

УДК 621.98.043:004.94

М.М. Бакрадзе¹, А.В. Скугорев¹, В.В. Кучеряев¹, М.В. Бубнов¹

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-175-185

В статье показан опыт использования во ФГУП «ВИАМ» современных методов компьютерного моделирования при разработке технологий получения штамповок из труднодеформируемых жаропрочных никелевых сплавов. Представлены результаты компьютерного моделирования процесса изотермической штамповки на воздухе, широко используемого в собственном производстве ФГУП «ВИАМ» для получения заготовок дисков турбин малогабаритных газотурбинных двигателей и установок.

Показан опыт использования компьютерного моделирования при разработке технологий штамповки крупногабаритных заготовок сложной формы типа «диск–вал», реализуемых на крупных металлургических предприятиях – АО «Металлургический завод «Электросталь» и АО «Ступинская металлургическая компания» (АО «СМК»). Использование компьютерного моделирования позволило увеличить коэффициент использования металла (КИМ) на 10–30% за счет снижения массы штамповки, в некоторых случаях удалось сократить число технологических операций штамповки и тем самым оптимизировать технологию производства штамповок, снизить затраты на прямые эксперименты.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, обработка металлов давлением, штамповка, ковка, жаропрочные никелевые сплавы, изотермическая деформация.

М.М. Bakradze, A.V. Skugorev, V.V. Kucheryaev, M.V. Bubnov

Computer modeling of technological metal forming processes as effective instrument for development of new technologies

In this article is shown the experience of using modern computer modeling methods in developing technologies for production of difficult-to-form nickel-based superalloys forgings. Computer modeling results of isothermal forging in air, that is widely used at FSUE «VIAM» to produce disks billets of small-size gas turbine engines and units are shown.

¹ Федеральное 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

Experience of implementing computer modeling in developing technologies for large-size complex shape forged billets like «disk–shaft» that are used in gross metallurgical factories such as public corporation «Metallurgical Factory «Electrostal» and public corporation «Stupino Metallurgical Company» is shown in this article. Computer modeling allowed to increase metal stock usage up to 10–30% due to decreasing weight of forging and in several cases to reduce number of technological operations that optimized the technology.

Keywords: *computer modeling, metal forming, pressing, forging, nickel-based superalloys, isothermal deformation.*

Введение

Современное развитие материалов для различных областей техники диктует высокие требования к технологическим процессам их получения. Повышение стоимости металлических материалов обуславливает их экономное использование в производстве, повышение коэффициента использования материала (КИМ), снижение энергозатрат и повышение производительности труда. Особенно остро данные вопросы стоят в области производства высоколегированных жаропрочных сплавов, так как цена основных компонентов и легирующих элементов год от года только возрастает.

Производство штампованных заготовок дисков турбин газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов, как и любое производство деформированных полуфабрикатов, сопряжено с большим расходом металла. Потери металла имеют место на всех этапах производства, в том числе на заключительном этапе штамповки (промежуточная обточка между переходами, обточка штамповки под термическую обработку, чистовая обточка заготовки). Методы компьютерного моделирования процессов помогают оптимизировать технологию деформации таким образом, чтобы штамповка получалась более точной, т. е. максимально приближенной к форме чистовой заготовки.

В современном, динамически развивающемся производстве компьютерное моделирование просто необходимо при разработке новых технологий получения заготовок дисков турбин ГТД и ГТУ. Например, разработка нового газотурбинного двигателя в различных вариантах – начиная от демонстратора технологий и заканчивая опытными и серийными образцами – требует от металлургического производства десятков заготовок дисков, колец и т. д. различных наименований (шифров). Проектирование технологий получения такой большой номенклатуры металлургической продукции требовало бы очень больших временных и материальных затрат. С использованием компьютерного моделирования трудозатраты на разработку технологий деформационной обработки значительно сокращаются.

Использование компьютерного моделирования при проектировании процессов штамповки заготовок горячего тракта ГТД и ГТУ позволяет:

- унифицировать заготовительные операции обработки металлов давлением и черновые операции штамповых переходов;
- повысить точность штамповки, тем самым снизив массу штамповки и исходной заготовки, повысить КИМ;
- сократить число штамповых переходов без потери качества штамповки;
- улучшить деформационную проработку структуры материала, тем самым повысив уровень физико-механических свойств готового изделия и равномерность распределения свойств по сечению.

