

УДК 621.9+621.431.75

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ НАГРЕВА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ И ОТЖИГА НА КОМПЛЕКС МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ШТАМПОВКИ

©2013 В. А. Костышев, М. С. Питюгов

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

В статье рассматривается экспериментальное исследование и анализ влияния режимов нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) и отжига на макро- и микроструктуру, комплекс механических свойств, величину коробления и термическую стабильность лопаток, изготавливаемых методом высокоскоростной штамповки. Исследована возможность правки, совмещённой с термической обработкой, для получения удовлетворительной геометрии лопаток без существенного снижения комплекса механических свойств.

Высокоскоростная штамповка, сплав ВТ9, нагрев ТВЧ, комплекс механических свойств, коробление, термическая стабильность.

Для исследования влияния индукционного нагрева на структуру и свойства лопаток была отштампована партия лопаток из сплава ВТ9 при температурах, равных 970°C и 1040°C.

В качестве исходного материала под высокоскоростную штамповку использовался прутки Ø27 × 48. Температура полиморфного превращения данной плавки определялась методом закалки. Нагрев заготовок под высокоскоростную штамповку осуществлялся в индукторе ТВЧ (2500 Гц) и электропечах сопротивления. Температуры нагрева под деформирование были выбраны по следующим соображениям: температура, равная 970 °С, соответствует температуре, указанной в инструкции ВИАМ № 900-73 для выдавливания заготовок из сплава ВТ9; температура, равная 1040°C, – температура, при которой в заготовках при нагреве ТВЧ отмечается наиболее равномерная микроструктура с размером зёрен 40 мкм. После индукционного нагрева заготовки автоматически передавались по жёлобу в штамп в течение 5-6 с, что соответствует времени до момента удара. Предварительно было проведено термометрирование для установления силы тока на соответствие

заданным температурам в момент отключения индуктора. Высокоскоростная штамповка (ВСШ) лопаток осуществлялась за один удар со скоростью деформирования 30 м/с на высокоскоростном молоте ВСМ-2. Время с момента удара до извлечения штамповки из штампа составляло 8 с. Штамповые вставки были нагреты до температуры 250 – 300°C. Термическая обработка включала отжиг при 700°C в течение двух часов или стандартный двойной отжиг для сплава ВТ-9: при 950°C в течение одного часа и в дальнейшем при 530°C в течение 6 часов. Результаты испытаний механических свойств образцов, изготовленных из замковой части лопаток, показали, что штамповка в $\alpha+\beta$ -области независимо от способа нагрева после отжига при 700°C в течение двух часов обеспечивает практически одинаковый уровень механических свойств. При этом отмечается достаточно высокая прочность σ_b до 135 кг/мм². Штамповка в β -области с последующим отжигом при 700°C в течение двух часов в случае печного нагрева снижает характеристики пластичности ниже заявленных в технических условиях. Применение нагрева ТВЧ приводит к существенному

повышению комплекса механических свойств. Возрастают как прочностные, так и пластические характеристики. Термообработка по стандартному режиму восстанавливает значения пластичности при печном нагреве до оптимального уровня с существенным снижением прочности. Лопатки с печным нагревом после стандартного отжига показали на плоских образцах, вырезанных из пера, при испытании на базе $5 \cdot 10^7$ циклов меньший предел усталостной прочности по сравнению с лопатками после отжига при 700°C в течение двух часов. Предел усталостной прочности после печного нагрева независимо от режимов штамповки одинаков и равен 60 кг/мм^2 . Очевидно, при испытании гладких образцов низкая пластичность не оказывает влияния на результаты. Следует ожидать, что при испытании образцов с надрезом усталостная прочность будет ниже. После нагрева ТВЧ в $\alpha+\beta$ -области усталостная прочность составляет 58 кг/мм^2 . Микроструктура лопаток, изготовленных с печным нагревом в $\alpha+\beta$ -области, равноосная $\alpha + \beta$. После индукционного нагрева в $\alpha+\beta$ области структура отличается большей дисперсностью и количеством α -фазы. После нагрева под штамповку в β -области и отжига лопаток при 700°C в течение двух часов микроструктура мелкодисперсная независимо от способа нагрева. После стандартного отжига микроструктура зернистая $30\text{-}40 \text{ мкм}$ с пластинчатой α -фазой внутри и по границам зёрен в случае печного нагрева, после нагрева ТВЧ структура имеет вид «корзиночного клепания». Максимальная величина альфированного слоя на лопатках при печном нагреве в β -области составляет $0,15 \text{ мм}$ и $0,06 \text{ мм}$ – при нагреве ТВЧ. При нагреве ТВЧ в β -области свойства остаются практически на том же уровне, в то время как печной нагрев приводит к резкому снижению пластичности (ниже требований технических условий). Стандартный отжиг обеспечивает наилучшее сочетание

