

качественные листовые детали сравнительно большой глубины с локальными элементами малого радиуса. Однако не стоит забывать, что данная технология экономически эффективна в единичном и мелкосерийном производстве. Дальнейшие технологические исследования связаны с формообразованием металлических листов с большой степенью деформации, изменениями пластичности металлов, методами предотвращения перегрева листовых металлов из-за нагрева быстро сжимаемого воздуха.

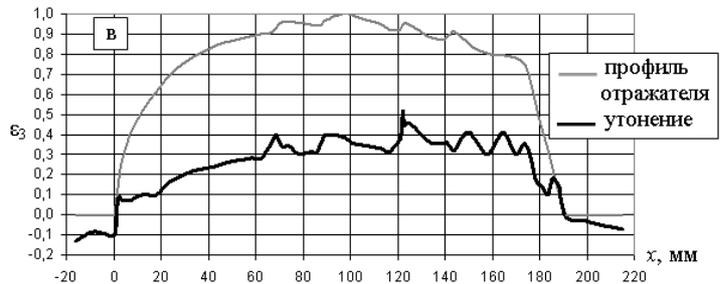
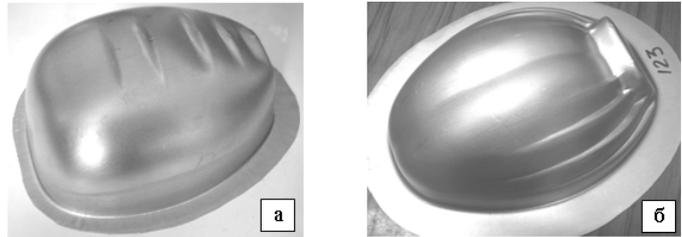


Рис. 6. Окончательные формы отражателей светильника с поперечными ребрами (а) и продольными ребрами (б) и распределение утонений  $\epsilon_3$  в продольном сечении детали с поперечными ребрами (в)

**Список литературы:** 1. *Knyazyev M.K.* Measurements of Pressure Fields with Multi-Point Membrane Gauges at Electrohydraulic Forming / *M.K. Knyazyev, Ya.S. Zhovno-vatyuk* // Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming, March 9-10 [2010]. – Columbus, Ohio, 2010. – P. 75-82. 2. *Thomas J.D.* Forming Limits for Electromagnetically Expanded Aluminum Alloy Tubes: Theory and Experiment / *J.D. Thomas, M. Seth, G.S. Daehn, J.R. Bradley, N. Triantafylidis* // Acta Mater. – 2007. – No. 55. – P. 2863-2873.

Поступила в редакцию 06.12.2011

УДК 620.22:669.24

*А.В. КОРОБКО*, ст. преп., ЗНТУ, Запорожье

## К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ МАРКИ ВОЛОКОН ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТОВ, ФОРМИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Осуществлен анализ проволок из высокожаропрочных тугоплавких металлов и сплавов на их основе для упрочнения композиционных материалов с металлическими матрицами, применяемых для изготовления тонкостенных насадков сопловых блоков ракетных двигателей. Показано, что в качестве армирующих волокон целесообразно использовать отожженную вольфрамовую проволоку марки ВР273ВП.

Проведено аналіз дроту із високожароміцних металів і сплавів на їх основі для зміцнення композиційних матеріалів з металевими матрицями, які використовуються для виготовлення тонкостінних насадків соплових блоків ракетних двигунів. Показано, що у якості армуючих волокон доцільно використовувати відпалений вольфрамовий дріт марки ВР273ВП.

The analysis of high-temperature wire of refractory metals and their alloys for hardening of composite materials with metal matrices used for the manufacture of thin-walled nozzles blocks of rocket engines. It is shown that as the fiber reinforcement is advisable to use annealed tungsten wire VR273VP brand.

## Введение

Повышение эксплуатационных характеристик летательных аппаратов различного назначения в значительной степени зависит от использования в конструкции их основных узлов и блоков новых, легких, недефицитных, термопрочных, теплозащитных и термоэразионных материалов. К таким материалам можно отнести, разрабатываемые в настоящее время композиционные материалы с металлическими матрицами и армирующими тугоплавкими волокнами, надежно работающие при высоких температурах в потоке горячих газовых сред. Данные металлокомпозиты превосходят по своим удельным характеристикам аналогичные показатели традиционных жаропрочных сплавов, что позволяет значительно снизить массу конструкций и повысить эффективность работы тепловых двигателей.

