

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья
УДК 621.7, 004.9
DOI: 10.34759/vst-2022-1-226-244

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКИ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ПОМОЩИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Михаил Александрович Петров¹ ✉, Алексей Григорьевич Матвеев²,
Павел Александрович Петров³, Борис Юрьевич Сапрыкин⁴

^{1,2,3,4}Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹m.a.petrov@mospolytech.ru ✉

²a.g.matveev@mospolytech.ru

³p.a.petrov@mospolytech.ru

⁴b.yu.saprykin@mospolytech.ru

Аннотация. Рассмотрены процессы объёмной штамповки поковки «Шестерня коническая» из алюминиевого сплава, в которых применяется вращающийся верхний инструмент. Результаты моделирования сопоставлены с результатами стандартного процесса холодной объёмной штамповки (ХОШ). Было установлено, что традиционный процесс ХОШ требует оборудования, имеющего в несколько раз более высокую силу деформирования для практической реализации процесса, но требует меньше расчётного времени для численного анализа по методу конечных элементов (МКЭ). Кроме этого, применение вращающегося инструмента снижает его напряжённо-деформированное состояние (НДС), улучшает течение материала, но увеличивает его износ. В зависимости от процесса варьируется и точность поковки, а также требуется специальный подход при проектировании инструмента.

Ключевые слова: холодная объёмная штамповка, сферодвижная штамповка, инкрементальная штамповка, штамповка с кручением, расчёт штампов, АД35, численное моделирование, МКЭ, QForm

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ДНТ в рамках научного проекта № 19-58-45020 в рамках конкурса на лучшие научные проекты фундаментальных исследований, проводимого совместно РФФИ и Департаментом науки и технологии правительства Индии (Инд_а).

Для цитирования: Петров М.А., Матвеев А.Г., Петров П.А., Сапрыкин Б.Ю. Расчёт и анализ процессов объёмной штамповки с вращающимся инструментом при помощи конечно-элементного моделирования // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 226-244. DOI: 10.34759/vst-2022-1-226-244

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCE

Original article

COMPUTATION AND ANALYZING BULK FORMING PROCESSES WITH A ROTATING TOOL USING FE SIMULATION

Mikhail A. Petrov¹ ✉, Alexey G. Matveev², Pavel A. Petrov³, Boris Y. Saprykin⁴

^{1,2,3,4}Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

¹m.a.petrov@mospolytech.ru ✉

²a.g.matveev@mospolytech.ru

³p.a.petrov@mospolytech.ru

⁴b.yu.saprykin@mospolytech.ru

Abstract

Materials forming or forging is being complicated with their development. This complexity concerns the movements that need to be performed by the output link of the machine (press or hammer). Besides the purely translational movement, which was characteristic to the first hammers, as well as the purely rotary movement, which dates back to the time of the first rolling mills (XIX century), forming machines of the early XX century were able to combine translational and rotary movements. This is how the processes of spherical or orbital forming, based on incremental or sector approach, allowing producing the parts of hub and flanges type without the need to employ the equipment of high deforming force, appear. On the other hand, the development of heavy machinery and control systems allows creating presses with mechanical and hydraulic systems that form one or more output links, to apply servo control as well as schemes from robotics and create flexible forming systems. The material flow can be improved by increasing the total deforming volume per time step or the intensity of deformation, for example, by torsion with forging.

As the article shows by the finite element (FE) simulation in the QForm of the “bevel pinion” forging without teeth working out, rotating tools allow

- Reducing peak deformation force,
- Creating in material media the required thermal characteristic for the material propitious flow;
- Obtaining the shape with specified contour offset from the required geometry;
- Reducing the stress-strain state and tool' wear.

The 3D geometry of both the tool and the workpiece, boundary conditions setting, corresponding to the technological conditions of process and non-linear characteristic describing of the material hardening in the process of its deforming are being required for numerical simulation. The computations duration depends upon the basic computing duration and duration of the problems being additionally solved, such as simulation of the stress-strain state of the forming tools. In other words, numerical simulation by the finite element method depends on the number of equations of the system being solved in the mesh points, which number is being determined depending on the degrees of freedom, characterizing the actuator movement, as well as rheological description of materials.

Funding: the work was supported by the RFBR and DST in the framework of scientific project No. 19-58-45020, as part of the calls for the best scientific proposals of fundamental research, conducted jointly by the RFBR and the Department of Science and Technology of the Government of India (Ind_a)

Keywords: cold massive forming, orbital forming, incremental forming, forming with torsion, forging tools design, AW-6082, numerical modeling, FEA, QForm

For citation: Petrov M.A., Matveev A.G., Petrov P.A., Saprykin B.Y. Computation and analyzing bulk forming processes with a rotating tool using FE simulation. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 226-244. DOI: 10.34759/vst-2022-1-226-244

Введение

Процессы обработки материалов давлением (ОМД) непрерывно изучаются и улучшаются; процент усовершенствований, основанных на результатах компьютерного моделирования в последние двадцать лет неуклонно растёт. Во-первых, это связано с развитием компьютерной техники и (специализированного) программного обеспечения; во-вторых, это вызвано сменой достижений в развитии технологий, которые человек мог видеть и разумно изменять, на те достижения, которые неподвластны оптическому восприятию человека и измерительным системам. Можно сказать, что накопленный опыт описания материалов и технологий позволяет проводить предсказательное моделирование и на его результатах получать новые технологические процессы.

Применение вращающегося инструмента

На протяжении последних пятидесяти лет проводилось совершенствование технологий штамповки с применением вращающихся инструментов. В самых первых исследованиях, относящихся к 1918 г., Е.Е. Сликом была разработана система с вращающимся верхним инструментом на основе прокатного стана, верхний валок которого был установлен под углом $10,7^\circ$, для изготовления железнодорожных колёс [1]. Уже тогда сложилось понимание того, что для штамповки больших поковок необходимо сегментирован-

ное или инкрементальное приложение силы с образованием локального очага деформации, который перемещается за счёт вращения относительно оси вращения заготовки. В работе [2] рассматривается экспериментальная лабораторная установка с верхним приводом для деформирования свинцовых цилиндрических образцов с $H/D \leq 1$. Было подчёркнуто существенное снижение осевой силы деформирования по сравнению с традиционным процессом осадки цилиндрической заготовки почти в два раза. В представленной там же переписке между представителями компаний и научных учреждений из разных стран, проводившими похожие исследования, и авторами [2] были показаны работы, выполненные компанией B. & S. Massey Ltd на основании патента 1929 г. [3], образцы стальных поковок, полученные в холодном, тёплом и горячем состояниях исходных заготовок в 1964 г. на оборудовании Rotaform вертикального исполнения с номинальной силой 0,7 МН.

Полученные в результате операций поковки (рис. 1) можно разделить на четыре группы: цапфы и стаканы с фланцем (А–Г, Е, Ж), с наружным буртом (З), с внутренним буртом (И, К) и комбинированные (Д). Все они являются осесимметричными. Проф. А.Д. Томлёнов рассматривал оборудование с вращающимся инструментом для штамповки как разновидность прокатного оборудования, обладающего максимальной эффективностью с точки зрения производительности.

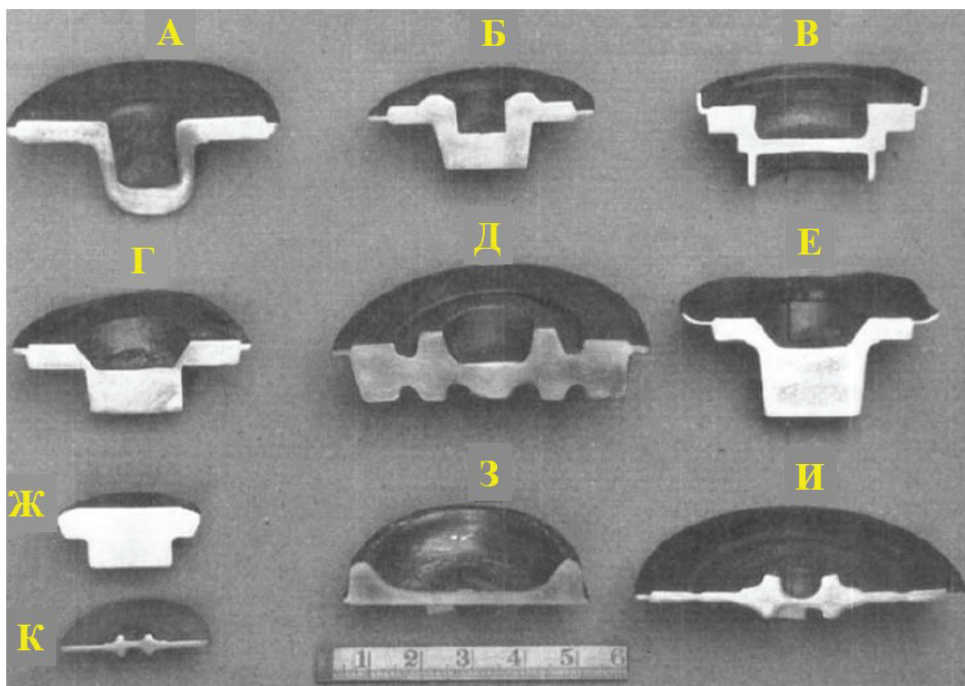


Рис. 1. Поковки, полученные компанией B. & S. Massey Ltd

Однако в оборудовании Massey инструменты не обладали возможностью вращения относительно собственных осей.

В период с 1967 по 1970 г. выходят патенты и работы З. Марчиньяка (Варшавский университет), в которых рассматривался механизм вращения верхнего инструмента относительно своей оси [4, 5], что позволяло выполнять сложные перемещения пуансона, по заданной траектории. Первый пресс PXW 100 обладал номинальной силой 1 МН. После 1982 г. начали изготавливать прессы PXW 200 с номинальной силой 2 МН и большим рабочим пространством.

До 1984 г. было изготовлено 250 таких прессов, имевших широкое хождение по миру. В 1976 г. компанией «Schmidt AG» (с 1999 г. принадлежит компании «Feintool AG») были приобретены права на пресс PXW 100. Компания расширила со временем линейку прессов [6]. Некоторые компании, например японская «Naito-Tekko-Sho Co.», модернизировали оборудование под компактирование порошков медных сплавов и тугоплавких металлов с целью изготовления подшипников скольжения и режущих пластин соответственно, приобретя лицензию на PXW 100. Существующая с 1992 г. японская компания «Mori Iron Works Co.» изготовила большой гидравлический пресс для сферодвижной штамповки с номинальной силой 6,5 МН и мощностью 265 кВт (рис. 2, а), которых достаточно для изготовления деталей диаметром до 240 мм (рис. 2, б) [7, 8]. Основными преимуществами сферодвижной штамповки (СДШ) являются: возможность штамповать большие осесимметричные детали с минимальной

силой деформирования, возможность получать сложные и тонкостенные поковки.

