на технологию получения структуры изделий из $\alpha+\beta$ - титановых сплавов, обладающих устойчивостью к усталостному разрушению.

Известно, что титановый сплав ВТ9 относится к группе деформируемых сплавов мартенситного класса с $\alpha+\beta$ - фазовой структурой ($k_\beta = 0,3-0,9$) [1]. Легирование сплава алюминием (α -стабилизатор, который повышает температуру полиморфного превращения) и молибденом (β -изоморфный стабилизатор, который расширяет область твёрдых растворов на основе β -титана) позволяет сохранить устойчивую $\alpha+\beta$ - фазу в широком интервале температур, что обеспечивает оптимальное сочетание пластичности и прочностных свойств. В связи с этим основные усилия исследователей по оптимизации микроструктуры титановых сплавов сосредоточились на управлении термомеханическими операциями обработки. Обычно оптимальные свойства изделий достигаются сочетанием операций ступенчатого (в несколько этапов) деформирования и термообработки заготовок.

Например, патент США № 5026520 [2] раскрывает методы термомеханической обработки исходных слитков α , $\alpha+\beta$ -сплавов,

предназначенные улучшить β -размер зерна сплава. Предложенные методы включают в себя операции по ковке слитка при температуре выше $T_{\alpha+\beta}$, отжига при температуре не меньше ковочной температуры с целью рекристаллизации материала (или одновременная обработка давлением и рекристаллизация при температуре выше $T_{\alpha+\beta}$). Далее, после рекристаллизации β -зерна, сплав может подвергаться пластическому деформированию выше температуры $T_{\alpha+\beta}$ при условии, что основная часть обжатия с целью дробления первичной α -фазы происходит в $\alpha+\beta$ - области.

Оценка параметров микроструктуры, прежде всего характера выделения упрочняющей α -фазы (новообразованной при β -деформировании и существующей + новообразованной при $\alpha+\beta$ - деформировании), с точки зрения их влияния на комплекс механических свойств, по данным из различных источников неоднозначна.

Известно, что промежуточная деформация в $\alpha+\beta$ - температурном диапазоне главным образом требуется для того, чтобы привести в структуру сплава неоднородную энергию деформации с целью направленного воздействия на рекристаллизацию (улучшение размера исходного β -зерна сплава и измельчение α -фазы) при окончательном пластическом формообразовании либо отжиге (нормализации). Вместе с тем промежуточная деформация может внести целый ряд эффектов. Например, может развиваться распределенная по объёму микроскопическая по-

ристорость, известная как «деформационно-индуцированная пористость» (ДИП) [3]. Наличие ДИП сказывается на ухудшении механических свойств, в особенности отрицательному воздействию подвергается пластичность сплава и длительная прочность.

В работе [3] изложены исследования образования ДИП во время промежуточной обработки деформированием сплава "ELI" Ti-6Al-4V, прокатанного в диапазонах выше и ниже точки β -полиморфного превращения. Целью исследования было получение пластинчатой α -фазы (трансформированного β -зерна). Основываясь на этой работе, авторы предлагают дифференцированный нагрев заготовки, обеспечив более высокую температуру поверхности и пониженную температуру сердцевины заготовки с целью избежать появления ДИП. Предложенный способ открывает большую вариативность термомеханических методов обработки $\alpha+\beta$ и "бетированных" титановых сплавов, например [4]. Способ включает деформирование при первой температуре ($T_{sub.1}$), которая выше температуры β -полиморфного превращения, далее реализуется один из вариантов: деформирование при второй температуре ($T_{sub.2}$), которая больше чем $T_{sub.1}$ для рекристаллизации части сплава титана, или выдерживание сплава при температуре $T_{sub.2}$ некоторое время, достаточное для рекристаллизации хотя бы части титанового сплава. Окончательное деформирование сплава производится при третьей температуре ($T_{sub.3}$) при выполнении условия: $T_{sub.1} \geq T_{sub.3} > \beta T_{sub.}$, причём полуфабрикат не подвергается деформации при температуре ниже некоторой граничной температуры.

В настоящее время для получения заготовок компрессорных лопаток из титановых сплавов используется высокоскоростная штамповка (ВСШ) (скорость деформирующего инструмента 20...40 м/с, коэффициент вытяжки 5-9) в $\alpha+\beta$ -области, которая позволяет получать заготовки с мелкодисперсной структурой [5] за один удар молота.

