

ВИАМ/2015-Тр-02-03



УДК 621.77

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Е.И. Разуваев

кандидат технических наук

Н.В. Моисеев

Д.В. Капитаненко

М.В. Бубнов

Февраль 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Е.И. Разуваев¹, Н.В. Моисеев¹, Д.В. Капитаненко¹, М.В. Бубнов¹

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Представлены современные принципы и подходы к разработке технологических процессов изготовления деформированных заготовок дисков и лопаток из жаропрочных никелевых, титановых и других сплавов с целью достижения оптимального комплекса функциональных и технологических характеристик. Рассмотрен процесс изотермической штамповки дисков с применением специальной окалинстойкой штамповой оснастки, работающей без применения вакуумной камеры.

Ключевые слова: структура, сплав, процесс, пластическая деформация, термомеханическая обработка.

E.I. Razuvaev, N.V. Moiseev, D.V. Kapitanenko, M.V. Bubnov

Modern technologies of plastic working of metals

Modern principles and approaches to development of processing procedures for manufacture of wrought billets of disks and blades from heat-resistant nickel, titanium and other alloys for the purpose to achieve an optimum combination of operational and processing characteristics were described in the paper. Isothermal forging of disks in a special oxidation-resistant stamping tool without the use of a vacuum camera was considered.

Keywords: structure, alloy, process, plastic deformation, thermomechanical treatment.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Развитие авиакосмической техники и других отраслей машиностроения в значительной мере обеспечивается разработкой и применением новых, более сложных композиций конструкционных материалов, обладающих высокими прочностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, износостойкостью, а также специальными физико-механическими свойствами (памятью формы, низким температурным коэффициентом линейного расширения и т. п.) [1, 2]. Объем производства и применения таких материалов непрерывно растет. Создание таких материалов достигается путем многокомпонентного легирования, а также формирования гетерофазных структур, термостабильных до температур, близких к температуре плавления. Это приводит к снижению технологичности и затрудняет изготовление из них деформированных заготовок и полуфабрикатов с применением традиционных способов обработки давлением. Вместе с тем известно, что режимы термической обработки и термомеханические параметры деформации оказывают решающее влияние не только на возможность формоизменения, но и на формирование структуры.

Наиболее высокой жаропрочностью и, соответственно, низкой технологической пластичностью обладают гетерофазные никелевые сплавы, содержащие более 40% упрочняющей γ' -фазы, применяемые для изготовления дисков и других деталей ГТД [3–5]. В результате исследований, выполненных в ВИАМ, разработаны технологические процессы термомеханической обработки высокожаропрочных труднодеформируемых сплавов на никелевой основе, обеспечивающие повышение технологической пластичности и