Несмотря на то, что технология СДШ широко исследовалась и создавались проекты разных вариантов оборудования [9–11], были и существенные недостатки, не позволявшие внедрять данную технологию далее мелкосерийного производства. Причины снижения интереса к процессу следующие: сложность в описании механизма деформации и изменения микроструктуры, низкая производительность оборудования для серийного и крупносерийного производств, а также низкая стойкость инструмента. На рис. 3 показаны принципиальные схемы сферодвижной штамповки [11]. Тем не менее, сложная траектория перемещения инструмента может быть использована для изготовления несимметричных деталей, например штамповки корпусов смартфонов из листовой алюминиевой заготовки [12] или рулевых реек автомобилей из объёмной стальной заготовки [13].

Компьютерное моделирование вдохнуло новую жизнь в процессы сферодвижной штамповки [14–17]. Напряжённо-деформированное состояние материала при разных схемах деформирования и течение материала стали более понятными благодаря визуализируемым полям напряжений и деформаций, а также возможности трассирования материальных точек заготовки.

С 1975 г. начались разработки прессы для штамповки с кручением (ШК) под руководством учёных из втуза при ЗиЛе [18–21]. Благодаря большим возможностям завода ЗиЛ, а также готовности ряда других предприятий, таких как ТМП (Воронеж), были реализованы прессы для



а)



б)

Рис. 2. Пресс для сферодвижной штамповки с сервоуправлением (а) и поковки, получаемые на нём (б)

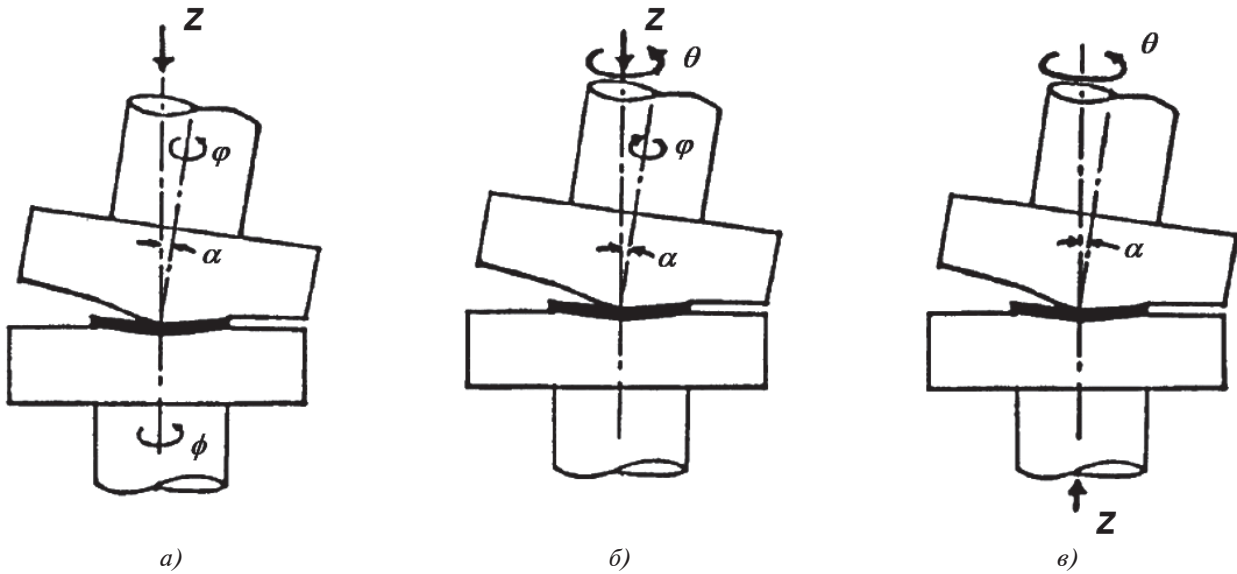


Рис. 3. Схемы привода исполнительного механизма для СДШ: а — три степени свободы, трансляционная сверху, ротационные сверху и снизу; б — три степени свободы сверху: две ротационные и одна трансляционная; в — две степени свободы, трансляционная снизу и ротационная сверху

штамповки с кручением по механической, гидравлической, фрикционной и винтовой схемам.

Было проведено численное моделирование процесса и результаты сопоставлены с результатами экспериментов для стальных, медных, алюминиевых и титановых образцов [22, 23]. Также были изготовлены поковки реальных изделий типа воронок, фланцев, фрез, заготовок под ротационное выдавливание и штамповку с улучшенной микроструктурой [24—27]. Особенностью процесса является некое среднее положение между процессами классической и сферодвижной штамповки. Проектирование инструментов соответствует классической схеме, а главный привод может быть оформлен по одной из трёх схем (рис. 4).

С активным внедрением сервоприводов появляется возможность улучшить контроль и за процессом штамповки, причём законы перемещения выходного звена могут иметь вид не только вид периодической функции, с учётом трансляционных движений, в форме гармонического колебания, но и в любой другой заданной форме, с учётом трансляционных и вращательных движений. На этом принципе построен концептуальный пресс с шестью степенями свободы, основанный на гексаподном принципе, роботизированные сервосистемы с параллельной кинематикой на гидравлических линейных актюаторах, в котором, как и в случае сферодвижной штамповки, недостатком является сложность

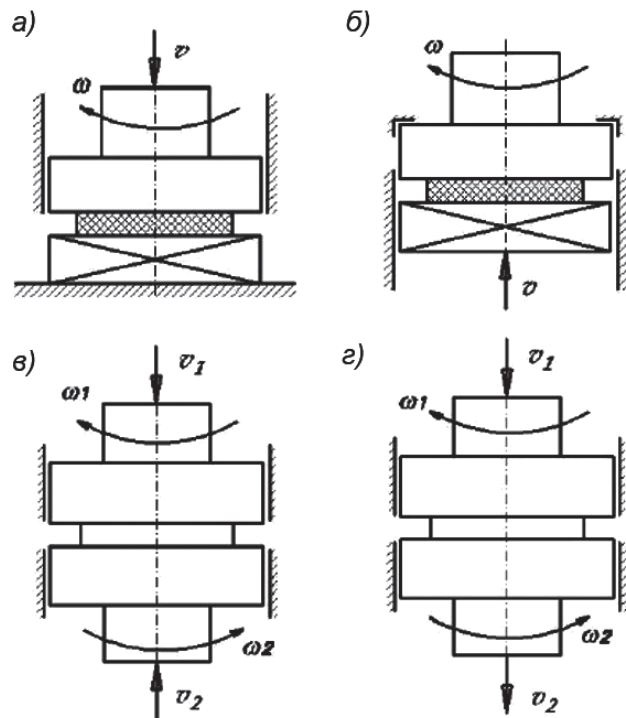


Рис. 4. Схемы привода исполнительного механизма для ШК: две степени свободы, трансляционная и ротационная сверху (а); две степени свободы, трансляционная снизу и ротационная сверху (б); четыре степени свободы, трансляционные разнонаправленные сверху и снизу, ротационные противоположно направленные сверху и снизу (в); трансляционные сонаправленные сверху и снизу, ротационные противоположно направленные сверху и снизу (г)

проектирования инструмента [28–30]. На рис. 5 представлены варианты исполнений оборудования с вращающимися инструментами.

Одним из важных технологических параметров, влияющим на течение материала заготовки, в условиях пластической деформации, помимо явных отличий, связанных с приводом исполнительного механизма, является трение. В общей

формулировке постулат можно сформулировать следующим образом: при одинаковой температуре заготовки увеличение силы трения приводит к торможению течения материала. При неравномерном распределении силы трения искажение формы образца в сечении и, как следствие, по всему объёму, будет неодинаковым [31]. Кроме этого, сама шероховатость поверхности образца влияет в большей степени на силу деформирования с уменьшением самого образца [32]. Этот факт имеет особую важность для процессов микроштамповки, которые также исследуются и для области СДШ [33].

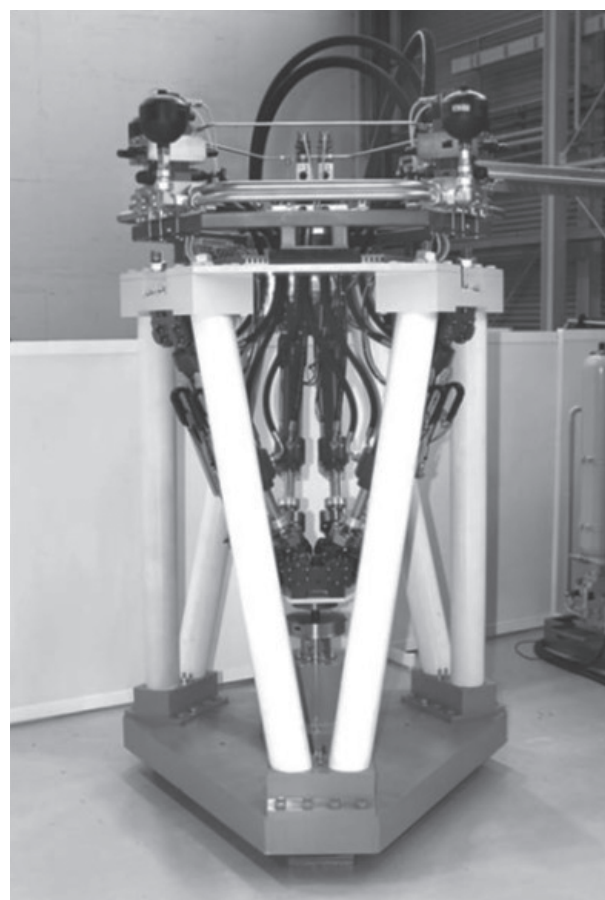
Применение компьютерного моделирования при разработке производственных процессов для авиакосмической отрасли весьма перспективно. В ряде работ рассматриваются задачи листовой и объёмной штамповки, определяется взаимосвязь механических характеристик материалов с практическим результатом, определяются свойства, которые проявляются при нахождении в



а)



б)



в)

Рис. 5. Машины с вращающимся инструментом: а — пресс для СДШ Т-300 по схеме РХВ 100 [6]; б — пресс для ШК на базе гидравлического пресса, модель ДБ2432А [23]; в — формообразующая машина с гибким приводом [28]

определённых условиях окружающей среды летательного (ЛА) или космического (КА) аппаратов [34—38].

Производственные процессы, реализованные на оборудовании с вращающимся инструментом, рассмотренным выше, могут быть применены для изготовления осесимметричных деталей, например дисков турбин [39—41], дисков колёс шасси [41], и несимметричных корпусных деталей коробчатой формы. В качестве материалов, в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик деталей, могут быть выбраны алюминиевые (АД1, АД35, АМг6), медные и титановые сплавы (ВТ6, ВТ20, ОТ4-1), а также композиции на основе дискретных гранульных или порошковых материалов, так как в условиях возникновения больших сдвиговых напряжений и, соответственно, интенсивной пластической деформации наблюдается эффект «кузнечной сварки» с образованием сплошного объёма, уменьшение пористости или несплошности материала.

Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование проводилось в программе QForm 9, работающей на методе конечных элементов (МКЭ). Особенностью программы является алгоритм автоматического самосгущения сетки конечных элементов (КЭ), уменьшающий размер КЭ с уменьшением области контакта материала заготовки с инструментом. Моделировались и сравнивались три процесса (рис. 6): холодная объёмная штамповка (ХОШ), сферод-

вижная штамповка (СДШ) и штамповка с кручением (ШК). Сравнение результатов моделирования проводилось для поковки «Шестерня коническая», без проработки зубьев (рис. 7,а), выполненной из алюминиевого сплава АД35 ($E = 75$ ГПа, $\eta = 0,33$, $\sigma_T = \sigma_T(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$). Также анализировалось напряжённо-деформированное состояние материала инструментов. На рис. 7,б показаны 3D-модели инструментов. Видно, что для случая СДШ верхнее и нижнее кольца были объединены вместе, а пуансон имеет вид конуса, наклонённого к центральной оси на угол γ , принятый равным 5° и 10° .

На практике угол наклона γ варьируется в диапазоне $2^\circ \dots 12^\circ$. Материал инструментов – сталь 4Х5МФС ($E = 210$ ГПа, $\eta = 0,3$, $\sigma_S = 1\ 650$ МПа).

При одном и том же объёме материала исходной заготовки её высота и, соответственно, диаметр, различались: $H = 110$ мм и $D = 110$ мм (для ХОШ и ШК), $H = 58$ мм и $D = 150$ мм (для СДШ). Условия трения задавались одинаковыми для всех контактных поверхностей между инструментом и заготовкой в виде закона трения Леванова с параметрами, значения которых указаны в табл. 1. Деформирование заготовок осуществлялось в холодном состоянии при $T = 20^\circ\text{C}$. Предусмотрены две оси вращения: центральная ось, перпендикулярная плоскости разреза (ось 1) и наклонная ось, наклонённая к центральной оси на угол γ (ось 2). В СДШ определяется вращение

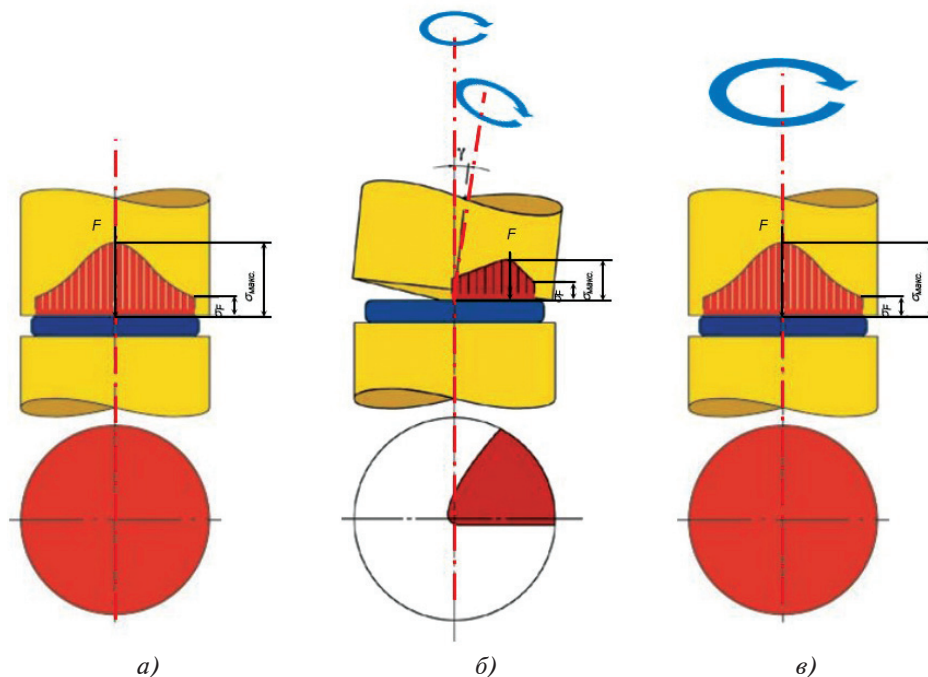


Рис. 6. Схемы моделируемых процессов: а — ХОШ; б — СДШ; в — ШК

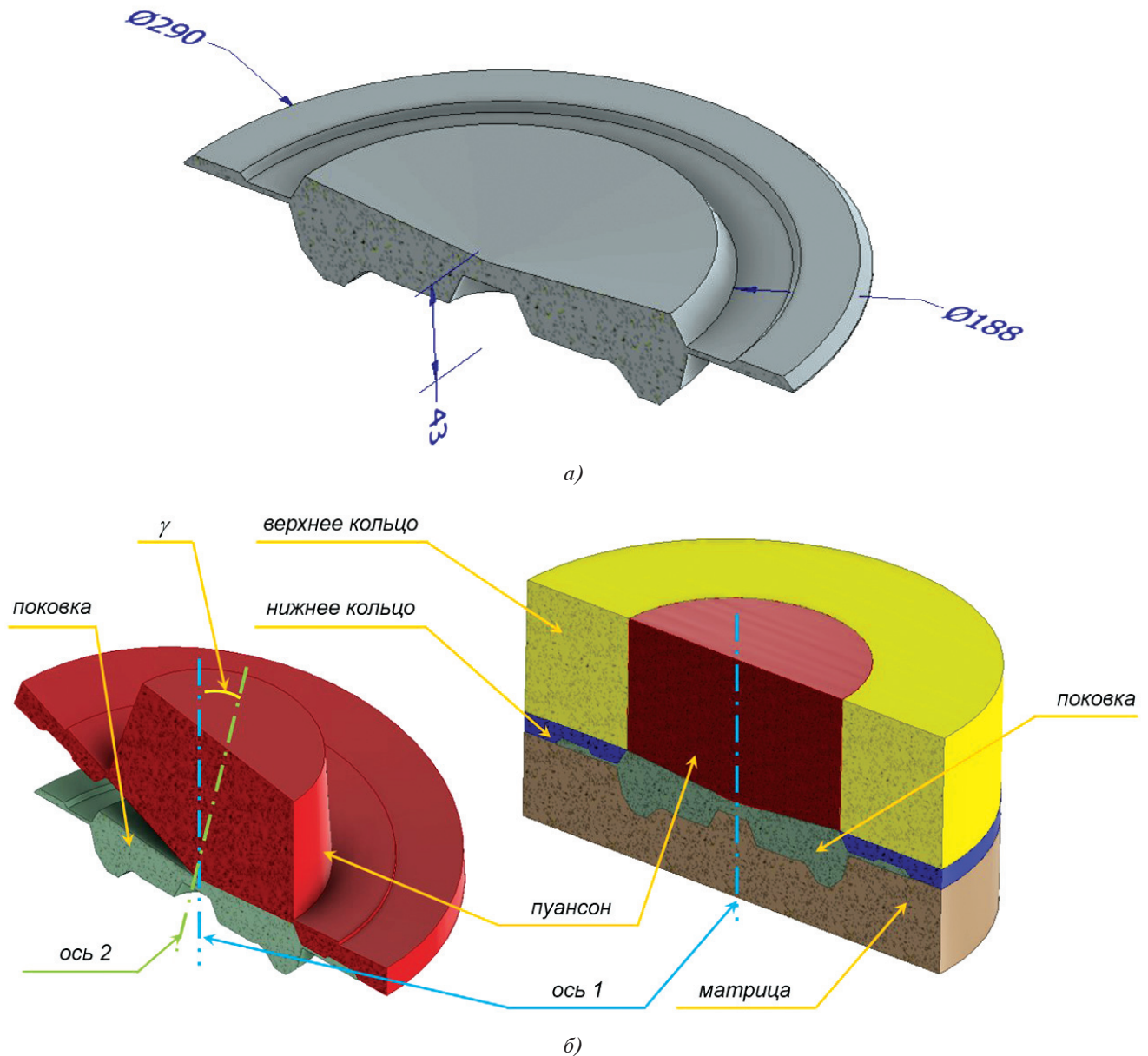


Рис. 7. Поковка конической шестерни с облоем (а) и инструмент для моделирования (б)

Таблица 1

Значения параметров по закону трения Леванова

Параметр/ Коэффициент	Фактор трения (ФТ), [-]	Коэффициент Леванова (КЛ), [-]	Коэффициент теплопередачи, [Вт/м²К]	Коэффициент паузы (КП), [-]
Значение	0,15	1,25	75 000	0,05

Таблица 2

Параметры технологического оборудования

Вариант задачи	I	II/III	IV
Скорость деформирования, мм/с	1	8	1
Кол-во оборотов, мин ⁻¹	0	120/120	30

относительно осей 1 и 2, а в ШК – относительно оси 1. Технологические параметры оборудования представлены в табл. 2. Для простоты обсуждения результатов введено следующее обозначение задач: ХОШ – вариант I; СДШ – вариант II ($\gamma = 5^\circ$) и вариант III

Таблица 3

Конфигурации расчётных ПК

Расчётная система 1 (ПК_1)	Расчётная система 2 (ПК_2)
Тип: настольный ПК (desktop) ОС: Windows 10 Pro Процессор: Intel Core i7-9700KF 3,6 ГГц (8 ядер, 8 потоков) Графическая карта: NVidia GeForce RTX 2060 Super (дискретная) ОЗУ (RAM, DDR4), ГБ: 64 Объём жёсткого диска, ТБ: 0,3 + 2 Тип жёсткого диска: SSD + HDD	Тип: настольный ПК (desktop) ОС: Windows 10 Pro Процессор: Intel Core i5-10400T 2,0 ГГц (6 ядер, 12 потоков) Графическая карта: Intel UHD 630 (интегрированная) и NVidia Quadro P620 (дискретная) ОЗУ (RAM, DDR4), ГБ: 8 Объём жёсткого диска, ТБ: 1 Тип жёсткого диска: SSD

($\gamma = 10^\circ$); ШК – вариант IV. В табл. 3 показаны конфигурации расчётных систем на базе стационарных персональных компьютеров, на которых производились расчёты.