Следует отметить, что применительно к процессам ВСШ с предварительным нагревом исходных заготовок ТВЧ изложенная выше [2-4] технология улучшения β -зерна неприменима, поскольку требует разделения

процесса формообразования на несколько переходов и не учитывает динамику процессов фазовых превращений при скоростном (до 2 мин) ТВЧ-нагреве и высокоскоростной штамповке. Вместе с тем, изложенный материал позволяет сформулировать ключевое требование к технологическому процессу скоростной штамповки заготовок лопаток с повышенным ресурсом (высоким пределом длительной прочности, высоким значением критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} (по I моде деформаций)): штампованная заготовка из $\alpha+\beta$ -сплава должна иметь волокнистую структуру, состоящую из вытянутой строчной рекристаллизованной β -фазы с вкраплениями деформированной первичной либо пластинами вторично рекристаллизованной α -фазы. Подобная структура обеспечивает повышенную ударную вязкость и торможение развития усталостной трещины при её пересечении пластинами β -фазы. Указанную структуру необходимо получить за один деформирующий переход сочетанием технологических операций предварительного нагрева и деформации заготовок в области выше точки полиморфного превращения или последующей двухступенчатой термообработки при температурах ниже точки полиморфных превращений.

С этой целью была проведена оптимизация термомеханических режимов деформирования применительно к ВСШ компрессорных лопаток с ТВЧ – нагревом исходных заготовок выше точки полиморфных превращений. Также был проведён комплекс исследований, направленный на формирование оптимальной структуры, обеспечивающей наибольшую длительную прочность при приемлемом уровне статических механических свойств.

Проведённые исследования позволяют сформулировать задачу о поиске оптимальных режимов предварительного нагрева и последедеформационной термической обработки в следующей постановке.

Обозначим через $X, x = \{T_{def}, (T_1, t_1), (T_2, t_2)\}$ область допустимых значений технологических вариантов, каждый из которых состоит из сочетаний температуры нагрева под штамповку T_{def} , температур и времён вы-

держки последеформационных отпусков соответственно T_1, T_2 и t_1, t_2 , заданных на множестве Y :

$$X = \{x/\sigma_b \geq 1130 \text{ МПа}, \delta \geq 35\%, K_{cv} \geq 430 \text{ КДж/м}^2, T_{\text{деф}} \geq T_{\alpha+\beta}\} \subset Y,$$

где Y - область эксперимента, $T_{\alpha+\beta}$ - температура полиморфного превращения, σ_b - предел прочности, δ - относительное удлинение, K_{cv} - ударная вязкость,

$$Y = \{x/950^\circ\text{C} < T_{\text{деф}} < 1200^\circ\text{C}, 530^\circ\text{C} \leq T_1, T_2 \leq 950^\circ\text{C}\}.$$

Целевая функция $\sigma_N = \sigma_N(x)$ есть отображение функции предела длительной прочности σ_N при базовом числе циклов N на множество допустимых значений Y технологических параметров экспериментов:

$$\sigma_N(x): X \left\{ \begin{array}{l} x | \sigma_b \geq 1130 \text{ МПа}, \delta \geq 35\%, \\ \psi \geq 12\%, K_{cv} \geq 430 \text{ КДж/м}^2, \\ T_{\text{деф}} \geq T_{\alpha+\beta} \end{array} \right\} \xrightarrow{\{T_{\text{деф}}, (T_1, t_1), (T_2, t_2)\}_{\text{opt}}} Y,$$

где $\{T_{\text{деф}}, (T_1, t_1), (T_2, t_2)\}_{\text{opt}}$ - искомая функция, удовлетворяющая критерию поиска $\sigma_N(x) \rightarrow \max_{\{T_{\text{деф}}, (T_1, t_1), (T_2, t_2)\}_{\text{opt}} \in X}$, ψ - относительное сужение.

