

Обзорная статья

УДК 621.7:004.94

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-23-32

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ (обзор)

М.С. Яшин¹, Д.В. Капитаненко¹, Д.А. Мельникова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Специальные программные комплексы позволяют моделировать различные операции обработки металлов давлением. Расчеты проводятся с учетом свойств деформируемых материалов и материалов оснастки, а также при варьировании технологических параметров процессов деформации. Благодаря этому появляется возможность оценки технологичности различных схем изготовления деформированных полуфабрикатов путем анализа различных параметров, таких как деформация, усилия, диапазон температурных полей и др. Это позволяет сокращать затраты на проведение прямых экспериментов и отработку технологий деформации.

Ключевые слова: обработка давлением, компьютерное моделирование,ковка, штамповка, прокатка, конечные элементы, изотермическая деформация

Для цитирования: Яшин М.С., Капитаненко Д.В., Мельникова Д.А. Особенности использования компьютерного моделирования при разработке технологических процессов обработки металлов давлением (обзор) // Труды ВИАМ. 2026. № 9 (163). С. 23–32. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-23-32.

Review article

PECULIARITIES OF COMPUTER MODELING IN THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR METAL PRESSURE PROCESSING (review)

M.S. Yashin¹, D.V. Kapitanenko¹, D.A. Melnikova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Specialized software packages allow for the simulation of various plastic processing operations. Calculations are performed taking into account the properties of the deformed and tooling materials, as well as varying the process parameters of the deformation processes. This makes it possible to evaluate the manufacturability of various manufacturing schemes for deformed semi-finished products by analyzing various parameters, such as deformation, forces, temperature ranges, and others. This reduces the costs of direct experiments and the development of deformation technologies.

Keywords: pressure treatment, computer modeling, forging, stamping, rolling, finite elements, isothermal deformation

For citation: Yashin M.S., Kapitanenko D.V., Melnikova D.A. Peculiarities of computer modeling in the development of technological processes for metal pressure processing (review). *Trudy VIAM*, 2026, no. 9 (163), pp. 23–32. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-23-32.

Введение

В настоящее время в машиностроении одним из основных способов получения полуфабрикатов для изготовления деталей из металлов и их сплавов [1, 2] является обработка давлением [3]. Суть такой обработки заключается в придании исходной заготовке формы и размеров, близких к параметрам готовой детали для уменьшения припусков под механическую обработку, а также в изменении структуры материала для получения требуемого комплекса механических свойств [4]. Наиболее распространенными операциями являются прокатка, штамповка, прессование и др. С помощью обработки давлением получают изделия из сталей и жаропрочных никелевых сплавов, полосы припоя и др. [5–7]. Для изготовления полуфабриката из труднодеформируемых металлов, таких как жаропрочные никелевые сплавы, применяют особые виды деформации, например деформацию заготовок в изотермических условиях [8]. В отличие от традиционных методов горячей деформации, при изотермической деформации температура инструмента максимально близка к температуре нагрева заготовки, что позволяет избежать интенсивного охлаждения заготовки и, как следствие, повышает ее пластичность.

С развитием машиностроения наиболее актуальными проблемами в области обработки давлением становятся снижение трудоемкости, увеличение производительности и коэффициента использования материала (уменьшение количества металла, который перерабатывается в стружку при механической обработке деформированного полуфабриката) [9]. Наиболее популярными технологическими решениями являются уменьшение габаритов заготовки и припусков под механическую обработку, получение полуфабриката, форма которого наиболее приближена к чистовой детали, и др.

При проектировании новых технологических процессов бывает недостаточно только теоретических расчетов. Для того чтобы удостовериться в пригодности разработанной технологии, необходимо отработать ее на практике. Однако проводить многочисленные натурные эксперименты зачастую бывает экономически нецелесообразно. Для решения этой задачи возможно применение компьютерного моделирования, которое позволит провести отработку новых технологий без проведения экспериментов с реальным металлом, исключая возникающие при этом экономические издержки [10].

