

УДК 620.178.6:669.715

В.И. Воронков¹, К.Е. Потапенко¹, П.А. Петров¹, С.В. Выдумкина²**ПОЛУЧЕНИЕ УТОЧНЕННЫХ ДАННЫХ
ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
ПРИ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКЕ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АД35 И АД31**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-3-10

Показан способ получения данных о сопротивлении пластической деформации алюминиевых сплавов АД35 и АД31 методом постановки обратной задачи (методом инверсного моделирования). Суть метода постановки обратной задачи заключается в воспроизведении механических испытаний путем моделирования, сравнения полученных расчетных диаграмм силы с экспериментальными и корректировки данных о сопротивлении исследуемого материала пластической деформации на основании указанного сравнения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 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») [1].

Ключевые слова: сопротивление пластической деформации, математическая модель, скорость деформации, кривая текучести.

The way of obtaining data on resistance of aluminum alloys AD35 and AD31 to plastic deformation by the inverse method (the method of inverse modeling) is shown. The essence of the method of inverse problem statement is to reproduce mechanical tests through simulation, compare the calculated and experimental force diagrams and correct the data on resistance of the material to plastic deformation on the basis of this comparison.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 3.2. «Computer simulation including application of neural networks, processes of treatment by pressure with forecasting of structure, complex of mechanical and operational properties of products» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: resistance to plastic deformation, mathematical model, strain rate, yield curve.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)» [Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI)»]; e-mail: mami@mami.ru

²Федеральное 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

При расчете процессов объемной деформации металла, благодаря применению метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в современных программах, таких как Qform, Forge, Deform и других, проблемы математического описания рассчитываемой технологической операции не возникает. Для получения максимально точного результата расчетов, который может обеспечить используемая программа, пользователю необходимо корректно задать граничные условия и данные, характеризующие деформируемый материал [2].

Точность задаваемых граничных условий при моделировании процессов объемной штамповки, включающих геометрическую форму ручья штампа, закон перемещения инструментов, температуру окружающей среды, закон контактного трения и прочее, зависит от возможностей программы.

Так, например, способы задания перемещения инструментов и закона контактного трения в программах Forge и Qform существенно отличаются, что объясняется разной концепцией при создании данных программных продуктов. На возможности применяемого программного обеспечения технолог, конечно, повлиять не может, и точность описания граничных условий будет зависеть от особенностей программы и опыта пользователя, который должен понимать, как именно посредством предложенного инструментария приблизить расчет к реальному процессу деформирования [3].

Кроме того, при постановке задачи моделирования возникает проблема описания свойств деформируемого материала. Как правило, в коммерческих программах базы данных материалов содержат достаточно большой перечень деформиру-

емых металлов и сплавов, но удовлетворить одновременно требования различных отраслей промышленности, где при производстве часто применяется штамповка деталей из сложных сплавов, не представляется возможным. Следует также учитывать, что при составлении базы данных материалов данные о сопротивлении материалов пластической деформации могут быть взяты из большого числа источников, в которых экспериментальные кривые текучести (зависимость напряжения текучести от накопленной деформации) получены по разным методикам и с различной степенью точности. Таким образом, базы данных материалов, предлагаемые разработчиками программного обеспечения, неполные и не всегда обеспечивают требуемую точность при расчетах.

Однако указанная проблема не препятствует возможности проведения точного расчета деформирования, так как во всех коммерческих программах пользователь может самостоятельно определить свойства деформируемого материала. В большинстве известных программ данные по сопротивлению материала пластической деформации при горячей объемной штамповке представляют собой таблично-заданные кривые текучести, определенные для фиксированных значений скорости деформации и температуры. Другим способом задания зависимости напряжения от скорости деформации и температуры являются математические модели [4]. Так, например, в программах Forge и Qform используется модель сопротивления деформации, представляющая собой функцию вида: $\sigma_i = f(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}, T)$, где σ_i – напряжение текучести; ε_i – накопленная деформация; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации; T – температура.

