

УДК 621.438.002.2

**Канд. техн. наук Ю. С. Кресанов¹, д-р техн. наук А. Я. Качан²,
канд. техн. наук Д. В. Павленко², С. А. Уланов²**

¹АО «Мотор Сич», ²Запорожский национальный технический университет;
г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

В работе установлено влияние режимов холодного деформирования (вальцевания) и термической обработки жаропрочного сплава на длительную прочность и сопротивление усталости рабочих лопаток компрессора ГТД.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, рабочая лопатка, штамповка, холодное вальцевание, термообработка, длительная прочность, предел выносливости.

Введение

Жаропрочные сплавы для рабочих лопаток последних ступеней компрессора, работающих при повышенных температурах и относительно высоких напряжениях, находят широкое применение в современных авиационных двигателях.

Жаропрочный сплав для лопаток компрессора должен иметь относительно мелкое и равномерное зерно, которое обеспечивает в процессе их эксплуатации требуемое сопротивление усталости. Величина зерна обуславливается также и геометрическими особенностями, когда крупное зерно может сравниться по размеру с тонкими кромками пера лопатки. С другой стороны, для обеспечения требуемого уровня длительной прочности при повышенных температурах материал рабочей лопатки должен иметь и более крупное зерно.

Наиболее прогрессивным, экономичным и производительным вариантом изготовления лопаток компрессора ГТД, в том числе и из жаропрочных сталей и сплавов, является их формообразование методами пластического деформирования с применением точной штамповки, холодного вальцевания пера и термообработки [1, 2].

Изготовление лопаток производится из штампованных заготовок с припуском 0,15 мм на сторону с последующей механической обработкой хвостовика и холодным вальцеванием пера.

Точная штамповка производилась по следующей технологической схеме [1]:

- исходная заготовка — шлифованный пруток;
- получение групповой заготовки (полосы) методом периодического проката из предварительного подката прутка с нагревом 1130 °С;
- вырубка индивидуальных заготовок из периодической полосы (температура нагрева 830 °С);

- точная штамповка заготовок лопаток (нагрев при температуре 1130 °С);
- обрезка облоя при температуре 830 °С;
- калибровка с нагревом при температуре 1080 °С;
- термообработка;
- пескоструйная очистка поверхности поковок и удаление дефектного слоя электрополированием;
- правка нахолодно на прессе (при необходимости).

Последующая механическая обработка лопаток выполнялась по следующей технологической схеме:

- протягивание хвостовика;
- холодное вальцевание пера за 2...3 перехода с промежуточной (при необходимости) термообработкой для восстановления пластических свойств;
- окончательная механическая обработка хвостовика;
- окончательная термообработка;
- виброполирование.

Основными задачами при формообразовании лопаток компрессора методами пластического деформирования являются:

1. Определение рациональной схемы процесса формообразования пера лопаток методом холодного вальцевания.

2. Исследования и выбор оптимальных режимов предварительной, промежуточной и окончательной термообработки заготовок.

3. Сравнительная оценка свойств материала и работоспособности лопаток.

Цель работы — оценка влияния холодного деформирования (вальцевания) и термической обработки жаропрочного сплава на эксплуатационные свойства лопаток компрессора ГТД.

Объектом исследования является жаропрочный сплав ХН77ТЮРВД (ЭИ437Б-ВД) после операций деформирования (вальцевания) и термической обработки.

Методы исследований

Исследование проводилось на образцах, на которых оценивалось влияние различной холодной деформации и режимов термообработки на длительную прочность материала по трем режимам «температура – напряжение». Также определялись упрочнение (твердость НВ) и характер макро- и микроструктуры на всех этапах изготовления образцов, начиная от исходного прутка и заканчивая холодным вальцеванием.

Определение режимов нагрева под деформацию и термообработку для установления оптимальных характеристик материала применительно к лопаткам компрессора проводилась на специальных плоских образцах из сплава ЭИ437Б-ВД (рис. 1), химический состав которого представлен в табл. 2.