В 2012 г. в рамках подготовленных во ФГУП «ВИАМ» «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.» [1] предложено комплексное научное направление 3.2. «Компьютерное моделирование, в том числе с применением нейронных сетей, процессов обработки давлением с прогнозированием структуры, комплекса механических и эксплуатационных свойств изделий» [2].

В настоящее время развитие данного направления проводится с использованием современного программного комплекса для моделирования процессов обработки металлов давлением QForm3D [3, 4], а также путем внедрения разработанных технологий как в собственное производство, так и на предприятиях отрасли.

Математический аппарат программного комплекса QForm основан на методе конечных элементов [5]. Принцип действия программного комплекса QForm заключается в разбиении деформируемого тела (заготовки) на конечные элементы – тетраэдры, для которых производится совместное решение уравнений пластичности и равновесия с граничными условиями, вычисляемыми для границ конечных элементов. Основной особенностью программного комплекса QForm и его отличием от зарубежных аналогов является динамически перестраиваемая в процессе моделирования сетка конечных элементов. Динамическое перестроение сетки конечных элементов позволяет производить более точный расчет течения материалов там, где это необходимо, например, в тонких частях заготовок сложной формы, и таким образом повышается точность расчета в локальных частях деформируемого тела, при этом сохраняется необходимая производительность вычислительной системы.

Использование программного комплекса QForm направлено в первую очередь на разработку технологий штамповки жаропрочных никелевых сплавов как для собственного производства, так и для крупных металлургических предприятий – АО «Металлургический завод «Электросталь» и АО «Ступинская металлургическая компания» (АО «СМК»).

Собственное производство ФГУП «ВИАМ» имеет значительное отличие от крупных металлургических и машиностроительных предприятий, поскольку активно использует современный процесс изотермической штамповки на воздухе [6–9].

Компьютерное моделирование изотермической деформации на воздухе

ФГУП «ВИАМ» располагает современным производством штамповок дисков из жаропрочных никелевых и титановых сплавов. Штамповка заготовок дисков осуществляется на специализированных гидравлических прессах усилием 630 и 1600 тс, оснащенных установками индукционного нагрева штампового инструмента [10]. Имеющееся оборудование позволяет получать заготовки дисков турбин диаметром до 300–350 мм, в зависимости от сопротивления деформации сплава. В настоящее время освоено серийное производство дисков малогабаритных ГТД и ГТУ из никелевых (ЭИ698, ЭП742, ЭК151, ЭП975) и титановых (ВТ6, ВТ8, ВТ41) сплавов, получены опытно-промышленные партии дисков ГТД из современных сплавов ВЖ175, ВЖ172, ВТИ-4 и др. [11]. С 2007 г. разработка технологий получения штампованных заготовок каждого нового шифра проводится с обязательным использованием компьютерного моделирования в программном комплексе QForm. Для примера на рис. 1 представлены результаты компьютерного моделирования процесса штамповки заготовки диска из сплава ЭП742. Разработанная технология изготовления заготовок дисков из сплава ЭП742 активно используется — изготовлено и поставлено заказчикам более 1000 штамповок.