Получить данные о сопротивлении пластической деформации конкретного материала можно по результатам механических испытаний (методом сжатия, кручения или растяжения) и последующего пересчета полученных диаграмм силы по формулам согласно какой-либо известной методике. Так, например, известны методики получения изотермических кривых текучести по результатам испытаний при сжатии [5, 6] или методики получения кривых текучести по результатам испытаний при растяжении, учитывающих объемное напряженное состояние в шейке образца [7]. В указанных подходах учет нелинейного напряженного состояния осуществляется по выражениям, дающим в конечном счете только приближительную корректировку значений напряжения текучести. Кроме того, необходимо скорректировать значения напряжения текучести согласно изменению температуры образца в результате теплового эффекта при пластической деформации, определить которое по некоторым теоретическим выражениям, не учитывающим градиент температур по сечению образца, можно также

лишь приблизительно. Кривые текучести материала, определенные по любым методикам, представляющим собой поэтапную корректировку значений напряжения текучести по некоторым теоретическим и эмпирическим формулам, могут быть пригодны для моделирования технологических операций, не требующих высокой точности расчета энергосиловых параметров процесса и анализа течения материала в штампе. Для расчета процессов штамповки, характеризующихся сложным течением металла в полости штампа [8–11], требуются уточненные данные по сопротивлению металла пластической деформации.

В данной статье описывается способ получения данных о сопротивлении пластической деформации алюминиевых сплавов АД35 и АД31 методом постановки обратной задачи (методом инверсного моделирования). Суть метода постановки обратной задачи заключается в воспроизведении механических испытаний путем моделирования [12], сравнения полученных расчетных диаграмм силы с экспериментальными и корректировки данных о сопротивлении исследуемого материала пластической деформации на основании указанного сравнения.

По результатам механических испытаний методом сжатия цилиндрического образца были получены диаграммы «ход–сила». Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине INSTRON VHS 400 kN (VHS8800 family)* в изотермических условиях без нанесения смазки на контактную поверхность образцов. Отсутствие смазки упрощает постановку задачи при моделировании механических испытаний, так как точно воспроизвести характер трения на контактной поверхности, на которую была нанесена смазка, достаточно сложно: на показатель трения будет оказывать влияние толщина слоя смазки, равномерность ее нанесения, а также температура [13, 14]. Для проведения осадки были изготовлены цилиндрические образцы высотой 10 мм и диаметром 10 мм. Испытания проводили при температурах 300, 350, 430 и 510°C при постоянных скоростях деформации 0,1; 1; 10 и 50 с⁻¹ (для сплава АД35 испытания при скорости деформации 50 с⁻¹ не проводили). Конечная степень накопленной деформации составила: 0,6 – для сплава АД31 и 0,8 – для сплава АД35.

Корректировку кривых текучести осуществляли поэтапно. На каждом этапе путем моделирования в программе Qform воспроизводили все вышеописанные условия испытаний. Данные о сопротивлении пластической деформации задавали таблично (рис. 1). Для уменьшения этапов корректировки начальные кривые текучести определяли с учетом влияния теплового эффекта пластической деформации и контактного трения [5]. После каждого этапа расчетов производили

* Оборудование установлено в Институте материаловедения Ганноверского университета им. В. Лейбница (г. Ганновер, Германия).