достижение сверхпластичности путем комплексного воздействия пластической деформации и термической обработки. В отличие от традиционной технологии горячей деформации в однофазном состоянии (твердый раствор) новая технология предусматривает формирование структуры, позволяющей проводить эффективное формоизменение в гетерофазном состоянии. Задача заключается в определении условий термомеханической обработки, обеспечивающей формирование регламентированной структуры с высокой технологической пластичностью. Предварительная термическая обработка слитков и заготовок способствует устранению или снижению ликвационной неоднородности в сложнолегированных композициях и формированию структуры с предпочтительной морфологией (размером, формой и распределением) частиц упрочняющих фаз. Последующая пластическая деформация в максимально приближенных к всестороннему неравномерному сжатию условиях при строго регламентированных температурно-скоростных параметрах, обеспечивающих процесс динамической рекристаллизации, позволяет сформировать мелкозернистую структуру, обладающую более высокой пластичностью, а в случае формирования ультрамелкозернистой структуры – сверхпластичностью. Необходимость деформации таких сплавов в двухфазном состоянии обусловлена резким сужением или отсутствием температурного диапазона существования однофазного состояния. В результате снижения температуры процесс деформации (при отсутствии изотермических условий) сопровождается распадом твердого раствора с выделением мелкодисперсных частиц упрочняющих фаз, способствующих охрупчиванию и резкому повышению сопротивления деформации сплава. Особенностью гетерофазных сплавов является также их высокая чувствительность к скорости деформации, что, в свою очередь, требует применения для их обработки давлением технологического оборудования с оптимальной, желателно регулируемой, скоростью нагружения, так как температурно-скоростные параметры деформации контролируют процесс разупрочнения. В отличие от горячей деформации в однофазном состоянии, когда упрочнение практически отсутствует, при деформации в двухфазной области упрочнение проявляется более значительно, особенно с понижением температуры в процессе формоизменения [6, 7]. Поэтому очень важно обеспечить условия деформации, при которых устанавливается равновесие процессов «упрочнение–разупрочнение». Наиболее полно такие условия достигаются при изотермической деформации, обеспечивающей возможность поддержания температуры и скорости в оптимальных для данной композиции узких диапазонах в процессе всего цикла формоизменения заготовки. Таким образом, процесс должен осуществляться при строгом соблюдении оптимальных температурно-скоростных параметров деформации. Такие параметры (деформации сплавов в гетерофазном состоянии) устанавливаются с учетом критических температур конкретной плавки (полного растворения основных упрочняющих фаз, динамической рекристаллизации, полиморфного превращения и т. п.). Процесс изотермической деформации является наиболее перспективным при изготовлении высококачественных полуфабрикатов с регламентированной структурой из труднодеформируемых гетерофазных сплавов. Для практического осуществления таких технологий в ВИАМ определены оптимальные параметры термомеханической обработки сплавов, созданы специализированное оборудование и высокожаропрочная штамповая оснастка. Разработка специальных высокожаропрочных окалиностойких композиций штамповых материалов с рабочей температурой до 1150–1200°C позволила осуществить процессы изотермической деформации титановых и жаропрочных никелевых сплавов в установках открытого типа, выгодно отличающихся от дорогостоящих вакуумных установок, в которых используются штампы из тугоплавких сплавов, простотой конструкции и более высокой производительностью. Разработаны также специальные технологические покрытия, обеспечивающие защиту деформируемых заготовок от окисления и газонасыщения при нагреве и являющиеся одновременно эффективной смазкой при деформации [8–12].

Известно, что технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов также определяются характером структуры, формирование которой зависит от термомеханических параметров деформации. В связи с тем, что структура и свойства полуфабрикатов, деформированных при температурах однофазной β -области, существенно отличаются от характеристик материала, деформированного в двухфазной ($\alpha+\beta$)-области, важным критерием при выборе оптимального температурного диапазона обработки является температура полиморфного превращения (не только конкретного сплава, но и конкретной плавки). Деформация титановых сплавов при температуре β -области обеспечивает высокую технологическую пластичность при меньших энергозатратах, однако не позволяет сформировать однородную мелкозернистую структуру с заданным комплексом свойств, которая требуется для большинства изделий. Кроме того, обработка титановых сплавов с нагревом при температурах β -области сопровождается значительным окислением и газонасыщением поверхностного слоя, который необходимо полностью удалять механической обработкой, чтобы обеспечить высокие эксплуатационные свойства детали.

Деформация титановых сплавов в двухфазном состоянии ($\alpha+\beta$) позволяет формировать регламентированные структуры, обеспечивающие достижение комплекса высоких технологических и эксплуатационных характеристик [13]. Для всех титановых сплавов, разработанных в ВИАМ, установлены оптимальные технологические схемы и термомеханические параметры деформации в β - и ($\alpha+\beta$)-областях, обеспечивающие формирование структуры с требуемым (предпочтительным) комплексом свойств и учетом условий эксплуатации изделий.

Особенностью титановых сплавов является проявление способности к сверхпластической деформации в двухфазном состоянии при определенных структурных и температурно-скоростных параметрах. Технологические процессы с использованием сверхпластической деформации титановых сплавов находят все более широкое применение в промышленности при изготовлении экономичных полуфабрикатов сложной формы. При этом практически не лимитируется степень деформации и в 5–10 раз снижается усилие, необходимое для требуемого формоизменения заготовки. Полуфабрикаты, изготовленные изотермической и сверхпластической деформацией, отличаются более однородной структурой, повышенным и стабильным уровнем свойств. Специально разработанная композиция высокопрочного титанового сплава проявляет сверхпластичность при температуре на 75–100°C ниже температуры сверхпластической деформации промышленных сплавов. Это позволяет использовать менее жаропрочные и более дешевые штамповые материалы и существенно увеличить их стойкость [14–17].