Технологический процесс изготовления образцов представлен в табл. 1.

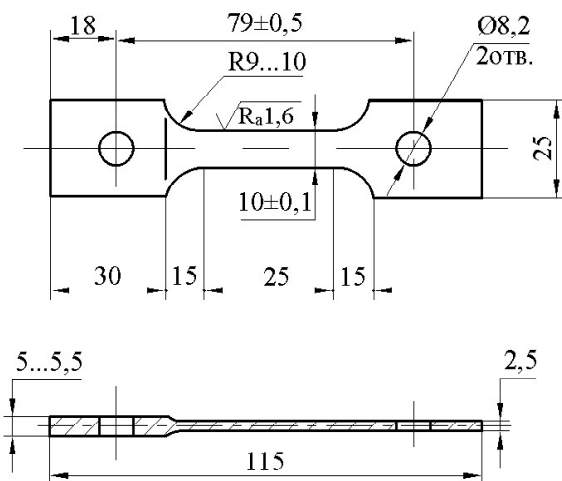


Рис. 1. Образец для определения длительной прочности

Образцы изготавливались с применением операций холодного вальцевания на гладких валках установки УВЛ 100 со степенью деформации 50, 20 и 10 %. Промежуточная термообработка между переходами холодного вальцевания образцов не производилась из-за высокой технологической пластичности сплава ХН77ТЮРВД в холодном состоянии даже при твердости 3,21...3,02 ГПа, которая образуется старением, необходимым для получения требуемой шероховатости хвостовика лопатки при его протягивании, против твердости 1,70...1,49 ГПа в закаленном состоянии.

Режимы термической обработки образцов из сплава ХН77ТЮРВД представлены в табл. 3.

Длительная прочность материала прутка исследуемой плавки определялась на круглых стандартных образцах (диаметр рабочей части 5 мм, длина 60 мм) и плоских образцах (рис. 1) после горячей прокатки (поз. 2, табл. 4) и холодного вальцевания (поз. 7, табл. 4) до разрушения по трем режимам:

режим 1 – 700 °С – 460 МПа;

режим 2 – 650 °С – 650 МПа;

режим 3 – 550 °С – 800 МПа.

Определяющим режимом испытания материала являлся режим 3, который характеризует условие работы лопаток 6...7 ступени компрессора на двигателе Д-36.

Твердость образцов на всех этапах изготовления определяли по Бринеллю шариком диаметром 5 мм при нагрузке 7,5 кН.

Микро- и микроструктура образцов исследовалась на оптическом микроскопе МИМ-7.

Результаты исследований и их обсуждение

Холодное вальцевание образцов показало, что сплав ХН77ТЮРВД при всех режимах термической обработки (см. табл. 4) обладает относительно высокой технологической пластичностью, в частности, более высокой, чем двухфазные титановые сплавы ВТ3-1 и ВТ8 в отожженном состоянии.

Результаты испытания длительной прочности, твердости и величины зерна материала образцов из сплава ХН77ТЮРВД, изготовленных из прутка, горячекатаной полосы, холодного вальцевания после различных режимов термообработки представлены в табл. 4.

Анализ результатов испытания материала различных образцов из сплава ХН77ТЮРВД по твердости (НВ) позволяет сделать следующие выводы:

- холодная 50 % деформация образцов независимо от исходной термообработки сопровождается значительным деформационным упрочнением и приводит к увеличению твердости до 3,88 ГПа;

- проведение только старения после холодной деформации приводит к еще более существенному увеличению прочностных характеристик материала до 4,80 ГПа;

- полная термообработка (закалка и старение) в зависимости от температуры закалки и продолжительности выдержки обеспечивает различные значения твердости: после закалки с пониженной температуры и старения по режиму 5 (см. табл. 4) – на уровне верхнего предела твердости (3,21 ГПа), а после закалки и старения со стандартной температуры по режиму 1 (см. табл. 4) в зависимости от степени рекристаллизации (различное время выдержки) – на уровне нижнего предела – 2,69 ГПа.