свойств, но приводит к значительному короблению и снижению усталостной прочности на 30%. В связи с тем, что для изготовления крупногабаритных лопаток компрессора из сплава ВТ9 потребуется значительная мощность оборудования, возникла необходимость в установлении предельной температуры нагрева заготовок относительно температуры полиморфного превращения. Исследования, проведённые на лопатках, отштампованных в интервале температур $970\text{-}1060^\circ\text{C}$, показали, что с повышением температуры нагрева до 1060°C (что соответствует Тп.п. $+50^\circ\text{C}$) рабочие давления снижаются на 20% (с 64 атм. до 50 атм.). Изменение механических свойств от температуры нагрева и режимов отжига приведено на рис. 1. Испытание механических свойств проводилось на лопатках, подвергнутых стандартному двойному отжигу. Значительного изменения механических свойств и структуры с повышением температуры β -штамповки с 1000°C до 1060°C не наблюдается, что, очевидно, связано с незначительной степенью перегрева выше температуры полиморфного превращения. Наблюдается значительная разница в механических свойствах замка и пера лопатки, что, по-видимому, объясняется разными условиями деформации и охлаждения, а также формой образцов (цилиндрическая — из замка и плоскими — из пера). Для исследования влияния формы образцов дополнительно было проведено испытание механических свойств на цилиндрических и плоских образцах из замка и плоских образцах из пера. Сравнительная оценка показала, что плоские образцы имеют на 5% большую прочность и на 26% меньшее удлинение по сравнению с цилиндрическими. Материал пера по сравнению с материалом замка, испытанный на плоских образцах, имеет, в свою очередь, на 7% повышенную прочность и на 23% более низкую пластичность.

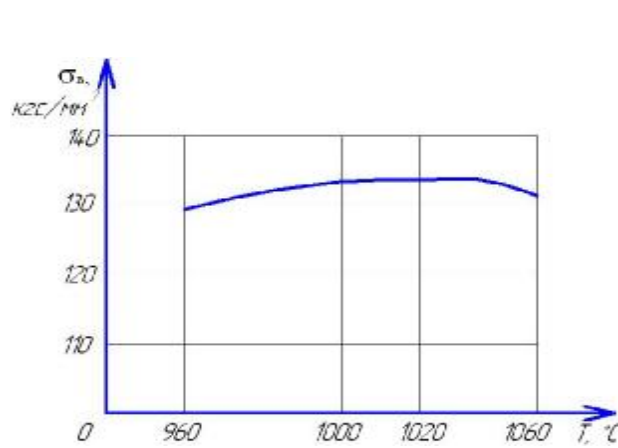


Рис. 1 а. Зависимость предела прочности образцов, вырезанных из замка штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры индукционного нагрева

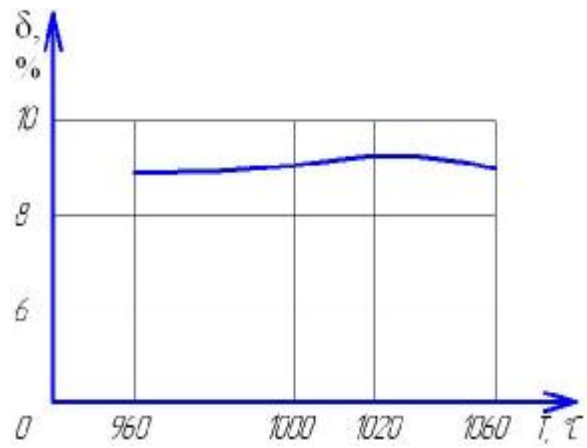


Рис. 1 б. Зависимость относительного удлинения образцов, вырезанных из замка штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры индукционного нагрева