Формирование оптимальной регламентированной структуры способствует также успешному осуществлению последующих технологических операций [18]. Например, формирование в поковках и штамповках из алюминийлитиевых сплавов изотропной структуры определенного типа позволяет повысить качество и надежность сварных конструкций.

Значительный практический интерес представляют технологические процессы изготовления точных заготовок лопаток ГТД из жаропрочных никелевых и титановых сплавов с использованием регламентированной холодной деформации. Холодное вальцевание лопаток, наряду со снижением трудоемкости окончательной механической обработки и ручных операций по доводке пера, обеспечивает повышение коэффициента использования дорогостоящих металлов и качества лопаток.

Новая технология включает в себя более точный расчет технологических операций на стадии изготовления предварительной заготовки, регламентированную холодную деформацию на операциях вальцовки пера и переходной зоны – от пера к замку лопатки. При этом достигается формирование однородной структуры во всех элементах лопатки и, соответственно, повышение эксплуатационных характеристик.

Заслуживают внимания технологические процессы изготовления листовых, прутковых и трубных полуфабрикатов из разнородных материалов, а также крупногабаритных листов и сверхтонкой фольги пакетным методом.

В связи с разработкой и все более широким применением технологических процессов сверхпластической формовки листовых деталей, определены оптимальные температурно-скоростные параметры сверхпластической деформации большого числа промышленных и опытных титановых, алюминиевых и магниевых сплавов.

Разработка комбинированных листовых материалов (алюмопластов, металлопластов и т. п.) также потребовала изыскания способов их эффективного формоизменения. Разработан и освоен в промышленности технологический процесс изготовления втулок подшипников скольжения из металлопласта методом вытяжки из листа. Определены предельные коэффициенты формоизменения алюмопластов различных композиций.

Заключение

В представленном обзоре технологических процессов показана необходимость и актуальность дальнейших поисков эффективных способов изготовления деформированных полуфабрикатов и заготовок из перспективных конструкционных материалов новых классов, например, сплавов на интерметаллидной основе, титановых и алюминиевых сплавов с дисперсным упрочнением и других. На данном этапе очень важно не допустить отставания в разработке эффективных технологических процессов изготовления деформированных полуфабрикатов из перспективных материалов и создать условия для их широкого промышленного применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 129–141.
4. Способ изготовления штамповок дисков из слитков высокоградиентной кристаллизации из никелевых сплавов: пат. 2389822 Рос. Федерация; опубл. 29.04.2009.
5. Морозова Г.И. Закономерность формирования химического состава γ'/γ -матрицы многокомпонентных никелевых сплавов //ДАН. 1991. Т. 320. №6. С. 1413–1416.
6. Способ получения изделия из деформируемого жаропрочного никелевого сплава: пат. 2387733 Рос. Федерация; опубл. 31.03.2009.
7. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 98–103.
8. Солнцев С.С., Розененкова В.А. Защитные технологические покрытия на основе стекла для термической обработки сталей и сплавов //Стекло и керамика. 2006. №11. С. 29–33.
9. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
10. Фиглин С.З., Бойцов В.В., Калпин Ю.Г., Каплин Ю.И. Изотермическое деформирование металлов. М.: Машиностроение. 1978. 239 с.
11. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) //Материаловедение. 2010. №7. С. 24–28.
12. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Производство дисков ГТД из жаропрочных сплавов на изотермических прессах //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 13–16.