Как показали экспериментальные исследования, между изменением механических свойств, характеризующих длительную прочность σ_N , с одной стороны, и кратковременными свойствами K_{cv}, ψ , с другой стороны, существует устойчивая положительная корреляционная связь:

(σ_N & K_{cv}) при

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{деф}} = \text{var}, (T_1, t_1) = \text{fix}, (T_2, t_2) = \text{fix} | \sigma_b \geq 1130 \text{ МПа}, \\ \delta \geq 35\%, K_{cv} \geq 430 \text{ КДж/м}^2, HB > 310 \end{array} \right\}$$

и (σ_N & ψ) при

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{деф}} = \text{fix}, (T_1, t_1) = \text{var}, (T_2, t_2) = \text{var} | \sigma_b \geq 1130 \text{ МПа}, \\ \delta \geq 35\%, K_{cv} \geq 430 \text{ КДж/м}^2, K_{cv} \geq 100 \text{ КДж/м}^2, HB > 310. \end{array} \right\}$$

где K_{cv} - вязкость разрушения образцов с забоинами, HB - твёрдость по Бринеллю.

Из этих связей вытекает, что с целью сокращения числа экспериментов оптимизационную задачу по поиску $\sigma_N(x) \rightarrow \max$ можно провести в два этапа, используя в качестве целевых функций кратковременные механические свойства K_{cv} и ψ :

- определение оптимальной температуры нагрева под штамповку $T_{\text{деф}}$;
- определение оптимальных режимов последеформационных отпусков $(T_1, t_1), (T_2, t_2)$.

$$\left(\begin{array}{l} \sigma_N(x) \rightarrow \max_{\{T_{\text{деф}}, (T_1, t_1), (T_2, t_2)\}_{\text{opt}} \in X} \\ K_{cv} \rightarrow \max_{\{T_{\text{деф}}\}_{\text{opt}} \in X_1}; \\ X_1 = \{T_{\text{деф}} = \text{var}, (T_1, t_1) = \text{fix}, (T_2, t_2) = \text{fix} | \sigma_b \geq 1130 \text{ МПа}, \\ \delta \geq 35\%, K_{cv} \geq 430 \text{ КДж/м}^2, HB > 310\}; \\ \psi \rightarrow \max_{\{(T_1, t_1), (T_2, t_2)\}_{\text{opt}} \in X_2} \\ X_2 = \{T_{\text{деф}} = \{T_{\text{деф}}\}_{\text{opt}}, (T_1, t_1) = \text{var}, (T_2, t_2) = \text{var} | \sigma_b \geq 1130 \text{ МПа}, \\ \delta \geq 35\%, K_{cv} \geq 430 \text{ КДж/м}^2, K_{cv} \geq 100 \text{ КДж/м}^2, HB > 310\} \end{array} \right) \Leftrightarrow$$

Найденное оптимальное сочетание режимов $\{T_{\text{деф}}, (T_1, t_1), (T_2, t_2)\}_{\text{opt}}$ далее проверяется экспериментально путём проведения контрольных испытаний на длительную прочность.

Результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных режимов высокоскоростного деформирования приведены на рис. 1 и 2.