В настоящее время существует множество специальных программных комплексов для проведения компьютерного моделирования различных процессов обработки металлов давлением, такие как QForm, Deform и др. [11]. В их основе используется метод конечных элементов, суть которого заключается в расчете процесса деформации в виде множества простых уравнений для каждой маленькой части всей заготовки. В специальном программном комплексе происходит разделение заданной заготовки, которую представляют в виде сетки – совокупности множества маленьких геометрических фигур, т. е. конечных элементов. Далее производится расчет на каждом отдельном элементе с использованием простых линейных уравнений, вычисляются перемещения, деформация, напряжение и др. Затем эти уравнения объединяются в матрицу, которая рассчитывается с учетом связей элементов между собой. Таким образом осуществляется оценка всего процесса деформации [12].

В стандартных базах данных таких программных комплексов зачастую содержатся сведения о реологических свойствах широкой номенклатуры металлов и сплавов, при моделировании можно задавать параметры температуры, скорости деформации, перемещения инструмента, а также учитывать смазочные материалы [13]. В результате моделирования можно оценить не только форму полученной заготовки, но и изменения усилий, температурных полей и деформации в процессе обработки давлением [14].

Основной целью данной работы является анализ современных возможностей специального программного комплекса для моделирования основных методов обработки металлов давлением.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Обзор примеров моделирования процессов обработки давлением

В работе [15] приведены результаты моделирования процессов прокатки листа из стали Ст10 толщиной 50 мм при температуре 1200 °С. Прокатку осуществляли за пять переходов, до толщины 2,8 мм. Перед процессом моделирования разработаны 3D-модели исходной заготовки и валков прокатного стана. Компьютерное моделирование в специальном программном комплексе показало (рис. 1), что отклонения по толщине после каждого перехода составили от 0,11 до 1,50 %. Усилия прокатки по расчетам снижались с 20,06 МН на первом переходе до 6,74 МН на последнем переходе. Эти значения не превышают допустимые величины усилия прокатного стана с длиной бочки рабочих валков 1600 мм. Таким образом, компьютерное моделирование показывает допустимость использования данного технологического процесса для получения листов из стали Ст10 требуемых размеров.

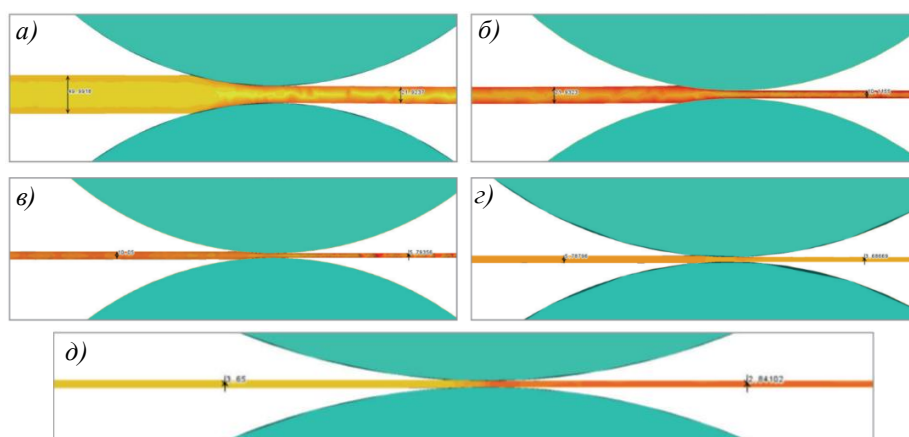


Рис. 1. Результаты компьютерного моделирования горячей прокатки листа из стали Ст10 на первом (а), втором (б), третьем (в), четвертом (г) и пятом (д) переходах [15]

Проведено моделирование процесса прокатки труб, по результатам которого осуществлена оценка параметров, определяющих сопротивление пластической деформации [16]. Процесс представлял собой прокатку трубы из стали Ст40 на плавающей оправке на двух валках при температуре 1200 °С. Коэффициент трения задавался по закону Зибеля.

Для оценки напряженно-деформированного состояния материала на поверхности заготовки заданы точки, параметры которых можно оценивать в любой момент времени при перемещении в процессе пластической деформации. После анализа построены графики изменения значений величины и скорости пластической деформации. В результате выявлены диапазоны изменений параметров, которые определяют сопротивление пластической деформации. В итоге с помощью компьютерного моделирования получены оптимальные значения скорости, величины деформации и диапазон температур металла.

