

УДК 669.018.44:669.245

А.С. Шпагин¹, В.В. Кучеряев¹, М.В. Бубнов¹**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЖАРОПРОЧНЫХ
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ВЖ175 И ЭП742**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35

Представлены результаты по разработке базы данных реологических свойств жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742. Показана последовательность действий для создания базы данных реологических свойств материала и ее проверки на работоспособность. Использование разработанной базы данных в программе QForm обеспечит возможность компьютерного моделирования различных процессов обработки давлением сплавов ВЖ175 и ЭП742 для разработки новых технологий получения деформированных полуфабрикатов из данных сплавов.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, компьютерное моделирование, обработка металлов давлением, база данных, реологические свойства, напряжение течения, штамповка, деформация.

A.S. Shpagin¹, V.V. Kucheryaev¹, M.V. Bubnov¹**COMPUTER SIMULATION OF THERMOMECHANICAL PROCESSING
OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS VZh175 AND EP742**

This article represents the results of the database development of the rheological properties related to the heat-resistant Nickel alloys VZh175 and EP742. It also shows the sequence of actions for creating of rheological model of material and checking its operability. The using of the mentioned database in the program QForm will provide the possibility of computer simulation of various processes of pressure treatment of alloys VZh175 and EP742 for the development of new technologies for obtaining deformed semi-finished products from these alloys.

Keywords: heat-resistant nickel alloys, computer simulation, metal forming, database, rheological properties, flow stress, stamping, deformation.

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 металлургической промышленности требует применения принципиально новых подходов при разработке новых технологий в области материаловедения [1, 2]. Современные жаропрочные никелевые сплавы обладают высоким уровнем прочностных свойств и сложным химическим составом, что отрицательно сказывается на их пластичности и затрудняет процесс изготовления из них деталей требуемой формы и размеров [3]. Таким образом, разработку технологий получения деформированных полуфабрикатов из данных сплавов целесообразно осуществлять с применением компьютерного моделирования для снижения материальных затрат на проведение прямых экспериментов [4, 5].

Компьютерное моделирование термомеханической обработки металлов и сплавов проводится в программах, использующих метод конечных элементов [6]. Разработка программ для моделирования процессов обработки металлов давлением началась

в 1980-х годах. Из-за недостаточных мощностей оборудования первые программные комплексы отличались низкой производительностью – моделирование нетривиальных процессов обработки давлением продолжалось несколько дней. Но даже с такими недостатками использование моделирования оказалось полезным для разработки новых технологий деформации, в связи с чем работы по совершенствованию программного обеспечения были продолжены.

В настоящее время разработано много программных комплексов для решения задач по обработке металлов давлением, например QForm 3D, Deform, 3DANSYS, Forge3. Развитие вычислительной техники позволяет не только прогнозировать формообразование металла и рассчитывать силовые параметры, но и проводить расчет микроструктуры, фазовых превращений, решать упругопластические задачи при нагреве и охлаждении [7, 8].

Во ФГУП «ВИАМ» используется программное обеспечение QForm, разработанное ООО «КванторФорм» (Россия). Программа QForm обладает всем необходимым набором инструментов для моделирования различных процессов термомеханической обработки металлов [9]. Она предназначена для математического моделирования методом конечных элементов технологических процессов обработки металлов давлением с учетом термомеханических процессов нагрева и охлаждения металла, в том числе в процессе деформации, а также взаимодействия деформируемой заготовки с технологическим инструментом и оборудованием.

Для построения процесса деформации выбранного металла или сплава в первую очередь необходимы данные по сопротивлению деформации (напряжению течения) материала при определенных температурах, скоростях и степенях деформации. Эти данные содержатся в базе данных деформируемых материалов, имеющейся в программе QForm. Но в стандартной базе данных деформируемых материалов не представлены новейшие и перспективные сплавы, из которых в настоящее время изготавливаются детали для авиационной отрасли. Из-за отсутствия базы данных реологических свойств конкретного материала разработчикам приходится использовать в качестве исходных материалов устаревшие сплавы и сплавы-аналоги.