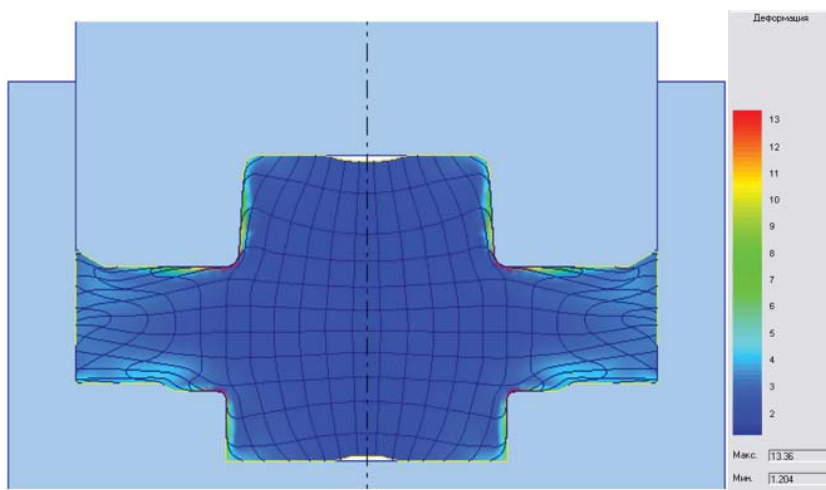


Рис. 1. Распределение интенсивности накопленной деформации по сечению заготовки

Компьютерное моделирование в программном комплексе QForm использовали также при разработке опытных технологий получения заготовок дисков диаметром до 300 мм для модернизируемого вертолетного двигателя ВК-2500М из наиболее труднодеформируемого жаропрочного никелевого сплава марки ВЖ175. Рассматривали несколько вариантов штамповки с разной геометрической формой штампового инструмента. На рис. 2 представлены распределения интенсивности накопленной деформации по объему деформированной заготовки при различных вариантах деформации в заключительном фасонном штампе.

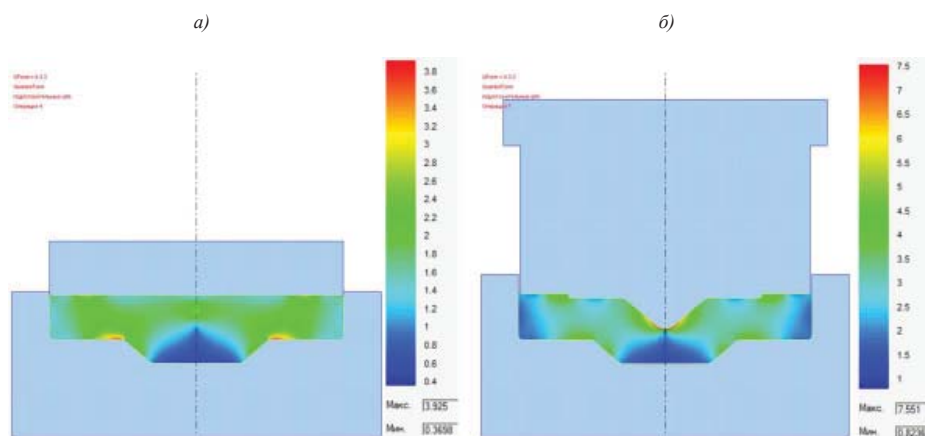


Рис. 2. Распределение интенсивности накопленной деформации по объему заготовки при различных вариантах штамповки

Анализ деформированного состояния заготовки при различных вариантах штамповки показал, что недостатками *первого* варианта (рис. 2, а) являются достаточно низкое значение интенсивности накопленной деформации в нижней ступичной части штамповки, а также сниженный коэффициент использования металла (КИМ). Преимуществами *второго* варианта (рис. 2, б) штамповки являются лучшая проработка структуры в зоне нижней ступицы диска и более высокий КИМ благодаря более сложной геометрической форме верхнего инструмента. Минимальное значение интенсивности накопленной деформации в данном случае составляет 0,82 (в 2,5 раза выше, чем в первом варианте), что позволяет произвести более полную проработку структуры, уменьшить размер зерна и повысить механические свойства материала. На основании полученных данных выбран второй вариант геометрической формы штамповки.

На основании анализа результатов сравнительного компьютерного моделирования разработаны чертежи заготовки диска турбины из сплава ВЖ175 после механической обработки, штамповки диска турбины из

сплава ВЖ175, а также чертежи штамповой оснастки для изготовления данной штамповки методом изотермической штамповки на воздухе.

Поскольку заготовки дисков являются телами вращения, компьютерное моделирование для приведенных ранее примеров штамповок осуществляли с помощью решения двухмерной осесимметричной задачи. Специфика производства ФГУП «ВИАМ» подразумевает использование прессов для изотермической штамповки также дляковки сутунок на плоских нагретых бойках. Для получения необходимых геометрических размеров (толщины и ширины сутунки) проводили компьютерное моделированиековки сутунок для последующей их прокатки. В процессе моделированияковки сутунок с решением трехмерной задачи проводили корректировку степени обжатия, что в конечном счете обеспечивает получение сутунки требуемых размеров.