Таблица 1 – Схема технологического процесса обработки образцов

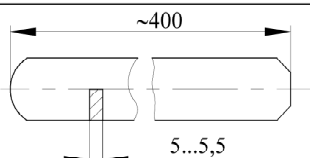
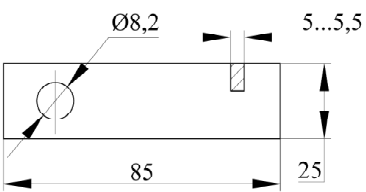
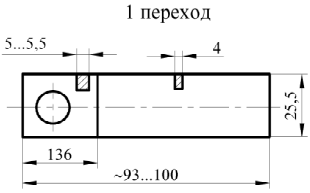
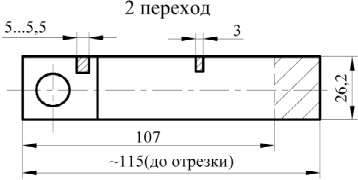
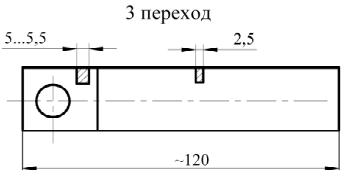
Наименование операции	Эскиз заготовки образца	Процесс обработки, оборудование	Примечание
Порезка исходных заготовок	Пруток диаметром 20 мм по ТУ14-1-223. Длина заготовки 200 мм	–	
Изготовление полосы		Прокатка за 2 перехода, нагрев 1130 ± 10 °С, в бариевой ванне, выдержка 8...10 мин.	
Очистка прокатанной полосы	– // –	Гидропескоструйная обработка + электрополирование в серной и фосфорной кислотах	
Механическая обработка заготовки образца под вальцевание		Ручное шлифование поверхности рабочей части	
Термическая обработка (предварительная)	– // –	См. таблицу 3. Закалка в аргоне. Старение на воздухе	
Очистка индивидуальной заготовки	– // –	Гидропескоструйная обдувка + электрополирование	
Холодное вальцевание за 3 перехода	<p>1 переход</p>  <p>2 переход</p>  <p>3 переход</p>  <p>Гладкие вальцы</p> <p>– // –</p> <p>– // –</p>	Установка для вальцевания лопаток УВЛ 100	
Окончательная термообработка	– // –	См. таблицу 3	
Механическая обработка	См. рис. 1	Полирование рабочей части образца	
Контроль	– // –	Метод ЛЮМ-А	

Таблица 2 – Химический состав исследуемого жаропрочного сплава ЭИ437Б-ВД

Профиль	Содержание химических элементов, %							
	C	Cr	Fe	Ti	Mn	Al	Si	Ni
Пруток диаметром 20 мм	0,06	19,5	0,46	2,65	0,22	0,85	0,6	основа
Норма по Ту 14-1-223	0,07	19...22	< 1,0	2,5...2,9	< 0,4	0,6...1,0	< 0,6	

Таблица 3 – Режимы термической обработки образцов

№ режима	Режим термообработки			
	Закалка		Старение	
	Температура, °C	Время, час	Температура, °C	Время, час
1	1080	8	700	16
2		2		
3		1		
4		2	800	4
5	1000	4	700	16

Анализ результатов свойств образцов по длительной прочности при повышенных температурах показал, что для сплава ХН77ТЮРВД наиболее жестким режимом оказывается испытание при температуре 650 °C с нагрузкой 650 МПа (режим 2, табл. 4).