Реологические модели деформируемых материалов из стандартной базы данных QForm разработаны на основе сведений из справочников и могут иметь значительные расхождения со свойствами реальных материалов, так как исследования проводились на разном испытательном оборудовании, не всегда учитывалось состояние поставки материала. Последняя систематизация реологических свойств отечественных металлических материалов производилась в 1983 г., результаты исследований изложены в справочнике «Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов» [10]. Наличие систематизированной базы данных реологических свойств новых жаропрочных сплавов позволило бы решать многие технологические задачи по термомеханической обработке данных сплавов [11, 12].

Для повышения точности расчетов компьютерного моделирования во ФГУП «ВИАМ» проведена работа по созданию базы данных реологических свойств новых сплавов, наиболее часто используемых в производстве. Одними из таких сплавов являются жаропрочные никелевые сплавы ВЖ175 и ЭП742, из которых изготавливаются диски турбин и компрессора высокого давления [13, 14].

Для создания реологической базы данных материала необходимо:

- провести экспериментальные исследования по определению напряжения течения материала при различных температурах, скоростях и степенях деформации;
- провести сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений энергосиловых параметров;
- провести сравнительный анализ формообразования и энергосиловых параметров в реальном процессе и при использовании компьютерного моделирования;

– при необходимости провести доработку реологической модели с помощью ввода поправочного коэффициента.

Напряжение течения металла (σ) рассчитывают по формуле

$$\sigma = \frac{F}{A_k},$$

где F – осевая сжимающая нагрузка; A_k – конечная площадь поперечного сечения цилиндрического образца после испытания до заданной деформации.

Данные по напряжению течения материала могут быть занесены в QForm в виде постоянной величины, табличной функции или формулы. При задаче реологии в виде формулы используется уравнение Хензеля–Шпиттеля [15]:

$$\sigma = A \cdot e^{-m_1 T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot e^{(-m_4 \cdot \varepsilon)} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3},$$

где A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – эмпирические коэффициенты; e – экспонента; T – температура, °C; ε – деформация; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹.

Эмпирические коэффициенты находят с помощью аппроксимации зависимостей напряжения течения от температуры, скорости и степени деформации. В случае если сравнительный анализ расчетных и экспериментальных графиков «усилие–деформация» показал, что характер кривых совпадает, но существует значительное отклонение от экспериментальных данных, достаточно будет ввести поправочный коэффициент и умножить его на коэффициент A .

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 3.2. «Компьютерное моделирование, в том числе с применением нейронных сетей, процессов обработки давлением с прогнозированием структуры, комплекса механических и эксплуатационных свойств изделий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

Материалы и методы

Исходными материалами служили цилиндрические образцы для испытаний на осадку. Образцы из сплава ЭП742 изготавливали из кованого прутка, из сплава ВЖ175 – из шайбы, полученной осадкой заготовки из прессованного прутка.

Испытания на сжатие осуществляли на модульном комплексе Gleeble-3800 в соответствии с ГОСТ 8817–82 «Металлы. Метод испытания на осадку» с построением кривых зависимости напряжения течения материала от логарифмической степени деформации (кривых пластического течения) при указанных температурах и скоростях испытаний. На каждую температуру и скорость испытано по три цилиндрических образца диаметром 10 мм и высотой 15 мм.

Компьютерное моделирование проводили в программном комплексе QForm с использованием полученных в результате экспериментальных исследований реологических свойств сплавов ВЖ175 и ЭП742.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования по определению напряжения течения материала при различных температурах, скоростях и степенях деформации

Экспериментальные исследования напряжения течения необходимы для построения кривых упрочнения сплава при различных температурных и скоростных параметрах. Полученные кривые упрочнения интегрируются в программу QForm и используются при построении различных задач по обработке давлением. Расчет энергосиловых параметров деформации напрямую зависит от данных по напряжению течения материала.

Для определения напряжения течения используют различные методы. Основными из них являются испытания на растяжение, сжатие и кручение. Наиболее эффективным является метод сжатия образцов, за счет которого возможно получить кривые упрочнения при высоких степенях деформации.

Испытания на сжатие представляют собой одноосное сжатие цилиндрических образцов между двумя плоскопараллельными бойками (рис. 1). По полученным данным строятся кривые упрочнения в координатах «напряжение течения–деформация».