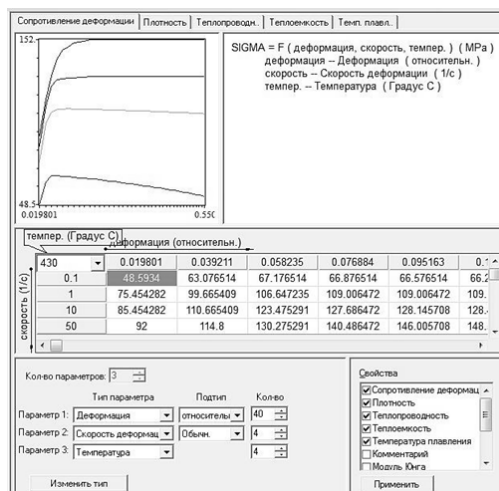


Рис. 1. Ввод данных о сопротивлении деформации в программе Qform

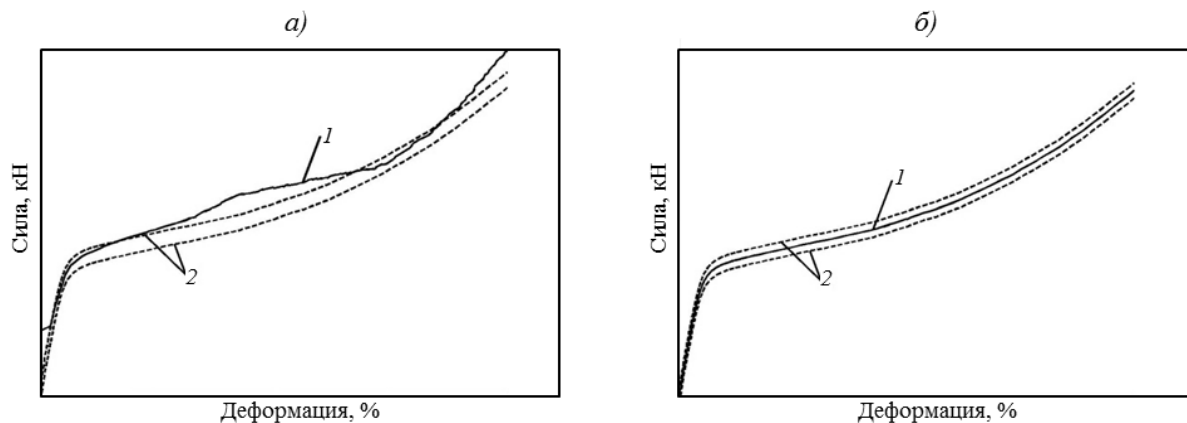


Рис. 2. Диаграммы силы до корректировки кривых текучести методом постановки обратной задачи (а) и после (б):

1 – кривые силы, полученные при моделировании; 2 – границы доверительного интервала

сравнение всех расчетных и экспериментальных диаграмм, после чего в кривые текучести вносили соответствующие изменения. Конечная цель расчетов – достигнуть путем корректировки данных о сопротивлении материала пластической деформации сходимости всех расчетных диаграмм силы с экспериментальными (рис. 2) с учетом точности, задаваемой представленным далее выражением.

Допустимую погрешность моделирования определяли следующим образом:

$$\delta = \left| \frac{P_{\text{расч}} - P_{\text{эксп}}}{P_{\text{эксп}}} \cdot 100\% \right| \leq 2,5\%$$

где $P_{\text{расч}}$ – расчетные значения силы; $P_{\text{эксп}}$ – экспериментальные значения силы.

На первом этапе моделирования механических испытаний выявлены существенные расхождения между расчетными и экспериментальными диаграммами силы.

После шести этапов моделирования была достигнута требуемая сходимость расчетных и экспериментальных результатов (рис. 3 и 4). Полученные кривые текучести алюминиевых сплавов АД35 и АД31 показаны на рис. 5 и 6.

После корректировки кривых текучести исследуемых сплавов достигнута необходимая точность моделирования, обеспечивающая расхождение расчетных и экспериментальных данных, не превышающее $\pm 2,5\%$. Видно (рис. 3 и 4), что при моделировании механических испытаний (для сплава АД35 при температуре 350°C и скорости деформации $0,1 \text{ c}^{-1}$, а также для сплава АД31 при температурах 300 и 510°C и скоростях деформации $0,1$ и 10 c^{-1} соответственно) на конечной стадии деформирования наблюдается незначительный «выход» расчетного графика силы за границы допустимого отклонения. Это объясняется тем, что при моделировании каждого испытания вид графика силы определяется сразу несколькими кривыми текучести, взаимное влияние которых на значения силы деформирования порой