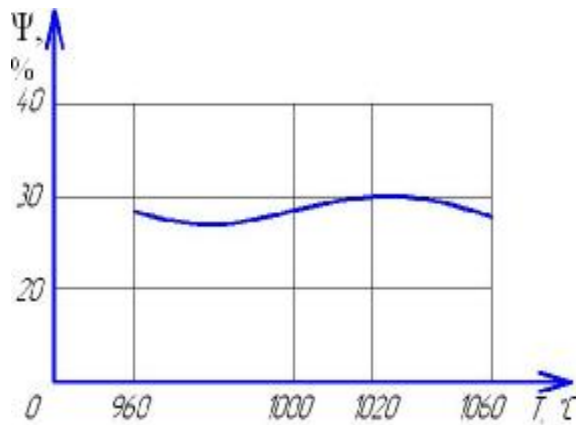


Рис. 1 в. Зависимость относительного сужения образцов, вырезанных из замка штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры индукционного нагрева

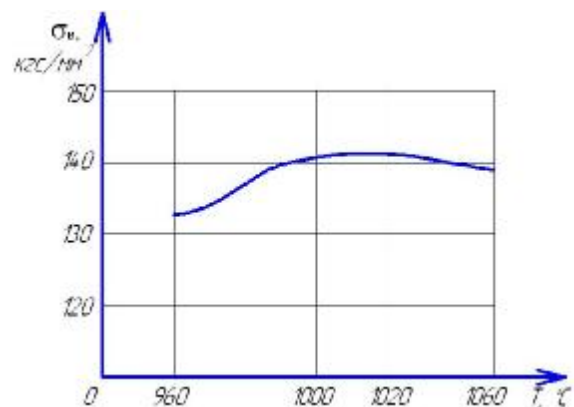


Рис. 1 г. Зависимость предела прочности образцов, вырезанных из пера штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры индукционного нагрева

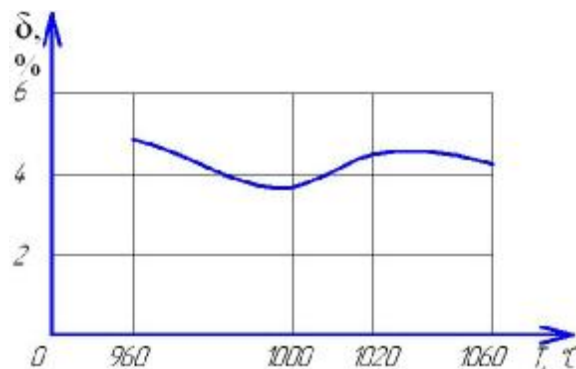


Рис. 1 д. Зависимость относительного удлинения образцов, вырезанных из пера штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры индукционного нагрева

Температура деформации и режим отжига оказывают существенное влияние на уровень свойств материала замка и пера лопаток (рис. 2).

Материал пера имеет более низкие значения пластичности при практически одинаковом пределе прочности по сравнению с материалом замка, что связано с различной формой испытываемых образцов и условиями деформации и охлаждения. Значительное влияние на механические свойства оказывает режим термообработки. Следует отметить, что нагрев под деформацию при температурах β -области позволяет снизить энергию деформирования на 20-25%, что способствует повышению стойкости штампов.

Отжиг по режиму 700°C, 2 часа обеспечивает на лопатках стабильный уровень свойств. Отличающийся разброс свойств и выпады по пластичности,

пластичность на пере не удовлетворяют требованиям технических условий. Увеличение температуры отжига до 800-850°C приводит к повышению характеристик пластичности и снижению прочности как в замке, так и в пере штамповки, деформированной при температуре β -области.

Пластичность на пере достигает значений $\delta > 6\%$ после деформации с 1040°C и отжига 800°C и после отжига 850°C независимо от режимов деформации, при этом $\sigma_s < 120 \text{ кг/мм}^2$. Значения ударной вязкости на пере лопаток после штамповки из β -области выше, чем на замке, и не зависит от режима отжига.

После штамповки из $\alpha + \beta$ -области уровень ударной вязкости на пере и замке практически одинаков. Вязкость разрушения KCV материала замка имеет низкие значения и колеблется в диапазоне 0,3...0,5 кг/см².