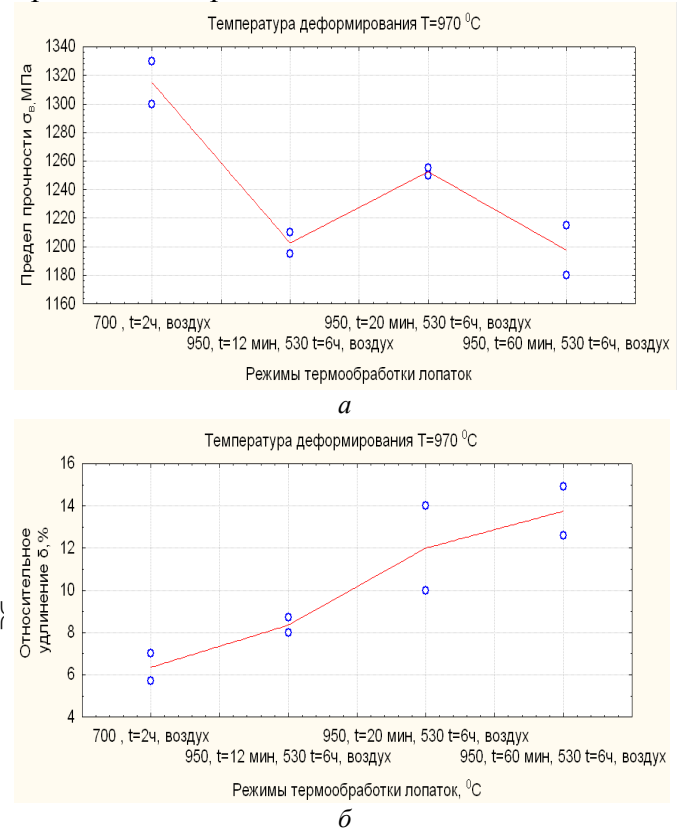


Рис. 1. Механические свойства материала пера лопаток в зависимости от режимов термической обработки при штамповке с температурой нагрева ТВЧ 970°C: а- предел прочности; б- относительное удлинение

Исследование зависимости структуры и механических свойств материала лопаток от времени выдержки заготовок лопаток проводилось при температуре высокого отпуска 950°C. Для сравнения отштампованные заготовки лопаток подвергались термической обработке, рекомендованной в [6] (отжиг 700°C, $t = 2$ ч) и обеспечивающей высокий уровень прочности при удовлетворительной пластичности.

Штамповка заготовок лопаток производилась на высокоскоростном молоте ВСМ-4. Температура нагрева исходных заготовок $1030 \pm 15^\circ\text{C}$. Термическая обработка осуществлялась в электропечи в среде аргона. Мак-

роструктура материала замков контролировалась на поперечных темплетах. Макроструктура лопаток, термообработанных при температуре 700°C, темнотравящаяся, с синим оттенком. Лопатки, термообработанные при 950°C, имеют матовую, более светлую поверхность.

На лопатках, отштампованных при температуре 970°C и термообработанных при 700°C, обнаружены линии повышенной травимости, являющиеся зонами интенсивного течения металла при штамповке. Расслоений по линиям повышенной травимости не обнаружено.