В рамках выполнения научно-исследовательской работы проведено моделированиековки сутунки из перспективного свариваемого листового жаропрочного сплава ВЖ171. В качестве исходной заготовки использовали конусный слиток вакуумно-индукционной выплавки. На рис. 3 представлены обобщенные результаты моделирования для получения сутунки толщиной 35 мм и шириной 170 мм.

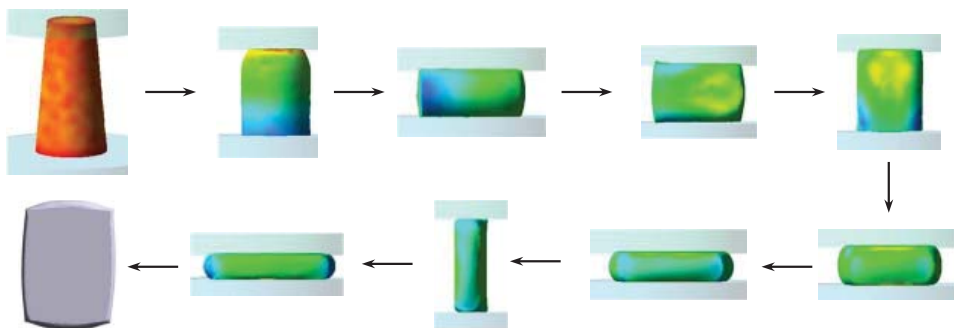


Рис. 3. Результаты компьютерного моделированияковки сутунки из сплава ВЖ171

На основании результатов моделирования разработана схема всестороннейковки сутунки и получены сутунки для дальнейшей прокатки и получения листа толщиной 0,8–1,3 мм [12]. Геометрические размеры полученных сутунок показали хорошую сходимость с результатами моделирования.

Компьютерное моделирование штамповки диска турбины с развитой ступичной частью – валом

Современные отечественные вспомогательные силовые установки (ВСУ) и вспомогательные ГТД для авиационной и вертолетной техники как гражданского, так и военного назначения, имеют радиальную конструкцию турбины высокого давления. Исходя из данных особенностей конструкции турбины, в качестве рабочей ступени турбины используется моноколесо в виде крыльчатки с полученными механической обработкой лопастями. При этом рабочее колесо турбины должно иметь достаточно длинный вал для привода компрессора высокого давления. Особенности работы радиальной турбины не позволяют использовать для соединения вала с рабочей ступенью турбины разъемных соединений. Для их соединения необходимо использовать сварку либо изготавливать цельную заготовку моноколеса с развитой ступичной частью – валом.

Следующей особенностью конструкции турбины является достаточно высокая рабочая температура лопастей крыльчатки турбины, что в свою очередь обуславливает использование для изготовления заготовки типа «диск–вал» наиболее жаропрочных отечественных никелевых сплавов марок ЭК151 и ЭП975. Во ФГУП «ВИАМ» предложен метод получения составной заготовки типа «диск–вал» путем соединения заготовки диска диффузионной сваркой с использованием горячего изостатического прессования и изотермической штамповки [13], однако данный метод пока не применяют для изготовления серийных заготовок.

В связи с этим остается актуальной необходимость изготовления сложных штамповок типа «диск–вал» из труднодеформируемых жаропрочных сплавов марок ЭК151 и ЭП975. Производство таких штамповок осуществлялось в АО «СМК», позднее производство подобных заготовок освоено в АО «Металлургический завод «Электросталь».

В процессе производства заготовок типа «диск–вал» из сплава ЭП975 по серийной технологии АО «СМК» масса заготовок составляла 40,7–47 кг. На основании результатов компьютерного моделирования во ФГУП «ВИАМ» предложена схема деформации, позволяющая повысить накопленную деформацию материала, снизить неравномерность деформации вала, а также снизить массу заготовки до 37 кг. Таким образом, удастся увеличить КИМ при штамповке заготовок типа «диск–вал» на 10–30% и сократить трудоемкость механической обработки штамповок.

На рис. 4 представлены результаты моделирования штамповки заготовки из сплава ЭП975 по серийной технологии и технологии, предложенной специалистами ФГУП «ВИАМ».