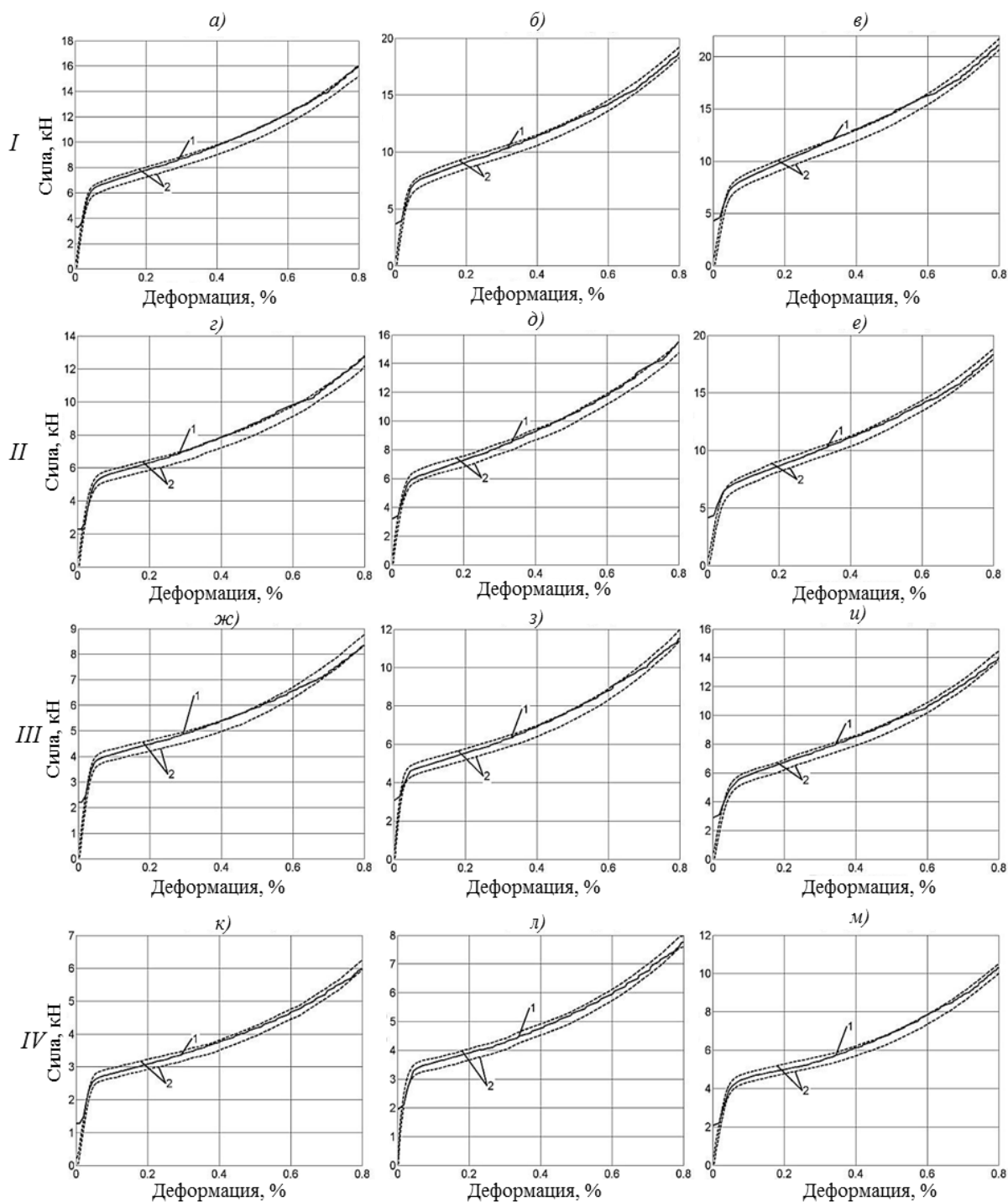


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные диаграммы силы для сплава АД35 после корректировки кривых текущей прочности методом инверсионного анализа при температурах 300 (I), 350 (II), 430 (III) и 510°C (IV) и скорости деформации 0,1 (а, г, ж, к), 1 (б, д, з, л) и 10 с⁻¹ (в, е, и, м):

1 – кривые силы, полученные при моделировании; 2 – границы доверительного интервала