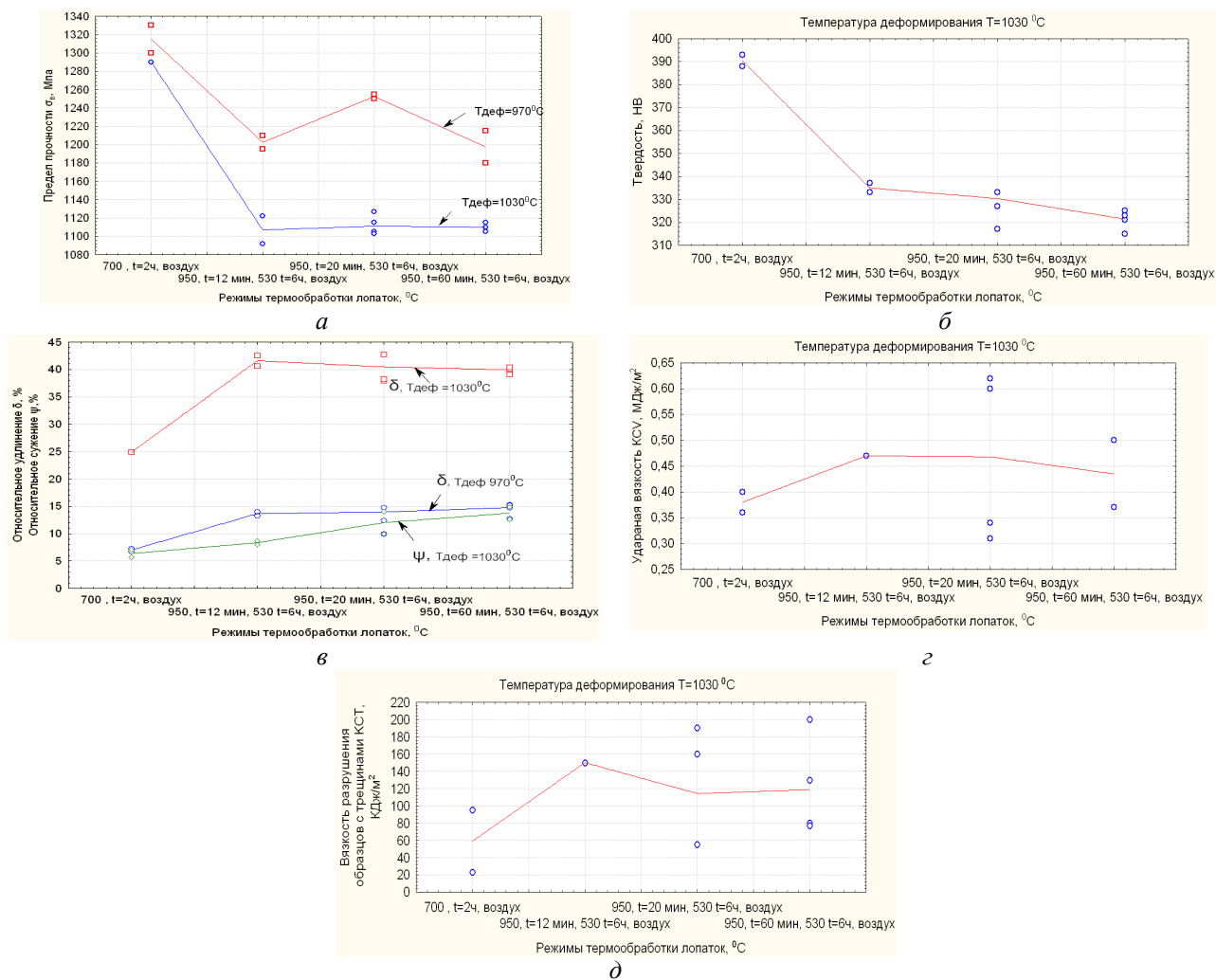


Рис. 2. Механические свойства материала лопаток в зависимости от режима термической обработки для лопаток, отштампованных при $T_{деф}=970^\circ\text{C}$ и $T_{деф}=1030^\circ\text{C}$: а, б – прочностные свойства, в – пластические свойства, г, д – вязкость разрушения

Для тех же лопаток после термообработки при 950°C, независимо от времени выдержки, линий повышенной травимости не наблюдается, т.е. структура и фазовый состав становятся более однородными, тип

структуры - муар. Макроструктура замка - без видимого зерна.

Макроструктура лопаток, отштампованных с нагревом исходных заготовок выше точки полиморфных превращений, отли-

чается от лопаток, отштампованных при 970°C, наличием видимого зерна, более однородной структурой, отсутствием зон повышенной травимости. Макроструктура плотная, дефектов не имеет. Макрозерно не превышает 2-го балла 10 балльной шкалы инструкции ВИАМ.

Структура материала лопатки после штамповки 970°C и отпуска 700°C в течение 2 часов - глобулярная, мелкодисперсная (10-20 мкм). Повышение температуры деформации до 1040°C приводит к увеличению зерна до 20-40 мкм, при этом в пера лопатки зёрна дробятся за счёт высокой степени деформирования ($\varepsilon > 400\%$) и приобретают направленность вдоль оси пера в направлении главной деформации. Дальнейшее увеличение температуры нагрева (1100°C) приводит к разориентировке пластин α - фазы в пера вследствие перекристаллизации. Как известно, пластинчатые структуры обеспечивают более высокую вязкость разрушения и меньшую скорость роста трещин, чем глобулярные структуры.

Это объясняется более резким изменением направления движения трещин в пластинчатой структуре, что связано с влиянием границ первичных β - зёрен и α - колоний, а также их ветвлением с образованием вторичных трещин.

Фазовый состав материала лопаток определялся на установке Дрон5.

Фазовый состав термообработанных лопаток во всех точках дифрактометрии: $\alpha + \beta + \alpha''$.

Фазовый состав нетермообработанных лопаток:

по замку - $\alpha + \beta + \alpha''$;

по перу - $\alpha + \alpha''$ и в некоторых точках $\alpha + \beta + \alpha''$.

Распределение β - фазы в замке и по оси пера составляет 15-18%. По кромкам лопатки в результате резкого выпадения с высокой температуры происходит выделение α' и α'' - фазы внутри β - зерна.

Кратковременные механические свойства определялись на различных образцах с диаметром рабочей части 3 мм, ударных образцах размерами 5×10×55 мм, ударных образцах с предварительно нанесённой усталостной трещиной глубиной 1,5 мм, вырезан-

ных из замка, и разрывных образцах, вырезанных из пера.

Анализ результатов показывает следующее.