В статье [17] показан процесс компьютерного моделирования прессования проволочного припоя из сплава ПОИп52 (сплав индия и олова) с использованием специального программного комплекса. Диаметр заготовки составил 20 мм. Цель данного

моделирования – не только определение геометрических и силовых параметров процесса, но и расчет температуры, поскольку материал припоя обладает низкой температурой плавления ($\sim 120^\circ\text{C}$), а при прессовании зачастую наблюдается сильный разогрев материала из-за высоких степеней деформации. Прессование осуществляли на прессе Д2428. Разработаны 3D-модели заготовки и оснастки. Скорость прессования составила 0,5; 1,0 и 3,0 мм/с, диаметр полученной проволоки достиг 2 мм.

В ходе анализа результатов моделирования выявлено значительное влияние скорости прессования на температуру процесса. При увеличении скорости в 6 раз температура металла возрастает на $\sim 40^\circ\text{C}$. При последовательном непрерывном прессовании четырех заготовок температура получаемой проволоки возрастает еще на $\sim 10^\circ\text{C}$, что связано с нагревом оснастки. Однако при прессовании большего количества заготовок дальнейшее повышение температуры материала не наблюдается и процесс стабилизируется. Максимально достигнутая температура на 87°C меньше допустимой, что означает пригодность использования данного технологического процесса для получения полуфабриката из сплава ПОИп52.

Моделирование процессов горячей объемной штамповки представлено в работе [18]. В специальном программном комплексе осуществлено моделирование изготовления поковки полуфабриката шестерни на горячем прессе. Материал заготовки – сталь 30ХГТ, начальная температура процесса и инструмента составила 1200 и 200°C соответственно, в качестве смазки выбрана водно-графитная суспензия. В ходе моделирования учитывали упругопластическую деформацию инструмента. Штамповку осуществляли за три перехода: осадка, предварительная и окончательная штамповка.

Как показали результаты моделирования (рис. 2), усилия составили 2,9; 7,7 и 12,4 МН при осадке, предварительной и окончательной штамповке соответственно. Максимальные растягивающие напряжения в процессе осадки возникают на боковой поверхности и не превышают 5 МПа, как и в случае с предварительной штамповкой, где эти значения не превышают 15 МПа. При окончательной штамповке происходила пробивка центрального отверстия, и именно в зоне отделения перемычки зафиксированы максимальные растягивающие напряжения, достигающие 70 МПа (рис. 3). Эти значения превышают предел прочности при растяжении для стали 30ХГТ при температуре 1100°C . Это означает осуществимость операции пробивки отверстия одновременно с окончательной штамповкой без возникновения трещин на остальном полотне полуфабриката.