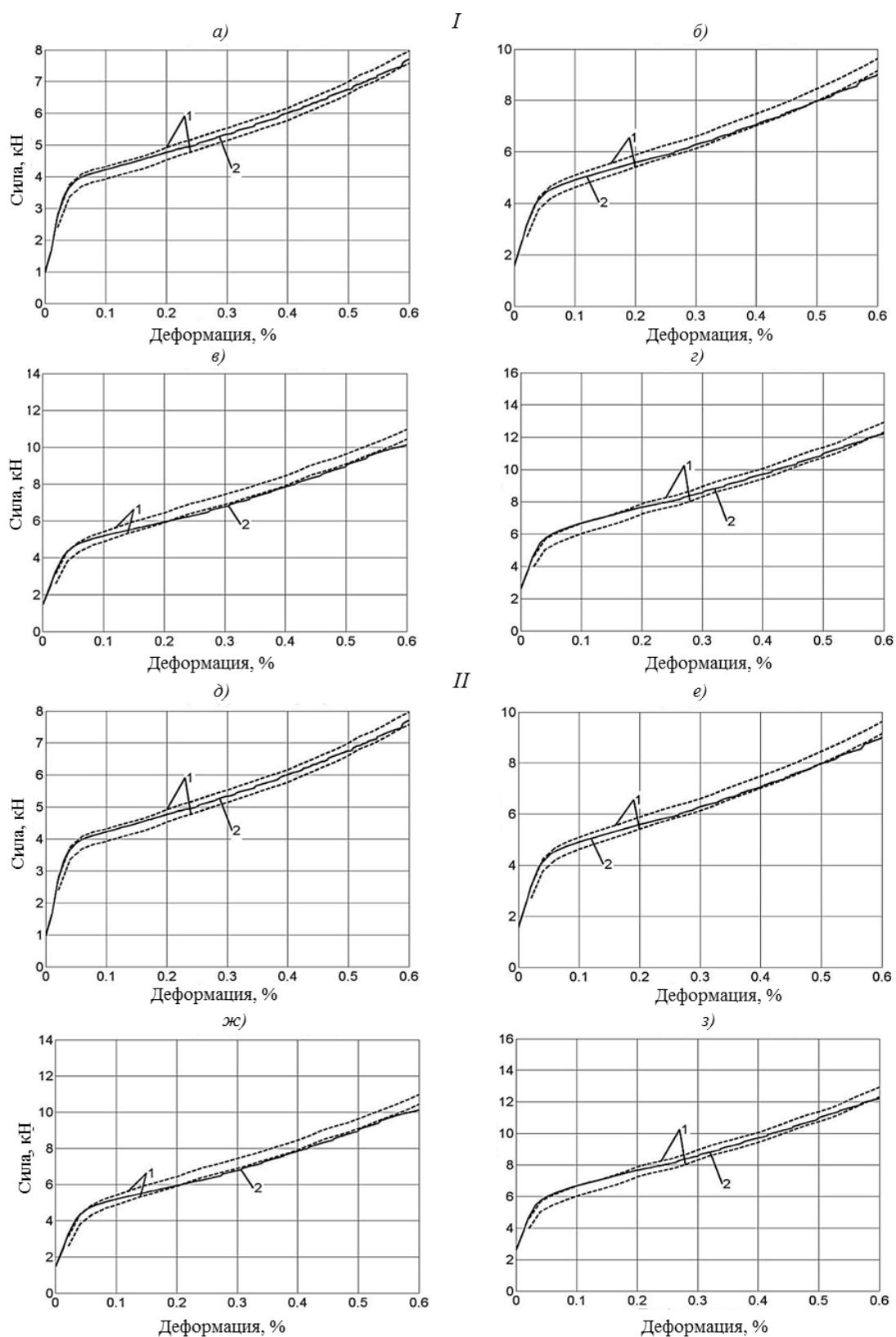


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные диаграммы силы для сплава АД31 после корректировки кривых текучести методом инверсионного анализа при температурах 300 (I), 350°C (II) и скорости деформации 0,1 (а, д), 1 (б, е), 10 (в, ж) и 50 с⁻¹ (з, з):

1 – границы доверительного интервала; 2 – кривые силы, полученные при моделировании