Предел прочности материала лопаток, прошедших термическую обработку при температуре 700°C, выше, а пластичность и ударная вязкость ниже, чем после термической обработки по режимам стандартного отжига.

Механические свойства материала замка лопаток ($\sigma_g, \delta, \varphi, K_{cv}, K_{ст}, НВ$), прошедших термическую обработку при температуре нагрева 950°C с выдержкой 12, 20 и 60 минут, практически одинаковы.

Величина вязкости разрушения ($K_{ст}$) материала лопаток, прошедших термическую обработку при температуре 700°C, значительно ниже, чем при стандартном отжиге. Это указывает на повышенную склонность материала к хрупкому разрушению при этом виде термической обработки.

С увеличением температуры отжига имеет место снижение предела прочности материала пера лопаток и повышение относительного удлинения. С понижением выдержки при температуре отжига 950°C наблюдается тенденция к понижению относительного удлинения.

Анализ (рис. 2, в) свидетельствует, что максимальный уровень механических свойств, характеризующих пластичность, (δ, ψ) является определяющим для повышения показателей длительной прочности при рассматриваемых вариантах последеформационной термообработки в области несущественного снижения остальных параметров ($\sigma_g, K_{cv}, K_{ст}, НВ$), что подтвердило правильность его выбора в качестве целевой функции. Кроме того, высокие пластические свойства важны для выполнения технологической операции – правка пера от коробления, которая производится между высокотемпературным (950°C) и низкотемпературным (530°C) отпусками.

В результате было установлено, что оптимальным комплексом механических свойств, структурой и минимальным короблением обладают лопатки, изготовленные с применением последеформационного нагрева до температуры 950°C, выдержки 1 ч,

правки пера для ликвидации его коробления, нагрева до температуры 530°C, выдержки 6 ч, охлаждения на воздухе.

Для оценки механических свойств материала лопаток, изготовленных с применением высокотемпературного выдавливания, было проведено сравнение усталостной прочности этих лопаток с усталостной прочностью лопаток, изготовленных по серийной технологии (рис. 3).

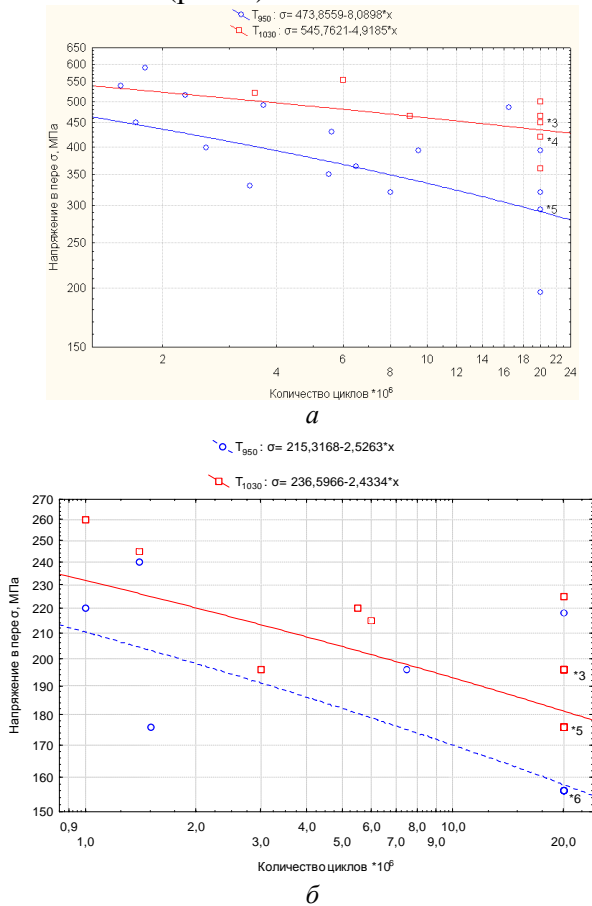


Рис. 3. Усталостная прочность материала лопаток: T₉₅₀ – отштампованных по стандартной технологии с применением ВТМО, T₁₀₃₀ – отштампованных с нагревом выше точки полиморфных превращений

Испытания на усталостную прочность производились по методике ЦИАМ («Руководящие материалы по испытанию на усталостную прочность рабочих лопаток компрессора») при консольном закреплении исследуемых лопаток на электродинамическом вибраторе с частотой основного тона изгибных колебаний.