Одним из компонентов волокнистых металлокомпозитов, во многом определяющим их физико-механические свойства, являются армирующие волокна. Для эффективного упрочнения волокно должно быть прочнее и жестче матрицы, передающей основную нагрузку на него. Критерием при выборе армирующих волокон являются такие основные требования [1], как: высокие модуль упругости и температура плавления; повышенная жаропрочность; низкий удельный вес и достаточная пластичность. При этом волокна должны быть совместимы с материалом матрицы, не растворяться в нем во время формирования металлокомпозита; обладать хорошей смачиваемостью раствором металла матрицы; быть химически стабильными в процессе изготовления и эксплуатации композиции. Армирующие волокна из высокожаропрочных тугоплавких металлов, таких как вольфрам, молибден и сплавов на их основе в наиболее полной мере удовлетворяют предъявляемым физико-механическим требованиям.

В свою очередь большое значение при изготовлении тонкостенных насадков методом обработки давлением имеют технологическая пластичность и высокотемпературная прочность вольфрамовых и молибденовых сплавов, из которых изготовлены армирующие волокна. Поэтому при выборе волокон осуществлен обзор работ, направленных на увеличение прочности и улучшение технологических характеристик такого типа волокон.

Так, в работе [2] показано, что прочность вольфрамового сплава повышается на высоких температурах при увеличении в нем содержания углерода до 0,1% масс.

При исследовании металлокерамического вольфрама [3] после термообработки со скоростным электронагревом установлено, что при отжиге  $1765^{\circ}\text{C}$  повышается его относительное удлинение примерно в шесть раз при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , однако прочность при этом снижается в два раза.

В работе [4] установлено, что увеличение окислов тория и циркония в составе вольфрамовых сплавов до 8% объема приводит к непрерывному снижению температуры перехода в хрупкое состояние этих сплавов как после отжига  $1300^{\circ}\text{C}$ , так и после рекристаллизации при  $1800^{\circ}\text{C}$ . В то же время окислы тория и циркония являются неметаллическими включениями, и повышение их содержания увеличивает склонность вольфрамовых сплавов к расслоению, что

приводит к снижению прочности композиционного материала в направлениях отличных от направлений упрочняющих волокон.

Путем оптимизации технологического режима получения вольфрам-ториевых сплавов можно добиться уменьшения их склонности к расслоению [5-8], что положительно влияет на технологическую пластичность и прочность композиционного материала в направлениях, несовпадающих с направлением упрочняющих волокон.

При достаточно большом количестве научных разработок, проволоки из металлокерамических вольфрам-ториевых сплавов все же не обладают достаточной прочностью в поперечном направлении, в связи с чем не могут быть использованы для армирования деталей типа насадков.

Особый интерес вызывает использование в качестве армирующих волокон ренийсодержащих вольфрамовых и молибденовых сплавов, обладающих [9] уникальным сочетанием прочностных и пластических свойств.

### Результаты исследований

На рисунке приведены графики зависимости температур начала разупрочнения (кривые 1-3) и температур достижения максимальной пластичности (кривые 4-6) холоднодеформированных вольфрам (ВР273ВП, ВРМК) и молибденрениевых (МР473ВП) сплавов от времени скоростного нагрева. Из кривых видно, что в случае ренийсодержащих молибденового и вольфрамовых сплавов различной металлургической природы, после предварительной скоростной тепловой обработки, имеет место временной порог (0,05-0,15 с), при котором достигаются максимальные температуры начала разупрочнения и температуры наибольшей пластичности исследуемых сплавов.

В то же время характер изменения прочностных и пластических характеристик предварительно отожженных проволок исследованных марок после импульсных нагревов существенно отличаются от холоднодеформированных неотожженных проволок. Так, в исходном состоянии, отожженные проволоки обладают максимальной пластичностью при более низких значениях кратковременной прочности. При этом импульсные нагревы вплоть до температур предварительного отжига практически не оказывают никакого влияния на значение остаточной прочности и пластичности. В то же время волокна из сплавов ВР273ВП и МР473ВП сохраняют свою пластичность после импульсных нагревов вплоть до