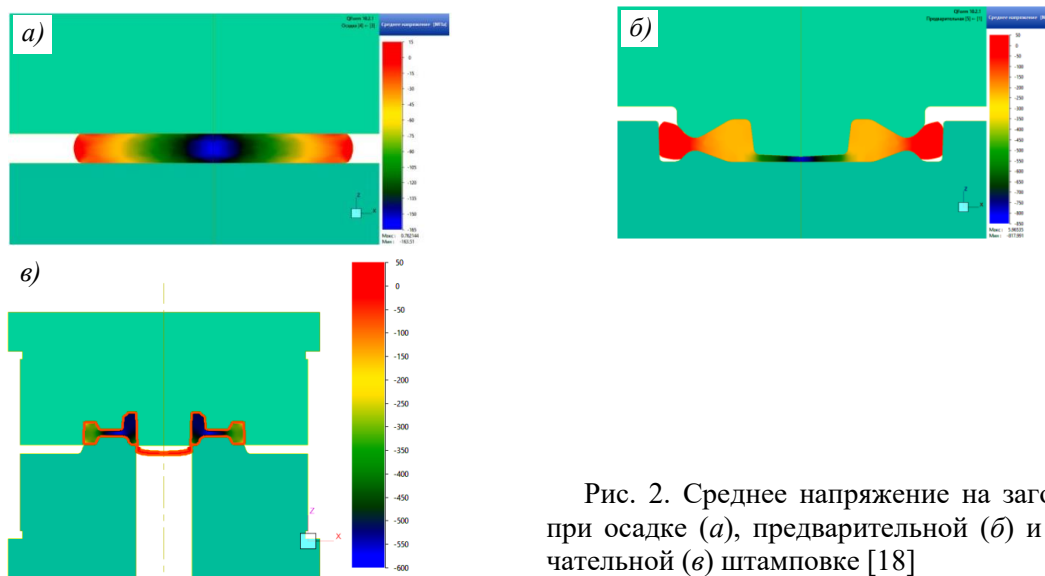


Рис. 2. Среднее напряжение на заготовке при осадке (а), предварительной (б) и окончательной (в) штамповке [18]

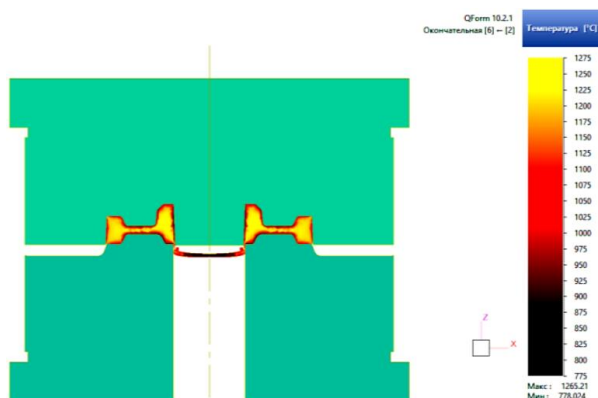


Рис. 3. Распределение полей температур в полуфабрикате при окончательной штамповке [18]

Моделирование также показало, что среднее значение температур в полуфабрикате составляет 1160 °С. Минимальные значения наблюдаются в зоне контакта инструмента и заготовки и составляют 800 °С. Кроме того, результаты моделирования подтвердили отсутствие торцевых заусенцев и выдавливание перемычки в зазор. В дополнении в работе проведен анализ действующих на инструмент напряжений. Сжимающие напряжения в области контакта штампа и заготовки составили ~(400–500) МПа, а растягивающие напряжения в угловых точках увеличились до 750 МПа, что не превышает предела текучести материала инструмента.

Таким образом, моделирование в специальном программном комплексе помогло проанализировать процесс горячей объемной штамповки шестерни с учетом совмещения с операцией пробивки. Результаты моделирования показали возможность реализации данной технологии.

В специальном программном комплексе возможно проводить моделирование процессов холодной штамповки, как показано в работе [19]. В данном случае с помощью компьютерного моделирования проведен анализ технологических усилий формоизменения в процессе пластических деформаций с учетом влияния смазочных жидкостей. При расчетах учитывали влияние двух видов смазок: графит с водой и фосфаты с мылом (рис. 4). Кроме того, проведено моделирование процесса без смазки (модель трения стали по стали). При расчетах использовали законы Кулона и Зибеля.

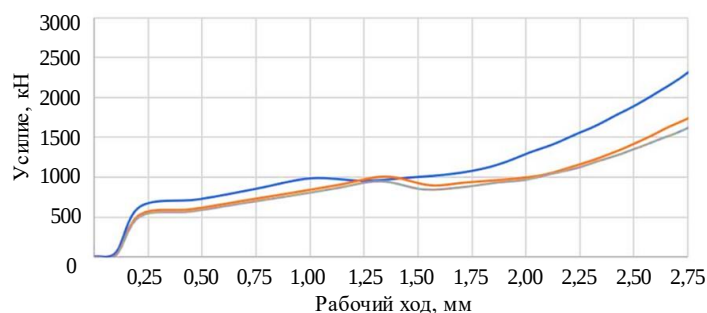


Рис. 4. Зависимости усилия от рабочего хода в процессе холодной штамповки без смазки (—) и при использовании в качестве смазки графита и воды (—), фосфатов и мыла (—) [19]