Выход на заданный режим осуществлялся по тензодатчику, показывающему максимальное напряжение. Контроль режима испытания проводился по показателям кон-

трольного тензодатчика и по размаху конца пера лопатки.

Момент поломки фиксировали по снижению резонансной частоты. Перед испытаниями определили на 6 лопатках распределение относительных напряжений по перу лопатки и провели тарировку.

Максимальный уровень нагружения при тарировке не превышал уровня напряжений при испытаниях на выносливость.

Наработку лопаток в процессе тарировки в результатах испытаний не учитывали, число циклов определяли по частоте и времени испытания. Испытание проводили на базе 2×10⁶ циклов.

Анализ кривых усталостной прочности показывает, что усталостная прочность материала лопаток, изготовленных с применением высокотемпературного выдавливания, как с забоиной, так и без неё, выше, чем у серийных с применением стандартной ВТМО.

В результате в ходе решения задачи по определению оптимального варианта термической обработки заготовок лопаток после их деформирования выше точки полиморфного превращения было установлено, что наиболее предпочтительным является 2-этапный отпуск. Оптимальным комплексом механических свойств, структурой и минимальным короблением обладают заготовки лопаток, подвергнутые высокотемпературному отпуску при температуре 950°C с выдержкой 1 ч, последующей правке с целью устранения коробления пера лопатки, низкотемпературному отпуску с нагревом до температуры 530°C и выдержкой 6 ч.

Библиографический список

1. Чечулин, Б.Б. Титановые сплавы в машиностроении [Текст] / Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева.- Л.: Машиностроение, 1977. - 241с.
2. Fine grain titanium forgings and a method for their production. US Patent 5026520. [Электронный ресурс]:/ US Patent 5026520. -1991.
3. http://www.google.com/patents?id=wuknAAAAEBAJ&pg=PA2&source=gbs_selected_pages&cad=4#v=onepage&q&f=false.
4. Tamarisakandaia, S. Strain-Induced Porosity During Cogging of Extra-Low Interstitial

Grade Ti-6Al-4V [Text:] / S. Tamarisakandaia // Journal of Materials Engineering and Performance.- 2001 vol. 10(2).- P. 125-130.

5. Methods of beta processing titanium alloys: US Patent 7611592 [Электронный ресурс]:/ US Patent 7611592.- 2009/<http://www.docstoc.com/docs/57457866/Methods-Of-Beta-Processing-Titanium-Alloys---Patent-7611592>.

6. Шитарев, И.Л. Моделирование микроструктуры при высокоскоростной штамповке лопаток из титанового сплава ВТ9 [Текст] / И.Л. Шитарев, А.И. Хаймович // Заготовительные производства.- М.: 2011. - № 11. - С.41-44.

7. Магниевые и титановые сплавы [Текст]: справочник в 9 Т. / под ред. Р.Е. Шалина // Авиационные материалы. – М.: ОНТИ ВИАМ, 1983. - Т5. -580с.

METHOD OF COMPRESSOR BLADES LIFE GAINING PROCESSED BY HIGH SPEED FORGING FROM $\alpha + \beta$ TITANIUM ALLOYS WITH HEATING ABOVE A POINT OF POLYMORPHIC TRANSFORMATIONS

© 2012 I. L. Shitarev, A. I. Khaimovich

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

In this paper the researches of thermomechanical conditions of compressor blades made by high-speed forging process from $\alpha + \beta$ titanium alloys with heating above a point of polymorphic transformations are discussed.

$\alpha + \beta$ titanium alloys, high-speed forging process, polymorphic transformations.

Информация об авторах

Шитарев Игорь Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pdla@ssau.ru. Область научных интересов: технология производства авиационных двигателей и деталей.

Хаймович Александр Исаакович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: berill_samara@bk.ru. Область научных интересов: технология производства авиационных двигателей и деталей.

Shitarev Igor Leonidovich, doctor of technical science, professor, Managing chair of «Manufacture of engines of flying machines» department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: pdla@ssau.ru. Area of research: Manufacture of engines of flying machines.

Khaimovich Alexandr Isaacovich, candidate of technical science, associate Professor of «Manufacture of engines of flying machines» department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: berill_samara@bk.ru. Area of research: Manufacture of engines of flying machines.