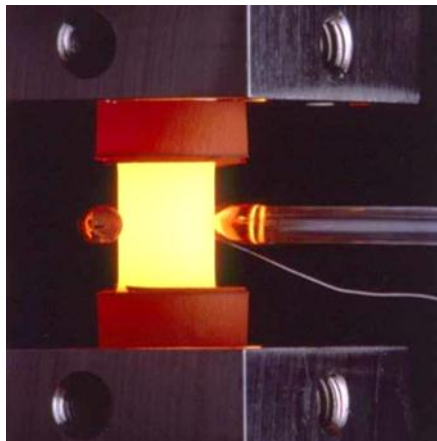


Рис. 1. Испытания на сжатие цилиндрического образца

Испытания проводили на модульном комплексе Gleeble-3800. Температурные интервалы испытаний выбирали исходя из инструкций на термомеханическую обработку выбранных сплавов с учетом возможного перегрева и переохлаждения. Выбранные интервалы составили: 900–1200°C – для сплава ВЖ175 и 850–1150°C – для сплава ЭП742, с шагом 50°C. Скорости испытаний устанавливали в диапазоне от 10^{-3} до 10 с $^{-1}$. Степень деформации выбрана по данным о технологической пластичности сплавов ВЖ175 и ЭП742 и составила 35%. По результатам трех испытаний на точку строили усредненные кривые упрочнения, которые заносили в базу QForm в виде табличной функции, так как дальнейший анализ расчетных и экспериментальных данных показал, что полученные реологические базы данных не требуют доработки.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений энергосиловых параметров и формообразования

Перед началом использования полученной реологической базы данных необходимо провести проверку расчета энергосиловых параметров и формообразования для оценки достоверности полученных реологических свойств. Провести проверку можно с помощью моделирования процесса осадки с условиями, максимально соответствующими условиям эксперимента (рис. 2).

Полученные в результате моделирования графики «усилие–деформация» сравнивают с графиками, полученными в результате эксперимента. Поскольку испытания проводили на трех образцах на одну температуру и скорость, для построения экспериментального графика использовали усредненные значения. В первую очередь необходимо понять, соответствует ли характер кривой «усилие–деформация», полученной в ходе компьютерного моделирования, кривой, полученной в ходе эксперимента (рис. 3). По соответствию расчетных и экспериментальных графиков можно понять, нуждается ли реологическая модель в доработке или ее можно использовать для моделирования термомеханической обработки выбранного сплава.