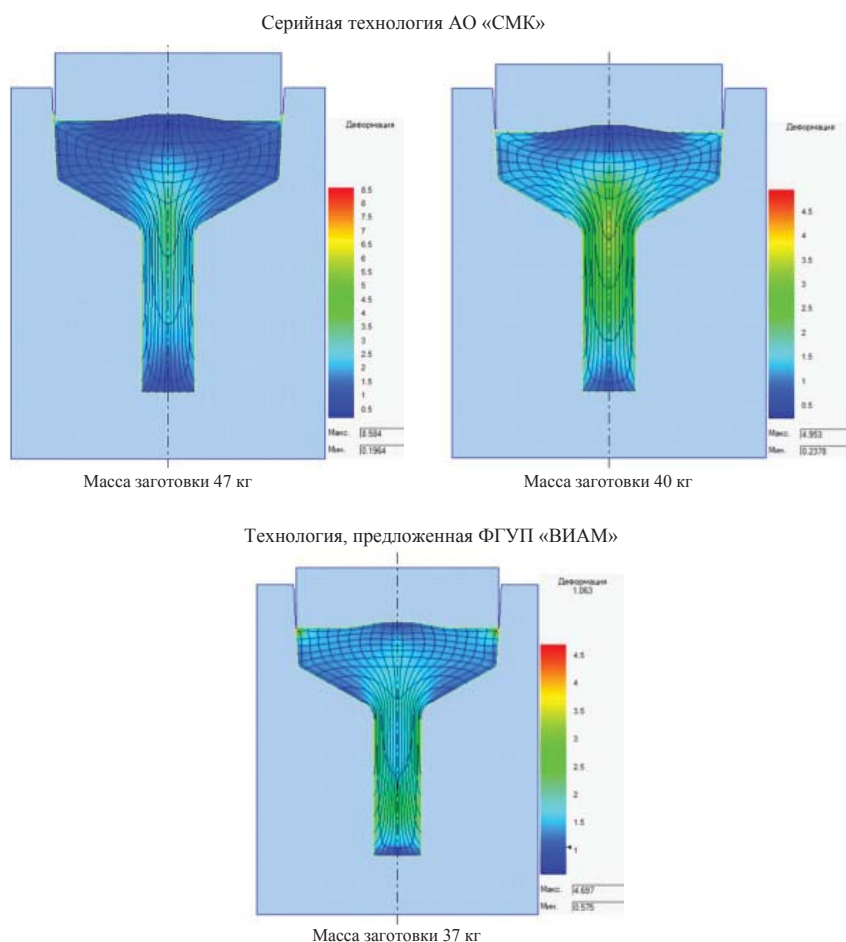


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования штамповки заготовки типа «диск–вал»

Результаты моделирования показали, что предложенная технологическая схема увеличивает накопленную степень деформации заготовки и увеличивает ее равномерность. Минимальная величина накопленной деформации увеличивается с 0,19–0,23 до 0,57, распределение накопленной деформации не имеет явно выраженного пика в области перехода от дисковой части к валу.

Аналогичные работы проведены для АО «Металлургический завод «Электросталь» при разработке технологии изготовления заготовок типа «диск–вал» из сплава ЭП975. Рассмотрены три варианта технологической схемы получения данной заготовки, отличающиеся числом переходов и способом получения дисковой части заготовки: свободная осадка на плите с отверстием после выдавливания вала или штамповка

дисковой части в закрытом штампе с выдавливанием вала за один или два перехода. По результатам компьютерного моделирования деформации заготовки по трем рассматриваемым вариантам выбран вариант, при котором обеспечивается более равномерное распределение накопленной деформации по сечению штампованной заготовки. На рис. 5 представлен результат компьютерного моделирования штамповки заготовки.