При испытании длительной прочности по режиму 550 °C – 800 МПа преобладали удовлетворительные результаты, в том числе и для холоднодеформированных образцов. Режим 700 °C – 460 МПа дал примерно равное количество положительных и отрицательных результатов. Холодное вальцевание приводит к резкому увеличению общего количества неудовлетворительных результатов, главным образом за счет испытаний при 700 и 650 °C. При этом стандартный режим термообработки холоднодеформированных образцов дает неудовлетворительные результаты для всех назначенных условий испытаний, что связано с большой разнотерностью структуры. Сокращение времени выдержки при закалке с 1080 °C повышает значения длительной прочности, особенно для случая двойного старения, обеспечивающего дополнительное упрочнение матрицы. С точки зрения длительной прочности режим двойного старения 1080 °C, 2 ч + 800 °C, 4 ч является оптимальным, однако, уменьшение времени выдержки при закалке с 1080 °C не всегда гарантирует получение структуры с мелким зерном при

отсутствии разнотерности. Более целесообразным оказывается понижение температуры закалки. Закалка холоднодеформированных образцов с 1000 °C обеспечивает высокую длительную прочность и мелкое равноосное зерно.

Полученные данные показывают, что для холоднодеформированного сплава ХН77ТЮРВД выбор оптимальных температур последующей закалки затруднителен и должен проводиться с учетом условий работы детали.

Если после холодного деформирования выполняется только старение, длительная прочность материала при испытаниях по режимам 700 °C – 460 МПа и 650 °C – 650 МПа оказывается низкой. Испытания по режиму 550 °C – 800 МПа в этих случаях дали удовлетворительные результаты.

Особенности микроструктуры материала образцов по этапам их изготовления и для различных режимов термообработки представлены на рис. 2–5.

Исходный пруток характеризуется мелким равноосным зерном размером 1520 мкм (рис. 2, а). Стандартная термообработка по режиму 1 (см. табл. 3) сохраняет равномерность зерна, увеличивая его размеры до 100...150 мкм, из-за увеличения времени выдержки (рис. 2, б). Термообработка по режиму 5 (см. табл. 3) оставляет величину исходного зерна без изменения (рис. 2, в).

Таблица 4 – Длительная прочность, твердость и величина зерна материала образцов при различных режимах термической обработки

№ группы	Вид образца и операции	Режим термообработки (табл. 3)	Твердость НВ, ГПа	Время до разрушения при режимах испытания, час			Размер зерна, мкм
				1	2	3	
1	Исходный пруток	В состоянии поставки без термообработки	2,69	–	–	–	15...20
		1	2,85	123 76 106	37 30 46	161 192* 192*	150...400
		5	3,21	36 40 28	25 30 19	196* 196* 222*	15...20
		4	3,02	158 94* 94*	96 114 127	216* 216* 320*	100...300
		3	3,02	50 87 114	23 17 46	192* 192* 222*	100...150
2	Горячекатаная полоса	Без термообработки	–	–	–	–	20...300
		1	2,85	138 142 116	17 50 24	305 89 308	50...800
		5	3,21	83 85 91	84 108 82	210* 210* 305*	150...250 оторочка по границам 10
		4	3,02	134 141 174	85 80 35	222 207* 295*	50...200
		3	2,85	91 134 105	50 27 34	143 230* 230*	50...150
3	Холодновальцованный	Закалка по реж. 3	1,78	–	–	–	50...150
	Вальцевание	–	3,88	–	–	–	–
	Термообработка	1	2,69	2 8 7	6 4 12	32 34 27	50...800
		5	3,21	16 30 28	18 31 29	229 104 310	20...30
		3	2,85	115 66 79	17 10 13	122 192 134	70...100
		4	3,02	124 116 69	42 335 187	156 673* 207*	150...500
4	Предварительная термообработка	1	2,85	–	–	–	50...100
	Вальцевание	–	3,88	–	–	–	–
	Окончательная термообработка	Старение по реж. 1, 8 час	4,80	1,0 0,6 1,5	9 10 20	203 113 207*	–
5	Предварительная термообработка	Закалка по реж. 5	2,29	–	–	–	200...300 оторочка по границам 10...15
	Вальцевание	–	3,88	–	–	–	–
	Окончательная термообработка	Старение по реж. 5	4,80	7 3 19	14 12 9	377 280* 280*	–
6	Предварительная термообработка	Закалка по реж. 1	1,70	–	–	–	100...300
	Вальцевание	–	3,88	–	–	–	–
	Окончательная термообработка	Старение по реж. 1	4,80	7 22 13	6 14 11	609 259* 259*	–
7	Предварительная термообработка	Закалка по реж. 2	1,70	–	–	–	100...250
	Вальцевание	–	3,88	–	–	–	–
	Окончательная термообработка	Закалка 1080°C-4ч Старение по реж.1	4,44	7 4 8	6 15 5	65 565 304	–
Нормы ТУ			2,55... 3,21	≥ 46	≥ 30	≥ 100	–