В результате компьютерного моделирования в специальном программном комплексе получены зависимости усилия от рабочего хода. Характер поведения кривых одинаков во всех трех случаях. Однако значения усилия при пластической деформации отличаются. Наиболее высокие значения достигаются при холодной штамповке без смазки, самые низкие – при использовании смазки на основе фосфатов и мыла. Таким

образом, благодаря компьютерному моделированию подобрана оптимальная смазка для осуществления процесса холодной штамповки.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ широко применяется компьютерное моделирование для разработки технологий обработки металлов давлением. Так, расчеты в специальном программном комплексе помогли оптимизировать технологию изготовления колец диаметром 500 мм из жаропрочного никелевого сплава ЭП648-ВИ [20]. Рассмотрены две технологические схемы изготовления полуфабриката: многократная деформация заготовки на плоских бойках и деформация заготовки в конусном штампе, который использовали в качестве подкладной нижней плиты. Обработку давлением осуществляли в изотермических условиях на вертикальном гидравлическом прессе.

Результаты расчетов в специальном программном комплексе показали, что при штамповке по схеме деформации на плоских бойках двух переходов недостаточно для формирования необходимого диаметра полуфабриката. Поскольку мощности прессы недостаточно для достижения нужных размеров, требуется осуществить три перехода осадки, после каждого из которых необходимо производить вырезку центральных отверстий. Кроме того, осадка по схеме на плоских бойках требует использования крупногабаритной заготовки. Это означает, что большая часть металла заготовки перерабатывается в стружку при изготовлении полуфабриката. Такая схема обработки давлением является нетехнологичной.

Альтернативным способом получения требуемого полуфабриката является осадка с использованием конической нижней плиты, которая центрируется по центральному отверстию в заготовке (рис. 5). Такая схема обработки позволяет металлу заготовки свободно перемещаться вниз без значительных сопротивлений. Кроме того, предполагается увеличение диаметра заготовки до требуемого без увеличения усилий прессы.

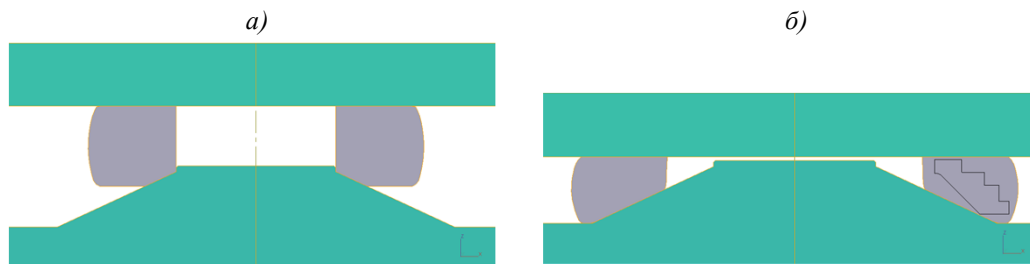


Рис. 5. Моделирование второго перехода деформации: *а* – начало перехода; *б* – конец перехода, в область заготовки вписан контур детали после чистовой обработки [20]

Согласно расчетам, высоту исходной заготовки для этой схемы осадки можно уменьшить в ~2 раза. Первый переход осуществляли на плоских бойках со степенью деформации 50 %. Затем вырезали центральное отверстие. Далее рассчитывали угол наклона конуса для проектирования оснастки под второй переход. В специальном программном комплексе проведено моделирование осадки с различными углами наклона конуса. По результатам моделирования подобран оптимальный угол наклона конуса, составивший 25 градусов. После проведения окончательного моделирования выявлено, что размеры полученного полуфабриката удовлетворяют необходимым размерам с учетом технологических припусков под изготовление образцов. Усилия деформации (рис. 6) снижены по сравнению с первой технологической схемой за счет скольжения по конусной оправке, а количество переходов сокращено до двух. Анализ полей температур показал (рис. 7), что температура заготовки в процессе деформации находится в оптимальном диапазоне, который соответствует условиям получения требуемой структуры. Таким образом, компьютерное моделирование позволило определить наиболее технологичную схему изготовления полуфабриката методом изотермической штамповки.