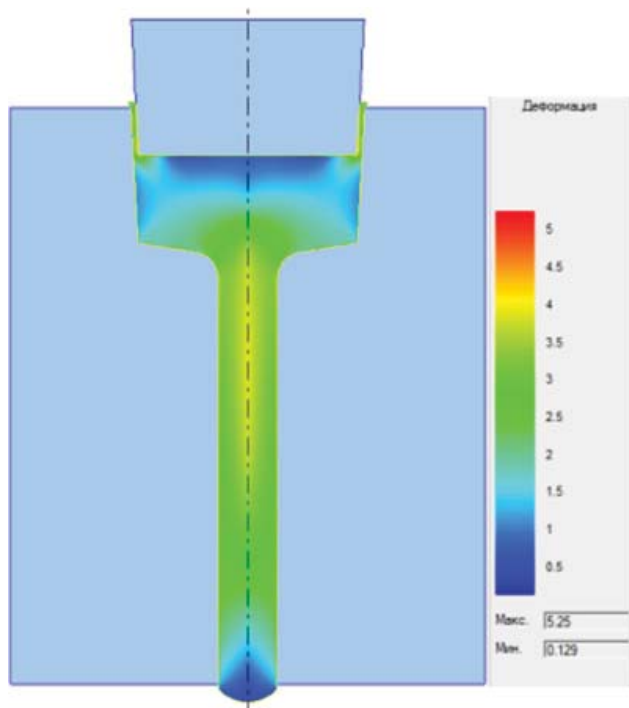


Рис. 5. Распределение накопленной деформации по сечению штампованной заготовки типа «диск–вал»

Полученные результаты моделирования показали, что предложенная технологическая схема получения штампованной заготовки типа «диск–вал» из сплава ЭП975 позволяет получить достаточно равномерное распределение накопленной деформации по сечению заготовки. Использование схемы с одновременной штамповкой дисковой части заготовки и выдавливанием вала на последнем переходе позволяет уменьшить количество переходов до трех. Для получения заготовки с формированием дисковой части свободной осадкой на плоских бойках с отверстием необходимо проводить штамповку за четыре перехода, что привело бы к увеличению расходов.

Заключения

1. Анализ работ, проведенных специалистами ФГУП «ВИАМ», в области моделирования процессов обработки металлов давлением показал, что данное направление является эффективным инструментом для «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.».

2. Использование компьютерного моделирования позволяет снизить затраты при разработке технологий получения деформированных заготовок, в том числе из труднодеформируемых жаропрочных сплавов.

3. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением активно используется при разработке технологий изотермической штамповки заготовок дисков турбин малогабаритных ГТД и ГТУ, реализуемых в собственном производстве ФГУП «ВИАМ». Компьютерное моделирование также используется при разработке опытных и опытно-промышленных технологий получения деформированных полуфабрикатов из перспективных жаропрочных сплавов разработки ФГУП «ВИАМ», в том числе для отраслевых металлургических предприятий.

4. При разработке технологий получения крупногабаритных заготовок сложной формы типа «диск–вал» показано, что использование компьютерного моделирования позволяет увеличить коэффициент использования металла на 10–30% за счет снижения массы штамповки, а также сократить число технологических операций штамповки и тем самым оптимизировать технологию производства.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. 2013. №10. С. 23–32.
3. Стебунов С.А. Бочаров Ю.А. Сертификация авиационных поковок на основе моделирования процессов в программе QForm // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. №6. С. 33–35.
4. Gladkov Yu.A., Mordvinchev P.S. Моделирование технологических процессов штамповки при решении задач авиа- и двигателестроения

- // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. №5. С. 38–47.
5. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 141–147.
 6. 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Эффективная технология изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. №10. С. 13–17.
 10. Пономаренко Д.А., Скугорев А.В., Сидоров С.А., Строков В.В. Технологические возможности специализированных изотермических прессов силой 6,3 и 16 МН в производстве деталей авиационного назначения // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015. №9. С. 36–40.
 11. 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.
 12. Ахмедзянов М.В., Скугорев А.В., Овсепян С.В., Мазалов И.С. Разработка ресурсосберегающей технологии получения холоднокатаного листа из высокожаропрочного свариваемого сплава ВЖ171 // Производство проката. 2015. №1. С. 14–17.
 13. Скугорев А.В., Шпагин А.С., Выдумкина С.В., Шишков С.Ю., Сидоров С.А., Ложкова Д.С. Энергоэффективная технология изотермической деформации на воздухе для изготовления полуфабрикатов деталей авиационного назначения // Современные жаропрочные деформируемые никелевые и интерметаллидные сплавы, методы их обработки: сб. матер. конф. / ВИАМ. М., 2015. С. 5.