Обсуждение результатов

Моделирование процесса

По результатам численного моделирования получены графики сила деформирования – перемещение пуансона (рис. 8). Установлено, что для варианта I сила деформирования в 2 раза выше по сравнению с вариантом IV и в ~8 раз по

сравнению с вариантами II и III. Максимальная сила соответствовала следующим значениям: вариант I – ~40 МН (график 1); вариант II/III – ~3,5 МН (график 3 и 4 соответственно); вариант IV – ~20 МН (график 2). Графики для вариантов II/III имеют вид возрастающей колебательной функции, для которой необходимо выполнить аппроксимацию, например, полиномами пятой степени (вида $y = Ax^5 + Bx^4 + Cx^3 + Dx^2 + Ex + F$), для которых в табл. 4 представлены коэффициенты аппроксимации (рис. 8, в). Рост и падение силы на коротких интервалах носят повторяю-

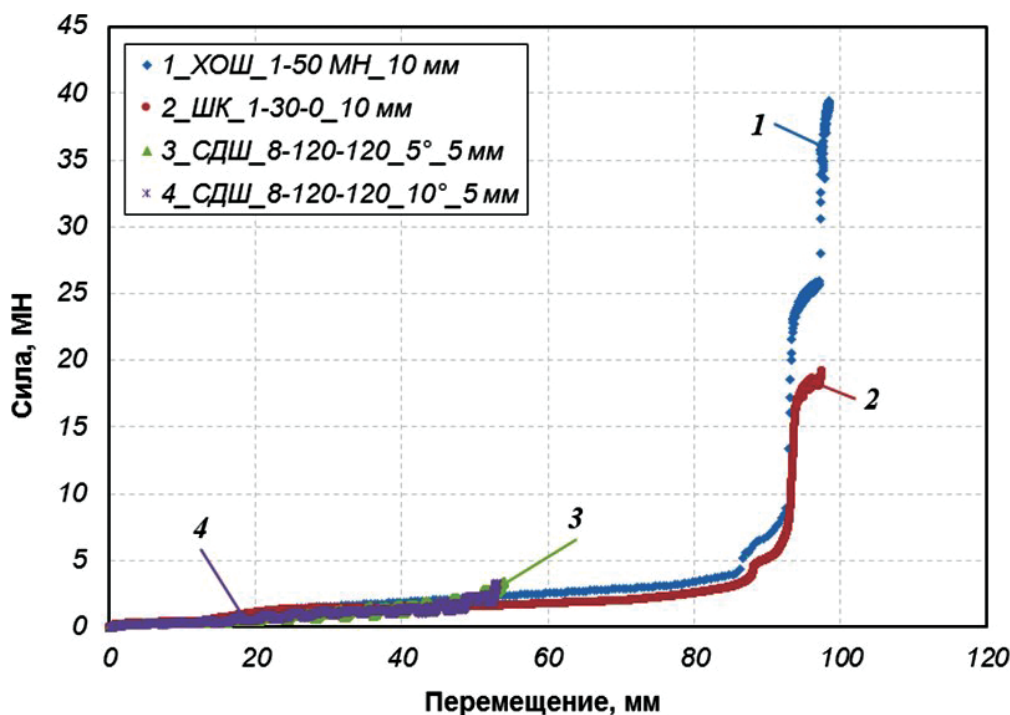
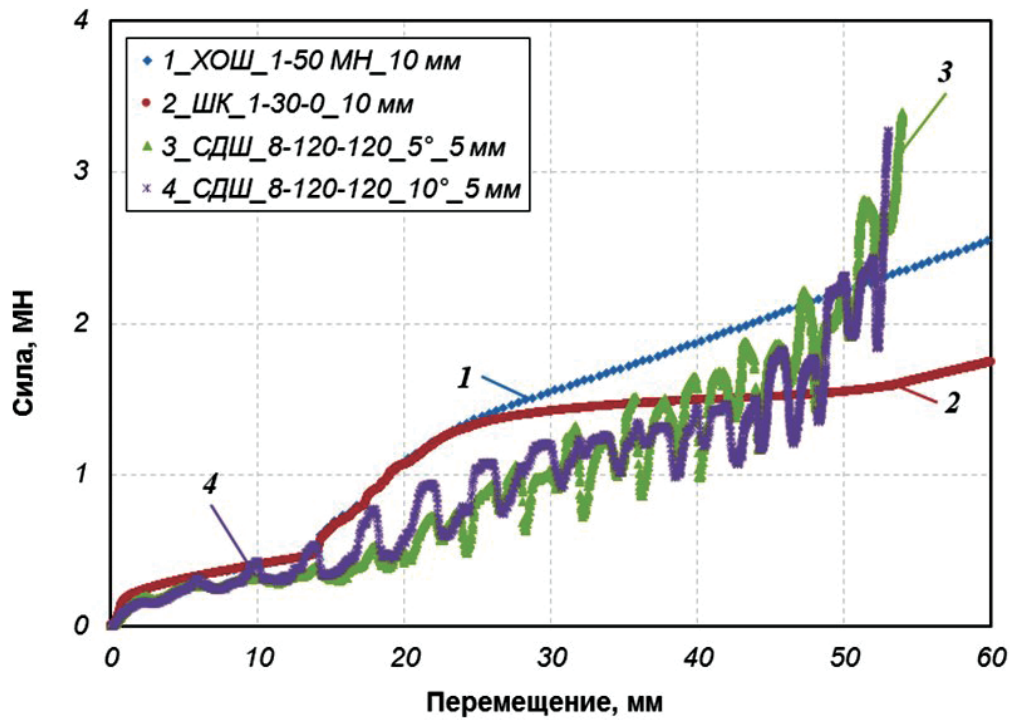
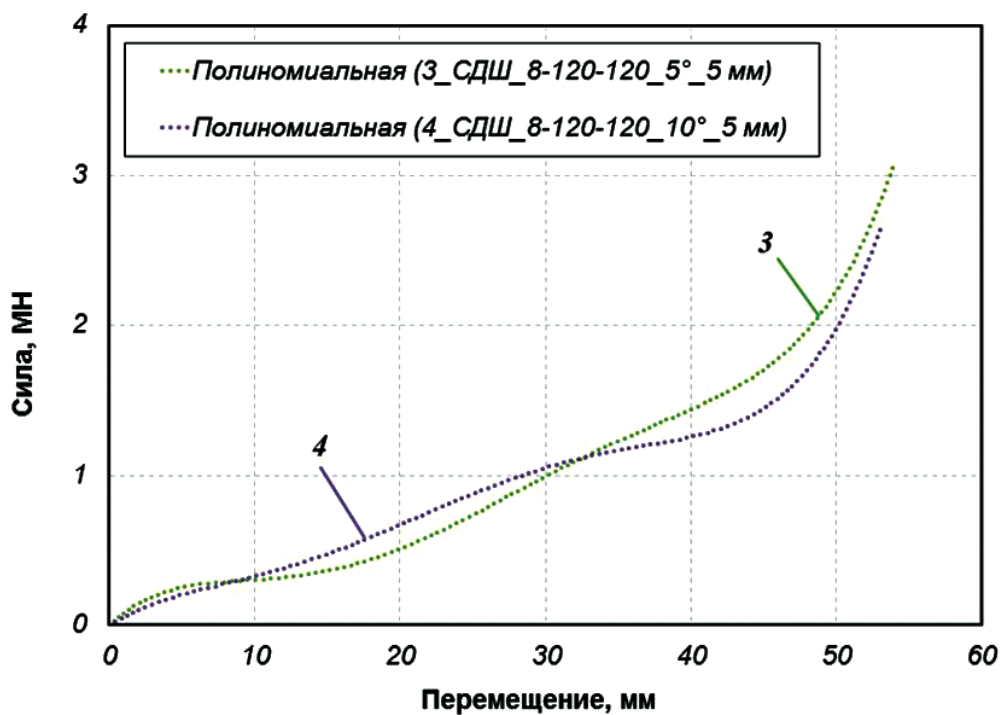


Рис. 8 (начало)



б)



в)

Рис. 8. Графики «сила-перемещение»: общий вид (а), увеличенная область силы деформирования (б) и аппроксимация графиков для вариантов II/III (в)

щийся характер с периодом $T \sim 250$ мс. Это объясняется проскальзыванием заготовки и её вращением с верхним инструментом. Проскальзывание и вращение заготовки уменьшается по мере увеличения площади контактной поверхно-

сти с инструментом. На рис. 9 и 10 представлены геометрии поковок. Видно, что в варианте IV оформлена центральная часть, а облой (удаляемая фланцевая часть) имеет больший диаметр по сравнению с вариантом I. Поковки по вариантам

Таблица 4

Значения коэффициентов аппроксимации

Коэффициент	A	B	C	D	E	F
Значение	для СДШ и $\gamma=5^\circ$					
	10^{-7}	-10^{-5}	$6 \cdot 10^{-4}$	$-112 \cdot 10^{-4}$	$924 \cdot 10^{-4}$	0
	для СДШ и $\gamma=10^\circ$					
	10^{-7}	-10^{-5}	$4 \cdot 10^{-4}$	$-59 \cdot 10^{-4}$	$617 \cdot 10^{-4}$	0

II/III имеют неполное оформление в нижней центральной части и неравномерный облой по периметру поковки, что связано с интенсивным проскальзыванием.

На рис. 11 показано искажение линий, связанных с материальными точками поковки (Лагранжева система координат). Видно, что наиболее равномерно проекции углов закручивания (ПУЗ) распределены в варианте IV, что указывает на небольшое проскальзывание заготовки в про-

цессе деформирования и равномерную проработку материала по всему объёму.

Диапазон изменения ПУЗ для варианта IV находится в пределах $25^\circ \dots 45^\circ$, а для вариантов II и III он составляет $0^\circ \dots 45^\circ$. Для варианта I поворот линий относительно вертикальной оси не наблюдается. Проскальзывание в случае варианта II меньше, так как передаваемая от пуансона сила P больше, чем в варианте III ($P_{II} = P \cos(5^\circ) > P_{III} = P \cos(10^\circ)$). Показанное на рис. 12 распределение температуры указывает на то, что наи-

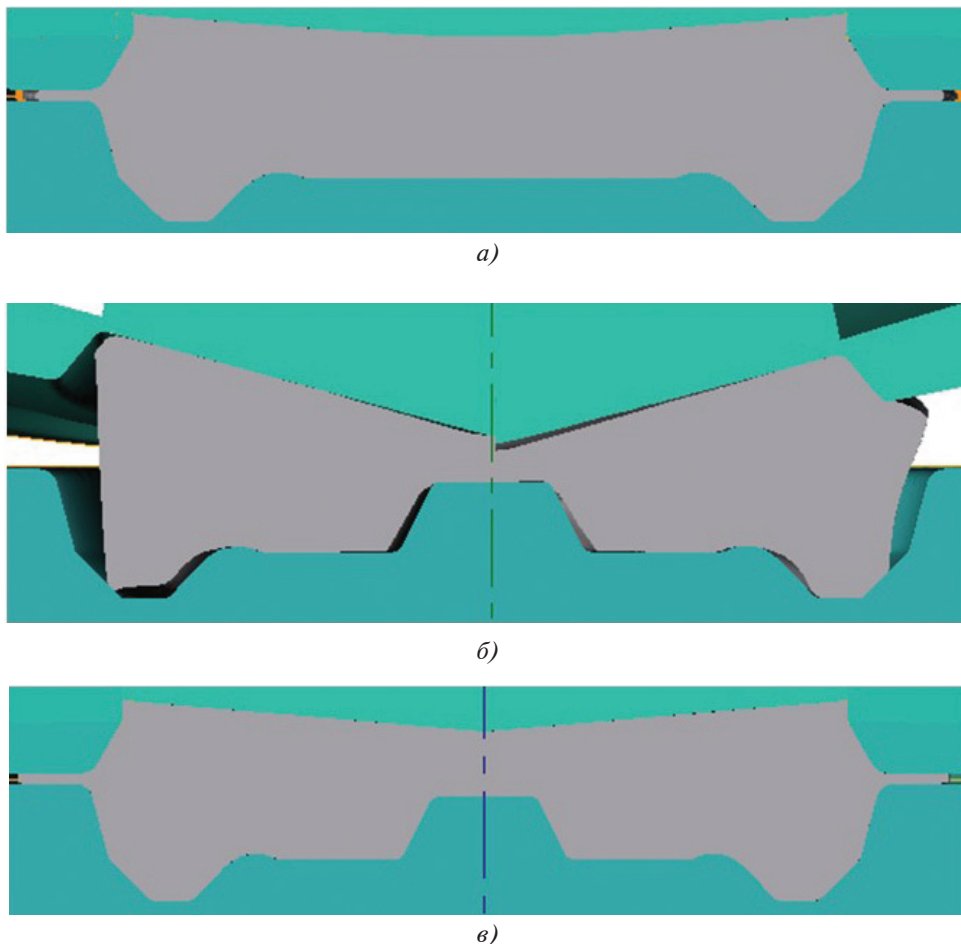


Рис. 9. Сравнение геометрии поковки (в сечении): а — вариант I; б — вариант II, $\gamma = 5^\circ$ (справа) и вариант III $\gamma = 10^\circ$ (слева); в — вариант IV