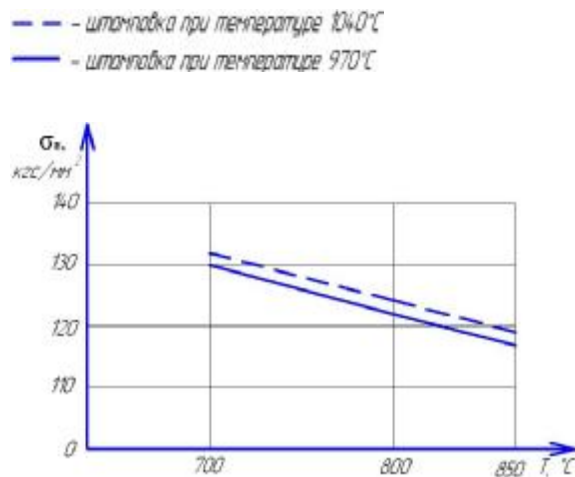


Рис. 2 а. Зависимость предела прочности образцов, вырезанных из замка штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

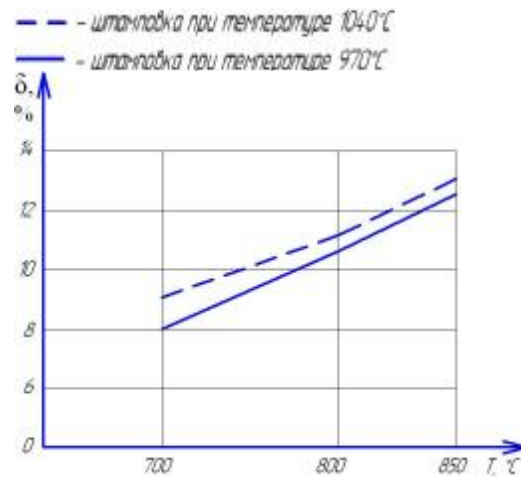


Рис. 2 б. Зависимость относительного удлинения образцов, вырезанных из замка штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

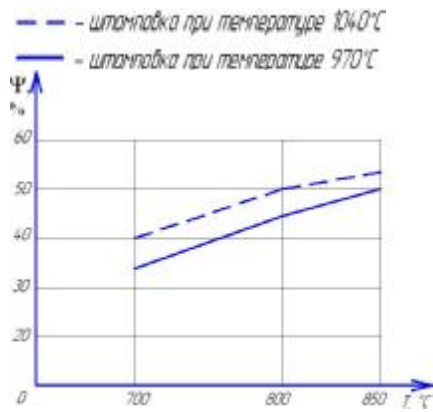


Рис. 2 в. Зависимость относительного сужения образцов, вырезанных из замка штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

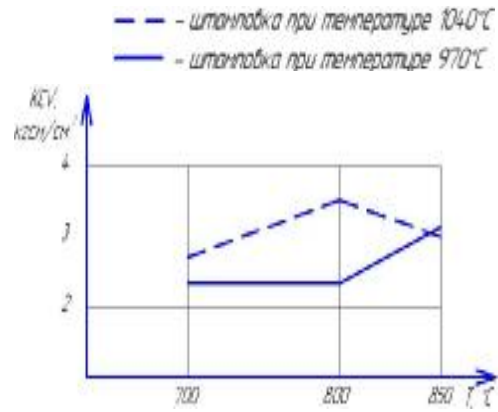


Рис. 2 г. Зависимость KCV образцов, вырезанных из замка штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

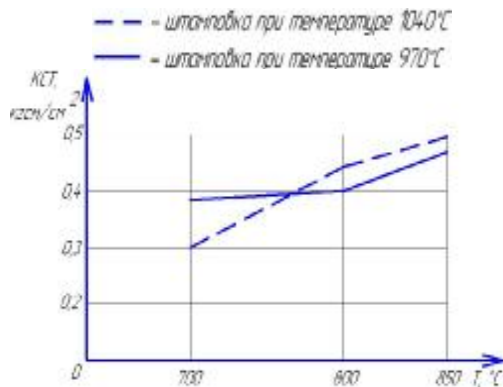


Рис. 2 д. Зависимость KCT образцов, вырезанных из замка штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

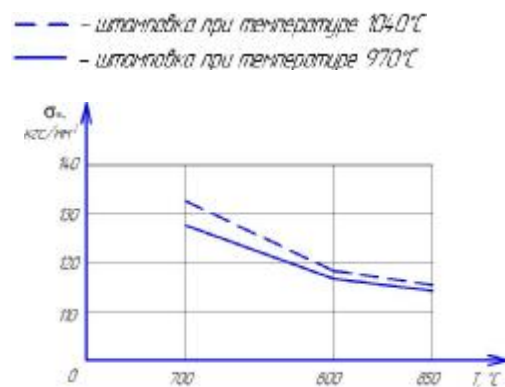


Рис. 2 е. Зависимость предела прочности образцов, вырезанных из пера штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