Примечание: * – образцы, снятые с испытаний. Исходный пруток, горячекатаная полоса и вальцевание – позиции 1, 2 и 3 табл. 4 соответственно

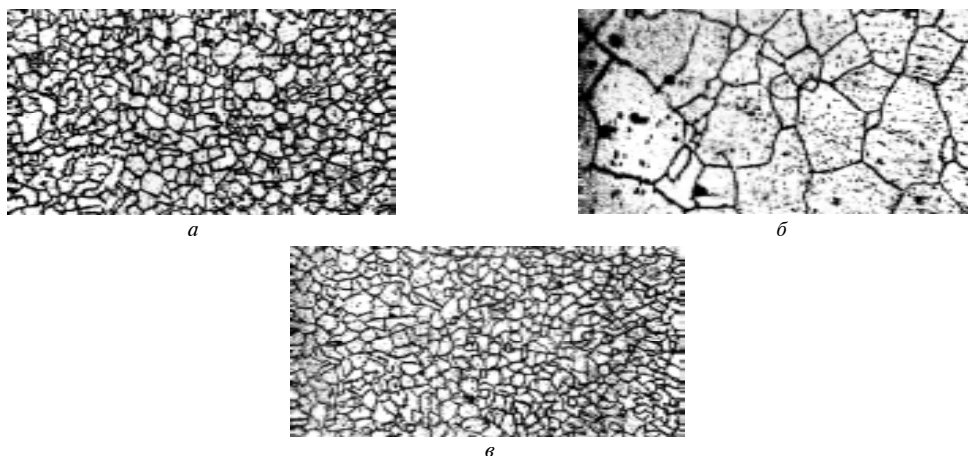


Рис. 2. Микроструктура прутка в состоянии поставки (*a*), после термообработки по режиму 1 (*б*) и по режиму 5 (*в*), (см. табл. 3)

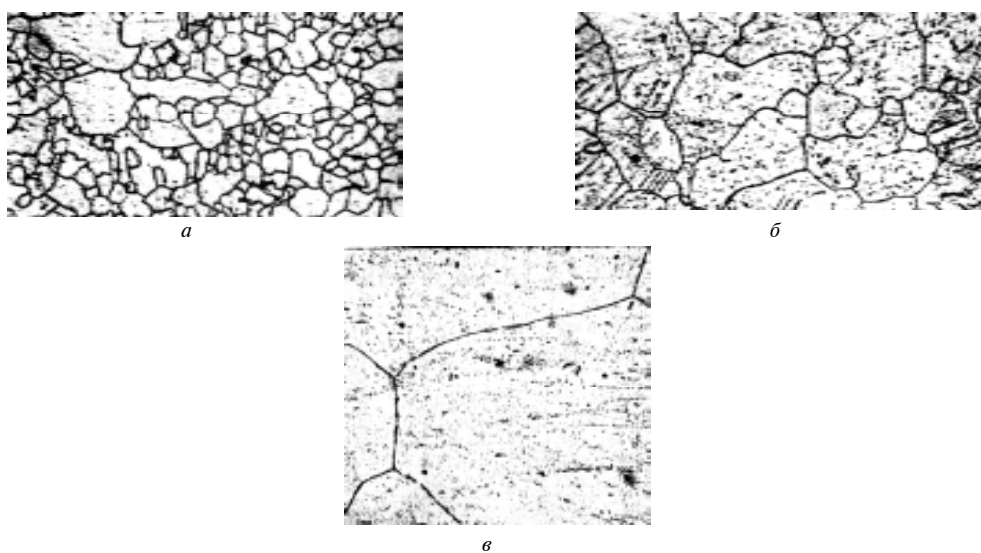


Рис. 3. Микроструктура полосы в исходном состоянии (*a*), нагрев перед деформацией 1130 °С), после заковки по стандартному режиму 1 (*б*, *в*) (см. табл. 3)