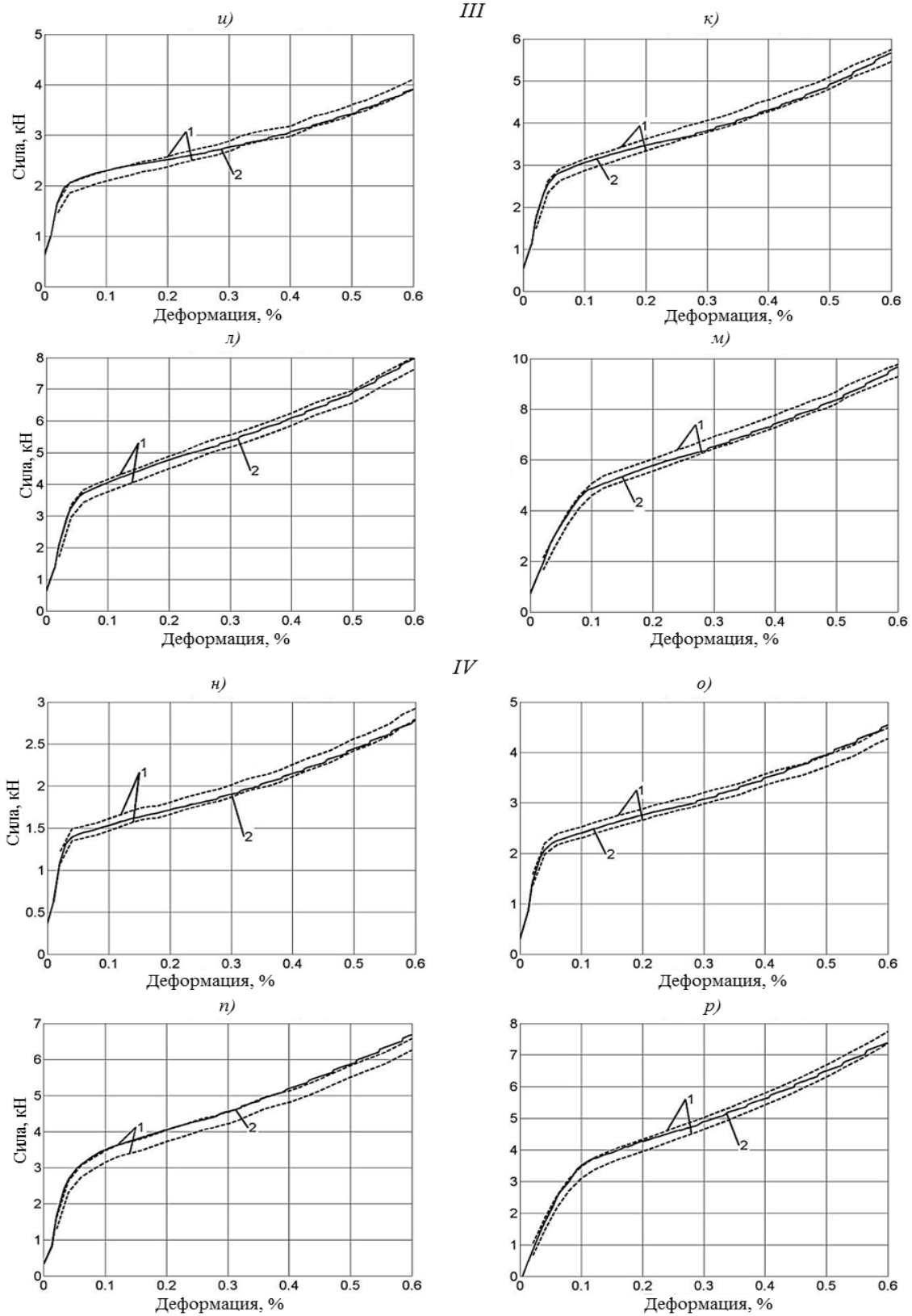


Рис. 4 (продолжение). Расчетные и экспериментальные диаграммы силы для сплава АД31 после корректировки кривых текучести методом инверсионного анализа при температурах 430 (III), 510°C (IV) и скорости деформации 0,1 (*u, н*), 1 (*к, о*), 10 (*л, п*) и 50 с⁻¹ (*м, р*):

1 – границы доверительного интервала; 2 – кривые силы, полученные при моделировании