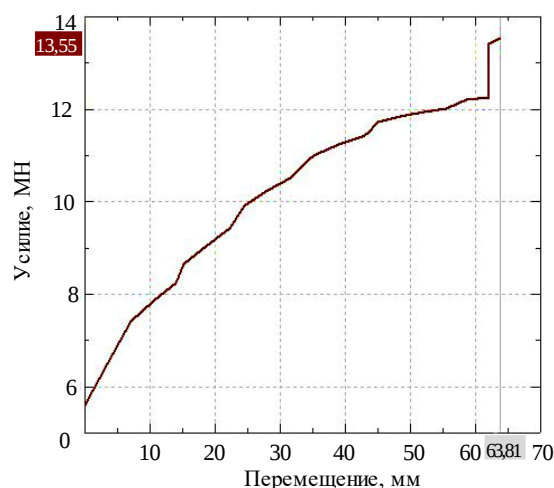


Рис. 6. Зависимость усилий прессы от перемещения инструмента в процессе второго перехода [20]

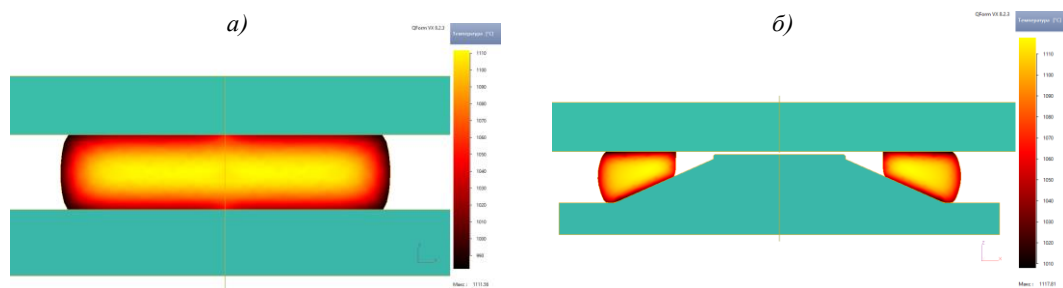


Рис. 7. Температурные поля заготовки в процессе первого (а) и второго (б) переходов [20]

Кроме того, в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны реологические модели материалов, в частности алюминиевого деформируемого сплава 1163 [21]. Собранные данные о напряжении деформируемого материала при разных температурах, скоростях и степенях деформации. Эксперименты осуществляли на небольших цилиндрических образцах. Для интегрирования экспериментальных данных о реологических свойствах сплава в специальный программный комплекс применена эмпирическая модель Хензеля–Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами, рассчитанными по методу Левенберга–Марквардта. Кроме того, в реологической модели сплава 1163 учтены физические свойства материала.

Проверку полученной модели материала осуществляли с помощью сравнительного анализа зависимостей напряжения течения от степени деформации. Кроме того, рассчитаны средняя ошибка и коэффициент детерминации. Расчеты показали, что характер зависимостей совпадает, размер средней ошибки не превосходит 10. Коэффициенты детерминации составляют 0,95 и 0,97 для модели холодной и горячей штамповки соответственно. Это свидетельствует о высокой степени точности полученной модели поведения сплава 1163 при обработке давлением, что подтвердили и последующие эксперименты, результаты которых сравнили с данными моделирования. Таким образом, получена возможность осуществлять компьютерное моделирование процессов деформации на алюминиевом сплаве 1163. Подобную методику можно применять для разработки реологических моделей других материалов.

Заключения

Компьютерное моделирование нашло широкое применение в машиностроении. Оно позволяет воспроизводить различные операции обработки давлением, такие как