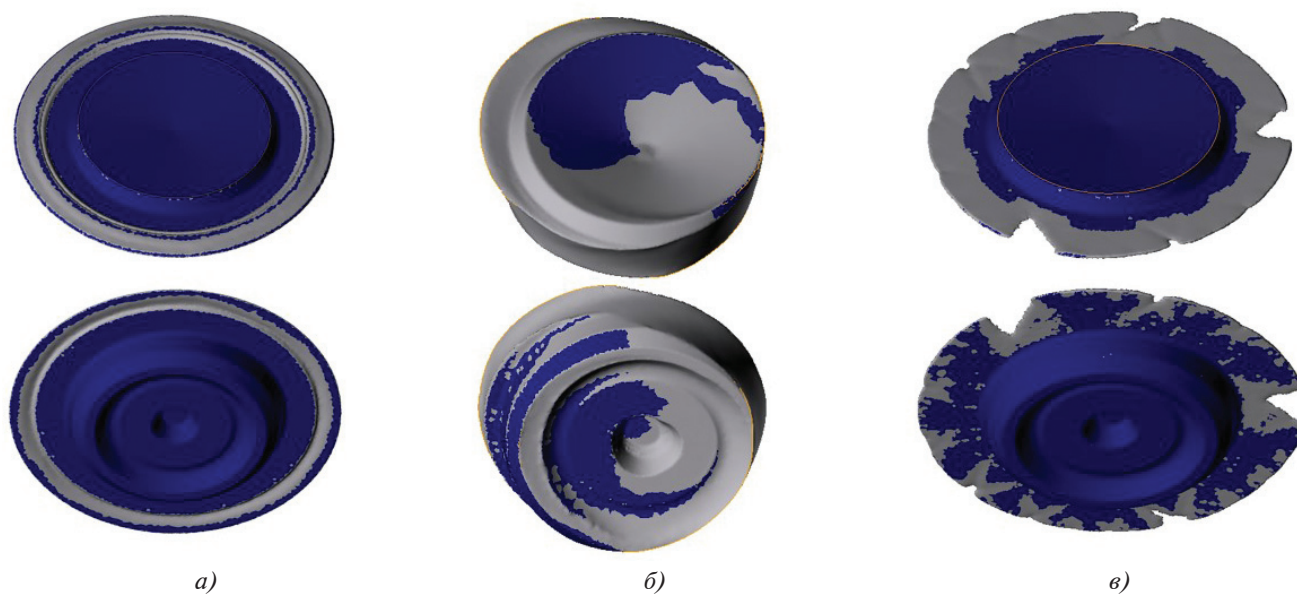


Рис. 10. Сравнение геометрии поковки (синим показаны области контакта пуансона с материалом поковки): *a* — вариант I; *б* — вариант II; *в* — вариант IV

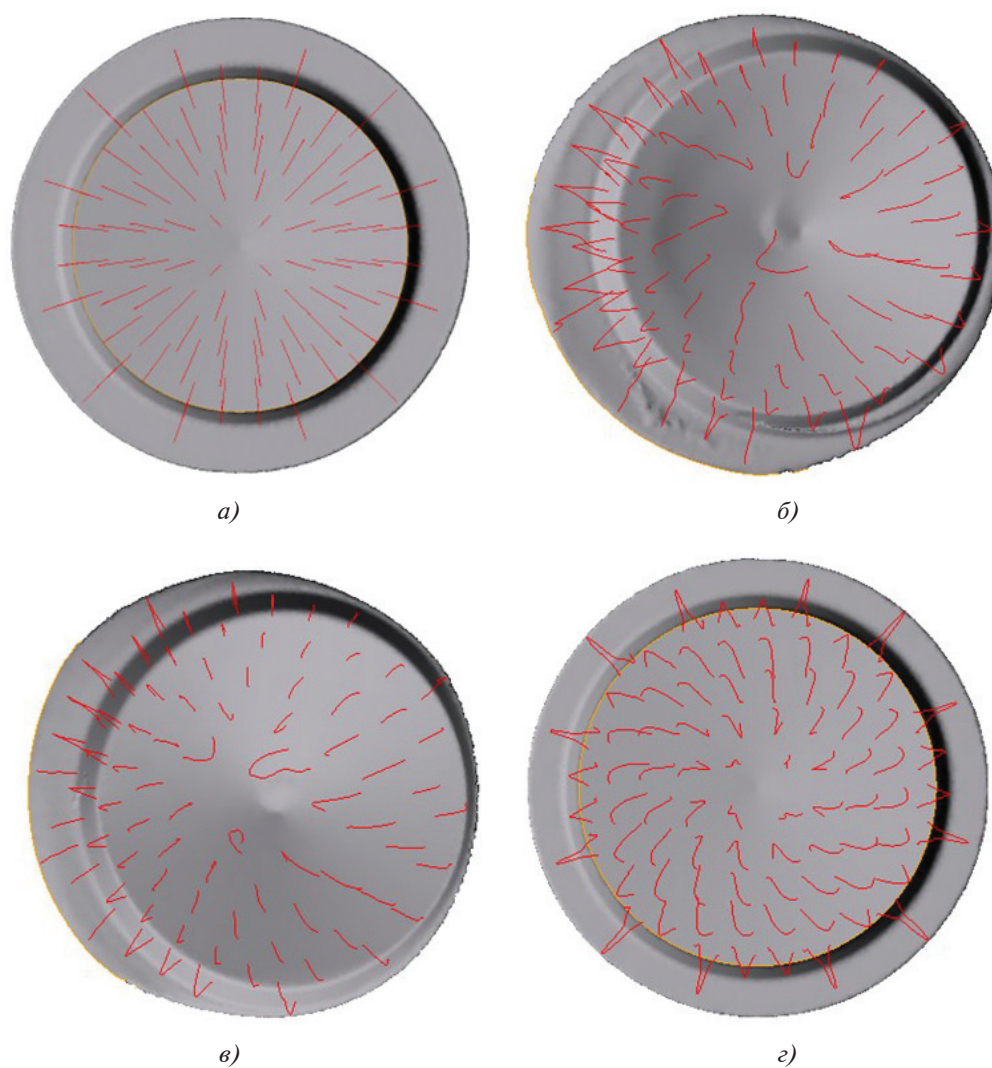


Рис. 11. Линии течения материала и вид геометрии с облоем (вид сверху): *a* — вариант I; *б* — вариант II; *в* — вариант III; *г* — вариант IV

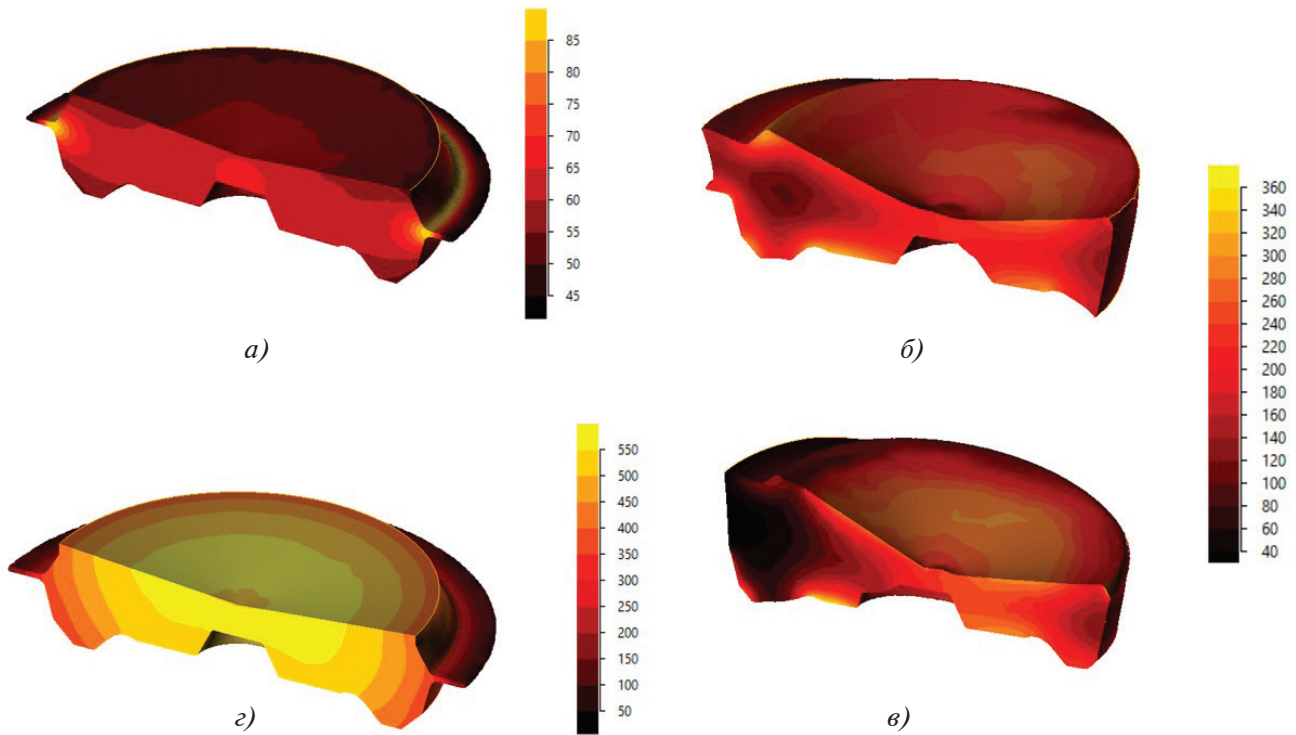


Рис. 12. Поля изменения температуры в конце процесса деформирования: *а* — вариант I; *б* — вариант II; *в* — вариант III; *г* — вариант IV

больший разогрев материала происходит по варианту IV, а наименьший — по вариантам II/III.