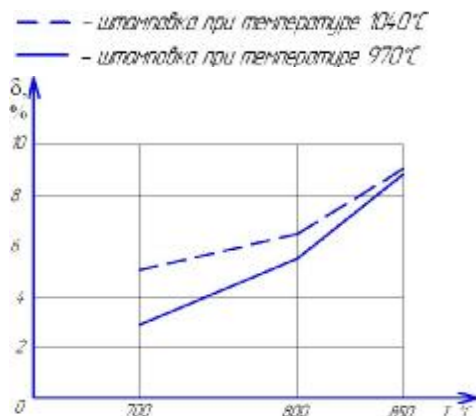


Рис. 2 ж. Зависимость относительного удлинения образцов, вырезанных из пера штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

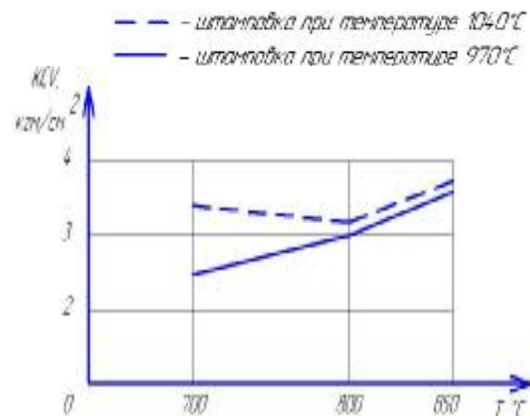


Рис. 2 з. Зависимость KCV образцов, вырезанных из пера штампованных заготовок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

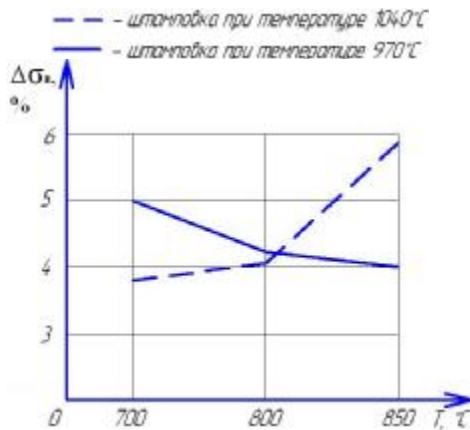


Рис. 3 а. Зависимость изменения предела прочности лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

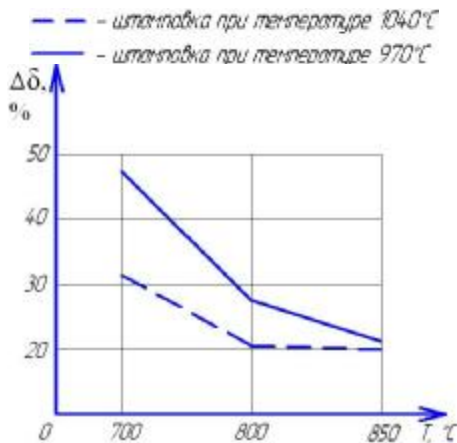


Рис. 3 б. Зависимость изменения относительного удлинения лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

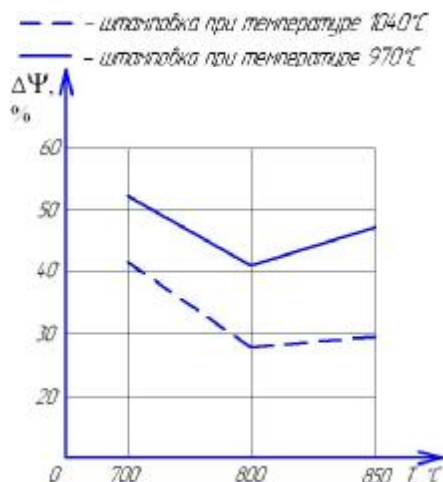


Рис. 3 в. Зависимость изменения относительного сужения лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

Исследование термической стабильности материала замка лопаток после выдержки 500 часов при 500°C показало (рис. 3), что материал, отожжённый по режиму 700°C, 2 часа, находится в нестабильном состоянии, т. к. потеря пластичности достигает 50% после деформации с $T=970$ °C и 30-40% после деформации с 1040°C.