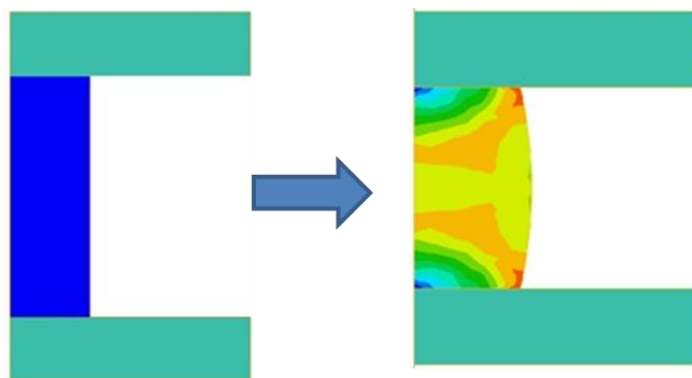


Рис. 2. Моделирование процесса осадки образцов

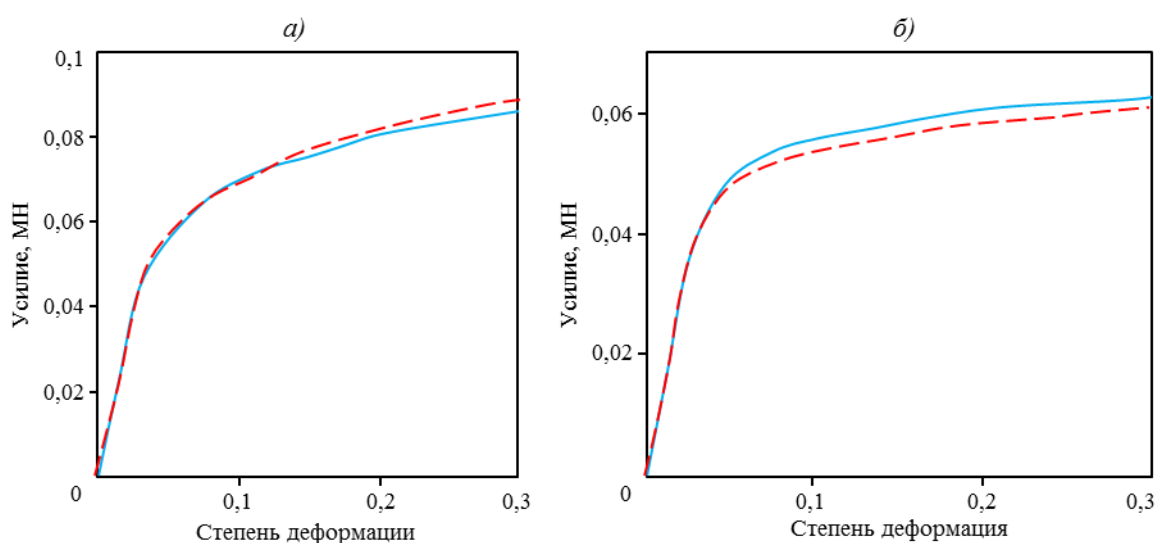


Рис. 3. Сравнительный анализ энергосиловых параметров сплавов ВЖ175 (а) и ЭП742 (б) для температуры 950°C и скорости 10 с⁻¹:

— экспериментальные данные; - - - данные из базы QForm

Как видно из данных рис. 3, на примере температуры 950°C и скорости 10 с⁻¹, характер кривых «усилие–деформация», полученных путем моделирования, соответствует экспериментальным данным.

Для проверки точности полученной реологической базы данных также необходимо вычислить общую ошибку моделирования. Она определяется суммированием ошибки вычисления силы деформирования и ошибки прогнозирования геометрической формы:

$$err = err_1 + err_2,$$

где err – общая ошибка моделирования; err_1 – ошибка вычисления силы деформирования; err_2 – ошибка прогнозирования геометрической формы.

Ошибка вычисления сил деформирования определяется как среднеквадратичное отклонение сил деформирования по результатам эксперимента (P_{exp}) и расчета (P_{com}) для нескольких точек нагрузочного графика:

$$err_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_{exp_i} - P_{com_i}}{P_{exp_i}} \right)^2.$$

Ошибка прогнозирования геометрической формы определяется по формуле

$$err_2 = \frac{D_{\text{exp}} + D_{\text{com}}}{D_{\text{exp}}},$$

где D_{exp} – максимальный диаметр образца в результате эксперимента; D_{com} – максимальный диаметр образца в результате моделирования.

Расчет общей ошибки моделирования для всех температурно-скоростных интервалов испытаний показал, что общая ошибка моделирования для сплава ВЖ175 не превышает 5%, а общая ошибка моделирования для сплава ЭП742 не превышает 7%. По полученным результатам можно сделать вывод, что разработанные реологические базы данных сплавов жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742 позволяют достаточно точно спрогнозировать процесс деформации выбранных сплавов и не нуждаются в доработке.

Сравнительный анализ формообразования и энергосиловых параметров в реальном процессе и при использовании компьютерного моделирования

Для проверки работоспособности разработанной базы данных реологических свойств в реальном процессе проведено моделирование серийного процесса изготовления штамповок из сплава ЭП742, производство которых налажено во ФГУП «ВИАМ». Для производства штамповок дисков для газотурбинных двигателей и энергетических установок во ФГУП «ВИАМ» создан участок, оснащенный гидравлическими прессами с усилием 630 и 1600 тс с индукционным нагревом штампов [17, 18]. Моделирование проводили в полном соответствии с технологией изготовления штамповки – с учетом температуры, скорости, степени деформации, а также продолжительности охлаждения заготовки на воздухе и в инструменте. Для того чтобы показать, насколько сильно может отличаться результат моделирования при использовании реологической базы данных сплавов-аналогов, проведено моделирование процесса штамповки с использованием реологии сплава ЭИ867 (рис. 4).