штамповка, прокатка, прессование. Расчеты проводятся с учетом свойств деформируемых материалов и оснастки, а также технологических параметров процессов деформации. Благодаря вычислениям в специальном программном комплексе представляется возможность оценивать технологичность той или иной схемы изготовления полуфабрикатов путем анализа таких данных, как деформация, усилия, диапазон температурных полей и др. При необходимости скорректировать технологический процесс и выбрать наиболее оптимальную схему изготовления полуфабриката компьютерное моделирование позволяет сократить затраты материала, экономические издержки, время на проведение испытаний и отработку технологий. Кроме того, базы реологических моделей специального программного комплекса можно пополнять за счет экспериментальных данных с помощью эмпирической модели Хензеля–Шпиттеля и расчетов по методу Левенберга–Марквардта. Компьютерное моделирование процессов обработки давлением в специальном программном комплексе является одним из приоритетных направлений в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Дуюнова В.А., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В. Долговечность поковок и штамповок из сплава ВТ6 для деталей газотурбинных двигателей и авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 23–35. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
2. Латушкин И.А., Яшин В.В., Суздальцев Е.А., Арышенский Е.В. Математическая модель расчета контактных напряжений при горячей прокатке полос из алюминиевых сплавов на пятиклетевом стане непрерывной прокатки // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 4 (81). С. 15–22. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-15-22.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Сторожев М.В., Попов А.Е. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
5. 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. № S. С. 52–57.
6. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Лукин В.И., Рыльников В.С. Высокотехнологичные полуфабрикаты жаропрочных припоев (ленты и пасты на органическом связующем) // *Труды ВИАМ*. 2013. № 9. С. 8–11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2026).
7. *Авиационные материалы: справочник в 9 т. / под общ ред. А.Т. Туманова*. М.: ОНТИ, 1989. Т. 3: Жаропрочные стали и сплавы. 566 с.
8. 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. № S. С. 129–141.
9. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // *Директор по маркетингу и сбыту*. 2017. № 5–6. С. 40–44.
10. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 141–147.
11. Цепин М.А., Бегнарский В.В., Лисунец Н.Л., Сеницын М.В., Ерохов М.А. Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением // *Цветные металлы*. 2007. № 5. С. 98–101.
12. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А., Биба Н.В., Шитиков А.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2019. 384 с.

13. Шпагин А.С., Баженов А.Р., Антипов К.В., Оглодкова Ю.С. Исследование реологических свойств деформируемого алюминий-литиевого сплава 1441 для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 3 (80). С. 37–46. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-37-46.
14. Стебунов С.А., Биба Н.В. Qform – программа, созданная для технологов // *Кузнечно-штамповочное производство*. 2004. № 9. С. 38–43.
15. Олимжонов Ж.О., Шербутаев Н.И., Татару А.С. Сравнительный анализ результатов моделирования процесса прокатки горячекатаного листового проката в среде QForm VX с техническими характеристиками ЛПК АО «Узметкомбинат» // *Литье и металлургия*. 2024. № 1. С. 55–59.
16. Аль-Кхузаи А.С.О., Широков В.В., Выдрин А.В. Определение диапазона изменения параметров напряженно-деформированного состояния металла при непрерывной прокатке труб // *Вестник ЮУрГУ. Сер.: Металлургия*. 2019. Т. 19. № 1. С. 74–79.
17. Радионова Л.В., Фаизов С.Р., Громов Д.В., Ермаков И.Н. Компьютерное моделирование температурных режимов при полунепрерывном прямом прессовании легкоплавких материалов // *Вестник ЮУрГУ. Сер.: Металлургия*. 2020. Т. 20. № 4. С. 30–38.
18. Тепин Н.В., Дьяконова Л.Ю., Тепина Н.Н. Компьютерное моделирование технологии штамповки детали «шестерня» // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2023. № 1 (50). С. 55–64.
19. Цепляев И.К. Исследование процесса холодной штамповки при различных режимах трения // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023. № 4. С. 354–356.
20. Шпагин А.С., Капитаненко Д.В., Моисеев Н.В., Баженов А.Р. Разработка технологии изготовления кольцевых заготовок из сплава ЭП648-ВИ методом изотермической штамповки на воздухе с использованием маломощных гидравлических прессов // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). С. 17–26. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-17-26.
21. Шпагин А.С., Баженов А.Р., Антипов К.В., Оглодкова Ю.С. Построение реологической модели деформируемого алюминиевого сплава 1163 для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением // *Труды ВИАМ*. 2024. № 10 (140). С. 24–33. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-24-33.