Повышение температуры отжига до 800-850°C и деформация при $T=1040$ (β-область) способствуют увеличению термической стабильности материала лопаток, потеря пластичности при этом составляет 20-25% по относительному удлинению и поперечному сужению.

Испытания образцов, вырезанных из пера лопаток на удар и угол загиба, показывают (рис. 4), что лопатки, отожжённые по режиму 700°C, 2 часа, имеют низкие значения удельной работы деформации и угла изгиба, что свидетельствует о неблагоприятной структуре материала и его склонности к распространению усталостной трещины. С повышением температуры отжига эти характеристики возрастают в 2 раза независимо от режима деформирования. Тот факт, что образцы, отожжённые по режиму 850°C, 2 часа, не разрушались, а прогнулись, указывает на высокую стойкость материала ударным нагрузкам. Испытания образцов из кромок лопаток на угол загиба дали аналогичные результаты. Макроструктура лопаток независимо от температурного режима деформации матовая с величиной зерна 1 балл. Микроструктура лопаток представляет собой β-зерно с мелкодисперсными продуктами распада. Размер микроструктуры определяется температурой и степенью деформации. После деформации с температуры 970°C размер микроструктуры – 10-20 мкм по замку и перу лопаток. Повышение температуры до 1040°C приводит к увеличению зерна на замке до 20-40 мкм, при этом в пера лопатки зёрна дробятся за счет высокой степени деформации и приобретают направленность вдоль оси пера. Характер

распределения продуктов распада определяется режимом термообработки. С повышением температуры отжига с 700°C до 850°C наблюдается уменьшение продуктов распада за счёт коагуляции и скопления их по границам зёрен.

Исследование влияния режимов деформации и термообработки на геометрию лопаток показало (рис. 5), что отклонение геометрических размеров лопаток увеличивается по мере повышения температуры отжига.

Величина коробления после отжигов при $T=800, 850^{\circ}\text{C}$ в 2 раза меньше, чем после стандартного отжига, но превышает на 0,1-0,25 мм величину отклонений после отжига 700°C, 2 часа и превышает поле допуска на механическую обработку.

Учитывая высокий и стабильный уровень свойств, обеспечиваемый отжигами 800-850°C с повышением

термической стабильности надёжности и качества материала по сравнению с отжигом 700°C, 2 часа, следует устранять коробление лопаток при указанных режимах за счёт применения операций правки или создания специальных приспособлений при термообработке. Как показали исследования, применение операции правки в тех же вставках при $T=950^{\circ}\text{C}$, что соответствует верхней ступени отжига после штамповки из $\alpha+\beta$ -области (960°C), позволяет получить лопатки с удовлетворительной геометрией (отклонение от чертежа не превышает 0,1-0,35 мм) и высоким уровнем свойств (табл.1). При этом повышается предел прочности на 10-15 кг/мм² и значения вязкости разрушения KCV по сравнению с лопатками, подвергнутыми отжигу 850°C.

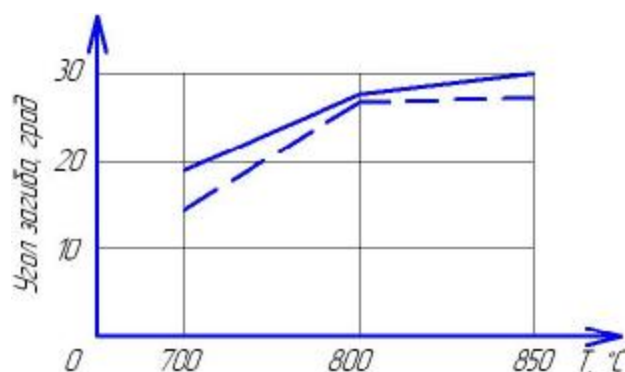


Рис. 4. Зависимость угла загиба образцов, вырезанных из кромок лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