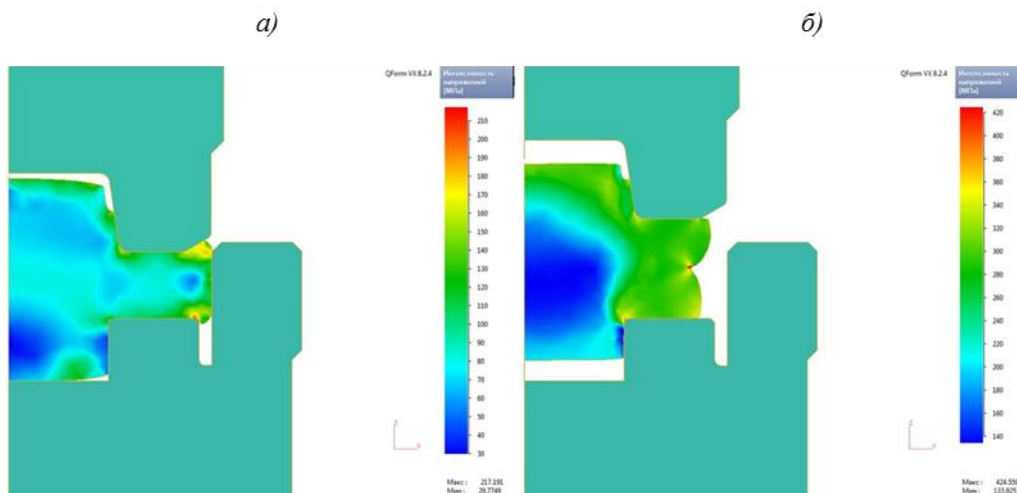


Рис. 4. Моделирование процесса штамповки из сплава ЭП742 с реологией сплавов ЭП742 (а) и ЭИ867 (б)

Изготовление штамповок данного шифра проводится на изотермическом прессе с усилием 630 тс. На последнем переходе пресс работает на максимальных усилиях, в связи с чем использование в качестве исходной реологической модели данных сплавов-

аналогов может привести к неполному заполнению гравюры штампа металлом из-за значительной разницы значений напряжения течения в требуемом температурном интервале деформации. В данном случае при использовании реологии другого сплава металл не достигает стенок контейнера, заготовка не может оформиться до конца и не приобретает нужной для изготовления обточенной штамповки геометрической формы необходимого размера (рис. 5).

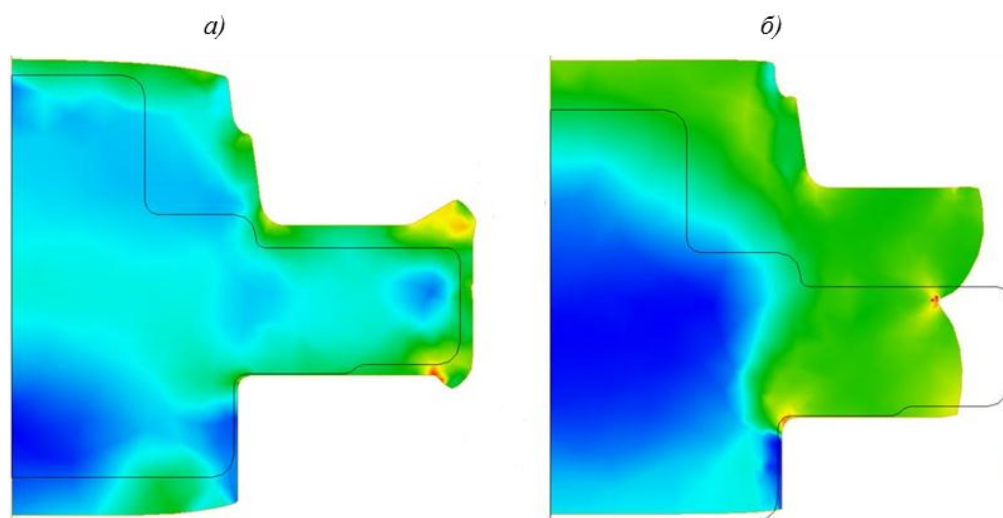


Рис. 5. Контур обточенной штамповки, наложенный на результаты моделирования с реологией сплавов ЭП742 (а) и ЭИ867 (б)

После моделирования необходимо сравнить форму и размеры штамповки с результатом, полученным путем компьютерного моделирования (рис. 6).



Рис. 6. Внешний вид штамповки, полученной в процессе реальной штамповки (а) и компьютерного моделирования (б)

Анализ формообразования показал, что форма и размеры модели соответствуют форме и размерам штамповки с погрешностью не более 10%. Несоответствие расчетных и экспериментальных размеров может быть вызвано износом штамповой оснастки и вытеканием смазки в процессе штамповки.