13. Скугарев А.В., Бурханова А.А., Ночовная Н.А., Изотова А.Ю. Эффективность применения изотермической деформации при изготовлении штамповок из титановых сплавов //Титан. 2013. №1(39). С. 31–34.
14. Разуваев Е.И., Лебедев Д.Ю., Бубнов М.В. Формирование ультрамелкозернистой и наноразмерной структуры в металлах и сплавах методами деформации //Авиационные материалы и технологии. 2010. №3. С. 3–8.
15. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Эффективная технология изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов //Кузнечно-штамповочное производство. 2013. №10. С. 13–17.
16. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 52–57.
17. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3–8.
18. Разуваев Е.И., Капитаненко Д.В. Влияние термомеханической обработки на структуру и свойства аустенитных сталей //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 01 (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij uklad [Sixth technological way] //Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Kompleksnaja innovacionnaja tehnologija izotermicheskoj shtampovki na vozduhe v rezhime sverhplastichnosti diskov iz superzharoprochnyh spлавov [Integrated innovative technology isothermal forging in air superplasticity drive from superzharoprochnyh alloys] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 129–141.
4. Sposob izgotovlenija shtampovok diskov iz slitkov vysokogradientnoj kristallizacii iz nikel'evyh spлавov [A method of manufacturing forgings from ingots high-gradient drives the crystallization of nickel alloys]: pat. 2389822 Ros. Federacija; opubl. 29.04.2009.
5. Morozova G.I. Zakonomernost' formirovanija himicheskogo sostava γ'/γ -matricy mnogokomponentnyh nikel'evyh spлавov [Pattern formation of the chemical composition of γ'/γ -matrix multi-nickel alloys] //DAN. 1991. T. 320. №6. С. 1413–1416.
6. Sposob poluchenija izdelija iz deformiruемого zharoprochnogo nikel'evogo splava [A method of manufacturing a heat-resistant nickel alloy wrought]: pat. 2387733 Ros. Federacija; opubl. 31.03.2009.
7. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokozharoprochnye deformiruemye nikel'evye splavy dlja perspektivnyh gazoturbinnyh dvigatelej i gazoturbinnyh ustanovok [Highly heat resistant wrought nickel alloys for advanced gas turbine engines and gas turbines] //Вестник МГТУ им. Н.Е. Баумана. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. С. 98–103.
8. Solncev S.S., Rozenenkova V.A. Zashhitnye tehnologicheskie pokrytija na osnove stekla dlja termicheskoj obrabotki stalej i spлавov [Protective technological coatings based on heat treatment of glass and steel alloys] //Стекло и керамика. 2006. №11. С. 29–33.
9. Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Sozdanie sovremennyh zharoprochnyh materialov i tehnologij ih proizvodstva dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [The creation of modern high-temperature materials and production technologies for aviation engine] //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
10. Figlin S.Z., Bojcov V.V., Kalpin Ju.G., Kaplin Ju.I. Izotermicheskoe deformirovanie metallov [Isothermal deformation of metals]. М.: Mashinostroenie. 1978. 239 s.
11. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M. Novyj zharoprochnyj nikel'evyj splav dlja diskov gazoturbinnyh dvigatelej (GTD) i gazoturbinnyh ustanovok (GTU) [New heat-resistant nickel alloy disks of gas turbine engines (GTE) and gas turbines (GT)] //Materialovedenie. 2010. №7. С. 24–28.
12. Ponomarenko D.A., Moiseev N.V., Skugorev A.V. Proizvodstvo diskov GTD iz zharoprochnyh spлавov na izotermicheskikh pressah [Production of GTE disks of superalloys isothermal presses] //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 13–16.

13. Skugarev A.V., Burhanova A.A., Nochovnaja N.A., Izotova A.Ju. Jeffektivnost' primenenija izotermicheskoj deformacii pri izgotovlenii shtampovok iz titanovyh splavov [Efficacy of isothermal deformation in the manufacture of titanium alloy forgings] //Titan. 2013. №1(39). S. 31–34.
14. Razuvaev E.I., Lebedev D.Ju., Bubnov M.V. Formirovanie ul'tramelkozernistoj i nanorazmernoj struktury v metallah i splavah metodami deformacii [Formation of ultrafine and nano-sized structures in metals and alloys by deformation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №3. S. 3–8.
15. Ponomarenko D.A., Moiseev N.V., Skugorev A.V. Jeffektivnaja tehnologija izgotovlenija diskov GTD iz zharoprochnyh nikelovyh splavov [Effective manufacturing technology drives a turbine engine from heat-resistant nickel alloys] //Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. 2013. №10. S. 13–17.
16. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikelovye splavy dlja detalej gazoturbinyh dvigatelej [High-temperature heat-resistant nickel alloys for turbine engines parts] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 52–57.
17. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M. Osobennosti legirovanija i termicheskoj obrabotki zharoprochnyh nikelovyh splavov dlja diskov gazoturbinyh dvigatelej novogo pokolenija [Features alloying and heat treatment of heat-resistant nickel alloys for disks of gas turbine engines of the new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 3–8.
18. Razuvaev E.I., Kapitanenko D.V. Vlijanie termomehanicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva austenitnyh stalej [Effect of thermomechanical treatment on the structure and properties of austenitic steels] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 01 (viam-works.ru).