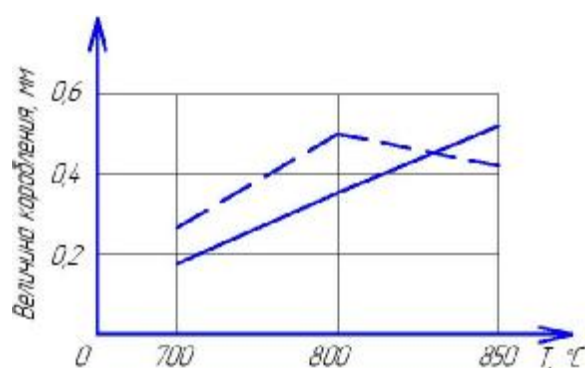


Рис. 5. Зависимость величины коробления лопаток, полученных методом высокоскоростной штамповки, от температуры нагрева ТВЧ под деформирование и режима отжига

Таблица 1. Зависимость механических свойств и величины коробления лопаток от термомеханических режимов изготовления

Режим изготовления	Механические свойства			Величина коробления, мм
	σ_b , кгс/мм ²	δ , %	Ψ , %	
Штамповка + виброгалтовка + отжиг 700°C, 2 часа	125	11,6	30	0,1-0,25
Штамповка + правка, совмещённая с отжигом, $T=950^{\circ}\text{C}$, 1 час + виброгалтовка + старение 530°C, 6 часов	128	14,0	37,4	0,1-0,25
Штамповка + отжиг $T=950^{\circ}\text{C}$, 1 час + виброгалтовка + старение 530°C, 6 часов	127,5	15,7	40,8	0,9-1,7

Выводы

1. Исследована возможность применения нагрева ТВЧ для заготовок из сплава VT9 под высокоскоростную штамповку лопаток.

2. Показано, что нагрев ТВЧ в интервале температур 970°C-1060°C в течение 40-50 с позволяет значительно снизить окисление металла и получать заготовки из сплава VT9 с размером зерна, не превышающим 50-60 мкм, что в 7-8 раз меньше, чем при нагреве в камерных печах на те же температуры.

3. Решающее влияние на механические свойства лопаток после ВСШ оказывает режим термообработки. Отжиг по режиму 700°C, 2 часа не обеспечивает получение стабильного уровня свойств пера в соответствии с ОСТ 9000270, $\sigma_s=140$ кг/мм², $\delta<6\%$. Материал с такими свойствами обладает низкими характеристиками по углу загиба, KCV и термической стабильности.

4. Повышение температуры отжига до 800, 850°C независимо от режимов нагрева под ВСШ позволяет повысить пластичность на 12...15%, способствует повышению термической стабильности материала и усталостной прочности. Однако коробление лопаток при этом увеличивается и достигает 0,5 мм на сторону после отжига 850 °С.

5. Показана возможность правки лопаток после ВСШ в тех же вставках с нагревом под правку при 950°C, 20 мин. Механические свойства, структура и размеры лопаток удовлетворяют требованиям технических условий.

Библиографический список

1. Согришин, Ю.П. Штамповка на высокоскоростных молотах [Текст] / Ю.П. Согришин, Л.Г. Гришин, В.М. Воробьев. – М.: Машиностроение, 1978. – 8 с.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF HIGH- FREQUENCY CURRENT AND ANNEALING MODES ON THE COMPLEX OF MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY GTE COMPRESSOR BLADES PRODUCED BY HIGH-SPEED STAMPING

©2013 V. A. Kostyshev, M. S. Pityugov

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

The paper presents a pilot study and analysis of the influence of high-frequency current heating and annealing modes on the macro – and microstructure, the complex of mechanical properties, the amount of buckling and thermal stability of blades produced by high-speed stamping. The possibility of straightening combined with thermal processing to obtain satisfactory geometry of blades without essential decrease in the complex of mechanical properties is investigated.

High-speed stamping, VT9 alloy, high- frequency current heating, complex of mechanical properties, buckling, thermal stability.

Информация об авторах

Костышев Вячеслав Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kostyshev@ssau.ru. Область научных интересов: обработка металлов давлением, материаловедение.

Питюгов Михаил Сергеевич, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: 123_456_789_1011@mail.ru. Область научных интересов: обработка металлов давлением, материаловедение.

Kostyshev Vyacheslav Aleksandrovich, doctor of technical science, professor of the department of plastic working of metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kostyshev@ssau.ru. Area of research: plastic working of metals, materials engineering.

Pityugov Mikhail Sergeevich, post-graduate student, department of plastic working of metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: 123_456_789_1011@mail.ru. Area of research: plastic working of metals, materials engineering.