Расчёт инструментов

На рис. 13–15 представлены результаты моделирования инструментов в конце процесса

деформирования. Для проверки НДС инструментов расчёты проводились для совместной деформации по упрощённой модели (раздельной), при которой решатель определяет прогиб заготовки, а после этого добавляет необходимую величину

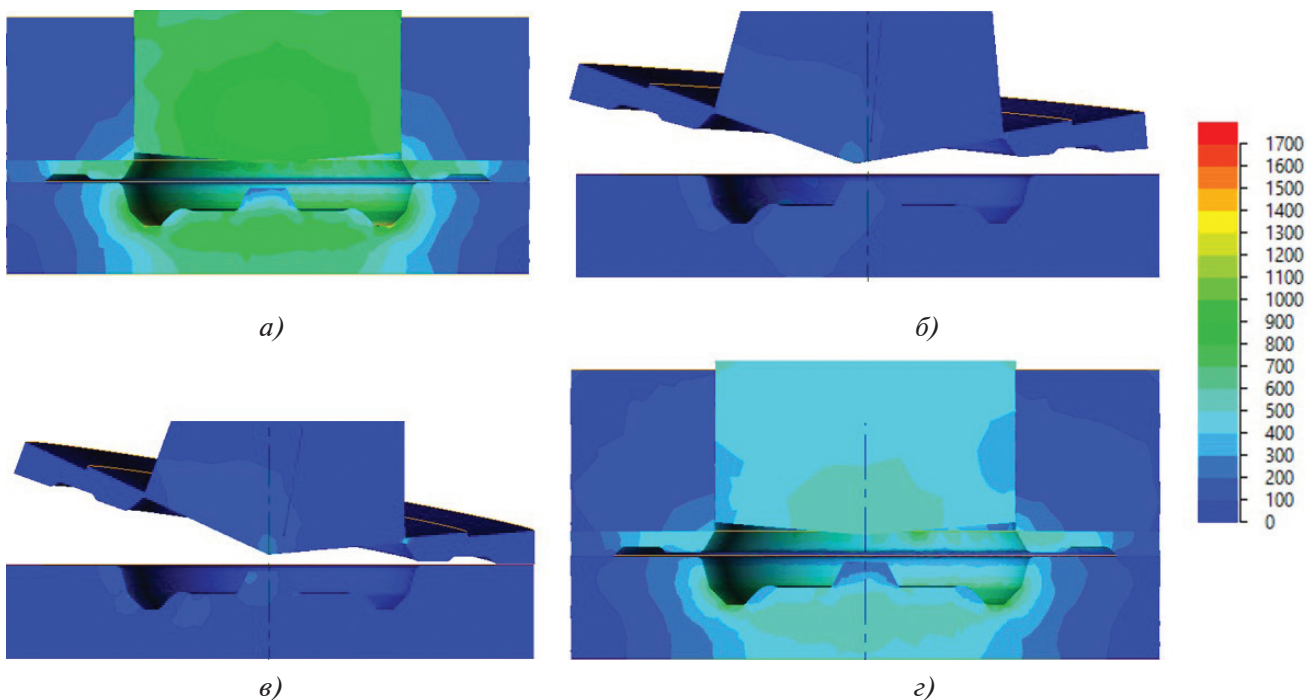


Рис. 13. Поля изменения интенсивности напряжений: *а* — вариант I; *б* — вариант II; *в* — вариант III; *г* — вариант IV

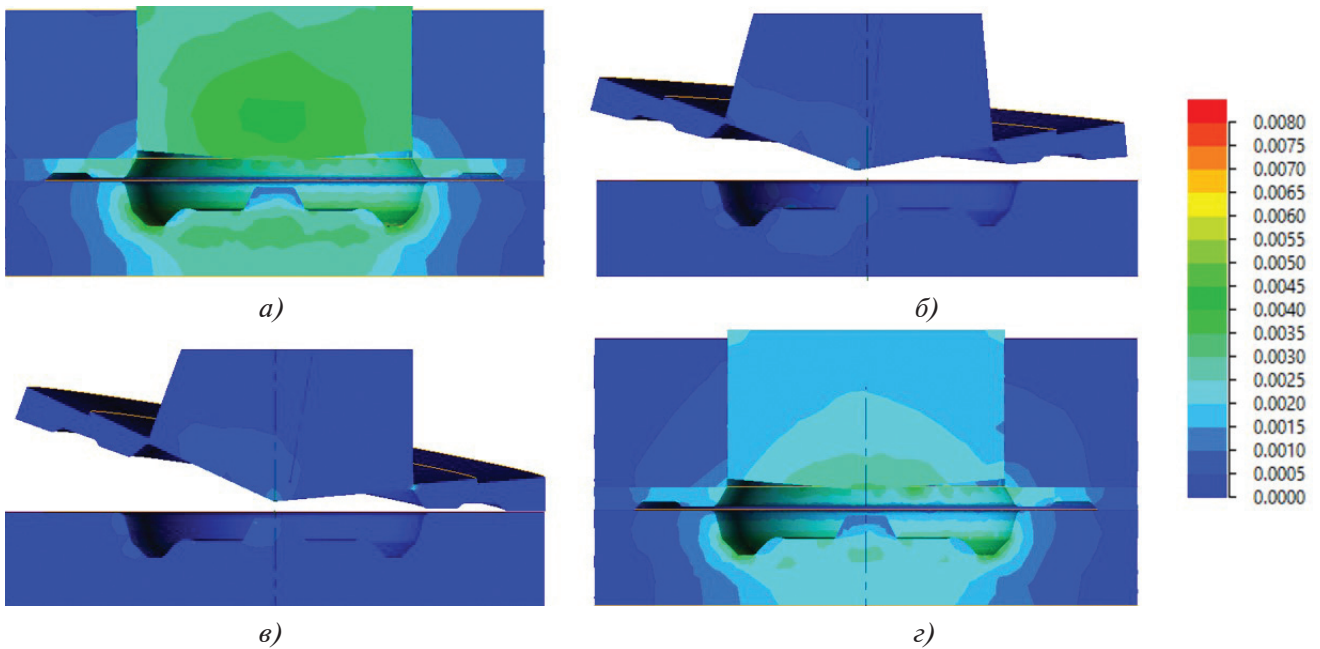


Рис. 14. Поля изменения упругой деформации: *a* — вариант I; *b* — вариант II; *v* — вариант III; *z* — вариант IV

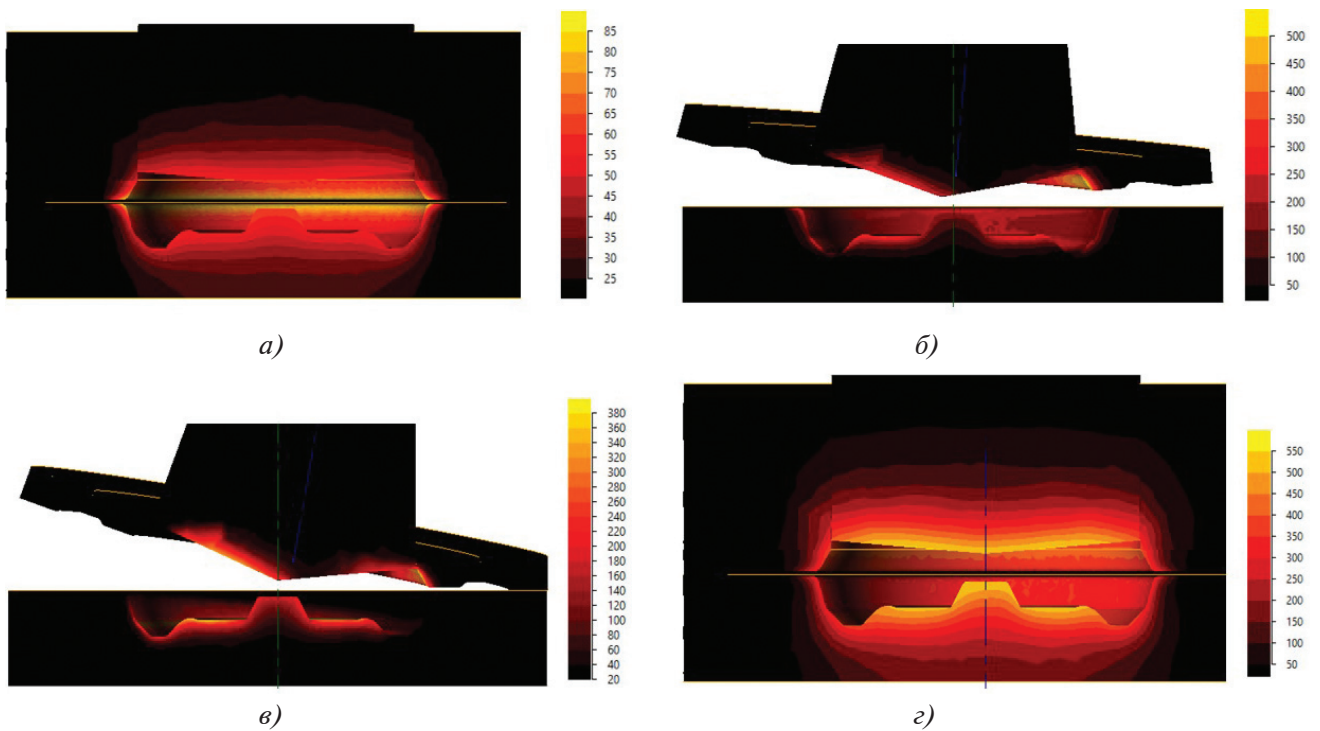


Рис. 15. Поля изменения температуры: *a* — вариант I; *b* — вариант II; *v* — вариант III; *z* — вариант IV

прогиба инструменту, с учётом жёсткости инструмента.

Для удобства сравнения результатов по полям интенсивности напряжений и упругой деформации цветные шкалы легенды были даны для одного интервала для каждой из четырёх задач. Интенсивность напряжений и, соответственно, упругая деформация варианта I в более чем в пять раз превышают аналогичные значения вариантов II/III. Для варианта IV аналогичное сравнение с

вариантами II/III показывает увеличение значений в три раза.

Максимальные значения приходятся на центральную область матрицы и пуансона. Между собой варианты II и III также отличаются тем, что при меньшем значении угла установки наклона конуса γ НДС материала повышается, растёт и температура разогрева инструмента в результате большего контактного давления и, соответственно, роста силы трения (рис. 15).

В меньшей степени разогревается инструмент по варианту I, так как при отсутствии вращающейся контактной поверхности сдвиговые деформации меньше, интенсивность течения металла ниже. При вращающихся инструментах за счёт увеличения температуры снижается требуемое напряжение текучести и материал более интенсивно течёт в радиальном направлении, что снова обусловлено более интенсивным задействованием сдвиговых деформаций.

Длительность расчётов

На рис. 16 показана диаграмма сравнения общего расчётного времени изучаемых процессов. Наиболее длительными являются расчёты, в которых, кроме процесса моделирования, изучается и НДС штампов, причём самым длительным расчётом оказался расчёт по варианту IV (с инструментами). Самыми быстрыми расчётами при реализации их на ПК_1 являются расчёты ХОШ, с учетом и без учёта НДС инструментов.

Для увеличения эффективности расчётов или снижения расчётного времени могут быть применены допущения, рассматривающие задачи в сечении, в месте контакта материала заготовки и инструмента, отображая впоследствии результат симметрично относительно оси вращения (в 2,5D постановке). Такие подходы распространены, например, при моделировании процессов ротационной вытяжки и выдавливания, при раскатке кольцевых поковок и в других сложных процессах ОМД [42—47]. Однако такая неполная постановка задачи не позволит моделировать

процесс потери устойчивости, возникающий при моделировании, например, неравномерных условий контактного трения, деформирования на высоких скоростях или при деформировании заготовок больших размеров.