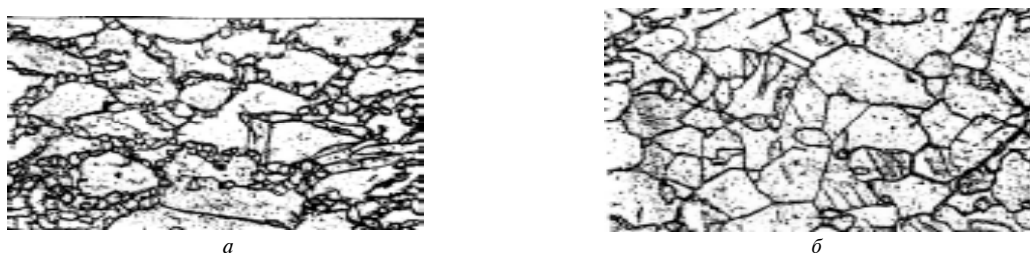


Рис. 4. Микроструктура полосы перед вальцеванием после заковки по режиму 5 (*a*) и режиму 3 (*б*) (см. табл. 3)

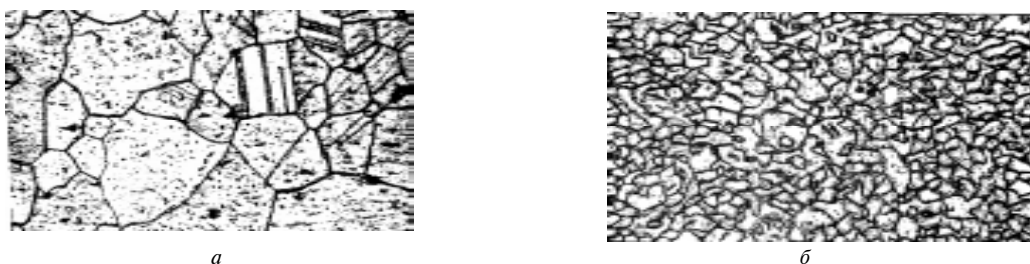


Рис. 5. Микроструктура образца после холодного вальцевания и последующей термообработки по режиму 1 (*a*) и режиму 5 (*б*) (см. табл. 3)

Прокатанная из прутка полоса при температуре 1130 °С, предназначенная для изготовления плоских образцов в исходном состоянии, имеет относительно крупные до 100...150 мкм зерна в окружении большого количества мелких зерен размером 1530 мкм (рис. 3, а), что свидетельствует о прохождении частичной рекристаллизации и неравномерной деформации при горячей прокатке. Последующая закалка полосы по стандартному режиму при температуре 1080 °С приводит к различной степени разности зернистости, причем для некоторых образцов при выдержке 8 часов она оказалась весьма грубой и размер зерен достигал 1000 мкм (рис. 3, б, в). Учитывая геометрические размеры лопаток, наличие такой структуры недопустимо, так как зерно может охватывать все сечение пера лопатки. После закалки полосы с температуры 1000 °С (режим 5, табл. 3) процесс рекристаллизации, по сравнению со структурой полосы в исходном состоянии после прокатки, продолжается и носит собирательный характер. Получена характерная структура с относительно крупных (в среднем до 200 мкм) зерен, отороченных мелкими до 10...15 мкм зернами, что свидетельствует о микронеоднородности предшествующей деформации при прокатке полосы (рис. 4, а). Сокращение времени выдержки при температуре закалки 1080 °С до 1 часа способствует протеканию более равномерной рекристаллизации и зерно при этом не успевает вырасти до значительных размеров. Наблюдается разность зернистости (рис. 4, б).