Для проведения сравнительного анализа энергосиловых параметров построены графики зависимости усилий от продолжительности для реального процесса штамповки и компьютерного моделирования. Графики усилий при штамповке сравнивали с графиком усилий, полученным в результате компьютерного моделирования (рис. 7). Видно, что характер кривых «усилие–продолжительность процесса» совпадает. Отклонение расчетных и экспериментальных значений в среднем составило не более 7%. По полученным результатам анализа формообразования и энергосиловых параметров в реальном процессе и при использовании компьютерного моделирования можно сделать

вывод, что разработанная база данных реологических свойств может быть использована для моделирования различных процессов термомеханической обработки.

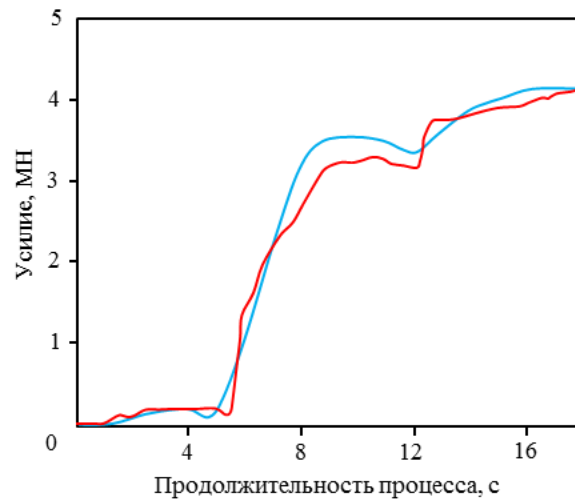


Рис. 7. Графики зависимости усилий от продолжительности процесса для штамповки (—) и компьютерного моделирования (—)

Заключения

Компьютерное моделирование значительно облегчит работу инженеров и технологов, так как позволяет не тратить время и ресурсы на проведение прямых экспериментов и разработку штамповой оснастки. Разработанные реологические модели жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742 показали свою работоспособность и возможность их применения для разработки новых технологий термомеханической обработки данных сплавов. Результаты расчетов, полученные с использованием данных моделей, будут обеспечивать сходимость результатов с реальным экспериментом на уровне 90–95%.

Реологическая модель сплава должна содержать информацию о напряжении течения материала в требуемых температурно-скоростных интервалах, подтвержденную проведенными экспериментальными исследованиями. Достоверный расчет энергосиловых параметров процесса деформации и формообразования возможен только при использовании реологической модели конкретного сплава, из которого будет изготавливаться деформированный полуфабрикат. Использование в качестве исходной модели реологии сплавов-аналогов и устаревших сплавов не позволяет в должной мере получить достоверные результаты.

Использование реологических свойств сплавов в компьютерных программах моделирования процессов обработки металлов давлением обеспечит:

- повышение точности результатов расчета формообразования в процессах обработки металлов давлением. Корреляция экспериментальных и расчетных (полученных методом математического моделирования с применением реологических свойств) данных будет обеспечена на уровне 90–95%;
- снижение материальных затрат на проведение прямых экспериментов по отработке технологии обработки давлением в 2–3 раза;
- сокращение трудоемкости операций доработки штамповой оснастки на 50–60%;
- уменьшение припусков и напусков на 30–40% и увеличение коэффициента использования металла на 10–15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. На перекрестке науки, образования и промышленности // Эксперт. 2015. №15 (941). С. 49–53.
2. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
3. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
4. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 141–147.
5. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // Труды ВИАМ: электрон-науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
6. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Metallurgy, 1980. 456 с.
7. Биба Н.В., Лишний А.И., Стебунов С.А. Эффективность применения моделирования для разработки технологии штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 2001. №5. С. 39–44.
8. Бакрадзе М.М., Скугорев А.В., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование технологических процессов обработки металлов давлением как инструмент разработки новых технологий // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 175–185. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-175-185.
9. Стебунов С.А., Биба Н.В. QForm – программа, созданная для технологов // Кузнечно-штамповочное производство. 2004. №9. С. 38–43.
10. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1983. 488 с.
11. Гладков Ю.А., Мордвинцев П.С. Моделирование технологических процессов штамповки при решении задач авиа- и двигателестроения // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. №5. С. 38–47.
12. 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.
13. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
14. Волков А.М., Востриков А.В., Бакрадзе М.М. Принципы создания и особенности легирования гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №8 (44). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-2-2.
15. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справ. изд. Пер. с нем. М.: Metallurgy, 1982. 360 с.
16. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
17. 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.
18. 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.