Выводы

Установлено, что при СДШ и ШК затрачиваются меньшие силы деформирования. Однако вследствие действия интенсивных сдвиговых деформаций происходит сильный разогрев поковки и поверхности инструмента. Для создания сдвиговых деформаций необходимо, чтобы системой вносились большие значения энергии, расходуемые на преодоление действующих сил трения и совершения пластической деформации. Таким образом, уменьшение силы осуществляется за счёт увеличения мощности оборудования. Высокая скорость деформирования при СДШ (8 мм/с против 1 мм/с для ХОШ и ШК) приводит к росту силы деформирования, согласно реологическому описанию течения материалов кривыми упрочнения. Однако она оказывается сопоставимой с силами для ХОШ и ШК, что связано с инкрементальным или секторным характером процесса СДШ, т.е. последовательным воздействием на небольшие участки поковки.

При сравнении расчётов инструментов для ХОШ и ШК было получено, что уровень интенсивности напряжений и доля упругой деформации при ШК значительно ниже. Таким образом, можно предположить, что при ШК инструмент

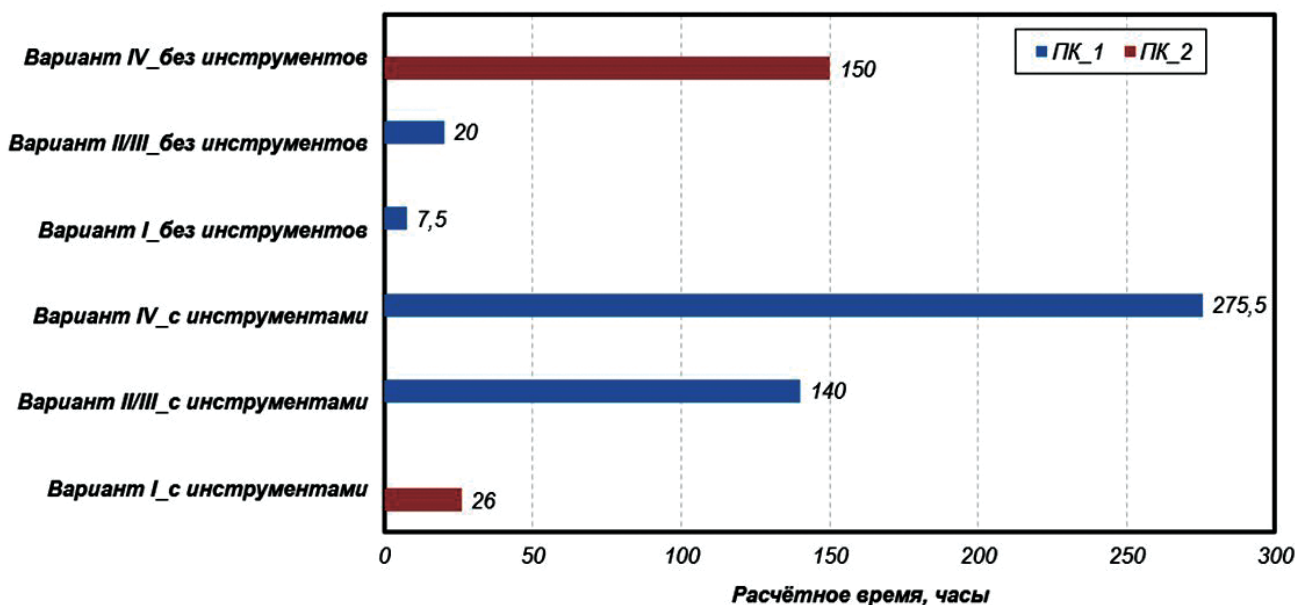


Рис. 16. Диаграмма зависимости расчётного времени от вида задачи

находится в более благоприятном напряжённо-деформированном состоянии.

Время расчёта процессов с комбинированным движением, линейно перемещающиеся и вращающиеся инструменты в несколько раз превышают время расчёта традиционных процессов с линейно перемещающимися инструментами. Это, в свою очередь, приводит либо к необходимости упрощения задачи, либо к реализации расчёта на мощных расчётных станциях и суперкомпьютерах, либо к поиску и разработке оптимальных алгоритмов.

Список источников

1. *Slick E.E.* The Slick Wheel Mill // The iron age. 1918. Vol. 102. No. 9, pp. 491–498.
2. *Slater R.A.C., Barooah N.K., Appleton E., Johnson W.* The Rotary Forging Concept and Initial Work with an Experimental Machine // Institution of Mechanical Engineers. 1969. Vol. 184. No. 1, pp. 577–592. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1969_184_046_02
3. *Massey H.F.* Rotary forging machine. British Patent Specification. 1929. No. 319065.
4. *Tekkaya A.E., Homberg W., Brosius A.* (eds.) 60 Excellent Inventions in Metal Forming. — Springer Vieweg, 2015. — 456 p.
5. *Marciniak Z.* Rocking die technique for cold forming operations // Machinery and Production Engineering. 1970. Vol. 117, pp. 792–797.
6. Feintool Fineblanking Technology. URI: https://www.feintool.com/fileadmin/user_upload/Produkte_Services/Pressen_Komplettsysteme/Pressen_und_Anlagen/Taumelpressen/Taumelpressen_Brochure_EN.pdf
7. *Standring P.M., Appleton E.* Rotary forging developments in Japan. Part I. Machine development and forging research // Journal of Mechanical working technology. 1980. Vol. 3, pp. 253–273.
8. *Standring P.M., Appleton E.* Rotary forging developments in Japan. Part II. Theoretical investigation and analysis: powder compaction and sinter-forging // Journal of Mechanical working technology. 1980. Vol. 4, pp. 7–29.
9. *Kubo K., Hirai Y., Ogiso S., Ito S.* Preliminary Work of Rotary Forging Process with an Experimental Press // Journal of Japan Society for Technology of Plasticity. 1973. Vol. 14, pp. 648–655.
10. *Samolyk G.* Studies on stress and strain state in cold orbital forging a AlMgSi alloy flange pin // Archives of Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 58. No. 4, pp. 1183–1189. DOI: 10.2478/amm-2013-0149
11. *Shivpuri R.* Past development and future trends in the rotary or orbital forging process // Journal of Material Shaping Technologies. 1988. Vol. 6(1), pp. 55–71. DOI: 10.1007/BF02833583
12. *Han X., Jin Q., Hua L.* Research on Cold Orbital Forming of Complex Sheet Metal of Aluminum Alloy // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2017. Vol. 139. No. 6. DOI: 10.1115/1.4035124
13. *Han X., Hu Y., Hua L.* Cold orbital forging of gear rack // International Journal of Mechanical Sciences. 2016. Vol. 117, pp. 227–242. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.09.007
14. *Nowak J., Madej L., Ziolkiewicz S., Plewinski A., Grosman F., Pietrzyk M.* Recent development in orbital forging technology // International Journal of Material Forming. 2008, pp. 387–390. DOI: 10.1007/s12289-008-0076-2
15. *Behrens B.-A., Hübner S., Müller P., Besserer H.-B., Gerstein G., Koch S., Rosenbusch D.* New Multistage Sheet-Bulk Metal Forming Process Using Oscillating Tools // Metals. 2020. Vol. 10. No. 5. DOI: 10.3390/met10050617
16. *Samolyk G.* Numerical investigation of producing a Ti6Al4V alloy jaw coupling sleeve-disk by orbital forging // Metalurgija. 2014. Vol. 53. No. 4 pp. 497–500. URI: <https://hrcaak.srce.hr/122172>
17. *Jin Q., Gu Z., Hua J.* Preform designing approach in cold orbital forging of flange gear // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10. No. 10. DOI: 10.1177/1687814018808620
18. *Субич В.Н., Дёмин В.А., Шестаков Н.А., Власов А.В.* Штамповка с кручением: Монография. — М.: МГИУ, 2008. — 389 с.
19. *Шестаков Н.А., Субич В.Н., Дёмин В.А.* Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. — М.: Физматлит, 2011. — 266 с
20. *Суслов А.Г.* (ред.). Научноёмкие технологии в машиностроении. — М.: Машиностроение, 2012. — 528 с.
21. *Степанов Б.А., Субич В.Н., Шестаков Н.А., Максименко А.Е.* Штамповка с кручением на прессе с кривошипно-кулисным исполнительным механизмом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 4. С. 15–21.
22. *Степанов Б.А., Петров М.А.* Винтовой пресс для штамповки с кручением // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. №11(1). С. 271–277.
23. *Petrov M.A., Subich V.N., Petrov P.A.* Experimental and numerical research on forging with torsion // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1896. DOI: 10.1063/1.5008237
24. *Наумова Е.А., Петров М.А., Степанов Б.А., Васильева Е.С.* Штамповка с кручением заготовки из Al–Ca-сплава с высоким содержанием интерметаллида Al₄Ca // Цветные металлы. 2019. № 1. С. 66–71. DOI: 10.17580/tsm.2019.01.10
25. *Бач В.Ч., Бурлаков И.А., Степанов Б.А., Петров П.А.* О технологических возможностях штамповки с кручением при изготовлении низких промежуточных заготовок из титана ВТ1-0 // Технология легких сплавов. 2019. № 2. С. 51–58.
26. *Бурлаков И.А., Забелян Д.М., Петров П.А., Бач В.Ч., Степанов Б.А.* Определение рациональных режимов осадки с кручением заготовок титана ВТ1-0 с применением метода активного эксперимента

- // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. № 5. С. 203–207.
27. Бурлаков И.А., Бач В.Ч., Петров А.Н., Логинов Б.А. Эволюция микроструктуры технического титана BT1-0 при интенсивной пластической деформации // Цветные металлы. 2019. № 6. С. 71–77. DOI: 10.17580/tsm.2019.06.10
 28. Hesselbach J., Behrens B.-A., Dietrich F., Rathmann S., Poelmeyer J. Flexible forming with hexapods // Production Engineering. 2007. Vol. 1(4), pp. 429–436. DOI: 10.1007/s11740-007-0063-3
 29. Wonnemberg B., Muller A., Dröder K. Comparison of design approaches to generate tools for a forming process with a six degree of freedom press // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2113. DOI: 10.1063/1.5112648
 30. Han X., Hua L., Zhuang W., Zhang X. Process design and control in cold rotary forging of non-rotary gear parts // Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214. No. 11, pp. 2402–2416. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.003
 31. Petrov M.A., Petrov P.A., Yafaev R.R. To the question on the friction assessment methods applied for metal forming operations // Key Engineering Materials. 2015. Vol. 651–653, pp. 522–529. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.522
 32. Petrov M., Petrov A., Petrov P. Numerical investigation of the material behavior during compression tests for samples with rough surfaces represented in different geometry scale factors // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 716, pp. 736–752. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.716.736
 33. Presz W. Ultrasonic Orbital Microforming – A New Possibility in the Forming of Microparts // Metals. 2018. Vol. 8. No. 11. DOI: 10.3390/met8110889
 34. Хайрнатов К.З. Моделирование процесса штамповки деталей авиационной техники // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 5. С. 96–104.
 35. Бобылёв А.А., Белашова И.С., Кузьмин С.Д. Контактная задача о вдавлении в функционально-градиентное покрытие выпуклого штампа заданным усилием // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 3. С. 151–160.
 36. Комков В.А., Кокорева О.Г., Курсаков А.В. Исследование возможностей упрочнения поверхностей тонкостенных элементов летательных аппаратов методом поверхностной пластической деформации // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 132–136.
 37. Галкин В.И., Галкин Е.В., Палтиевиц А.Р., Преображенский Е.В., Борунова Т.И. Изучение технологических схем производства деталей типа «СЕГМЕНТ ШПАНГОУТА» // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 210–220.
 38. Амосов А.П., Воронин С.В., Лобода П.С., Ледяев М.Е., Чаплыгин К.К. Определение влияния поверхностного натяжения на механические свойства алюминиевого сплава методом компьютерного моделирования // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 214–222. DOI: 10.34759/vst-2020-2-214-222
 39. Магеррамова Л.А., Крафт Е.П., Ясинский В.В. Конструктивно-технологическое моделирование биметаллических блисков для газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 82–88.
 40. Диски Корпорации ВСМПО-АВИСМА, <http://www.vsm-po.ru/ru/products/Diski>
 41. Aerospace from Aubert & Duval, <https://www.aubertduval.com/markets/aerospace/>
 42. Lianggang G., He Y. Numerical Modelling and Simulation of Radial-Axial Ring Rolling Process // Numerical Analysis – Theory and Application. 2011. DOI: 10.5772/24643
 43. Stebunov S., Biba N., Vinnichenko S. Industrial Ring and Wheel Rolling Simulations // Forging. 2017. https://www.qform3d.com/files_com/1217/QFormSim.pdf
 44. DEFORMTM News. 2016. Vol. 14. No.3. URI: https://www.deform.com/wp-content/uploads/2016/08/DEFORM_News_Summer_2016.pdf
 45. Hamilton S., Long H. Analysis of conventional spinning process of a cylindrical part using finite element methods // Steel Research International. 2008. Vol. 79 (1), pp. 632–639.
 46. Cioca T., Oancea G., Filip A.C. Software Tool Used for Simulation of Metal Spinning Process for Complex Rotational Parts // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 657, pp. 153–157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.657.153
 47. Filip A.C., Neagoe I. Simulation of the Metal Spinning Process by Multi-Pass Path Using AutoCAD/VisualLISP // 3rd International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (22–24 July 2010; Corfu Island, Greece), pp. 161–165.

References

1. Slick E.E., The Slick Wheel Mill. *The iron age*, 1918, vol. 102, no. 9, pp. 491–498.
2. Slater R.A.C., Barooah N.K., Appleton E., Johnson W. The Rotary Forging Concept and Initial Work with an Experimental Machine, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1969, vol. 184, pp. 577–592.
3. Massey H.F. *Rotary forging machine*. British Patent Specification, 1929, no. 319065.
4. Tekkaya A.E., Homberg W., Brosius A. (eds.) *60 Excellent Inventions in Metal Forming*. Springer Vieweg, 2015, 456 p.
5. Marciniak Z. Rocking die technique for cold forming operations. *Machinery and Production Engineering*, 1970, vol. 117, pp. 792–797.

6. *Feintool Fineblanking Technology*. URI: https://www.feintool.com/fileadmin/user_upload/Produkte_Services/Pressen_Komplettsysteme/Pressen_und_Anlagen/Taumelpressen/Taumelpressen_Brochure_EN.pdf
7. Strandring P.M., Appleton E. Rotary forging developments in Japan. Part I. Machine development and forging research. *Journal of Mechanical working technology*, 1980, vol. 3, pp. 253–273.
8. Strandring P.M., Appleton E. Rotary forging developments in Japan. Part II. Theoretical investigation and analysis: powder compaction and sinter-forging. *Journal of Mechanical working technology*, 1980, vol. 4, pp. 7–29.
9. Kubo K., Hirai Y., Ogiso S., Ito S. Preliminary Work of Rotary Forging Process with an Experimental Press. *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity*, 1973, vol. 14, pp. 648–655.
10. Samolyk G. Studies on stress and strain state in cold orbital forging a AlMgSi alloy flange pin. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 58, no. 4, pp. 1183–1189. DOI: 10.2478/amm-2013-0149
11. Shivpuri R. Past development and future trends in the rotary or orbital forging process. *Journal of Material Shaping Technologies*, 1988, vol. 6(1), pp. 55–71. DOI: 10.1007/BF02833583
12. Han X., Jin Q., Hua L. Research on Cold Orbital Forming of Complex Sheet Metal of Aluminum Alloy. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, vol. 139, no. 6. DOI: 10.1115/1.4035124
13. Han X., Hu Y., Hua L. Cold orbital forging of gear. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, vol. 117, pp. 227–242. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.09.007
14. Nowak J., Madej L., Ziolkiewicz S., Plewinski A., Grosman F., Pietrzyk M. Recent development in orbital forging technology. *International Journal of Material Forming*, 2008, pp. 387–390. DOI: 10.1007/s12289-008-0076-2
15. Behrens B.-A., Hübner S., Müller P., Besserer H.-B., Gerstein G., Koch S., Rosenbusch D. New Multistage Sheet-Bulk Metal Forming Process Using Oscillating Tools. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 5. DOI: 10.3390/met10050617
16. Samolyk G. Numerical investigation of producing a Ti6Al4V alloy jaw coupling sleeve-disk by orbital forging. *Metalurgija*, 2014, vol. 53, no. 4 pp. 497–500. URI: <https://hrcak.srce.hr/122172>
17. Jin Q., Gu Z., Hua J. Preform designing approach in cold orbital forging of flange gear. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, no. 10. DOI: 10.1177/1687814018808620
18. Subich V.N., Demin V.A., Shestakov N.A., Vlasov A.V., *Shtampovka s krucheniem, monografiya*, Moscow, MGIU, 2008, p. 389.
19. Shestakov N.A., Subich V.N., Demin V.A. *Compaction, consolidation and fracture of porous materials*, Moscow, Fizmatlit, 2011, 266 p.
20. Suslov A.G. (ed.). *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, Moscow, Mashinostroenie, 2012, 528 p.
21. Stepanov B.A., Subich V.N., Shestakov N.A., Maksimenko A.E. *Izvestiya TulGU. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 4, pp. 15–20.
22. Stepanov B.A., Petrov M.A. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 11(1), pp. 271–277.
23. Petrov M.A., Subich V.N., Petrov P.A. Experimental and numerical research on forging with torsion. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1896. DOI: 10.1063/1.5008237
24. Naumova E.A., Petrov M.A., Stepanov B.A., Vasil'eva E.S. *Tsvetnye metally*, 2019, no. 1, pp. 66–71. DOI: 10.17580/tsm.2019.01.10
25. Bach V.Ch., Burlakov I.A., Stepanov B.A., Petrov P.A. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2019, no. 2, pp. 51–58.
26. Burlakov I.A., Zabel'yan D.M., Petrov P.A., Bach V.Ch., Stepanov B.A. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2019, no. 5, pp. 203–207.
27. Burlakov I.A., Zabel'yan D.M., Petrov P.A., Bach V.Ch., Stepanov B.A. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2019, no. 6, pp. 71–77. DOI: 10.17580/tsm.2019.06.10
28. Hesselbach J., Behrens B.-A., Dietrich F., Rathmann S., Poelmeyer J., Flexible forming with hexapods. *Production Engineering*, 2007, vol. 1(4), pp. 429–436. DOI: 10.1007/s11740-007-0063-3
29. Wonenberg B., Muller A., Dröder K. Comparison of design approaches to generate tools for a forming process with a six degree of freedom press. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2113. DOI: 10.1063/1.5112648
30. Han X., Hua L., Zhuang W., Zhang X. Process design and control in cold rotary forging of non-rotary gear parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 11, pp. 2402–2416. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.003
31. Petrov M.A., Petrov P.A., Yafaev R.R. To the question on the friction assessment methods applied for metal forming operations. *Key Engineering Materials*, 2015, vol. 651–653, pp. 522–529. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.522
32. Petrov M., Petrov A., Petrov P. Numerical investigation of the material behavior during compression tests for samples with rough surfaces represented in different geometry scale factors. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 716, pp. 736–752. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.716.736
33. Presz W. Ultrasonic Orbital Microforming – A New Possibility in the Forming of Microparts. *Metals*, 2018, vol. 8, no. 11. DOI: 10.3390/met8110889.
34. Khayrnasov K.Z. Simulation of stamping process of aviation engines parts. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 5, pp. 96–104.
35. Bobylov A.A., Belashova I.S., Kuzmin S.D. The contact problem of indentation of a functionally graded coating by a convex punch under a predefined load. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 151–160.

36. Komkov V.A., Kokoreva O.G., Kursakov A.V. Investigation of possibilities to harden thin-wall elements of flying vehicles by surface plastic deformation. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 132-136.
37. Galkin V.I., Galkin E.V., Paltievich A.R., Preobrazhenskii E.V., Borunova T.V. Analyzing technological schemes of production of "FRAME SEGMENT" type parts. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 210-220.
38. Amosov A.P., Voronin S.V., Loboda P.S., Ledyayev M.E., Chaplygin K.K. Determining surface tension effect on aluminum alloy mechanical properties by computer simulation technique. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 214-222. DOI: 10.34759/vst-2020-2-214-222
39. Magerramova L.A., Kratt E.P., Yacinsky V.V. Structural technological designing of bimetallic blisk for gas turbines. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 82-88.
40. *Disks of VSMPO-AVISMA Corporation*, <http://www.vsmo.ru/ru/products/Diski>
41. *Aerospace from Aubert & Duval*, <https://www.aubertduval.com/markets/aerospace/>
42. Lianggang G., He Y. Numerical Modelling and Simulation of Radial-Axial Ring Rolling Process. *Numerical Analysis - Theory and Application*, 2011. DOI: 10.5772/24643
43. Stebunov S., Biba N., Vinnichenko S. Industrial Ring and Wheel Rolling Simulations. *Forging*, 2017. https://www.qform3d.com/files_com/1217QFormSim.pdf
44. *DEFORMTM News*, 2016, vol. 14, no. 3. URI: https://www.deform.com/wp-content/uploads/2016/08/DEFORM_News_Summer_2016.pdf
45. Hamilton S., Long H. Analysis of conventional spinning process of a cylindrical part using finite element methods. *Steel Research International*, 2008, vol. 79 (1), pp. 632–639.
46. Cioca T., Oancea G., Filip A.C. Software Tool Used for Simulation of Metal Spinning Process for Complex Rotational Parts. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 657, pp. 153–157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.657.153
47. Filip A.C., Neagoe I. Simulation of the Metal Spinning Process by Multi-Pass Path Using AutoCAD/VisualLISP. *3rd International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (22–24 July 2010; Corfu Island, Greece)*, pp. 161–165.

Статья поступила в редакцию 24.08.2021; одобрена после рецензирования 27.11.2021; принята к публикации 27.11.2021.

The article was submitted 24.08.2021; approved after reviewing 27.11.2021; accepted for publication 27.11.2021.