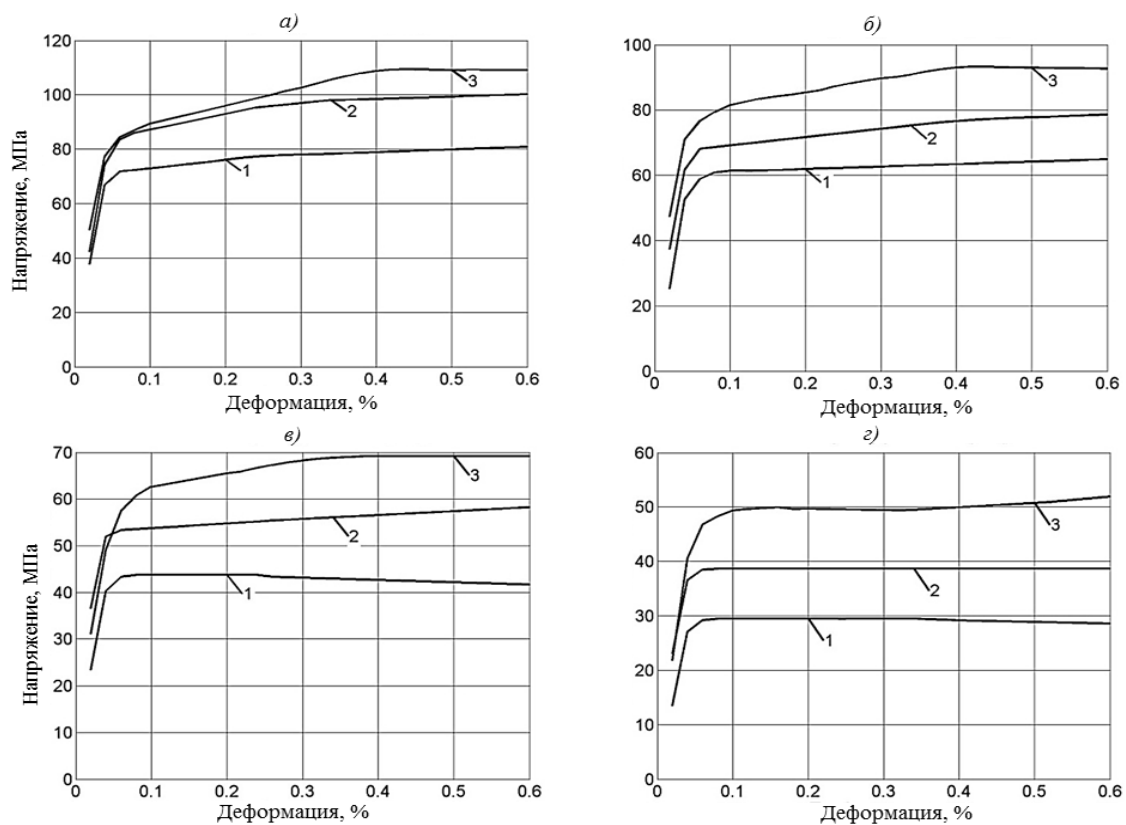


Рис. 5. Кривые текучести алюминиевого сплава АД35 при температурах 300 (а), 350 (б), 430 (в) и 510°C (г) и скорости деформации 0,1 (1), 1 (2) и 10 с⁻¹ (3)

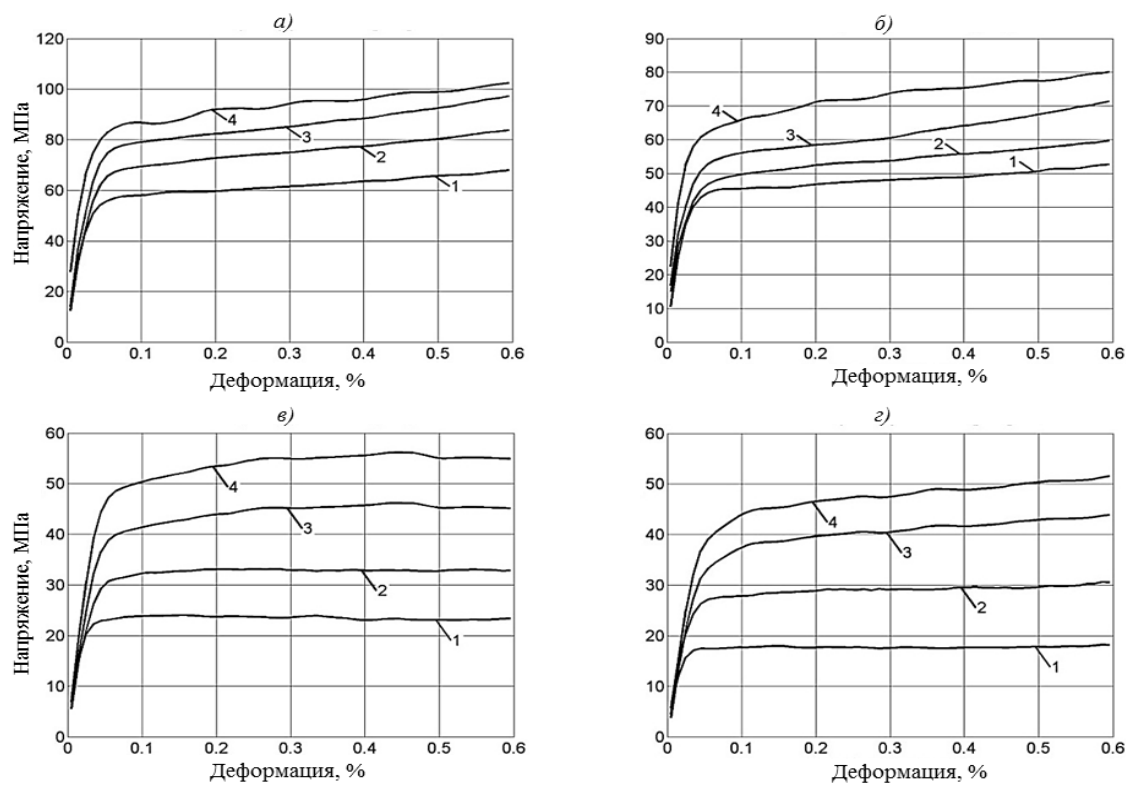


Рис. 6. Кривые текучести алюминиевого сплава АД31 при температурах 300 (а), 350 (б), 430 (в) и 510°C (г) и скорости деформации 0,1 (1), 1 (2), 10 (3) и 50 с⁻¹ (4)

трудно проанализировать ввиду сравнительно сложной картины распределения поля скоростей и температур по сечению образца.