References

1. Duyunova V.A., Pavlova T.V., Kashapov O.S., Chuchman O.V. Fatigue strength of forgings from VT6 alloy for parts of gas turbine engines and aircrafts. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 23–35. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
2. Latushkin I.A., Yashin V.V., Suzdaltsev E.A., Aryshensky E.V. Mathematical model for calculating contact stresses during hot rolling of aluminum alloy strips on a five-ring continuous rolling mill. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 4 (81), pp. 15–22. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-15-22.
3. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Storozhev M.V., Popov A.E. *Theory of metal forming*. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 432 p.
5. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. High-temperature heat resisting nickel alloys for details of gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 52–57.
6. Afanasev-Hodykin A.N., Lukin V.I., Ryl'nikov V.S. High-tech semi-finished high-temperature solders (tape and paste on an organic binder). *Trudy VIAM*, 2013, no. 9, pp. 8–11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 16, 2026).
7. *Aviation materials: a reference book in 9 vols*. Ed. A. T. Tumanov. Moscow: ONTI, 1989, vol. 3: Heat-resistant steels and alloys, 566 p.

8. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Complex innovative technology of isothermal punching on air in mode of superplasticity of disks from superhot strength alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 129–141.
9. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft manufacturing and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
10. Ospennikova O.G., Bubnov M.V., Kapitanenko D.V. Computer modeling of metal working processes by pressure. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 141–147.
11. Tsepin M.A., Begnarsky V.V., Lisunets N.L., Sinitsyn M.V., Erokhov M.A. Use of specialized programs in the development of technological processes for metal forming. *Tsvetnye metally*, 2007, no. 5, pp. 98–101.
12. Vlasov A.V., Stebunov S.A., Evsyukov S.A., Biba N.V., Shitikov A.A. *Finite element modeling of technological processes of forging and die stamping*. Moscow: Publ. house of Bauman MSTU, 2019, 384 p.
13. Shpagin A.S., Bazhenov A.R., Antipov K.V., Oglodkova Yu.S. Study of rheological properties of aluminium-lithium alloy 1441 for computer modeling of metal forming processes. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 37–46. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-37-46.
14. Stebunov S.A., Biba N.V. Qform – a program created for technologists. *Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo*, 2004, no. 9, pp. 38–43.
15. Olimzhonov Zh.O., Sherbutaev N.I., Tataru A.S. Comparative analysis of the results of modeling the rolling process of hot-rolled sheet metal in the QForm VX environment with the technical characteristics of the rolling mill of JSC Uzmetskombinat. *Litye i metallurgiya*, 2024, no. 1, pp. 55–59.
16. Al-Khuzai A.S.O., Shirokov V.V., Vydrin A.V. Determination of the range of change in the parameters of the stress-strain state of metal during continuous rolling of pipes. *Vestnik YUURGU. Ser.: Metallurgiya*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 74–79.
17. Radionova L.V., Faizov S.R., Gromov D.V., Erdakov I.N. Computer Modeling of Temperature Regimes during Semi-Continuous Direct Pressing of Low-Metal Materials. *Vestnik YUURGU. Ser.: Metallurgiya*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 30–38.
18. Tepin N.V., Dyakonova L.Yu., Tepina N.N. Computer Modeling of Stamping Technology for the Gear Part. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema*, 2023, no. 1 (50), pp. 55–64.
19. Tseplyaev I.K. Study of the cold stamping process under various friction conditions. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2023, no. 4, pp. 354–356.
20. Shpagin A.S., Kapitanenko D.V., Moiseev N.V., Bazhenov A.R. Development of the technology for manufacturing ring blanks made of EP648-VI alloy by isothermal air forging using low-power hydraulic presses. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 17–26. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-17-26.
21. Shpagin A.S., Bazhenov A.R., Antipov K.V., Oglodkova Yu.S. Construction of a rheological model of deformable aluminum alloy 1163 for computer simulation of metal pressure processes. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), pp. 24–33. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 16, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-24-33.

Информация об авторах

Яшин Максим Сергеевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Капитаненко Денис Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мельникова Дарья Андреевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maksim S. Yashin, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis V. Kapitanenko, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Daria A. Melnikova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.05.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.06.2026.
The article was submitted 06.05.2026; approved and accepted for publication after reviewing 03.06.2026.