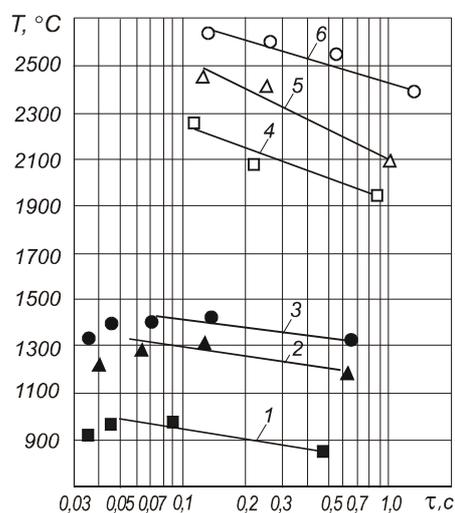


Рис. Зависимость температур начала разупрочнения и максимальной пластичности вольфрамовых и молибденовой проволок от времени нагрева: 1 и 4 – МР473ВП; 2 и 5 – ВРМК; 3 и 6 – ВР273ВП; (кривые 1, 2, 3 характеризуют спад температур начала разупрочнения; 4, 5, 6 – спад температур максимальной пластичности)

температур плавления, в отличии от отожженной проволоки ВРМК, которая охрупчивается уже после импульсных нагревов до температур свыше 2000<sup>0</sup>С.

### **Выводы**

Таким образом, установлено, что в качестве армирующих волокон наиболее целесообразно использовать отожженную вольфрамениевую проволоку марки ВР27ЗВП, имеющую сравнительно равные удельные механические характеристики с проволокой из молибденениевого сплава МР47ЗВП, но содержащую в своем составе меньшее количество (в 1,7 раза) дефицитного рения и характеризующейся большим модулем упругости.

**Список литературы:** 1. *Савицкий Е.М.* Металловедение сплавов тугоплавких и редких металлов / Е.М.Савицкий, Г.С.Бурханов. – М.: Наука, 1971. – 354 с. 2. *Подъячев В.Н., Гаврилюк М.И.* Влияние углерода на прочность вольфрама при высоких температурах // Проблемы прочности. – 1975. – № 12. – С. 81–83. 3. *Богатырев Ю.М.* Скоростная электротермическая обработка тугоплавких металлов в вакууме // Термообработка при индукционном нагреве. – М.: Металлургия. – 1968. – С. 86–90. 4. *Ratliff I.L.* Tungsten sheet alloys with improved low-temperature ductility Trans Metallurg / I.L.Ratliff, D.I. Maykuth, H.R. Olden // Soc. AIME. – 1964. – Vol.230, № 3. – P. 490–800. 5. Влияние повышенного содержания тугоплавкого окисла на технологические и механические свойства вольфрамового сплава. / *Нецик А.Я., Виниченко В.С., Ястребова О.Ф., Кесаев Т.М.* // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий.: Всесоюзн. науч.-техн. конф.: тезисы докл. – Запорожье: ЗМИ. – 1978. – С. 15–16. 6. Исследование взаимосвязи между выходом годного и металлургическими факторами при производстве вольфрамо-рениевого материала / *Виниченко В.С., Тюпа С.С., Нецик А.Я., и др.* // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий.: Всесоюзн. науч.-техн. конф.: тезисы докл. – Запорожье: ЗМИ. – 1978. – С. 50–51. 7. *Кесаев Т.М., Виниченко В.С., Натапова А.Б.* Повышение пластичности прутков из порошковых вольфрамовых сплавов, упрочненных частицами ThO<sub>2</sub> // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий.: Всесоюзн. науч.-техн. конф., 3-5 сентября 1980 г.: тезисы докл. – Запорожье: ЗМИ. – 1980. – С. 54–55. 8. К вопросу об оптимизации процесса получения вольфрамо-ториевых заготовок. / *Виниченко В.С., Тюпа С.С., Нецик А.Я., Ястребова О.Ф., Ольшанецкий В.Е., Кесаев Т.М.* // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий.: Всесоюзн. науч.-техн. конф.: тезисы докл. – Запорожье: ЗМИ. – 1978. – С. 48-49. 9. *Лавренко А.С.* Разупрочнение холоднодеформированного вольфрама при скоростном нагреве / А.С. Лавренко, В.Е. Ольшанецкий, Б.С. Натапов // Физика металлов и металловедение. – 1981. – Т. 51, № 5. – С. 1029–1036.

*Поступила в редколлегию 23.11.2011*