По результатам анализа изменения формы кривых текучести до и после корректировки методом постановки обратной задачи отмечено, что кривые текучести «выпрямились» утратив выгиб вверх при больших степенях накопленной деформации. Это объясняется в первую очередь тем, что при обработке экспериментальных данных учет влияния трения на контактных поверхностях образца был недостаточным. Кроме того, на изменение формы кривых текучести оказывает влияние методика расчета напряжения текучести при моделировании, где расчет ведется не по одной кривой текучести, а по группе соседних кривых, каждая из которых ока-

зывает влияние на конечный вид графика силы, а следовательно, и на корректировку каждой из соседних кривых текучести. Данное замечание является существенным преимуществом метода постановки обратной задачи перед обычными аналитическими методами корректировки кривых, где каждая кривая пересчитывается отдельно. Возможность совместной корректировки группы кривых приближает расчеты (моделирование) к реальному процессу деформирования, где по сечению образца наблюдается как градиент температур, так и скоростей деформации [15, 16].

Полученные данные о сопротивлении сплавов АД35 и АД31 пластической деформации, представленные набором кривых текучести (рис. 5 и 6) могут быть использованы для точного моделирования процессов штамповки деталей из данных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 141–147.
3. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 19–36.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 129–141.
5. Петров П.А., Дубинчин А.В. Построение «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава АМг6 // *Обработка материалов давлением*. 2008. №1 (19). С. 145–150.
6. Петров П.А. Построение «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава В95 // *Обработка материалов давлением*. 2010. №2 (23). С. 88–93.
7. Калпин Ю.Г., Перфилов В.И., Петров П.А., Рябов В.А., Филиппов Ю.К. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением: учеб. пособие для вузов. М.: МГТУ МАМИ, 2005. 113 с.
8. Петров П.А., Воронков В.И., Крутина Е.В., Иванов В.А. Разработка технологии изотермической штамповки детали «корпус муфты» из алюминиевого сплава АД35 // *Сб. докл. Третьего Международного конгресса «Цветные металлы–2011»*. Красноярск: Версо, 2011. С. 590–596.
9. Петров П.А. Разработка и исследование технологии точной штамповки деталей из алюминиевых сплавов на основе компьютерного моделирования // *Матер. Третьей науч.-технич. конф. «Металлофизика, механика материалов, наноструктуры и процессы деформирования. Металлдеформ–2009»*. Самара: СГАУ, 2009. Т. 2. С. 174–183.
10. Гринберг И.В., Петров П.А., Гневашев Д.А., Воронков В.И. Физическое и математическое моделирование процесса изготовления тонкостенных оболочек в штампе для выдавливания // *Технология легких сплавов*. 2010. №2. С. 101–106.
11. Петров П.А. Моделирование процессов изотермической штамповки алюминиевых и магниевых сплавов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2011. №12. С. 29–35.
12. Орлов М.Р. Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИАМ» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 387–393.
13. Потапенко К.Е., Пеньков И.В., Воронков В.И., Петров П.А. Исследование контактного трения при горячей пластической деформации сплава АМг6 // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2012. №2. С. 16–19.
14. Потапенко К.Е., Пеньков И.В., Воронков В.И., Петров П.А., Шайхулов М.В. Исследование контактного трения при горячей пластической деформации сплава АВ // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. №6. С. 18–21.
15. Александров И.В., Чембарисова Р.Г., Латыпов М.И. Аналитическое моделирование напряжения течения сплава АL1570, подвергнутого интенсивной пластической деформации // *Вестник УГАТУ*. 2012. №3 (48). С. 120–123.
16. Петров П.А., Перфилов В.И. Исследование упрочнения алюминиевого сплава АМг6 на начальном участке кривой текучести при повышенных температурах // *Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии: сб. тр. 2-й Всерос. науч.-практич. конф. Новокузнецк, 2006*. С. 205–207.