Структура образцов с высокой степенью деформации (~ 60 %), прошедших после холодного вальцевания только старение, отличается вытянутостью зерен, а также большим количеством двойников и линий скольжения. Величина зерен зависит от предварительной термообработки. Полная термообработка образцов при закалке с 1080 °С дает разную степень рекристаллизации, которая в количественном отношении характеризуется как увеличением размера зерен, так и соотношением количества зерен разных размеров. Например, термообработка по стандартному для сплава ХН77ТЮРВД режиму привела к значительной разности зернистости (рис. 5, а). Однако характер процесса рекристаллизации холоднодеформированного материала после закалки с пониженной температуры 1000 °С качественно меняется: появляются весьма мелкие равноосные зерна, размеры которых меньше, чем в исходной полосе после термообработки по режиму 5 (см. табл. 3) (рис. 5, б).

Полученные в ходе исследований результаты позволили определить основные технологические параметры процесса точной штамповки заготовок рабочих лопаток компрессора из жаропрочных сплавов с последующим холодным вальцеванием пера.

Влияние установленных режимов холодного деформирования и термической обработки жаропрочного сплава ХН77ТЮРВД на сопротивление усталости определяли на лопатках 5 ступени компрессора авиационного двигателя Д-36, изготовленных методом точной штамповки с применением холодного вальцевания и путем последующей механической обработкой.

Сопротивление усталости лопаток устанавливали методом ступенчатого повышения нагрузки, начиная с 260 МПа (установленная норма) как среднее по 6 лопаткам.

Для лопаток, изготовленных холодным вальцеванием, предел выносливости составил 398 МПа, что более чем в 1,5 раза выше установленной нормы, а изготовленных только ручной доводкой пера — 426 МПа.

Таким образом, статические характеристики сопротивления усталости вальцованных и невальцованных лопаток практически находятся на одном уровне.

Выводы

1. При холодном вальцевании лопаток из жаропрочного сплава ХН77ТЮРВД наиболее рациональный уровень свойств достигается окончательной термообработкой в защитной среде по режиму закалка при температуре 1000 °С в течение 4 часов и старение при температуре 750 °С в течение 16 часов.

2. Установленные термомеханические условия горячей деформации заготовок, холодного вальцевания пера и режимов предварительной и окончательной термообработки позволяют обеспечить необходимый уровень длительной прочности при испытании при температуре 550 °С и напряжении 800 МПа, а также высокий уровень их предела выносливости.

3. Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления лопаток компрессора и других деталей ГТД из жаропрочных сплавов с применением операций холодного деформирования.

Список литературы

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография / [В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др.] — Запорожье : изд. АО «Мотор Сич», 2003. — 369 с.
2. Влияние точной штамповки и холодного вальцевания пера рабочих лопаток компрессора из жаропрочных сплавов на качество их изготовления / [Ю. С. Кресанов, А. В. Богуслаев, А. Я. Качан, Л. И. Гасик] // Вестник двигателестроения. — 2010. - № 1. — С. 60–71.

Поступила в редакцию 10.02.2014

Кресанов Ю.С., Качан О.Я., Павленко Д.В., Уланов С.О. Вплив холодного деформування та термічної обробки жароміцного сплаву на експлуатаційні властивості лопаток компресора ГТД

У роботі визначено вплив холодного деформування (вальцювання) та термічної обробки жароміцного сплаву на довготривалу міцність та опір втомленості робочих лопаток компресора ГТД.

Ключові слова: жароміцний сплав, робоча лопатка, штамповка, холодне вальцювання, термообробка, тривала міцність, межа витривалості.

Kresanov Yu., Kachan A., Pavlenko D., Ulanov S. Effect of cold eformation and heat treatment of heat-resistant alloy on performance of gas-turbine drive compressor blades

This paper determines the effect of heat-resistant alloy cold deformation (rolling) and heat treatment conditions on stress-rupture and fatigue properties of gas-turbine drive compressor rotor blades.

Key words: heat resistant alloy rotor blade, stamping, cold rolling, heat treatment, long-term strength, endurance limit.